

# Die Hydrologie der Kander – gestern, heute, morgen

## Analyse und Modellierung der Hochwasser und ihrer raum-zeitlichen Dynamik

Inauguraldissertation  
der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Universität Bern

vorgelegt von

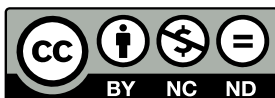
**Bernhard Wehren**

von Hasliberg (BE)

Leiter der Arbeit:

Prof. Dr. R. Weingartner

Geographisches Institut der Universität Bern



Originaldokument gespeichert auf dem Webserver der Universitätsbibliothek Bern. Dieses Werk ist unter einem Creative Commons «Namensnennung - Keine kommerzielle Nutzung - Keine Bearbeitung» 2.5 Schweiz - Lizenzvertrag lizenziert. Um die Lizenz anzusehen, gehen Sie bitte zu <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ch/> oder schicken Sie einen Brief an: Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, California 94105, USA.

## Urheberrechtlicher Hinweis

Dieses Dokument steht unter einer Lizenz der Creative Commons «Namensnennung - Keine kommerzielle Nutzung - Keine Bearbeitung» 2.5 Schweiz (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ch/>).

### Sie dürfen:



Dieses Werk vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen.

### Zu den folgenden Bedingungen:



**Namensnennung:** Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen (wodurch aber nicht der Eindruck entstehen darf, Sie oder die Nutzung des Werkes durch Sie würden entlohnt).



**Keine kommerzielle Nutzung:** Dieses Werk darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden.



**Keine Bearbeitung:** Dieses Werk darf nicht bearbeitet oder in anderer Weise verändert werden.

Im Falle einer Verbreitung müssen Sie anderen die Lizenzbedingungen, unter welche dieses Werk fällt, mitteilen. Jede der vorgenannten Bedingungen kann aufgehoben werden, sofern Sie die Einwilligung des Rechteinhabers dazu erhalten. Diese Lizenz lässt die Urheberpersönlichkeitsrechte nach Schweizer Recht unberührt. Eine ausführliche Fassung des Lizenzvertrags befindet sich unter <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ch/legalcode.de>

# Die Hydrologie der Kander – gestern, heute, morgen

## Analyse und Modellierung der Hochwasser und ihrer raum-zeitlichen Dynamik

Inauguraldissertation  
der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Universität Bern

vorgelegt von  
**Bernhard Wehren**  
von Hasliberg (BE)

Leiter der Arbeit:  
Prof. Dr. R. Weingartner  
Geographisches Institut der Universität Bern

Von der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät angenommen.

Bern, 13. Oktober 2010

Der Dekan:  
Prof. Dr. S. Decurtins



# Vorwort

*„The green nook which I have been describing is called the Gasternthal. The glacier streams gather and flow through it in a broad and rushing brook to a narrow cleft between lofty precipices; here the rushing brook becomes a mad torrent and goes booming and thundering down towards Kandersteg, lashing and thrashing its way over and among monster boulders, and hurling chance roots and logs about like straws. [...] The cows wear church-bells, and that is good idea in the cows, for where that torrent is you couldn't hear an ordinary cow-bell any further than you could hear the ticking of a watch.”*

*Mark Twain (1880)*

Dieser Eintrag im Reisetagebuch von Mark Twain macht deutlich, wie eindrücklich die Hydrologie der Kander sein kann. Auch auf der hydrologischen Entdeckungsreise, auf welcher ich in den letzten vier Jahren im Rahmen des Projekts Kander.2050 unterwegs war, konnte ich diese Erfahrung immer wieder von Neuem machen.

Mit der Ausarbeitung der vorliegenden Arbeit erhielt ich die Gelegenheit, in einem spannenden und innovativen Projekt mitzuarbeiten und die Hydrologie eines typischen alpinen Einzugsgebietes in allen Facetten kennenzulernen. Gleichzeitig war die Zusammenarbeit im interdisziplinären Team sowie die enge Verknüpfung von Wissenschaft und Praxis sowohl stetige Bereicherung als auch Herausforderung.

Zahlreiche Beteiligte haben in verschiedenster Form zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen. Für die wertvolle Unterstützung und die Hilfestellung bei auftretenden Schwierigkeiten möchte ich folgenden Personen meinen Dank aussprechen:

- > Prof. Dr. Rolf Weingartner für die Leitung der Arbeit, die stetige Unterstützung und die vielen wertvollen Impulse.
- > Willy Müller und Ernst Spycher für die Initiierung und Leitung des Projekts Kander.2050 sowie dem ganzen Projektteam für den regen Austausch und die gute Zusammenarbeit.
- > Dr. Robert Kirnbauer für die konstruktiven fachlichen Hinweise im Rahmen des Koreferats.
- > Jan Schwanbeck, Dr. Daniel Viviroli und Dr. Massimiliano Zappa für die Hilfsbereitschaft und die vielen Diskussionen bei allen Fragen rund um «R» sowie um das Modellsystem PREVAH.
- > Dr. Dimitrios Gyalistras für alle Beiträge und Anregungen im Bereich Klimaänderung sowie für die Bereitstellung des Wettergenerators.

- > Dr. Thomas Konzelmann, Dr. Claudia Mühlhäuser, Frank Lumpert (MeteoSchweiz); Andreas Walther (BKW FMB Energie AG); Daniel Streit, Edith Oosenbrug (BAFU); Jean-Claude Bader und Hansjürg Bolliger (AWA) für die zahlreichen Datenlieferungen sowie für den Zugang zu den Datenarchiven.
- > Daniel Scheidegger, Tensing Gammeter, Timon Stucki, Stefan Zraggen, Dominic Bütschi, Ruth Schuler, Stefan Schnydrig, Rolf Rüfenacht für die Beiträge im Rahmen ihrer Seminar-, Diplom- und Masterarbeiten, für den regen Austausch und die gute Zusammenarbeit.
- > Ein spezieller Dank geht an meine Familie, meine Frau Simone und unseren Sohn Lars für die stetige moralische Unterstützung und die Geduld.

Muri b. Bern, im September 2010

Bernhard Wehren

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	i
Inhaltsverzeichnis.....	iii
Abbildungsverzeichnis.....	vii
Tabellenverzeichnis.....	xi
Zusammenfassung.....	xiii
Teil I: Grundlagen.....	1
1 Einleitung.....	3
1.1 Die Kander – ein Fluss und seine Geschichte.....	3
1.2 Das Projekt «Kander.2050».....	7
1.3 Problem- und Fragestellung.....	8
1.4 Zielsetzung.....	9
1.5 Stand der Forschung.....	10
1.6 Arbeitsschritte.....	16
1.7 Aufbau der Arbeit.....	18
2 Untersuchungsgebiet.....	21
2.1 Allgemeine Beschreibung.....	21
2.2 Hydrologische Gliederung.....	23
2.3 Geologie.....	25
2.4 Pedologie.....	27
2.5 Landnutzung.....	31
2.6 Hydrologisch relevante Gebietskennwerte.....	33
2.7 Fazit.....	35
3 Daten.....	37
3.1 Meteorologische Daten.....	37
3.2 Hydrologische Daten.....	46
3.3 Fazit.....	49
4 Klima und Hydrologie.....	51
4.1 Niederschlag und Temperatur.....	51
4.2 Verdunstung.....	52
4.3 Abfluss.....	53
4.4 Wasserhaushalt.....	55
4.5 Starkniederschläge.....	56
4.6 Hochwasserabflüsse.....	59
5 Methoden der Hochwasserabschätzung.....	67
5.1 Übersicht über bestehende Methoden.....	67
5.2 Extremwertstatistik.....	68
5.3 Niederschlag-Abfluss-Modelle.....	70
5.4 Regionale Übertragung.....	71
5.5 Verwendete Methoden.....	72

6	Modellsystem PREVAH .....	75
6.1	Grundlagen des Modellsystems .....	75
6.2	Kalibrierung .....	84
6.3	Regionalisierung der Modellparameter.....	93
6.4	Vorgehen.....	94
6.5	Beispiele zur Kalibrierung und Regionalisierung .....	95
6.6	Fazit.....	99
	Teil II: Die Hydrologie der Kander – gestern .....	101
7	Historische Hochwasser der Kander.....	103
7.1	Ausgangslage .....	103
7.2	Methode.....	103
7.3	Resultate.....	105
7.4	Fazit.....	108
8	Entwicklung klimatischer Verhältnisse .....	109
8.1	Ausgangslage .....	109
8.2	Daten.....	109
8.3	Untersuchte klimatische Parameter .....	111
8.4	Methoden .....	112
8.5	Entwicklung der Niederschläge im Berner Oberland seit 1901 .....	113
8.6	Entwicklung der Niederschläge im Einzugsgebiet Kander-Hondrich seit 1901 .....	114
8.7	Entwicklung der extremen Starkniederschläge im Einzugsgebiet Kander-Hondrich seit 1901 .....	117
8.8	Entwicklung der Temperatur im Berner Oberland seit 1901 .....	120
8.9	Fazit.....	121
9	Entwicklung der Abflussverhältnisse .....	123
9.1	Daten.....	123
9.2	Untersuchte hydrologische Parameter .....	123
9.3	Methoden .....	124
9.4	Entwicklung der Abflussverhältnisse .....	124
9.5	Entwicklung der seltenen Hochwasserabflüsse .....	127
9.6	Fazit.....	129
10	Vergleich der Entwicklung von Niederschlag und Abfluss .....	131
10.1	Vergleich der Trends von ausgewählten Parametern .....	131
10.2	Entwicklung von Starkniederschlägen und Hochwassern.....	133
10.3	Fazit.....	134
11	Modellierung von langen Abflussreihen .....	135
11.1	Vorgehen.....	135
11.2	Daten.....	137
11.3	Kalibrierung der hydrologischen Modelle .....	139
11.4	Validierung der hydrologischen Modelle .....	139
11.5	Beurteilung der Modellgüte für die Langzeitsimulationen.....	140
11.6	Resultate.....	145
11.7	Fazit.....	150
12	Schlussfolgerungen zu Teil II .....	153



Teil III: Die Hydrologie der Kander – heute.....	151
13 Hochwasserabschätzung für die mesoskaligen Teileinzugsgebiete.....	157
13.1 Ausgangslage.....	157
13.2 Vorgehen.....	158
13.3 Räumliches Muster der Hochwasserverhältnisse.....	161
13.4 Entwicklung der Hochwasser entlang der Kander.....	166
14 Hochwasserabschätzung für 99 kleine Teileinzugsgebiete.....	169
14.1 Ausgangslage.....	169
14.2 Datengrundlagen und Hochwasserabschätzmethoden.....	170
14.3 Untersuchte Einzugsgebiete und verwendete Methoden.....	176
14.4 Resultate der einzelnen Methoden.....	178
14.5 Synthesekarte.....	179
14.6 Methodenvergleich.....	183
14.7 Fazit.....	188
15 Flächendeckende Modellierung der Abflussprozesse.....	193
15.1 Ausgangslage.....	193
15.2 Verwendete Methode.....	194
15.3 Datengrundlagen und hochaufgelöste Abflussprozesskarte.....	196
15.4 Generalisierung der Abflussprozesse.....	198
15.5 Kombination von Wasserspeichervermögen und Fließweg.....	201
15.6 Resultate.....	203
15.7 Fazit.....	205
16 Schlussfolgerungen zu Teil III.....	207
Teil IV: Die Hydrologie der Kander – morgen.....	211
17 Szenarien der Klimaänderung.....	213
17.1 Stand des Wissens zur Klimaänderung.....	213
17.2 Prinzip zur hydrologischen Modellierung mit Klimaszenarien.....	217
18 Entwicklung und Anwendung der Modellkaskade.....	221
18.1 Methoden der Regionalisierung von Klimaszenarien.....	221
18.2 Wettergenerator.....	222
18.3 Hydrologische Modellierung mit PREVAH.....	224
18.4 Verwendete meteorologische Stationen.....	226
18.5 Modellkaskade.....	227
18.6 Verwendete Ansätze zur Modellierung der Klimaänderung.....	230
18.7 Fazit.....	233
19 Validierung der Modellkaskade.....	235
19.1 Grundlagen der Modellvalidierung.....	235
19.2 Modellvalidierung mit Gütemassen.....	237
19.3 Modellvalidierung mit Q-Q-Plots.....	246
19.4 Modellvalidierung mit direktem optischem Vergleich.....	250
19.5 Fazit.....	254

20	Sensitivitätsanalysen.....	255
20.1	Methode und Darstellung.....	255
20.2	Resultate.....	258
20.3	Fazit.....	288
21	Auswirkungen ausgewählter Klimaszenarien auf die Hydrologie der Kander .....	293
21.1	Klimaszenarien für die hydrologische Modellierung.....	293
21.2	Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und die Abflussverhältnisse .....	296
21.3	Auswirkungen auf die Hochwasserverhältnisse .....	309
21.4	Fazit.....	319
22	Schlussfolgerungen zu Teil IV .....	321
22.1	Vergleich der Sensitivitätsanalysen und der Modellierung mit ausgewählten Klimaszenarien.....	321
22.2	Vergleich zu bestehenden Untersuchungen .....	322
22.3	Methodisches Fazit.....	323

**Teil V: Synthese .....** **325**

23	Diskussion und Schlussfolgerungen.....	327
23.1	Schlüsselgrößen und Schlüsselräume .....	327
23.2	Bedeutung für die Praxis.....	329
23.3	Zeitliche und räumliche Übertragung der Ergebnisse .....	335
24	Ausblick .....	339
24.1	Historische Hochwasser .....	339
24.2	Hochwasserabschätzung mit unterschiedlichen Ansätzen.....	340
24.3	Hydrologische Modellierung mit PREVAH.....	341
24.4	Untersuchung der Klimaänderung .....	342

**Quellenverzeichnis.....** **345**

**Anhang.....** **369**

Anhang A:	Übersichtskarte, Topographie und Impressionen aus dem Einzugsgebiet.....	A-1
Anhang B:	Gebietskennwerte aller Teileinzugsgebiete .....	B-1
Anhang C:	Hochwasserabschätzungen für alle Teileinzugsgebiete .....	C-1
Anhang D:	Ergänzende Gütemasse zur Validierung und Sensitivitätsflächen weiterer Parameter .....	D-1
Anhang E:	Untersuchungen zur Hochwasserhydrologie der Engstlige-Frutigen.....	E-1

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Umleitung der Kander in den Jahren 1711-1714.....	3
Abb. 1.2	Auswirkungen der Korrektionsarbeiten an der Kander .....	4
Abb. 1.3	Verbauungsarbeiten an der Kander und deren Seitenbäche (1899 bis 1912) .....	5
Abb. 1.4	Auswirkungen der Sohlenerosion auf die Uferverbauungen .....	6
Abb. 1.5	Faktoren in Abhängigkeit der Höhenlage, welche die Hochwasserdisposition der Einzugsgebiete beeinflussen .....	12
Abb. 1.6	Struktur und Arbeitsschritte der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen.....	17
Abb. 2.1	Lage des untersuchten Einzugsgebietes Kander-Hondrich im Berner Oberland.....	21
Abb. 2.2	Hypsographische Kurve und Flussprofil der Kander .....	22
Abb. 2.3	Unterteilung des untersuchten Einzugsgebietes in elf mesoskalige Teileinzugsgebiete .....	23
Abb. 2.4	Bilanzierungsgebiete und Basisgebiete im Einzugsgebiet der Kander .....	25
Abb. 2.5	Lithologische Karte für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich .....	26
Abb. 2.6	Bodeneignungskarte für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich .....	28
Abb. 2.7	Flächenanteile der bodenbedeckten Flächen an den verschiedenen Parameterkombinationen von Wasserdurchlässigkeit und Wasserspeichervermögen .....	29
Abb. 2.8	Räumliche Verteilung des Wasserspeichervermögens und der Wasserdurchlässigkeit der bodenbedeckten Flächen.....	30
Abb. 2.9	Landnutzung für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich .....	31
Abb. 2.10	Anteile der Landnutzung im Einzugsgebiet Kander-Hondrich .....	32
Abb. 2.11	Vergletscherte Fläche bzw. ausgewählte Gletscher im Einzugsgebiet der Kander .....	33
Abb. 2.12	Ausgewählte Gebietskennwerte der Basiseinzugsgebiete im Einzugsgebiet der Kander-Hondrich und Einordnung in den gesamtschweizerischen Kontext.....	35
Abb. 3.1	Klimaregionen der Schweiz und Lage des Einzugsgebietes Kander-Hondrich .....	38
Abb. 3.2	Übersicht über die im Berner Oberland und den angrenzenden Gebieten verfügbaren Klimastationen aus den Messnetzen der MeteoSchweiz.....	39
Abb. 3.3	Datenverfügbarkeit für den Parameter Niederschlag .....	40
Abb. 3.4	Datenverfügbarkeit für den Parameter Temperatur .....	41
Abb. 3.5	Höhenverteilung der Niederschlags- und der Temperaturmessstationen.....	44
Abb. 3.6	Anteil der fehlenden Messwerte in den Messreihen der digitalen Niederschlagsdaten.....	45
Abb. 3.7	Räumliche Verteilung der Abflussmessstationen im Einzugsgebiet der Kander .....	46
Abb. 3.8	Verfügbarkeit der Abflussmessdaten im Einzugsgebiet der Kander .....	47
Abb. 4.1	Mittlere monatliche Niederschlagssummen und Temperaturen im Berner Oberland .....	52
Abb. 4.2	Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhen im Berner Oberland .....	53
Abb. 4.3	Mittlere monatliche Abflüsse des Gesamteinzugsgebietes sowie der Teileinzugsgebiete.....	53
Abb. 4.4	Einordnung der mittleren jährlichen Werte der Wasserhaushaltsgrössen im Einzugsgebiet Kander-Hondrich im gesamtschweizerischen Vergleich .....	56
Abb. 4.5	Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer .....	57
Abb. 4.6	Eintretenszeitpunkt der jährlichen Starkniederschlagsmaxima 1- und 3-tägiger Dauer für die Stationen Kiental und Kandersteg.....	58

Abb. 4.7	Abflussganglinien der Kander-Hondrich, Kander-Frutigen und Engstlige-Frutigen im Hochwasserfall.....	60
Abb. 4.8	Abflussbeitrag der Teileinzugsgebiete zum Hochwasserabfluss der Kander-Hondrich.....	62
Abb. 4.9	Prozentuale Häufigkeit des Eintretenszeitpunktes sowie Abflussmenge der jährlichen Abflussspitzen und der grössten jährlichen Tagesmittelwerte .....	64
Abb. 5.1	Übersicht über Hochwasserabschätzverfahren .....	68
Abb. 5.2	Übersicht über die Wahl der Hochwasserabschätzmethoden.....	73
Abb. 6.1	Schema der Modellstruktur von PREVAH .....	79
Abb. 6.2	Iteratives Vorgehen bei der automatischen Kalibrierung mit PREVAH .....	88
Abb. 6.3	Bereitstellung der Abflussganglinie bei der Regionalisierung .....	94
Abb. 6.4	Beurteilung der kalibrierten und regionalisierten hydrologischen Modelle: Beispiel Kander-Frutigen .....	96
Abb. 6.5	Beurteilung der kalibrierten und regionalisierten hydrologischen Modelle: Beispiel Allenbach-Adelboden .....	98
Abb. 7.1	Kombinationsmatrix zur Bestimmung der Schadensklasse eines Ereignisses .....	104
Abb. 7.2	Hochwasser- bzw. Schadenschronik für verschiedene Einzugsgebiete der Schweiz und für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich .....	106
Abb. 7.3	Lange Messreihen der Jahreshochwasser für grosse Einzugsgebiete im Berner Oberland .....	107
Abb. 8.1	Untersuchte Niederschlagsdaten und verfügbare meteorologische Messstationen .....	110
Abb. 8.2	Entwicklung der Starkniederschläge unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperiode für die Station Frutigen .....	118
Abb. 9.1	Entwicklung der extremen Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Wiederkehrperiode für die Stationen Kander-Hondrich und Kander-Kandersteg.....	128
Abb. 11.1	Meteorologische Messstationen, deren Daten für die Modellierung der langen Abflussreihen verwendet wurden.....	138
Abb. 11.2	Beurteilung der hydrologischen Modellierungen mit langen meteorologischen Reihen anhand von Gütemassen .....	141
Abb. 11.3	Beurteilung der hydrologischen Modellierungen mit langen meteorologischen Reihen anhand des direkten Vergleichs von modellierten und beobachteten Daten.....	143
Abb. 11.4	Beurteilung der modellierten hydrologischen Reihen anhand extremwertstatistischer Auswertungen der Jahreshochwasser .....	144
Abb. 11.5	Gegenüberstellung der modellierten Jahreshochwasser .....	146
Abb. 11.6	Extremwertstatistische Auswertung der modellierten Jahreshochwasser.....	148
Abb. 11.7	Entwicklung der Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit.....	149
Abb. 13.1	Beispiel Kander-Frutigen: Extremwertstatistische Hochwasserabschätzung anhand modellierter Daten .....	160
Abb. 13.2	Extremwertstatistische Hochwasserabschätzungen unterschiedlicher Wiederkehrperiode aus modellierten Abflussdaten.....	162
Abb. 13.3	Abschätzung der 100-jährlichen Hochwasserabflussspende mit HQx_meso_CH und mit extremwertstatistischer Auswertung von modellierten Daten sowie prozentuale Abweichungen zwischen den beiden Abschätzungen.....	163
Abb. 13.4	Extremwertstatistische Hochwasserabschätzungen aus beobachteten und modellierten Abflussdaten sowie Hochwasserabschätzung mit HQx_meso_CH.....	164
Abb. 13.5	Entwicklung der Hochwasserabflüsse und der Hochwasserabflussspenden entlang des Flusslaufes der Kander von Kander-Gasteretal bis Kander-Hondrich.....	166
Abb. 14.1	Validierungsschema für die Methode Schaffner .....	173
Abb. 14.2	Validierung der mit der Methode Schaffner berechneten 100-jährlichen Hochwasserabflussspenden.....	174
Abb. 14.3	Lage der untersuchten kleinen Teileinzugsgebiete und Anzahl verfügbarer Abschätzungen mit verschiedenen Methoden .....	176

Abb. 14.4	Abschätzung der 100-jährlichen Hochwasserabflussspende mit unterschiedlichen Methoden .....	178
Abb. 14.5	Schema zur Bereitstellung der Synthesekarte .....	180
Abb. 14.6	Vergleich der 100-jährlichen Hochwasserabflussspende: Abschätzung mit der Methode Schaffner und Angabe aus den Technischen Berichten .....	180
Abb. 14.7	Verwendete Methoden(-kombinationen) zur Herleitung der Synthesekarte.....	181
Abb. 14.8	Synthesekarte der abgeschätzten 100-jährlichen Hochwasserabflussspenden .....	182
Abb. 14.9	Prozentuale Abweichungen zwischen den Abschätzungen der 100-jährlichen Hochwasserabflussspende aus verschiedenen Methoden und der definitiven Abschätzung in der Synthesekarte .....	185
Abb. 14.10	Hochwasserabflussspenden für die Teileinzugsgebiete < 10 km <sup>2</sup> .....	187
Abb. 14.11	Hochwasserabflussspenden für die Teileinzugsgebiete > 10 km <sup>2</sup> .....	187
Abb. 15.1	Modellierte dominierende Abflussprozesse für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich.....	197
Abb. 15.2	Abflussreaktion bzw. inhaltlich und räumlich generalisierte Abflussprozesse.....	199
Abb. 15.3	Mittleres Wasserspeichervermögen und mittlere Länge des Fließweges der kleinen Teileinzugsgebiete im Einzugsgebiet Kander-Hondrich.....	200
Abb. 15.4	Schematische Darstellung: Berechnung des mittleren gewichteten Speichervermögens.....	202
Abb. 15.5	Schematische Darstellung: Berechnung des mittleren aufsummierten Wasserspeichervermögens.....	203
Abb. 15.6	Standardisierte Kennwerte zur Beurteilung der Abflussbereitschaft im Hochwasserfall für die kleinen Teileinzugsgebiete im Einzugsgebiet Kander-Hondrich .....	204
Abb. 16.1	Vergleich der hochwasserhydrologischen Verhältnisse auf unterschiedlichen räumlichen Skalen .....	208
Abb. 17.1	Erwartete Änderung der mittleren Sommer- und Wintertemperatur sowie der entsprechenden jahreszeitlichen Niederschlagsmenge in Europa für die Jahre 2080-2099 .....	213
Abb. 17.2	Erwartete Änderung der mittleren saisonalen Temperatur und relative Änderung der mittleren saisonalen Niederschlagssumme auf der Alpennordseite der Schweiz für die Jahre 2030, 2050 und 2070 .....	215
Abb. 17.3	Methodisches Prinzip zur hydrologischen Modellierung mit Klimaszenarien .....	218
Abb. 18.1	Verwendete meteorologische Stationen für die Modellierung mit der Modellkaskade.....	226
Abb. 18.2:	Schematischer Aufbau der gesamten Modellkaskade .....	227
Abb. 18.3	Veränderte Einflussgrößen der Modellkaskade zur Herleitung der besten Modellversion .....	229
Abb. 18.4	Bereiche der Temperatur- und Niederschlagsänderung der Sensitivitätsanalysen .....	231
Abb. 18.5	Beispiel für eine Kombination von ausgewählten, saisonal differenzierten Klimaszenarien.....	232
Abb. 19.1	Q-Q-Plots für vier Modellversionen .....	248
Abb. 19.2	Vergleich von modellierten und beobachteten Jahreshochwassern .....	251
Abb. 19.3	Vergleich von modelliertem und beobachtetem mittleren jährlichen Abfluss.....	252
Abb. 20.1	Aufbau, wesentliche Elemente und Interpretationsmöglichkeiten der Sensitivitätsflächen .....	256
Abb. 20.2	Sensitivitätsanalyse für das Abflussregime mit Vergletscherung .....	258
Abb. 20.3	Sensitivitätsanalyse für das Abflussregime ohne Vergletscherung .....	259
Abb. 20.4	Sensitivitätsanalyse der mittleren jährlichen Abflusshöhe mit Vergletscherung .....	262
Abb. 20.5	Sensitivitätsanalyse der mittleren jährlichen Abflusshöhe ohne Vergletscherung .....	262
Abb. 20.6	Sensitivitätsanalyse der Variabilität der täglichen Abflusshöhen mit Vergletscherung .....	264
Abb. 20.7	Sensitivitätsanalyse der Variabilität der täglichen Abflusshöhen ohne Vergletscherung.....	264
Abb. 20.8	Sensitivitätsanalyse der mittleren saisonalen Abflussmenge im Winter mit Vergletscherung .....	266
Abb. 20.9	Sensitivitätsanalyse der mittleren saisonalen Abflussmenge im Winter ohne Vergletscherung.....	266
Abb. 20.10	Sensitivitätsanalyse der mittleren saisonalen Abflussmenge im Sommer mit Vergletscherung .....	267
Abb. 20.11	Sensitivitätsanalyse der mittleren saisonalen Abflussmenge im Sommer ohne Vergletscherung .....	267
Abb. 20.12	Sensitivitätsanalyse ausgewählter Wasserhaushaltskomponenten mit Vergletscherung .....	269

Abb. 20.13	Sensitivitätsanalyse ausgewählter Wasserhaushaltskomponenten ohne Vergletscherung .....	269
Abb. 20.14	Auswirkung der Parameter der Allgemeinen Extremwertverteilung (AEV) .....	270
Abb. 20.15	Sensitivitätsanalyse der 100-jährlichen Hochwasserabflüsse mit Vergletscherung.....	272
Abb. 20.16	Sensitivitätsanalyse der 100-jährlichen Hochwasserabflüsse ohne Vergletscherung.....	272
Abb. 20.17	Sensitivitätsanalyse des Skalierungsparameters Alpha mit Vergletscherung.....	274
Abb. 20.18	Sensitivitätsanalyse des Skalierungsparameters Alpha ohne Vergletscherung.....	274
Abb. 20.19	Sensitivitätsanalyse des Lageparameters Chi mit Vergletscherung.....	275
Abb. 20.20	Sensitivitätsanalyse des Lageparameters Chi ohne Vergletscherung.....	275
Abb. 20.21	Burn-Kreise für die Eintretenstage der Jahreshochwasser mit Vergletscherung .....	278
Abb. 20.22	Burn-Kreise für die Eintretenstage der Jahreshochwasser ohne Vergletscherung.....	279
Abb. 20.23	Sensitivitätsanalyse des mittleren Tages der Jahreshochwasser mit Vergletscherung .....	281
Abb. 20.24	Sensitivitätsanalyse des mittleren Tages der Jahreshochwasser ohne Vergletscherung.....	281
Abb. 20.25	Sensitivitätsanalyse der zeitlichen Streuung der Eintretenstage der Jahreshochwasser mit Vergletscherung.....	282
Abb. 20.26	Sensitivitätsanalyse der zeitlichen Streuung der Eintretenstage der Jahreshochwasser ohne Vergletscherung.....	282
Abb. 20.27	Burn-Kreise für die Eintretenstage des kleinsten Abflussmittelwerts über sieben Tage mit Vergletscherung.....	284
Abb. 20.28	Burn-Kreise für die Eintretenstage des kleinsten Abflussmittelwerts über sieben Tage ohne Vergletscherung.....	285
Abb. 20.29	Sensitivitätsanalyse des mittleren NM7Q mit Vergletscherung .....	287
Abb. 20.30	Sensitivitätsanalyse des mittleren NM7Q ohne Vergletscherung .....	287
Abb. 20.31	Reaktionstypen der hydrologischen Kenngrößen auf systematische Veränderungen von Temperatur und Niederschlag.....	288
Abb. 21.1	Erwartete Veränderungen bei Temperatur und Niederschlag für das Jahr 2050 .....	294
Abb. 21.2	Schematische Darstellung zur Bereitstellung eines ausgewählten bzw. realistischen Klimaszenarios .....	294
Abb. 21.3	Auswirkungen der Klimaänderung auf den Abfluss und die Verdunstung .....	297
Abb. 21.4	Einfluss der Modellversion auf die modellierten Werte von Abfluss und Verdunstung.....	300
Abb. 21.5	Einfluss von erhöhter Sommertemperatur und unterschiedlicher Vergletscherung auf die modellierten Werte von Abfluss und Verdunstung.....	301
Abb. 21.6	Auswirkung der Klimaänderung auf das Abflussregime der Kander-Hondrich .....	303
Abb. 21.7	Mittlere Auswirkungen der Klimaänderung auf die mittleren monatlichen Abflüsse.....	305
Abb. 21.8	Extremwertanalyse der 1000 grössten jährlichen Hochwasserabflüsse unter dem Einfluss der Klimaänderung mit Vergletscherung.....	311
Abb. 21.9	Extremwertanalyse der 1000 grössten jährlichen Hochwasserabflüsse unter dem Einfluss der Klimaänderung ohne Vergletscherung.....	312
Abb. 23.1	Hochwasserabschätzung für das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich mit unterschiedlichen Datengrundlagen .....	330
Abb. 23.2	Schema zur Berücksichtigung des Unsicherheitsbereichs bei den hochwasserhydrologischen Bemessungsgrößen .....	333
Abb. 23.3	Anwendung der in der Arbeit erstellten Hochwasserabschätzungen für das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich sowie für die Teileinzugsgebiete unterschiedlicher Größenordnung.....	335
Abb. 23.4	Zusammenhang der Eintretenszeitpunkte der Abflussmengen von monatlich maximalen Tages- und Stundenmittelwerten .....	336
Abb. 23.5	Andrews-Kurven zur Beurteilung der Ähnlichkeit der mesoskaligen, nordalpinen Einzugsgebiete der Schweiz .....	337

# Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Permeabilitätsklassen gemäss Geotechnischer Karte.....	27
Tab. 2.2	Hydrologische Kenngrössen der Bilanzierungsgebiete im Einzugsgebiet Kander-Hondrich.....	34
Tab. 4.1	Mittlere jährliche Abflüsse bzw. mittlere jährliche Abflussspenden.....	54
Tab. 4.2	Mittlerer jährlicher Wasserhaushalt der Bilanzierungsgebiete.....	55
Tab. 4.3	Hochwasserkenngrossen für das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich.....	60
Tab. 5.1	Zuverlässigkeit der statistischen Aussage in Abhängigkeit der Beobachtungsdauer.....	69
Tab. 5.2	Anwendung verschiedener Methoden zur Hochwasserabschätzung.....	73
Tab. 6.1	Gebietskennwerte und Datenquellen zur Bestimmung der Hydrotupe.....	76
Tab. 6.2	Modellantrieb für das hydrologische Modellsystem PREVAH.....	77
Tab. 6.3	Teilmodule von PREVAH und methodische Grundlagen.....	79
Tab. 6.4	Modellausgabe von PREVAH.....	84
Tab. 6.5	Modellparameter und deren kalibrierbarer Parameterbereich.....	88
Tab. 6.6	Kalibrierte Parameterpaare.....	89
Tab. 7.1	Beurteilung des Schadensausmasses.....	104
Tab. 8.1	Entwicklung der klimatischen Verhältnisse im Berner Oberland.....	113
Tab. 8.2	Relative Trends ausgewählter Niederschlagsparameter im Untersuchungsgebiet.....	115
Tab. 8.3	Extremwertstatistische Auswertung der jährlichen maximalen Ein- und Mehrtagesummen der Stationen Frutigen und Kiental.....	120
Tab. 8.4	Entwicklung der mittleren saisonalen Temperatur in der Region des Berner Oberlandes.....	121
Tab. 9.1	Entwicklung der hydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet der Kander.....	125
Tab. 9.2	Extremwertstatistische Auswertung der Jahreshochwasser der Kander-Hondrich und der Kander-Kandersteg.....	129
Tab. 10.1	Vergleich der Trends von ausgewählten Parametern zu Niederschlag, Temperatur und Abfluss für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich in den letzten 100 Jahren.....	132
Tab. 10.2	Erläuterung der Abkürzungen der in Tab. 10.1 verwendeten Parameter.....	132
Tab. 11.1	Verwendete Stationen für die hydrologische Modellierung mit langen meteorologischen Reihen.....	138
Tab. 11.2	Berechnete Gütemasse zur Validierung der Modelle, welche für die Langzeitsimulationen eingesetzt wurden.....	139
Tab. 11.3	Zusammenhang zwischen den langen Zeitreihen der modellierten Jahreshochwasser.....	147
Tab. 11.4	Hochwasserstatistische Kennwerte der modellierten langen Abflussreihen.....	148
Tab. 11.5	Auswirkungen der ausgewerteten Periode auf die Hochwasserabschätzung.....	150
Tab. 13.1	Extremwertstatistische Hochwasserabschätzung modellierter Abflussdaten.....	160
Tab. 13.2	Hochwasserabschätzungen für das Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen mit HQx_meso_CH.....	161
Tab. 13.3	Übersicht über die Hochwasserabschätzungen für die Teileinzugsgebiete der Kander.....	167
Tab. 14.1	Anzahl der Teileinzugsgebiete, für welche mit verschiedenen Methodenkombinationen Hochwasserabschätzungen durchgeführt wurden.....	177
Tab. 14.2	Korrelationsmatrix für die Hochwasserabschätzungen aus verschiedenen Methoden.....	184
Tab. 15.1	Übersicht über die verschiedenen Abflussprozesse, welche anhand der Prozessbeurteilungsschemata unterschieden werden können.....	195
Tab. 15.2	Verwendete Grundlagendaten zur Modellierung der Abflussprozesse.....	196

Tab. 15.3	Inhaltliche Generalisierung der Abflussprozesse zu Abflusstypen .....	199
Tab. 17.1	Erwartete Änderungen der mittleren saisonalen und jährlichen Temperatur und der Niederschlagssumme auf der Alpennordseite der Schweiz im Jahr 2050 .....	215
Tab. 18.1	Monatliche Variabilität des empirischen Faktors zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration.....	225
Tab. 18.2	Verwendete meteorologische Stationen für die Modellierung mit der Modellkaskade .....	226
Tab. 19.1	Übersicht über die Tabellen, welche die Resultate der Modellvalidierung enthalten .....	242
Tab. 19.2	Validierung der Versionen des hydrologischen Modells (1981-1999, HQm) .....	244
Tab. 19.3	Validierung der Versionen der Modellkaskade (1981-1999, HQm) .....	244
Tab. 19.4	Validierung der Versionen des hydrologischen Modells (1981-1999, MQm) .....	244
Tab. 19.5	Validierung der Versionen der Modellkaskade (1981-1999, MQm).....	244
Tab. 19.6	Validierung der Versionen des hydrologischen Modells (1933-2005, HQm) .....	245
Tab. 19.7	Validierung der Versionen der Modellkaskade (1933-2005, HQm) .....	245
Tab. 19.8	Validierung der Versionen des hydrologischen Modells (1933-2005, MQm) .....	245
Tab. 19.9	Validierung der Versionen der Modellkaskade (1933-2005, MQm).....	245
Tab. 20.1	Zusammenfassende Darstellung der Reaktionstypen hydrologischer Kenngrößen gegenüber systematischen Temperatur- und Niederschlagsänderungen.....	289
Tab. 21.1	Saisonale Änderungsbeträge für Temperatur und Niederschlag für die Klimaszenarien .....	295
Tab. 21.2	Auswirkungen der Klimaänderung auf die saisonalen Mittelwerte ausgewählter Komponenten des Wasserhaushalts für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich.....	298
Tab. 21.3	Auswirkung der Klimaänderung auf verschiedene Quantile der täglichen Abflussmittelwerte mit Vergletscherung.....	306
Tab. 21.4	Auswirkung der Klimaänderung auf verschiedene Quantile der täglichen Abflussmittelwerte ohne Vergletscherung .....	307
Tab. 21.5	Übersicht über die verschiedenen Modellierungsvarianten, welche zur Abschätzung der Auswirkungen der Klimaänderung auf die Hochwasserhältnisse verwendet wurden .....	309
Tab. 21.6	Einfluss der Klimaänderung auf die Hochwasserabflüsse mit Vergletscherung .....	311
Tab. 21.7	Einfluss der Klimaänderung auf die Hochwasserabflüsse ohne Vergletscherung .....	312
Tab. 21.8	Prozentuale Veränderungen bei den Hochwasserabflüssen unterschiedlicher Wiederkehrperiode unter dem Einfluss der Klimaänderung .....	313
Tab. 21.9	Einfluss der Klimaänderung auf die Parameter der geschätzten Verteilungsfunktion und die extremen Hochwasserabflüsse mit aktueller Vergletscherung.....	314
Tab. 21.10	Einfluss der Klimaänderung auf die Parameter der geschätzten Verteilungsfunktion und die extremen Hochwasserabflüsse ohne Vergletscherung .....	315
Tab. 21.11	Auswirkung der Klimaänderung auf die morphologisch wirksamen Hochwasserabflüsse mit Vergletscherung.....	317
Tab. 21.12	Auswirkung der Klimaänderung auf die morphologisch wirksamen Hochwasserabflüsse ohne Vergletscherung.....	318



# Zusammenfassung

Die **Kander** – ein alpiner Fluss mittlerer Grösse im Berner Oberland, Schweiz – wurde zu Beginn des 20. Jahrhunderts über weite Strecken begradigt und verbaut, wodurch die im Talboden bestehende Hochwassergefahr fast vollständig gebannt werden konnte. In Folge der vorgenommenen Eingriffe erhöhte sich die Fliessgeschwindigkeit bzw. die Transportkapazität des Flusses, was schliesslich einen unausgeglichene Geschiebehalt bewirkte. Die hervorgerufenen, stellenweise hohen Erosionsraten und die damit verbundene Sohleneintiefung führten in den letzten Jahren verbreitet zur Unterspülung der Verbauungen, wodurch der Hochwasserschutz langfristig gefährdet ist.

Mit dem Ziel in den nächsten Jahrzehnten einen umfassenden und nachhaltigen Hochwasserschutz für die Kander umzusetzen wurde das **Projekt «Kander.2050»** initiiert. Durch die vorliegende Arbeit, welche im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurde, sollen die für die Hydrologie der Kander bestehenden Kenntnislücken insbesondere im Bereich der hochwasserhydrologischen Verhältnisse geschlossen werden. Damit soll zum Verständnis der Kander als **hydrologisches Gesamtsystem** in räumlicher und zeitlicher Differenzierung beigetragen werden. Zudem sollen die beobachteten Veränderungen und die zu erwartenden Entwicklungen für ausgewählte hochwasserhydrologisch relevante Kenngrössen aufgezeigt werden. Daneben werden hydrologische Bemessungsgrundlagen, welche auch für zukünftige wasserbauliche Projekte im Einzugsgebiet gültig sind, bereitgestellt.

Die inhaltlichen Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit umfassen somit die drei folgenden Bereiche:

- > Die Hydrologie der Kander – **gestern**: Analyse und Beurteilung der historischen bzw. aktuellen meteorologischen und hydrologischen Verhältnisse sowie der aufgetretenen Veränderungen im Einzugsgebiet der Kander.
- > Die Hydrologie der Kander – **heute**: Räumlich differenzierte Beurteilung der aktuellen hochwasserhydrologischen Verhältnisse auf Ebene von Teileinzugsgebieten unterschiedlicher räumlicher Skala.
- > Die Hydrologie der Kander – **morgen**: Abschätzung möglicher zukünftiger (hochwasser-) hydrologischer Entwicklungen auf Basis von Klimaszenarien für das Jahr 2050.

Aus den durchgeführten Untersuchungen in diesen drei Bereichen werden die folgenden **Resultate** ersichtlich:

- > **Die Hydrologie der Kander – gestern**: Die in den letzten Jahren an der Kander festgestellten extremen Hochwasserabflüsse stellen sowohl in der Region als auch schweizweit kein aussergewöhnliches Phänomen dar und zeigen eine hohe Übereinstimmung zu den zyklischen Mustern der Hochwasserhäufigkeit. Im Einzugsgebiet ist sowohl für den Winter als auch für den Sommer seit 1900 ein Trend zu grösseren Starkniederschlagssummen sowie eine Zunahme der jährlichen Hochwasserabflüsse zu beobachten. Diese Entwicklung ist sowohl für die Teileinzugsgebiete der Kander als auch für das Berner Oberland und für weite Teile der Schweiz jedoch in unterschiedlicher Ausprägung erkennbar.
- > **Die Hydrologie der Kander – heute**: Anhand der für die Teileinzugsgebiete unterschiedlicher Grössenordnung durchgeführten Hochwasserabschätzungen lassen sich die aktuellen

hochwasserhydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet der Kander in verschiedener räumlicher Differenzierung ausweisen. Aus den räumlichen Mustern lassen sich Teileinzugsgebiete bestimmen, welche die hochwasserhydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet Kander-Hondrich massgeblich beeinflussen. Es wird ersichtlich dass die Teileinzugsgebiete Chiene-Kien sowie Engstlige-Frutigen die Hochwasserabflüsse bei Kander-Hondrich vorwiegend prägen.

Die Resultate zeigen zudem, dass durch das Zusammenwirken der kleinen Teileinzugsgebiete, das auch durch die Gebietsform der übergeordneten mesoskaligen Einzugsgebiete gesteuert wird, die grossräumigen hochwasserhydrologischen Verhältnisse beeinflusst werden.

- > **Die Hydrologie der Kander – morgen:** Die Untersuchungen zu den Auswirkungen der Klimaänderung wurden mit Hilfe einer im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Modellkaskade, bestehend aus einem stochastischen Wettergenerator und einem hydrologischen Modell, durchgeführt. Die Auswirkungen auf die hydrologischen Verhältnisse wurden anhand von sogenannten Sensitivitätsanalysen wie auch anhand der hydrologischen Modellierung von konkreten Klimaszenarien für das Jahr 2050 untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass im Mittel aller Klimaszenarien für das Jahr 2050 von einem leichten Rückgang der mittleren jährlichen Abflussmenge (-6%) ausgegangen werden muss. Die in den Jahreszeiten unterschiedlich ausgeprägten Veränderungen führen dazu, dass das Abflussregime zukünftig ausgeglichener sein wird. Wie aus den Resultaten hervorgeht, wird der zu erwartende Jahresgang der Abflussverhältnisse jedoch wesentlich vom saisonalen Muster der zukünftigen klimatischen Veränderungen sowie vom vorhandenen Vergletscherungsgrad geprägt sein.

Unter dem Einfluss der Klimaszenarien für das Jahr 2050 ist zudem eine deutliche Zunahme bei der zeitlichen Streuung der Jahreshochwasser zu beobachten, allerdings werden die meisten Jahreshochwasser unverändert im Sommer auftreten. Die Angaben zu den Veränderungen der Abflussmengen bei seltenen Hochwasserereignissen (z.B. HQ100) weisen eine grosse Bandbreite auf; unter dem Einfluss der Klimaszenarien lassen sich sowohl Zu- wie auch Abnahmen der Hochwasserabflussmengen beobachten. Im Mittel aller Szenarien ist von einer geringfügigen Abnahme um -4% auszugehen.

Mit diesen Resultaten konnten die für die Schweiz aktuell vorliegenden qualitativen Angaben zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf die hochwasserhydrologischen Verhältnisse (KOHS 2007) für das Einzugsgebiet der Kander bestätigt und quantifiziert werden. Es empfiehlt sich die ausgewiesene Unsicherheit der zukünftigen hochwasserhydrologischen Verhältnisse bei der Massnahmenplanung zu berücksichtigen und die Bemessungsgrössen am oberen Unsicherheitsbereich festzulegen – insbesondere falls ein günstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis der geplanten wasserbaulichen Massnahmen vorliegt.

Abschliessend kann gesagt werden, dass es gelang anhand der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen bzw. der verwendeten Methoden, die räumliche und zeitliche Information zu den (hochwasser-)hydrologischen Verhältnissen im Einzugsgebiet der Kander wesentlich zu erweitern. Der Vergleich zu den Ergebnissen aus vorliegenden Untersuchungen zeigt, dass die beobachteten Veränderungen und die zu erwartenden Entwicklungen gut mit denjenigen anderer alpiner Einzugsgebiet übereinstimmen – die **Kander** stellt in mancher Hinsicht **keinen hydrologischen Sonderfall** dar.

# Teil I

## Grundlagen

## Übersicht Teil I

Dieser einleitende Teil enthält die Grundlagen zur Hydrologie der Kander und zu den Methoden, welche in der vorliegenden Arbeit in verschiedenen Kapiteln zur Bearbeitung verschiedener Fragestellungen eingesetzt wurden. Die sechs ersten Kapitel umfassen die folgenden Inhalte:

- > In **Kapitel 1: Einleitung** werden die aktuelle Situation sowie die bestehenden Probleme, welche ihre Wurzeln in der Geschichte der Kander haben, beschrieben. Daneben wird das Projekt «Kander.2050», in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit durchgeführt wurde, vorgestellt. Abschliessend werden die Problem- und Fragestellung sowie die Zielsetzungen und der Aufbau der vorliegenden Arbeit vorgestellt.
- > Das **Kapitel 2: Untersuchungsgebiet** enthält die Charakterisierung des untersuchten Einzugsgebietes. Diese Beschreibung umfasst insbesondere eine hydrologische Gliederung sowie eine Beschreibung der geologischen und pedologischen Verhältnisse. Ausgewählte hydrologisch relevante Gebietskennwerte des Einzugsgebietes werden zudem im gesamtschweizerischen Kontext verglichen.
- > Die meteorologische und hydrologische Datenlage für das untersuchte Einzugsgebiet und für die nähere Region wird in **Kapitel 3: Daten** vorgestellt.
- > In **Kapitel 4: Klima und Hydrologie** werden die aus Messdaten abgeleiteten klimatischen und hydrologischen Verhältnisse im Berner Oberland bzw. im Einzugsgebiet Kander-Hondrich erläutert. Die Charakterisierung erfolgt sowohl für die mittleren Niederschlags- und Abflussverhältnisse wie auch für die Starkniederschläge und die Hochwasser.
- > **Kapitel 5: Methoden der Hochwasserabschätzung** stellt die in der vorliegenden Arbeit mehrfach verwendeten Ansätze zur Hochwasserabschätzung für Einzugsgebiete unterschiedlicher räumlicher Skala vor. Diese für die Bearbeitung der in Kapitel 1 aufgeworfenen Fragen zentralen Instrumente umfassen sowohl extremwertstatistische Auswertungen gemessener und modellierter Abflussdaten wie auch Ansätze der regionalen Übertragung.
- > Das hydrologische Modellsystem PREVAH, welches im Rahmen der vorliegenden Arbeit für zahlreiche Anwendungen eingesetzt wurde, wird in **Kapitel 6: Modellsystem PREVAH** vorgestellt. Neben der Modellstruktur und den einzelnen Teilmodulen des hydrologischen Modellsystems wird in diesem Kapitel auch auf die verfügbaren und gewählten Ansätze zur Bestimmung der freien Modellparameter durch Kalibrierung und Regionalisierung eingegangen.

# 1 Einleitung

In diesem einleitenden Kapitel zur Hydrologie der Kander werden die Geschichte und die aktuellen Probleme des Flusses aufgezeigt (Kapitel 1.1). Daneben wird das Projekt «Kander.2050» vorgestellt, in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit durchgeführt wurde (Kapitel 1.2). Gleichzeitig werden auch die Problem- und Fragestellung, die Zielsetzungen sowie der Stand der Forschung dargelegt (Kapitel 1.3 bis Kapitel 1.5). In Kapitel 1.6 werden die wesentlichen Arbeitsschritte und in Kapitel 1.7 der Aufbau der vorliegenden Arbeit beschrieben.

## 1.1 Die Kander – ein Fluss und seine Geschichte

Die Kander ist für ihre raschen und ausgeprägten Abflussschwankungen bekannt, weshalb sie auch als einer der grössten Wildbäche der Schweiz bezeichnet wird (VISCHER 2003). Besonders eindrücklich kam diese Eigenschaft auch im **August 2005** zum Ausdruck, als an der Messstation in Hondrich beim grössten bisher gemessenen **Hochwasserereignis** eine Abflussspitze von über  $270 \text{ m}^3/\text{s}$  registriert wurde (BAFU, WSL 2007). Dieser Wert ist mehr als doppelt so gross wie der mittlere Jahreshochwasserabfluss der Jahre 1902 bis 2008. Bei diesem Extremereignis waren im Einzugsgebiet Schäden in Millionenhöhe zu verzeichnen und die in den letzten Jahrzehnten gut funktionierenden Schutzbauten der Kander gerieten an die Grenzen der hydraulischen Kapazität sowie der mechanischen Belastbarkeit.

Aber auch in früherer Zeit waren die Bewohner des Kandertals immer wieder der vom Fluss ausgehenden Hochwassergefahr ausgesetzt: Vor allem im Unterlauf, zwischen dem Zusammenfluss mit der Simme und der Einmündung in die Aare, waren weite Teile wiederholt von schweren Überschwemmungen betroffen (z.B. BÜTSCHI 2008). Deshalb wurde in den Jahren 1711 bis 1714 der Flusslauf der Kander in einem für die damalige Zeit visionären Projekt in den Thunersee umgeleitet. Zentrales Element der wasserbaulichen Pioniertat war der sogenannte **«Kanderdurchstich»**, d.h. der Durchbruch eines Moränenzuges («Strättligenhügel»). Dieser Hügel versperrte zuvor der Kander den Weg in den Thunersee (Abbildung 1.1).

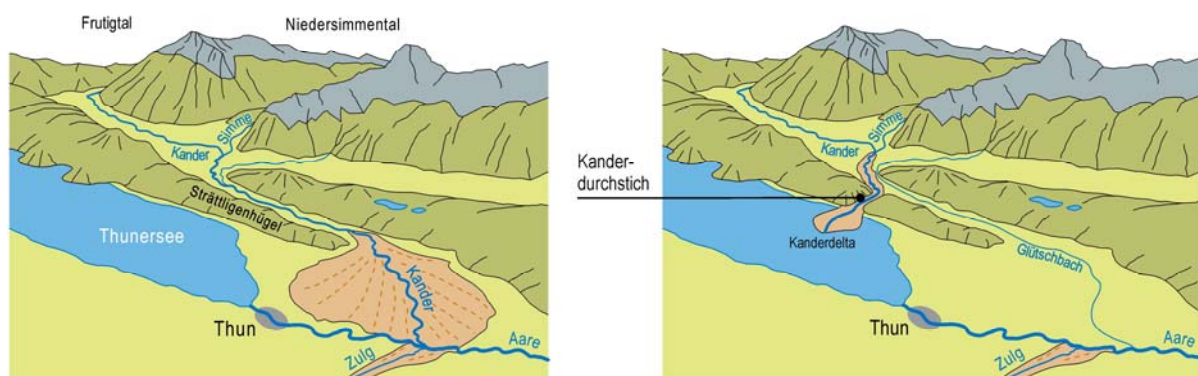


Abbildung 1.1: Umleitung der Kander in den Jahren 1711-1714. Die Abbildung zeigt den Zustand vor dem Kanderdurchstich (links) und danach (rechts). (Grafik: verändert nach HASLER & EGLI 2004)

Künftig sollte der Thunersee als Retentionsbecken für die Hochwasserabflüsse von Kander und Simme dienen. Durch diese Massnahme wurden weite Teile des Unterlaufs von der ständig drohenden Hochwassergefahr befreit, das Problem verlagerte sich jedoch in der Folge zu den am Thunersee gelegenen Siedlungen, insbesondere zur Stadt Thun (HÜGLI 2007). Kurz nach dem Bau des Kanderdurchstichs tiefte sich zudem die Flusssohle im Bereich der leicht erodierbaren Moräne um gut 40 m ein und löste dadurch auch eine massive, rückschreitende Erosion im unteren Kandertal aus (MÜLLER & WAGNER 2005).

Wie manche andere Flüsse im Alpenraum auch (vgl. KOBLET 1995), wurde die Kander ab Ende des 19. Jahrhunderts in mehreren Etappen **begradigt und verbaut** (vgl. BÜTSCHI 2008). Die Breite des Flusslaufes wurde dabei über weite Strecken vom natürlichen Zustand der teilweise über 150 m betrug, auf ein Normalprofil von 20 bis 22 m reduziert (HZP 2004). Damit einher gingen wasserbauliche Massnahmen an den Seitengewässern und Wildbächen, deren mitgeführtes Geschiebe fortan nicht mehr in den Hauptfluss gelangte, sondern in Geschiebesammlern und in Sperren zurückgehalten wurde (vgl. Abbildung 1.2 sowie Abbildung 1.3).

Diese umfangreichen Korrektionsarbeiten am Hauptfluss und an den Seitenbächen brachten einen weitgehenden Hochwasserschutz im Kandertal: Der nun stark eingeeengte Fluss trat seltener über die Ufer, wodurch die Siedlungsgebiete im Talboden wesentlich sicherer wurden. Dies war auch eine Voraussetzung dafür, dass ab Anfang des 20. Jahrhunderts die **Verkehrswege** und insbesondere die bedeutende Bahnlinie durch den Lötschberg auf- und ausgebaut werden konnten (AMACHER 2006, BÜTSCHI 2008).

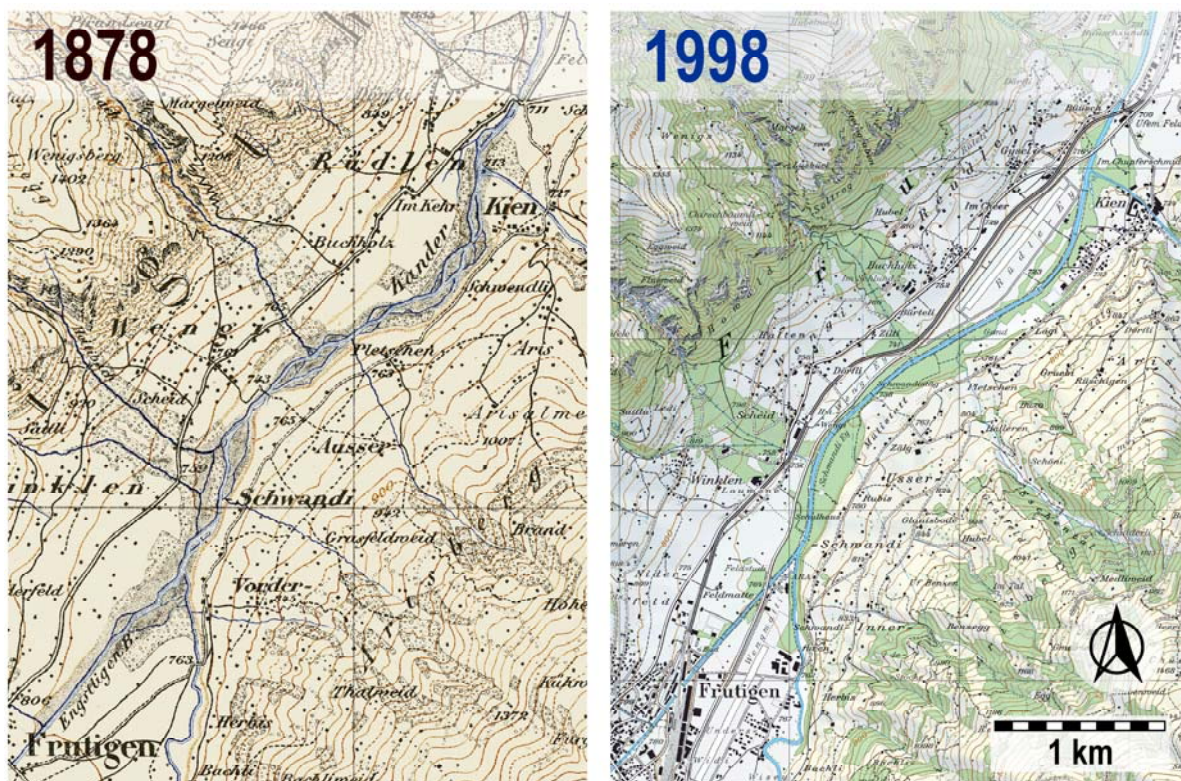


Abbildung 1.2: Auswirkungen der Korrektionsarbeiten an der Kander zu Beginn des 20. Jahrhunderts: Begradigung des Flusses zwischen Frutigen und Kien sowie Ausbau der Verkehrswege, insbesondere der Bahnlinie durch den Lötschberg. (Karte: SWISSTOPO 1998B UND 2003B)



Abbildung 1.3: Verbauungsarbeiten an der Kander (oben sowie unten links) und deren Seitenbäche (unten rechts) in den Jahren 1899 bis 1912 (Fotos: StAB 1911, 1914a, 1914b)

Eine weitere Auswirkung dieser wasserbaulichen Korrekturen bzw. der Einengung des Flusses war die **Absenkung der Sohle durch die verstärkte Erosion**, welche sich als Folge sowohl des stark reduzierten Geschiebeeintrages als auch der erhöhten Fließgeschwindigkeit einstellte. In der Periode von 1971 bis 1999 betrug die Sohlenabsenkung an einzelnen Stellen mehr als einen Meter (MÜLLER & WAGNER 2005). Dies führte dazu, dass die Uferverbauungen unterspült wurden. Gleichzeitig wurde auch der aus Holz bestehende Unterbau freigelegt und somit der Zersetzung ausgesetzt; der Hochwasserschutz an der Kander ist somit längerfristig nicht mehr gesichert (Abbildung 1.4). Zahlreiche Schutzbauten weisen heute solche Mängel auf und zudem machen sich bei vielen Schwellen altersbedingte Schäden an der Bausubstanz bemerkbar (DÄHLER ET AL. 2004). Die Häufung der intensiven Hochwasserereignisse in den letzten Jahren hat diese Entwicklung zusätzlich beschleunigt und dazu beigetragen, dass sich der bauliche Zustand der verschiedenen Schutzbauten deutlich verschlechtert hat.

In einer Studie zum **Geschiebehaushalt** der Kander (HZZP 2004) wurde die Sohleneintiefung mit Hilfe von hydraulischen Modellen berechnet und Abschätzungen zur Entwicklung in den nächsten Jahrzehnten gemacht. Daraus geht hervor, dass ein weiteres massives Fortschreiten der Sohlenerosion zu erwarten ist, sofern keine geeigneten Gegenmassnahmen getroffen werden.

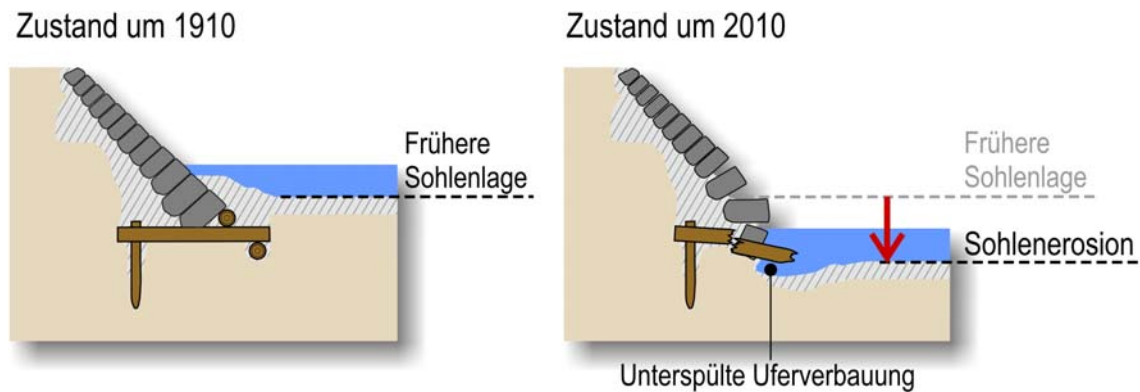


Abbildung 1.4: Auswirkungen der Sohlenerosion auf die Uferverbauungen. Schematischer Querschnitt durch eine Uferverbauung: Ursprünglicher Zustand um 1910 (links); Zustand nach 100 Jahren, die Sohle ist durch Erosion tiefer gelegt, die Uferverbauungen werden unterspült (rechts). (Grafikvorlage: LANAT, TBA 2009)

Durch die Verbauungen der Kander wurden auch der natürliche **Flusslebensraum** sowie die Vernetzung mit den begleitenden Auen stark beeinträchtigt. Zudem ist durch die zahlreichen zum Teil sehr hohen Querverbauungen die Fischwanderung in die Laichgebiete, welche sich im Oberlauf des alpinen Gewässers befinden, heute verunmöglicht. Einzelne Arten wurden dadurch stark dezimiert (TBA, LANAT 2007). Der hohe Verbauungsgrad kommt auch bei der Beurteilung des ökomorphologischen Zustandes deutlich zum Ausdruck: Rund 40% der gesamten Flusstrecke werden in der Untersuchung von SIGMAPLAN (2003) als «stark beeinträchtigt» bzw. als «naturfremd» klassiert, wobei sich der grösste Anteil der verbauten Strecken unterhalb von Kandergrund, d.h. im Unterlauf des Flusses befindet (vgl. Anhang A).

Sowohl die langfristigen Auswirkungen der wasserbaulichen Massnahmen als auch die in den letzten Jahren häufiger auftretenden, grossen bis extremen Hochwasserereignisse zeigen deutlich auf, dass das **Gesamtsystem der Kander** je länger je mehr an Grenzen stösst und in vielen Bereichen Handlungsbedarf besteht. Gleichzeitig erfüllt der aktuelle Zustand des Flusses die Anforderungen der gesetzlichen Vorschriften in den Bereichen Wasserbau, Natur- und Gewässerschutz sowie Fischerei vielerorts nicht mehr (TBA, LANAT 2009). Schliesslich muss auch berücksichtigt werden, dass die Nutzungsansprüche an die Fliessgewässer heute äusserst vielseitig und teilweise auch mit Interessenskonflikten behaftet sind (z.B. JUNKER & BUCHECKER 2008, LEISI 2009). So ist z.B. bei der Bevölkerung ein immer grösser werdendes Interesse an natürlichen Naherholungsräumen in Flussnähe festzustellen (BAFU 2009A).

Eine mögliche Massnahme, die eine Vielzahl dieser Probleme lösen könnte, ist die **Renaturierung** des Flussraumes (z.B. MÜLLER & WAGNER 2005, KÜNZI ET AL. 2005), obschon deren Wirksamkeit insbesondere bezüglich der zu beobachtenden Erosionstendenz heute kontrovers diskutiert wird (REQUENA & MINOR 2008). An zwei besonders stark von Erosion betroffenen Stellen entlang der Kander – in der «Augand» sowie in der «Schwandi-Ey» – wurden in den letzten Jahren bereits erste Renaturierungen umgesetzt; weitere Massnahmen sollen nun aber im Rahmen des Gesamtprojekts «Kander.2050» (vgl. Kapitel 1.2) koordiniert werden. Insbesondere sind Lösungen gesucht, die dem Konzept des **nachhaltigen Hochwasserschutzes** (BWG 2001) gerecht werden und somit die Anliegen aus den Bereichen «Umwelt», «Gesellschaft» und «Wirtschaft» gleichermaßen berücksichtigen und differenziert aufeinander abstimmen.



## 1.2 Das Projekt «Kander.2050»

Da die in vielen Bereichen vorhandenen Defizite an der Kander immer deutlicher zu Tage treten und deshalb vielerorts Handlungsbedarf besteht, hat der Kanton Bern – vertreten durch die beiden Fachstellen «Amt für Landwirtschaft und Natur» (LANAT) und «Tiefbauamt» (TBA) – im Jahr 2006 das Projekt «Kander.2050» ins Leben gerufen. Ziel des Projektes war es, die vorliegenden Probleme und deren Ursachen genauer zu analysieren sowie Lösungen zu erarbeiten, die auf einen längerfristigen Zeithorizont bzw. bis ins Jahr 2050 ausgerichtet sind (TBA, LANAT 2009). Dabei sollen insbesondere die Richtlinien des Bundes zum integralen Hochwasserschutz (BWG 2001) verfolgt und umgesetzt werden. Das bedeutet, dass die gesellschaftlichen, wirtschaftlichen sowie ökologischen Aspekte in allen Projektphasen berücksichtigt und bei der darauffolgenden Massnahmenplanung koordiniert bzw. in ausgewogenen Verhältnissen aufgenommen werden sollen. Zudem sollen in diesem Projekt Lösungen gesucht werden, welche auf Stufe des gesamten Flusseinzugsgebietes und nicht nur abschnittsweise bzw. auf Gemeindeebene koordiniert werden, wie das nach geltender Wasserbaugesetzgebung im Kanton Bern (WBG 1989) heute noch der Fall ist. Dadurch soll gewährleistet werden, dass die lokalen Bedürfnisse und die Ansprüche aus den verschiedenen Bereichen zukünftig besser aufeinander abgestimmt sind.

Mit dem Projekt «Kander.2050» sollen deshalb unter Einbezug der Bevölkerung für die künftige Entwicklung des Flusses nachhaltige und überregionale Lösungen gesucht werden. Die erarbeiteten Erkenntnisse und Empfehlungen fliessen schliesslich in ein sogenanntes Gewässerentwicklungskonzept ein, welches die Leitplanken für zukünftige Wasserbauprojekte bzw. Handlungsempfehlungen für den Wasserbau an der Kander vorgeben soll (TBA, LANAT 2009).

Mit den Projektarbeiten werden die folgenden **übergeordneten Ziele** verfolgt (TBA, LANAT 2009):

- > Ausreichenden Hochwasserschutz gemäss heute gültigen Normen und Kenntnissen sichern
- > Naturnahe Aufwertung des Flussraumes und Beseitigung von ökologischen Defiziten
- > Gesellschaftlich attraktiven Lebensraum gestalten

Wesentliche **Fragestellungen**, die sich daraus ergeben, sind (TBA, LANAT 2009):

- > Wie ist das heutige System der Kander entstanden und in welchem Zustand befindet es sich?
- > Welche Defizite hat die Kander in den Bereichen Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft?
- > Was sind die elementaren Anforderungen an ein neues System «Kander.2050» bezüglich Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft?
- > Welche Massnahmen werden diesen Anforderungen am besten gerecht?

Der gewählte **Projektaufbau** sowie das **Vorgehen** orientieren sich an den Empfehlungen aus verschiedenen Forschungsarbeiten in diesem Bereich (REY & ORTLEPP 2000, REY 2004, ROHDE 2005). Diese wurden im Rahmen von vergleichbaren Projekten an verschiedenen grösseren Flüssen in der Schweiz und im angrenzenden Ausland durchgeführt (z.B. «Rhone-Thur-Projekt», EAWAG 2006 oder «Projekt Alpenrhein», IRKA, IRR 2005).

In Anlehnung an das Prinzip der nachhaltigen Entwicklung (DEZA, ARE 2004) bzw. des integralen Hochwasserschutzes (BWG 2001) wurde das Projekt «Kander.2050» in die Module Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft gegliedert. Die Bearbeitung erfolgte auf Basis von sogenannten Teilmodu-

len. So wurde z.B. der Bereich «Umwelt» in die Teilmodule «Hydrologie», «Ökologie» und «Flussmorphologie/Wasserbau» unterteilt.

Während die Bearbeitung der meisten Teilmodule durch private Ingenieur-, oder Umweltbüros erfolgte, wurden die Untersuchungen im **Teilmodul «Hydrologie»** im Rahmen der vorliegenden Dissertation und in verschiedenen hier integrierten Diplomarbeiten (SCHEIDEGGER 2008, GAMMETER 2008, STUCKI 2009, ZGRAGGEN 2009) in der Gruppe für Hydrologie am Geographischen Institut der Universität Bern ausgeführt.

Die im Rahmen des Teilmoduls «Hydrologie» bzw. der vorliegenden Dissertation durchgeführten Arbeiten tragen insbesondere zur umfassenden Zustandsanalyse des Einzugsgebietes bei und liefern somit zentrale Grundlagen für die Arbeiten in den darauf aufbauenden Projektphasen.

### 1.3 Problem- und Fragestellung

Aus der Beschreibung des Gesamtprojektes in Kapitel 1.2 wird ersichtlich, dass die Bearbeitung von verschiedenen Problem- und Fragestellungen auf hydrologische Grundlagen angewiesen ist. Von vorrangigem Interesse sind dabei der **aktuelle Zustand** sowie die **zeitliche Entwicklung** verschiedener **hydrologischer Grössen und Kennwerte**. So muss z.B. für die geplanten wasserbaulichen Massnahmen auf hydrologische Bemessungsgrössen bzw. auf Hochwasserabschätzungen für die verschiedenen Gewässerabschnitte der Kander zurückgegriffen werden können. Hierbei interessiert auch die räumliche Differenzierung der Hochwasser- bzw. Abflussbereitschaft. In diesem Zusammenhang soll untersucht werden, welche Teilräume im Hochwasserfall besonders stark zum Abflussgeschehen der Kander beitragen können. Während sich die Arbeiten bei den übrigen Teilmodulen im Wesentlichen auf den eng begrenzten Flussraum der Kander beschränken, wird deshalb im Teilmodul Hydrologie das gesamte Einzugsgebiet untersucht.

Daneben stellt sich aber auch die Frage, in welchem Zusammenhang die in den letzten Jahren im Berner Oberland und an der Kander häufiger zu beobachtenden intensiven **Hochwasserabflüsse** stehen. Insbesondere interessiert, welche Veränderungen im Einzugsgebiet der Kander in den letzten Jahren bei verschiedenen hydrologischen Grössen und im Speziellen bei den Hochwasserabflüssen festzustellen sind und von welchem Ausmass diese Veränderungen sind.

Damit auch langfristig ausgerichtete wasserbauliche Massnahmen getroffen werden können, werden zudem Abschätzungen zu den **erwarteten Entwicklungen** der hochwasserhydrologisch relevanten Grössen für die nächsten Jahre und Jahrzehnte benötigt.

Ausgehend von dieser Problemstellung lassen sich für die vorliegende Arbeit drei thematische Schwerpunkte definieren, welche die nachfolgenden zentralen Fragestellungen beinhalten:

#### **Schwerpunkt 1: Veränderungen der hochwasserhydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet Kander-Hondrich während den letzten Jahrzehnten und Jahrhunderten.**

- > Welche Veränderungen traten bei den hochwasserhydrologisch relevanten Grössen im Einzugsgebiet der Kander in den letzten Jahrzehnten bzw. den letzten Jahrhunderten auf?
- > Wie lassen sich die beobachteten Veränderungen bei den hochwasserhydrologischen Verhältnissen bzw. die extremen Hochwasserabflüsse der letzten Jahre erklären?

### **Schwerpunkt 2: Aktueller Zustand und räumliche Differenzierung der hochwasserhydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet Kander-Hondrich.**

- > Wie gross sind die Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit, welche als hydrologische Bemessungsgrössen entlang der Kander verwendet werden sollen?
- > Wie gestaltet sich die räumliche Differenzierung der hochwasserhydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet der Kander auf unterschiedlichen räumlichen Skalen?

### **Schwerpunkt 3: Zu erwartende Entwicklung der hochwasserhydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet Kander-Hondrich in den kommenden Jahrzehnten bzw. bis 2050.**

- > Mit welchen Entwicklungen ist in den kommenden Jahrzehnten bei den (hochwasser-) hydrologischen Verhältnissen im Einzugsgebiet Kander-Hondrich zu rechnen?
- > Wie müssen die hochwasserhydrologischen Bemessungsgrössen heute gewählt werden, damit diese auch für längerfristig geplante Massnahmen bzw. im Jahr 2050 gültig sind?

## **1.4 Zielsetzung**

Durch die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen sollen insbesondere die bestehenden Kenntnislücken im Bereich der hochwasserhydrologischen Verhältnisse aber auch bei den hydrologischen Grundlagen geschlossen werden. Die Resultate sollen zum **Verständnis der Kander als hydrologisches Gesamtsystem** in räumlicher und zeitlicher Differenzierung beitragen. Gleichzeitig sollen Aussagen sowohl zu den beobachteten als auch zu den erwarteten **hydrologischen Veränderungen** gemacht sowie **hochwasserhydrologische Bemessungsgrundlagen** für zukünftige wasserbauliche Projekte im gesamten Einzugsgebiet bereitgestellt werden. Die thematische Ausrichtung der Arbeit erfolgt deshalb in erster Linie auf die hochwasserhydrologischen Verhältnisse der Kander, daneben werden aber auch Grundlagen zu anderen hydrologischen Aspekten (z.B. mittlere Abflussverhältnisse) bereitgestellt und analysiert.

Die Zielsetzungen der vorliegenden Arbeit lassen sich entsprechend den in Kapitel 1.3 aufgeführten thematischen Schwerpunkte strukturieren:

#### **Schwerpunkt 1:**

- > Zur Beurteilung hochwasserrelevanter klimatischer und hydrologischer Veränderungen während den letzten Jahrzehnten bzw. Jahrhunderten sollen sowohl historische Hochwasserereignisse als auch lange Messreihen analysiert werden. Diese Auswertungen sollen räumlich differenziert bzw. unter Einbezug einer möglichst breiten Datengrundlage durchgeführt werden.
- > Die Analyse der raum-zeitlichen hydrologischen Veränderungen im Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich soll anhand von langen gemessenen oder modellierten Abflussreihen erfolgen.

### Schwerpunkt 2:

- > Die aktuellen hochwasserhydrologischen Verhältnisse sollen mit Hilfe bestehender Methoden auf Basis von Teileinzugsgebieten unterschiedlicher Grössenordnung beurteilt werden.
- > Anhand von Hochwasserabschätzungen für Einzugsgebiete unterschiedlicher räumlicher Skala soll die Differenzierung der hochwasserhydrologischen Verhältnisse räumlich weiter aufgelöst werden.

### Schwerpunkt 3:

- > Die Entwicklung der (hochwasser-)hydrologischen Verhältnisse für die nächsten Jahrzehnte soll anhand der Auswirkungen von Klimaszenarien, welche die für das Jahr 2050 zu erwartenden Veränderungen vorgeben, untersucht werden.
- > Die verwendeten Klimaszenarien sollen dem aktuellen Stand der Wissenschaft entsprechen und die lokalen klimatischen Veränderungen aufzeigen.

Der Einsatz eines zeitlich und räumlich hoch aufgelösten **hydrologischen Modells** soll einerseits zur hydrologischen Beurteilung des Ist-Zustandes und dadurch auch zum Systemverständnis des untersuchten Einzugsgebietes beitragen. Gleichzeitig kann es andererseits auch für die hydrologische Modellierung von ausgewählten Szenarien möglicher zukünftiger Entwicklungen eingesetzt werden. Mit Hilfe des hydrologischen Modells können zudem hydrologische Modellierungen für Einzugsgebiete ohne Abflussmessungen durchgeführt oder vorliegende kurze Abflussmessreihen in die Vergangenheit verlängert werden.

Ziel der Analysen soll es schliesslich sein, den **Zustand** bzw. den **Charakter der Kander** und damit verbunden Schlüsselräume und -grössen, welche das (hochwasser-)hydrologische Geschehen im Einzugsgebiet Kander-Hondrich massgeblich prägen, zu bestimmen.

Die Arbeit soll damit einen wesentlichen Beitrag zu den in den weiteren Planungsschritten des Projekts «Kander.2050» benötigten Grundlagen leisten. Daneben sollen aber auch Erkenntnisse zur Hydrologie alpiner Einzugsgebiete sowie zu den hydrologischen Auswirkungen der bis ins Jahr 2050 erwarteten Klimaänderung gewonnen werden.

## 1.5 Stand der Forschung

Die nachfolgende Zusammenstellung umreist den aktuellen Stand der Forschung zu verschiedenen thematischen Schwerpunkten. Um die Eigenschaften des alpinen Untersuchungsgebiets sowie die für die vorliegende Arbeit zentralen Fragestellungen zu berücksichtigen, fokussiert diese Übersicht auf Forschungsarbeiten und Untersuchungen, welche im schweizerischen bzw. europäischen Alpenraum durchgeführt wurden.

### 1.5.1 Hydrologische Grundlagen für den Untersuchungsraum

Eine Vielzahl von hydrologischen Grundlagendaten für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich können den in der Regel gesamtschweizerischen Übersichtskarten, welche im Hydrologischen Atlas der Schweiz (BAFU, SWISSTOPO 1992-2010) enthalten sind, entnommen werden. Während zahlreiche Karten Angaben zu den verschiedenen Bilanzgrössen des Wasserhaushalts und deren Entwicklung im während dem letzten Jahrhundert enthalten (z.B. KIRCHHOFER & SEVRUK 1992, WEINGARTNER & ASCHWANDEN 1992, MENZEL ET AL. 1999, SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002, HUBACHER & SCHÄDLER 2010), werden in diesem Werk auch

Angaben zu hochwasserhydrologisch relevanten Kenngrössen aufgeführt (z.B. GEIGER ET AL. 1992 BZW. JENSEN ET AL. 1997, DIEZIG & KAN 2010). Allerdings muss berücksichtigt werden, dass der Untersuchungszeitraum bei vielen der enthaltenen Auswertungen bereits vor einigen Jahren endet und somit die aktuellsten Werte in den Resultaten nicht immer berücksichtigt sind.

Als weitere Datengrundlage bieten sich die **hochwasserhydrologischen und extremwertstatistischen Auswertungen** von SPREAFICO & ASCHWANDEN (1986-1991) an, welche für eine Vielzahl der eidgenössischen Abflussmessstationen durchgeführt wurden. Für alle aktuell noch in Betrieb stehenden Stationen werden die extremwertstatistischen Auswertungen zudem jährlich nachgeführt und publiziert (BAFU 2009B).

Daneben bestehen heute für sämtliche im Einzugsgebiet liegenden Gemeinden umfangreiche **Gefahrenabschätzungen** (TBA 2003-2005), aus welchen insbesondere Angaben zu den hochwasserhydrologischen Verhältnissen bzw. entsprechende Bemessungsgrössen für wasserbauliche Massnahmen zum Hochwasserschutz entnommen werden können. Es muss aber berücksichtigt werden, dass sich diese Untersuchungen durchwegs auf die Gewässer beschränken, von welchen eine potentielle Gefahr für den Siedlungsraum ausgeht. Da das Einzugsgebiet Kander-Hondrich aber in verschiedenen Regionen nur schwach besiedelt ist, sind dadurch für weite Bereiche des Einzugsgebietes keine Aussagen zu den hydrologischen Verhältnissen verfügbar. Im Weiteren ist zu beachten, dass die Resultate nicht immer mit den gleichen Methoden hergeleitet wurden, was die Vergleichbarkeit wesentlich einschränkt. Daneben wurden im Zusammenhang mit wasserbaulichen Projekten weitere hydrologische Grundlagen erarbeitet, die meist nur punktuell und für die vom Bauprojekt betroffenen Bereiche des Flusslaufes Aussagen liefern (z.B. JÄGGI 1996).

Weitergehende Untersuchungen wurden zudem auch nach dem Hochwasserereignis vom August 2005 im Rahmen sogenannter «lokaler lösungsorientierter Ereignisanalysen» durchgeführt (TBA 2006, 2007). Da aber bei diesem Ereignis nicht das ganze Einzugsgebiet gleichermassen betroffen war, beschränken sich diese vertieften Analysen auf die beiden Teileinzugsgebiete «Chiene-Kien» und «Kander-Kandersteg».

## 1.5.2 Hochwasserhydrologie im Alpenraum

Die Entstehung von Hochwassern in alpinen Einzugsgebieten, die auslösenden Prozesse sowie deren räumliche Differenzierung sind Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten, welche in den letzten Jahren auf räumlichen Skalen von einzelnen Quadratmetern bis mehreren Quadratkilometern durchgeführt wurden. Von besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang auch langjährige Forschungsprojekte in kleineren Einzugsgebieten die mit zahlreichen Untersuchungen zum Prozessverständnis, teilweise auch über verschiedene räumliche Skalen hinweg, beitragen (z.B. WEINGARTNER & KIENHOLZ 1994, KIENHOLZ ET AL. 1998, KIRNBAUER ET AL. 2008).

Gemäss der qualitativen Beurteilung von WEINGARTNER ET AL. (2003) wird die sogenannte Hochwasserdisposition alpiner Einzugsgebiete massgeblich durch verschiedene **Schlüsselfaktoren** determiniert. Die Hochwasserdisposition bezeichnet bei diesem Ansatz die Gesamtheit der in einem Gebiet vorhandenen Voraussetzungen für die Entstehung eines Hochwassers (BWW, LHG 1991). Neben dem Niederschlag wirken sich demnach vor allem auch die topographischen und pedologischen Voraussetzungen auf die zu erwartenden Hochwasserabflüsse bzw. die Abflussreaktion aus. Eine untergeordnete Bedeutung kommt dabei der Vegetation zu. Die Kombination aller Faktoren ergibt die gesamte Hochwasserdisposition, welche eine deutliche Höhenabhängigkeit aufweist (vgl. Abbildung 1.5). Demnach ist im schweizerischen Mittelland von einer geringeren totalen Hochwasserdisposition auszugehen als in den Voralpen und Alpen.

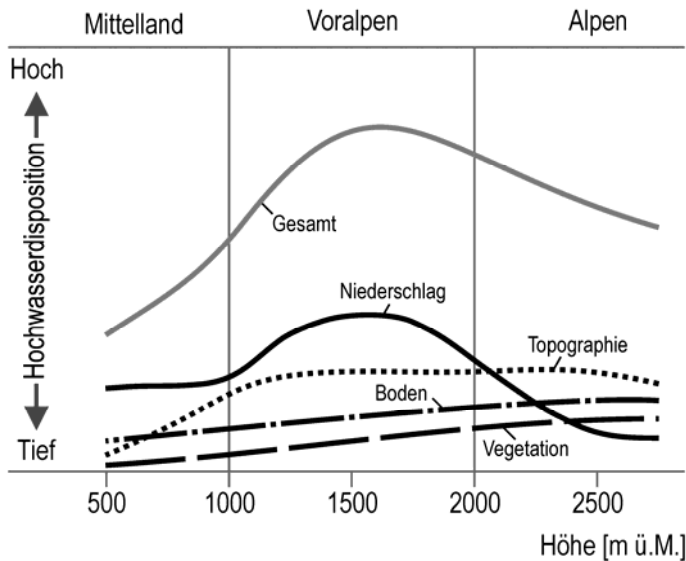


Abbildung 1.5: Faktoren in Abhängigkeit der Höhenlage, welche die Hochwasserdisposition der Einzugsgebiete beeinflussen (verändert nach WEINGARTNER ET AL. 2003)

Allerdings geht aus den Untersuchungen von MERZ ET AL. (2006) hervor, dass in den voralpinen und alpinen Höhenlagen von einer grossen räumlichen Variabilität der potentiellen Abflussbereitschaft ausgegangen werden muss. Auch NAEF ET AL. (2008) weisen in ihren Arbeiten darauf hin, dass nicht bei allen alpinen Einzugsgebieten mit einer raschen Abflussreaktion gerechnet werden kann, obschon die Speichervermögen der Böden tendenziell gering und die zu erwartenden Niederschläge eher von grösserer Intensität sind. Gemäss diesen Autoren stellen deshalb die Bereitstellung und Beurteilung so genannter **Abflussprozesskarten** wertvolle Methoden dar, um die Reaktionsweise bzw. das Speichervermögen eines Einzugsgebietes in räumlicher Differenzierung darzustellen (vgl. SCHERRER & NAEF 2003, SCHMOCKER-FACKEL ET AL. 2007, NAEF ET AL. 2007). Anhand dieser Grundlage können die hochwasserrelevanten Prozesse sowie die räumliche Verteilung der Abflussbereitschaft für ein Einzugsgebiet abgeschätzt und damit die Entstehung von extremen Hochwasserabflüssen besser verstanden werden.

Weitere Arbeiten zur Hochwasserabschätzung in alpinen Einzugsgebieten wurden z.B. von VOGT (2001), BARBEN (2003), SPREAFICO ET AL. (2003), GUTKNECHT ET AL. (2006), MERZ & BLÖSCHL (2008) und DOBMANN (2009) durchgeführt. GUTKNECHT ET AL. (2006) und MERZ & BLÖSCHL (2008) weisen in ihren Untersuchungen darauf hin, dass eine «klassische» Hochwasserabschätzung unter alleiniger Anwendung der Extremwertstatistik auf lange Abflussreihen nicht ausreicht, um eine verlässliche hochwasserrelevante Aussage zu erzielen. Vielmehr sollte die **Information räumlich, kausal wie auch zeitlich erweitert** werden, damit die hochwasserhydrologische Beurteilung eines Einzugsgebietes besser und breiter abgestützt ist. Eine zeitliche Informationserweiterung umfasst den Vergleich der beobachteten Jahreshochwasser zur längeren hydrologischen Geschichte des Gebietes. Das bedeutet z.B., dass die an einem Pegel gemessenen Hochwasser mit meist qualitativen Angaben zu historischen Hochwasserereignissen im Einzugsgebiet ergänzt werden. Die räumliche Informationserweiterung ergibt sich aus dem Vergleich der Hochwasser mit denjenigen aus Nachbargebieten. Die kausale Informationserweiterung verbindet die Jahreshochwasser mit den Prozessen, welche vorwiegend zur Hochwasserentstehung beitragen (vgl. DYCK 1980A, 1980B).

Ein zentrales Instrument, welches ebenfalls zur Informationserweiterung und zum Prozessverständnis bei der Beurteilung hochwasserhydrologischer Untersuchungen im Alpenraum eingesetzt wird, bildet die **hydrologische Modellierung** mit räumlich differenzierten Modellen. In alpinen Gebieten wurden in den letzten Jahren verschiedenste Untersuchungen durchgeführt, welche auf der

Anwendung des hydrologischen Modells PREVAH (vgl. VIVIROLI ET AL. 2007) beruhen (z.B. ZAPPA 2002, VIVIROLI 2007, KOBOLTSCHNIG ET AL. 2007, JAUN ET AL. 2008, SCHWANBECK ET AL. 2008). Die im Rahmen dieser Arbeiten erzielten Resultate haben aufgezeigt, dass die Modellierungen wesentlich zur Informationserweiterung zu den hochwasserhydrologischen Verhältnissen in alpinen Einzugsgebieten beitragen können. Dadurch werden z.B. weitreichende Erkenntnisse zu extremen Hochwasserereignissen bzw. die Rekonstruktion und Abschätzung derselben ermöglicht. Die gemachten Erfahrungen und die verschiedenen entwickelten und im System integrierten Methoden ermöglichen es zudem, das Modell flexibel, zielgerichtet und anwenderfreundlich einzusetzen.

### 1.5.3 Zeitliche Veränderung hydrologischer Grössen

Untersuchungen zur zeitlichen Variabilität hydrologischer Grössen können entweder anhand historischer Daten oder langer Messreihen durchgeführt werden.

Forschungsarbeiten zu **historischen Hochwasserereignissen** an schweizerischen Fließgewässern wurden von AEBISCHER (1997), GEES (1997), PFISTER (1999), KÖNIG (2005), HÜGLI (2002, 2007), NAEF ET AL. (2008) bzw. SCHMOCKER-FACKEL & NAEF (2010A) durchgeführt: Eine Übersicht über die Niederschlags-, Temperatur- und Abflussverhältnisse der letzten Jahrhunderte in der Schweiz ist der Arbeit von STUCKI & LUTERBACHER (2010) zu entnehmen. Zentrale Erkenntnis aus allen Untersuchungen ist, dass in den vergangenen 500 Jahren im Alpenraum markante Phasen unterschiedlicher Häufigkeit extremer Hochwasserereignisse festzustellen sind. Insbesondere lassen sich nach PFISTER (1999) in der Schweiz zwei Perioden mit geringer Überschwemmungshäufigkeit (1641-1706; 1927-1975) sowie zwei Perioden mit häufigen Überschwemmungsereignissen (1550-1580; 1827-1875) nachweisen. Ähnliche, langfristige Zyklen der Hochwasseraktivität wurden auch in anderen Regionen Europas wie z.B. in den Pyrenäen und in Deutschland festgestellt (STURM ET AL. 2001, GLASER 2008).

Die **langen Datenreihen** der in der Schweiz gemessenen meteorologischen Grössen, und insbesondere des für die hydrologischen Fragestellungen besonders interessanten Parameters Niederschlag, wurden im Rahmen zahlreicher Untersuchungen analysiert. So weisen z.B. die Resultate der Arbeiten von WIDMANN & SCHÄR (1997), SCHMIDL ET AL. (2002), BADER & BANTLE (2004) sowie BEGERT ET AL. (2005) darauf hin, dass in der Schweiz im 20. Jahrhundert eine Zunahme der jährlichen Niederschlagsmenge um rund 120 mm (8%) festgestellt werden kann, welche im Winter sowie im nördlichen und westlichen Alpenraum mit einer Zunahme von 20% bis 30% besonders stark ausgeprägt ist. Daneben zeigen die Ergebnisse von COURVOISIER (1998) und SCHMIDL & FREI (2005), dass die Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen seit 1900 fast in der ganzen Schweiz zugenommen hat. Die Zunahmen auf der Alpennordseite sind im Winter und Herbst fast durchwegs signifikant und betragen bei den einzelnen Stationen zwischen 15 und 70%. Daneben haben ZELLER ET AL. (1976-1991) die Jährlichkeiten der Starkniederschlagsmengen unterschiedlicher Niederschlagsdauer für die Periode von 1901 bis 1971 umfassend analysiert und dargestellt (vgl. auch GEIGER ET AL. 1992).

Obschon während des letzten Jahrhunderts Veränderungen beim Niederschlag festgestellt werden konnten, weist SCHÄDLER (2007, 2008) darauf hin, dass beim mittleren Abfluss auf Grund der gesteigerten Verdunstung keine signifikante Veränderung aufgetreten ist. Quantitativ wurde dies auch durch die Auswertungen von HUBACHER & SCHÄDLER (2010) belegt, welche die Entwicklung der Wasserhaushaltsgrössen grosser Einzugsgebiete in der Schweiz für das 20. Jahrhundert untersucht haben. Dagegen zeigt die saisonale Analyse der Abflussdaten durch BIRSAN ET AL. (2005), dass für den Zeitraum von 1931 bis 2000 bei etwas mehr als der Hälfte der untersuchten Zeitreihen eine signifikante **Zunahme des Winterabflusses** zu verzeichnen ist.

### 1.5.4 Auswirkungen der Klimaänderung

Mit welchen klimatischen Verhältnissen im europäischen Alpenraum unter dem Einfluss der Klimaänderung zu rechnen ist, kann heute mit Hilfe von regionalen Klimamodellen (z.B. CHRISTENSEN & CHRISTENSEN 2007, CHRISTENSEN ET AL. 2007, GOODESS 2003) und spezifischen Auswertungen für den Alpenraum (z.B. FREI ET AL. 2006, SCHMIDLI ET AL. 2007) abgeschätzt werden. Der aktuelle Stand des Wissens ist zusammengefasst in KLIWA (2006), OCCC, PROCLIM (2007), OCCC (2008) bzw. BÖHM ET AL. (2008) enthalten. Darauf basierend wurden in den letzten Jahren die zu erwartenden Auswirkungen auf die hydrologischen Verhältnisse im Alpenraum im Rahmen von zahlreichen Forschungsarbeiten untersucht (z.B. HEBENSTREIT 2000, FUCHS 2005, HORTON ET AL. 2005, SCHAEFLI ET AL. 2007, HOLZMANN ET AL. 2010); die Zusammenstellung von HÄNGGI & PLATTNER (2007) gibt einen Überblick über den Stand der Forschung in diesem Bereich.

Wie aus OCCC, PROCLIM (2007) bzw. FREI (2005) ersichtlich wird, muss in der Schweiz auf der Alpennordseite bis ins Jahr 2050 grundsätzlich von einer **Erwärmung um rund 2 bis 3°C** ausgegangen werden. Es wird damit gerechnet, dass die Zunahme im Sommer leicht grösser sein wird, als im Winter. Die Konfidenzintervalle umfassen einen relativ grossen Bereich von 1 bis 7°C. Bei den Niederschlägen wird eine Zunahme um rund 10% im Winter und eine Abnahme im Sommer von rund 20% erwartet (z.B. FREI 2005). Auch andere Autoren bestätigen mit ihren Untersuchungen die geringfügige Reduktion der jährlichen Niederschlagsmenge (z.B. BOSSHARD ET AL. 2009). Insgesamt muss von einer weiteren **Zunahme der extremen Niederschlagsereignisse** vor allem im Winter, möglicherweise aber auch im Sommer ausgegangen werden. Allerdings ist hierbei zu berücksichtigen, dass sich diese Aussagen auf Grossregionen beziehen (z.B. «Alpennordseite» der Schweiz) und besonders für den Sommer mit grösseren Unsicherheiten behaftet sind.

SCHÄDLER (2007, 2010) fasst die erwarteten Folgen, die sich aus diesen veränderten klimatischen Bedingungen bei den verschiedenen Wasserhaushaltsgrossen ergeben, wie folgt zusammen:

- > Die **Verdunstung** wird – ausgelöst durch die Erwärmung – generell weiter zunehmen.
- > In tieferen und mittleren Lagen fällt wegen der Erwärmung seltener Niederschlag in Form von **Schnee**. Die Schneegrenze steigt um mehr als 350 m.
- > Der mittlere jährliche **Abfluss** wird sich um 7 bis 12% verringern, was auf die gesteigerte Verdunstung sowie auf die geringeren Niederschläge zurückzuführen ist und – je nach betrachteter räumlicher Skala und Gebietseigenschaften – auch durch die allenfalls kurzfristig gesteigerte Gletscherschmelze nicht kompensiert werden kann.
- > Auf Grund des veränderten Temperaturregimes und des allgemein erwarteten starken Rückgangs der Gletscher um bis zu 75% der heutigen Ausdehnung werden sich auch die **Abflussregimes** verändern. Wie umfangreiche Modellierungen von HORTON ET AL. (2005) zeigen, werden sich diese um etwa eine bis zwei Regimestufen nach unten verschieben. Das bedeutet, dass ein heute noch nival geprägtes Regime in Zukunft pluviale Merkmale aufweisen kann. Diese Veränderungen dürften sich in Zukunft vorwiegend in heute glazialen und nivalen Regimes deutlich bemerkbar machen (vgl. HUSS ET AL. 2008).

Insgesamt kann also davon ausgegangen werden, dass sich unter den Voraussetzungen der zu erwartenden Klimaänderung ein ausgeglicheneres Abflussregime einstellen wird, welches zusätzlich einen um bis zu 12% tieferen jährlichen Mittelwert aufweist.



Qualitative Einschätzungen der Auswirkungen der Klimaänderung auf die Hochwasserhydrologie sind dem **Standortpapier der KOHS (2007)** zu entnehmen. Diese weisen darauf hin, dass in höher gelegenen Einzugsgebieten der Alpennordseite (über 1500 m ü.M. mittlerer Gebietshöhe), zu welchen auch das Einzugsgebiet der Kander gehört, mit einer Zunahme der Abflüsse im Winter zu rechnen ist. Hochwasser dürften in diesen Regionen im Frühjahr etwas häufiger auftreten. Es ist davon auszugehen, dass die Jahreshochwasser auch unter den künftigen Klimabedingungen etwa in der gleichen Grössenordnung und immer noch im Sommer auftreten werden. Für den Herbst werden keine Veränderungen erwartet.

Mit welchen Schwierigkeiten und Einschränkungen die **Klimafolgenforschung** im Bereich der Hydrologie und im Speziellen bei der Hochwasserhydrologie heute noch konfrontiert ist, wird auch aus der Synthese eines Expertenworkshops ersichtlich (ADAPTALP 2009):

- > Aussagen zu hydrologischen Ereignissen mit geringer Wiederkehrperiode sind möglich, schwierig ist eine Aussage zu extremen und seltenen Ereignissen.
- > Je kürzer der Zeitraum, je kleiner das Einzugsgebiet und je komplexer das System, desto unschärfer wird die Zuverlässigkeit und Sicherheit der Szenarien und Aussagen.
- > Die zu erwartende Fehlerfortpflanzung wird sich ausgehend von den Klimaszenarien über die hydrologische Prozessquantifizierung zur Schadenswahrscheinlichkeit aufsummieren.

### 1.5.5 Forschungsbedarf

Aus der Übersicht in Kapitel 1.5.1 bis Kapitel 1.5.4 lässt sich der Forschungsbedarf zur Beantwortung der in Kapitel 1.3 aufgeworfenen Fragen bzw. zur Erreichung der in Kapitel 1.4 gesetzten Zielen ableiten.

Obschon für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich zahlreiche hydrologische Grundlagendaten und darauf basierende Auswertungen verfügbar sind, fehlt bis anhin ein **praxisrelevanter Überblick zur (hochwasser-)hydrologischen Situation** im Einzugsgebiet der Kander. So wurden beispielsweise die aktuellen Daten der in der Region vorhandenen hydrologischen und meteorologischen Messstationen (vgl. KAN 2002, KONZELMANN ET AL. 2007) bezüglich verschiedenen hochwasserhydrologischen Kenngrössen bisher noch nicht einheitlich analysiert.

Die Resultate und Erkenntnisse aus verschiedenen Untersuchungen in der Schweiz bzw. im Alpenraum lassen sich teilweise auch auf das Einzugsgebiet der Kander übertragen. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass sich sämtliche Untersuchungen nur auf einzelne der zahlreichen Stationen in der Region des Untersuchungsgebietes sowie vielfach auf den Zeitraum bis 2000 beschränken. Damit sind Aussagen zum Einzugsgebiet der Kander sowie zur **Entwicklung der aufgetretenen hydrologischen Veränderungen** in den letzten Jahren unvollständig oder nicht möglich.

Bei den Auswirkungen der Klimaänderung auf die Hydrologie alpiner Einzugsgebiete kann festgestellt werden, dass Aussagen zu künftigen seltenen hydrologischen Ereignissen noch mit grösseren Unsicherheiten behaftet sind und keine quantitativen Angaben zu den Veränderungen der **Hochwasserabflüsse** vorliegen. Deshalb fehlen auch lokale und quantitative Angaben, auf welchen eine langfristig ausgerichtete Massnahmenplanung für den Hochwasserschutz in mesoskaligen Einzugsgebieten basiert.

Mit den im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgesehenen Untersuchungen sollen die bestehenden Lücken für das Einzugsgebiet der Kander geschlossen werden. Bei der Bereitstellung der hydrologischen Grundlagen soll zudem berücksichtigt werden, dass die erzielten Resultate auch für weitere

Arbeiten im Untersuchungsraum eingesetzt werden können und in **praxisrelevanter Form** vorliegen müssen. Folgende **Schwerpunkte** sollen dabei gesetzt werden:

- > Zur Beurteilung der zeitlichen Variabilität hochwasserhydrologisch relevanter Parameter sollen ausgewählte Grössen anhand langer Messreihen der lokalen Niederschlags- und Abflussmessstationen untersucht werden.
- > Die räumlich differenzierten Hochwasserverhältnisse sollen einerseits anhand der Resultate bestehender Hochwasserabschätzmethoden für Einzugsgebiete unterschiedlicher Grössenordnung beurteilt und verglichen werden. Andererseits sollen aber Ansätze verwendet werden, welche eine kausale, zeitliche und räumliche Informationserweiterung ermöglichen.
- > Die Auswirkungen der Klimaänderung auf die hochwasserhydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet Kander-Hondrich sollen quantitativ abgeschätzt und beurteilt werden.

## 1.6 Arbeitsschritte

Die in Kapitel 1.3 aufgeführten Punkte wurden in fünf verschiedene thematische Bereiche aufgeteilt, welche sich in die folgenden Arbeitsschritte strukturieren lassen (vgl. Abbildung 1.6):

- 1) Für das Einzugsgebiet der Kander werden aus den vorliegenden, digitalen Geodaten hydrologisch relevante Parameter und Gebietseigenschaften abgeleitet und miteinander verknüpft. Diese Datengrundlage ermöglicht eine räumlich detaillierte Modellierung der Abflussprozesse, mit welcher eine hoch aufgelöste **hochwasserhydrologische Raumgliederung** bestimmt werden kann. Anhand des Vergleichs zu den Hochwasserabschätzungen, welche für zahlreiche Teilräume und auf unterschiedlicher räumlicher Skala durchgeführt wurden, können die räumlichen Muster der hochwasserhydrologischen Verhältnisse plausibilisiert werden.
- 2) Neben der räumlichen Analyse der hochwasserhydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet Kander-Hondrich tragen die **Aufbereitung, Auswertung und Analyse von meteorologischen und hydrologischen Datenreihen** zum Systemverständnis des Untersuchungsgebietes bei. Gleichzeitig können durch Auswertung der im Einzugsgebiet vorhandenen und teilweise für mehr als 100 Jahre verfügbaren hydrologischen und meteorologischen Messreihen die Veränderungen bei verschiedenen hochwasserhydrologisch relevanten Parametern erfasst und beschrieben werden.  
Die bereitgestellten meteorologischen und hydrologischen Daten bilden zudem eine weitere Grundlage für die hydrologische Modellierung.
- 3) Unter Einbezug der Resultate aus den Untersuchungen zum **historischen Hochwassergeschehen** werden Aussagen zu den hydrologischen Verhältnissen im Zeitraum vor den Instrumentenmessungen ermöglicht. Die für diesen Teil benötigten Informationen zu den historischen Schadenereignissen stammen aus verschiedenen historischen Quellen (z.B. Chroniken).
- 4) Der Einsatz eines **hydrologischen Modells** ermöglicht die räumliche und zeitliche Informationserweiterung zum Wasserhaushalt und zu den Abflussverhältnissen im Einzugsgebiet und in dessen Teileinzugsgebieten (Punkt 4a). In der vorliegenden Untersuchung wird das hydrologische Modell vorwiegend für spezifische hochwasserhydrologische Auswertungen verwendet:

- > Die **Regionalisierungsmethode** VIVIROLI (2007) ermöglicht die hydrologische Modellierung von ungemessenen mesoskaligen Teileinzugsgebieten und dadurch eine räumliche Informationserweiterung bezüglich den hochwasserhydrologischen Verhältnissen (Punkt 4a).
- > Anhand von **Klimaszenarien**, welche die für den Untersuchungsraum zu erwartenden Veränderungen unter dem Einfluss der Klimaänderung bis ins Jahr 2050 abdecken, können mit Hilfe der hydrologischen Modellierung die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und die hochwasserhydrologischen Verhältnisse abgeschätzt werden (Punkt 4b).

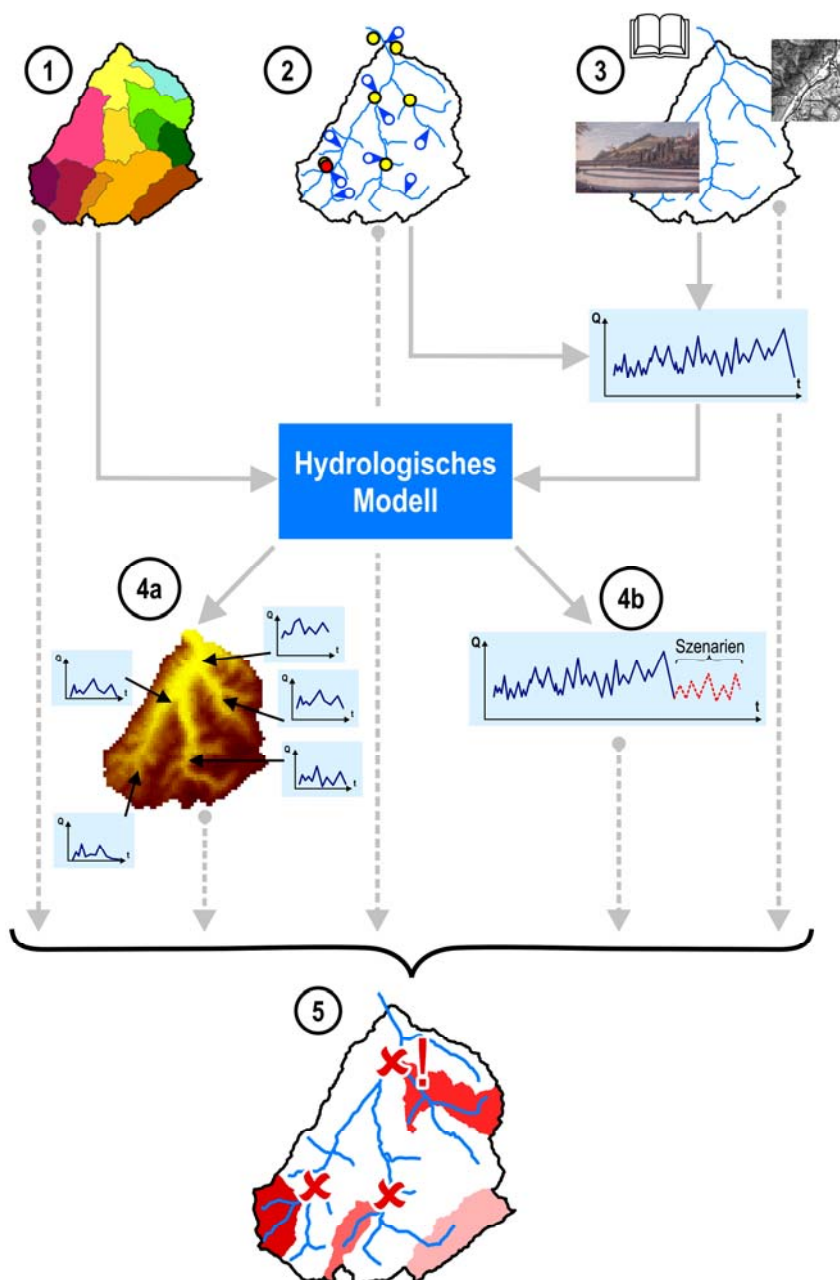


Abbildung 1.6: Struktur und Arbeitsschritte der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich.

- 5) Die Resultate der unter Punkt 1 bis 4 erläuterten Arbeiten werden zusammengetragen, miteinander verglichen und analysiert. Die darauf aufbauende **Auswertung** erfolgt auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen:
  - > **räumliche Skala:** Analysen auf Basis der Teileinzugsgebiete unterschiedlicher Grössenordnung oder für das gesamte Einzugsgebiet.
  - > **zeitliche Skala:** Auswertung verschiedener Parameter bezüglich den aufgetretenen und festgestellten Veränderungen und Entwicklungen für die beobachtete Periode oder für den Zeitraum der Klimaszenarien.

## 1.7 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in die folgenden fünf Teile bzw. in 24 Kapitel gegliedert:

- > **Teil I: Grundlagen**

Nach dem einleitenden Kapitel (Kapitel 1) werden im ersten Teil die Datengrundlagen (Kapitel 2), der Naturraum des Untersuchungsgebiets Kander-Hondrich bzw. die vorherrschenden hydrologischen und klimatologischen Verhältnisse charakterisiert (Kapitel 3 und 4). Daneben werden die verwendeten Methoden zur Abschätzung der Hochwasserabflüsse (Kapitel 5) und das eingesetzte hydrologische Modell (Kapitel 6) erläutert.
- > **Teil II: Die Hydrologie der Kander – gestern**

Der zweite Teil der Arbeit enthält die Resultate der Untersuchungen zu den klimatischen und hydrologischen Veränderungen im Einzugsgebiet Kander-Hondrich sowie im Berner Oberland während den letzten mehreren hundert Jahren. In Kapitel 7 wird zuerst auf die Ergebnisse der Untersuchungen zu den historischen Hochwasserereignissen seit 1500 eingegangen. Die hydrologische und klimatische Entwicklung, welche aus der Analyse der Messreihen für die letzten gut 100 Jahre abgeleitet werden kann, werden in Kapitel 8 und Kapitel 9 aufgezeigt und in Kapitel 10 miteinander verglichen. In Kapitel 11 wird auf die hydrologische Modellierung der langen meteorologischen Datenreihen und der daraus resultierenden räumlichen und zeitlichen Informationserweiterung zu den Hochwasserverhältnissen eingegangen. In einer abschliessenden Synthese zu diesem Teil (Kapitel 12) werden die wesentlichen Resultate aus allen Kapiteln zusammengefasst.
- > **Teil III: Die Hydrologie der Kander – heute**

Im dritten Teil der Arbeit werden die aktuellen hochwasserhydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet der Kander in unterschiedlicher räumlicher Differenzierung aufgezeigt. Das erste Kapitel (Kapitel 13) enthält die Resultate der Hochwasserabschätzungen für die mesoskaligen Teileinzugsgebiete, welche mit verschiedenen Ansätzen durchgeführt wurden. Im darauf folgenden Kapitel 14 wird auf das räumliche Muster, welches sich aus den Hochwasserabschätzungen mit verschiedenen Ansätzen für 99 kleine Teileinzugsgebiete ableiten lässt, eingegangen. Die Modellierung der dominierenden Abflussprozesse sowie deren hochwasserhydrologische Interpretation, welche auf Basis der kleinen Teileinzugsgebiete durchgeführt wurde, bildet den Inhalt von Kapitel 15. Im letzten Kapitel dieses Teils (Kapitel 16) werden alle zentralen Ergebnisse in einer Synthese zusammengefasst.
- > **Teil IV: Die Hydrologie der Kander – morgen**

Auf die Auswirkungen verschiedener Klimaszenarien auf ausgewählte hydrologische Kenngrößen wird im vierten Teil dieser Arbeit eingegangen. Während in Kapitel 17 und Kapi-

tel 18 die verwendeten Methoden sowie der aktuelle Stand des Wissens erläutert werden, wird in Kapitel 19 auf die Validierung der erstellten Modellkaskade eingegangen. In Kapitel 20 werden die hydrologischen Auswirkungen des Gesamteinzugsgebietes gegenüber systematischen Veränderungen von Niederschlag und Temperatur anhand sogenannter Sensitivitätsanalysen aufgezeigt. Das nachfolgende Kapitel 21 enthält die Resultate der hydrologischen Modellierung realistischer Klimaszenarien. In der Synthese (Kapitel 22) folgt die Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem vierten Teil.

> **Teil V: Synthese**

Der abschliessende fünfte Teil der Arbeit fasst die Resultate aus allen Kapiteln in einer Synthese zusammen. Während Kapitel 23 die Diskussion bzw. die wesentlichen Schlussfolgerungen enthält, wird in Kapitel 24 ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf gegeben.



## 2 Untersuchungsgebiet

In diesem Kapitel wird das untersuchte Einzugsgebiet Kander-Hondrich charakterisiert. Während in Kapitel 2.1 eine Lokalisierung und eine allgemeine Beschreibung erfolgt, wird in Kapitel 2.2 auf die hydrologische Gliederung, welche als Basis für die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Auswertungen verwendet wurde, eingegangen. Neben der Beschreibung und hydrologischen Beurteilung der geologischen und pedologischen Verhältnisse sowie der Landnutzung (Kapitel 2.3 bis 2.5) erfolgt in Kapitel 2.6 die Charakterisierung des Einzugsgebietes anhand von hydrologisch relevanten Gebietskennwerten, welche zudem im gesamtschweizerischen Kontext eingeordnet und verglichen werden.

### 2.1 Allgemeine Beschreibung

Der Name «Kander» entstammt dem keltischen «candara» und bedeutet «die Weisse» bzw. «die Glänzende», was ein Hinweis auf die zeitweise intensive helle Trübung ist, welche durch den grossen Anteil an Gletscherschmelzwasser hervorgerufen wird (REICHEN ET AL. 2001).

Das Einzugsgebiet der Kander liegt am westlichen Alpennordhang im Berner Oberland, Schweiz (Abbildung 2.1) und entwässert insgesamt rund einen Fünftel des Einzugsgebietes der Aare bis Thun. Sowohl die mittlere Höhe (1833 m ü.M., SWISSTOPO 1998B) wie auch der Vergletscherungsgrad (rund 7%, SWISSTOPO 1998B) zeigen auf, dass es sich bei der Kander, deren Einzugsgebietsfläche rund 496 km<sup>2</sup> beträgt, um ein typisch alpines und ein gemäss BECKER & NEMEC (1987) mesoskaliges Einzugsgebiet handelt.

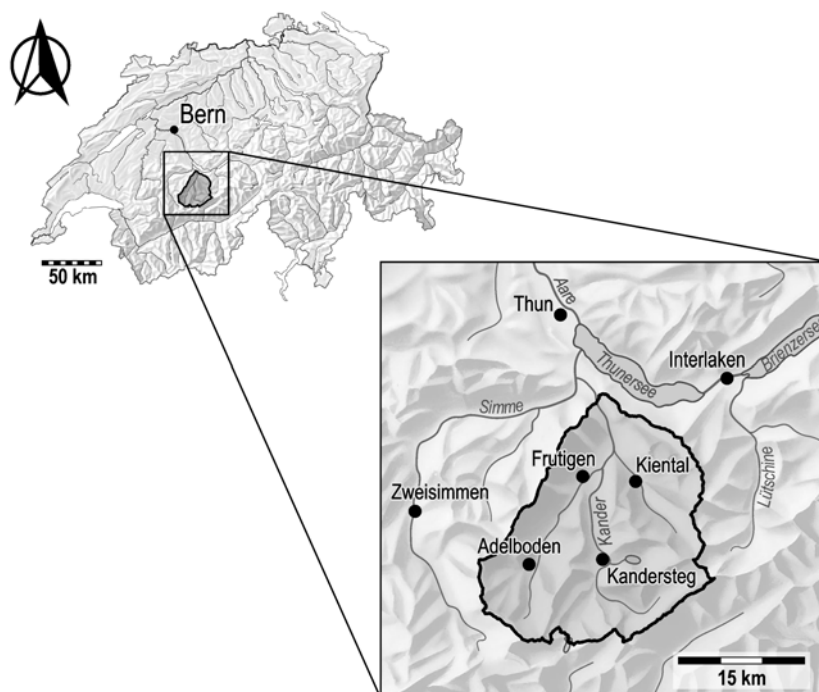


Abbildung 2.1: Lage des untersuchten Einzugsgebietes Kander-Hondrich im Berner Oberland, Schweiz (Relief: SWISSTOPO 2007)

Das Untersuchungsgebiet umfasst das hydrologische Einzugsgebiet der Kander bis zur Abflussmessstation in Hondrich. Es lässt sich im Wesentlichen in die vier folgenden Teileinzugsgebiete unterteilen (vgl. Kapitel 2.2): Engstlige, Kander, Chiene und Suld, welche eine Einzugsgebietsfläche zwischen 25 km<sup>2</sup> und 188 km<sup>2</sup> aufweisen. Die wichtigsten topographischen und geographischen Informationen zum Untersuchungsgebiet können auch den Übersichtskarten sowie der Fotodokumentation in Anhang A entnommen werden. Die nachfolgend aufgeführten Angaben beziehen sich ausschliesslich auf das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich, die Angaben für die verschiedenen Teileinzugsgebiete (vgl. Kapitel 2.2) sind in Anhang B enthalten.

Aus der **hypsographischen Kurve** in Abbildung 2.2 a), welche die prozentuale Höhenverteilung des Einzugsgebietes darstellt, wird ersichtlich, dass sich das Einzugsgebiet über einen Höhenbereich von über 3000 m erstreckt. Während die höchsten Erhebungen im Gasteretal liegen und bis zu einer Höhe von 3698 m ü.M. (Balmhorn) reichen, liegt der tiefste Punkt von 647 m ü.M. bei der Abflussmessstation in Hondrich. Aus dem Verlauf der Kurve wird zudem ersichtlich, dass die Höhenzonen zwischen 1200 und 2500 m ü.M. den grössten Teil am Einzugsgebiet ausmachen.

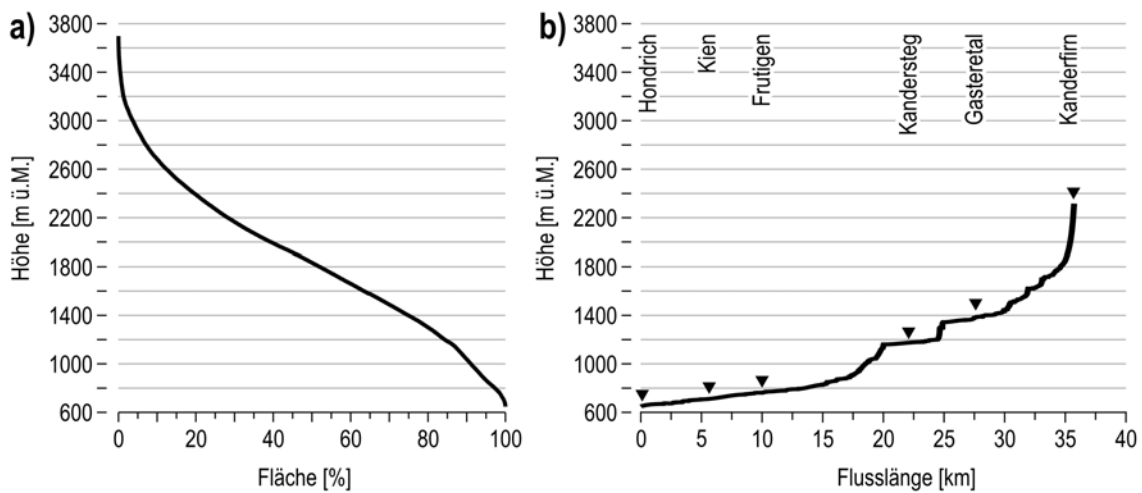


Abbildung 2.2: Hypsographische Kurve (a) und Flussprofil (b) der Kander (Einzugsgebiet bis Hondrich, Daten: SWISSTOPO 1996, 1998A).

In Abbildung 2.2 b) ist zudem das **Profil des Hauptflusses** bis zur Messstation in Hondrich dargestellt, welches sich wie folgt beschreiben lässt: Die Kander entspringt dem Kanderfirn im hinteren Gasteretal auf rund 2300 m ü.M. Der hier noch weitgehend unverbaute und natürliche Flusslauf führt via Gasteretal über eine Steilstufe (Chluse) nach Kandersteg. Kurz nach Kandersteg folgt eine weitere markante Steilstufe, welche durch ein Kraftwerk wasserwirtschaftlich genutzt wird, worauf der nun weitgehend verbaute Flusslauf nach Frutigen durch das Haupttal bis zur Messstation in Hondrich führt. Zwischen Frutigen und Hondrich münden in Abständen von wenigen Kilometern die Engstlige, die Chiene sowie die Suld in die Kander.

Kurz unterhalb der Messstation in Hondrich folgt der Zusammenfluss mit der Simme, wonach die Kander durch den so genannten «Kanderdurchstich» (vgl. Kapitel 1.1) fliesst und schliesslich am Kanderdelta in den Thunersee mündet.



## 2.2 Hydrologische Gliederung

Die Gliederung des Untersuchungsgebietes Kander-Hondrich in Teileinzugsgebiete erfolgte ausschliesslich auf Grund hydrologischer Aspekte: Einerseits anhand der im Einzugsgebiet vorliegenden hydrologischen Messstationen (Kapitel 2.2.1), andererseits unter Einbezug der bestehenden Gliederung nach Basis- und Bilanzierungsgebieten (Kapitel 2.2.2). Die erste Gliederung bildet die räumliche Basis für alle im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Auswertungen und Modellierungen und wurde gleichzeitig zur Bestimmung der Schlüsselräume verwendet. Daneben konnte die zweite Gliederung für die Charakterisierung der Gebietseigenschaften und der hydrologischen Verhältnisse eingesetzt werden, da bereits verschiedene Auswertungen auf Basis dieser räumlichen Einteilung durchgeführt wurden (vgl. BAFU, SWISSTOPO 1992-2010).

### 2.2.1 Differenzierung nach mesoskaligen Teileinzugsgebieten

Abbildung 2.3 zeigt, in welche mesoskaligen Teilräume ( $> 25 \text{ km}^2$ ) das Einzugsgebiet der Kander für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen unterteilt wurde.

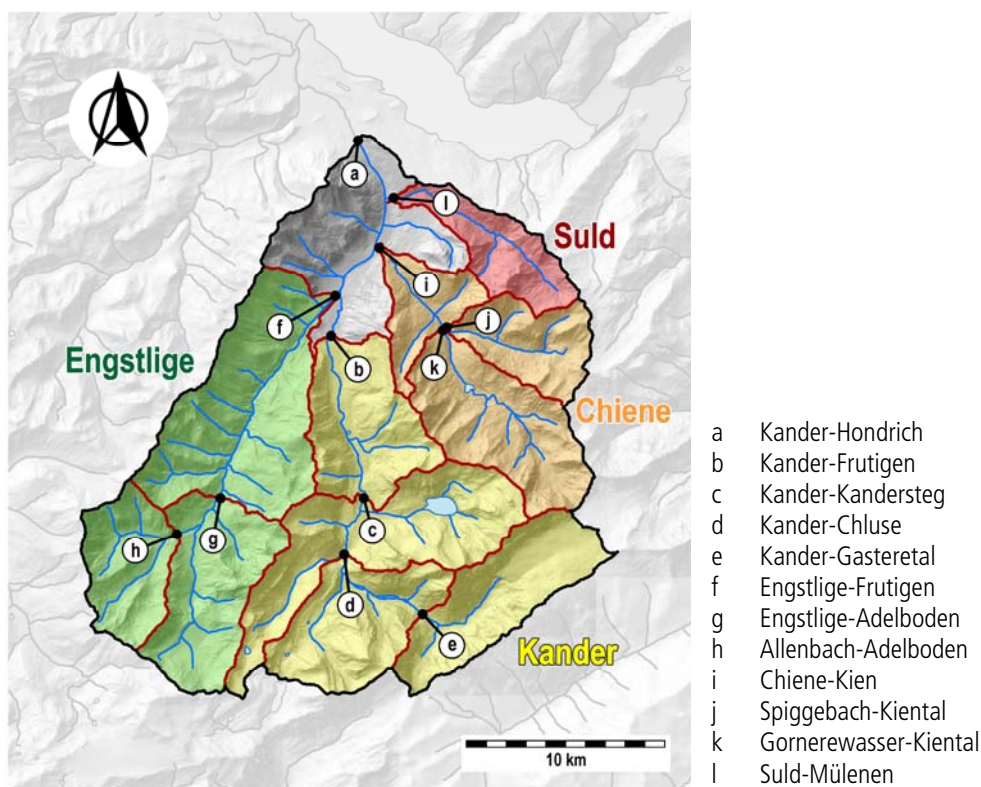


Abbildung 2.3: Unterteilung des untersuchten Einzugsgebietes Kander-Hondrich in elf mesoskalige Teileinzugsgebiete als Basis für die durchgeführten Untersuchungen.

In dieser Darstellung ist der Pegel des jeweiligen Gebietsausflusses, welcher die hydrologische Begrenzung des Teileinzugsgebietes definiert, mit einem Punkt markiert. Es ist darauf zu achten, dass in diesem System ein untersuchtes Teileinzugsgebiet jeweils die ganze Fläche, also auch die oberliegenden Teileinzugsgebiete umfasst. So setzt sich z.B. das Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen aus den Teileinzugsgebieten Kander-Kandersteg (Abbildung 2.3, Punkt c), Kander-Chluse (Punkt d)

sowie Kander-Gasteretal (Punkt e) zusammen. Alle Auswertungen wurden entsprechend für die ganze Fläche des Teileinzugsgebietes durchgeführt, worauf beim Vergleich der verschiedenen Resultate geachtet werden muss (vgl. Kapitel 13). Dies ist von Bedeutung, weil sich die Grösse der verschiedenen Teileinzugsgebiete deutlich unterscheiden kann.

Insgesamt wurden unter Anwendung nachfolgender Kriterien **elf Teileinzugsgebiete** definiert:

- > In erster Linie orientiert sich die Gliederung **an den im Untersuchungsgebiet vorhandenen Abflussmessstationen** (vgl. Kapitel 3.2), wodurch sich sechs Teileinzugsgebiete unterscheiden lassen.
- > Bei der Unterteilung von weiteren Teileinzugsgebieten wurde darauf geachtet, dass die Einzugsgebietsgrösse **nicht kleiner als 25 km<sup>2</sup>** ist. Dies vor allem im Hinblick auf die für die Teilräume vorgesehenen hydrologischen Modellierungen, welche gemäss den Empfehlungen von VIVIROLI (2007) nur für Einzugsgebiete von mehr als 25 km<sup>2</sup> durchgeführt werden sollten.
- > Gleichzeitig orientiert sich die Einteilung aber auch an den **natürlichen hydrologischen Grenzen**. Das bedeutet, dass darauf geachtet wurde, dass mit der vorgenommenen Abgrenzung die Teilräume hydrologisch vollumfänglich erfasst sind, weshalb der Gebietsauslass jeweils an der Mündung zum nächst grösseren Fließgewässer gesetzt wurde.

Auf der Ebene der vier Teileinzugsgebiete erster Ordnung (Engstlige-Frutigen, Kander-Frutigen, Chiene-Kien, Suld-Mülenen) wurden verschiedene Auswertungen durchgeführt, auf welche in den folgenden Kapiteln und Teilen vertieft eingegangen.

Neben diesen elf grösseren Teileinzugsgebieten lässt sich im Untersuchungsgebiet eine Vielzahl kleiner (Wildbach-)einzugsgebiete mit Einzugsgebietsflächen zwischen 1 und 30 km<sup>2</sup> ausscheiden. Diese wurden von ZGRAGGEN (2009) definiert und auf die Hochwasserverhältnisse hin untersucht (vgl. Kapitel 14.2).

## 2.2.2 Bestehende hydrologische Gliederungen

Als Grundlage für eine landesweite hydrologische Raumgliederung haben BREINLINGER ET AL. (1992) im Rahmen des Hydrologischen Atlases der Schweiz (BAFU, SWISSTOPO 1992-2010) ein eigenes System hergeleitet. Dieses umfasst drei Ebenen, welche sich auf Grund der räumlichen Skala unterscheiden:

- > **Grosse Einzugsgebiete:** Flusseinzugsgebiete von typischerweise mehreren 1000 km<sup>2</sup> Grösse.
- > **Bilanzierungsgebiete** (vgl. Abbildung 2.4 a): Grössere Einzugsgebiete mit Flächen zwischen 100 und 150 km<sup>2</sup>.
- > **Basisgebiete** (vgl. Abbildung 2.4 b): Kleinere Einzugsgebiete zwischen 30 und 50 km<sup>2</sup>.

Der Vorteil dieser räumlichen Gliederung liegt darin, dass Auswertungen, welche innerhalb einer hierarchischen Ebene für verschiedene Einzugsgebiete durchgeführt werden, auf Grund der homogenen Gebietsgrösse jeweils direkt miteinander vergleichbar sind (vgl. BREINLINGER 1996). Die Unterteilung kann zudem von den unteren Ebenen in eine der oberen überführt werden, was einer Aggregation der Flächeninformation entspricht. Zu beachten ist jedoch, dass sich diese räumliche Gliederung vorwiegend an den natürlichen hydrologischen Einzugsgebieten und nicht an den Standorten der vorhandenen Messstationen orientiert.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Bilanzierungs- und Basisgebiete hauptsächlich für die Charakterisierung der Gebietseigenschaften (vgl. Kapitel 2.6) sowie deren Einordnung in den gesamtschweizerischen Kontext verwendet. Zu diesem Zweck konnte auf die bestehenden gesamtschweizerischen Untersuchungen und Auswertungen von BREINLINGER ET AL. (1992) bzw. SCHÄDLER & WEINGARTNER (2002) zurückgegriffen werden.

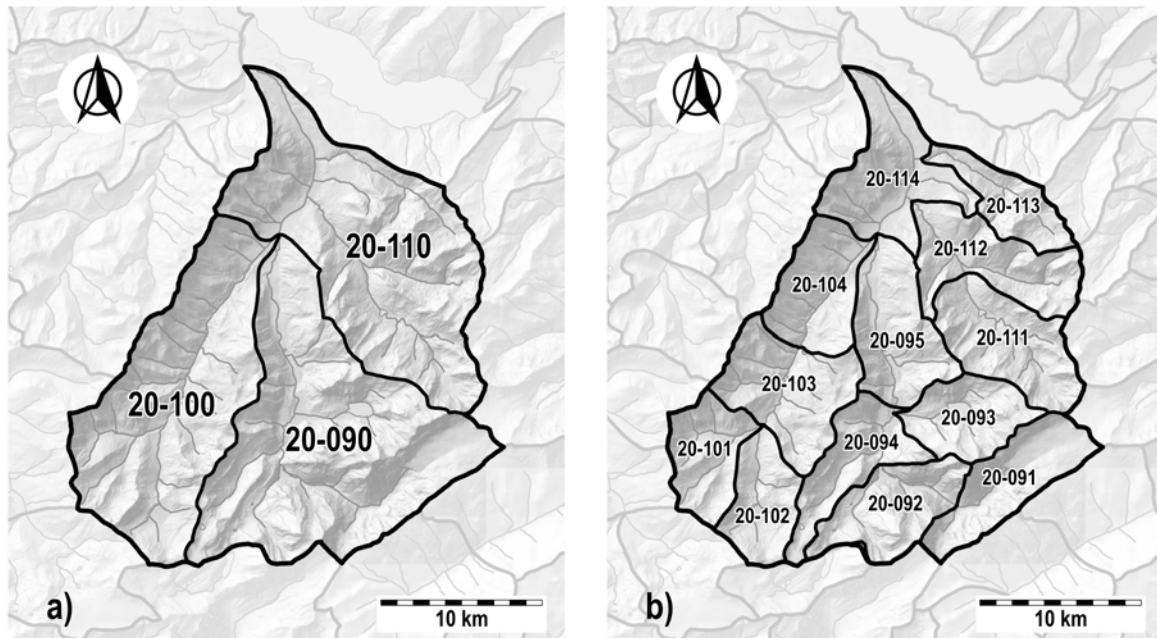


Abbildung 2.4: Bilanzierungsgebiete (a) und Basisgebiete (b) im Einzugsgebiet der Kander (nach BREINLINGER ET AL. 1992)

## 2.3 Geologie

### 2.3.1 Grundzüge

Detaillierte geologische Untersuchungen im Einzugsgebiet der Kander sind für zahlreiche Lokalitäten verfügbar (z.B. FURRER 1938, BAER 1959, ZWAHLEN 1993). Diese beleuchten jedoch meist nur einen spezifischen Teilaspekt. In den Arbeiten von SOOM (2004) und ADRIAN & SCHULER (1977) werden hingegen die geologischen Verhältnisse in der Übersicht dargestellt und bilden deshalb die Grundlage für die folgenden Ausführungen. Auf Grund der hydrologischen Bedeutung konzentriert sich die Beschreibung mehrheitlich auf die vorherrschenden lithologischen Verhältnisse (Abbildung 2.5).

Der Felsuntergrund der Kander setzt sich zum grössten Teil aus **Sedimentgesteinen** (Trias-Tertiär) bzw. Flyschsandsteinen und -schiefern (Oberkreide-Alttertiär) sowie am südöstlichen Rand aus **kristallinen Intrusiva** prätriadischen Alters zusammen. Die Sedimentpakete entstammen Schichten, die während der alpinen Gebirgsbildung von ihrem ursprünglichen Ablagerungsort abgeschert und verfrachtet wurden. Aus der gleichzeitig stattfindenden Verfaltung resultierte ein heute zu beobachtendes, allgemeines Schichtstreichen von Nordosten nach Südwesten (SOOM 2004).

Die einzelnen Formationen gehören verschiedenen tektonischen Einheiten an, insbesondere den Sedimenten der Préalpes und des Helvetikums sowie dem Kristallin des Helvetikums (BITTERLI ET AL.

2004). Von Nordwesten nach Südosten sind dies: Niesen-Decke, Wildhorn-Decke, Diableres-Gellihorn-Decke, Parautochthon, Aarmassiv (Soom 2004).

Die lithologischen Grundzüge des untersuchten Einzugsgebietes werden anhand von Abbildung 2.5 (BFS 2004c) deutlich sichtbar: Während die östliche Region des Einzugsgebietes, welche vorwiegend zum Teileinzugsgebiet der Engstlige gehört, aus bis zu mehr als 1000 m mächtigem **Flysch** (= Wechsellagerungen aus Sandsteinplatten und Tonschiefern) aufgebaut ist, sind in den übrigen Regionen verbreitet massige und verschieferte **Kalke** sowie **Mergelschiefer und -kalke** anzutreffen, welche aber auf die hydrologische Geschlossenheit des Einzugsgebietes keinen Einfluss haben. Das im Südosten gelegene Gasteretal verläuft ab einer Höhe von etwa 1500 m ü.M. im südlichen Teil in **Granit und Gneis**, der Felsuntergrund auf der Nordseite des Tales besteht ebenfalls aus massigen Kalken.

Als weiteres prägendes geologisches Element treten im Untersuchungsgebiet verbreitet Ablagerungen der verschiedenen **eiszeitlichen Vergletscherungen** auf. Dabei handelt es sich in erster Linie um Moränenmaterial, welches bis auf eine Höhe von ca. 1000 m ü.M. an den Talflanken anstehend ist und vom Kanderfirn sowie vom Strubel- und Gamchigletscher (vgl. Kapitel 2.5) abgelagert wurde.

Die nach dem Rückzug der Gletscher verbreitet einsetzenden Hangprozesse führten schliesslich auch zu Ablagerungen von **Bergsturzmaterial**, welche teilweise von sehr grossem Ausmass sind (z.B. Bergsturz von Kandersteg, vgl. BECK 1929, BECK 1952). Gleichzeitig wurden die Talböden durch **fluviale Ablagerungen** aufgefüllt, welche heute vor allem entlang des Haupttales unterhalb Kandersteg im Talboden als Schotter und Stillwassersedimente anzutreffen sind. Daneben bildeten sich auch zahlreiche und zum Teil grössere Schwemmfächer, welche in Abbildung 2.5 ebenfalls als fluviale Ablagerungen dargestellt sind.

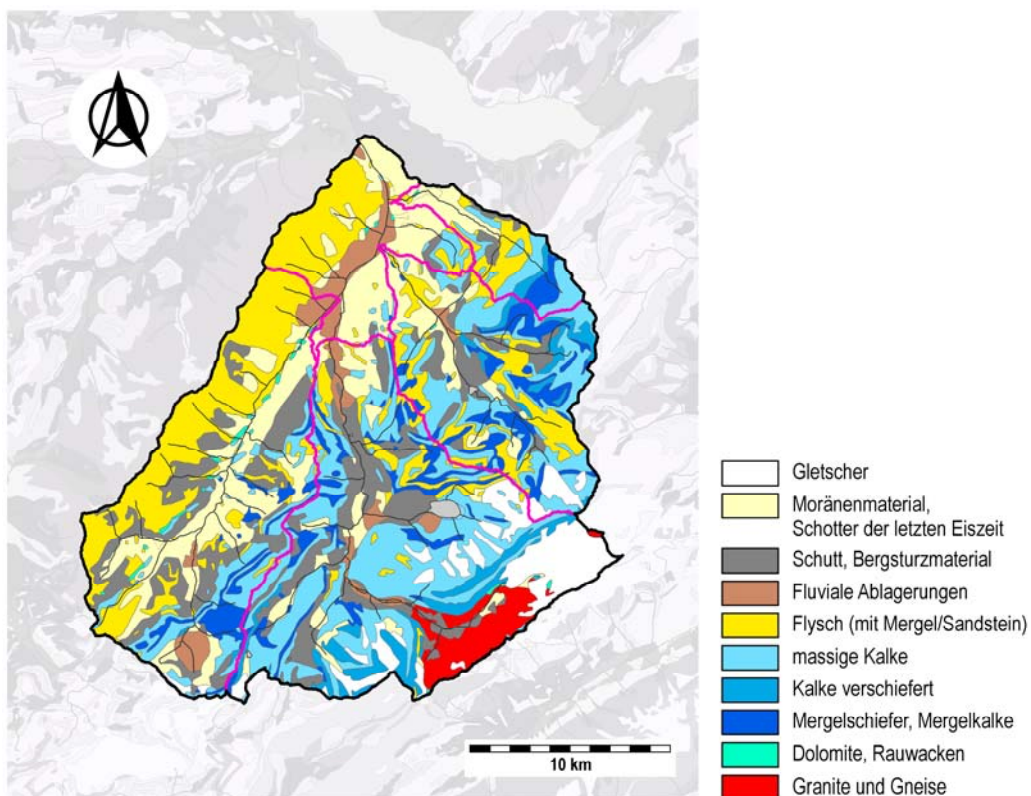


Abbildung 2.5: Lithologische Karte für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich (Daten: BFS 2004c)

## 2.3.2 Hydrogeologische Beurteilung

Die hydrologische Beurteilung der geologischen Verhältnisse erfolgt in Anlehnung an die Klassierung von MAGNIN (1990) (Tabelle 2.1). Wie auch KÖLLA (1986) in ihren Arbeiten erwähnt, kann der geologische Untergrund einen wesentlichen Einfluss auf die hydrologischen Verhältnisse und insbesondere auf die Hochwasserabflüsse eines Einzugsgebiets haben. Entscheidende Einflussgrösse hierbei stellt die **Permeabilität des Muttergesteins** dar. Weil die Durchlässigkeit des geologischen Untergrunds jedoch innerhalb desselben Materials stark variieren kann, muss diese mit entsprechender Vorsicht beurteilt werden. Dies wird bei der Einteilung der geotechnischen Einheiten in die Durchlässigkeitsklassen nach MAGNIN (1990) insofern berücksichtigt, als nur drei grobe Klassen verwendet werden.

Tabelle 2.1: Permeabilitätsklassen gemäss Geotechnischer Karte (nach MAGNIN 1990)

Geotechnische Einheiten	Permeabilität
Schotter der letzten Eiszeit, Bergsturzmaterial, Gehängeschutt, massige Kalke, Kalke verschiefert, Dolomite, Rauwacken	hoch
Moränenmaterial, fluviale Ablagerungen, Mergelschiefer, Mergelkalke, Granite, Gneise	mittel bis gering
Flysch mit Mergel und Sandstein	sehr gering

Unter Einbezug dieser Klassierung können die geologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet Kander-Hondrich wie folgt beurteilt werden:

Für die Bereiche im Nordwesten, welche hauptsächlich aus Flysch aufgebaut sind, werden grundsätzlich sehr geringe Durchlässigkeiten erwartet. Im südlichen sowie im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes dominieren in den Regionen mit vorwiegend massigen (und teilweise zerklüfteten bzw. verkarsteten) Kalken hohe Permeabilitäten. Die meisten Tallagen weisen auf Grund der dort vorherrschenden fluvialen Ablagerungen mittlere bis geringe Permeabilitätswerte auf. Die Permeabilität der Granite und Gneise im Gasteretal fällt ebenfalls in die Klasse «mittel bis gering»; obschon bei dieser Geologie sehr geringe Permeabilitätswerte zu erwarten sind, überprägt die vorhandene Zerklüftung des Gesteins die zu erwartende Durchlässigkeit in dieser Region.

## 2.4 Pedologie

### 2.4.1 Grundzüge

Eine Beurteilung der pedologischen Verhältnisse für das ganze Einzugsgebiet ist auf Grund der Datenlage einzig anhand der **Bodeneignungskarte der Schweiz** (BFS 2004A) möglich. Diese Datengrundlage im Massstab 1:200'000 weist die standortbedingten potentiellen landwirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten aus, weshalb die Kartierungseinheiten nicht alle pedologischen Einzelheiten sowie deren kleinräumige Variationen ausweisen. In der Karte werden nur die grösseren Raumeinheiten unterschieden, innerhalb derer verschiedene Bodentypen mit grösserer Wahrscheinlichkeit vorkommen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die räumliche Variabilität der damit einhergehenden Bodeneigenschaften (wie z.B. Bodentiefe, Wasserspeichervermögen), pro Kartie-

zungseinheit als gering einzustufen ist, da sich die verschiedenen Bodentypen in diesen Parametern weniger stark unterscheiden.

Im Einzugsgebiet der Kander ist grundsätzlich ein breites Spektrum an Bodentypen anzutreffen, welche auf Grund der stark variierenden bodenbildenden Faktoren (Relief, Gestein, Mikroklima, Bodenwasser, Vegetation und Tierwelt) eine hohe räumliche Variabilität aufweisen dürften, was gemäss VEIT (2002) für alpine Lagen typisch ist.

Vorwiegend vertreten sind im Untersuchungsgebiet die Böden der **Alpinen Kalk-Berglandschaften** (Abbildung 2.6). Dabei handelt es sich in erster Linie um Lithosole, Rendzinen oder Regosole. Diese in der Regel sehr flachgründigen Bodentypen sind durch einen hohen Skeletthalt gekennzeichnet. Vor allem entlang der so genannten «Niesenkette» am nordwestlichen Rand des Untersuchungsgebietes zwischen dem Albristhorn bei Adelboden und dem Niesen (vgl. Anhang A), sind aber auch Bodentypen der **Alpinen Flysch-Landschaften** verbreitet: Neben den schon erwähnten Bodentypen sind hier zusätzlich auch Cambisole und Gleysole vertreten, welche etwas tiefgründiger sowie weniger skelettreich sind.

In den Tallagen sind auf den jüngeren fluvialen Sedimenten verbreitet **Fluvisole** aber auch **Gleysole** anzutreffen, was auf stellenweise vorhandenes Stauwasser hinweist. Grundsätzlich ist in diesen Lagen von etwas tiefgründigeren Böden auszugehen, die aber auch sehr skelettreich sein können. Im hinteren Gasteretal sind in einzelnen Bereichen Böden der Alpinen Kristallinen Berglandschaft vertreten. Für diese Regionen kann davon ausgegangen werden, dass es sich vorwiegend um sehr flachgründige und extrem skelettreiche Ranker handelt.

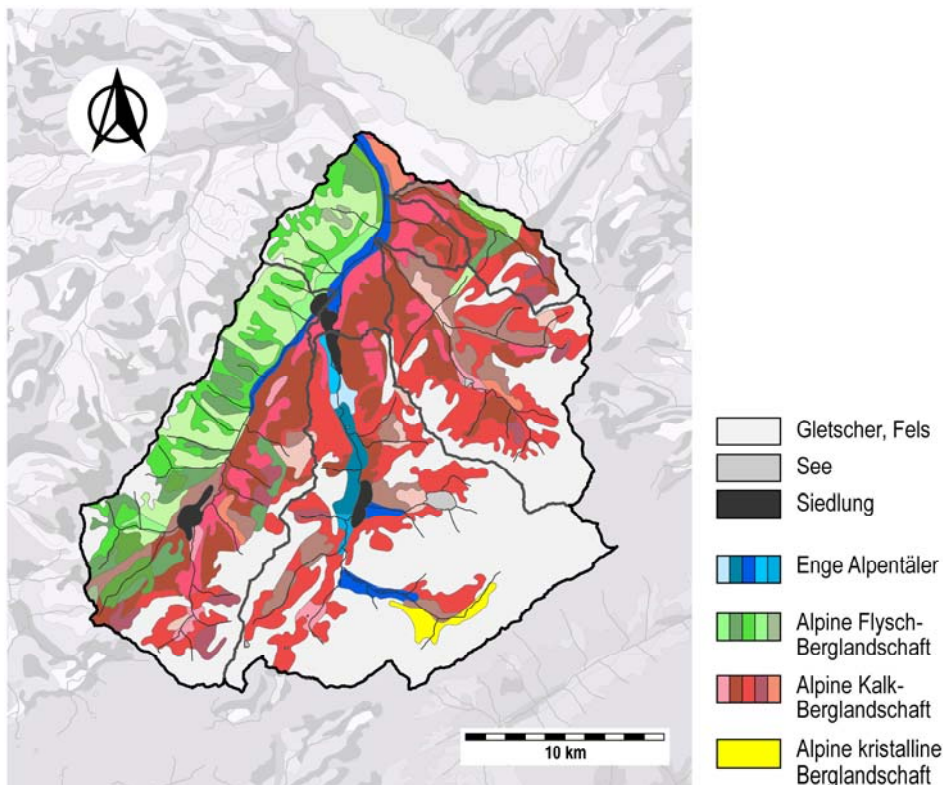


Abbildung 2.6: Bodeneignungskarte für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich. (Daten: BFS 2004A). Die verschiedenen Farbabstufungen zeigen, dass die jeweilige physiographische Einheit mehrere Bodentypen umfasst.

In den Teileinzugsgebieten lassen sich die folgenden Ausprägungen erkennen (Abbildung 2.6):

- > **Engstlige-Frutigen:** In diesem Einzugsgebiet sind vorwiegend die Bodentypen Rendzina, Regosol und Lithosol verbreitet. An den südostexponierten Hängen treten verbreitet auch Regosole sowie Cambisole auf. An den nordwestexponierten Hanglagen sind etwas flachgründigere und wasserdurchlässigere Böden zu erwarten als an den südexponierten Hängen. Insgesamt ist bei diesem Einzugsgebiet die grösste Bodenvielfalt vertreten.
- > **Kander-Frutigen:** Vorwiegend treten in diesem Einzugsgebiet sehr flachgründige und extrem skelettreiche Lithosole, Rendzinen und Regosole auf. Auf Grund der relativ weiten Talböden, die gegenüber den anderen Teileinzugsgebieten deutlich ausgeprägter sind, kommen in diesem Einzugsgebiet verbreitet auch Böden auf feinkörnigen Alluvionen und Schuttkegeln vor, wobei es sich vorwiegend um Fluvisole, Regosole und Ranker handelt.
- > **Chien-Kien:** Im Einzugsgebiet der Chiene kommen fast ausschliesslich die Bodentypen der Alpenen Kalk-Berglandschaften vor (Lithosol, Regosol und Rendzina). Diese werden als sehr flach, skelettreich und als normal wasserdurchlässig bezeichnet.
- > **Suld-Mülenen:** In diesem Einzugsgebiet herrschen ebenfalls die Böden der Alpenen Kalk-Berglandschaften (Rendzina, Regosol, Lithosol) vor. Da aber auch Bodentypen der Alpenen Flysch-Berglandschaften vertreten sind, können auch Cambisole und Gleysole auftreten.

## 2.4.2 Bodenhydrologische Beurteilung

Im Rahmen einer bodenhydrologischen Beurteilung sind von den verfügbaren Bodeneigenschaften die Parameter «**Wasserdurchlässigkeit**» und «**Wasserspeichervermögen**» von vorrangigem Interesse (vgl. ASCHWANDEN 1996). Sie werden deshalb an dieser Stelle noch etwas ausführlicher dargestellt. Abbildung 2.7 a) zeigt die prozentualen Anteile der bodenbedeckten Fläche des gesamten Untersuchungsgebietes Kander-Hondrich an den verschiedenen Kombinationen der beiden hydrologisch bedeutsamen Bodeneigenschaften.

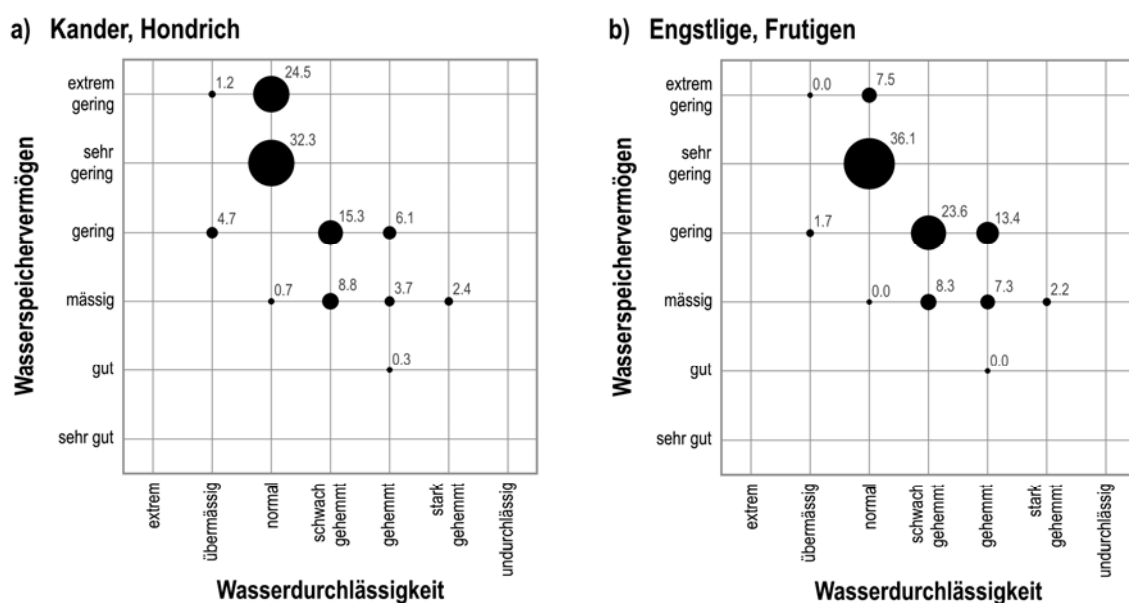


Abbildung 2.7: Flächenanteile der bodenbedeckten Flächen an den verschiedenen Parameterkombinationen von Wasserdurchlässigkeit und Wasserspeichervermögen (a: Kander-Hondrich, b: Engstlige-Frutigen; Daten: BFS 2004A)

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die Kombinationen, welche im oberen rechten Bereich dieser Darstellung liegen, zu einer höheren Abflussbereitschaft führen. Falls die Auswertung zu einer gehäuften Verteilung in der unteren linken Ecke führt, ist im entsprechenden Einzugsgebiet eine eher moderate Abflussbereitschaft zu erwarten. Für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich zeigt die Auswertung Bodentypen, welche vorwiegend durch eine normale Wasserdurchlässigkeit und ein sehr geringes bis extrem geringes Wasserspeichervermögen gekennzeichnet sind.

In Abbildung 2.7 b) ist dieselbe Auswertung für das Teileinzugsgebiet Engstlige-Frutigen dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Böden in diesem Teileinzugsgebiet zwar ein leicht grösseres Wasserspeichervermögen aufweisen, jedoch etwas weniger durchlässig sind. Dies bedeutet, dass in dieser Region auf Grund der gehemmten Infiltration bei intensiven Starkniederschlägen die Abflussbildung etwas schneller ablaufen könnte.

Aus der Zusammenstellung in Abbildung 2.7 wird ersichtlich, dass im Untersuchungsgebiet **vorwiegend normal wasserdurchlässige Böden mit sehr geringem Wasserspeichervermögen** anzutreffen sind: Mehr als die Hälfte der bodenbedeckten Fläche weist eine normale Wasserdurchlässigkeit und gleichzeitig ein «sehr geringes» bis «extrem geringes» Wasserspeichervermögen auf.

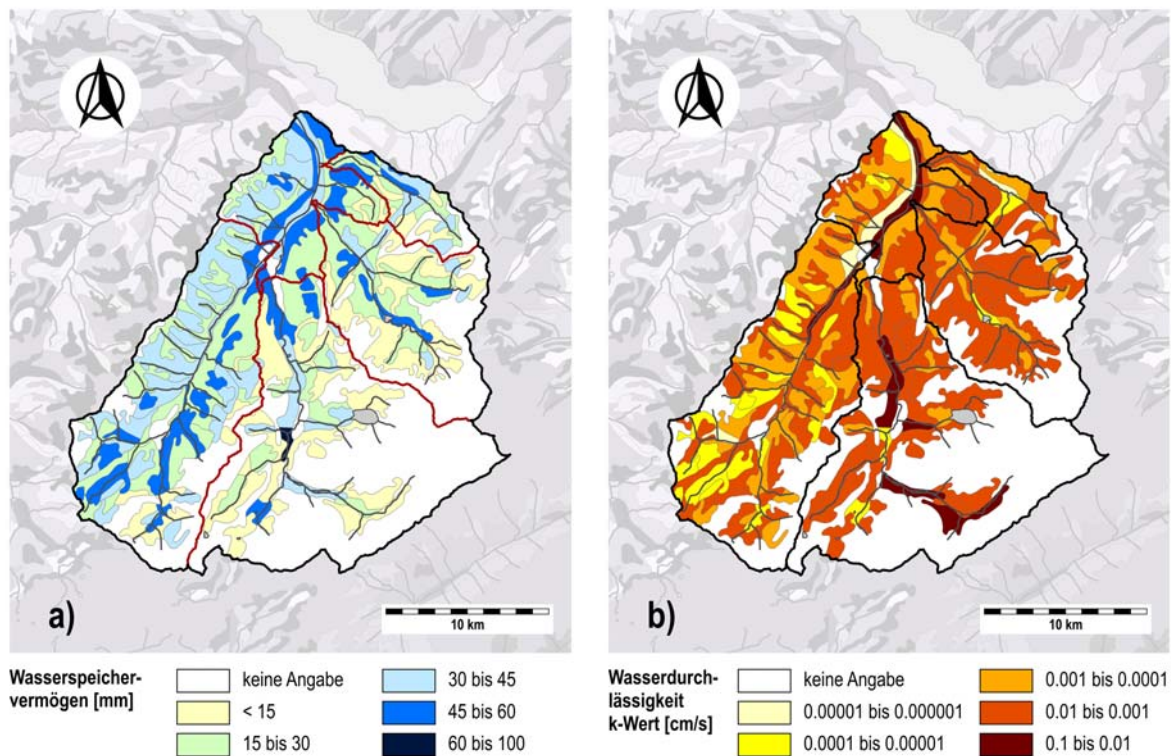


Abbildung 2.8: Räumliche Verteilung des Wasserspeichervermögens (a) und der Wasserdurchlässigkeit (b) der bodenbedeckten Flächen. (Daten: BFS 2004A)

Bezogen auf die einzelnen Teileinzugsgebiete ist folgendes Bild zu beobachten, welches auch anhand der beiden Karten in Abbildung 2.8 verdeutlicht wird: Die Böden im Teileinzugsgebiet **Engstlige-Frutigen** weisen mittlere bis grössere Wasserspeichervermögen auf, sind aber gleichzeitig weniger wasserdurchlässig. Dieser Gegensatz ist besonders im hinteren Teil des Einzugsgebietes deutlich zu erkennen und dürfte sich in einer raschen Abflussbereitschaft bzw. einer hohen Hochwasserdisposition äussern. Beim Teileinzugsgebiet **Kander-Frutigen** ist ein reduziertes Wasserspei-



chervermögen bei normaler Wasserdurchlässigkeit zu beobachten. Stellenweise treten hier aber auch sehr durchlässige Böden auf, die zum Teil ein nur geringes Wasserspeichervermögen besitzen. In diesem Einzugsgebiet ist deshalb im Hochwasserfall von einer verzögerten Abflussbereitschaft auszugehen. Auch bei der **Chiene-Kien** ist ein ähnliches Muster zu beobachten. Das Teileinzugsgebiet **Suld-Mülenen** weist ein Muster auf, das zwischen den beiden Ausprägungen liegt.

## 2.5 Landnutzung

### 2.5.1 Grundzüge

Die Landnutzung im Untersuchungsgebiet wurde anhand der digital verfügbaren sogenannten «**Primärflächen**» (SWISSTOPO 1998B) beurteilt (Abbildung 2.9). In Abbildung 2.10 sind die verschiedenen Kategorien nach prozentualen Anteilen am Gesamteinzugsgebiet sowie nach absoluten Flächenbeträgen pro Höhenzone dargestellt. Für diese Auswertung und Darstellung wurden verschiedene der detailliert verfügbaren Landnutzungskategorien zusammengefasst.

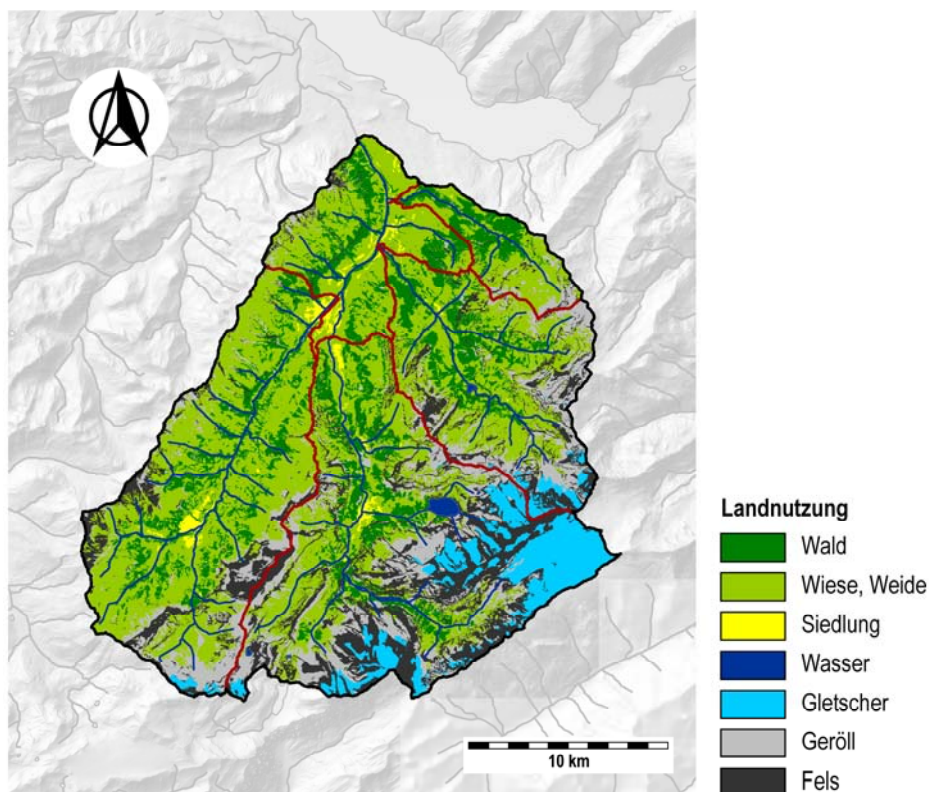


Abbildung 2.9: Landnutzung für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich, dargestellt anhand der Primärflächen. (Daten: SWISSTOPO 1998B)

Insgesamt zeigt sich, dass die Landnutzung im Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich durch die Kategorien **Wiese/Weide** und **Wald** dominiert wird. Aber auch die Kategorien Fels und Geröll machen zusammen noch über 30% der Landnutzung aus. Im Gegensatz zu älteren Angaben, welche z.B. im hydrologischen Jahrbuch (BAFU 2009B) enthalten sind, beträgt der Gletscheranteil bei dieser aktuelleren Auswertung nur noch 6.4%.

Die flächenmässig umfangreichsten Höhenzonen stellen diejenigen zwischen 1000 und 2500 m ü.M. dar. Sie sind ebenfalls vorwiegend durch die Landnutzungen «Weiden/Wiesen» und «Wald» geprägt, in grösseren Höhenlagen ist vermehrt «Fels» und «Geröll» vertreten.

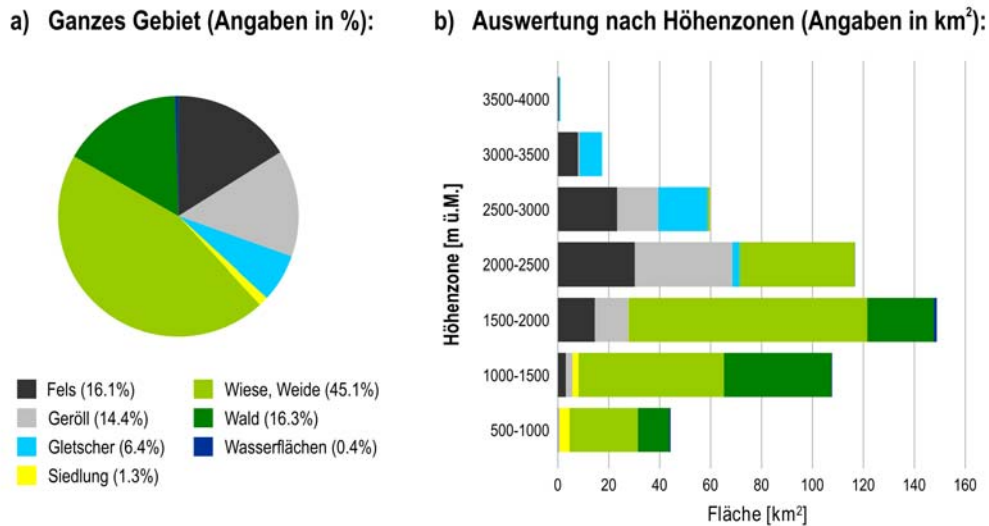


Abbildung 2.10: Anteile der Landnutzung im Einzugsgebiet Kander-Hondrich. Ausgewertet anhand der Primärflächen sowie nach prozentualen Anteilen im Gesamteinzugsgebiet (a) und nach absoluten Flächenbeträgen pro Höhenzone (b). (Daten: SWISSTOPO 1998B).

## 2.5.2 Vergletscherung

Die Vergletscherung als spezielle Kategorie der Landnutzung ist für die Hydrologie der alpinen Einzugsgebiete von herausragender Bedeutung (vgl. z.B. KOBOLTSCHNIG & SCHOENER 2010). Wie Abbildung 2.11 zeigt, befinden sich die grössten Gletscheranteile im Einzugsgebiet der Kander im Bereich des hinteren Gasteretals, wo auch die höchsten Regionen des Untersuchungsgebietes liegen. Einige kleinere Gletscher liegen am südöstlichen Ende des Kientals sowie am südlichen Ende des Engstligentals.

Die Veränderungen der Gletscherausdehnung im Einzugsgebiet der Kander sowie in den angrenzenden Regionen während den letzten gut 100 Jahren können aus den langjährigen, gemessenen Längenänderung (VAW 1881-2008) abgeleitet werden (vgl. Abbildung 2.11). Daraus geht hervor, dass alle Gletscher im Einzugsgebiet der Kander mehr oder weniger stark abschmelzen bzw. rückschreiten, was dem aktuellen Trend im Alpenraum entspricht (HAEBERLI ET AL. 2005A, 2005B). In Abhängigkeit der topographischen Lage, Exposition, Form und Grösse des einzelnen Gletschers beträgt die kumulierte Längenänderung seit Messbeginn im Jahre 1880 bis zu -800 m (Blüemlisalp-gletscher). Die im Untersuchungsraum Kander-Hondrich beobachteten Veränderungen entsprechen dem gesamtschweizerischen, langjährigen Trend und sind ein Hinweis auf das langfristig wirksame klimatische Signal (BAUDER ET AL. 2008), insbesondere auf die Zunahme der jährlichen Temperaturmittelwerte im Alpenraum (ZEMP ET AL. 2007). Da sich heute noch kein Gleichgewichtszustand bei den Gletschern eingestellt hat und für die nächsten Jahrzehnte von einer weiteren Erwärmung auszugehen ist (z.B. FREI 2005), wird erwartet, dass sich die Gletscher in Zukunft weiter zurückbilden und an einzelnen Orten möglicherweise sogar ganz verschwinden werden (ZEMP ET AL. 2006).

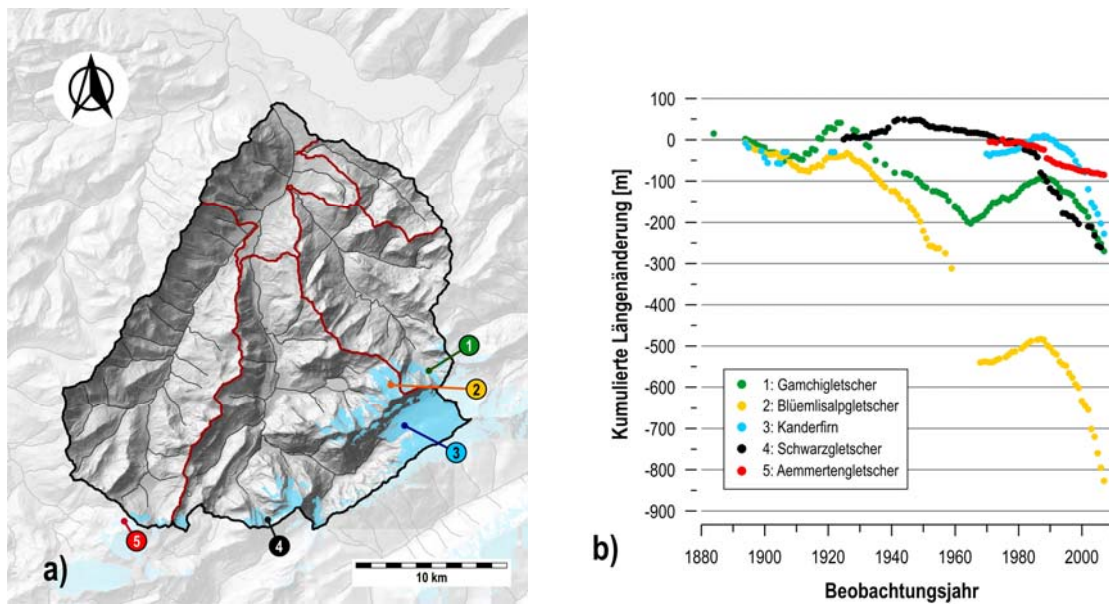


Abbildung 2.11: Vergletscherte Fläche bzw. ausgewählte Gletscher im Einzugsgebiet der Kander (1 = Gamchigletscher, 2 = Blüemlisalp, 3 = Kanderfirn, 4 = Schwarzgletscher, 5 = Aemmertengletscher) (a) und Entwicklung der Gletscherlängen (b) (Daten: VAW 1881-2008).

## 2.6 Hydrologisch relevante Gebietskennwerte

### 2.6.1 Gebietskennwerte der Bilanzierungsgebiete der Kander

Wie in Kapitel 2.2.2 erwähnt, wurden auf der Ebene der Bilanzierungs- und Basisgebiete verschiedene hydrologische Auswertungen durchgeführt. Anhand der Gebietskennwerte, welche von BREINLINGER ET AL. 1992) für alle Basisgebiete der Schweiz bestimmt wurden, sollen die hydrologischen Eigenschaften des Untersuchungsgebietes numerisch zusammengefasst und anschliessend in einen gesamtschweizerischen Kontext gestellt werden. Die in Tabelle 2.2 dargestellten Gebietskennwerte für die Bilanzierungsgebiete im Einzugsgebiet Kander-Hondrich wurden aus den Resultaten für die Basisgebiete flächengewichtet abgeleitet. Die detaillierten Werte der Basisgebiete sind in Anhang B aufgeführt. Im Wesentlichen entsprechen die Bilanzierungsgebiete folgenden Teileinzugsgebieten des untersuchten Einzugsgebietes Kander-Hondrich:

- > **20-090:** Kander-Frutigen
- > **20-100:** Engstlige-Frutigen
- > **20-110:** Chiene-Kien, Suld-Mülenen und Zwischeneinzugsgebiet der Kander bis zum Zusammenfluss mit der Simme

Die letzte Spalte in Tabelle 2.2 (= «Gesamteinzugsgebiet») enthält die Auswertung für das ganze Einzugsgebiet der Kander. Die entsprechende ausgewertete Fläche ist etwas grösser als diejenige des Untersuchungsgebietes, da die Bilanzierungsgebiete nicht auf die Messstationen (hier: Kander-Hondrich) sondern auf das natürliche Einzugsgebiet bezogen (hier: bis zum Zusammenfluss mit der Simme) bestimmt wurden.

Die Übersicht in Tabelle 2.2 zeigt, dass vor allem für das Bilanzierungsgebiet 20-090, welches dem Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen entspricht, bei vielen Kennwerten die markantesten Ausprägungen resultieren. So weist dieses Gebiet bei den Höhen- und Neigungsverhältnissen sowie bei der Vergletscherung die deutlich grössten Werte auf. Ebenso widerspiegelt sich in den Landnutzungsparametern die grosse mittlere Höhenlage dieses Bilanzierungsgebietes: Der Anteil der bodenbedeckten Fläche sowie der Waldanteil sind deutlich kleiner als in den anderen beiden Teilräumen, das Wasserspeichervermögen fällt entsprechend kleiner aus.

Die beiden anderen Bilanzierungsgebiete 20-100 und 20-110 unterscheiden sich in den aufgeführten Gebietskennwerten nur geringfügig.

Tabelle 2.2: Hydrologische Kenngrössen der Bilanzierungsgebiete im Einzugsgebiet Kander-Hondrich. (Daten: BREINLINGER ET AL. 1992)

Gebietskennwert	Einheit	Abk.	Bilanzierungsgebiete			Gesamteinzugsgebiet
			20-090	20-100	20-110	
Einzugsgebietsfläche	[km <sup>2</sup> ]	Fn	188.4	146.2	167.7	502.3
mittlere Höhe	[m ü.M.]	mH	2133	1741	1605	1843
maximale Höhe	[m ü.M.]	Hmax	3850	3250	3550	3850
minimale Höhe	[m ü.M.]	Hmin	750	750	550	550
mittlere Hangneigung	[°]	Im	26.8	21.0	22.2	23.6
Anteil Fläche < 3°	[%]	I3	1.7	1.8	3.1	2.2
Anteil Fläche > 15°	[%]	I15	82.1	75.0	74.8	77.6
Vergletscherung	[%]	Fvgl	16.1	1.2	2.1	7.1
Anteil versiegelter Fläche	[%]	Fvsg	0.7	0.8	0.7	0.7
Anteil bodenbedeckter Fläche	[%]	FBo	41.5	78.8	77.4	64.3
Anteil Fläche mit Wald	[%]	FW	12.7	17.8	22.8	17.6
Wasserspeichervermögen	[mm]	WSV	18.0	32.1	26.3	24.9

20-090: Kander-Frutigen; 20-100: Engstlige-Frutigen; 20-110: Chiene-Kien, Suld-Mülenen und Zwischeneinzugsgebiet

## 2.6.2 Einordnung in den gesamtschweizerischen Kontext

Da die Auswertungen von BREINLINGER ET AL. (1992) für alle Basisgebiete der Schweiz verfügbar sind, können die Angaben für die Basisgebiete der Kander in einen gesamtschweizerischen Kontext gestellt werden (Abbildung 2.12). Dieser Vergleich erfolgt anhand von ausgewählten Kenngrössen, deren Werte für die mehr als 1000 Basisgebiete der Schweiz in Form von Boxplots zusammengefasst dargestellt sind. Anhand der schwarzen Punkte, welche ebenfalls in den Boxplots enthalten sind, wird ersichtlich, welche Werte die Basisgebiete im Einzugsgebiet Kander-Hondrich für die entsprechenden Kenngrössen ausweisen.

Aus dieser Gegenüberstellung geht deutlich hervor, dass die Basisgebiete im Einzugsgebiet Kander-Hondrich im gesamtschweizerischen Vergleich durch eine **überdurchschnittliche Höhenlage** sowie durch **besonders steile Neigungsverhältnisse** auffallen. Diese topographischen Verhältnisse widerspiegeln sich auch bei anderen Gebietskennwerten, wie z.B. dem eher **unterdurchschnittlichen Anteil mit boden- bzw. waldbedeckter Fläche** und den im gesamtschweizerischen Vergleich eher **geringen Wasserspeichervermögen**.

Diese Zusammenstellung verdeutlicht noch einmal die alpine Lage des Einzugsgebietes der Kander und zeigt den Einfluss der Höhenlage auf verschiedene Gebietskennwerte.

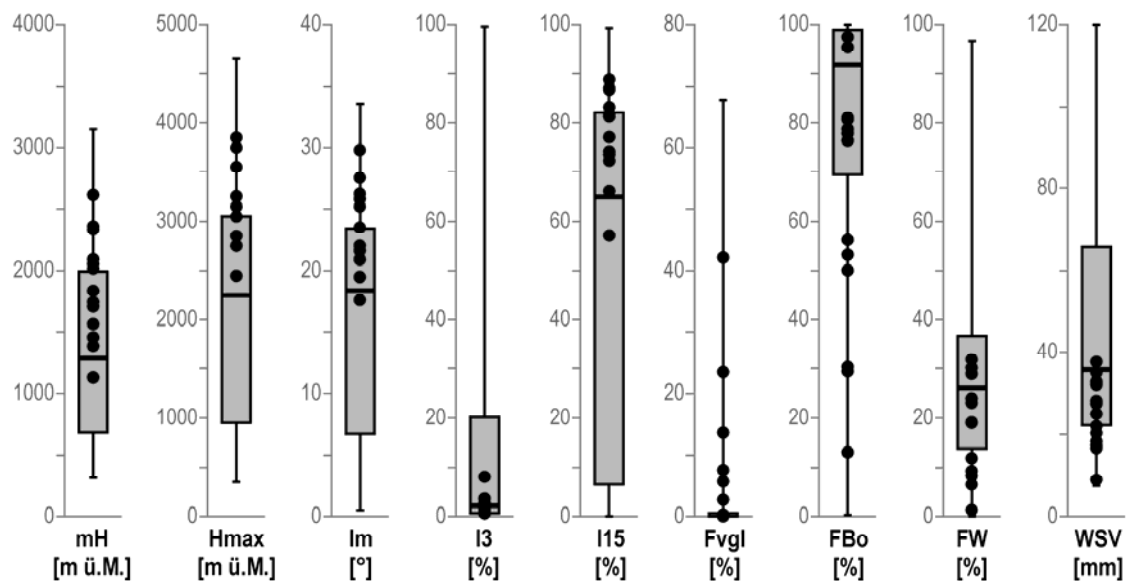


Abbildung 2.12: Ausgewählte Gebietskennwerte der Basiseinzugsgebiete im Einzugsgebiet der Kander-Hondrich und Einordnung in den gesamtschweizerischen Kontext (Daten: BREINLINGER ET AL. 1992; Auf Grundlage von über 1000 Basiseinzugsgebieten der Schweiz). Abkürzungen vgl. Tabelle 2.2. Die Boxplots fassen die Werte aus allen Basisgebieten der Schweiz zusammen, die Punkte geben die Werte der Basisgebiete im Einzugsgebiet Kander-Hondrich an.

## 2.7 Fazit

Beim Untersuchungsgebiet Kander-Hondrich handelt es sich um ein alpines Einzugsgebiet im Berner Oberland (Schweiz). Die hydrologische Gliederung des Gesamteinzugsgebietes erfolgte für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgesehenen Untersuchungen in elf mesoskalige Teileinzugsgebiete. Diese Gliederung orientiert sich sowohl an den im Einzugsgebiet vorhandenen Abflussmessstationen als auch an den natürlichen Einzugsgebietsgrenzen (vgl. Kapitel 2.2.1).

Obwohl die **geologischen wie auch die pedologischen Verhältnisse** eine hohe räumliche Variabilität aufweisen, lässt sich das Untersuchungsgebiet in starker Vereinfachung in zwei Regionen unterteilen:

- > Im **nordwestlichen Teil** des Untersuchungsgebietes (Teileinzugsgebiet Engstlige-Frutigen, Niesenkette) sind die geologischen Verhältnisse mit einer geringen Permeabilität verbunden. Die Böden in dieser Region zeichnen sich durch eine eher gehemmte Wasserdurchlässigkeit und ein geringes Wasserspeichervermögen aus.
- > In den **östlichen und südlichen Regionen** des Einzugsgebietes (Teileinzugsgebiete Kander-Frutigen, Chiene-Kien, Suld-Mülenen) ist dagegen von geologischen Verhältnissen mit höherer Permeabilität auszugehen. Gleichzeitig weisen die Böden ein reduziertes Wasserspeichervermögen auf, sind jedoch etwas wasserdurchlässiger.

Die **Landnutzung** des Gesamteinzugsgebietes Kander-Hondrich wird bis zur Höhenlage von 2000 m ü.M. von den Kategorien «Wiese, Weide» bzw. «Wald» dominiert. In höheren Lagen ist verbreitet «Fels» und «Geröll» anzutreffen. Die Gletscher im Einzugsgebiet sind in den letzten Jahren und Jahrzehnten markant abgeschmolzen, wodurch auch der Gletscheranteil am Gesamteinzugsgebiet deutlich kleiner wurde.

Im gesamtschweizerischen Vergleich erweist sich das Untersuchungsgebiet als **überdurchschnittlich hohes und steiles Einzugsgebiet**. Diese topographischen Voraussetzungen schlagen sich auch in der Ausprägung anderer hydrologisch bedeutsamer Gebietseigenschaften nieder: Insbesondere ist von einem unterdurchschnittlichen Anteil bodenbedeckter Fläche und von einem geringen Wasserspeichervermögen auszugehen. Das untersuchte Einzugsgebiet Kander-Hondrich weist somit spezifische Gebietseigenschaften auf und unterscheidet sich dadurch wesentlich von den meisten mesoskaligen Einzugsgebieten der Schweiz (vgl. auch Kapitel 23.3.2).

## 3 Daten

Dieses Kapitel zeigt auf, welche meteorologischen (Kapitel 3.1) und hydrologischen (Kapitel 3.2) Datengrundlagen für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich verfügbar sind und welche Daten im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet wurden. Zudem wird erläutert, wie und für welche Stationen die bisher nur analog verfügbaren meteorologischen und hydrologischen Daten digitalisiert wurden. Im Weiteren wird auf einzelne Aspekte der Datenqualität der verwendeten Grundlagen eingegangen. Kapitel 3.3 fasst die wichtigsten Ergebnisse als Fazit zusammen.

### 3.1 Meteorologische Daten

#### 3.1.1 Messnetze

Als Grundlage für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgesehenen Datenanalysen und hydrologischen Modellierungen wurden meteorologische Messreihen benötigt, welche einen möglichst langen Zeitraum abdecken (vgl. Kapitel 1.3). Im Berner Oberland befindet sich eine Vielzahl meteorologischer Messstationen, welche eidgenössischen, kantonalen und privaten Messnetzen angehören (vgl. KONZELMANN ET AL. 2007). Der zeitliche Umfang ist aber bei den meisten kantonalen und privaten Messstationen sehr kurz und in der Regel auf den Zeitraum ab Mitte der 1990er Jahre beschränkt. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Arbeit ausschliesslich meteorologische Daten von Stationen aus dem Messnetz des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) verwendet.

Zu Beginn der vorliegenden Arbeit hat MeteoSchweiz mehrere Messnetze betrieben, wobei insbesondere die drei nachfolgend aufgeführten für hydrologische Anwendungen von Interesse sind. Nach BEGERT ET AL. (2003) lassen sich diese wie folgt charakterisieren:

- > **Automatisches Messnetz (ANETZ):** Die automatischen Klimastationen sind seit Ende der 1970er Jahre in Betrieb und liefern zeitlich hoch aufgelöste Messwerte (Auflösung < 1 h, in der Regel 10 Minuten Mittelwerte). Gemessen wird jeweils eine breite Palette an Parametern: Niederschlagssummen, Lufttemperatur, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, Relative Luftfeuchtigkeit, Sonnenscheindauer, etc. Im Jahr 2005 gehörten 72 automatische Klimastationen zu diesem Messnetz.
- > **Konventionelles Klimamessnetz (KLIMA):** An den konventionellen Klimastationen werden Klimadaten von verschiedenen meteorologischen Parametern dreimal täglich gemessen (seit 1970: um 6:00, 12:00 und 18:00 UTC, bis 1970: um 6:30, 12:30 und 20:30 UTC). Die Erhebung der Daten erfolgt dabei durch einen Beobachter, welcher die Instrumente an den drei vorgegebenen Terminen abliest und die entsprechenden Werte schriftlich festhält. Das Messnetz existiert seit Dezember 1863 und wurde mehrmals erweitert bzw. reduziert: Während in den 1970er Jahren noch über 120 Stationen in Betrieb standen, waren im Jahr 2005 noch Messdaten von insgesamt 25 konventionellen Klimastationen verfügbar.

- > **Niederschlags-Messnetz (NIME):** Dieses Messnetz ist für die Erfassung der täglichen Niederschlagssummen konzipiert. Mit über 340 Stationen (Stand: 2005) ist es das umfassendste Messnetz von MeteoSchweiz, womit der grösseren räumlichen Variabilität des Niederschlags Rechnung getragen wird. Zahlreiche Stationen sind bereits seit ca. 1880 verfügbar – ab 1900 wurde der Umfang des Messnetzes nur noch geringfügig erweitert. Die Niederschlagssummen werden einmal täglich zu einem vorgegebenen Termin (6:30 UTC) von einem Beobachter abgelesen.

Da die bestehenden Messnetze baulich und technologisch heute nicht mehr dem aktuellsten Stand der Technik entsprechen und der heterogene Aufbau der verschiedenen Netze den Unterhalt schwerfällig macht, werden die Messnetze «KLIMA» und «ANETZ» im Rahmen des Projekts «SwissMetNet» seit 2006 in ein gemeinsames Messnetz zusammengeführt (METEO SCHWEIZ 2005).

### 3.1.2 Verfügbarkeit und Verwendung der Daten

Aus den Messnetzen ANETZ, KLIMA und NIME der MeteoSchweiz wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit alle Stationen verwendet, welche sich einerseits in der näheren Umgebung des Untersuchungsgebietes befinden und andererseits in der Klimazone «westlicher Alpennordhang» nach SCHÜEPP & GENSLER (1980) liegen (Abbildung 3.1). Bei den ANETZ-Stationen wurden jedoch auf Grund der geringen Messnetzdichte auch zwei Stationen berücksichtigt, die in angrenzenden Klimazonen der Alpennordseite liegen (Bern-Liebefeld, Engelberg).

Mit dieser Stationsauswahl konnte weitgehend sichergestellt werden, dass die Auswertungen und Modellierungen auf Daten vergleichbarer Klimaregionen basieren und nicht durch Klimasignale aus anderen Regionen verfälscht werden.

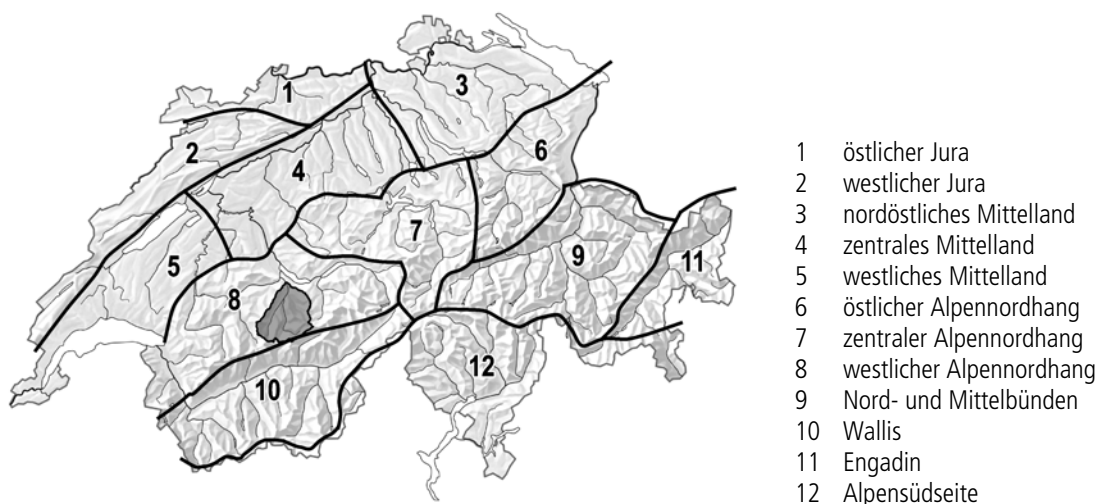


Abbildung 3.1: Klimaregionen der Schweiz nach SCHÜEPP & GENSLER (1980) und Lage des untersuchten Einzugsgebietes Kander-Hondrich (Grafik verändert nach BEGERT ET AL. 2003).

Die räumliche Verteilung der im Einzugsgebiet verfügbaren Messstationen ist in Abbildung 3.2 dargestellt. In dieser Grafik sind diejenigen Stationen in Farbe markiert, deren Daten in der vorliegenden Untersuchung verwendet wurden. Auf die Verwendung der Stationen zwischen Plaffeien und Thun wurde verzichtet, weil die Stationsdichte in der Region, welche unmittelbar nordwestlich an das Einzugsgebiet der Kander anschliesst (Boltigen, Erlenbach, Wimmis) bereits genügend gross ist.



Bei weiteren nicht verwendeten Stationen handelt es sich meistens um Niederschlags-Jahres-totalisatoren der MeteoSchweiz. Diese Daten wurden nicht berücksichtigt, da einerseits die zeitliche Auflösung zu gering ist und weil andererseits die Messperioden, welche oft nur einige Jahre bis Jahrzehnte des mittleren 20. Jahrhunderts abdecken, für die angestrebten Auswertungen nicht geeignet sind.

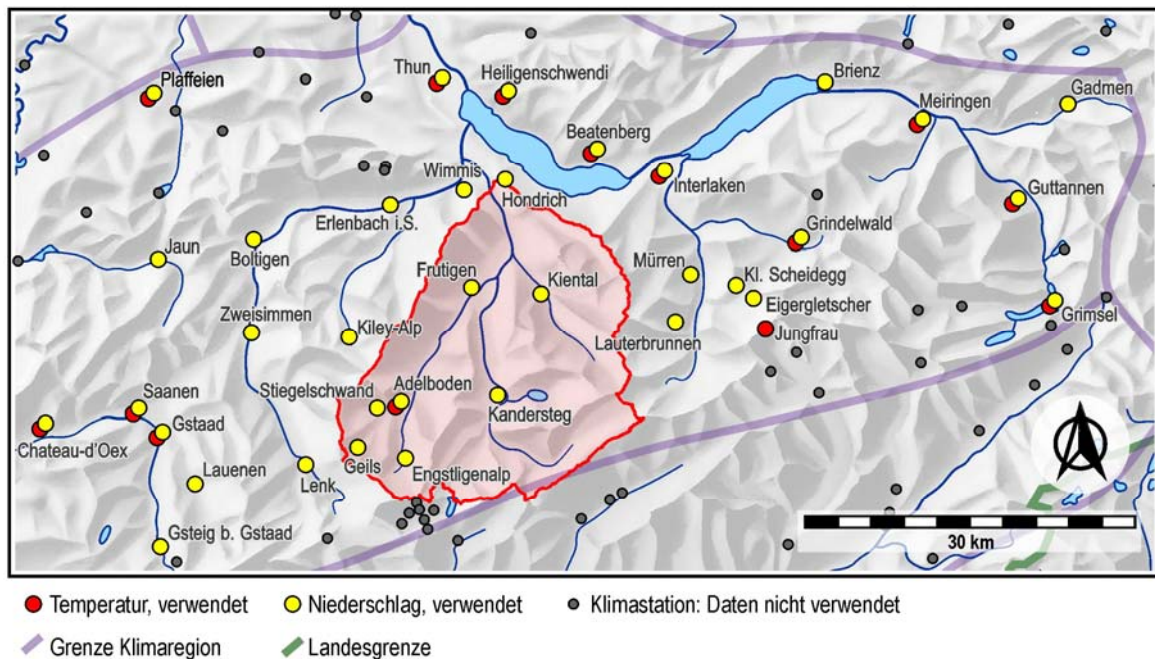


Abbildung 3.2: Übersicht über die im Berner Oberland und den angrenzenden Gebieten verfügbaren Klimastationen aus den Messnetzen der MeteoSchweiz. Dargestellt sind zudem die Klimaregionen nach SCHÜEPP & GENSLER (1980), die erhobenen klimatischen Parameter sowie die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Stationen. (Übersichtskarte: SWISSTOPO 2007)

Die **Messreihen der verwendeten meteorologischen Stationen** sowie die zeitliche Auflösung der Messwerte ( $< 1$  Stunde bzw.  $< 1$  Tag bzw. 1 Tag) und die Art der Datenverfügbarkeit (digital bzw. analog) wird aus den beiden Zusammenstellungen in Abbildung 3.3 für die Niederschlagsmessungen bzw. in Abbildung 3.4 für die Temperaturmessungen ersichtlich.

Abbildung 3.3 zeigt, dass viele der **36 verwendeten Niederschlagsmessreihen** erst ab 1961 digital verfügbar sind. Heute sind davon noch deren 27 in Betrieb. Vor 1900 besteht das Messnetz aus deutlich weniger Stationen und nur für einzelne sind auch digitale Daten verfügbar.

Für die **Lufttemperatur** (Abbildung 3.4) ist im Untersuchungsraum eine deutlich geringere Anzahl an Messreihen verfügbar (insgesamt **17 Stationen**; davon sind heute noch zehn in Betrieb). Auch bei diesem Parameter wird ersichtlich, dass vor 1960 nur einzelne Stationen über digitale Daten verfügen, vor 1900 ist dies sogar nur für eine Datenreihe (Bern-Liebefeld) der Fall. Diese liegt allerdings schon in einiger räumlicher Distanz zum Untersuchungsgebiet und befindet sich deshalb auch in einer anderen Klimaregion. Die Messungen für diese Station reichen bis ins Jahr 1863 zurück.

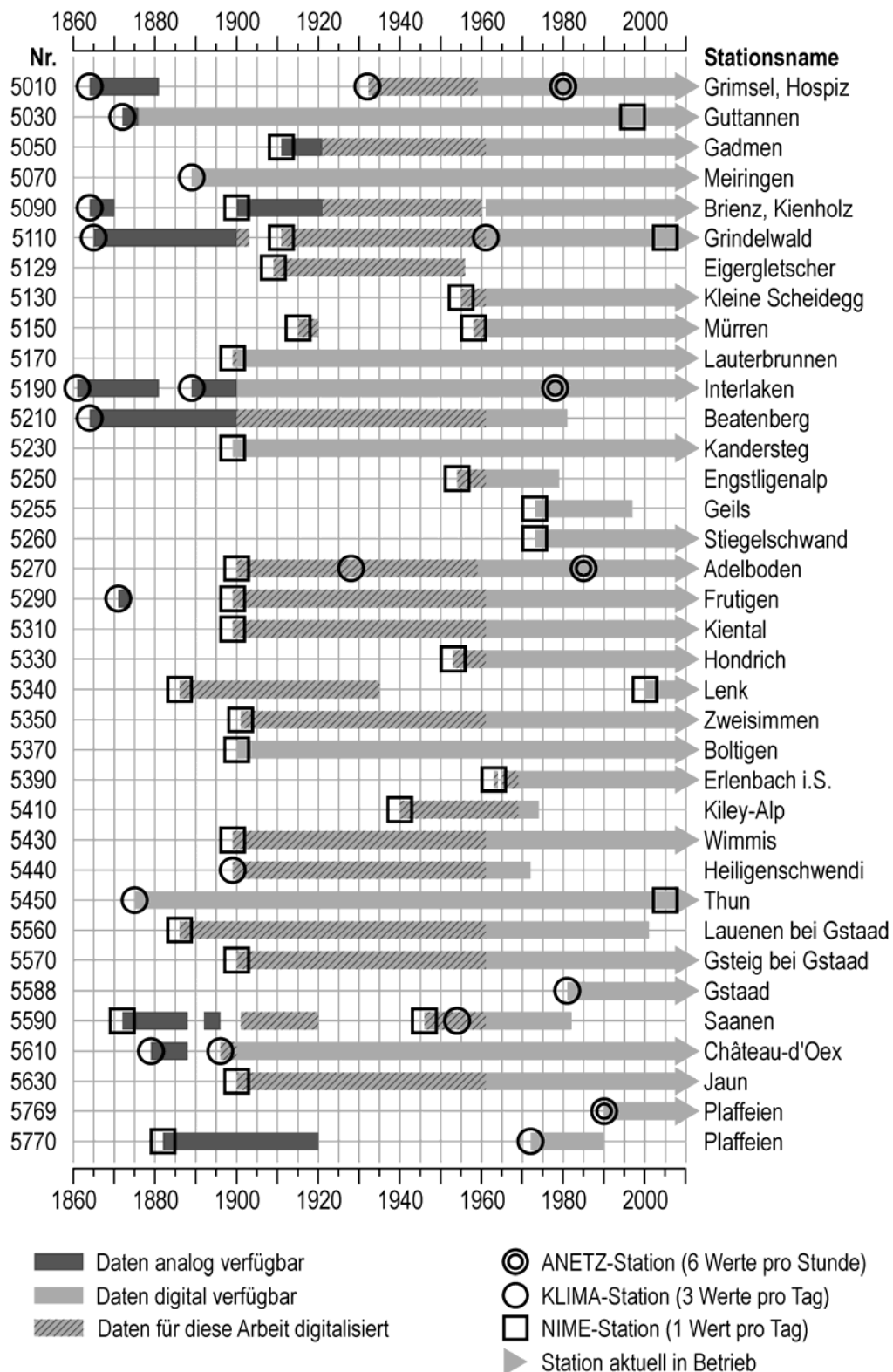


Abbildung 3.3: Datenverfügbarkeit für den Parameter Niederschlag. Dargestellt sind die Messreihen nach Messperiode, Art der Verfügbarkeit und zeitlicher Auflösung.

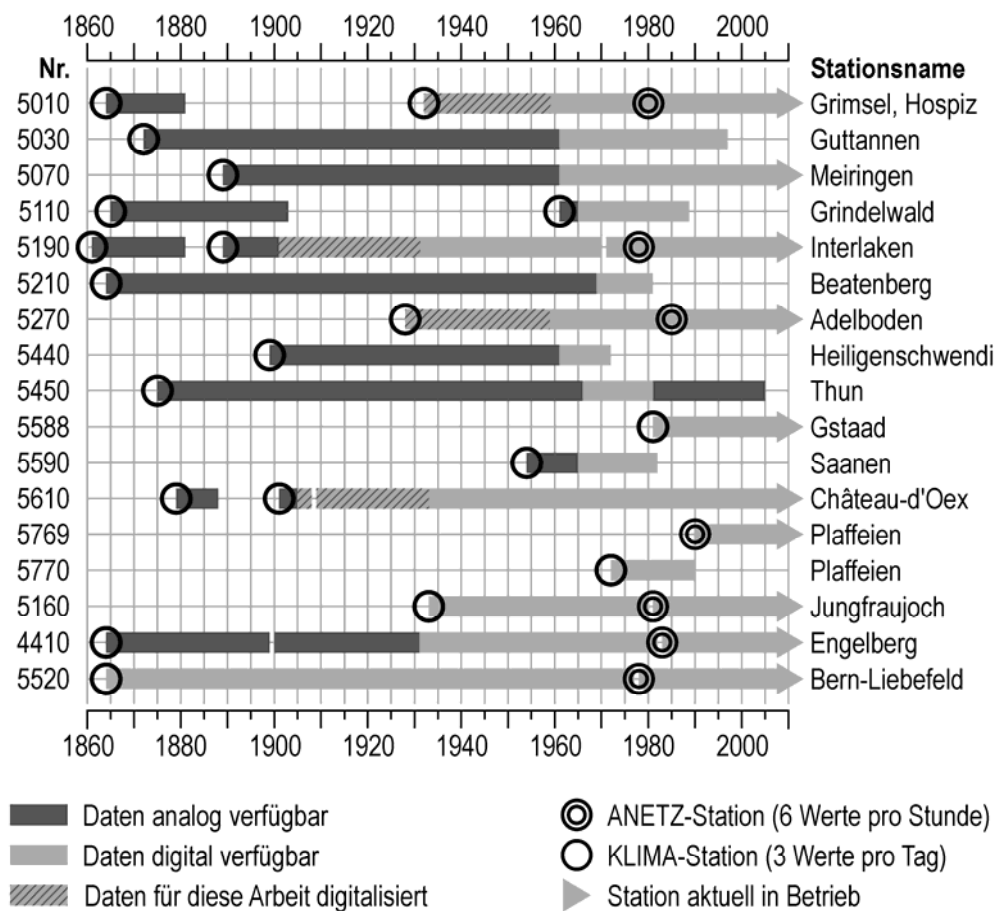


Abbildung 3.4: Datenverfügbarkeit für den Parameter Temperatur. Dargestellt sind die Messreihen nach Messperiode, Art der Verfügbarkeit und zeitlicher Auflösung.

Wie in Kapitel 1.3 erwähnt, steht bei der vorliegenden Untersuchung die Analyse einer möglichst grossen Anzahl langer und lokaler Datenreihen im Vordergrund. Aus Abbildung 3.3 wird ersichtlich, dass für das Einzugsgebiet der Kander vor Beginn der vorliegenden Arbeit einzig für die Niederschlagsstation «Kandersteg» eine digital verfügbare Messreihe von über 100 Jahren vorlag. Daneben existieren aber noch fünf weitere Niederschlagsstationen, im Einzugsgebiet der Kander, die während des gesamten letzten Jahrhunderts betrieben wurden, deren Daten aber bisher nur analog verfügbar waren. Deshalb wurde für die Region des Untersuchungsgebietes eine grössere Anzahl an Datenreihen entweder bis zum Messbeginn jedoch höchstens bis ins Jahr 1900 zurück digitalisiert.

Da bereits eine grosse Anzahl klimatologischer Auswertungen für die so genannte Normperiode von 1961-1990, durchgeführt wurden (z.B. BEGERT ET AL. 2003), waren vor Beginn der vorliegenden Arbeit die meisten Daten ab diesem Zeitpunkt digital verfügbar. Die Digitalisierung erfolgte deshalb vorwiegend für die Periode von 1900 bis 1961. Die bearbeiteten Messreihen sind in Abbildung 3.3 und Abbildung 3.4 mit einer Schraffur markiert. Auf eine Erweiterung der Untersuchungsperiode auf den Zeitraum vor 1900 wurde verzichtet, da das Messnetz in dieser Phase erst wenige Stationen umfasst, wodurch weiterführende und regionale Vergleiche für diese Periode nicht sinnvoll durchführbar sind. Daneben weisen die Daten vor 1900 zum Teil noch nicht die gleiche Qualität auf wie nach diesem Zeitpunkt, was aufwändige Homogenisierungen nötig gemacht hätte.

### 3.1.3 Digitalisierung meteorologischer Daten

Zur Erweiterung der digitalen Datengrundlage konnten die folgenden **Quellen** verwendet werden:

- > **Publikationen der MeteoSchweiz (bzw. der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt SMA):** Ab 1901 wurden die täglich gemessenen Niederschlagssummen von der MeteoSchweiz bzw. der SMA in einem jährlich erscheinenden Bericht publiziert (SMA 1901-1997, 1998-2008). Bei den publizierten Daten handelt es sich um überprüfte und korrigierte Werte. Das bedeutet, dass die in den Originalaufzeichnungen teilweise noch vorhandenen Messfehler und Datenlücken in dieser Quelle bereits weitgehend bereinigt oder als so genannte «Fehlwerte» deklariert sind (vgl. PERL ET AL. 2009).
- > **Papierarchiv der MeteoSchweiz:** Für einzelne Stationen sind in den erwähnten Publikationen keine Angaben enthalten. In diesen Fällen konnten die Daten aus dem Archiv der MeteoSchweiz übernommen werden. Da es sich dabei um unkorrigierte Originalaufzeichnungen handelt, mussten die Werte nach der Digitalisierung noch überprüft und korrigiert werden.

Die **Digitalisierung der Daten** beschränkt sich ausschliesslich auf Tagesmittelwerte der Temperatur bzw. auf Tagessummen des Niederschlags. Falls vorhanden wurden auch die Bemerkungen zur Qualität der Daten miterfasst, welche bei allfälligen anschliessenden Korrekturen berücksichtigt werden konnten. Die Datenerfassung erfolgte manuell am PC. Automatische Text- und Spracherfassung wurden erprobt, konnten aber im Rahmen dieser Arbeit nicht effizient um- und eingesetzt werden.

Bei der Digitalisierung der **Niederschlagsdaten** konnten die erfassten Daten über den Vergleich der berechneten und der in den Datengrundlagen ebenfalls aufgeführten Monatssummen plausibilisiert sowie im Quervergleich mit anderen Stationen auf allfällige Eingabefehler überprüft werden. Daneben lagen aber auch in den analogen Datenquellen so genannte «Fehlwerte» vor, die sowohl vor als auch nach der Korrektur speziell gekennzeichnet sind. Als Fehlwerte werden in diesem Zusammenhang ausschliesslich Werte bezeichnet, welche durch Ablesung durch den Beobachter mit Fehlern behaftet sind. Folgende Kategorien können dabei unterschieden werden:

- > **Unverteilte Summen:** Diese Kategorie umfasst mehrtägige Niederschlagssummen, welche durch den Beobachter ohne zwischenzeitliches Ablesen erfasst wurden. Im Rahmen des Korrekturverfahrens der MeteoSchweiz (vgl. PERL ET AL. 2009) wurden diese Werte über die an benachbarten und vergleichbaren Stationen gemessenen täglichen Niederschlagssummen wieder auf die einzelnen Tage des betroffenen Zeitraums verteilt.
- > **Interpolierte Werte:** Einzelne nicht erfasste Niederschlagswerte wurden beim Korrekturverfahren der MeteoSchweiz mit Hilfe der Niederschlagssummen, welche an benachbarten und vergleichbaren Stationen gemessen wurden, auf den Standort der Messstation interpoliert.
- > **Fehlende Werte:** Diese Kategorie umfasst alle fehlenden und unplausiblen Messwerte, für welche auch keine Korrektur durchgeführt wurde.

Eine Beurteilung der Qualität der digitalisierten Datengrundlage erfolgt in Kapitel 3.1.4. Systematische Messfehler der Niederschlagsmessungen, welche z.B. durch das am Messgerät verstärkte Windfeld entstehen, wurden in der vorliegenden Arbeit nicht korrigiert. Dies auch aus Gründen der Vergleichbarkeit der Resultate zu Untersuchungen anderer Autoren (z.B. ZELLER ET AL. 1976-1991,

SCHMIDLI ET AL. 2002, FREI ET AL. 2006), welche auf die Bereinigung dieser Fehler ebenfalls verzichtet haben. Aus den gleichen Gründen wurde auch die von verschiedenen Autoren vorgeschlagene Homogenisierung der erfassten Daten nicht umgesetzt (z.B. BUIHAND 1982, BEGERT ET AL. 2005).

Die Digitalisierung erfolgte beim **Niederschlag für 25 Stationen**, für welche Tagesmittelwerte für insgesamt fast 1000 Jahre erfasst werden konnten. In den meisten Fällen erstrecken sich die digitalisierten Werte über eine oder mehrere Perioden im Zeitraum zwischen 1900 und 1961.

Bei der **Digitalisierung der Temperaturdaten** mussten insbesondere auch die folgenden methodischen Aspekte beachtet werden: Die Tagesmittel der Temperatur wurden bis 1970 von der damaligen SMA nach dem so genannten «Vierer-Mittel» nach KÄMTZ (1831) berechnet und publiziert (Gleichung 3.1, vgl. auch BEGERT ET AL. 2003).

$$\bar{T} = \frac{(T_7 + T_{13} + 2 \cdot T_{21})}{4} \quad \text{Gleichung 3.1}$$

mit:  $\bar{T}$  = Tagesmittelwert der Temperatur (berechnet nach 4er-Mittel)  
 $T_7$  = Temperatur am Morgen (6:30 Uhr UTC)  
 $T_{13}$  = Temperatur am Mittag (12:30 Uhr UTC)  
 $T_{21}$  = Temperatur am Abend (20:30 Uhr UTC)

Bei der Berechnung der Tagesmitteltemperatur nach diesem Verfahren wird berücksichtigt, dass die Nachttemperatur durch den Beobachter nicht erfasst wird und der arithmetische Tagesmittelwert dadurch verfälscht wird (DE MONTMOLLIN 1993). Allerdings ist zu beachten, dass die Bestimmung der Tagesmittelwerte der Temperatur wesentlich von den Zeitpunkten der einzelnen Beobachtungen beeinflusst wird. Deshalb wurden von der SMA ab 1971 – auf Grund veränderter Beobachtungstermine – neue Formeln zur Berechnung der Tagesmitteltemperatur eingesetzt, welche auf Arbeiten von KÖPPEN (1888) zurückgehen. Ein Vergleich zwischen den Tagesmittelwerten der Temperatur, welche nach verschiedenen Methoden berechnet wurden und den «wahren» bzw. gemessenen Werten, kann DE MONTMOLLIN (1993) entnommen werden.

In den originalen Aufzeichnungen, welche zur Digitalisierung der Tagesmittelwerte der Temperatur für alle Stationen vorlagen, sind aber jeweils nur die Terminwerte vom Morgen, Mittag und Abend sowie das arithmetische Mittel aus diesen drei Werten, jedoch nicht das für den Zeitraum vor 1971 benötigte «Vierer-Mittel» enthalten. Deshalb mussten für die Digitalisierung eines Temperaturtagesmittelwertes mindestens zwei Werte erfasst werden: Die Abendtemperatur und das arithmetische Tagesmittel. Mit Hilfe von Gleichung 3.2 konnte anschliessend auf das gesuchte «Vierer-Mittel» geschlossen werden.

$$\bar{T} = \frac{(3 \cdot T_M + T_{21})}{4} \quad \text{Gleichung 3.2}$$

mit:  $\bar{T}$  = Tagesmittelwert der Temperatur (berechnet nach 4er-Mittel)  
 $T_M$  = arithmetisches Tagesmittel der Temperatur (berechnet aus  $T_7$ ,  $T_{13}$  und  $T_{21}$ )  
 $T_{21}$  = Temperatur am Abend (20:30 Uhr UTC)

Der zeitliche Aufwand zur Digitalisierung der Temperaturdaten ist daher deutlich höher als derjenige für die Digitalisierung von Niederschlagsdaten. Zudem müssen bei der Digitalisierung der Temperatur für jeden Tag Werte erfasst werden, was beim Niederschlag nicht der Fall ist.

Bei den **Temperaturmessungen** wurden **für vier Stationen** Daten im Zeitraum von 1901 bis 1960 erfasst (vgl. Abbildung 3.4). Zusammen umfassen diese digitalisierten Messreihen über 120 Jahre.

### 3.1.4 Beurteilung der meteorologischen Datengrundlage

#### a) Höhenlage der Stationen

Bei den beiden in der vorliegenden Untersuchung verwendeten meteorologischen Parametern Niederschlag und Temperatur wird im Allgemeinen von einer ausgeprägten Höhenabhängigkeit ausgegangen (vgl. z.B. BARRY 2008, WEHREN ET AL. 2010b). Deshalb sind die Höhenlage der Messstationen sowie der durch die Messstationen abgedeckte Höhenbereich von zentraler Bedeutung. In Abbildung 3.5 sind deshalb die Höhenverteilungen der Messstationen, aufgeteilt nach verfügbaren Niederschlags- (a) und Temperaturmessungen (b), aufgeführt.

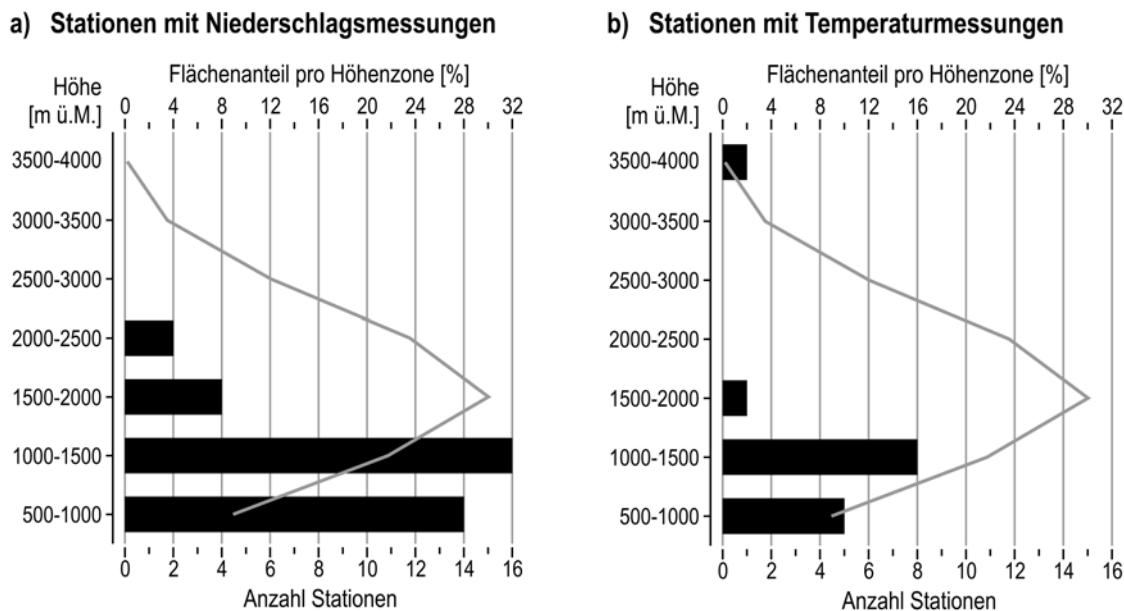


Abbildung 3.5: Höhenverteilung der Niederschlags- (a) und der Temperaturmessstationen (b) (schwarze Balken) sowie Flächenanteil des Einzugsgebietes Kander-Hondrich pro Höhenzone (graue Linie).

Aus Abbildung 3.5 geht hervor, dass die Höhenzone mit den meisten Messstationen nicht derjenigen Höhenzone entspricht, welche den grössten Flächenanteil am untersuchten Einzugsgebiet aufweist (vgl. Verlauf der grauen Linie). Während sich die Standorte der Niederschlagsmessstationen vorwiegend auf Tallagen konzentrieren und sich deshalb ausschliesslich im Höhenbereich von 500 bis 2500 m ü.M. befinden, liegen die Temperaturmessstationen zwischen 500 und 4000 m ü.M. Die Höhererstreckung des Untersuchungsgebietes (647 bis 3698 m ü.M.) ist somit nur bei den Temperaturmessungen vollständig abgedeckt, allerdings nur auf Grund der Station Jungfraujoch. Räumliche Interpolationen auf ungemessene höhere Lagen sind deshalb insbesondere beim Niederschlag mit grösseren Unsicherheiten behaftet als bei der Temperatur. Die zu erwartenden Unsicherheiten werden auch dadurch verstärkt, dass beim Niederschlag von einem zum Teil beträchtlichen systematischen Messfehler ausgegangen werden muss, der mit zunehmender Höhe deutlich grösser wird (vgl. SEVRUK 1996, 1997).

## b) Lücken in den Datenreihen

Wie in Kapitel 3.1.3 erwähnt, wurden die Fehler, welche in den digitalisierten meteorologischen Daten enthalten sind, anhand der Informationen aus Messungen an vergleichbaren bzw. benachbarten Stationen korrigiert. Die meisten fehlenden Werte – insbesondere die «unverteilten Summen» und verschiedene Fehlwerte – wurden bereits durch das Korrekturverfahren der MeteoSchweiz bereinigt (vgl. PERL ET AL. 2009) und sind somit nicht mehr ersichtlich. Die Qualität der verwendeten Grundlagendaten wird deshalb an dieser Stelle anhand der Summe der effektiven Messlücken, d.h. anhand der Anzahl Tage mit fehlenden Messwerten beurteilt.

In Abbildung 3.6 ist zu diesem Zweck am Beispiel des Niederschlags für jede Station der prozentuale Anteil an Tagen ohne verfügbaren Messwert an allen Tagen der verwendeten Messperiode dargestellt. Ein Wert von rund 0.27% entspricht einem fehlenden Wert pro Jahr. Diese Zusammenstellung zeigt deutlich, dass bei allen Stationen nur sehr wenige Fehlwerte zu verzeichnen sind. Von den 25 Stationen, für welche Daten digitalisiert (= D) wurden, weisen 15 Stationen Datenlücken auf, wobei die Anteile der fehlenden Messwerte nur in zwei Fällen über einem fehlenden Wert pro Jahr liegen (Adelboden und Kiley-Alp).

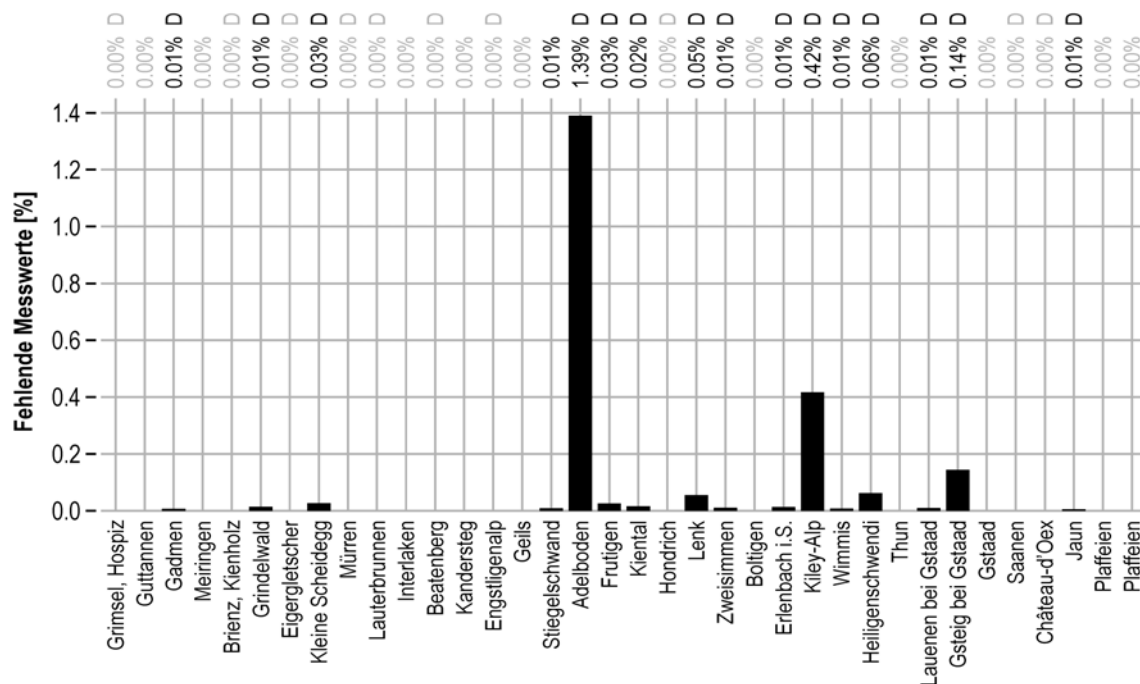


Abbildung 3.6: Anteil der fehlenden Messwerte in den Messreihen der digitalen Niederschlagsdaten des Berner Oberlands. Hervorgehoben sind die Stationen mit fehlenden Messwerten. D: Station für welche Daten im Rahmen der vorliegenden Arbeit digitalisiert wurden. Digitalisierte Perioden siehe Abbildung 3.3 sowie Abbildung 3.4.

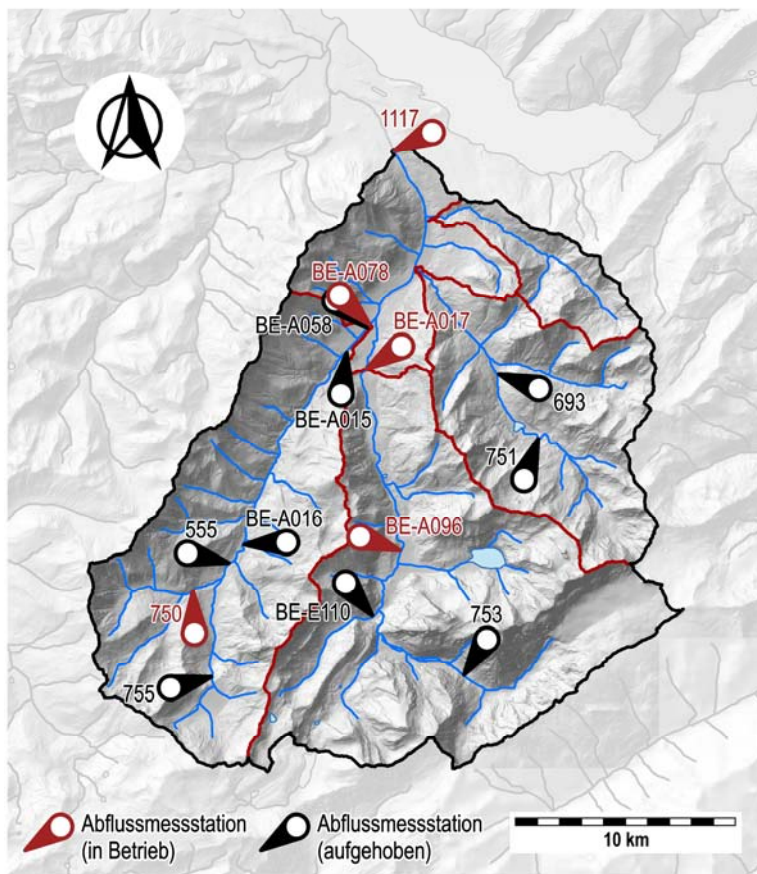
Diese Auswertung zeigt, dass die Beobachtungen des Niederschlags mit grosser Zuverlässigkeit durchgeführt wurden und nur von einer geringen Anzahl fehlender Messwerte ausgegangen werden muss. Ebenso kann für die von Hand interpolierten Werte sowie für die verteilten Summen, für welche auch Informationen von anderen Stationen beigezogen werden, ebenfalls von einer guten Datenqualität ausgegangen werden. Dies deshalb weil die räumliche Variabilität des Niederschlagsgeschehens auf der zeitlichen Skala von Tagessummen bereits deutlich reduziert ist (vgl. GEIGER ET AL. 1991) und die räumliche Abdeckung durch die Messstationen relativ hoch ist.

## 3.2 Hydrologische Daten

### 3.2.1 Verwendete Stationen

Bei den hydrologischen Daten wurden ausschliesslich die Daten der Messstationen im Untersuchungsgebiet verwendet. Die Stationen gehören entweder zu den Messnetzen des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), des Kantons Bern oder eines privaten Kraftwerkbetreibers (BKW FMB Energie AG).

Von den insgesamt **14 Stationen** im Einzugsgebiet der Kander, mit welchen seit 1900 jeweils für mehrere Jahre Abflussmessungen durchgeführt wurden, sind heute noch fünf in Betrieb (Abbildung 3.7 und Abbildung 3.8). An weiteren Standorten (z.B. im Kiental) wurden zur Abschätzung des wasserwirtschaftlichen Potentials noch weitere Abflussmessungen für einzelne Jahre durchgeführt (FEDERER 2008). Da sich diese Messreihen meist nur über einzelne Jahre erstrecken sowie ausschliesslich in analoger Form zugänglich sind, wurden die entsprechenden Messreihen in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt.



#### Legende:

- 1117: Kander-Hondrich\*
- BE-A017: Kander-Frutigen\*\*
- BE-A096: Kander-Kandersteg\*\*\*
- 753: Kander-Gasteretal\*
- BE-E110: Alpbach-Kandersteg\*\*
  
- BE-A015: Engstlige-Frutigen (Camping)\*\*
- BE-A058: Engstlige-Frutigen (Bad)\*\*
- BE-A078: Engstlige-Frutigen\*\*
- BE-A016: Engstlige-Adelboden\*\*
- 555: Engstlige-Adelboden\*
- 755: Engstligenbach-Engstligenalp\*
- 750: Allenbach-Adelboden\*
  
- 693: Gornerewasser-Kiental\*
- 751: Gornerebach-Kiental\*
  
- \* = Stationen des BAFU
- \*\* = Stationen des Kantons Bern
- \*\*\* = Station der BKW FMB Energie AG

Abbildung 3.7: Räumliche Verteilung der Abflussmessstationen im Einzugsgebiet der Kander.

Die **räumliche Verteilung der Stationen** konzentriert sich auf zwei der vier grösseren Teileinzugsgebiete: Neben dem gesamten Einzugsgebiet, dessen Messstation sich in Hondrich befindet, wurden bisher in den beiden Teileinzugsgebieten **Engstlige-Frutigen** sowie **Kander-Frutigen** an mehreren Stellen Abflussmessungen durchgeführt. Im hinteren Kiental liegen zwar für den Gorne-



rebach zwei Messreihen vor, allerdings wurden bisher für das gesamte Teileinzugsgebiet Chiene-Kien wie auch für das Teileinzugsgebiet Suld-Mülenen keine Abflussmessungen durchgeführt.

Daneben sind für die **Kander** bei den Messstellen in Hondrich und in Kandersteg zwei lange Messreihen verfügbar, welche die folgenden Zeiträume in verschiedener zeitlicher Auflösung abdecken:

- > **Kander-Hondrich:** Für die Periode von 1903 bis 1921 sind digitale Tagesmittelwerte bzw. seit 1980 digitale und zeitlich hoch aufgelöste Messwerte verfügbar. Zwischen 1921 und 1980 wurde die Station von einem privaten Kraftwerk (BKW FMB Energie AG) betrieben. In diesem Zeitraum wurden die Messungen ausschliesslich in analoger Form aufgezeichnet und als Liminigraphenstreifen bzw. als Jahrbuchseite mit Tagesmittelwerten archiviert.
- > **Kander-Kandersteg:** Für die Station Kander-Kandersteg, welche seit 2005 vom Kanton Bern betrieben wird, sind die Daten ab diesem Zeitpunkt zeitlich hoch aufgelöst (< 1 h) digital verfügbar. Auch diese Messstation wurde zuvor von den Bernischen Kraftwerken AG (BKW) betrieben. Die Daten wurden in der gleichen Form wie bei der Station Kander-Hondrich archiviert und waren deshalb ausschliesslich analog verfügbar.

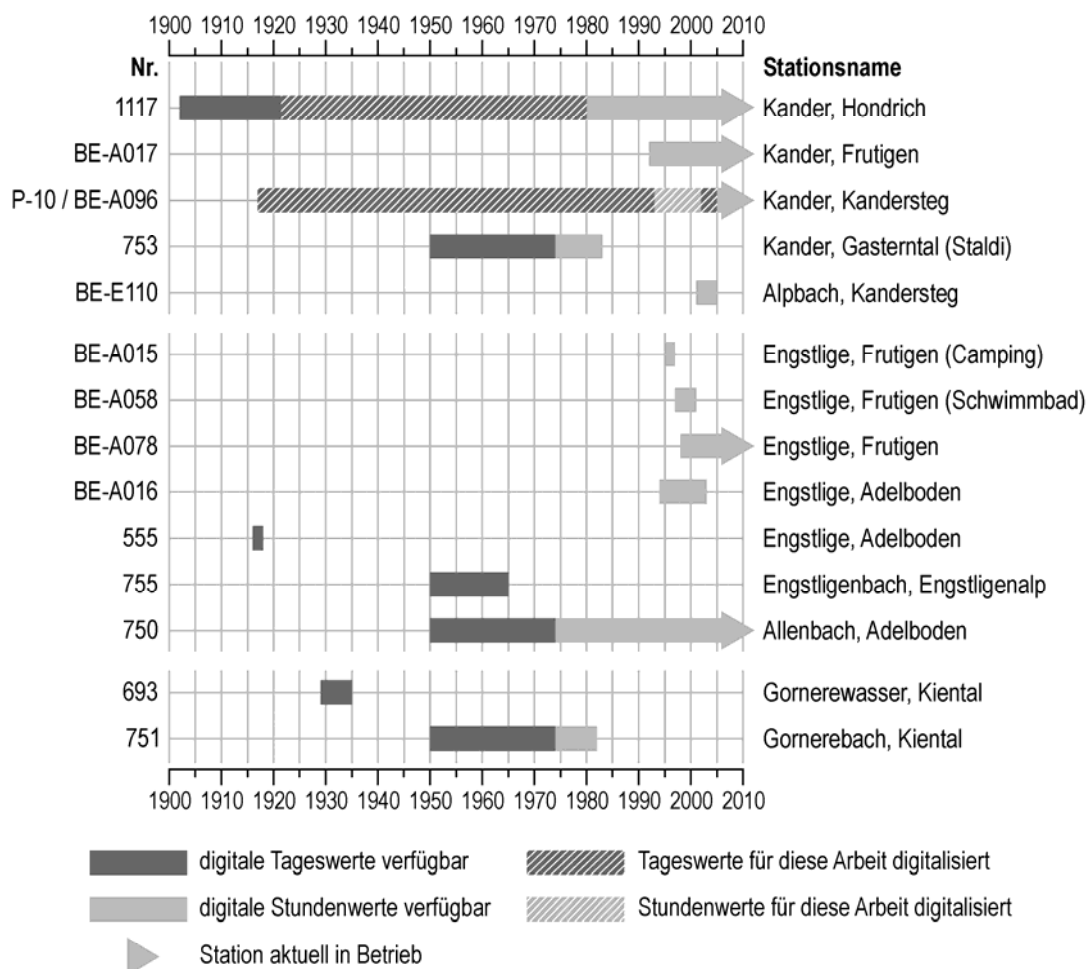


Abbildung 3.8: Verfügbarkeit der Abflussmessdaten im Einzugsgebiet der Kander

Der Abfluss der **Engstlige** wurde vom Bund sowie vom Kanton Bern im Verlauf des letzten Jahrhunderts an verschiedenen Stellen aber meist nur für einige Jahre gemessen. Aktuell ist eine Station

in Frutigen in Betrieb. Die längste Messreihe im Teileinzugsgebiet Engstlige-Frutigen ist für den Al-lenbach-Adelboden verfügbar, welcher zudem zu den hydrologischen Untersuchungsgebieten des Bundesamtes für Umwelt gehört (vgl. KAN 2002). Die Abflussdaten sind für dieses Einzugsgebiet seit 1950 als Tagesmittelwerte und seit 1974 in einer zeitlichen Auflösung von weniger als einer Stunde digital verfügbar (vgl. Abbildung 3.8).

### 3.2.2 Digitalisierung der Abflussdaten

Analog zu den meteorologischen Daten wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch Abflussdaten für mehrere Jahre digitalisiert. Umfangreich bearbeitet wurden aber ausschliesslich die langen Messreihen von Kander-Hondrich und Kander-Kandersteg, welche durch die Digitalisierung noch nicht verfügbarer Perioden (Tagesmittelwerte) komplettiert werden konnten. Die analogen Grundlagendaten stammen für beide Stationen aus dem Archiv des Kraftwerksbetreibers (BKW FMB Energie AG). Es handelt sich dabei sowohl um hydrologische Jahrbuchseiten, welche die Tagesmittelwerte des Abflusses enthalten wie auch um Limnigraphenstreifen, welche die kontinuierliche Ganglinie aufzeigen.

Insgesamt wurden für die beiden Stationen über 150 Jahre digitalisiert, wobei die Daten von Kander-Hondrich von SCHNYDRIG (2007) im Rahmen einer Seminararbeit erfasst, überprüft und korrigiert wurden. Wie auch bei der Digitalisierung der meteorologischen Daten (vgl. Kapitel 3.1.3) wurden die Tagesmittelwerte manuell am PC erfasst. Die Kontrolle auf falsch eingegebene Werte erfolgte in erster Linie über den Vergleich der berechneten und in den Jahrbuchseiten aufgeführten Monatsmittelwerten aber auch über systematische Vergleiche zwischen Datengrundlage und Eingabe.

Da für die Kalibrierung des hydrologischen Modells zeitlich hoch aufgelöste Abflussdaten mit einem Messintervall von einer Stunde benötigt werden, wurden zudem anhand der Limnigraphenstreifen der Jahre 1992-2002 für die Station Kander-Kandersteg die entsprechende Abflussganglinie digitalisiert (vgl. auch SCHULER 2007). Diese zeitlich aufwändige Digitalisierung wurde mit Hilfe der Software HydroPro (KERN 2009) durchgeführt.

### 3.2.3 Beurteilung der hydrologischen Datengrundlage

Auf eine vertiefte Beurteilung der Qualität der Abflussdaten wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchung verzichtet. Auf folgende Punkte, welche die Qualität der Abflussdaten betreffen, sei an dieser Stelle dennoch hingewiesen:

- > Bei einzelnen Stationen (z.B. Kander-Kandersteg, Kander-Frutigen, Engstlige-Frutigen) muss im extremen Hochwasserfall (z.B. Hochwasserereignis vom August 2005) im Bereich der Abflussmessstationen mit Ausuferungen gerechnet werden. Neben dem in diesem Wertebereich allgemein erhöhten Messfehler (z.B. POTTER & WALKER 1985 oder BWG 2002) ist deshalb bei diesen Stationen die Abflussbestimmung im Hochwasserfall mit zusätzlichen Unsicherheiten verbunden (BOLLIGER 2009).
- > Nach grossen Hochwasserereignissen ist bei einzelnen Stationen von einer starken Sohlenveränderung im Bereich der Messstelle auszugehen, was die Qualität der Abflussdaten stark beeinträchtigt. Bei der Station Kander-Kandersteg waren diese Gerinneveränderungen nach den grossen Hochwasserabflüssen der Jahre 2004 und 2005 so stark ausgeprägt, dass mit den vorhandenen Messeinrichtungen der Abfluss im Niedrigwasserbereich nicht mehr erfasst werden konnte (WALTER 2007). Die teilweise umfangreichen Lücken in der Messreihe sind auf diesen Umstand zurückzuführen.

### 3.3 Fazit

Im untersuchten Einzugsgebiet Kander-Hondrich und im Berner Oberland sind zahlreiche meteorologische Messstationen vorhanden. Für den Zeitraum ab 1961 sind die Daten sämtlicher Messstationen digital verfügbar und können für Auswertungen direkt eingesetzt werden. Dagegen lagen für viele Stationen, welche seit 1900 oder teilweise noch früher in Betrieb sind, die Messungen bisher nur in analoger Form vor. Zur Erweiterung der raum-zeitlichen Information zu den klimatischen Verhältnissen wurden deshalb im Rahmen der vorliegenden Arbeit zahlreiche Datenreihen von Niederschlag und Temperatur bis 1900 zurück digitalisiert und für weitere Auswertungen erschlossen. Somit liegt heute für das Berner Oberland sowie für das Einzugsgebiet der Kander eine zeitlich umfassende Datengrundlage vor, welche räumlich hoch aufgelöste Analysen z.B. zu den klimatischen Veränderungen während des vergangenen Jahrhunderts ermöglicht (vgl. Kapitel 8).

Ebenso sind im untersuchten Einzugsgebiet Kander-Hondrich die Daten zahlreicher hydrologischer Messstationen verfügbar. Im Vergleich zu anderen Einzugsgebieten in der Schweiz oder in anderen Bergregionen im Ausland scheint deshalb die Datenlage für die vorgesehenen Auswertungen ideal zu sein (vgl. z.B. WEHREN ET AL. 2010B). Es gilt aber zu beachten, dass insbesondere bei den verfügbaren hydrologischen Datenreihen im Einzugsgebiet die Messperioden oft unterschiedlich lang sind und/oder verschiedene Zeiträume abdecken. Dies erschwert die Auswertung und schränkt die Vergleichbarkeit der Resultate deutlich ein. Durch Digitalisierung der beiden langen Messreihen von Kander-Kandersteg und Kander-Hondrich konnte diesen Umständen begegnet und die Datenlage zusätzlich erweitert werden: Die Auswertung und der Vergleich der hydrologischen Veränderungen wurden somit für diese beiden Messstellen für nahezu das gesamte 20. Jahrhundert ermöglicht (vgl. Kapitel 9).



## 4 Klima und Hydrologie

Dieses Kapitel zeigt die aktuellen klimatologischen und hydrologischen Verhältnisse im untersuchten Einzugsgebiet. Die Charakterisierung erfolgt dabei in erster Linie anhand von Daten der in Kapitel 3 aufgeführten Messstationen.

Während die Verhältnisse von Niederschlag, Temperatur und Verdunstung in Kapitel 4.1 und Kapitel 4.2 beschrieben werden, enthält Kapitel 4.3 eine Charakterisierung der Abflussverhältnisse im untersuchten Einzugsgebiet. In Kapitel 4.4 werden die Bilanzierungsgrößen der vorangehenden Kapitel zum Wasserhaushalt für das Gesamteinzugsgebiet sowie für die Bilanzierungsgebiete zusammengefasst. Kapitel 4.5 und Kapitel 4.6 beleuchten die im Einzugsgebiet Kander-Hondrich vorherrschenden Starkniederschlags- und Hochwasserverhältnisse.

### 4.1 Niederschlag und Temperatur

Abbildung 4.1 zeigt in der Übersicht die mittleren monatlichen und jährlichen Niederschlags- und Temperaturverhältnisse im Berner Oberland bzw. im Einzugsgebiet Kander-Hondrich. Anhand der Niederschlagskarte von KIRCHHOFER & SEVRUK (1992) wird ersichtlich, mit welchen mittleren jährlichen Niederschlagssummen (Periode 1951-1980) in der Region des Untersuchungsgebietes gerechnet werden kann. In den verschiedenen Klimadiagrammen sind die mittleren monatlichen Niederschlagssummen (Periode 1901-2008) und die mittleren monatlichen Temperaturen (Periode 1933-2008) aufgeführt. Da nicht alle Standorte über Niederschlags- und Temperaturmessungen verfügen, ist bei einzelnen Klimadiagrammen nur ein Parameter aufgeführt. Aus dem Vergleich zwischen den Angaben in der Karte und den Klimadiagrammen wird zudem ersichtlich, dass die entsprechenden Beträge je nach verwendeter Periode schwanken können (vgl. auch Kapitel 8).

Die Zusammenstellung zeigt, dass die räumliche Variabilität der **mittleren jährlichen Niederschlagsverhältnisse** stark von der Höhenlage geprägt wird und dass die mittlere jährliche Niederschlagssumme im Einzugsgebiet Kander-Hondrich je nach Höhenlage zwischen rund 1200 und über 2800 mm betragen kann. Bei den Klimadiagrammen der Stationen, welche auf einer Höhe zwischen 580 und 1320 m ü.M. liegen, treten im Jahresmittel Niederschlagssummen zwischen 1179 und 1271 mm auf. Der Jahresgang unterscheidet sich bei den einzelnen Standorten nur geringfügig: Im Sommer betragen die mittleren Monatssummen bis zu 150 mm, im Winter fällt im Monatsmittel mit rund 80 mm nur knapp die Hälfte dieser Niederschlagsmenge an. Das Verhältnis von Sommer- zu Winterniederschlag beträgt bei den dargestellten Stationen zwischen 1.69 und 1.95.

Auch bei der **mittleren monatlichen und jährlichen Temperatur** ist eine deutliche Höhenabhängigkeit festzustellen. Während in Interlaken (580 m ü.M.) ein Jahresmittelwert von 8.5 °C zu beobachten ist, beträgt der entsprechende Mittelwert der Temperatur auf dem Jungfrauoch (3580 m ü.M.) -7.6 °C. Auch bei der Temperatur ist der monatliche Verlauf bei allen drei Stationen sehr ähnlich, allerdings ist mit zunehmender Höhe eine leichte Abnahme der Saisonalität festzustellen: Während in Interlaken der Schwankungsbereich zwischen Sommer und Winter knapp 17 °C beträgt, umfasst die gleiche Differenz auf dem Jungfrauoch nur noch rund 12 °C.

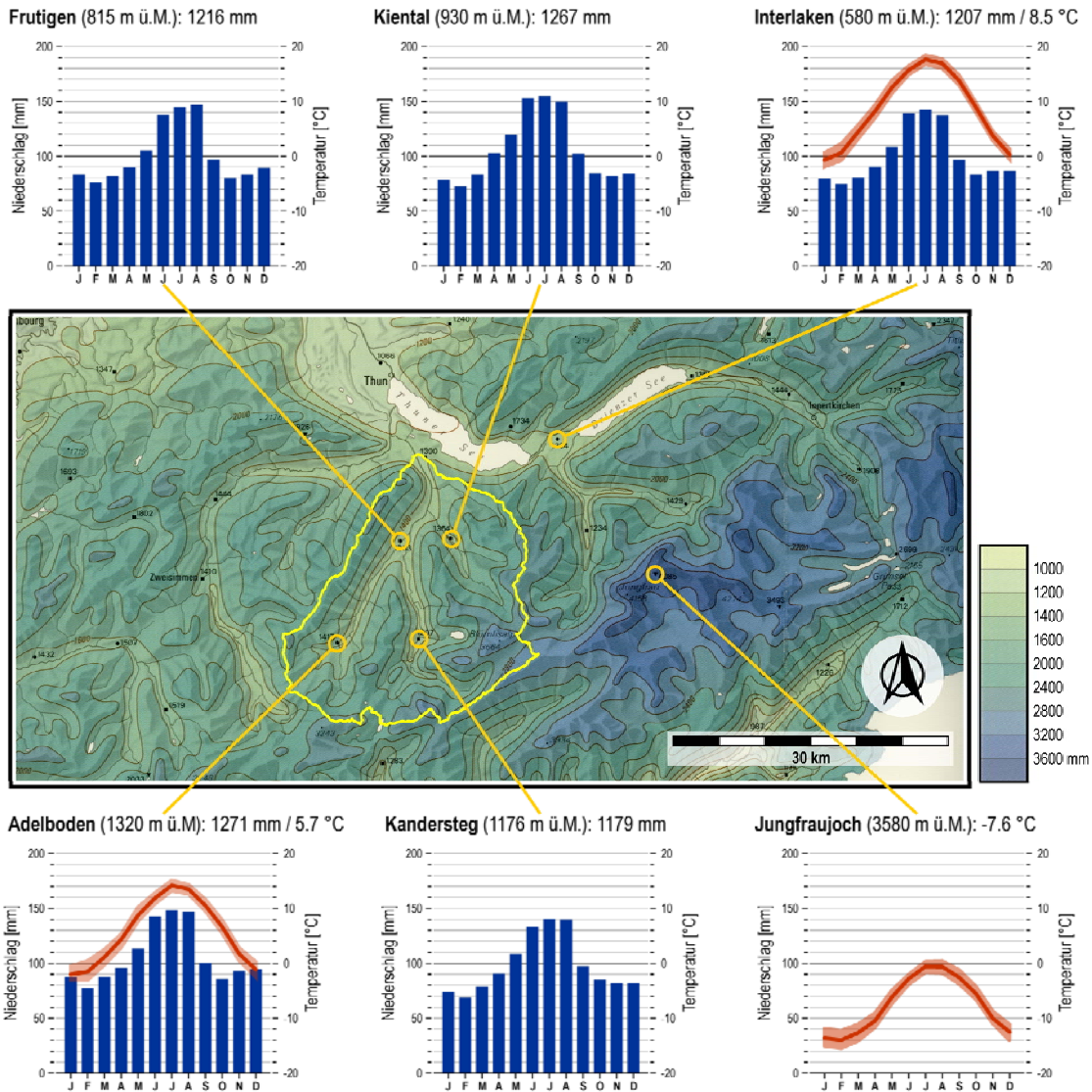


Abbildung 4.1: Mittlere monatliche Niederschlagssummen und Temperaturen im Berner Oberland. Das rote Band bei den Temperaturmittelwerten umfasst den Bereich zwischen dem oberen und unteren Quartil. Perioden Klimadiagramme: Niederschlag: 1901-2008, Temperatur: 1933-2008; Periode Karte: 1951 bis 1980. (Karte: KIRCHHOFER & SEVRUK 1992)

## 4.2 Verdunstung

Als weitere wichtige Grösse des Wasserhaushalts ist in Abbildung 4.2 die mittlere jährliche Höhe der **aktuellen Verdunstung** anhand der schweizweiten Übersichtskarte von MENZEL ET AL. (1999) dargestellt. Auch bei diesem Parameter führt die durch die Temperatur hervorgerufene Höhenabhängigkeit der Verdunstung dazu, dass die räumliche Differenzierung im Untersuchungsgebiet Kander-Hondrich deutlich ausgeprägt ist. Zwischen den tiefsten und den höchsten Lagen entsteht eine Differenz von rund 500 mm.

Während die Verdunstung in den Tallagen (Frutigen, Kien, Mülenen) einen Wert von rund 500 mm aufweist, treten in der gleichen Periode (1973-1992) im hinteren Gasteretal bzw. in der Region der Blüemlisalp (3657 m ü.M.), welche zu den höchsten Gebieten im Untersuchungsgebiet gehören, minimale Verdunstungshöhen von unter 100 mm auf.

Insgesamt ergibt sich für die aktuelle Verdunstung ein Gebietsmittel von rund 370 mm pro Jahr. Bei diesen Angaben ist jedoch zu beachten, dass es sich um modellierte und nicht um gemessene Werte handelt, die mit Unsicherheiten behaftet sind (MENZEL ET AL. 1999).

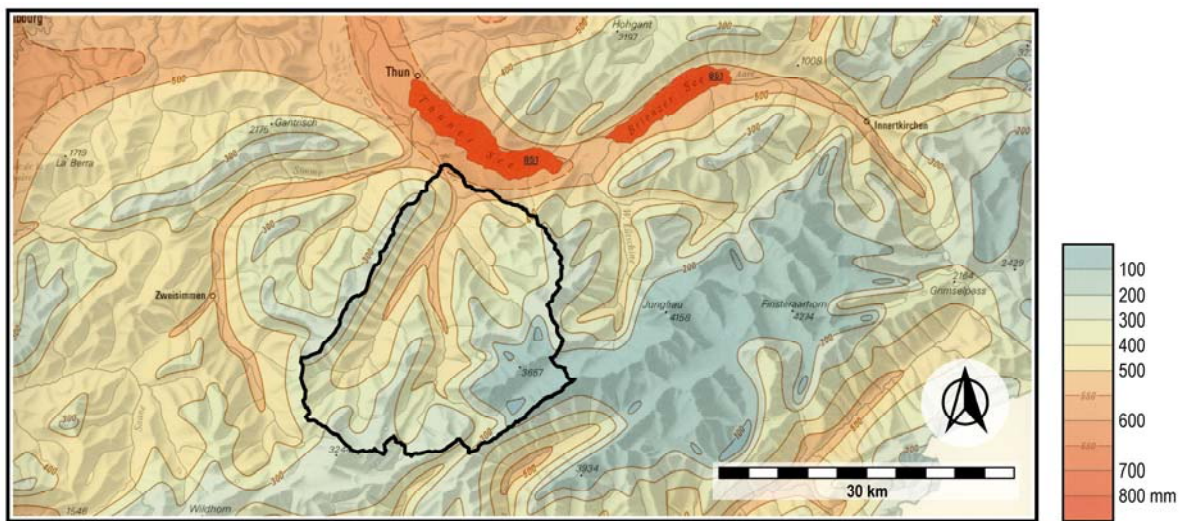


Abbildung 4.2: Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhen im Berner Oberland für die Periode 1973-1992. (Karte: MENZEL ET AL. 1999 verändert)

### 4.3 Abfluss

Wie aus den Übersichtskarten von MARGOT ET AL. (1992) sowie BAUMGARTNER ET AL. (2007) hervorgeht, sind die Abflussverhältnisse im untersuchten Einzugsgebiet Kander-Hondrich weitgehend unbeeinflusst von wasserwirtschaftlichen Nutzungen. Einzelne kleine Kraftwerke, welche die Abflussverhältnisse moderat und nur über kurze Strecken innerhalb der Teileinzugsgebiete verändern, befinden sich im Raum Kandersteg und Adelboden. Die Abflussverhältnisse können deshalb insgesamt als natürlich beurteilt werden.

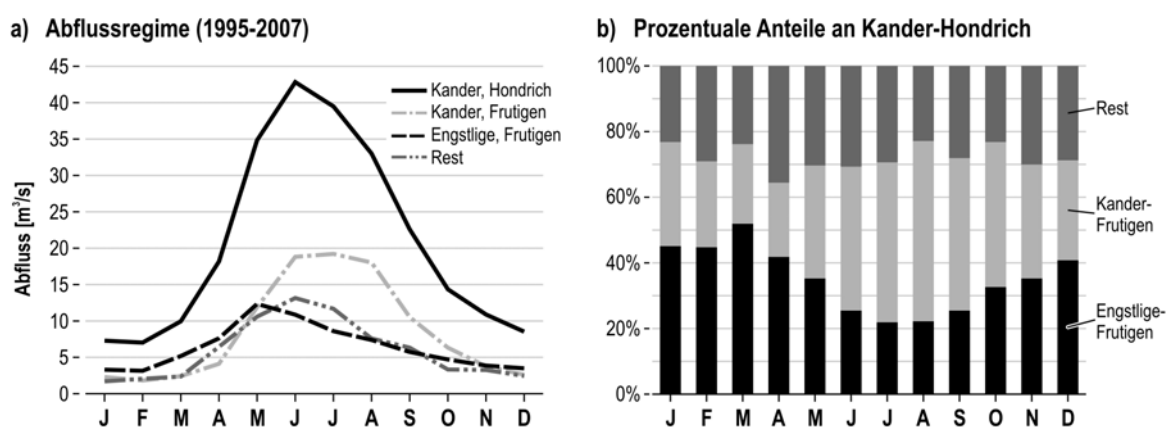


Abbildung 4.3: Mittlere monatliche Abflüsse des Gesamteinzugsgebietes Kander-Hondrich sowie der Teileinzugsgebiete Kander-Frutigen, Engstlige-Frutigen und der restlichen Einzugsgebietsfläche (a, Periode 1995-2007, Daten: BAFU, AWA) sowie prozentuale Anteile des Abflusses der Teileinzugsgebiete am Abfluss des Gesamteinzugsgebietes (b).

Der **mittlere monatliche Abfluss** kann für das Gesamteinzugsgebiet der Kander sowie für die Teileinzugsgebiete Kander-Frutigen und Engstlige-Frutigen aus den vorliegenden Abflussmessungen bestimmt werden (Abbildung 4.3, Periode: 1995-2007). Die Abflussmengen der übrigen Teileinzugsgebiete (in Abbildung 4.3 als «Rest» bezeichnet) umfassen die Abflüsse aus den Teileinzugsgebieten Suld-Mülenen, Chiene-Kien sowie des Zwischeneinzugsgebietes der Kander von der Messstelle in Frutigen bis Hondrich. Die Angaben wurden aus den vorhandenen Messwerten bilanziert.

Aus dieser Zusammenstellung wird ersichtlich, dass der Abfluss des gesamten Einzugsgebietes im Jahresverlauf in unterschiedlichem Ausmass vom Abfluss der verschiedenen Teileinzugsgebiete, welche nahezu gleich gross sind (vgl. Anhang B), beeinflusst wird (Abbildung 4.3). Während das Teileinzugsgebiet Engstlige-Frutigen in den Monaten Dezember bis April den grössten Abfluss aller Teileinzugsgebiete aufweist, ist der Abfluss bei Kander-Frutigen in den Monaten Juni bis Oktober am grössten. Der gesamte Abfluss aus den restlichen Teileinzugsgebieten ist ausser in den Monaten Juni und Juli vergleichbar mit demjenigen der Engstlige-Frutigen (Abbildung 4.3 a).

Die **prozentualen Anteile** am Abfluss des gesamten Einzugsgebietes sind dementsprechend für die Engstlige im Frühling am grössten (Abbildung 4.3 b). In den Sommermonaten liefert jedoch das Einzugsgebiet Kander-Frutigen den höchsten Beitrag zum Gesamtabfluss. Diese Variationen sind eine direkte Folge der unterschiedlichen Abflussregime, welche sich nach WEINGARTNER & ASCHWANDEN (1992) typisieren lassen und vorwiegend durch die mittlere Höhenlage und den Vergletscherungsgrad der jeweiligen Teileinzugsgebiete beeinflusst werden (vgl. Anhang B). Es zeigt sich, dass das Abflussregime des Hauptflusses (Kander-Hondrich bzw. Kander-Frutigen) vorwiegend glazial und dasjenige der übrigen Teileinzugsgebiete stärker nival geprägt ist (vgl. Tabelle 4.1).

Wie Tabelle 4.1 auch zeigt, liegen die prozentualen Anteile des mittleren jährlichen Abflusses der Teileinzugsgebiete am mittleren jährlichen Abfluss des Gesamteinzugsgebietes (Spalte «Anteil an MQ», Tabelle 4.1) durchwegs in der Grössenordnung der entsprechenden Flächenanteile am Gesamteinzugsgebiet (Spalte «Flächenanteil», Tabelle 4.1). Dies weist darauf hin, dass der Einfluss der Teileinzugsgebiete auf den Abfluss des Einzugsgebietes Kander-Hondrich zwar saisonale Unterschiede aufweist (vgl. Abbildung 4.3), dass sich diese im Verlauf des Jahres aber wieder ausgleichen und in der Grössenordnung der jeweiligen Flächenanteile liegen. Geringe Abweichungen davon sind bei der Kander-Frutigen sowie beim restlichen Teileinzugsgebiet festzustellen. Diese lassen sich durch die Unterschiede bei den mittleren jährlichen Niederschlagsmengen erklären (vgl. auch Tabelle 4.2).

Tabelle 4.1: Mittlere jährliche Abflüsse (MQ) bzw. mittlere jährliche Abflussspenden (Mq), Anteile der Teileinzugsgebiete am mittleren jährlichen Abfluss der Kander und Flächenanteile der Teileinzugsgebiete am Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich.

<b>Einzugsgebiet</b>	<b>MQ [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Mq [l/(s·km<sup>2</sup>)]</b>	<b>Anteil an MQ* [%]</b>	<b>Flächen- anteil* [%]</b>	<b>Abfluss- regime**</b>
Kander-Hondrich	20.8	41.9	100.0	100.0	nivo-glaciaire
Kander-Frutigen	8.5	46.4	40.9	37.0	glacio-nival
Engstlige-Frutigen	6.4	43.8	30.6	29.3	nival-alpin
Rest des Einzugsgebietes	5.9	35.3	28.5	33.7	nival-alpin

\* bezogen auf das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich, \*\* nach WEINGARTNER & ASCHWANDEN (1992)



Die **mittleren jährlichen Abflussspenden** (Mq) liegen in einem Bereich zwischen 35.3 und 46.4 l/(s·km<sup>2</sup>). Hier weist das vergletscherte Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen den höchsten Wert auf, während bei den ungemessenen restlichen Teileinzugsgebieten die kleinsten mittleren jährlichen Abflussspenden zu beobachten sind.

## 4.4 Wasserhaushalt

Wie in Kapitel 2.2 erwähnt, haben SCHÄDLER & WEINGARTNER (2002) für alle Bilanzierungsgebiete der Schweiz (Periode 1961-1990) die Wasserhaushaltsgrößen (Niederschlag, Abfluss, Verdunstung und Speicheränderung) bestimmt. Die verwendete Methode folgt dem Ansatz von LANG (1985), wobei der Niederschlag als Restglied der Wasserbilanz betrachtet und somit als Bilanzierungsgröße aus Abfluss, Verdunstung und Speicheränderung berechnet wird.

In Tabelle 4.2 sind die entsprechenden Werte für die Bilanzierungsgebiete der Kander sowie für das Gesamteinzugsgebiet zusammengestellt. Daraus wird Folgendes ersichtlich:

- > Für das Teileinzugsgebiet **Kander-Frutigen** (20-090) lässt sich die grösste Niederschlags- bzw. Abflussmenge sowie die kleinste Verdunstungshöhe und Speicheränderung im Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich beobachten.
- > Das Teileinzugsgebiet **Engstlige-Frutigen** (20-100) weist für den Niederschlag und den Abfluss sehr ähnliche Werte wie das Gesamteinzugsgebiet auf. Bei der Verdunstung und der Speicheränderung treten jedoch leicht höhere Werte auf.
- > Beim **restlichen Teileinzugsgebiet** (Chiene-Kien, Suld-Mülenen und Zwischeneinzugsgebiet, 20-110) lassen sich beim Niederschlag und beim Abfluss die tiefsten Wert beobachten. Während die Verdunstung in der gleichen Größenordnung wie beim Gesamteinzugsgebiet liegt, ist die Speicheränderung gleich gross wie beim Teileinzugsgebiet Engstlige-Frutigen.

Tabelle 4.2: Mittlerer jährlicher Wasserhaushalt der Bilanzierungsgebiete der Kander sowie des Gesamteinzugsgebietes (Periode: 1961-1990, Daten: SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002)

Bilanzierungsgebiet (Nummer)	N [mm]	A [mm]	V [mm]	dS [mm]
Kander-Frutigen (20-090)	1647	1315	341	-9
Engstlige-Frutigen (20-100)	1613	1229	385	-1
Chiene-Kien, Suld-Mülenen und Zwischeneinzugsgebiet (20-110)	1524	1167	358	-1
Gesamteinzugsgebiet (Kander bis Mündung zur Simme)	1597	1241	360	-4

N = Niederschlag, A = Abfluss, V = Verdunstung, dS = Speicheränderung

Da SCHÄDLER & WEINGARTNER (2002) die Werte der Wasserhaushaltsgrößen für alle Bilanzierungsgebiete der Schweiz bestimmt haben, können die Werte der Teilräume im Einzugsgebiet Kander-Hondrich in den **gesamtschweizerischen Kontext** eingeordnet werden. Dieser Vergleich ist in Abbildung 4.4 anhand von Boxplots für die Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag (N), Abfluss (A), Verdunstung (V) und Speicheränderung (dS) dargestellt. Während die Boxplots die Werte aller Bilanzie-

rungsgebiete der Schweiz umfassen, stellen die Punkte jeweils die Werte für die Bilanzierungsgebiete im Einzugsgebiet Kander-Hondrich dar.

Aus der Zusammenstellung in Abbildung 4.4 geht hervor, dass im Einzugsgebiet Kander-Hondrich im gesamtschweizerischen Vergleich eine überdurchschnittlich hohe mittlere jährliche Niederschlagsmenge auftritt (rund 1600 mm). Da die aktuelle Verdunstung im schweizweiten Vergleich auf Grund der Höhenlage mit einem mittleren jährlichen Wert von rund 360 mm unterdurchschnittlich ausgeprägt ist, gelangt im Jahresmittel mehr Wasser zum Abfluss als im gesamtschweizerischen Mittel (rund 1240 mm). Die Speicherinhalte bzw. die Gletscher nahmen in der Periode 1961-1990 im jährlichen Durchschnitt um ca. 4 mm ab, was einem mittleren Wert aller vergletscherten Einzugsgebiete der Schweiz entspricht (vgl. auch Tabelle 4.2).

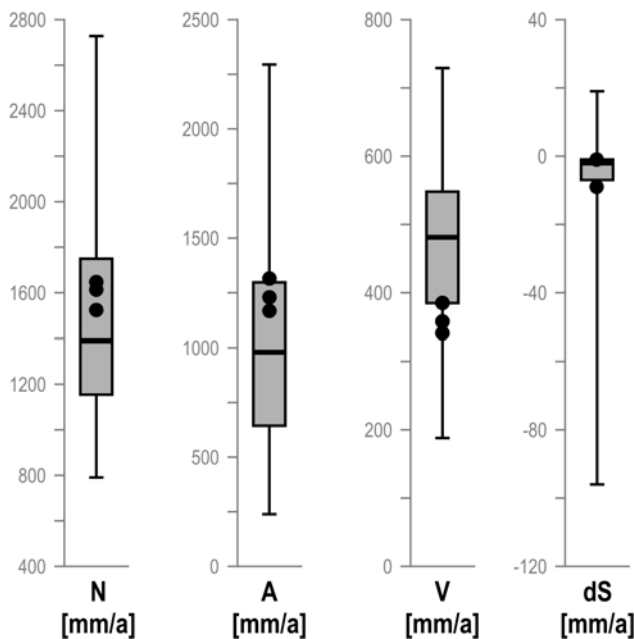


Abbildung 4.4: Einordnung der mittleren jährlichen Werte der Wasserhaushaltsgrößen im Einzugsgebiet Kander-Hondrich im gesamtschweizerischen Vergleich (Periode: 1961-1990, Daten: SCHÄDLER & WEINGARTNER 2002).

Die Boxplots fassen die Werte aus allen Bilanzierungsgebieten der Schweiz zusammen, die Punkte geben die Werte der Bilanzierungsgebiete im Einzugsgebiet Kander-Hondrich an.

N = Niederschlag, A = Abfluss, V = Verdunstung, dS = Speicheränderung

## 4.5 Starkniederschläge

### 4.5.1 Niederschlagsmengen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperiode

Für die Hochwasserhydrologie sind die vorherrschenden Starkniederschlagsverhältnisse von herausragender Bedeutung. Eine in der Schweiz für praktische Anwendungen oft eingesetzte Grundlage zur Beurteilung der Starkniederschlagsmengen für Ereignisse unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperiode stellt die Übersichtskarte von GEIGER ET AL. (1992) dar. Obschon von JENSEN ET AL. (1997) eine überarbeitete Version dieser Datengrundlage vorliegt, welche auf einer anderen Methode der räumlichen Interpolation aber auf den gleichen Grundlagendaten beruht, wird verbreitet noch die alte Version verwendet. Da für verschiedene Auswertungen in der vorliegenden Arbeit (vgl. z.B. Kapitel 14) ebenfalls die Werte von GEIGER ET AL. (1992) angewendet wurden, wird an dieser Stelle ausschliesslich auf diese Daten eingegangen.

HEGG & VOGT (2005) weisen jedoch darauf hin, dass der von GEIGER ET AL. (1992) ausgewertete Zeitraum von 1901 bis 1970 gegenüber den aktuell vorherrschenden Verhältnissen eine Phase mit deutlich reduzierten Starkniederschlagsmengen darstellt und dass die daraus abgeleiteten Werte die aktuel-

len Bedingungen zum Teil deutlich unterschätzen. Wie die daraus in den letzten Jahren entstandenen Veränderungen der Starkniederschlagsverhältnisse im Einzugsgebiet der Kander bzw. im Berner Oberland heute berücksichtigt werden müssen, wird vertieft in Kapitel 8.7 behandelt.

Bei der Beurteilung der Starkniederschlagsverhältnisse ist entscheidend, welche **Niederschlagsdauer** berücksichtigt wird. Auf Grund kürzerer Reaktionszeiten können bei kleinen Einzugsgebieten bereits Starkniederschläge kurzer Ereignisdauer grössere Hochwasserabflüsse hervorrufen (vgl. STEPHENSON 1981). Da die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten Teileinzugsgebiete Flächen zwischen 0.5 und 500 km<sup>2</sup> aufweisen (vgl. Kapitel 13 und Kapitel 14), wird die Charakterisierung der Starkniederschlagsverhältnisse anhand der Ereignisdauern von 1 und 24 Stunden vorgenommen. Wie Abbildung 4.5 für die Periode von 1901-1970 zeigt, lassen sich im Einzugsgebiet folgende räumliche Muster für diese beiden Niederschlagsdauern erkennen:

- > Die Regionen im hinteren **Kiental** und im hinteren **Engstligental** weisen bei den Niederschlagsereignissen von 1 und 24 Stunden Dauer und 100-jährlicher Wiederkehrperiode etwas höhere Werte auf, als die zentralen und die nordwestlichen Regionen des Untersuchungsgebietes. Während z.B. auf der **Engstligenalp** für ein 100-jährliches Niederschlagsereignis von 24 Stunden Dauer von über 160 mm und im hinteren Kiental von rund 140 mm ausgegangen werden muss, beträgt der entsprechende Wert im Raum Frutigen weniger als 100 mm.
- > Daneben sind bei den Niederschlagsmengen der Ereignisse mit 1-stündlicher Dauer etwas schwächer ausgeprägte **Gradienten** zwischen den Regionen mit geringen und hohen Niederschlagsmengen zu beobachten (Abbildung 4.5 a) als bei den Niederschlagsmengen, welche bei Ereignissen 24-stündlicher Dauer auftreten (Abbildung 4.5 b).

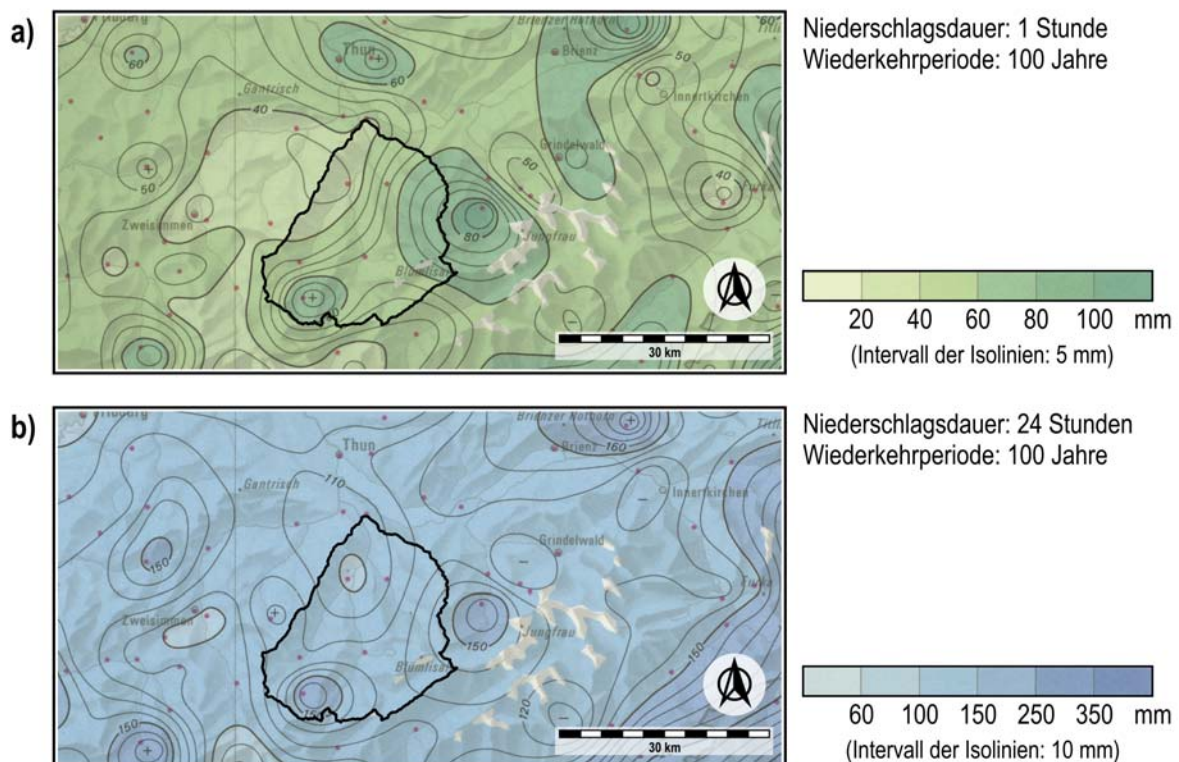


Abbildung 4.5: Extreme Punkttregen unterschiedlicher Dauer (a: 1 Stunde; b: 24 Stunden) und 100-jährlicher Wiederkehrperiode im Berner Oberland. Periode: 1901-1970. (Daten: GEIGER ET AL. 1992)

### 4.5.2 Eintretenszeitpunkt der Starkniederschläge

Neben den Niederschlagsmengen ist für die Hochwasserauslösung auch der Zeitpunkt des Starkniederschlagsereignisses im Jahresverlauf von entscheidender Bedeutung. Starkniederschläge, welche im Winter auftreten, fallen normalerweise zu einem grossen Anteil als Schnee und sind somit in der Regel nicht direkt abflusswirksam. Dagegen haben Niederschlagsereignisse, welche im Sommer auftreten, normalerweise einen direkten und hohen Einfluss auf die Hochwasserabflüsse.

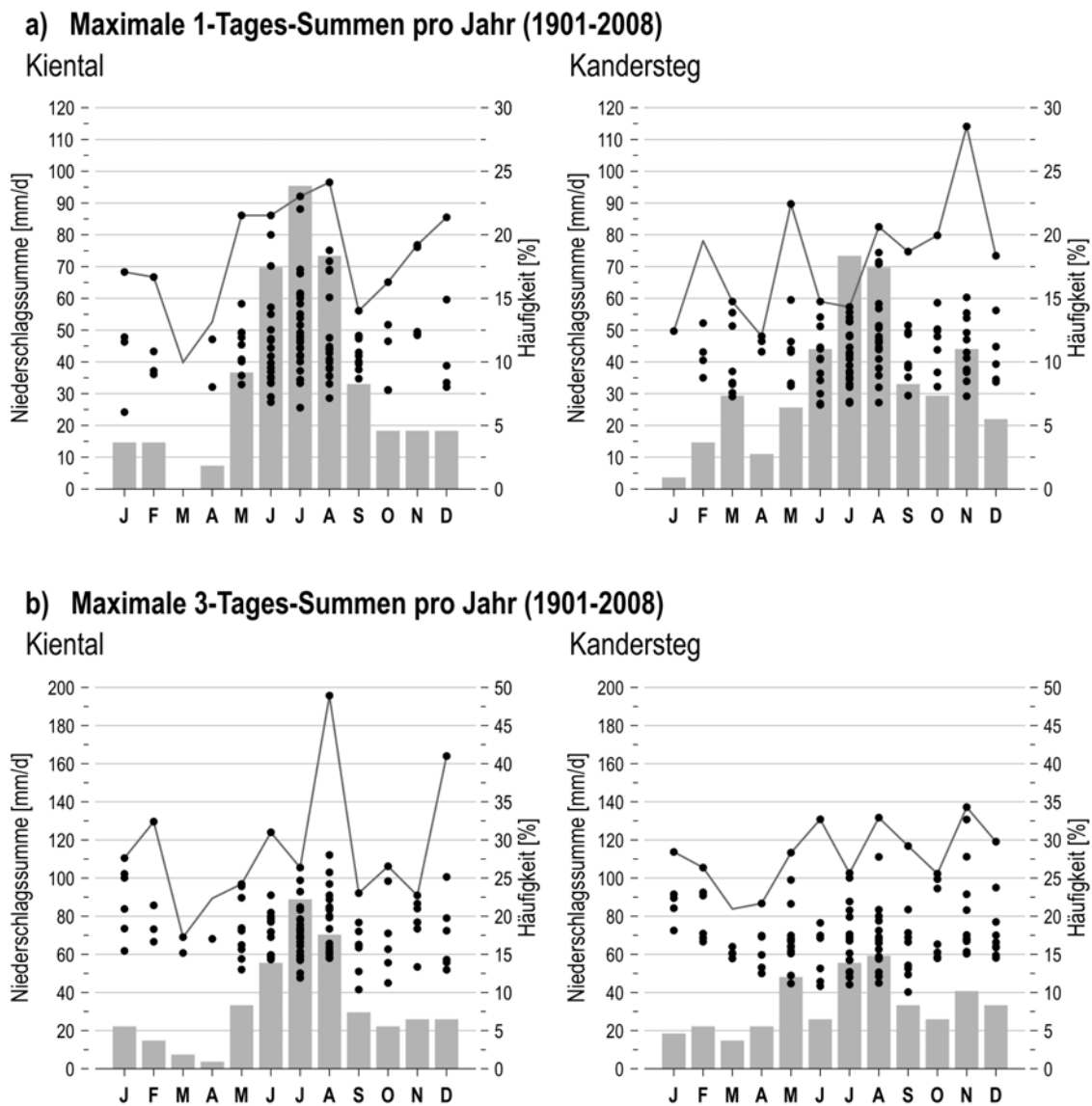


Abbildung 4.6: Eintretenszeitpunkt der jährlichen Starkniederschlagsmaxima 1- und 3-tägiger Dauer für die Stationen Kiental und Kandersteg (zusammengefasst nach Monaten, kalendarische Werte). Balken: prozentuale Häufigkeit der Jahresmaxima pro Monat. Punkte: Absolute Werte der Jahresmaxima, dargestellt nach Monat des Eintretens. Linien: Monatsmaxima.

Aus diesem Grund sind in Abbildung 4.6 am Beispiel der Stationen Kiental und Kandersteg die maximalen Niederschlagssummen pro Jahr unterschiedlicher Dauer (1 Tag bzw. 3 Tage), anhand des jeweiligen Monats des Eintretens klassiert, dargestellt. Die ausgewertete Periode umfasst die Jahre

1901-2008. Es ist zu beachten, dass es sich bei den verwendeten Daten um kalendarische Werte handelt. Das bedeutet, dass z.B. die 1-Tages-Maxima auf Grund der zeitlichen Auflösung der verfügbaren Niederschlagsdaten anhand der Tagessummen (jeweils 6:30 UTC bis 6:30 UTC des nächsten Tages) bestimmt wurden und nicht anhand einer gleitenden 24-Stunden-Summe.

In Abbildung 4.6 geben die grauen Balken die prozentuale Häufigkeit der Jahresmaxima für jeden Monat an. Die schwarzen Punkte entsprechen den Werten der jährlich grössten Niederschlagssummen und die Linien markieren die maximalen Niederschlagssummen, welche für den entsprechenden Monat erwartet werden müssen.

Bei beiden Stationen kann festgestellt werden, dass sich die Jahresmaxima der Starkniederschlagsereignisse, unabhängig der Ereignisdauer, vorwiegend auf den Sommer (Monate Juni bis August) konzentrieren. Daneben muss aber auch im Winter (November bis Februar), vor allem bei der Station Kandersteg, mit grossen Niederschlagsmengen gerechnet werden, welche in dieser Jahreszeit jedoch etwas weniger häufig auftreten. In den Monaten März und April traten bisher bei beiden Stationen nur selten Jahresmaxima auf und die maximalen 1- bzw. 3-täglichen Niederschlagsmengen fallen für diese Monate nur gering aus. Auf Grund dieser Auswertung ist davon auszugehen, dass mit grösseren Starkniederschlagsereignissen (vor allem in Kandersteg) vereinzelt auch im Winterhalbjahr zu rechnen ist, insbesondere mit Ereignissen längerer Dauer.

Der absolut grösste Wert bei den 1-Tagessummen ist für die Periode 1901-2008 bei der Station Kandersteg im November 1968 zu beobachten. Das grösste Jahresmaximum bei den 3-Tagessummen trat in Kiental im August 2005 auf. Weiterführende Auswertungen zu den Starkniederschlagsverhältnissen im Einzugsgebiet sowie im Berner Oberland können der Arbeit von GAMMETER (2008) entnommen werden.

## 4.6 Hochwasserabflüsse

### 4.6.1 Allgemeine Charakterisierung der Hochwasserverhältnisse

Wie in Kapitel 2.1 erwähnt, ist die Kander als besonders «launisches» Gewässer bekannt: Sie zeichnet sich durch starke und äusserst rasche Abflussschwankungen aus und kann zeitweise grosse Geschiebemengen mit sich führen, weshalb sie auch als grösster Wildbach der Schweiz bezeichnet wird (VISCHER 2003).

In Tabelle 4.3 sind ausgewählte **Kenngrossen** zu den Hochwasserabflüssen an den im Untersuchungsgebiet vorhandenen Messstellen, welche heute in Betrieb sind, zusammengestellt (vgl. Kapitel 3.2). Aus der Tabelle werden die mittleren und das maximale Jahreshochwasser (MHQa, HHQ) die daraus abgeleiteten Abflussspenden sowie die Variabilität der jährlich grössten Hochwasserabflüsse (Var(HQa)) ersichtlich, welche anhand des Variationskoeffizienten angegeben ist (z.B. SCHÖNWIESE 2006).

Diese Zusammenstellung zeigt deutlich, dass das Teileinzugsgebiet Engstlige-Frutigen die grössten Abflussspenden im Hochwasserfall (HHq, MHqa) sowie die grösste Variabilität der Jahreshochwasser (Var(HQa)) aufweist. Die hochwasserhydrologischen Verhältnisse dieses Teileinzugsgebietes wurden detailliert von WEHREN & WEINGARTNER (2008) untersucht und beschrieben (vgl. Anhang E). Beim Allenbach-Adelboden, einem Teileinzugsgebiet der Engstlige, treten die grössten Abflussspenden und der grösste Variationskoeffizient auf. Für die Teileinzugsgebiete der Kander sowie das Gesamt-

einzugsgebiet Kander-Hondrich sind sowohl kleinere Abflussspenden im Hochwasserfall als auch eine reduzierte Variabilität der jährlich grössten Hochwasserabflüsse zu beobachten.

Tabelle 4.3: Hochwasserkenngrossen für das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich sowie für ausgewählte Teileinzugsgebiete. HHQ = Grösstes gemessenes Hochwasser; HHq = Abflussspende des HHQ; MHQa = Mittleres Jahreshochwasser für die angegebene Periode; MHqa = Abflussspende des MHQa; Var(HQa) = Variationskoeffizient der Jahreshochwasser.

Einzugsgebiet	Periode	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Datum (HHQ)	HHQ [m <sup>3</sup> /s]	HHq [l/(s·km <sup>2</sup> )]	MHQa [m <sup>3</sup> /s]	MHqa [l/(s·km <sup>2</sup> )]	Var(HQa)
Kander-Hondrich	1903-2008	495.6	22.08.2005	273.0	551	123.0	248	0.26
Kander-Frutigen	1993-2008	183.1	22.08.2005	85.0	464	53.0	289	0.25
Kander-Kandersteg	1917-2005	142.7	22.08.2005	73.8	517	34.3	240	0.23
Engstlige-Frutigen	1995-2008	145.2	07.08.2007	102.0	703	55.6	383	0.39
Allenbach-Adelboden	1950-2008	28.8	07.08.1977	75.0	2600	23.7	823	0.60

Wie erwähnt sind bei der Kander und insbesondere auch bei der Engstlige im Hochwasserfall **ausgeprägte Abflussschwankungen** zu beobachten, was anhand zweier Hochwasserereignisse vom Oktober 2000 und vom Juli 2007 illustriert werden kann (Abbildung 4.7): Der Abfluss bei Kander-Hondrich stieg im Oktober 2000 innerhalb von wenigen Stunden von rund 15 m<sup>3</sup>/s auf den fast zehnfachen Betrag an (Abbildung 4.7 a). Gleichzeitig ist auch der Abfluss der Teileinzugsgebiete dargestellt, woraus der Anteil des Abflusses der Teilräume am Gesamtabfluss ersichtlich wird. Während in Abbildung 4.7 a das Hochwasserereignis vorwiegend vom Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen beeinflusst wird, werden die Hochwasserspitzen bei Kander-Hondrich (Abbildung 4.7 b) im Juli 2007 vorwiegend vom Abflussgeschehen der Engstlige-Frutigen ausgelöst.

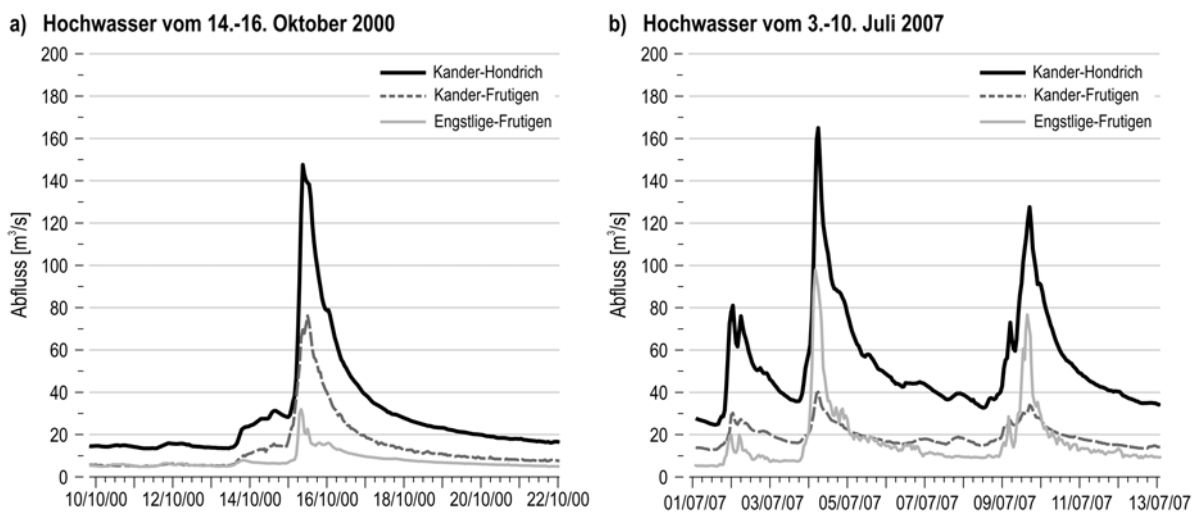


Abbildung 4.7: Abflussganglinien der Kander-Hondrich, Kander-Frutigen und Engstlige-Frutigen im Hochwasserfall. Die beiden Beispiele zeigen die Hochwasserereignisse vom Oktober 2000 (a) und vom Juli 2007 (b). (Daten: BAFU, AWA)

Auffällig ist in diesen beiden Beispielen, dass bei der Engstlige-Frutigen eine ausgeprägte Abflussvariabilität beobachtet werden kann, welche sich als Abflussanstieg und -rückgang innert kurzer Zeit äussert. Der Abfluss steigt im Beispiel vom 3./4. Juli 2007 innerhalb von wenigen Stunden von unter  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  auf fast  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  und geht anschliessend sehr rasch wieder auf einen Abfluss von rund  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  zurück. Dagegen treten bei Kander-Frutigen weniger rasche Veränderungen im Abflussgeschehen auf. Der Anstieg der Hochwasserwelle erfolgt zwar auch sehr schnell, geht aber von etwas höherem Niveau aus und erreicht nur eine Abflussspitze von ca.  $80 \text{ m}^3/\text{s}$ . Zudem erfolgt der Abflussrückgang bei diesem Teileinzugsgebiet deutlich langsamer.

Der Einfluss der Teileinzugsgebiete auf den Hochwasserabfluss des Gesamteinzugsgebiets Kander-Hondrich wird im nächsten Kapitel anhand einer systematischen Untersuchung dargelegt.

## 4.6.2 Einfluss der Teileinzugsgebiete im Hochwasserfall

Wie in Kapitel 4.3 beschrieben, wird das mittlere monatliche Abflussgeschehen des Gesamteinzugsgebiets im Verlauf des Jahres unterschiedlich stark von den Teileinzugsgebieten beeinflusst. Dementsprechend stellt sich die Frage, ob sich eine vergleichbare Beeinflussung auch im Hochwasserfall beobachten lässt bzw. von welchem Ausmass diese ist.

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden die monatlich maximalen Hochwasserabflüsse der Periode 1995-2007 analysiert. Für diesen Zeitraum sind für die Teileinzugsgebiete Kander-Frutigen und Engstlige-Frutigen sowie für das Gesamteinzugsgebiet zeitlich hoch aufgelöste Abflussdaten vorhanden.

Die Auswertung wurde sowohl für Stunden- als auch für Tagesmittelwerte durchgeführt. Die Distanzen zwischen den Stationen Kander-Frutigen und Kander-Hondrich bzw. den Stationen Engstlige-Frutigen und Kander-Hondrich sind nahezu gleich gross. Deshalb kann von keinem grossen Unterschied in der Fliesszeit von den beiden Pegeln der Teileinzugsgebiete bis zum Gebietsausfluss ausgegangen werden. Die Fliesszeit wurde anhand der Abflussdaten auf zwei Stunden geschätzt. Somit können die an den Stationen Kander-Frutigen bzw. Engstlige-Frutigen gemessenen Abflussdaten direkt miteinander und unter Berücksichtigung der Fliesszeit mit den Messwerten von Kander-Hondrich verglichen werden.

Der Abflussanteil der Teileinzugsgebiete am Hochwasserabfluss des Gesamteinzugsgebietes Kander-Hondrich wurde für jedes monatliche Hochwasser separat bestimmt. Für das ungemessene Teileinzugsgebiet («Rest», vgl. Kapitel 2.2) wurde der entsprechende Anteil aus den gemessenen Werten bilanziert. Dadurch sind in den Angaben für dieses Teileinzugsgebiet die Messfehler aus allen Abflussmessungen enthalten, wodurch diese Werte mit grösseren Unsicherheiten behaftet sind. Bei dieser Auswertung fällt dies umso mehr ins Gewicht, weil im Hochwasserfall mit grösseren Messfehlern im Bereich von 10 bis 20% auszugehen ist (vgl. POTTER & WALKER 1985, BWG 2002, SPREAFICO & WEINGARTNER 2005).

In Abbildung 4.8 sind die Resultate der Auswertungen sowohl für die Stunden- (a) als für die Tagesmittelwerte (b) enthalten. Die Abflussanteile der Teileinzugsgebiete sind jeweils in zwei verschiedenen Grafiken dargestellt: Einerseits anhand von zusammenfassenden Boxplots, andererseits in Abhängigkeit des Gesamtabflusses bei Kander-Hondrich. Die Angaben entsprechen immer dem Anteil des Abflusses der Teileinzugsgebiete am Hochwasserabfluss bei Kander-Hondrich.

Aus der Zusammenstellung in Abbildung 4.8 wird ersichtlich, dass die **Spitzenabflüsse** (bzw. die **Stundenmittelwerte**) bei Kander-Hondrich stärker durch den Abfluss der Engstlige-Frutigen beeinflusst werden als von der Abflussspitze bei Kander-Frutigen (Abbildung 4.8 a). Zwar kann an-

hand des t-Tests, welcher für den Mittelwertvergleich der Abflussanteile der Teileinzugsgebiete durchgeführt wurde, kein statistisch signifikanter Unterschied abgeleitet werden. Der Vergleich von mittlerem Abflussanteil im Hochwasserfall und des Flächenanteils am Gesamteinzugsgebiet, welcher mit einem schwarzen Rhombus in jedem Boxplot dargestellt ist, ergibt für die Teileinzugsgebiete folgendes Resultat: Das Teileinzugsgebiet Engstlige-Frutigen trägt im Hochwasserfall mehr und das Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen weniger zum Abfluss des Gesamteinzugsgebietes bei, als dies auf Grund des Flächenanteils zu erwarten wäre. Das restliche Teileinzugsgebiet weist einen leicht höheren Abflussanteil auf, als auf Grund des Flächenanteils erwartet werden könnte. Insbesondere bei den grössten Hochwasserabflussspitzen von Kander-Hondrich ist der Beitrag aus dem Teileinzugsgebiet Engstlige-Frutigen jeweils überdurchschnittlich gross.

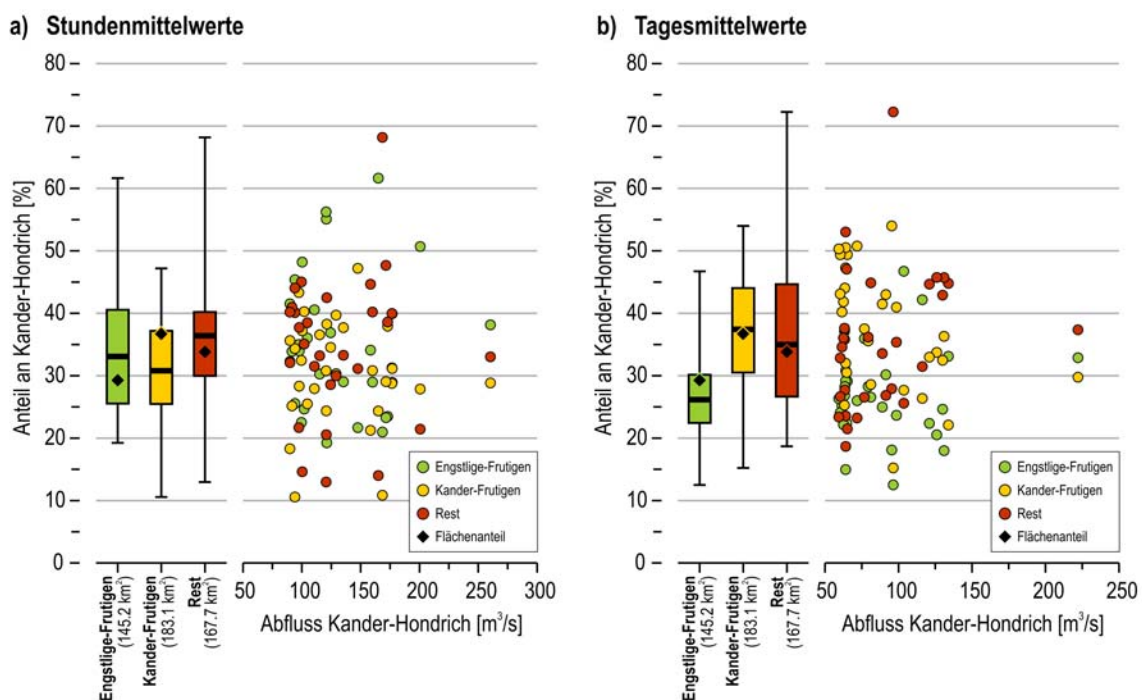


Abbildung 4.8: Abflussbeitrag der Teileinzugsgebiete zum Hochwasserabfluss der Kander-Hondrich. Periode 1995-2007. Auswertung auf Basis der Stundenmittelwerte (a) und der Tagesmittelwerte (b). Die schwarzen Rhomben in den zusammenfassenden Boxplots entsprechen den Flächenanteilen der Teileinzugsgebiete am Gesamteinzugsgebiet.

Die Auswertung der **Tagesmittelwerte**, welche gemäss FEDERER & WEINGARTNER (2006) einen Hinweis auf die **Hochwasserabflussvolumina** geben können, zeigt, dass die Unterschiede zwischen den mittleren Abfluss- und Flächenanteilen für das Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen und das restliche Teileinzugsgebiet deutlich weniger hoch ausfallen (Abbildung 4.8 b). Diese Teileinzugsgebiete tragen im Mittel soviel zum Hochwasserabflussvolumen des Gesamteinzugsgebietes bei, wie anhand ihres Flächenanteils erwartet werden kann. Dadurch weisen die Kander-Frutigen und das restliche Teileinzugsgebiet den grössten mittleren Abflussanteil auf. Bei den grössten Hochwasserereignissen bei Kander-Hondrich ist der Abflussanteil aus dem restlichen Teileinzugsgebiet immer am grössten, wobei berücksichtigt werden muss, dass diese Angaben mit einem grösseren Fehler behaftet sein können.

Im Gegensatz zu den Auswertungen bei den Abflussspitzen ist für das Teileinzugsgebiet **Engstlige-Frutigen** bei den Tagesmittelwerten ein im Vergleich zum Flächenanteil unterdurchschnittlicher Beitrag zu beobachten. Dies könnte einerseits durch die bodenhydrologischen Verhältnisse erklärt



werden, denn in diesem Teileinzugsgebiet sind vorwiegend Böden verbreitet, welche durch höhere Wasserspeichervermögen aber durch eine geringere Wasserdurchlässigkeit geprägt sind (vgl. Kapitel 2.4.2). Andererseits könnten die unterdurchschnittlichen Beiträge an den monatlich grössten Tagesmittelwerten auch durch die in diesem Teileinzugsgebiet geringeren Starkniederschlagsmengen längerer Dauer hervorgerufen werden. Dagegen könnten die überdurchschnittlichen Beiträge an den Abflussspitzen in Zusammenhang mit grösseren Intensitäten der Starkniederschläge kürzerer Dauer stehen (vgl. Kapitel 4.5.1).

### 4.6.3 Eintretenszeitpunkt der Jahreshochwasser

Analog zu den Auswertungen der jährlich grössten Starkniederschlagsmengen unterschiedlicher Ereignisdauer (vgl. Kapitel 4.5) sind in Abbildung 4.9 die Eintretenszeitpunkte der Jahreshochwasser enthalten. Dabei werden zwei verschiedene Kenngrössen unterschieden: Die grösste gemessene **jährliche Abflussspitze** und der **grösste jährliche Tagesmittelwert**. In Anlehnung an FEDERER & WEINGARTNER (2006) wurde vereinfachend angenommen, dass das grösste jährliche Hochwasservolumen durch den grössten Tagesmittelwert pro Jahr repräsentiert wird. Der absolute und exakte Wert der Hochwasserfracht müsste jedoch mittels ereignisbezogener Analyse und Ganglinienseparation bestimmt werden. Die Auswertungen wurden neben dem Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich auch für die Teileinzugsgebiete Kander-Kandersteg und Allenbach-Adelboden durchgeführt.

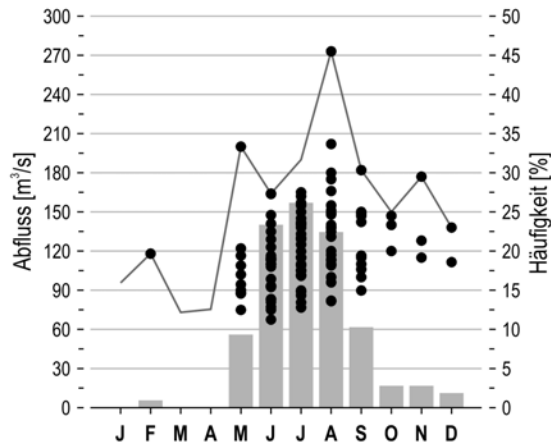
Im Gegensatz zu den Ergebnissen bei den Starkniederschlägen (Abbildung 4.6) ist bei den **Jahreshochwasserspitzen** eine deutlich ausgeprägte Konzentration der Ereignisse auf die Sommermonate festzustellen (Abbildung 4.9, linke Spalte). Bei allen untersuchten Einzugsgebieten treten die meisten Jahreshochwasserspitzen in den Monaten Mai bis September auf. In Ausnahmefällen können aber auch Jahreshochwasser in anderen Monaten beobachtet werden. Besonders auffällig ist hierbei das Ereignis vom Oktober 2000, welches bei der Station Kander-Kandersteg die zweitgrösste Abflussspitze der Messreihe darstellt.

Bei den grössten jährlichen **Tagesmittelwerten** (Abbildung 4.9, rechte Spalte) zeigt sich ein etwas anderes Bild: Hier sind bei den einzelnen Stationen deutliche Unterschiede im Eintretenszeitpunkt der Jahresmaxima zu beobachten. Während rund 70% der grössten jährlichen Tagesmittelwerte beim Allenbach-Adelboden in den Monaten Mai und Juni auftreten, werden bei Kander-Kandersteg die grössten Tagesmittelwerte am häufigsten zwischen Juni und August registriert. Beim Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich lässt sich im Monat Juni die grösste Häufigkeit feststellen, daneben treten die Jahresmaxima der Tagesmittelwerte häufig aber auch in den Monaten Mai bis August auf.

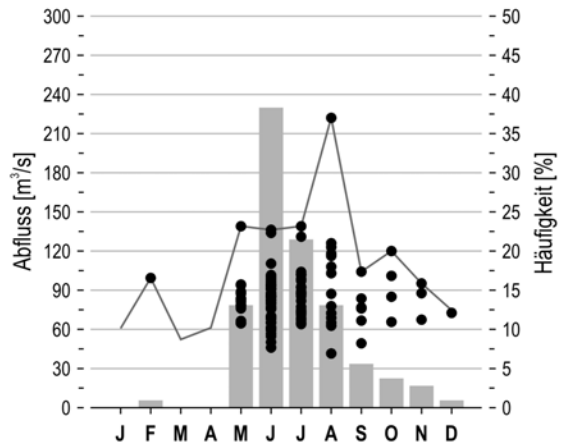
Diese unterschiedlichen Verteilungen der Eintretenszeitpunkte lassen sich z.B. anhand des unterschiedlich starken Einflusses verschiedener Abflussprozesse erklären, welche ihrerseits von den Gebietseigenschaften (z.B. mittlere Höhe des Einzugsgebietes) beeinflusst werden: Beim Allenbach-Adelboden kann davon ausgegangen werden, dass die Jahresmaxima der Tagesmittelwerte vorwiegend durch die Schneeschmelze, welche im Mai besonders stark ausgeprägt ist oder allenfalls durch kombinierte Schneeschmelz-Starkniederschlagsereignisse ausgelöst werden. Dagegen werden die grössten Tagesmittelwerte bei Kander-Kandersteg durch länger andauernde Niederschlagsereignisse, bei denen keine Zwischenspeicherung in Form von Schnee auftritt, ausgelöst. Somit häufen sich diese Ereignisse in den Sommermonaten, in welchen auf Grund der erhöhten Temperaturen auch die Nullgradgrenze am höchsten liegt.

### Jahreshochwasserspitze

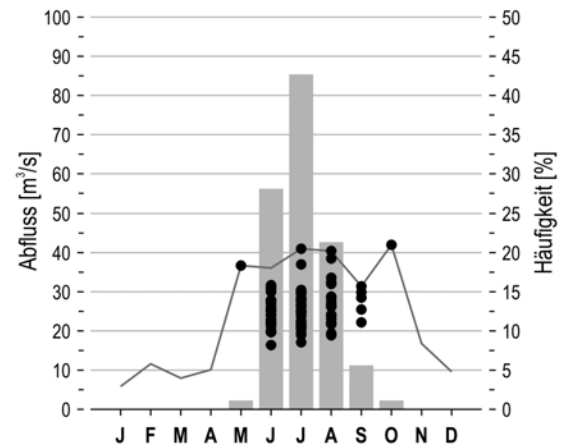
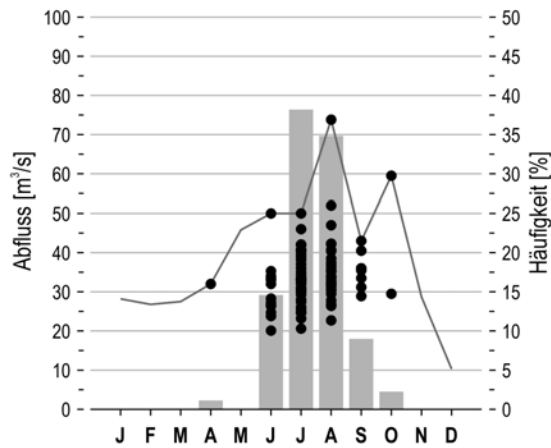
Kander-Hondrich (1903-2008; 1852 m ü.M.)



### Grösster jährlicher Tagesmittelwert



Kander-Kandersteg (1917-2005; 2329 m ü.M.)



Allenbach-Adelboden (1950-2008; 1854 m ü.M.)

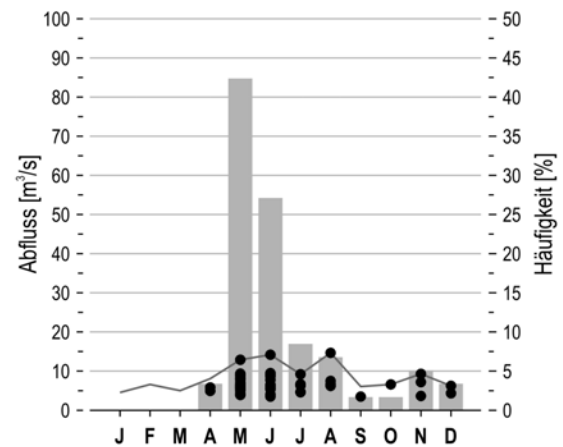
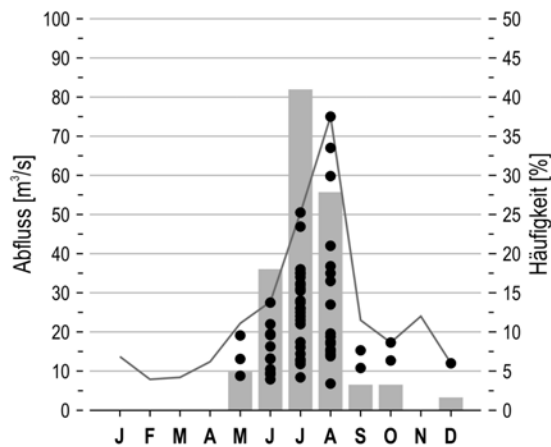


Abbildung 4.9: Prozentuale Häufigkeit des Eintretenszeitpunktes sowie Abflussmenge der jährlichen Abflussspitzen und der grössten jährlichen Tagesmittelwerte für ausgewählte Teileinzugsgebiete sowie das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich. Balken: prozentuale Häufigkeit der Jahresmaxima pro Monat. Punkte: Absolute Werte der Jahresmaxima, dargestellt nach Monat des Eintretens. Linien: Monatsmaxima.

Aus der Zusammenstellung in Abbildung 4.6 wird zudem ersichtlich, dass der mengenmässige Unterschied zwischen der grössten Abflussspitze und den grössten jährlichen Tagesmittelwerten beim Teileinzugsgebiet Allenbach-Adelboden sehr stark ausgeprägt ist. Beim Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich fallen die Differenzen wesentlich geringer aus. Dies zeigt deutlich auf, dass der Allenbach ein äusserst schnell reagierendes Teileinzugsgebiet ist, bei welchem die Abflussspitzen sehr stark ausgeprägt sein können (vgl. z.B. NAEF ET AL. 1999). Dagegen sind bei den beiden anderen Einzugsgebieten Kander-Hondrich und Kander-Kandersteg die Unterschiede zwischen maximalen Abflussspitzen und Tagesmittelwerten deutlich kleiner.



## 5 Methoden der Hochwasserabschätzung

In diesem Kapitel werden die in der vorliegenden Arbeit eingesetzten Methoden zur Abschätzung von Hochwasserspitzenabflüssen unterschiedlicher Wiederkehrperiode vorgestellt. Wie den Zielsetzungen in Kapitel 1.4 entnommen werden kann, sind diese Methoden für die vorliegende Arbeit von zentraler Bedeutung. Während Kapitel 5.1 eine Übersicht über die verschiedenen Methoden enthält, wird in Kapitel 5.2 auf die Hochwasserabschätzung anhand extremwertstatistischer Auswertungen von gemessenen Abflussdaten eingegangen. Kapitel 5.3 beleuchtet die Einsatzmöglichkeiten von Niederschlag-Abflussmodellen für die Hochwasserabschätzung, in Kapitel 5.4 werden die Methoden der regionalen Übertragung vorgestellt. Kapitel 5.5 zeigt in der Übersicht, für welche Teileinzugsgebiete welche Methoden der Hochwasserabschätzung eingesetzt wurden.

### 5.1 Übersicht über bestehende Methoden

Für die Beantwortung der in Kapitel 1.3 aufgeworfenen Fragen ist die Bereitstellung von hochwasserhydrologischen Kenngrößen bzw. von Hochwasserabflüssen unterschiedlicher Jährlichkeit von zentraler Bedeutung. Diese werden in erster Linie als Grundlage für die Planung von wasserbaulichen Massnahmen benötigt, die in der Regel auf eine Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten ausgerichtet werden.

In der Schweiz wird in der Praxis eine breite Palette an Methoden eingesetzt, um die entsprechenden Hochwasserkenngrossen – vor allem die Spitzenabflussmenge – abzuschätzen. Die Anwendung der verschiedenen Verfahren orientiert sich in erster Linie an den **hochwasserhydrologischen Zielparametern** (z.B. Spitzenabfluss oder Hochwasservolumen), der **Einzugsgebietsgrösse** und der **Verfügbarkeit der hydrologisch relevanten Informationen**. Ob eine Methode eingesetzt werden kann, hängt in erster Linie von der Verfügbarkeit von Abfluss- und Niederschlagsdaten sowie vom Umfang der entsprechenden Messreihen ab. Eine Übersicht über die verschiedenen Verfahren und Hinweise zu deren Anwendung sind SPREAFICO ET AL. (2003) sowie GUTKNECHT (2007) zu entnehmen.

Wie in Kapitel 3.2 erläutert wurde, verfügen die verschiedenen Teileinzugsgebiete im Untersuchungsgebiet Kander-Hondrich über sehr unterschiedliche hydrologische Datengrundlagen: Während für mehrere Teileinzugsgebiete Abflussmessreihen vorliegen, welche sich in ihrer Länge aber deutlich unterscheiden, sind für andere Teilräume keine Abflussdaten vorhanden. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung mussten deshalb verschiedene Methoden zur Hochwasserabschätzung für die Teileinzugsgebiete eingesetzt werden.

Die in Abbildung 5.1 dargestellte Übersicht der Hochwasserabschätzmethode orientiert sich vorwiegend an der **Verfügbarkeit der Abfluss- bzw. Niederschlagsdaten** bzw. an den vorliegenden **Kenntnissen zu den Gebietseigenschaften des Einzugsgebiets**. Dabei werden die folgenden Methodengruppen unterschieden, welche in nachfolgenden Kapiteln kurz vorgestellt werden:

- > Extremwertstatistik (vgl. Kapitel 5.2)
- > Niederschlag-Abfluss-Modelle (vgl. Kapitel 5.3)
- > Regionale Übertragung (vgl. Kapitel 5.4)

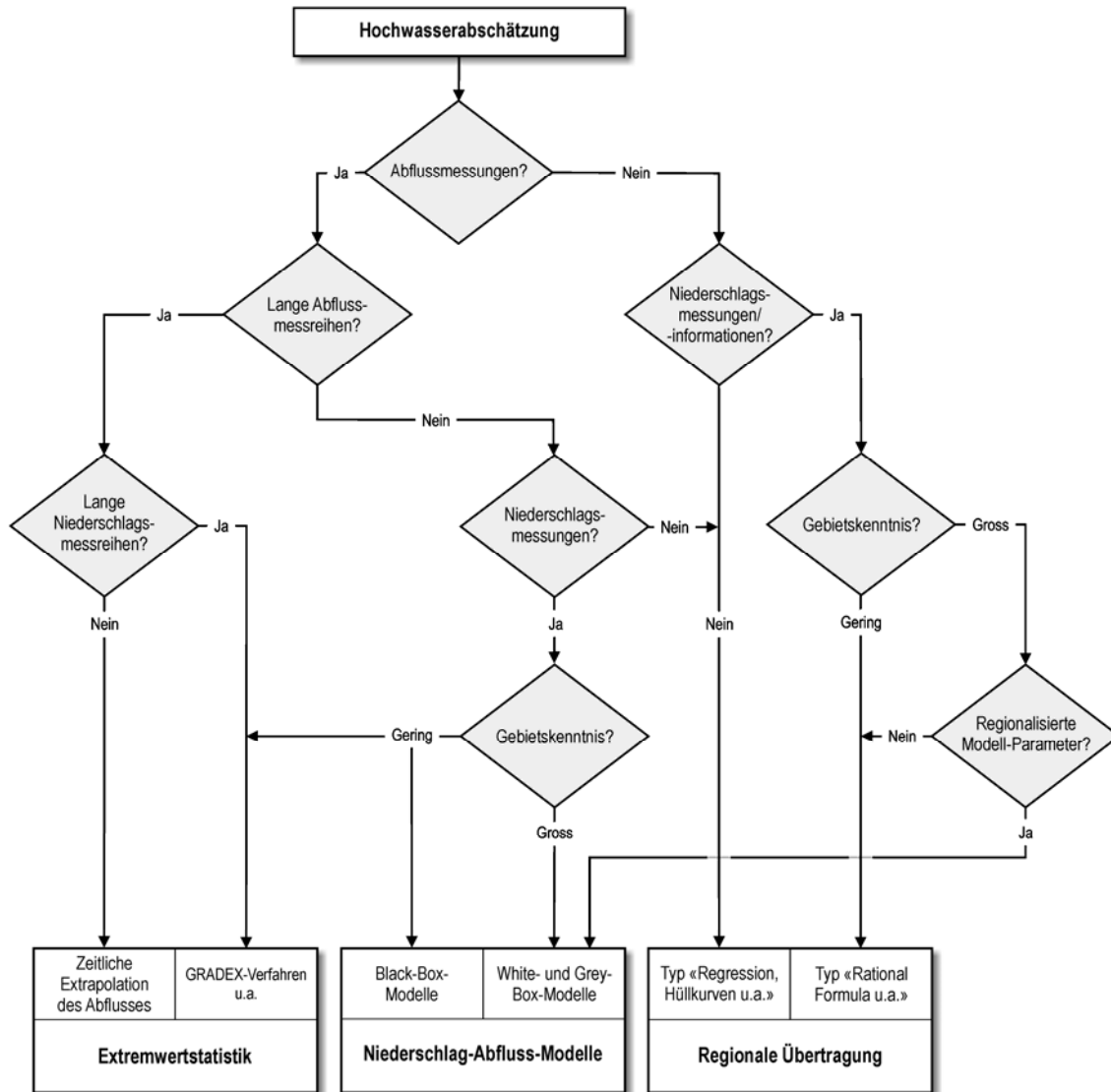


Abbildung 5.1: Übersicht über Hochwasserabschätzverfahren (verändert nach VIVIROLI 2007)

## 5.2 Extremwertstatistik

### 5.2.1 Allgemeines

Unter Anwendung der Extremwertstatistik können längere gemessene oder modellierte Abflussdatenreihen ausgewertet und ohne grossen Aufwand Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Wiederkehrperiode (z.B. HQ30, HQ100 und HQ300) abgeschätzt werden. Die Methode wird in der Praxis verbreitet eingesetzt und beruht auf folgendem Prinzip: Eine theoretische Verteilungsfunktion wird

an eine empirische Verteilung der Messwerte – meist Jahreshochwasser der untersuchten Periode oder alle Hochwasserabflussmengen über einem bestimmten Schwellenwert – angepasst. Grundsätzlich bieten sich zahlreiche Verteilungsfunktionen und Parameterschätzmethoden an, welche bei diesem Ansatz verwendet werden können (vgl. z.B. MENDEL 1993). Um die Wahl der Verteilungsfunktion sowie der Methode zur Parameterschätzung zu objektivieren, bietet sich der Einsatz von Gütemassen an. Daneben kann die Bestimmung der am besten geeigneten Verteilungsfunktion aber auch anhand der subjektiven Einschätzung durch den Bearbeiter erfolgen. Ausführlich wird das methodische Vorgehen auch in YEVJEVICH (1972), MENDEL (1993), DVWK (1999) beschrieben. Neben der klassischen Extremwertstatistik stehen für Hochwasserabschätzungen aus langen Abflussmessreihen noch weitere Verfahren zur Verfügung (z.B. GRADEX-Verfahren, MARGOUM ET AL. 1994). Diese verwenden zusätzlich Niederschlagsinformationen und Gebietseigenschaften des untersuchten Einzugsgebietes. Da diese Methode im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht verwendet wurde, wird sie nicht weiter ausgeführt.

Die statistische Aussagekraft der Resultate ist bei der extremwertstatistischen Hochwasserabschätzung massgeblich vom zeitlichen Umfang der ausgewerteten Messreihe abhängig (z.B. KIRNBAUER 1981, MIEGEL & BÜTTNER 2003). So ist gemäss DVWK (1999) eine Datenreihe erst ab einer Beobachtungsdauer von rund 30 Jahren für eine zuverlässige statistische Aussage geeignet (Tabelle 5.1). Daneben wird verbreitet (z.B. MANIAK 2005) angegeben, dass mit einer n-Jahre umfassenden Messreihe, eine Abschätzung bis zu einer 3·n-jährlichen Spitzenabflussmenge grundsätzlich durchgeführt werden kann. Diese Faustregel wird in der Literatur aber bezüglich statistischer Begründung und Richtigkeit kritisch hinterfragt (z.B. KLEEBERG & SCHUMANN 2001). Weitere oft zitierte Kritikpunkte am Einsatz der Extremwertstatistik liegen in der Wahl der Verteilungsfunktion bzw. der Parameterschätzmethode (KLEMES 2000A UND B) sowie in der Vernachlässigung der den Spitzenabflüssen zu Grunde liegenden hydrologischen Prozesse (z.B. SCHUMANN 2005).

Tabelle 5.1: Zuverlässigkeit der statistischen Aussage in Abhängigkeit der Beobachtungsdauer (nach DVWK 1999)

Beobachtungsdauer	statistische Aussage
< 10 Jahre	unbrauchbar
10 bis 20 Jahre	abschätzend
20 bis 30 Jahre	bedingt geeignet
> 30 Jahre	geeignet

## 5.2.2 Anwendung im Rahmen dieser Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wurde das Verfahren nach DVWK (1999), welches in der Software **HQ-EX** (WASY 2005) implementiert ist, für verschiedene gemessene und modellierte Datenreihen eingesetzt (vgl. Kapitel 13). In dieser Software stehen insgesamt sieben Verteilungsfunktionen und drei verschiedene Parameterschätzverfahren zur Verfügung (Momentenmethode, Maximum-Likelihood, Wahrscheinlichkeitsgewichtete Momente). Die verschiedenen Methodenkombinationen können zu unterschiedlichen Resultaten führen, was eine objektive Beurteilung und Wahl der Verteilungsfunktion sowie des Parameterschätzverfahrens anhand von Gütemassen bedingt. In der vorliegenden Untersuchung wurde dieser Punkt dadurch berücksichtigt, dass in einem ersten Schritt anhand der von der Software berechneten Gütemasse aus den verschiedenen Kombinationen die besten drei

gewählt wurden. In einem zweiten Schritt wurde nach subjektiver Einschätzung die beste Verteilungsfunktion bestimmt.

Auf Grund der subjektiven Beurteilung, welche zur endgültigen Auswahl der am besten geeigneten Verteilungsfunktion führt, ist dieses Verfahren jedoch nur bedingt für eine automatische Abschätzung der Hochwasserabflüsse geeignet. Da sich aber gemäss BARBEN (2003) insbesondere die **Allgemeine Extremwertverteilung** (AEV) in den meisten Fällen als besonders gut geeignet und flexibel erweist, wurde für die Automatisierung der Extremwertstatistik auf diese Verteilungsfunktion zurückgegriffen (vgl. Kapitel 20). Die damit verbundenen statistischen Berechnungen können in verschiedenen Software-Paketen z.B. «R» (R-PROJECT 2009) durchgeführt und weitgehend automatisiert werden. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass durch die Wahl der immer gleichen Verteilungsfunktion bei Differenzen zwischen den verschiedenen Resultaten die Methode als Ursache für allenfalls vorhandene Unterschiede ausgeschlossen werden kann.

## 5.3 Niederschlag-Abfluss-Modelle

### 5.3.1 Allgemeines

Ein Niederschlag-Abfluss-Modell ermöglicht die mathematische Transformation von Niederschlag zu Abfluss. Dabei werden die kausalen Zusammenhänge, welche zwischen Niederschlag und Abfluss bestehen bzw. die relevanten hydrologischen Prozesse mathematisch beschrieben. Je nach Detaillierungsgrad mit welchem die hydrologischen Prozesse abgebildet werden und entsprechend der verwendeten Gebietsinformation, lassen sich verschiedene Modelltypen unterscheiden. Nach zunehmendem Detaillierungsgrad werden Black-, Grey- und White-Box-Modelle differenziert (vgl. NEMEC 1993). Hierbei ist zu beachten, dass der Übergang zwischen Niederschlag-Abfluss-Modellierung und den Methoden der Regionalen Übertragung fließend ist. So können die Ansätze des Laufzeitverfahrens auch als einfachste konzeptionelle Modelle (Grey-Box-Modelle) betrachtet werden.

Dem praktischen Einsatz einer Niederschlag-Abfluss-Simulation sind heute in manchen Fällen noch **Grenzen** gesetzt. So ist für die Bereitstellung der Eingabedaten wie auch für die Modellkalibrierung mit einem grösseren zeitlichen Aufwand zu rechnen. Daneben werden insbesondere für kleine Einzugsgebiete von wenigen Quadratkilometern räumlich und zeitlich ausreichend detaillierte Gebietsinformationen und meteorologische Eingabedaten benötigt. Da aber solche Daten vielerorts noch nicht verfügbar sind, ist auch eine hydrologische Niederschlag-Abfluss-Modellierung auf diesem Skalenbereich nur in reduzierter Qualität möglich (vgl. z.B. WEHREN 2005).

In der praktischen Anwendung werden zwei Vorgehensweisen unterschieden: Die **ereignisbezogene Modellierung** und die **Langzeitsimulation**. Während beim ersten Ansatz ein Bemessungsniederschlag mit Hilfe des hydrologischen Modells in Abfluss transformiert wird (vgl. z.B. WEHREN & WEINGARTNER 2008, Anhang E), verwendet die Langzeitsimulation lange meteorologische Reihen als Eingabedaten, welche in der Regel entweder direkt aus Messwerten oder aus Modellierungen stammen (vgl. Kapitel 11 und Kapitel 19).

Die modellierten hydrologischen Datenreihen bilden schliesslich die Grundlage für weitere Analysen. So bieten sich z.B. auch die extremwertstatistische Auswertungen der modellierten Abflussdaten (vgl. Kapitel 5.2) an, anhand welcher Hochwasserabschätzungen durchgeführt werden können.



### 5.3.2 Anwendung im Rahmen dieser Arbeit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das **hydrologische Modellsystem PREVAH** (GURTZ ET AL. 1997, ZAPPA 2002, VIVIROLI 2007) für die Modellierung des Abflusses für das gesamte Einzugsgebiet Kander-Hondrich wie auch für Teileinzugsgebiete eingesetzt. Aufbau des Modells und Vorgehen bei der Modellkalibrierung sind in Kapitel 6 ausführlich beschrieben.

Der Vorteil bei der Anwendung dieses Modellsystems liegt darin, dass es bereits für viele Anwendungen im schweizerischen Alpenraum verwendet wurde (VIVIROLI ET AL. 2007) und somit auf eine breite Erfahrung in der Anwendung sowie auf bestehende und erprobte Methoden (z.B. für die Regionalisierung der freien Modellparameter sowie für die Modellkalibrierung) zurückgegriffen werden kann (vgl. Kapitel 6.3).

## 5.4 Regionale Übertragung

### 5.4.1 Allgemeines

Für Einzugsgebiete ohne Abflussmessungen werden zur Hochwasserabschätzung Methoden der regionalen Übertragung verwendet, die in der Literatur auch als «regionalhydrologische Analysen» bezeichnet werden (WEINGARTNER 1999). Diese zahlreich verfügbaren Ansätze orientieren sich je nach Datenlage an verschiedenen methodischen Prinzipien wie Hüllkurven, empirische Formeln oder an einfachen Konzeptmodellen (wie z.B. das Laufzeitverfahren bzw. die «Rational Formula», vgl. KÖLLA 1986). Den meisten Methoden der regionalen Übertragung liegt die Idee zu Grunde, dass über statistische Zusammenhänge, welche in Einzugsgebieten mit Abflussmessungen zwischen Hochwasserabflüssen und invarianten Gebietseigenschaften hergestellt werden, auf die Hochwasserabflüsse in unbeobachteten Gebieten geschlossen werden kann. Bei diesen Verfahren wird in der Regel eine hochwasserhydrologische Zielgrösse (HQ100, HQ20) berechnet. Neben den zur Verfügung stehenden Datengrundlagen ist aber auch die Grösse des untersuchten Einzugsgebietes für die Wahl und den Einsatz der verschiedenen Methoden entscheidend (vgl. SPREAFICO ET AL. 2003).

Neuere Ansätze z.B. von SEIBERT (1999), MERZ & BLÖSCHL (2004) oder VIVIROLI (2007) erlauben es zudem, von den Eigenschaften des untersuchten Einzugsgebietes auf die Modellparameter eines Niederschlags-Abflussmodells zu schliessen. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass mit dem hydrologischen Modell eine kontinuierliche Ganglinie des Gebietsabflusses für den Untersuchungsraum und nicht bloss eine vorgegebene Zielgrösse berechnet werden kann. Je nachdem, welcher Typ des hydrologischen Modells eingesetzt wird, kann zudem davon ausgegangen werden, dass die Randbedingungen (Vorfeuchte, Verlauf der Niederschlagsintensität) durch die kontinuierliche Modellierung bzw. durch den verwendeten meteorologischen Input für den Untersuchungsraum räumlich und zeitlich konsistent nachgebildet werden.

### 5.4.2 Anwendung im Rahmen dieser Arbeit

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendete und von BARBEN (2003) entwickelte Software «**HQx\_meso\_CH**» erlaubt es, auf einfache Weise verschiedene Methoden der regionalen Übertragung für beliebige ungemessene mesoskalige Einzugsgebiete der Schweiz zwischen 10 und 500 km<sup>2</sup> anzuwenden. Mit Hilfe der implementierten Methoden können sowohl die Abflüsse der Hochwasserspitzen unterschiedlicher Jährlichkeit (HQ20, HQ100) als auch diejenigen der maximal

zu erwartenden Hochwasserspitzen ( $Q_{max}$ ) berechnet werden. Die für die einzelnen Modelle benötigten Parameterwerte zu den Gebietseigenschaften werden von der Software automatisch aus bestehenden Datenquellen zusammengestellt. Zur vereinfachten Plausibilisierung und allfälligen Anpassung dieser automatisch generierten Modellparameter entwickelte KLAUSER (2004) eine zusätzliche Software («**HQx\_meso\_CH-visual**»), die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ebenfalls verwendet wurde.

Für die Hochwasserabschätzung in ungemessenen Einzugsgebieten kleiner als  $10 \text{ km}^2$  wurde die Software «HAKESCH» entwickelt (VOGT 2001, VOGT ET AL. 2002). Diese ermöglicht die Anwendung von verschiedenen, spezifisch für kleine Einzugsgebiete entwickelten Berechnungsverfahren, deren Parameter teilweise unter Einbezug von Feldbefunden eruiert werden müssen (vgl. Kapitel 14). Sowohl «HQx\_meso\_CH» als auch «HAKESCH» werden in der Praxishilfe von (SPREAFICO ET AL. 2003) ausführlich beschrieben.

Daneben hat SCHAFFNER (2007) eine weitere Methode zur Abschätzung eines HQ100 für kleine Einzugsgebiete anhand verschiedener Regressionsbeziehungen entwickelt. Diese wurde die für die vorliegende Arbeit ebenfalls eingesetzt (vgl. Kapitel 14).

Neben den Methoden der Regionalen Übertragung wurden in der vorliegenden Arbeit auch regionalisierte Modellparameter, welche nach dem Verfahren von VIVIROLI (2007) bestimmt wurden, zur hydrologischen Modellierung verschiedener ungemessener mesoskaliger Teileinzugsgebiete angewendet (vgl. Kapitel 13).

## 5.5 Verwendete Methoden

Für das gesamte Einzugsgebiet Kander-Hondrich liegen die meteorologischen Daten sowie die Gebietsinformationen (z.B. zu Geologie, Pedologie, etc.) flächendeckend und in identischer räumlicher und zeitlicher Auflösung vor. Deshalb konnte der Entscheidungsbaum, welcher für die Auswahl der Hochwasserabschätzungsmethode standardmässig verwendet wird (vgl. Abbildung 5.1) stark vereinfacht und reduziert werden. Die einzigen Kriterien, welche die Entscheidungen für die untersuchten Einzugsgebiete beeinflussen, stellen die **Verfügbarkeit der Abflussmessungen**, der **zeitliche Umfang der Messreihe** sowie die **Verfügbarkeit von regionalisierten Modellparametern** dar.

Welche Methoden für die Hochwasserabschätzungen im Einzugsgebiet Kander-Hondrich bzw. für die elf verschiedenen mesoskaligen Teileinzugsgebiete (vgl. Kapitel 2.2) eingesetzt wurden, kann Abbildung 5.2 entnommen werden:

- > Falls für ein untersuchtes Teileinzugsgebiet **lange Abflussmessreihen** vorliegen, wurden die Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit mit Hilfe der Extremwertstatistik bestimmt.
- > Bei **kurzen Abflussmessreihen** von wenigen Jahren Umfang wurde ein Niederschlag-Abfluss-Modell für das entsprechende Einzugsgebiet kalibriert. Liegen für ein untersuchtes Einzugsgebiet keine Abflussmessungen vor, wurden die freien Modellparameter des hydrologischen Modells nach dem Ansatz von VIVIROLI (2007) regionalisiert.
- > Für die Hochwasserabschätzung **ohne regionalisierte Modellparameter**, welche in der vorliegenden Arbeit in erster Linie zur Plausibilisierung der Resultate aus den anderen Ansätzen diente, wurden die Methoden der regionalen Übertragung angewendet.

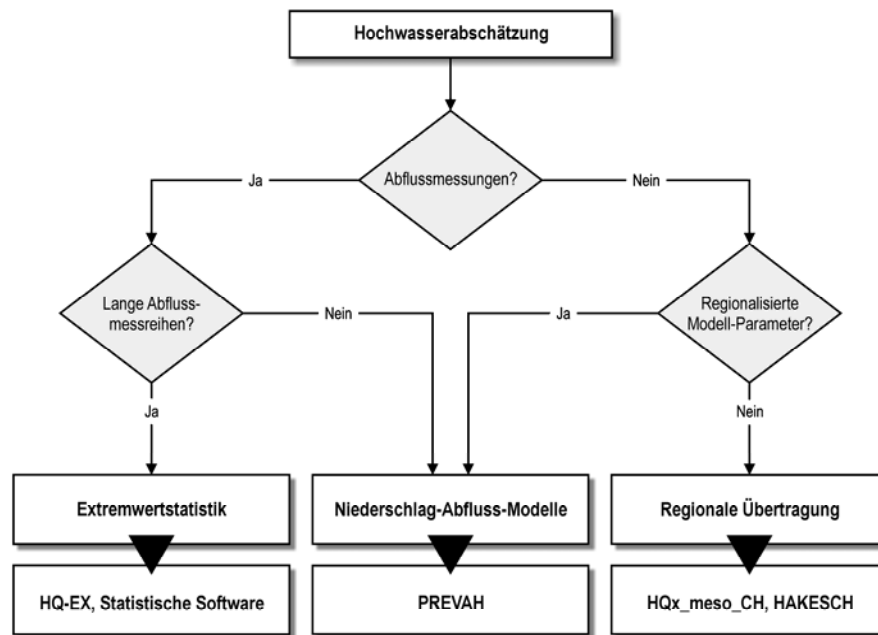


Abbildung 5.2: Übersicht über die Wahl der Hochwasserabschätzmethoden im untersuchten Einzugsgebiet.

Welche Methoden für die elf Teileinzugsgebiete sowie für das Gesamteinzugsgebiet eingesetzt wurden, wird aus Tabelle 5.2 ersichtlich.

Tabelle 5.2: Anwendung verschiedener Methoden zur Hochwasserabschätzung in den untersuchten Teileinzugsgebieten

Einzugsgebiet	Fläche [km <sup>2</sup> ]	HQ-EX	PREVAH		HQx_meso_CH
			kalibriert	regionalisiert	
Kander-Hondrich	495.6	X	X		X
Kander-Frutigen	183.1		X		X
Kander-Kandersteg	142.7	X	X		X
Kander-Chluse	81.5			X	X
Kander-Gasteretal	41.5	X		X	X
Engstlige-Frutigen	145.2		X		X
Engstlige-Adelboden	72.9		X		X
Allenbach-Adelboden	28.8	X	X		X
Chiene-Kien	90.5			X	X
Spiggebach-Kiental	24.8			X	X
Gornerewasser-Kiental	47.0	X		X	X
Suld-Mülenen	24.0			X	X

Es zeigt sich, dass nur für fünf Teileinzugsgebiete geeignete lange Abflussmessreihen von mindestens 30 Jahren vorliegen, für welche aussagekräftige Resultate aus der Anwendung der Extremwertstatistik zu erwarten sind (vgl. Kapitel 13, WEHREN & WEINGARTNER 2007). Daneben wurden für je sechs Teileinzugsgebiete hydrologische Modellierungen durchgeführt, einerseits mit kalibrierten und andererseits mit regionalisierten Modellparametern. Ungeachtet der verfügbaren Datengrund-

lagen sowie zu Vergleichszwecken wurde für alle Teileinzugsgebiete und für das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich eine Hochwasserabschätzung mit «HQx\_meso\_CH» durchgeführt (vgl. Kapitel 5.4).

Für alle Teileinzugsgebiete liegen damit mindestens zwei und in einzelnen Fällen sogar drei verschiedene Hochwasserabschätzungen vor. Die Resultate aus den verschiedenen Methoden sind in Kapitel 13 sowie in Anhang C enthalten.

## 6 Modellsystem PREVAH

Das hydrologische Modellsystem PREVAH wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit für verschiedene Untersuchungen als zentrales Werkzeug eingesetzt. Insbesondere konnte mit den verschiedenen durchgeführten Modellierungen die raum-zeitliche Information zu den Hochwasserverhältnissen im Untersuchungsgebiet Kander-Hondrich wesentlich erweitert werden (Kapitel 11 und Kapitel 13). Zudem bildet das Modellsystem eine der zentralen Komponenten der Modellkaskade, welche für die Modellierung der hydrologischen Auswirkungen der Klimaänderungsszenarien verwendet wurde (vgl. Kapitel 18).

In diesem Kapitel wird zuerst auf die Grundlagen bzw. den Aufbau (Kapitel 6.1) und danach auf die Kalibrierung des Modellsystems (Kapitel 6.2) eingegangen. Kapitel 6.3 zeigt auf, wie mit dem Modellsystem PREVAH für ungemessene Einzugsgebiete die Modellparameter regionalisiert und damit Abflussdaten modelliert werden. Das in der vorliegenden Arbeit gewählte Vorgehen sowie entsprechende Beispiele sind Inhalt der Kapitel (Kapitel 6.4 und Kapitel 6.5).

### 6.1 Grundlagen des Modellsystems

#### 6.1.1 Einleitung

Das **hydrologische Modellsystem PREVAH** (= **P**recipitation-**R**unoff-**E**vapotranspiration **H**ydrotoppe Model; GURTZ ET AL. 1997, ZAPPA 2002, VIVIROLI ET AL. 2007) ermöglicht die flächendifferenzierte sowie zeitlich hoch aufgelöste hydrologische Modellierung für mesoskalige Einzugsgebiete zwischen 10 und 1000 km<sup>2</sup> (vgl. BECKER & NEMEC 1987). Ursprünglich zur Nachbildung des Wasserhaushalts alpiner Systeme entwickelt, eignet sich PREVAH insbesondere auch für die kontinuierliche Modellierung von Abflussganglinien sowie für die Simulation des zeitlichen Verlaufs einer Vielzahl hydrologischer Größen. PREVAH wurde in den letzten Jahren in mehreren Forschungsarbeiten und Anwendungen in alpinen Systemen erfolgreich eingesetzt (z.B. ZAPPA 2002, WEHREN 2005, KOBOLTSCHNIG ET AL. 2007, VERBUNT ET AL. 2007, VIVIROLI 2007, ZAPPA & KAN 2007, SCHWANBECK ET AL. 2008, JAUN ET AL. 2008).

Im Rahmen der Arbeiten von GURTZ ET AL. (1997), ZAPPA (2002) und VIVIROLI (2007) wurde das Modell sowie eine Vielzahl von Hilfsprogrammen entwickelt, ausgebaut und eine anwenderfreundliche Programmoberfläche erstellt. Somit konnten die verschiedenen Arbeitsschritte (Gebietsaufbereitung, Modellablauf und Auswertung der Modellierungsergebnisse) stark vereinfacht und der zeitliche Aufwand wesentlich reduziert werden.

Detaillierte Beschreibungen zum Aufbau und zur Anwendung des Modellsystems PREVAH können VIVIROLI ET AL. (2007) oder VIVIROLI ET AL. (2009b) entnommen werden. An dieser Stelle beschränkt sich die Beschreibung des Modells auf die wesentlichsten Punkte, die zum Verständnis der vorliegenden Arbeit nötig sind.

### 6.1.2 Räumliche und zeitliche Diskretisierung

Die **räumliche Diskretisierung** von PREVAH orientiert sich am Prinzip der **Hydrotope** (bzw. «Hydrological Response Units», vgl. z.B. BECKER 1992, ENGEL 1996, FLÜGEL 1997). Dabei handelt es sich um Flächen, für welche aus hydrologischer Sicht die gleichen Reaktionen und Prozesse zu erwarten sind. Der Klassierung von NEMEC (1993) folgend lässt sich die räumliche Auflösung des Modells deshalb im Bereich von «semi-distributed» bis «grid-based» einordnen. Die Vorteile dieses auf Hydrotopen basierenden Modellansatzes liegen darin, dass einerseits die zur Modellierung benötigte Rechenzeit deutlich reduziert werden kann und andererseits die räumliche Differenzierung in die wesentlichsten hydrologischen Einheiten noch gewährleistet ist.

Die Bestimmung der Hydrotope erfolgt durch Kombination verschiedener Gebietseigenschaften, die aus bestehenden digitalen Grundlagendaten zusammengeführt werden (vgl. ZAPPA 1999). Diese umfassen im Wesentlichen die in Tabelle 6.1 aufgeführten Kategorien und Aspekte.

Tabelle 6.1: Gebietskennwerte und Datenquellen zur Bestimmung der Hydrotope in PREVAH

Kategorie	Aspekte	Datenquelle
Topographie	Einzugsgebietsfläche, Höhenlage, Hangneigung, Exposition	Höhenmodell (BLT 1991)
Landnutzung	Vegetationstyp, Bodenbedeckung, Vergletscherung	Arealstatistik (BFS 2004B)
Bodeneigenschaften	Bodenart, Bodentiefe, Hydraulische Leitfähigkeit, Nutzbare Feldkapazität, Skelettgehalt	Bodeneignungskarte (BFS 2004A)

Die räumliche Diskretisierung des Einzugsgebietes orientiert sich an einem **Raster von 100 m x 100 m Auflösung**. Diese Maschenweite wird durch die verschiedenen digitalen Datengrundlagen vorgegeben und bestimmt die maximale räumliche Auflösung der hydrologischen Modellierung. Obschon also grundsätzlich eine räumliche Auflösung von 100 m x 100 m gewählt werden könnte, wird in verschiedenen Arbeiten eine Auflösung von 500 m x 500 m zur Anwendung bei mesoskaligen Einzugsgebieten empfohlen (ZAPPA 2002, CORTI 2003, VIVROLI 2007). Ebenso weist auch SCHULLA (1997) in seiner Arbeit darauf hin, dass für Einzugsgebiete von 10 bis 500 km<sup>2</sup> die räumliche Auflösung von 500 m x 500 m am besten geeignet ist. Deshalb wurde in der vorliegenden Arbeit ebenfalls diese räumliche Auflösung der Grundlagendaten verwendet.

Unter Anwendung des Hilfsprogrammes **WINHRU** (ZAPPA 1999, SCHULLA & JASPER 2000, VIVROLI ET AL. 2007) kann das Preprocessing der räumlichen Datengrundlagen weitgehend automatisiert werden. In diesem Arbeitsschritt werden für das untersuchte Einzugsgebiet sowohl die Hydrotope bestimmt als auch die für das Modell benötigten Eingabedateien mit den Informationen zu den Gebietseigenschaften zusammengestellt. Der hohe Automatisierungsgrad, welcher dieses Programm ermöglicht, führt zu einer starken Vereinfachung der verschiedenen Arbeitsschritte. Es empfiehlt sich aber, die automatisch generierten räumlichen Modellgrundlagen immer kritisch zu überprüfen. So hat sich z.B. bei der Anwendung im Einzugsgebiet der Kander gezeigt, dass die automatische Bestimmung des Einzugsgebietes trotz deutlich ausgeprägtem Relief fehlgeschlagen ist. Dies war besonders in den teilweise verkarsteten Gebieten (z.B. Region Schwarzenbach-Gemmipass) zu beobachten, wo

das hydrologische und das topographische Einzugsgebiet auf Grund von unterirdischen Abflüssen in benachbarte Einzugsgebiete nicht identisch sind.

PREVAH berechnet grundsätzlich alle Wasserhaushaltskomponenten in einer **zeitlichen Auflösung von maximal einer Stunde**. Die berechneten Grössen können entsprechend wahlweise als Stunden- und/oder als Tages-, Monats- bzw. Jahreswerte ausgegeben werden. Als Eingabegrössen können kontinuierliche meteorologische Datenreihen (vgl. Kapitel 6.1.3) in verschiedener zeitlicher Auflösung verwendet werden.

### 6.1.3 Modellantrieb

#### a) Meteorologische Eingabedaten

PREVAH wird von einer Reihe meteorologischer Daten angetrieben. Diese können dem Modellsystem in verschiedener zeitlicher Auflösung zwischen 5 Minuten und einem Tag eingegeben werden, allerdings muss das Messintervall kontinuierlich sein. Vor allem auf Grund der in PREVAH standardmässig verwendeten Verdunstungsmodelle müssen dem Modellsystem zahlreiche Messgrössen eingegeben werden (vgl. Tabelle 6.2).

Tabelle 6.2: Modellantrieb für das hydrologische Modellsystem PREVAH

Meteorologische Grösse	Einheit
Niederschlag	[mm] (Summe pro Zeiteinheit)
Lufttemperatur	[°C]
Windgeschwindigkeit	[m/s]
Dampfdruck oder Relative Feuchte	[hPa] oder [%]
Globalstrahlung	[W/m <sup>2</sup> ]
Relative Sonnenscheindauer	[-]

Diese Daten sind an den meisten ANETZ-Stationen in einer Auflösung von mindestens einer Stunde verfügbar. Somit ist eine zeitlich hoch aufgelöste hydrologische Modellierung für den Zeitraum von Anfang der 1980er Jahre bis heute möglich (vgl. Kapitel 3.1). Für die Zeit vor 1980 kann eine Modellierung jedoch nur in täglicher Auflösung durchgeführt werden, falls ausschliesslich Daten der MeteoSchweiz eingesetzt werden. Zusätzlich muss beachtet werden, dass vor 1980 viele meteorologische Parameter noch nicht gemessen wurden (z.B. Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung, Relative Sonnenscheindauer).

Da PREVAH aber auch ermöglicht verschiedene Grössen mit einfacheren Ansätzen zu modellieren, kann das Modellsystem auch mit deutlich weniger meteorologischen Grössen angetrieben werden. So wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch Modellierungen durchgeführt, welche ausschliesslich auf die Eingabe von Niederschlags- und Lufttemperaturdaten in täglicher Auflösung beruhen (vgl. Kapitel 11 oder Kapitel 18).

#### b) Räumliche Interpolation meteorologischer Eingabedaten

Das Modellsystem umfasst mit **WINMET** (VIVIROLI ET AL. 2007) ein Hilfsprogramm, mit welchem die meteorologischen Variablen einfach als Modellantrieb für ein Einzugsgebiet aufbereitet werden

können. Bei diesem Schritt werden Stationswerte mit verschiedenen Ansätzen räumlich interpoliert, wobei in dieser Arbeit in erster Linie die beiden folgenden Ansätze verwendet wurden:

- > **Inverse Distance Weighted (IDW):** Bei dieser Methode wird der Wert für einen Punkt, für den keine Messung vorliegt, anhand eines gewichteten Mittelwertes aus den Messwerten der umliegenden Stationen berechnet. Die verwendeten Gewichte, für den an der Station gemessenen Wert, sind proportional zum inversen Abstand zwischen dem Punkt, für welchen keine Beobachtung vorliegt und der entsprechenden Messstation (z.B. SHEPARD 1968, GOOVAERTS 1997).
- > **Detrended Inverse Distance Weighted (DTIDW):** Bei dieser Interpolationsmethode wird zusätzlich auch die Höhenabhängigkeit der meteorologischen Variablen berücksichtigt. Vereinfacht lässt sich die Methode wie folgt beschreiben: In einem ersten Schritt werden die Stationswerte für jede Stunde unter Anwendung der jeweils ermittelten Höhenregression auf eine Einheitsebene reduziert und anschliessend wiederum mit einem inversdistanzgewichteten Verfahren räumlich interpoliert. Die so berechneten, flächendeckend vorliegenden Werte werden anschliessend mit der Höhenregression auf die dem Punkt entsprechende Höhenlage der Topographie zurückgerechnet (GAREN & MARKS 2001, SUSONG ET AL. 1999).

Die räumlich interpolierten meteorologischen Eingabedaten fliessen jedoch nicht pro Rasterzelle, sondern jeweils gemittelt über Höhenzonen, welche in der Regel 100 m umfassen, ins Modell ein. Dies führt dazu, dass die gemessene räumliche Variabilität der meteorologischen Variablen im Modell nicht mehr repräsentiert wird. Dies kann vor allem für den Niederschlag, für welchen eine grössere räumliche Variabilität zu erwarten ist als für andere Grössen, von Bedeutung sein.

Die Interpolationsmethoden können für jede meteorologische Variable einzeln festgelegt werden, wobei in der Modellbeschreibung von PREVAH (VIVIROLI ET AL. 2007) Empfehlungen aufgeführt sind, für welche Interpolationsart pro meteorologische Variable die besten Resultate erwartet werden können. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden besonders für die Modellierungen mit Tageswerten (Historische Modellierungen (Kapitel 11) und die Auswirkungen der Klimaänderung (Kapitel 18) verschiedene Ansätze zur räumlichen Interpolation des Niederschlags erprobt.

#### 6.1.4 Modellstruktur

Die Modellstruktur von PREVAH lehnt sich in den wesentlichen Zügen an diejenige des HBV-Modells («Hydrologiska Bryans Vattenbalansavdelning»; BERGSTRÖM 1976, 1992 UND 1995) an. Das bedeutet, dass das Modell als **Kaskade von Einzellinearspeichern** bzw. aus Teilmodulen aufgebaut ist, in welchen unterschiedliche hydrologische Prozesse abgebildet und modelliert werden. Die hydrologischen Prozesse sind in den verschiedenen Teilmodulen zwar vereinfacht beschrieben, orientieren sich aber soweit als möglich an physikalischen Gesetzmässigkeiten. Die entsprechenden methodischen Grundlagen basieren auf den Arbeiten verschiedener Autoren (vgl. Tabelle 6.3).

Abbildung 6.1 zeigt den schematischen Aufbau der Modellstruktur von PREVAH. Die insgesamt **sieben** (bzw. zehn bei vergletscherten Gebieten) **Einzellinearspeicher** bzw. **Teilmodule** werden durch **17** (bzw. 19) **veränderbare Modellparameter** gesteuert. Diese freien Modellparameter können mit unterschiedlichen Methoden kalibriert und so auf die spezifischen Eigenschaften des Untersuchungsgebietes angepasst werden (vgl. Kapitel 6.2).



Tabelle 6.3: Teilmodule von PREVAH und methodische Grundlagen

Teilmodul	Methodische Grundlagen
Wasserbilanzkorrektur	GURTZ ET AL. (1997)
Schneesmelze und -akkumulation	SCHULLA (1997), HOCK (1999), ZAPPA ET AL. (2003)
Eis- bzw. Gletschersmelze	BRAUN (1985), HOCK (1999), HOCK & NÖTZLI (1997), BAKER ET AL. (1982), KLOK ET AL. (2001)
Interzeption	MENZEL (1997)
Bodenfeuchte	BERGSTRÖM (1976), GURTZ (1988), ZAPPA & GURTZ (2003)
Evapotranspiration	PENMAN (1948 UND 1956), MONTEITH (1965, 1975 UND 1981), U.A.
Abflussbildung und -konzentration	BERGSTRÖM (1976), SCHWARZE ET AL. (1999)

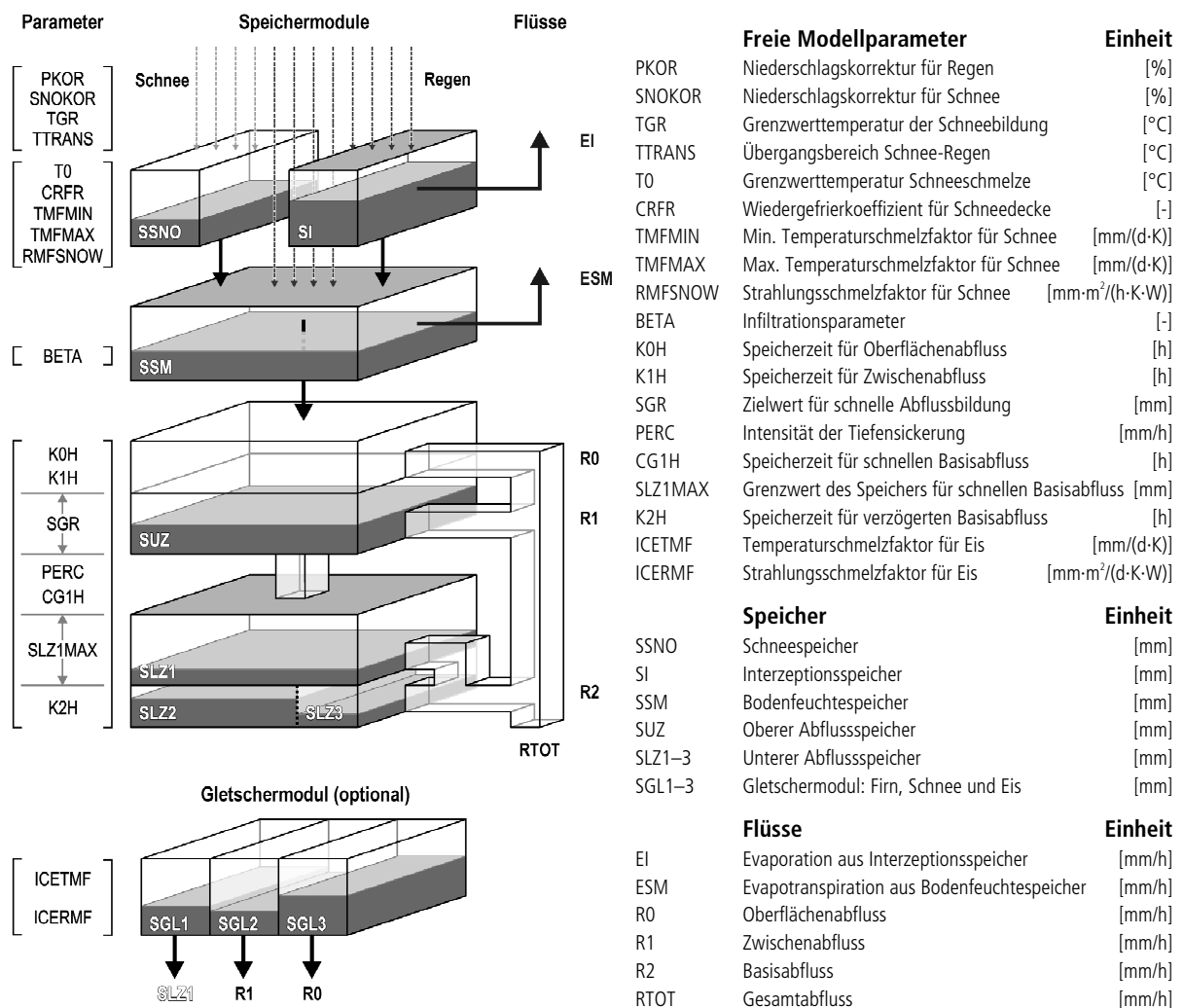


Abbildung 6.1: Schema der Modellstruktur von PREVAH. Dargestellt sind die Speichermodule, die freien Parameter sowie die hydrologischen Flüsse (Grafik nach VIVIROLI ET AL. 2009B)

Daneben hat eine Vielzahl weiterer Grössen Einfluss auf die Eigenschaften der Einzellinearspeicher und somit auch auf diejenigen des entsprechenden Hydrotops bzw. des gesamten Modells. So werden zum Beispiel bei der Zuordnung einer Vegetationsklasse zu einem Hydrotop weitere hydrologisch wirksame Grössen automatisch mitbestimmt (z.B. Stomatawiderstand, Wurzeltiefe, Blattflächenindex, Vegetationsbedeckungsgrad, Albedo, Rauigkeit der Bodenoberfläche und Bodenwärmestrom). Diese Grössen beeinflussen ihrerseits die Prozesse in den einzelnen Teilmodulen (z.B. die Verdunstungsraten im Evapotranspirationsmodell).

Jedes Hydrotop des untersuchten Einzugsgebietes ist entsprechend der in Abbildung 6.1 dargestellten Modellstruktur aufgebaut. Bei einer Modellierung werden in einem ersten Schritt die hydrologischen Prozesse bzw. die Zustände der verschiedenen Wasserhaushaltskomponenten für jedes einzelne Hydrotop berechnet und in einem zweiten Schritt schliesslich mit Hilfe des Abflusskonzentrationsmodells zur hydrologischen Systemantwort des Gesamteinzugsgebietes zusammengefasst (vgl. Kapitel 6.1.4 g).

Im Folgenden werden die wesentlichsten Prozesse der einzelnen **Teilmodule** kurz beschrieben. Die verwendeten Abkürzungen werden auch in der Legende zu Abbildung 6.1 erläutert.

### a) Wasserbilanzkorrektur

Mit Hilfe der beiden freien Modellparameter «Niederschlagskorrektur für Regen» (**PKOR**) und «Niederschlagskorrektur für Schnee» (**SNOKOR**) wird der Niederschlag, welcher in Form von Regen und/oder Schnee ins Modell eingetragen wird, korrigiert. Dadurch wird die gesamte modellierte Wasserbilanz auf die gemessenen Abflusswerte abgestimmt. Das bedeutet, dass nicht nur der Messfehler, welcher bei Niederschlagsmessungen von bedeutendem Ausmass sein kann, (z.B. SEVRUK 1996) berücksichtigt wird, sondern dass auch die Ungenauigkeiten in den Abflussmessungen sowie Abweichungen, welche durch die Modellunsicherheiten entstehen können, dadurch ausgeglichen werden.

### b) Schneeschmelze und -akkumulation

In diesem Teilmodul wird anhand der auf das entsprechende Hydrotop interpolierten Lufttemperatur festgelegt, ob der beobachtete Niederschlag in Form von Schnee oder Regen ins Modell eingeht. Die «Grenzwerttemperatur» (**TGR**) definiert die Grenze zwischen den beiden Niederschlagsformen Schnee und Regen, wobei auch ein «Übergangsbereich» (**TTRANS**), welcher sich jeweils in positiver und negativer Richtung an die TGR anschliesst, einbezogen wird. In diesem Bereich treten beide Niederschlagsformen auf, wobei die Anteile im Bereich  $TGR \pm TTRANS$  linear zu- bzw. abnehmen. Somit fällt unter der Temperatur  $T_{\text{Schnee}} = TGR - TTRANS$  sämtlicher Niederschlag in Form von Schnee, über der Temperatur  $T_{\text{Regen}} = TGR + TTRANS$  fällt der gesamte Niederschlag in Form von Regen. Der Schneeanteil des Niederschlags trägt jeweils zum Auffüllen des Schneespeichers (**SSNO**) bei.

Für die Berechnung der Schneeschmelze – welche die Leerung des Speichers steuert – stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung. Standardmässig wird der Ansatz von Hock (1999) zur Anwendung empfohlen, für welchen die beiden freien Modellparameter «Grad-Tag-Faktor» (**TMFSNOW**) sowie ein «Strahlungsschmelzfaktor für Schnee» (**RMFSNOW**) verwendet werden. Die Schneeschmelze setzt jedoch erst über einer Grenzwerttemperatur (**T0**) ein, welche ebenfalls zu den freien Modellparametern gehört. Weitere kalibrierbare Modellparameter steuern die minimalen bzw. maximalen täglichen Schneeschmelzbeträge (**TMFMIN**, **TMFMAX**). Gleichzeitig wird in diesem Modul auch die Wasserspeicherung von Niederschlags- und Schmelzwasser in der Schneedecke – jedoch mittels fest

vorgegebener Parametrisierung – berücksichtigt. Der Anteil des wiedergefrierenden Schmelzwassers in der Schneedecke bei negativer Strahlungsbilanz wird hingegen über einen freien Modellparameter (**CRFR**) berechnet.

Daneben stehen im Modellsystem auch zahlreiche andere Ansätze zur Modellierung der Schneeschmelze zur Verfügung, welche teilweise mit deutlich weniger Eingabedaten auskommen. So ist in PREVAH z.B. auch das klassische Grad-Tag-Verfahren implementiert (vgl. z.B. Hock 2003), welches ausschliesslich mit Lufttemperaturdaten angetrieben wird.

### c) Eis- bzw. Gletscherschmelze

Für vergletscherte Einzugsgebiete verwendet PREVAH ein separates Gletschermodule (vgl. BADOUX 1999, KLOK ET AL. 2001, VERBUNT ET AL. 2003). Die Hydrotope, welche auf Grund der Landnutzung als vergletschert gelten, werden anhand ihrer Lage gegenüber der Gleichgewichtslinie sowie anhand der aktuellen Schneedecke als Firn-, Schnee- und Eisfläche klassiert (**SGL1-3**).

Niederschlag, der in flüssiger Form in dieses Teilmodul eingetragen wird, gelangt direkt in den Speicher. Bei Schneebedeckung bzw. wenn Eis vorhanden ist, wird vorgängig die Schnee- und Eisschmelze nach dem Grad-Tag-Verfahren für Schnee bzw. nach einem kombinierten Ansatz von Hock (1999) für Eis berechnet. Dazu werden insbesondere der konstante Grad-Tag-Faktor für Eis (**ICETMF**) sowie der konstante Strahlungsschmelzfaktor für Eis (**ICERMF**) verwendet; beide Parameter können kalibriert werden.

Die Entleerung der Einzellinearspeicher SGL1-3 wird über fest vorgegebene Speicher- und Translationszeiten gesteuert und erfolgt jeweils an verschiedene Abflusskomponenten (SGL2 an R1, SGL3 an R0) bzw. an den Grundwasserspeicher (SGL1 an SLZ1; vgl. Abbildung 6.1).

### d) Interzeption

Pro Hydrotop wird für jeden Monat entsprechend der Bodenbedeckung, dem Vegetationstyp und der Meereshöhe der maximale Inhalt des Interzeptionsspeichers (**SI**) automatisch festgelegt (GURTZ ET AL. 1997). Während die Füllung des Interzeptionsspeichers dem Ansatz von MENZEL (1997) folgt, wird der Speicher durch die berechnete potentielle Evapotranspiration bzw. als Interzeptionsverdunstung (**EI**) geleert. Ist der Interzeptionsspeicher voll, wird der Niederschlag direkt an das Bodenfeuchtemodell weitergegeben, was in der hydrologischen Realität dem abtropfenden Niederschlag oder dem Stammabfluss entspricht.

Auf vegetationslosen Fels- und Siedlungsflächen wird die Interzeption durch die Muldenspeicherung bzw. die Oberflächenbenetzung ersetzt und modelliert. Für Wasserflächen wird dieses Teilmodul nicht berücksichtigt.

### e) Bodenfeuchte

Mit diesem Teilmodul, welches im Wesentlichen den Ansätzen von BERGSTRÖM (1976) folgt, werden die Vorgänge in der ungesättigten oberen Bodenzone gesteuert. Der maximale Inhalt des Speichers entspricht der nutzbaren Feldkapazität und somit dem pflanzenverfügbaren Wasser; der entsprechende Wert und dessen Jahresgang wird durch die Bodenart, Bodentiefe und Durchwurzelungstiefe vorgegeben (GURTZ ET AL. 1997).

Den Zufluss zum Teilmodul bildet Wasser unterschiedlicher Herkunft: durchfallender Niederschlag, abtropfender Niederschlag bzw. Stammabfluss sowie Schmelzwasser aus dem Schneespeicher

(**SSNO**). Der Infiltrationsparameter (**BETA**) entscheidet darüber, welcher Anteil des gesamthaft zufließenden Wassers an den Bodenfeuchtespeicher (**SSM**) bzw. an den oberen Abflussspeicher (**SUZ**) weitergegeben wird. Die Aufteilung ist aber auch vom aktuellen Füllstand des Bodenfeuchtespeichers und dessen maximaler Speicherkapazität abhängig.

## f) Evapotranspiration

Der Bodenfeuchtespeicher wird ausschliesslich durch die aktuelle Evapotranspiration (**ESM**) entleert. Bei diesem Prozess haben die pro Hydrotop und pro Monat parametrisierten Werte der Albedo bzw. der Stomatawiderstände eine entscheidende Bedeutung. Diese Werte werden unter Berücksichtigung der Landnutzungsart, der Vegetationsart, des Entwicklungsstandes der Vegetation sowie der Menge an pflanzenverfügbarem Bodenwasser automatisch festgelegt (GURTZ ET AL. 1999). Der obere Grenzwert der aktuellen Verdunstung wird durch die potentielle Evapotranspiration bestimmt, wobei verschiedene methodische Ansätze verwendet werden können (z.B. PENMAN 1948 UND 1956 oder MONTEITH 1965, 1975 UND 1981).

Neben diesen Ansätzen kann die Verdunstung aber auch mit wesentlich einfacheren Verfahren berechnet werden. So ist zum Beispiel auch die Methode von HAMON (1961) im Modell implementiert, welches die potentielle Evapotranspiration alleine auf Grund der Lufttemperatur berechnet (vgl. Kapitel 18.3).

## g) Abflussbildung und Abflusskonzentration

Im Abflussbildungsmodul von PREVAH stellt die Gesamtabflussmenge (**RTOT**) die Summe aus schnellem Abfluss (**R0**), verzögertem Abfluss (**R1**) sowie Basisabfluss (**R2**) dar.

R0 ist die Summe aus gesättigtem Oberflächenabfluss und Hortonschem Oberflächenabfluss und entspricht somit demjenigen Abflussanteil, der bei Starkniederschlagsereignissen und bei der Schneeschmelze wirksam wird. Mit R1 wird der Zwischenabfluss bezeichnet, welcher massgeblich durch die Bodeneigenschaften gesteuert wird. R2 bezeichnet den Basisabfluss, welcher zusätzlich in drei weitere Komponenten unterteilt werden kann (schneller, verzögerter und langsamer Basisabfluss). Die Funktionsweise der Abflussbildung folgt den Ansätzen von BERGSTRÖM (1976) bzw. SCHWARZE ET AL. (1999) und wurde von GURTZ ET AL. (1997) auf die Hydrotopstruktur von PREVAH adaptiert.

Der Zufluss zu den verschiedenen Abflussspeichern wird vom Bodenfeuchtespeicher (Kapitel 6.1.4 e) gesteuert. Das eingetragene Wasser durchfließt hintereinander einen oder mehrere Abflussspeicher (SUZ bis SLZ1-3), wobei der Fliessweg die Zugehörigkeit zur entsprechenden Abflusskomponente sowie den Zeitpunkt der Abflussbildung bestimmt. Der erste Abflussspeicher ist der obere Abflussspeicher (**SUZ**), welcher in seiner Grösse grundsätzlich nicht limitiert ist. Aus diesem werden entweder zwei verschiedene Abflussarten generiert oder das Wasser wird als Tiefensickerung an die unteren Abflussspeicher (**SLZ1-3**) weitergeleitet. Falls der Speicherinhalt den Grenzwert des oberen Abflussspeichers (**SGR**) überschreitet, tritt Oberflächenabfluss (**R0**) auf. Wie schnell dieses Abflussvolumen abgegeben wird, ist massgeblich vom kalibrierbaren Speicherkoeffizienten für Oberflächenabfluss (**KOH**) abhängig. Die Menge an verzögertem Abfluss (**R1**), welcher ebenfalls aus dem oberen Abflussspeicher fließt, wird vom Speicherkoeffizienten für Zwischenabfluss (**K1H**) gesteuert, der ebenfalls frei kalibrierbar ist. Wie viel Wasser pro Zeiteinheit in den unteren Abflussspeicher (SLZ1-3) gelangen kann, wird über die Tiefensickerungsintensität (**PERC**) bestimmt, welche ebenfalls zu den freien Modellparametern gehört. Die unteren drei Abflussspeicher (SLZ1-3), entsprechen der gesättigten Bodenzone. Für diese wird nach den Ansätzen von SCHWARZE ET AL. (1999) der Basisabfluss berechnet.

Der Eintrag aus dem oberen Abflussspeicher, erfolgt zuerst an den Speicher des schnellen Basisabflusses (**SLZ1**), der in seiner Grösse durch den freien Modellparameter **SLZ1MAX** begrenzt ist. Gleichzeitig wird das Wasser in Abhängigkeit des Füllstandes von SLZ1 sowie nach einem bestimmten Aufteilungsschlüssel auch an die beiden anderen Basisabflussspeicher (SLZ2 und SLZ3) weitergegeben. Hierbei ist der Eintrag in den Speicher des langsamen Basisabflussspeichers (**SLZ3**) acht Mal kleiner als der Eintrag in den verzögerten Basisabflussspeicher (**SLZ2**). Mit Hilfe der kalibrierbaren Speicherzeiten für den schnellen und verzögerten Basisabfluss (**CG1H, K2H**) wird die Entleerung von SLZ1 bzw. SLZ2 bestimmt. Auch das Auslaufen von SLZ3, also die Bildung des langsamen Basisabflusses, wird durch eine spezifische Speicherkonstante gesteuert, welche konstant das Neunfache von K2H beträgt. Diese drei Abflusskomponenten aus dem unteren Abflussspeicher (SLZ1 bis SLZ3) werden schliesslich zum Basisabfluss (**R2**) zusammengefasst. Unter dem Gesamtabfluss (**RTOT**) jedes einzelnen Hydrotops sowie des Gesamtgebietes wird schliesslich die Summe aller oben erwähnten Abflusskomponenten R0, R1 und R2 verstanden.

Während die Abflussbildung nach diesem Schema für jedes Hydrotop einzeln berechnet wird, werden bei der Abflusskonzentration die Abflüsse aller Hydrotope mit Hilfe einer Transferfunktion zum Gesamtabfluss des Einzugsgebietes zusammengefasst.

### 6.1.5 Reduktion freier Modellparameter

VIVIROLI ET AL. (2007) haben Vorschläge gemacht, wie die grosse Anzahl freier Modellparameter von PREVAH und die damit verbundene Modellunsicherheit reduziert werden kann. Damit wird das Ziel verfolgt, die Bestimmung der Modellparameter zu vereinfachen und die Werte somit eindeutiger festzulegen (vgl. auch LAMB 1999).

So wurde z.B. der Infiltrationsparameter (BETA) in Anlehnung an UHLENBROOK (1999) bzw. MERZ (2002) auf Grund der Bodentiefe sowie der mittleren Höhe für jedes Hydrotop fest parametrisiert. Parameter, welche z.B. die Schneeschmelze betreffen, können durch die Wahl eines anderen methodischen Ansatzes bei den entsprechenden Teilmodulen eliminiert werden, ohne die Modellierungsqualität einzuschränken (vgl. ZAPPA 2002, ZAPPA ET AL. 2003). Ebenso wurde auf die Kalibrierung des Wiedergefrierkoeffizienten für die Schneedecke (CRFR) verzichtet, welcher stattdessen auf einen physikalisch plausiblen Wert festgelegt wurde (vgl. VIVIROLI 2007).

Für die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung durchgeführten Modellierungen mussten somit entsprechend der meteorologischen Datengrundlage und je nach gewähltem Zeitschritt nur 12 bzw. 14 Parameter kalibriert werden (vgl. Kapitel 6.2). Da für die unbeobachteten Einzugsgebiete zudem der Regionalisierungsansatz von VIVIROLI (2007) verwendet wurde (vgl. Kapitel 6.3), welcher sich ebenfalls auf die gleichen Modellparameter stützt, können somit die Resultate aus kalibrierten und regionalisierten Einzugsgebieten besser miteinander verglichen werden.

### 6.1.6 Modellausgabe

Wie aus der Beschreibung der Modellstruktur (Kapitel 6.1.4) ersichtlich wird, bietet PREVAH die Möglichkeit, eine Vielzahl an **hydrologischen Grössen** zu modellieren. Diese können als Modellausgabe in verschiedenen Textdateien gespeichert werden, wobei die maximale **zeitliche Auflösung** der Ausgabegrössen jeweils **eine Stunde** beträgt. Die Werte können aber auch zusammengefasst als Monats- oder Jahreswerte ausgegeben werden.

Daneben ist PREVAH in der Lage, für das modellierte Einzugsgebiet **Rasterkarten** auszugeben, welche die räumliche Verteilung ausgewählter Wasserhaushaltsgrössen in verschiedener zeitlicher

Auflösung darstellen. Die maximale räumliche Auflösung dieser Karten entspricht der Auflösung des für die Modellierung gewählten Rasters, welche für die vorliegende Untersuchung 500 m x 500 m beträgt.

Tabelle 6.4 gibt einen Überblick über die wichtigsten Ausgabegrößen, welche von PREVAH bereitgestellt werden können. Die Einheiten entsprechen jeweils den über die Gebietsflächen gemittelten Niederschlags-, Abfluss- bzw. Verdunstungshöhen und sind entsprechend in der Einheit «mm/h» angegeben.

Für das sog. Postprocessing – die Nachbearbeitung und Auswertung der Ausgabedaten – stehen im Modellsystem PREVAH verschiedene Hilfsprogramme zur Verfügung, welche die Visualisierung und die Interpretation der Daten wesentlich vereinfachen (vgl. VIVIROLI ET AL. 2007).

Tabelle 6.4: Modellausgabe von PREVAH

Abkürzung	Beschreibung	Einheit
P-UK	Interpolierter Gebietsniederschlag (unkorrigiert)	[mm/h], [mm/d], ...
P-KOR	Interpolierter und angepasster Gebietsniederschlag (korrigiert)	[mm/h], [mm/d], ...
P-SME	Schneesmelze	[mm/h], [mm/d], ...
GLAC	Eissmelze	[mm/h], [mm/d], ...
EPOT	Potentielle Evapotranspiration	[mm/h], [mm/d], ...
EREA	Aktuelle Evapotranspiration	[mm/h], [mm/d], ...
EI	Interzeptions- und Schneeverdunstung	[mm/h], [mm/d], ...
ESM	Verdunstung aus Bodenfeuchtespeicher	[mm/h], [mm/d], ...
R0	Oberflächenabfluss	[mm/h], [mm/d], ...
R1	Zwischenabfluss	[mm/h], [mm/d], ...
R2	Basisabfluss	[mm/h], [mm/d], ...
RTOT	Gesamtabfluss	[mm/h], [mm/d], ...
SSNO	Füllstand Schneespeicher bzw. Schnee-Wasser-Äquivalent	[mm]
SI	Füllstand Interzeptionsspeicher	[mm]
SSM	Füllstand Bodenfeuchtespeicher (Pflanzenverfügbares Wasser)	[mm]
SUZ	Füllstand oberer Abflussspeicher	[mm]
SLZ	Füllstand unterer Abflussspeicher	[mm]

## 6.2 Kalibrierung

Die freien Modellparameter des Modellsystems PREVAH können hinsichtlich verschiedener Kenngrößen und unter Einsatz unterschiedlicher Methoden kalibriert werden. Die Kenngrößen lassen sich in zwei Kategorien unterteilen, welche entweder die Mittelwasser- oder die Hochwasserverhältnisse stärker berücksichtigen. Für die Kalibrierung wurden sowohl der in PREVAH integrierte Kalibrierungsalgorithmus als auch das Programmpaket PEST sowie die mit Monte-Carlo-Simulationen durchgeführte zufällige Parameterwahl verwendet.

### 6.2.1 Allgemeines

Niederschlag-Abfluss-Modelle stellen entsprechend dem Modelltyp immer eine mehr oder weniger starke Vereinfachung eines realen hydrologischen Systems dar. Dabei repräsentieren die verschie-

denen Teilmodule, welche in der Regel anhand mathematischer Funktionen beschrieben werden, die in der Natur beobachteten Prozesse. Aufgrund der nötigen Abstraktionen und Vereinfachungen, die bei der Beschreibung der hydrologischen Prozesse vorgenommen werden, können die in den mathematischen Funktionen verwendeten Modellparameter oft nicht direkt in der Natur gemessen werden. Deshalb müssen die so genannten «freien» Parameter des Modells dermassen geschätzt und angepasst werden, dass die Prozesskette «Eingabegrösse-Zustand-Ausgabegrösse(n)», welche durch das Modell abgebildet wird, möglichst konsistente Werte zu den im Einzugsgebiet gemessenen Grössen liefert (vgl. z.B. GUPTA ET AL. 2005).

Die **Kalibrierung der freien Modellparameter** hat deshalb zum **Ziel**, die Unterschiede zwischen modellierten und gemessenen Grössen durch Anpassung der freien Modellparameter zu minimieren und somit die Modellqualität möglichst optimal zu gestalten. Für die Beurteilung der Modellqualität gibt es verschiedene Möglichkeiten: Entweder werden objektive Gütemasse, welche z.B. die Abweichungen zwischen modellierter und gemessener Abflussganglinie berücksichtigen, bereitgestellt oder es erfolgt ein direkter optischer, jedoch subjektiver Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Grössen.

Da bei einer Modellierung immer von der Überlagerung verschiedener Fehler und Ungenauigkeiten auszugehen ist (z.B. VRUGT ET AL. 2005), wird in der Praxis nie eine völlige Übereinstimmung zwischen modellierten und gemessenen Grössen zu erzielen sein. Die Fehlerquellen können sowohl in den gemessenen Daten (Niederschlag, Abfluss) als auch in der Modellstruktur bzw. in der Beschreibung der Prozesse liegen (BEVEN 1993). Zudem wird die Kalibrierung eines hydrologischen Modells dadurch erschwert, weil davon ausgegangen werden muss, dass für ein Einzugsgebiet nicht nur ein einziger optimaler Parametersatz besteht: Durch das Zusammenwirken der verschiedenen freien Modellparameter ist eine gegenseitige Beeinflussung zu erwarten, so dass verschiedene optimale Parametersätze existieren können (BEVEN & BINLEY 1992, MADSEN ET AL. 2002).

Grundsätzlich kann die Kalibrierung eines Modells manuell («trial-and-error») oder automatisch durchgeführt werden. Den zahlreich verfügbaren automatischen Verfahren liegen unterschiedlichste Techniken und Algorithmen zu Grunde, welche von der zufälligen Parameterwahl bis zu komplexen mathematischen Algorithmen reichen, welche die globalen bzw. lokalen Optima im mehrdimensionalen Parameterraum bestimmen. Eine Übersicht über die aktuell bestehenden Kalibrierungsansätze kann z.B. DUAN ET AL. (2003) entnommen werden.

Für die Kalibrierung von PREVAH bieten sich verschiedene Möglichkeiten an, auf die im Folgenden eingegangen werden soll.

## 6.2.2 Kalibrierung von PREVAH

Das Resultat der Kalibrierung eines hydrologischen Systems kann von verschiedenen Grössen beeinflusst werden. So sind insbesondere der Modellinput, die räumliche Diskretisierung des untersuchten Einzugsgebietes sowie der Kalibrierungszeitraum von entscheidender Bedeutung (BÁRDOSSY & DAS 2008, HORRITT & BATES 2001, VIVIROLI 2007). Da in der vorliegenden Arbeit das Ziel angestrebt wurde, das Hochwasserverhalten der verschiedenen Einzugsgebiete möglichst optimal nachzubilden, wurden verschiedene Grössen variiert, was jedoch immer eine neue Kalibrierung der Modellparameter bedingt hat. Folgende Einflussgrössen wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Bestimmung der bestmöglichen Modellvariante variiert:

- > **Kalibrierungszeitraum:** Die Modelle wurden jeweils für vier Jahre entweder auf die Periode 1994-1997 oder auf die Periode 1999-2002 kalibriert, wobei jeweils ein Initialisierungsjahr zum Auffüllen der Speicher vor der Kalibrierungsperiode einbezogen wurde. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Kalibrierungszeitraum möglichst vielfältige hydrologische Verhältnisse aufweist, jedoch keine allzu extremen Ereignisse beinhaltet.
- > **Modellinput:** Die Interpolation des meteorologischen Inputs wurde nur für den Niederschlag variiert. Insbesondere für die Modellierungen im Tagesschritt wurden die beiden Interpolationsarten IDW sowie DTIDW (vgl. Kapitel 6.1.3) verwendet und miteinander verglichen.

In PREVAH ist eine **automatische Kalibrierungsmethode** integriert, welche die Optimierung verschiedener Gütemasse anstrebt (VIVIROLI ET AL. 2009c). Die verwendeten Gütemasse berücksichtigen verschiedene Aspekte der Abflussganglinie und ermöglichen eine objektive Beurteilung der Modellqualität. Im Folgenden werden zuerst die einzelnen Gütemasse (Abschnitt a) und anschliessend das Vorgehen bei der automatischen Kalibrierung (Abschnitt b) vorgestellt..

### a) Gütemasse zur Beurteilung der Modellqualität

Das Nash-Sutcliffe-Gütemass **NSE** (NASH & SUTCLIFFE 1970, Gleichung 6.1) beurteilt alle vorliegenden Wertepaare von modelliertem und beobachtetem Abfluss in einem vorgegebenen Zeitraum.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad NSE \in [-\infty, 1] \quad \text{Gleichung 6.1}$$

mit:  $O_i$  = Beobachteter Wert zum Zeitpunkt  $i$   
 $P_i$  = Modellierter Wert zum Zeitpunkt  $i$   
 $N$  = Anzahl Wertepaare

Die Modellierung stimmt umso besser mit der Messung überein, je näher das Gütemass bei 1 liegt. Es reagiert sensitiv auf Abweichungen bei den grossen Daten und kann bei Einzugsgebieten mit grosser Varianz automatisch zu guten Werten führen (z.B. SCHAEFLI & GUPTA 2007).

Deshalb wird bei der automatischen Kalibrierung von PREVAH ein weiteres Gütemass verwendet, welches die logarithmierten Werte von modellierten und beobachteten Abflussdaten einbezieht (**NSE<sub>ln</sub>**, Gleichung 6.2). Somit kann der Einfluss der grossen Werte deutlich reduziert werden.

$$NSE_{ln} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\ln(O_i) - \ln(P_i))^2}{\sum_{i=1}^N (\ln(O_i) - \ln(\bar{O}))^2} \quad NSE \in [-\infty, 1] \quad \text{Gleichung 6.2}$$

mit:  $O_i$  = Beobachteter Wert zum Zeitpunkt  $i$   
 $P_i$  = Modellierter Wert zum Zeitpunkt  $i$   
 $N$  = Anzahl Wertepaare



Die Interpretation von  $NSE_{in}$  ist mit derjenigen von  $NSE$  gleichzusetzen. Mit diesem Gütemass wird insbesondere die Qualität der modellierten Ganglinie ausserhalb von Hochwasserperioden – z.B. für Rezessionsäste oder Niedrigwasserperioden – bestimmt.

Im Weiteren wurde zur Überprüfung der Modellierungsqualität der Wasserbilanz das **volumetrische Gütemass DVOL** (Gleichung 6.3) beigezogen, welches die mittlere relative Abweichung zwischen den modellierten und gemessenen Abflusswerten beurteilt.

$$DVOL = \frac{\left| \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{O_i} - I \right|}{N} \quad DVOL \in [0, \infty] \quad \text{Gleichung 6.3}$$

mit:  $O_i$  = Beobachteter Wert zum Zeitpunkt  $i$   
 $P_i$  = Modellierter Wert zum Zeitpunkt  $i$   
 $N$  = Anzahl Wertepaare

Diese drei Gütemasse werden bei der automatischen Kalibrierung von PREVAH zu einem **Gesamtgütemass** kombiniert, mit welchem die Modellierungsqualität während der automatischen Kalibrierung beurteilt wird (vgl. VIVROLI ET AL. 2007). Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass durch diese Kombination die Defizite, mit welchen die einzelnen Gütemasse behaftet sind, reduziert werden bzw. dass dadurch die einseitige Kalibrierung der Modellparameter auf einen bestimmten hydrologischen Aspekt vermieden werden kann. Grundsätzlich muss jedoch davon ausgegangen werden, dass mit einem solchen auf mehreren Kalibrierungskriterien basierenden Vorgehen für den Zeitraum der Kalibrierung etwas tiefere Werte bei den einzelnen Gütemassen erzielt werden, dass die Resultate aber umso robuster für den Validierungszeitraum sein können (z.B. MERZ UND BLÖSCHL 2004).

## b) Vorgehen bei der automatischen Kalibrierung

Der Algorithmus der automatischen Kalibrierung zur Optimierung der freien Modellparameter geht paarweise und iterativ vor. Dabei werden jeweils zwei Modellparameter, welche einen inhaltlichen Zusammenhang aufweisen, systematisch über den von ihnen gemeinsam aufgespannten Parameterraum verändert. Dieser Parameterraum wird von den Bereichen der beiden Parameter vorgegeben, welche ihrerseits auf Grund von physikalisch plausiblen Grenzen oder basierend auf Erfahrungswerten festgelegt werden (vgl. Tabelle 6.5).

Bei der automatischen Kalibrierung (vgl. Abbildung 6.2) wird zuerst der gemeinsame Parameterraum in ein regelmässiges Gitter mit neun Teilflächen unterteilt. Für jeden der vier Gitterpunkte innerhalb des Parameterraumes wird anschliessend eine Modellierung mit den entsprechenden Parameterwerten durchgeführt (Schritt 1). Anhand des Gesamtgütemasses wird entschieden, welches Parameterpaar die beste Modellierung liefert. Dieses Parameterpaar bildet den Ausgangspunkt für die nächste Iteration, wobei der für die Kalibrierung jetzt noch zur Verfügung stehende Bereich nur die vier an den gewählten Gitterpunkt anschliessenden Gitterzellen umfasst (Schritt 2). Dieser Bereich wird wiederum gleichmässig in neun Teilbereiche unterteilt (Schritt 3) und das Vorgehen wird wie beschreiben wiederholt (Schritt 4). Falls sich das Gesamtgütemass während einer Iteration nicht mehr substantiell verändert bzw. ein vorgegebener Änderungsbetrag nicht überschritten wird oder wenn eine vorgegebene Anzahl an Iterationsschritten erreicht wurde, wird die Kalibrierung mit dem nächsten Parameterpaar fortgesetzt bzw. beendet.

Tabelle 6.5: Modellparameter und deren kalibrierbarer Parameterbereich

Beschreibung	Abkürzung	Einheit	Unterer Grenzwert	Ausgangswert	Oberer Grenzwert
Niederschlagskorrektur für Regen*	PKOR	[%]	-30	0	30
Niederschlagskorrektur für Schnee*	SNOKOR	[%]	-30	0	50
Grenzwerttemperatur der Schneebildung	TGR	[°C]	-1	0	1
Übergangsbereich Schnee-Regen	TTRANS	[°C]	0	0.75	1.5
Grenzwerttemperatur Schneeschmelze*	T0	[°C]	-1	0	1
Wiedergefrierkoeffizient für Schneedecke	CRFR	[-]	0	0.1	1.5
Minimaler Temperaturschmelzfaktor für Schnee	TMFMIN	[mm/(d·K)]	0.25	1	2
Maximaler Temperaturschmelzfaktor für Schnee	TMFMAX	[mm/(d·K)]	2	2	4
Strahlungsschmelzfaktor für Schnee*	RMFSNOW	[mm·m <sup>2</sup> /(h·K·W)]	0.00005	0.0001	0.0003
Infiltrationsparameter*	BETA	[-]	0.0001	0.001	6
Speicherzeit für Oberflächenabfluss*	K0H	[h]	10	10	30
Speicherzeit für Zwischenabfluss*	K1H	[h]	50	75	150
Zielwert für schnelle Abflussbildung*	SGR	[mm]	10	30	50
Intensität der Tiefensickerung*	PERC	[mm/h]	0.04	0.1	0.2
Speicherzeit für schnellen Basisabfluss*	CG1H	[h]	200	750	1000
Grenzwert des Speichers für schnellen Basisabfluss*	SLZ1MAX	[mm]	25	150	250
Speicherzeit für verzögerten Basisabfluss*	K2H	[h]	1000	2500	4000
Temperaturschmelzfaktor für Eis*	ICETMF	[mm/(d·K)]	0.5	2	3
Strahlungsschmelzfaktor für Eis*	ICERMF	[mm·m <sup>2</sup> /(d·K·W)]	0.00001	0.00002	0.0003

\* = im Rahmen der vorliegenden Untersuchung kalibrierte Parameter, zusätzlich auch TMFSNOW. Bei unkalibrierten Parametern wurde der Default-Wert übernommen, mit Ausnahme von BETA (vgl. Kapitel 6.1.5)

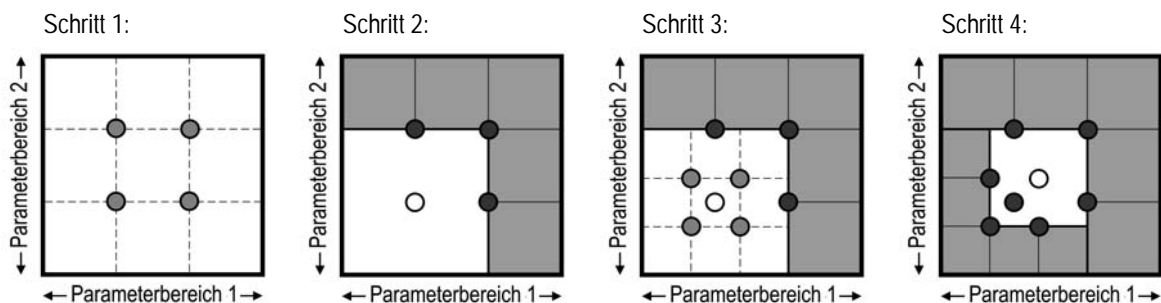


Abbildung 6.2: Iteratives Vorgehen bei der automatischen Kalibrierung mit PREVAH (Erläuterungen siehe Text, Grafik verändert nach VIVIROLI ET AL. 2007)

Wenn die Kalibrierung alle Parameterpaare durchlaufen hat, wird der Vorgang mit den im ersten Durchgang festgelegten Parameterwerten als Ausgangswerte erneut gestartet. Dies deshalb, weil davon ausgegangen werden muss, dass zwischen den verschiedenen Parametern eine gegenseitige Beeinflussung vorliegt. Die erneute Kalibrierung ermöglicht es, dass die Anpassungen, die bei der vorgängigen Kalibrierung z.B. bei den Parameterwerten des vierten Parameterpaars entstanden, beim ersten Parameterpaar berücksichtigt werden können. Dieses Vorgehen wurde von CORTI (2003) und VIVIROLI (2007) in verschiedenen Anwendungen getestet bzw. weiterentwickelt und hat sich seither in vielen Anwendungen bewährt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeiten wurde die Kalibrierung, je nach dem ob es sich um ein vergletschertes oder unvergletschertes Einzugsgebiet handelte, für acht bzw. neun **Parameterpaare**, welche auf Grund der Empfehlungen von VIVIROLI ET AL. (2007) zusammengestellt wurden, durchlaufen (vgl. Tabelle 6.6).

Für jedes Parameterpaar wurden gemäss den Empfehlungen von VIVIROLI (2007) maximal acht Iterationen durchlaufen, wobei jede Iteration jeweils vier Modelläufe umfasst. Die Kalibrierung für alle Parameterpaare wurde im Rahmen dieser Arbeit insgesamt dreimal wiederholt.

Tabelle 6.6: Kalibrierte Parameterpaare

Paar	Parameter 1	Parameter 2
1	Niederschlagskorrektur für Regen	Niederschlagskorrektur für Schnee
2	Grenzwerttemperatur Schneeschmelze	Temperaturschmelzfaktor für Schnee
3	Grenzwerttemperatur Schneeschmelze	Strahlungsschmelzfaktor für Schnee
4	Infiltrationsparameter	Speicherzeit für Oberflächenabfluss
5	Zielwert für schnelle Abflussbildung	Speicherzeit für Oberflächenabfluss
6	Speicherzeit für Zwischenabfluss	Intensität der Tiefensickerung
7	Speicherzeit für schnellen Basisabfluss	Grenzwert des Speichers für schnellen Basisabfluss
8	Speicherzeit für verzögerten Basisabfluss	Intensität der Tiefensickerung
9	Temperaturschmelzfaktor für Eis	Strahlungsschmelzfaktor für Eis

### 6.2.3 Zusätzliche Kalibrierung auf Hochwasser

Zur verstärkten Berücksichtigung der Hochwasserspitzen wurde von VIVIROLI ET AL. (2007) eine zusätzliche Kalibrierung entwickelt, welche stärker auf die Modellqualität im Hochwasserbereich fokussiert. Als Erweiterung zur bestehenden Kalibrierung wurden die **vier** folgenden **Gütemasse** miteinbezogen, welche auch in den Arbeiten von LAMB (1999) verwendet wurden:

**PQT (Peak over threshold):** Dieses Gütemass beurteilt sowohl die Abweichungen der Abflussmengen als auch der Eintretenszeitpunkte der modellierten bzw. der beobachteten Hochwasserspitzen (Gleichung 6.4). In die Beurteilung werden jeweils eine bestimmte Anzahl der grössten Spitzenabflüsse pro Jahr der untersuchten Periode einbezogen. Diese werden für die modellierten wie auch für die beobachteten Daten separat bestimmt und anschliessend in absteigender Reihenfolge anhand ihrer Grösse geordnet.

$$PQT = \sum_{i=1}^N \sqrt{\left[ \frac{(O_i - P_i)}{O^*} \right]^2 + \left[ \frac{(T_{O,i} - T_{P,i})}{T^*} \right]^2} \quad PQT \in [0, \infty] \quad \text{Gleichung 6.4}$$

mit:	$O_i$	=	Abflussmenge der beobachteten Spitze mit Rang $i$
	$P_i$	=	Abflussmenge der modellierten Spitze mit Rang $i$
	$O^*$	=	Differenz zwischen grösster und kleinster beobachteter Spitze
	$T_{O,i}$	=	Auftretenszeitpunkt der beobachteten Spitze mit Rang $i$
	$T_{P,i}$	=	Auftretenszeitpunkt der modellierten Spitze mit Rang $i$
	$T^*$	=	Differenz des Auftretenszeitpunkte der ersten und der letzten beobachteten Spitze
	$N$	=	Anzahl der beurteilten Wertepaare (= $m$ * Anzahl beurteilte Jahre; $m$ = Anzahl Spitzen pro Jahr)

Wenn das Gütemass den Wert 0 annimmt, wurde eine absolute Übereinstimmung zwischen den beobachteten und den simulierten Abflussspitzen, welche in die Beurteilung eingeflossen sind, erzielt.

**PSAE (Sum of absolute errors):** Auch dieses Gütemass beurteilt die  $m$  grössten Hochwasserspitzen pro Jahr des untersuchten Zeitraums, wobei die Spitzenabflüsse der Modellierung und der Beobachtung wie bei PQT unabhängig von einander bestimmt werden (Gleichung 6.5).

PSAE gibt die Summe der absoluten Fehler an, wobei ein Wert von  $PSAE=0$  auf eine vollständige Übereinstimmung der beurteilten Wertepaare hinweist.

$$PSAE = \sum_{i=1}^N |O_i - P_i| \quad PQT \in [0, \infty] \quad \text{Gleichung 6.5}$$

mit:  $O_i$  = Abflussmenge der beobachteten Spitze mit Rang  $i$   
 $P_i$  = Abflussmenge der modellierten Spitze mit Rang  $i$   
 $N$  = Anzahl der beurteilten Wertepaare (=  $m \cdot$  Anzahl beurteilte Jahre;  $m$  = Anzahl Spitzen pro Jahr)

**WAE (Weighted absolute errors):** Mit WAE (Gleichung 6.6) wird die gewichtete Summe der absoluten Fehler angegeben. In die Beurteilung fliessen sämtliche beobachteten und modellierten Werte des untersuchten Zeitraums ein. Durch den Einbezug des frei wählbaren Exponenten  $a$  werden jedoch die grossen Abflussmengen stärker gewichtet als die kleinen. LAMB (1999) hat in seinen Untersuchungen einen Wert von  $a = 1.5$  für die Erzielung einer hohen Sensitivität im Bereich der Spitzenabflüsse empfohlen. Dieser Wert wurde auch im Rahmen der vorliegenden Untersuchung angewendet. Auch bei diesem Gütemass zeigt ein Wert von 0 eine perfekte Übereinstimmung zwischen Modellierung und Beobachtung an.

$$WAE = \sum_{i=1}^N (O_i^a \cdot |O_i - P_i|) \quad WAE \in [0, \infty] \quad \text{Gleichung 6.6}$$

mit:  $O_i$  = Beobachteter Wert zum Zeitpunkt  $i$   
 $P_i$  = Modellierter Wert zum Zeitpunkt  $i$   
 $a$  = Exponent, frei wählbar  
 $N$  = Anzahl Wertepaare

**PSR (Spearman-Rangkorrelationskoeffizient):** Unter Anwendung des Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten (z.B. BAHRENBURG ET AL. 1999, Gleichung 6.7) wird insbesondere die zeitliche Übereinstimmung der modellierten und beobachteten Hochwasserabflussspitzen anhand deren Rangierung beurteilt.

$$PSR = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^N (R_{O,i} - R_{P,i})^2}{N \cdot (N^2 - 1)} \quad PSR \in [-1, 1] \quad \text{Gleichung 6.7}$$

mit:  $R_{O,i}$  = Rang der  $i$ -ten beobachteten Spitze  
 $R_{P,i}$  = Rang der  $i$ -ten modellierten Spitze  
 $N$  = Anzahl der betrachteten Jahre (resp. Jahreshochwasser)

Da es sich bei PSR um einen Korrelationskoeffizienten handelt, weist ein Wert von  $PSR = 1$  auf ein völlig gleichläufiges Verhalten zwischen den Werten hin,  $PSR = 0$  bedeutet, dass keinerlei Übereinstimmung zwischen Modellierung und Beobachtung vorliegt und  $PSR = -1$  zeigt ein vollständig gegenläufiges Verhalten an.

Bei der Methode der Modellkalibrierung auf Hochwasser fließt zudem das bereits beschriebene **Gütemass NSE** (vgl. Gleichung 6.1) in die Beurteilung der Modellqualität mit ein. Die in Gleichung 6.4 bis Gleichung 6.7 beschriebenen Gütemasse sowie das NSE werden auch bei dieser Methode zu einem **Gesamtgütemass** kombiniert, welches als Grundlage für die Kalibrierung der verschiedenen Parameterpaare dient. Die rechnerische Kombination dieser fünf Gütemasse wird ebenfalls in VIVIROLI (2007) detailliert beschrieben.

Die Kalibrierung auf Hochwasser erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie die beschriebene automatische Kalibrierung, wobei bei diesem Verfahren das kombinierte Hochwassergesamtgütemass zur Beurteilung der Modellqualität verwendet wird. Die Kalibrierung wird an die drei Durchgänge der Mittelwasserkalibrierung angeschlossen. Das bedeutet, dass die definitiven Modellparameter, welche für den Mittelwasserbereich kalibriert wurden, den Ausgangspunkt dieses vierten Kalibrierungsdurchgangs bilden. Er umfasst pro Parameterpaar wiederum maximal acht Iterationen mit jeweils vier Modellläufen.

## 6.2.4 Kalibrierung mit PEST

Neben der automatischen Kalibrierung, welche in PREVAH eingebaut ist, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit der Software «Parameter **EST**imation» (DOHERTY 2004, GALLAGHER & DOHERTY 2007) ein weiteres Kalibrierungsverfahren eingesetzt. Dieses wurde in zahlreichen aktuellen hydrologischen Untersuchungen zur Kalibrierung unterschiedlichster Modelle erfolgreich verwendet (z.B. AL-ABED & WHITELEY 2002, DOHERTY & JOHNSTON 2003, GOVENDER & EVERSON 2005, SKAHILL ET AL. 2009). Daneben hat WALTHER (2003) diese Methode bereits für den Einsatz mit PREVAH getestet.

Das Verfahren, welches auf beliebige Modelle aus den unterschiedlichsten Themenbereichen angewendet werden kann, wird ausführlich im Handbuch zur frei verfügbaren Software (DOHERTY 2004) oder zusammengefasst in GOEGEBEUR & PAUWELS (2007) bzw. GALLAGHER & DOHERTY (2007) beschrieben. Grundsätzlich orientiert sich die Methode an der Minimierung einer objektiven Funktion, welche durch die Differenzen zwischen modellierten und beobachteten Werten beschrieben wird und somit den gesamten Modellfehler berechnet. Die modellierten Werte werden bei dieser Methode als Resultat einer nichtlinearen Funktion betrachtet, die ihrerseits durch die freien Modellparameter beschrieben wird. Die Optimierung geschieht dabei unter iterativer Anpassung der freien Modellparameter und verfolgt das Ziel, die objektive Funktion möglichst effizient zu minimieren. Das Verfahren wird so oft wiederholt, bis die Reduktion einen vorgegeben Grenzwert nicht mehr unterschreiten kann. Das Vorgehen basiert auf der gradientenbasierten Gauss-Marquart-Levenberg-Methode (z.B. DRAPER & SMITH 1998).

PEST bietet zahlreiche Möglichkeiten, um auf die Kalibrierung und deren Verlauf Einfluss zu nehmen, was zwar eine äusserst flexible Anwendung ermöglicht, aber oft zu Schwierigkeiten führt, auf Anhieb den optimalen Datensatz zu erzielen. Von entscheidender Bedeutung bei der Anwendung dieses Verfahrens sind die drei folgenden Punkte (DOHERTY 2004):

- > **Ausgangswerte der freien Modellparameter:** Für die erste Modellierung dieser iterativen Kalibrierungsmethode müssen Ausgangswerte der Modellparameter gewählt werden, womit der Startpunkt der Optimierung definiert wird. Dies kann die Resultate der ersten

Optimierungsiterationen und somit den ganzen Kalibrierungsvorgang wesentlich beeinflussen. In den vorliegenden Untersuchungen wurden die standardmässigen Ausgangswerte (vgl. Tabelle 6.5) übernommen. Da sich Ausgangswerte von 0 ebenfalls negativ auf den Optimierungsalgorithmus auswirken können, wurden die Ausgangswerte der betreffenden Modellparameter leicht angepasst. So wurde z.B. für den Ausgangswert der Niederschlagskorrektur neu 1% anstatt 0% gewählt.

- > **Berücksichtigung verschiedener Kennwerte:** Wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben, kann auch die Kalibrierung mit PEST entweder anhand von Gütemassen aber auch direkt bzw. anhand der Abweichung von gemessenen und beobachteten Werten erfolgen. Im Rahmen der Kalibrierung von PREVAH mit PEST wurde folgender Ansatz gewählt: Die Kalibrierung erfolgte einerseits auf die Minimierung der Abweichung zwischen gemessener und modellierter Abflussganglinie und andererseits auf die Minimierung des hochwasserspezifischen Gütemasses PQT (vgl. Gleichung 6.4). Somit wurde sowohl der Verlauf der Ganglinie als auch die Qualität der Hochwassersimulation miteinbezogen.
- > **Gewichtung der berücksichtigten Kennwerte:** PEST ermöglicht zudem die unterschiedliche Gewichtung der für die Kalibrierung berücksichtigten Grössen. Damit kann der Einfluss, welchen die verschiedenen Kennwerte auf das Ergebnis der Kalibrierung haben, bestimmt werden. In den durchgeführten Untersuchungen wurden verschiedene Einstellungen getestet, wobei keine allgemein gültige Regel zur Bestimmung der optimalen Einstellungen gefunden werden konnte.

### 6.2.5 Kalibrierung mittels zufälliger Parameterwahl

Neben dem automatischen Kalibrierungsverfahren (vgl. Kapitel 6.2.2) bietet PREVAH auch die Möglichkeit, die Modellparameter zufällig festzulegen und aus einer grösseren Anzahl Parameterkombinationen die besten Parametersätze auszuwählen. Bei diesem Ansatz werden in einem ersten Schritt für alle freien Modellparameter zufällige Werte aus den vorgegebenen Parameterbereichen (Tabelle 6.5) festgelegt. Anschliessend wird mit dem zufällig generierten Parametersatz eine Modellierung durchgeführt. Dieser Vorgang wird beliebig oft wiederholt, wobei die Modellierung mindestens mehrere Tausend Modellläufe umfassen sollte. Anhand der für alle Modellierungen berechneten Gütemasse (vgl. Kapitel 6.2.2) kann schliesslich entschieden werden, welche Parameterkombination die besten Modellierungsergebnisse liefert.

Das Verfahren, welches auch unter dem Begriff **«Generalised Likelihood Uncertainty Estimation» (GLUE)** bekannt ist, orientiert sich an den Arbeiten von BEVEN & BINLEY (1992), welche postulieren, dass für ein Modell nicht ein einziger optimaler Parametersatz bestimmt werden kann. Die Autoren gehen davon aus, dass verschiedene Parametersätze existieren, mit welchen eine vergleichbar gute Modellierungsqualität erreicht werden kann.

GLUE erlaubt es, verschiedene funktionale Parametersätze für ein Modell zu bestimmen. Wie bei jedem Zufallsexperiment, ist eine grössere Anzahl an Modellläufen notwendig, um zu einer statistisch stabilen Aussage zu gelangen. Aus diesem Grund wurden für die verschiedenen untersuchten Einzugsgebiete je nach Modellversion bis zu 50'000 Modellparametersätze erstellt, was mit einem entsprechend grossen rechnerischen Aufwand verbunden ist. Neben der Bestimmung von verschiedenen funktionalen Modellparametersätzen können die zufällig generierten Datensätze aber auch für die Analyse von Parametersensitivitäten bzw. -unsicherheiten verwendet werden (z.B. BINLEY ET AL. 1991 oder VIVIROLI 2007).

Im Rahmen der durchgeführten Modellierungen wurde für jedes untersuchte Teileinzugsgebiet eine möglichst optimale Simulation der Hochwasserverhältnisse angestrebt. Durch die Anwendung von GLUE bot sich die Möglichkeit, die mit PEST oder der automatischen Kalibrierung von PREVAH bestimmten Modellparameter zu beurteilen. Dies indem die Qualität der mit kalibrierten Parametersätzen durchgeführten Modellierungen in den Kontext der Gütemasse aller Modellierungen mit zufällig generierten Parametersätzen eingeordnet wurde (vgl. Kapitel 6.2.5).

### 6.3 Regionalisierung der Modellparameter

Wie in Kapitel 6.2 beschrieben, werden bei Einzugsgebieten, für welche Abflussmessungen verfügbar sind, die freien Modellparameter unter Anwendung verschiedener Verfahren kalibriert. Falls jedoch **Abflussmessungen fehlen**, müssen die Modellparameter mit anderen Methoden hergeleitet werden. Eine Möglichkeit stellt die **Übertragung bzw. Regionalisierung der Parameterwerte** aus kalibrierten Einzugsgebieten dar. VIVIROLI (2007) hat zu diesem Zweck und für die Anwendung in PREVAH einen Ansatz entwickelt, mit welchem die Modellparameter für beliebige Einzugsgebiete der Schweiz mit einer Einzugsgebietsfläche zwischen 10 und 1000 km<sup>2</sup> regionalisiert werden können. Die Methode stützt sich auf eine Datengrundlage von 140 kalibrierten mesoskaligen Einzugsgebieten der Alpennordseite der Schweiz und beinhaltet ein Verfahren, welches sich auf die drei folgenden Ansätze stützt (vgl. Abbildung 6.3, vgl. auch VIVIROLI ET AL. 2009A):

- > **Nearest Neighbours:** Bei diesem Ansatz werden die fünf kalibrierten Einzugsgebiete einbezogen, die dem zu regionalisierenden Einzugsgebiet am ähnlichsten sind. Die Ähnlichkeit wird anhand der Euklidischen Distanz (z.B. BAHRENBERG ET AL. 1999) beurteilt, welche auf Grund verschiedener Gebietsattribute berechnet wird (vgl. VIVIROLI 2007). Die Modellparameter der fünf ähnlichsten kalibrierten Einzugsgebiete werden unverändert auf das zu regionalisierende Einzugsgebiet übertragen und für je eine Modellierung eingesetzt. Aus diesen fünf modellierten Ganglinien (NN1 bis NN5) wird anschliessend der Median gebildet; das Resultat bildet eine **erste regionalisierte Abflussganglinie (MNN)**.
- > **Kriging:** Beim Kriging-Ansatz wurden die Modellparameter der 140 kalibrierten Einzugsgebiete mittels Ordinary Kriging (z.B. GOOVAERTS 1997) für die Alpennordseite der Schweiz interpoliert. Für das zu regionalisierende Einzugsgebiet können die Werte der Modellparameter anhand der Lage dessen Gebietsschwerpunktes aus den interpolierten Parameterkarten von VIVIROLI (2007) herausgelesen werden. Unter Anwendung der entsprechenden Modellparameter wird eine **zweite regionalisierte Abflussganglinie (KRG)** modelliert.
- > **Regression:** Beim Regressionsansatz wurden von VIVIROLI (2007) die Zusammenhänge, die zwischen flächendeckend verfügbaren Gebietsattributen (z.B. pedologische oder klimatologische Gebietskennwerte) und den kalibrierten Modellparametern bestehen, verwendet. Mit Hilfe von für jeden Modellparameter berechneten Regressionsbeziehungen können somit aus den Gebietsattributen des modellierten Einzugsgebietes die Werte der Modellparameter hergeleitet werden. Damit wird die **dritte regionalisierte Abflussganglinie (RGR)** simuliert.

Die **endgültige Ganglinie (MKMB)** für das modellierte Einzugsgebiet wird schliesslich durch Kombination bzw. erneuter Medianbildung der drei regionalisierten Ganglinien (MNN, KRG, RGR), welche aus den oben beschriebenen Verfahren resultierten, gebildet.

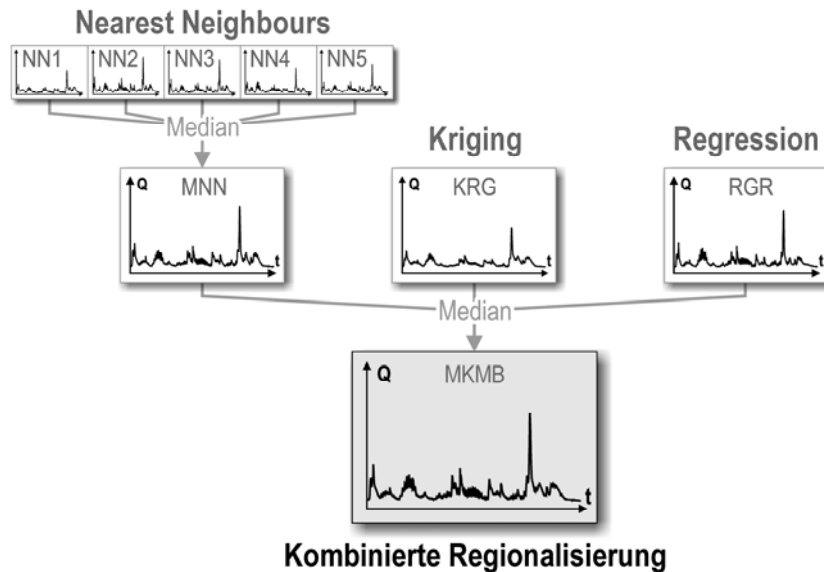


Abbildung 6.3: Bereitstellung der Abflussganglinie bei der Regionalisierung nach Viviroli (2007) (Grafik verändert nach VIVIROLI ET AL. 2008)

## 6.4 Vorgehen

Zur Kalibrierung der freien Modellparameter wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit und für **Einzugsgebiete, welche über Abflussmessungen für mindestens 10 Jahre im Zeitraum 1983-2005** verfügen, der folgende Ansatz verwendet:

- > Das hydrologische Modell wurde mit den drei in Kapitel 6.2 beschriebenen Verfahren (PEST, PREVAH und GLUE) für vier Jahre **kalibriert**.
- > Die Qualität der mit diesen Methoden kalibrierten Modelle wurde anschliessend anhand verschiedener **Gütemasse** miteinander verglichen. Anhand dieses Vergleichs wurden die besten ca. 10 Modelle bestimmt.
- > Für die ausgewählten kalibrierten hydrologischen Modelle wurde eine separate **Validierung** anhand der vorliegenden Abflussmesswerte der Periode 1983-2005 durchgeführt. Dabei wurden die Abflussmessungen der Jahre, welche für die Kalibrierung verwendet wurden, nicht berücksichtigt.
- > Anhand der Ergebnisse der Validierung für die verschiedenen hydrologischen Modelle wurde ein **bestes Modell** bestimmt, welches für die weiteren Auswertungen (z.B. Hochwasserabschätzung anhand modellierter Abflussdaten) eingesetzt wurde.

Für **Einzugsgebiete ohne Abflussmessungen** wurden die freien Modellparameter mit Hilfe der Regionalisierung von VIVIROLI (2007) bestimmt. Die Auswertung erfolgte in diesen Fällen jeweils anhand der medianen Abflussganglinie, welche gemäss dem in Kapitel 6.3 beschriebenen Verfahren hergeleitet wurde.



## 6.5 Beispiele zur Kalibrierung und Regionalisierung

Anhand der beiden Beispiele für Kander-Frutigen (Abbildung 6.4) und Allenbach-Adelboden (Abbildung 6.5) soll das Vorgehen bei der Kalibrierung illustriert werden. In diesen Abbildungen sind für die Gütemasse (NSE, PQT, PSAE, WAE, PSMR) diejenigen Werte eingetragen, welche für die kalibrierten Modelle resultieren. Für diese beiden Beispiele wurden zudem die Gütemasse für die Modelle mit regionalisierten Modellparametern berechnet und mit den Resultaten der kalibrierten Modelle verglichen.

In beiden Abbildungen wurden zur Differenzierung der verschiedenen Modelle folgende Farben gewählt:

- > rote Punkte: Resultate der Modelle, welche mit dem in PREVAH integrierten Algorithmus auf die Mittelwasserverhältnisse kalibriert wurden (vgl. Kapitel 6.2.2)
- > gelbe Punkte: Resultate der Modelle, welche mit dem in PREVAH integrierten Algorithmus spezifisch auf die Hochwasserverhältnisse kalibriert wurden (vgl. Kapitel 6.2.3)
- > blaue Punkte: Resultate der Modelle, welche mit PEST kalibriert wurden (vgl. Kapitel 6.2.4)
- > graue Punkte: Resultate der Modelle, deren Modellparameter mit der zufälligen Parameterwahl GLUE bestimmt wurden (50'000 Modellläufe, vgl. Kapitel 6.2.5)
- > schwarze Punkte: Beste Resultate der Modelle, deren Parameter mit GLUE bestimmt wurden (ca. 50 beste Modellläufe)
- > grüne Punkte: Resultate der Modelle, deren Modellparameter mit den verschiedenen Regionalisierungsansätzen bestimmt wurden. Der grosse grüne Punkt entspricht dem Resultat für die definitive Ganglinie; vgl. Kapitel 6.3)

Die rund 50 besten GLUE-Modellierungen wurden aus den jeweils 15 besten Modellläufen für jedes Hochwassergütemass (PQT, PSAE, WAE, PSMR) zusammengestellt. Dadurch resultiert jeweils für die verschiedenen Einzugsgebiete eine unterschiedliche Anzahl an Modellen. Dies deshalb, weil auch Modelle existieren, welche sich sowohl bei PQT als auch bei PSAE unter den besten 15 Modellen befinden.

Die Abbildungen sind jeweils so aufgebaut, dass den vier Teilgrafiken die Hochwassergütemasse (PQT, PSAE, WAE, PSMR; Gleichung 6.4 bis Gleichung 6.7) in Kombination mit dem «Nash-Sutcliffe»-Gütemass (NSE; Gleichung 6.1) dargestellt sind. Für die besten Modelle resultieren bei diesem Vergleich Gütemasse, welche sich in der rechten oberen Ecke jeder Teilgrafik befinden. Dies entspricht der Kombination aus dem besten Wert für NSE und dem optimalen Hochwassergütemass. Anhand der 50'000 grauen Punkte (Modelle mit GLUE kalibriert) wird in jeder Teilgrafik der Raum ersichtlich, in dem sich die Gütemasse aller Modelle – sowohl kalibriert als auch regionalisiert – bewegen können.

**a) Kander-Frutigen (Abbildung 6.4):**

Das erste Beispiel zeigt die Kalibrierung für das Einzugsgebiet Kander-Frutigen. Für diesen Pegel sind Abflussmessungen von 1995 bis 2008 verfügbar. Da zeitlich hoch aufgelöste meteorologische Daten bis 1983 vorliegen, kann für dieses Einzugsgebiet mit Hilfe der hydrologischen Modellierung die Information auf den Zeitraum von 1983 bis 1994 ausgedehnt werden.

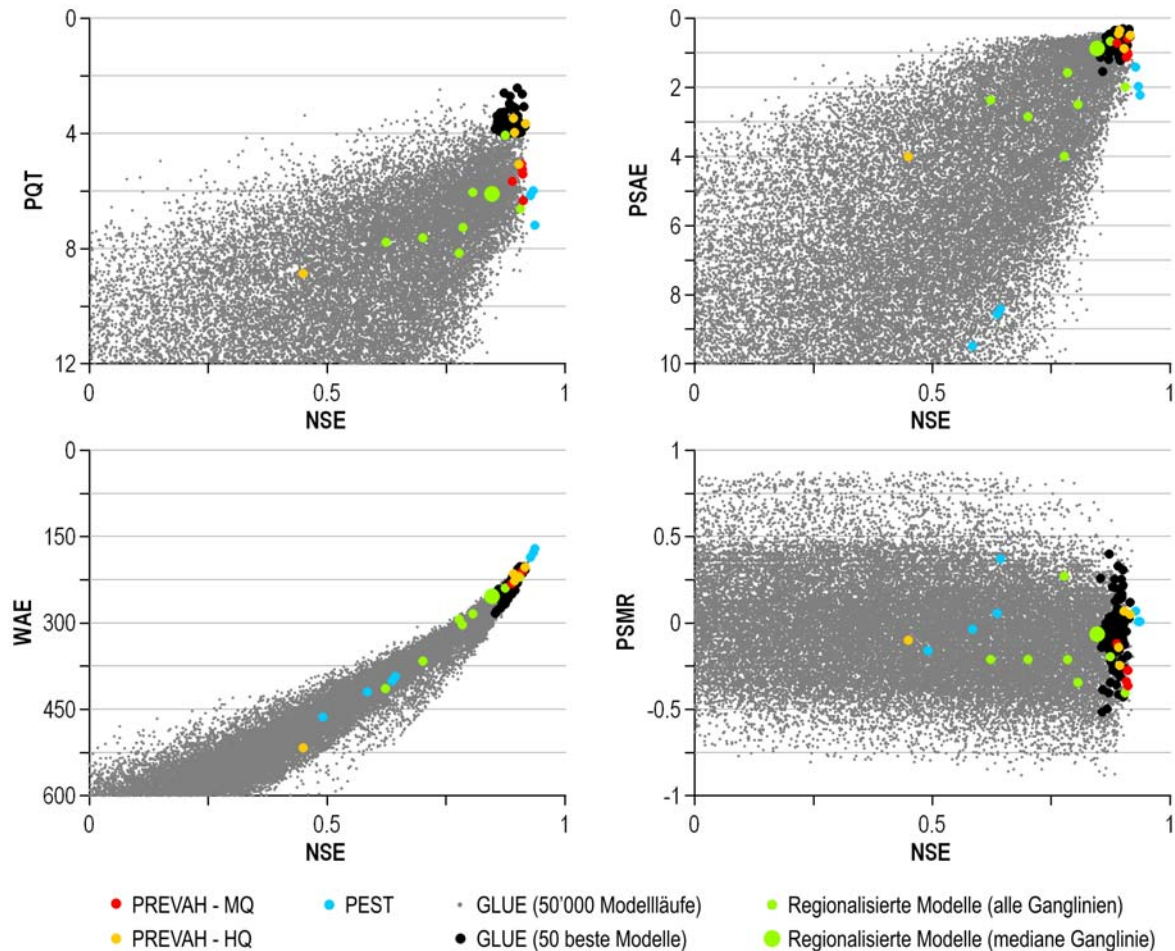


Abbildung 6.4: Beurteilung der kalibrierten und regionalisierten hydrologischen Modelle: Beispiel Kander-Frutigen (Kalibrierungszeitraum: 1999-2002, Initialisierungsjahr: 1998). Beurteilung anhand der Mittel- und Hochwassergütemasse (NSE, PQT, PSAE, WAE, PSMR).

- > **Mit PREVAH kalibrierte Modelle** (gelbe und rote Punkte): Wie zu erwarten, bringt die Kalibrierung auf Hochwasserverhältnisse (gelbe Punkte) gegenüber der Kalibrierung auf Mittelwasserverhältnisse (rote Punkte) eine zusätzliche Steigerung bezüglich der Hochwassergütemasse. Zudem wird ersichtlich, dass sich bei diesem Beispiel die Qualität des NSE für die beiden Kalibrierungsvarianten nur gering unterscheidet. Für einzelne Modelle, welche auf Hochwasserverhältnisse kalibriert wurden, fallen die Gütemasse aber auch sehr schlecht aus. Insgesamt befinden sich die mit PREVAH kalibrierten Modelle in einem optimalen Bereich: Sowohl für das Gütemass PSAE wie auch bei WAE liegen die Resultate im optimalen Bereich (oben rechts). Aus dem Vergleich zu den Werten der Gütemasse, welche für die mit GLUE kalibrierten Modelle resultieren, geht zudem hervor, dass mit der Kalibrierung mit

PREVAH die bestmöglichen Resultate bei den Gütemassen PQT, PSAW und WAE erzielt werden konnten.

- > **Mit PEST kalibrierte Modelle** (blaue Punkte): Mit dieser Methode erreichen die Gütemasse PQT und PSAE etwas schlechtere Werte als bei der Kalibrierung mit PREVAH. Für das Gütemass NSE liefern die Modelle, welche mit PEST kalibriert wurden, jedoch die mit Abstand besten Werte. Das Gleiche ist auch beim Gütemass WAE festzustellen. Dies weist darauf hin, dass die Modelle mit dieser Methode insbesondere für die hydrologischen Verhältnisse im Mittelwasserbereich optimal kalibriert werden konnten.
- > **Modelle mit GLUE-Parametern** (50 beste Modelle, schwarze Punkte): Es fällt auf, dass die besten 50 Modelle, für welche die zufällig erstellten Parametersätze verwendet werden, vergleichbare Gütemasse aufweisen: Bei den drei Hochwassergütemassen (PQT, PSAE, WAE) liegen die verschiedenen Modelle relativ nahe beieinander. Beim Gütemass PSMR ist die Streuung, zumindest bezüglich der y-Achse, jedoch deutlich grösser.
- > **Modelle mit regionalisierten Parametern** (grüne Punkte): Die Modelle, welche die Modellparameter der verschiedenen Regionalisierungen verwenden, weisen eine grosse Streuung bei den Gütemassen auf. Darunter befinden sich sowohl sehr gute wie auch deutlich schlechtere Modellierungen. Die Beurteilung der definitiven Ganglinie fällt besonders bei den Gütemassen NSE, PSAE und WAE gut aus. Es kann aber auch beobachtet werden, dass die Werte der kalibrierten Modelle in diesem Fall durchwegs etwas besser abschneiden, als die Modelle mit regionalisierten Modellparametern.

Bei diesem Beispiel für das Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen wird ersichtlich, dass die Kalibrierung mit PREVAH zu den besten Resultaten geführt hat. Daneben hat die Kalibrierung mit PEST für die Modellierung der Hochwasserverhältnisse keine optimalen Ergebnisse erbracht. Für die Modelle mit regionalisierten Modellparametern werden im Einzugsgebiet Kander-Frutigen gute Resultate erzielt, die kalibrierten Modelle schneiden aber fast durchwegs etwas besser ab.

Die Wahl für das beste Modell fiel im Beispiel von Kander-Frutigen auf ein mit PREVAH auf Hochwasserverhältnisse kalibriertes Modell, da in der vorliegenden Arbeit die Modellierung der Hochwasserverhältnisse von zentralem Interesse war.

### b) Allenbach-Adelboden (Abbildung 6.5):

Das zweite Beispiel illustriert die Kalibrierung für das Einzugsgebiet Allenbach-Adelboden. Für dieses Teileinzugsgebiet sind Abflussmessungen seit 1974 verfügbar, womit eine hydrologische Modellierung zur Beurteilung der Hochwasserverhältnisse grundsätzlich nicht nötig ist. Die Datenlage ermöglicht jedoch eine Abschätzung der Grenzen und Möglichkeiten der Modellierung von kleineren Einzugsgebieten mit PREVAH.

- > **Mit PREVAH kalibrierte Modelle:** Bei diesem Beispiel fällt auf, dass die auf Hochwasserverhältnisse kalibrierten Modelle deutlich geringere Werte beim Gütemass NSE aufweisen, als die Modelle, welche auf Mittelwasserverhältnisse kalibriert wurden. Es wird ersichtlich, dass durch die Kalibrierung auf Hochwasserverhältnisse zwar eine Verbesserung der hochwasserspezifischen Gütemasse erzielt werden kann, dass dies jedoch zu einer Reduktion bei der Modellierungsqualität im Mittelwasserbereich führt. Unter Anwendung dieses Kalibrierungsverfahrens können für das Teileinzugsgebiet Allenbach-Adelboden offenbar nicht gleichzeitig das Gütemass NSE wie auch die verschiedenen hochwasserspezifischen Gütemasse optimiert werden.

- > **Mit PEST kalibrierte Modelle:** Auch bei diesem Beispiel wird ersichtlich, dass die Kalibrierung des hydrologischen Modells mit PEST zu keinen optimalen Werten bei den Hochwassergütemassen führt. Wie jedoch aus dem Vergleich mit den Modellen mit den zufällig erstellten Parametersätzen (GLUE) ersichtlich wird, werden mit den Modellen, welche mit PEST kalibriert wurden, maximale Werte für das NSE-Gütemass erzielt.

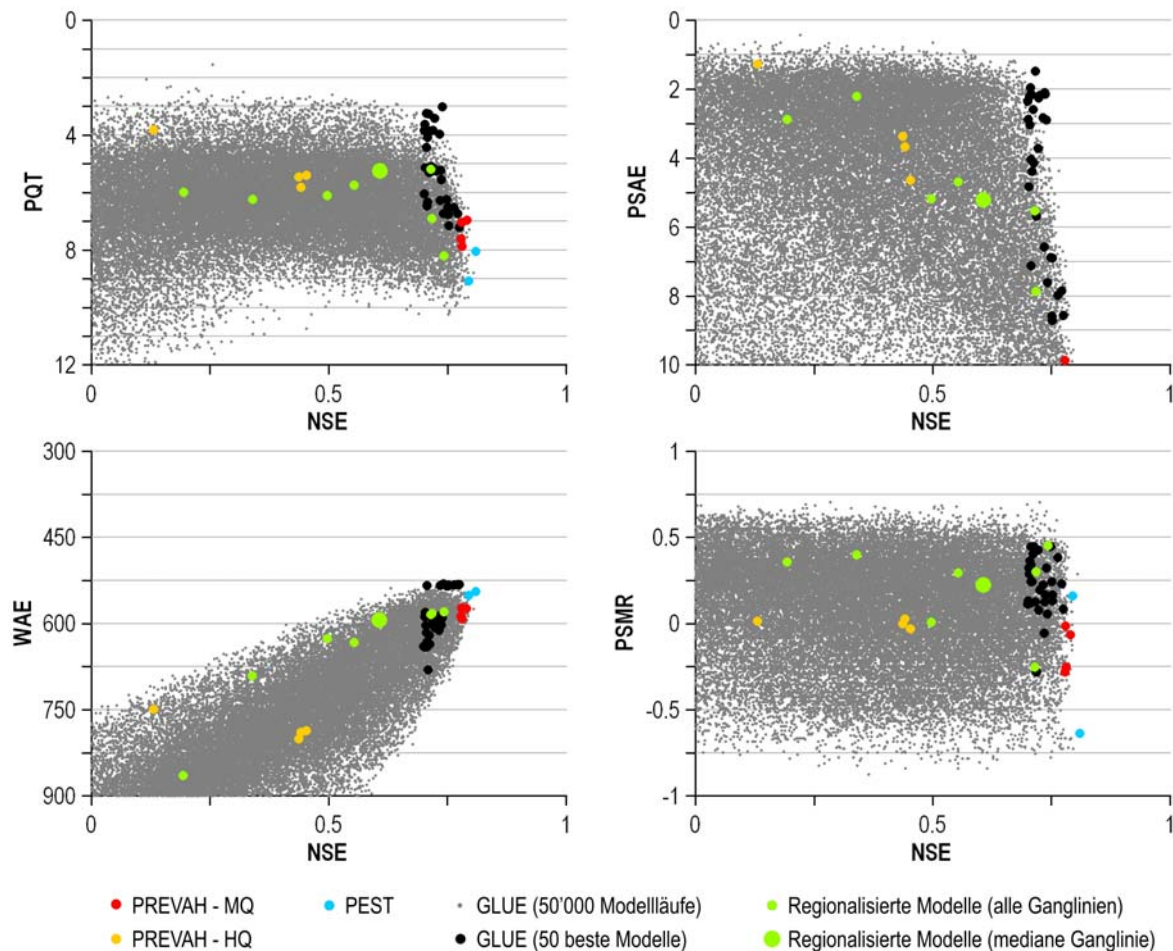


Abbildung 6.5: Beurteilung der kalibrierten und regionalisierten hydrologischen Modelle: Beispiel Allenbach-Adelboden (Kalibrierungszeitraum: 1999-2002, Initialisierungsjahr: 1998). Beurteilung anhand der Mittel- und Hochwassergütemasse (NSE, PQT, PSAE, WAE, PSMR).

- > **Modelle mit GLUE-Parametern:** Gegenüber dem Beispiel Kander-Frutigen ist für die besten rund 50 Modelle bei allen Hochwassergütemassen eine ausgeprägte Streuung zu beobachten. Dies ist ein Hinweis darauf, dass kaum Parametersätze vorliegen, welche für alle Gütemasse gute Resultate aufweisen.
- > **Modelle mit regionalisierten Parametern:** Die Resultate der Regionalisierung weisen auch in diesem Fall sowohl für das NSE wie auch für die verschiedenen Hochwassergütemasse eine sehr grosse Streuung auf. Die definitive Ganglinie erzielt auch hier bei allen Gütemassen nur mittlere Werte. Diese liegen zudem immer unter denjenigen, welche für die kalibrierten Modelle resultieren.

Insgesamt erweist sich die Kalibrierung des Modells für das Teileinzugsgebiet Allenbach-Adelboden als sehr schwierig. Die NSE-Gütemasse liegen einerseits deutlich tiefer als bei der Kalibrierung für

das Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen. Andererseits bringt die spezifische Kalibrierung auf Hochwasserverhältnisse immer eine Abminderung des NSE-Gütemasses mit sich. Die mit PEST kalibrierten Modelle zeigen im Vergleich zu den Modellen mit den zufällig erstellten Parametersätzen sehr gute Werte, erzielen jedoch keine optimalen Werte bei den Hochwassergütemassen.

Für das Teileinzugsgebiet Allenbach-Adelboden wurde für die weiteren Auswertungen ein Modell gewählt, dessen Parameter mit GLUE zufällig zusammengestellt wurde.

## 6.6 Fazit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde für die Kalibrierung des hydrologischen Modells PREVAH eine Methode gewählt, welche drei verschiedene Ansätze kombiniert. Der Vorteil dieser Kalibrierungsmethode liegt darin, dass relativ einfach abgeschätzt werden kann, welches Kalibrierungsverfahren die optimalen Parametersätze liefert bzw. ob für das Modell grundsätzlich noch besser geeignete Parametersätze existieren.

Aus den beiden dargestellten Beispielen wird ersichtlich, dass sich für die Bestimmung von optimalen Modellparametern verschiedene Methoden bewährt haben. Anhand der in der vorliegenden Arbeit gemachten Erfahrungen geht hervor, dass sich keine Methode finden lässt, welche für alle kalibrierten Einzugsgebiete die besten Resultate liefert. Es empfiehlt sich deshalb für die optimale Kalibrierung immer **mehrere und methodisch verschiedene Ansätze in Kombination und im direkten Vergleich anzuwenden**.

So kann z.B. mit dem in PREVAH integrierten Kalibrierungsalgorithmus nur für das Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen ein optimaler Parametersatz erzielt werden, mit welchem sowohl die Mittelwie auch die Hochwasserverhältnisse in guter Qualität modelliert werden können. Daneben zeigt sich, dass für das Teileinzugsgebiet Allenbach-Adelboden ausschliesslich die zufällige Parameterwahl mit GLUE zu guten Modellierungsergebnissen geführt hat. Auch anhand der Kalibrierung mit PEST konnten für beide Teileinzugsgebiete sehr gute Werte für das NSE-Gütemass erzielt werden, was auf einen effizienten Algorithmus hinweist, welcher dieser Methode zu Grunde liegt. Allerdings war es für diese beiden Beispiele nicht möglich, mit den bei dieser Methode gewählten Einstellungen bzw. mit den gewählten Zielgrössen ein optimales Hochwassermodell zu kalibrieren. Es bietet sich deshalb an, für eine Kalibrierung mit PEST andere Zielgrössen zu berücksichtigen oder eine andere Gewichtung der Kriterien zu wählen (z.B. nur Hochwasserphasen oder ausschliesslich Hochwassergütemasse, vgl. Kapitel 6.2.4).

Für die Modelle mit den unter Anwendung verschiedener Ansätzen regionalisierten Modellparametern weist die Modellierungsqualität bezüglich den ausgewählten Gütemassen eine sehr grosse Streuung auf. Beide Teileinzugsgebiete lassen sich mit der verwendeten Regionalisierung in guter Qualität modellieren, was insbesondere anhand der Gütemasse für die definitive, mediane Ganglinie ersichtlich wird (vgl. Abbildung 6.4 und Abbildung 6.5) und damit die Ergebnisse von VIVROU (2007) bestätigt. Mit Hilfe der verschiedenen Kalibrierungsansätze lassen sich aber in beiden Fällen Modelle bestimmen, welche bessere Werte bei den verwendeten Gütemassen liefern. Da für die Teileinzugsgebiete ohne Abflussmessungen, für welche die Regionalisierung der Modellparameter primär angewendet wird, keine Beurteilung der Modellierungsqualität möglich ist, sind die Resultate aus der für die gemessenen Teileinzugsgebiete durchgeführten Beurteilung der Modellqualität von besonderem Interesse.



# Teil II

## **Die Hydrologie der Kander – gestern**

Entwicklung der klimatischen und  
hydrologischen Verhältnisse

## Übersicht Teil II

In diesem Teil wird die Veränderung der klimatischen und hochwasserhydrologischen Verhältnisse im Verlauf der letzten Jahrzehnte und Jahrhunderte beschrieben. Die Ergebnisse resultieren aus historischen Untersuchungen sowie aus Analysen von langen Messreihen:

- > **Kapitel 7: Historische Hochwasser der Kander** enthält die Resultate der historischen Untersuchung, in welcher die Schadensereignisse aus verschiedenen Quellen zusammengetragen und analysiert wurden. Die Ergebnisse für das Einzugsgebiet der Kander werden zudem in einen schweizweiten Kontext gestellt und mit den historischen Hochwasserchroniken anderer Einzugsgebiete und Regionen verglichen.
- > Die Veränderung der klimatischen Verhältnisse, welche aus langen und über 100 Jahre umfassenden Messreihen von Niederschlag und Temperatur abgeleitet wurden, wird in **Kapitel 8: Entwicklung klimatischer Verhältnisse** erläutert. In saisonaler Auflösung wurden verschiedene Parameter zu den mittleren Niederschlagsverhältnissen aber auch zum Starkniederschlagsgeschehen analysiert.
- > In **Kapitel 9: Entwicklung der Abflussverhältnisse** werden die Veränderungen bei den mittleren Abflussverhältnissen sowie bei den seltenen Hochwasserabflüssen aufgeführt. Analog zu Kapitel 8 wurden die im Einzugsgebiet vorliegenden langen Abflussmessreihen in saisonaler Differenzierung ausgewertet und auf Trend untersucht.
- > Die Gegenüberstellung der Veränderungen, welche bei den klimatischen und hydrologischen Verhältnissen während dem letzten Jahrhundert registriert wurden, ist in **Kapitel 10: Vergleich der Entwicklung von Niederschlag und Abfluss** enthalten. Bei diesem Vergleich werden die Gemeinsamkeiten und Unterschiede bei der Entwicklung der klimatischen und hydrologischen Kenngrößen untersucht.
- > In **Kapitel 11: Modellierung von langen Abflussreihen** werden die Resultate der hydrologischen Modellierung vorgestellt, welche unter Anwendung der langen meteorologischen Messreihen durchgeführt wurden. Mit dieser Modellierung konnte die raumzeitlichen Information zum Hochwassergeschehen im Untersuchungsraum erweitert werden.
- > Das zusammenfassende **Kapitel 12: Synthese – Teil II** führt die wesentlichen Resultate und Erkenntnisse aus Teil II der vorliegenden Arbeit zusammen.



## 7 Historische Hochwasser der Kander

Dieses Kapitel enthält die Resultate zu den Untersuchungen der historischen Hochwasser im Einzugsgebiet der Kander. Nach der Beschreibung der Ausgangslage in Kapitel 7.1 werden in Kapitel 7.2 die von BÜTSCHI (2008) verwendeten Methoden erläutert. Kapitel 7.3 enthält die Resultate der historischen Untersuchungen. Zudem wird in diesem Kapitel anhand langer Messreihen die Entwicklung der Jahreshochwasser im Einzugsgebiet Kander-Hondrich mit der Entwicklung in benachbarten Einzugsgebieten verglichen. Das abschliessende Fazit in Kapitel 7.4 fasst die wichtigsten Ergebnisse dieses Kapitels zusammen.

### 7.1 Ausgangslage

Die extremen Hochwasserereignisse, welche in den letzten 10 Jahren in der Schweiz und im Einzugsgebiet der Kander aufgetreten sind, werfen die Frage auf, ob es sich dabei um einmalige Ausreisser oder um hydrologische Phänomene handelt, die in unbestimmten Abständen immer wieder auftreten können. Zur Beantwortung dieser Frage hat BÜTSCHI (2008) im Rahmen seiner Diplomarbeit für die letzten fünfhundert Jahre die historisch nachweisbaren Schadensereignisse im Einzugsgebiet der Kander zusammengetragen und analysiert.

Eine zuverlässige quantitative Beurteilung bzw. Rekonstruktion extremer Hochwasserereignisse ist grundsätzlich an die Verfügbarkeit von hydrologischen und/oder meteorologischen Messdaten gebunden. Wie aber bereits in Kapitel 3.1 erwähnt wurde, beschränkt sich diese Datengrundlage für das Einzugsgebiet der Kander ausschliesslich auf den Zeitraum ab 1900. Für eine Erweiterung der Informationen zu den extremen bzw. seltenen Hochwasserabflüssen müssen deshalb in erster Linie qualitative Informationen aus historischen Aufzeichnungen beigezogen werden (BAFU, WSL 2008). Ziel dieser Datenerweiterung ist es, das Erfahrungsspektrum, welches aus den Messdaten abgeleitet werden kann, zu erweitern und damit breiter abgestützte Aussagen zur statistischen Einordnung der extremen Ereignisse zu ermöglichen. Daneben können historische Extremereignisse auch wertvolle Hinweise bei der Ausscheidung von potenziellen Gefahrenbereichen geben und zur robusten Abschätzung der Wiederkehrperiode der gefährlichen Prozesse beitragen (GEES 1997, BUWAL 2002).

### 7.2 Methode

BÜTSCHI (2008) konnte mit seiner Arbeit, welche auf der Auswertung von Angaben zu Schäden an privatem und öffentlichem Eigentum in verschiedenen historischen Schriftquellen basiert, die Information zum Hochwassergeschehen im Untersuchungsgebiet deutlich erweitern. Eine Übersicht zu den geeigneten und auch im Rahmen der Untersuchung von BÜTSCHI (2008) verwendeten Datenquellen geben z.B. HÄCHLER (1991) oder STUCKI & LUTERBACHER (2010). Es ist zu beachten, dass in diesen Datengrundlagen nur diejenigen Ereignisse aufgeführt werden, die in der Gesellschaft auf Resonanz gestossen sind und welche die anthropogene Nutzung bzw. die tägliche Routine der Gesellschaft gestört oder beeinträchtigt haben (LUHMANN 1990). Da die Region des untersuchten Einzugsgebietes lange Zeit nur äusserst dünn besiedelt war, ist insbesondere für den Zeitraum vor 1600 die

Datenlage sehr spärlich. Die von BÜTSCHI (2008) beobachtete Zunahme der Hochwasser- und Schadensereignisse im 19. und 20. Jahrhundert ist deshalb auch direkt mit der gesteigerten Verfügbarkeit der Grundlagendaten in Verbindung zu bringen. Dies gilt insbesondere für den Zeitraum ab ca. 1890, als die grossräumigen Korrektionsarbeiten an der Kander eingesetzt haben und die mit Schäden verbundenen Ereignisse von der Bevölkerung eher wahrgenommen wurden.

Zur Klassierung der in den verschiedenen Datenquellen erwähnten **Schadensereignisse** hat BÜTSCHI (2008) die Kriterien nach HÄCHLER & PFISTER (1991) verwendet, welche einerseits das Schadensausmass und andererseits die räumliche Ausdehnung der Ereignisse berücksichtigen (vgl. Tabelle 7.1 und Abbildung 7.1).

Während Tabelle 7.1 die Beurteilung des Schadensausmasses ermöglicht, ist in Abbildung 7.1 die Klassierung der Schadensereignisse als Kombinationsmatrix aus Schadensausmass und räumlicher Ausdehnung aufgeführt. In Abbildung 7.1 ist hinter der qualitativen Klassierung («leicht» bis «katastrophal») in Klammer zudem auch die Länge der Balken, welche in Abbildung 7.2 dargestellt sind, angegeben. Ein leichtes Schadensereignis ist demnach auf eine Gemeinde beschränkt, brachte ein geringfügiges Schadensausmass mit sich und wird in Abbildung 7.2 mit einem kurzen Balken in die Schadenschronik eingetragen.

Tabelle 7.1: Beurteilung des Schadensausmasses (nach HÄCHLER & PFISTER 1991)

Schadensausmass	Merkmal
Geringfügig	Ereignis kann durch den Einsatz vorhandener Ressourcen der betroffenen Haushalte in kurzer Zeit wettgemacht werden.
Beträchtlich	Ereignis zog Kulturen und Infrastrukturanlagen länger und stärker in Mitleidenschaft, die Beseitigung nahm erhebliche Ressourcen in Anspruch.
Gross	Zerstörung von einzelnen lebenswichtigen Infrastrukturanlagen (Häuser, Strassen, Brücken), die aber durch die Solidaritätsnetze der einzelnen Gemeinden wiederhergestellt werden konnten.
Sehr gross	Vorübergehender Zusammenbruch der Versorgung mit lebenswichtigen Gütern und Dienstleistungen. Die lokale Bevölkerung konnte die Schäden mit eigenen Mitteln nicht beheben und war auf Spenden im Rahmen von überregionalen Solidaritätsnetzen angewiesen.

		Räumliche Ausdehnung	
		Eine Gemeinde	Mehr als eine Gemeinde
Schadensausmass	Geringfügig	leichtes Ereignis (1)	mittelschweres Ereignis (2)
	Beträchtlich	mittelschweres Ereignis (2)	schweres Ereignis (3)
	Gross	schweres Ereignis (3)	sehr schweres Ereignis (4)
	Sehr gross	sehr schweres Ereignis (4)	katastrophales Ereignis (5)

Abbildung 7.1: Kombinationsmatrix zur Bestimmung der Schadensklasse eines Ereignisses auf Grund des Schadensausmasses und der räumlichen Ausdehnung (verändert nach HÄCHLER & PFISTER 1991). Die in Klammern gesetzte Zahl hinter der Klassierung entspricht der Länge des Balkens in Abbildung 7.2.

## 7.3 Resultate

Die Resultate der Untersuchung von BÜTSCHI (2008) sind in Abbildung 7.2 c enthalten. Daneben sind in dieser Darstellung auch die Ergebnisse aus anderen historischen Untersuchungen aufgeführt und ermöglichen den regionalen und schweizweiten Vergleich bezüglich historischer Hochwasser. Während die Untersuchungen von PFISTER (1999) verschiedene grössere Einzugsgebiete bzw. Regionen abdecken (Wallis, Uri/Glarus, Graubünden, Tessin; Abbildung 7.2 a), hat HÜGLI (2007) in seinen Arbeiten das Einzugsgebiet der Aare bis Thun untersucht (Abbildung 7.2 b). Die verschiedenen Resultate sind gut miteinander vergleichbar, da bei allen die gleiche Methode zur Klassierung der Schadensereignisse verwendet wurde. Jedoch wurden bei den Resultaten von PFISTER (1999) und HÜGLI (2007) die Schadensereignisse auf zwei Klassen reduziert, wogegen bei den Ergebnissen von BÜTSCHI (2008) die fünf Klassen umfassende Skala beibehalten wurde.

Aus Abbildung 7.2 wird ersichtlich, dass in der Schweiz seit 1500 mehrere Phasen mit verstärkter bzw. abgeschwächter Hochwasserhäufigkeit zu beobachten sind, welche sich in verschiedenen Regionen nachweisen lassen. Gemäss PFISTER (1999) können die folgenden Perioden unterschieden werden:

### Phasen mit abgeschwächter Hochwasserhäufigkeit:

- > 1641 bis 1706
- > 1927 bis 1975

### Phasen mit verstärkter Hochwasserhäufigkeit:

- > 1550 bis 1580
- > 1825 bis 1875
- > ab 1987

Die Perioden mit verstärkter Hochwasserhäufigkeit von 1825 bis 1875 bzw. ab 1987 lassen sich im Einzugsgebiet der Kander ansatzweise erkennen. So fallen drei der fünf von BÜTSCHI (2008) als katastrophal klassierten Hochwasserereignisse an der Kander (1678, 1692, 1830, 1831, 2005) in die Zeiträume mit starken und häufig auftretenden Hochwasserereignissen. Die Phase mit schwacher Hochwasserhäufigkeit im 20. Jahrhundert (1927 bis 1975) ist für die Kander ebenfalls erkennbar; sie wird von PFISTER (2009) als Phänomen beschrieben, welches schweizweit bereits ab 1882 einsetzt und auch als «Katastrophenlücke» bzw. als «**Disaster Gap**» bezeichnet wird. Im Untersuchungsgebiet traten in der Phase zwischen 1950 und 2004 keine schweren bis katastrophalen Ereignisse auf. Weiter sind im Zeitraum zwischen 1710 und 1827 ebenfalls keine sehr schweren oder katastrophalen Schadensereignisse im Einzugsgebiet der Kander zu beobachten; diese Angaben sind aber auf Grund der schwachen Datenlage mit Vorsicht zu interpretieren.

In Abbildung 7.3 sind anhand **langer Abflussmessreihen**, welche im Berner Oberland seit 1900 verfügbar sind, die gemessenen Jahreshochwasser von Kander-Hondrich (a), Kander-Kandersteg (b) sowie der Einzugsgebiete dargestellt, welche direkt an das Einzugsgebiet Kander-Hondrich angrenzen (Simme-Oberwil (c) und Lütschine-Gsteig (d)). Da es sich hierbei um gemessene Daten handelt, sind diese Zeitreihen nicht direkt mit den interpretierten und kategorisierten Auswertungen zu den Schadensereignissen von BÜTSCHI (2008) vergleichbar.

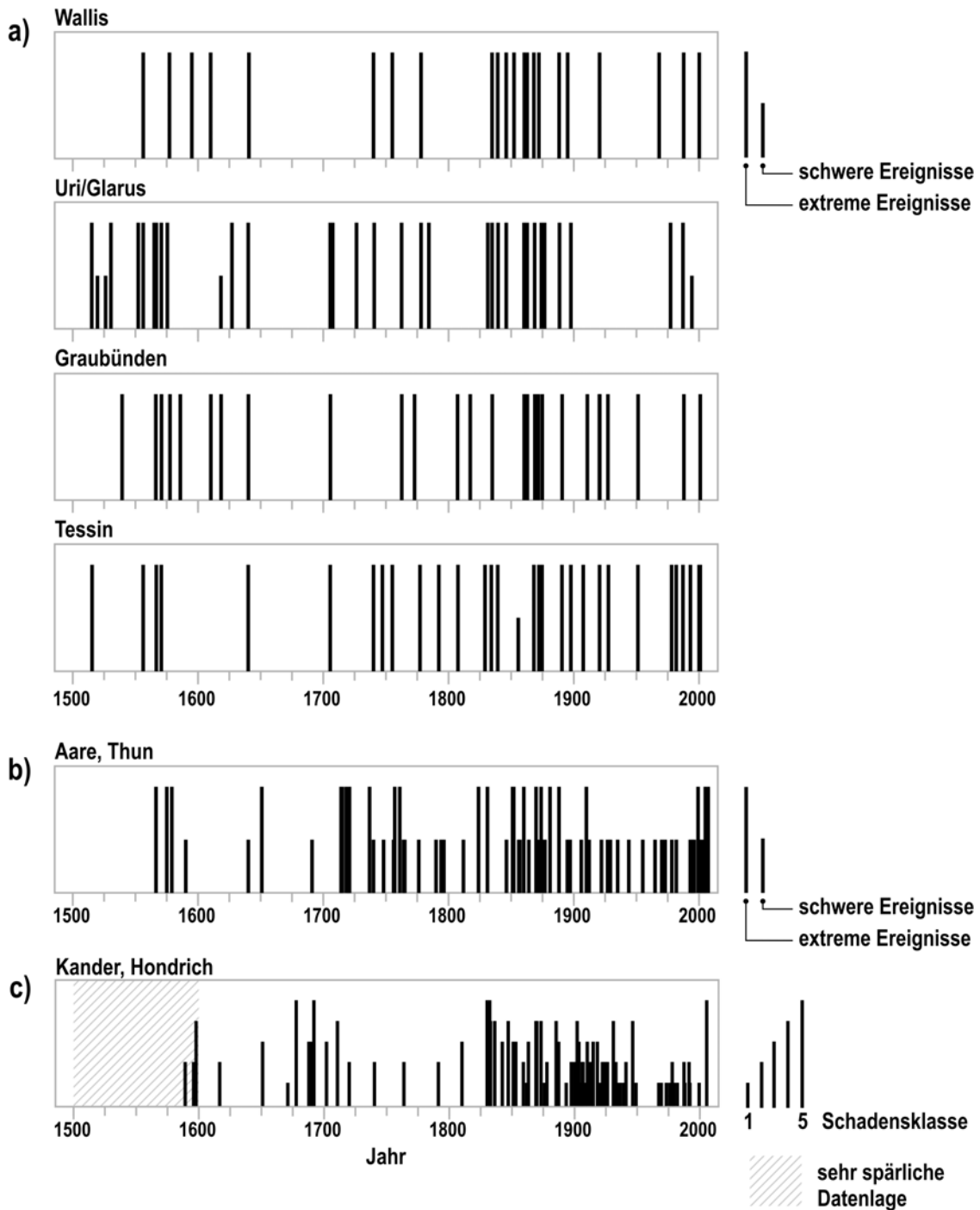


Abbildung 7.2: Hochwasser- bzw. Schadenschronik für verschiedene Einzugsgebiete der Schweiz und für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich (Daten: PFISTER 1999 (a), HÜGLI 2007 (b), BÜTSCHI 2008 (c)). Die Schadensereignisse wurden nach HÄCHLER & PFISTER 1999 in zwei (a und b) bzw. in fünf Klassen (c) eingeteilt (vgl. Abbildung 7.1).

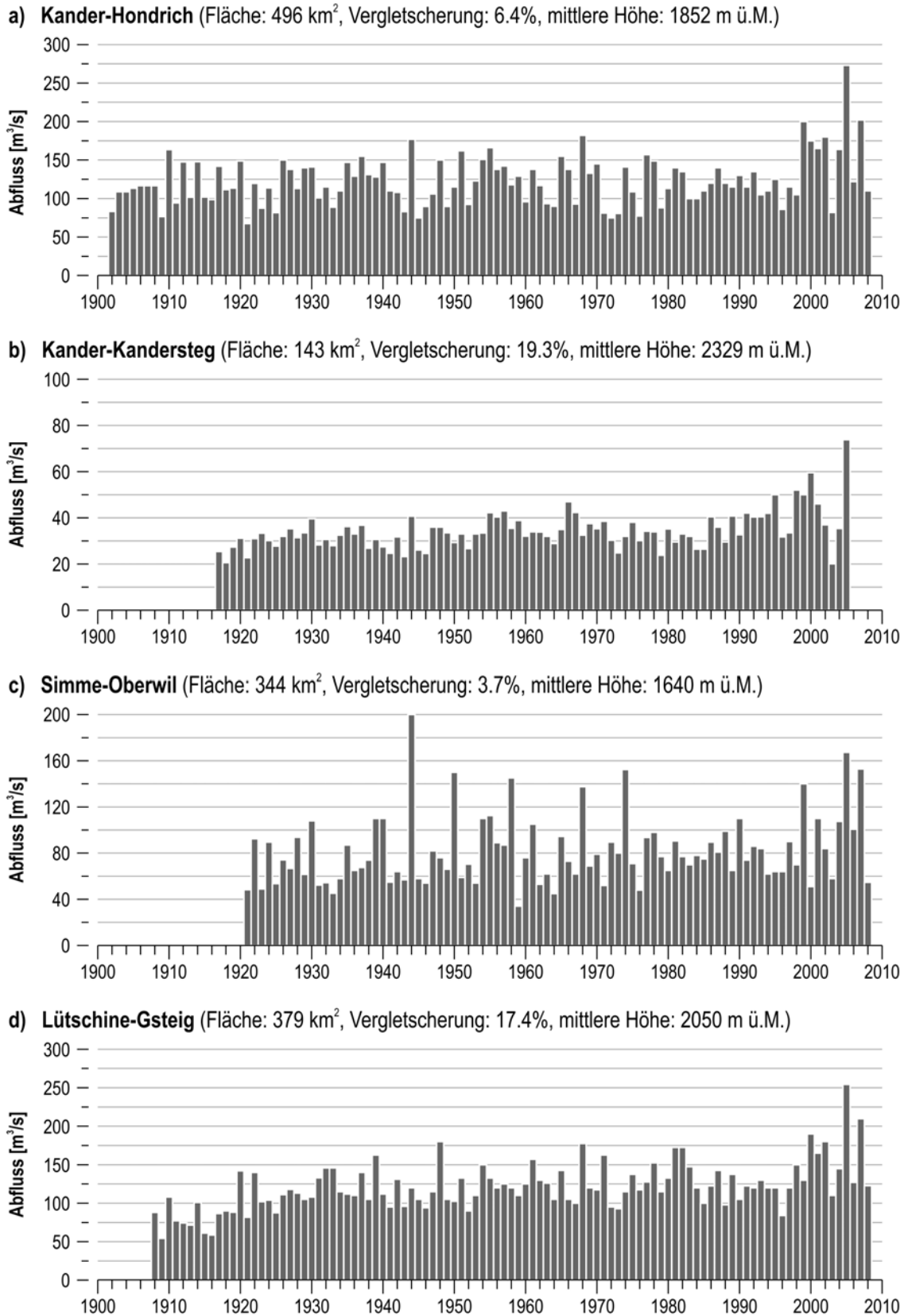


Abbildung 7.3: Lange Messreihen der Jahreshochwasser für grosse Einzugsgebiete im Berner Oberland (Abflussspitzenwerte; a: Kander-Hondrich, b: Kander-Kandersteg, c: Simme-Oberwil, d: Lütschine-Gsteig. Daten: BAFU 2009b (a, c und d)).

Aus dem Vergleich der verschiedenen Messreihen in Abbildung 7.3 wird ersichtlich, dass das Muster des Hochwassergeschehens von Kander-Hondrich sowohl im Einzugsgebiet (Kander-Kandersteg) wie auch in der näheren Region beobachtet werden kann: Während die Hochwasserabflüsse im Verlauf des 20. Jahrhunderts immer in der gleichen Grössenordnung ausfielen, treten die grössten jährlichen Hochwasserabflüsse bei den meisten Messreihen am Ende bzw. ab 1999 auf. Für das Einzugsgebiet Simme-Oberwil konnten aber auch im Zeitraum von 1944 bis 1975 extreme Jahreshochwasser beobachtet werden. Bei diesem Einzugsgebiet treten gegenüber den anderen Messreihen die grössten Unterschiede bei der Entwicklung der Jahreshochwasser auf.

## 7.4 Fazit

Die wesentlichsten Erkenntnisse aus Abbildung 7.2 und Abbildung 7.3 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- > Die Hochwasserhäufigkeit unterliegt sowohl im Einzugsgebiet der Kander wie auch im Einzugsgebiet der Aare und in verschiedenen Regionen der Schweiz **natürlichen Schwankungen**. Die Quantifizierung der Hochwasserabflüsse vor 1900 ist auf Grund fehlender Messungen mit grossem Aufwand aber auch mit grösserer Unsicherheit verbunden.
- > Während in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts bis 1987 keine grösseren Hochwasser aufgetreten sind, kann für die letzten Jahre ein **Trend zu grösseren Hochwasserereignissen** erkannt werden. Hinweise auf grosse Hochwasserereignisse an der Kander gibt es zudem für die Periode zwischen 1825 und 1875, welche gesamtschweizerisch ebenfalls zu den Phasen mit verstärkten Hochwasserabflüssen zählt.
- > Sowohl für die Kander als auch für die Aare-Thun lassen sich auch grosse bis extreme Hochwasser in Phasen nachweisen, welche gesamtschweizerisch als eher hochwasserarm gelten (z.B. 1641-1706). Dadurch wird das **individuelle Muster** der Hochwasserhäufigkeit der Einzugsgebiete erkennbar, welches in einer überregionalen Auswertung nicht zwingend erkannt werden muss.
- > Die Entwicklung der **Jahreshochwasser** im Einzugsgebiet Kander-Hondrich während dem 20. Jahrhundert, welche aus den langen Messreihen ersichtlich wird, lässt sich mit derjenigen benachbarter Einzugsgebiete vergleichen. Die grössten gemessenen Jahreshochwasser treten verbreitet ab 1999 auf. Abweichungen sind im Berner Oberland aber auch zu beobachten (z.B. Einzugsgebiet Simme-Oberwil).

Diese Ergebnisse werden durch die Resultate aus anderen Untersuchungen bestätigt. So weisen z.B. auch SCHMOCKER-FACKEL & NAEF (2010A, 2010B) in ihren Arbeiten darauf hin, dass die Häufigkeit der grossen Hochwasser in den letzten Jahrzehnten deutlich verstärkt auftritt und dass in der Schweiz natürliche Schwankungen der Hochwasserhäufigkeit beobachtet werden können. Auch die Resultate von SCHULTE ET AL. (2009) aus den Analysen der Schwemmfächersedimente der Lütchine zeigen, dass katastrophale Hochwasserabflüsse im Berner Oberland in den letzten 2400 Jahren und im Abstand von 300 bis 600 Jahren immer wieder aufgetreten sind.

## 8 Entwicklung klimatischer Verhältnisse

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Entwicklung der klimatischen Verhältnisse im untersuchten Einzugsgebiet bzw. im Berner Oberland seit 1900 enthalten. Nachdem in Kapitel 8.1 die Ausgangslage der durchgeführten Untersuchungen beschrieben wird, werden in Kapitel 8.2 die verwendeten Daten, in Kapitel 8.3 die untersuchten Parameter und in Kapitel 8.4 die Methoden vorgestellt. Die Resultate zur Entwicklung der Niederschläge im Berner Oberland sind in Kapitel 8.5 und diejenigen zur Entwicklung im Einzugsgebiet der Kander in Kapitel 8.6 enthalten. Während Kapitel 8.7 die Veränderungen bei den extremen Starkniederschlägen beleuchtet, enthält Kapitel 8.8 die Resultate zur Entwicklung der Temperatur. Das Kapitel wird mit einem Fazit (Kapitel 8.9) abgeschlossen.

### 8.1 Ausgangslage

GAMMETER (2008) hat im Rahmen seiner Diplomarbeit die Entwicklung der Niederschlags- und Temperaturverhältnisse im Berner Oberland und im untersuchten Einzugsgebiet der Kander anhand von langen Messreihen für den Zeitraum seit 1900 untersucht. Folgende **Ziele** standen bei dieser Arbeit im Vordergrund:

- > Anhand der langen Messreihen von Niederschlag und Temperatur soll die Entwicklung verschiedener klimatischer und (hochwasser-)hydrologisch relevanter Grössen im letzten Jahrhundert aufgezeigt werden.
- > Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, die aktuellen Verhältnisse in den historischen Kontext einzuordnen und daraus einen Trend für die zukünftige Entwicklung in den nächsten Jahren bzw. Jahrzehnten abzuleiten.
- > Die Resultate sollen mit den Ergebnissen aus anderen Arbeiten verglichen werden. Damit kann überprüft werden, ob die Entwicklung mit den gesamtschweizerischen Untersuchungen in Verbindung gebracht werden kann, oder ob im Berner Oberland bzw. im Einzugsgebiet der Kander ein deutlich anderes, lokales Muster zu erkennen ist.

### 8.2 Daten

Zur Durchführung einer räumlich breit abgedeckten Untersuchung, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit mehrere lange Datenreihen aus den Publikationen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA 1901-1997, SMA 1998-2008) digitalisiert (vgl. Kapitel 3.1). Die zeitliche Auflösung der verwendeten Messreihen beschränkt sich auf Tagesmittelwerte für die Temperatur bzw. auf Tagessummen beim Niederschlag. Dies entspricht normalerweise der höchsten verfügbaren zeitlichen Auflösung für den Zeitraum vor 1980. Auf die Homogenisierung der Datenreihen wurde, wie in anderen vergleichbaren Arbeiten auch (z.B. SCHMIDLI & FREI 2005), verzichtet. Die fehlenden Werte und die unverteilten Summen wurden mit Hilfe der Informationen aus den an benachbarten Stationen gemessenen Daten korrigiert (vgl. Kapitel 3.1).

- > **Niederschlag:** Die Auswertungen von GAMMETER (2008) wurden für **19 lange Niederschlagsreihen** (Abbildung 8.1), welche jeweils einen Zeitraum von mehr als 85 Jahren umfassen, durchgeführt. Dadurch wird die Beurteilung der langfristigen Veränderungen der Niederschlagsverhältnisse ermöglicht. Eine Übersicht über die Verfügbarkeit und zeitliche Auflösung der verwendeten Daten ist Kapitel 3.1 zu entnehmen (vgl. Abbildung 3.4).

Aus Abbildung 8.1 wird ersichtlich, dass die Region um das untersuchte Einzugsgebiet durch ein relativ dichtes und räumlich homogen verteiltes Messnetz abgedeckt ist. Mit den langen Messreihen der Stationen Adelboden, Frutigen, Kandersteg und Kiental sind zudem vier Datenreihen vorhanden, welche die Veränderungen der Niederschlagsverhältnisse im Einzugsgebiet der Kander bzw. in deren Teileinzugsgebieten seit 1900 aufzeigen. Wie aus Abbildung 8.1 auch hervorgeht, liegen die verschiedenen Messstationen alle in derselben Klimaregion «westlicher Alpennordhang» nach SCHÜEPP & GENSLER (1980).

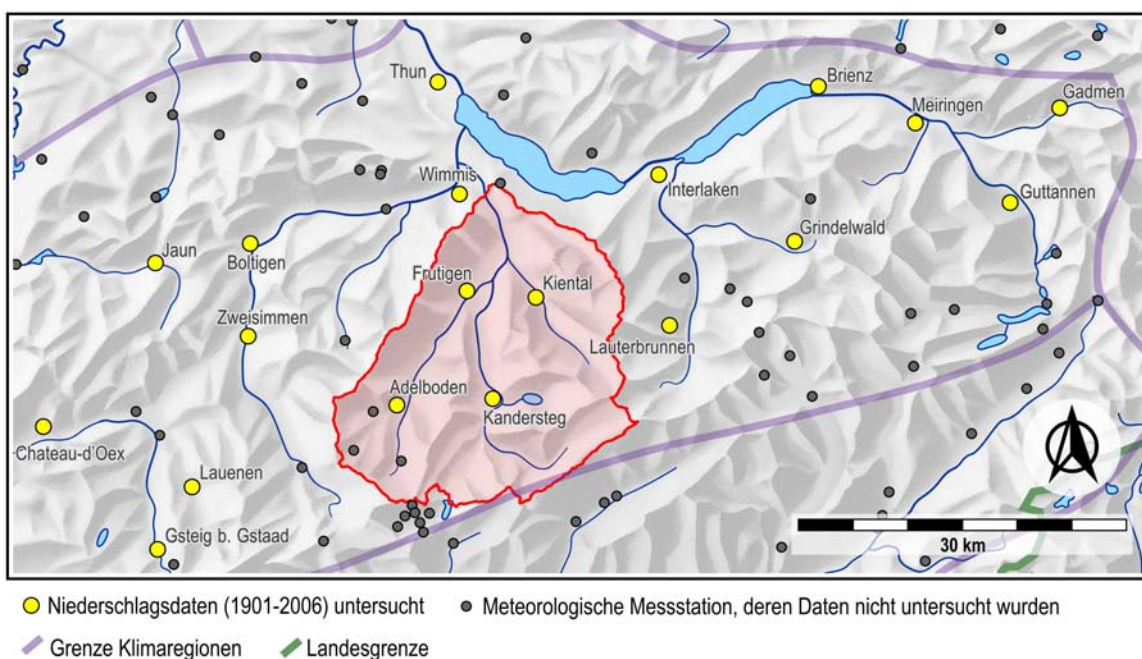


Abbildung 8.1: Untersuchte Niederschlagsdaten und verfügbare meteorologische Messstationen im Berner Oberland (Übersichtskarte: SWISSTOPO 2007)

- > **Temperatur:** Die Temperaturverhältnisse der letzten 100 Jahre wurden anhand der beiden langen Messreihen von **Château-d'Oex und Engelberg** untersucht. Diese beiden Messreihen bestehen aus homogenisierten Monatsmittelwerten der Temperatur (vgl. BEGERT ET AL. 2003). Während die Station Château-d'Oex in der gleichen Klimaregion nach SCHÜEPP & GENSLER (1980) wie das Untersuchungsgebiet liegt, befindet sich Engelberg in der nordöstlich angrenzenden Klimaregion («zentraler Alpennordhang») und ist deshalb in Abbildung 8.1 nicht mehr enthalten. Da bei der Temperatur davon ausgegangen werden kann, dass die räumliche und zeitliche Variation weniger stark ausgeprägt ist als beim Niederschlag, beschränken sich die Auswertungen auf die langen Reihen dieser beiden Stationen.



## 8.3 Untersuchte klimatische Parameter

### 8.3.1 Parameter des Niederschlags

Die Messreihen der täglichen Niederschlagssummen wurden bezüglich verschiedener Parameter ausgewertet (z.B. «Maximale Dreitagessumme des Niederschlags pro Jahreszeit») und anschließend, wie in Kapitel 8.4 beschrieben, auf Trend untersucht oder extremwertstatistisch ausgewertet. Die Auswahl der Parameter orientiert sich an den Untersuchungen von SCHMIDLI & FREI (2005) bzw. an den Vorschlägen von NICHOLS & MURRAY (1999). Die Auswertungen wurden für die vier Jahreszeiten durchgeführt:

- > **Winter:** Dezember bis Februar
- > **Frühling:** März bis Mai
- > **Sommer:** Juni bis August
- > **Herbst:** September bis November

Im Folgenden werden die sechs von GAMMETER (2008) analysierten Parameter erläutert, welche in der vorliegenden Arbeit ausführlicher behandelt werden:

- > **Saisonale Niederschlagssumme (NSum):** Die täglichen Niederschlagssummen wurden zu saisonalen Niederschlagssummen zusammengefasst.
- > **Mittlere Dauer der Niederschlagsereignisse (NEMD):** Als Dauer eines Niederschlagsereignisses gilt die Anzahl direkt aufeinander folgender Niederschlagstage, welche eine Niederschlagssumme von mehr als 1 mm aufweisen.
- > **Intensität der täglichen Niederschlagsmenge (NInt):** Aus der saisonalen Niederschlagssumme und der Anzahl Niederschlagstage pro Jahreszeit (Tag mit mehr als 1 mm Niederschlag) wurde die Niederschlagsmenge pro Niederschlagstag bzw. die Intensität der täglichen Niederschlagsmenge (NInt) abgeleitet.
- > **95%-Quantil der täglichen Niederschlagsmengen (NQ95):** Für jede Jahreszeit wurde das empirische 95%-Quantil aus den entsprechenden Tagessummen berechnet. Die Empfehlung verschiedener Autoren (z.B. BRIDGES & HAAN 1972, NICHOLS & MURRAY 1999, BRUNETTI ET AL. 2001A, 2001B), die Quantile aus einer den Niederschlagsdaten angepassten Gammaverteilung abzuleiten, wurde in den Untersuchungen von GAMMETER (2008) nicht aufgenommen. Dies deshalb, weil in vergleichbaren Arbeiten (z.B. WIDMANN & SCHÄR 1997, SCHMIDLI ET AL. 2002, SCHMIDLI & FREI 2005) ebenfalls auf dieses Vorgehen verzichtet wurde. Zudem wurden für verschiedene Stationen beim Versuch, die Gammaverteilung an die Daten anzupassen, teilweise unplausible Resultate erzielt.
- > **Anzahl Niederschlagstage über dem 95%-Quantil (NQ95Anz):** Wie von NICHOLS & MURRAY (1999) vorgeschlagen, wurden die saisonalen bzw. jährlichen Grenzwerte als 95%-Quantil für jede Station aus den Niederschlagsdaten der Jahre 1961 bis 1990 empirisch bestimmt. Somit wurde dieser Grenzwert für jede Station separat und nicht wie in anderen Untersuchungen generell für das ganze Untersuchungsgebiet bzw. für alle Stationen festgelegt (z.B. COURVOISIER 1998).

- > **Maximale Dreitagessumme des Niederschlags (NMax3d):** Die täglichen Niederschlagssummen wurden über ein gleitendes Fenster von drei Tagen zu Mehrtagessummen zusammengefasst. Anschliessend wurden für diese Dreitagessummen die grössten Werte pro Saison und pro Monat extrahiert.

Während die drei Parameter «Saisonale Niederschlagssumme», «Mittlere Dauer der Niederschlagsereignisse» und «Intensität der täglichen Niederschlagsmenge» die **mittleren Niederschlagsverhältnisse** beschreiben, geben die drei anderen Parameter «95%-Quantil der täglichen Niederschlagsmengen», «Anzahl Niederschlagstage über dem 95%-Quantil» sowie «Maximale Dreitagessumme des Niederschlags» einen Hinweis auf die Veränderung der **Starkniederschläge**.

Neben diesen sechs Parametern, welche auf Trend untersucht wurden, wurde die kontinuierliche zeitliche Entwicklung der Starkniederschläge unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperiode im Einzugsgebiet Kander-Hondrich während den letzten 100 Jahren untersucht (vgl. Kapitel 8.7).

### 8.3.2 Parameter der Temperatur

Für die Analyse der Entwicklung der Temperatur wurden ausschliesslich die **saisonalen Mittelwerte (MT)** verwendet, welche mit den in Kapitel 8.4 aufgeführten Methoden auf Trend untersucht wurden.

## 8.4 Methoden

Die aus den langen Niederschlags- und Temperaturreihen abgeleiteten Parameter (vgl. Kapitel 8.3) wurden mittels Trendanalysen für stetige und diskrete Variablen untersucht. Die Niederschlagsdaten wurden zudem extremwertstatistisch ausgewertet:

- > **Trendanalysen stetiger Variablen:** Die untersuchten stetigen Variablen, wurden mit Hilfe des zweiseitigen, nichtparametrischen Trendtests nach Mann-Kendall (vgl. MANN 1945, KENDALL 1970) untersucht. Dieser Test wurde in zahlreichen vergleichbaren Untersuchungen (z.B. WIDMANN & SCHÄR 1997, PILON & YOU 2002, BIRSAN ET AL. 2005, SCHMIDLI & FREI 2005) eingesetzt. Das Verfahren ist für Niederschlagsdaten deshalb geeignet, weil die Grundgesamtheit der untersuchten Daten keine spezifische Verteilung aufweisen muss. Die Steigung der Trendgeraden wurde in den hier aufgeführten Untersuchungen mit dem Ansatz nach Theil-Sen (vgl. THEIL 1950, SEN 1968) berechnet. Diese Methode hat sich gegenüber Ausreissern als besonders robust erwiesen und ist gut geeignet für die Beurteilung linearer Trends auch nicht normalverteilter Daten (vgl. z.B. BIRSAN ET AL. 2005).
- > **Trendanalysen diskreter Variablen:** Die Trendanalysen für Parameter mit diskretem Wertebereich (z.B. Zählraten wie «Anzahl Überschreitungen pro Jahr von einem vorgegebenen Quantil»), wurden mittels logistischer Regression durchgeführt. Der gewählte Ansatz folgt dem von SCHMIDLI & FREI (2005) verwendeten.
- > **Extremwertstatistik:** In Anlehnung an GEIGER ET AL. (1991) wurden die verschiedenen Datenreihen, bestehend aus saisonalen und jährlichen Höchstwerten unterschiedlicher Niederschlagsdauer, mit Hilfe der Allgemeinen Extremwertverteilung (AEV) extremwertstatistisch ausgewertet. Die Parameter der Verteilung wurden unter Anwendung der Maximum-Likelihood-Methode geschätzt (vgl. COLES 2001). Auf die Anwendung der Allgemeinen Extremwertverteilung (AEV) wird vertieft auch in Kapitel 20.2.6 eingegangen.

## 8.5 Entwicklung der Niederschläge im Berner Oberland seit 1901

Zur Beurteilung der Entwicklung der **saisonalen klimatischen Verhältnisse** sowie der Entwicklung der **Starkniederschläge** wurden die sechs in Kapitel 8.3.1 aufgeführten Parameter verwendet. Die entsprechenden Resultate für die 19 untersuchten Datenreihen, welche den Zeitraum von 1901 bis 2006 abdecken, sind in Tabelle 8.1 für die Region des Berner Oberlands zusammengefasst.

Tabelle 8.1: Entwicklung der klimatischen Verhältnisse im Berner Oberland (1901-2006). Daten: 19 Messreihen (vgl. Abbildung 8.1).

Parameter		Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Mittlere Niederschläge	Saisonale Niederschlagssumme (NSum)	++	+	+	+
	Mittlere Dauer der Niederschlagsereignisse (NEMD)	+++	-	-	--
	Intensität der täglichen Niederschlagsmenge (NInt)	++	++	+	+
Starkniederschläge	95%-Quantil der täglichen Niederschlagsmengen (NQ95)	++	++	+++	+
	Anzahl Niederschlagstage über dem 95%-Quantil (NQ95Anz)	+	+	+++	+
	Maximale Dreitagessumme des Niederschlags (NMax3d)	+++	+	++	+

+ / - : mehr als 10 von 19 Stationen weisen einen positiven bzw. negativen **nicht signifikanten** Trend auf (Sig.niveau: 0.1), d.h. leichter positiver/negativer Trend

++ / -- : mehr als 10 von 19 Stationen weisen einen positiven bzw. negativen Trend auf, der bei mindestens 5 Stationen **signifikant** ist (Sig.niveau: 0.1), d.h. deutlicher positiver/negativer Trend

+++ / --- : mehr als 10 von 19 Stationen weisen einen positiven bzw. negativen **signifikanten** Trend auf (Sig.niveau: 0.1), d.h. starker positiver/negativer Trend

Aus der Übersicht in Tabelle 8.1 ergibt sich für die Entwicklung der sechs untersuchten Niederschlags-Parameter an den 19 Stationen im Berner Oberland seit 1901 folgendes Bild:

- > Im **Winter** ist sowohl ein Trend zu deutlich feuchteren Verhältnissen (NSum, NEMD, NInt) wie auch zu grösseren Starkniederschlägen (NQ95, NQ95Anz, NMax3d) zu beobachten. Sämtliche ausgewertete Parameter zeigen einen positiven Trend, der bei den meisten Stationen signifikant ist. Auch sind in dieser Jahreszeit die Trends bei der Intensität der täglichen Niederschlagsmenge (NInt) sowie bei der mittleren Dauer der Niederschlagsereignisse (NEMD) deutlich bzw. stark positiv.
- > Im **Frühling** ist die Entwicklung bei den meisten untersuchten Parametern weniger stark ausgeprägt. Neben der leichten Zunahme der saisonalen Niederschlagssumme (NSum) und dem leichten Rückgang bei der mittleren Dauer der Niederschlagsereignisse (NEMD) kann auch eine deutliche Intensivierung des Niederschlagsgeschehens (NInt) festgestellt werden. Die Parameter der Starkniederschläge (NQ95, NQ95Anz, NMax3d) weisen auf eine leichte bis deutliche Zunahme hin.

- > Bei der Entwicklung im **Sommer** sind im Berner Oberland in erster Linie verstärkte Starkniederschlagsverhältnisse zu beobachten. Sämtliche Parameter (NQ95, NQ95Anz und NMax3d) weisen auf eine deutliche bis starke Zunahme hin. Während bei der saisonalen Niederschlagssumme (NSum) und der Intensität der täglichen Niederschlagsmenge (NIInt) eine leichte Zunahme zu beobachten ist, tritt bei der mittleren Dauer der Niederschlagsereignisse (NEMD) eine leichte Reduktion auf.
- > Die meisten Parameter weisen im **Herbst** leicht positive Trends auf. Hingegen ist bei der mittleren Dauer der Niederschlagsereignisse (NEMD) ein deutlich negativer Trend zu beobachten.

GAMMETER (2008) hat diese Auswertungen zudem bezüglich des **räumlichen Musters** untersucht und festgestellt, dass im Berner Oberland ein Unterschied zwischen den westlich und den östlich gelegenen Stationen beobachtet werden kann. Während im östlichen Teil des Berner Oberlandes die Entwicklung der meisten Parameter weniger deutlich ausgeprägt ist, können im westlichen Teil – in welchem auch die Stationen im Einzugsgebiet der Kander liegen – stärker ausgeprägte Trends beobachtet werden. GAMMETER (2008) weist darauf hin, dass dies insbesondere im Winter und Sommer der Fall ist, dass aber in den beiden übrigen Jahreszeiten keine deutlichen räumlichen Unterschiede festgestellt werden können.

Die Resultate in Tabelle 8.1 stimmen gut mit den Resultaten aus anderen Untersuchungen überein: Wie auch in der vorliegenden Untersuchung, fanden bereits WIDMANN & SCHÄR (1997) für den Zeitraum zwischen 1901 und 1990 in den westlichen und nördlichen Teilen der Schweiz eine signifikante Zunahme der Niederschlagssumme im **Winter**. Zum gleichen Ergebnis kommen auch SCHMIDLI & FREI (2005) für den Zeitraum von 1901 bis 2000, welche in ihren Untersuchungen zudem eine Intensivierung der Niederschlagsereignisse für diese Jahreszeit festgestellt haben. Dies wird auch in den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit ersichtlich.

Ebenso lassen sich die im **Sommer** für das Berner Oberland gefundene Zunahme der saisonalen Niederschlagsmenge sowie die Hinweise auf eine Intensivierung bzw. die stark ausgeprägten Trends zu grösseren Starkniederschlägen in den Untersuchungen von SCHMIDLI & FREI (2005) grösstenteils wiederfinden. Allerdings sind die Trends, welche auf Basis der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Datenreihen berechnet wurden bei den Starkniederschlägen stärker ausgeprägt und signifikant. Dies kann durch den Einbezug der intensiven Niederschlagsereignisse der letzten Jahre erklärt werden.

Auch für die beiden anderen Jahreszeiten zeigen die Untersuchungen von SCHMIDLI & FREI (2005) vergleichbare Ergebnisse zu denjenigen der vorliegenden Arbeit, allerdings bestehen auch hier wieder leichte Unterschiede bei der Trendstärke bzw. bei der Signifikanz der berechneten Werte.

## 8.6 Entwicklung der Niederschläge im Einzugsgebiet Kander-Hondrich seit 1901

In Tabelle 8.2 sind die Resultate für die vier untersuchten Stationen im Einzugsgebiet der Kander zusammengestellt (Kandersteg, Frutigen, Adelboden, Kiental). Zum Vergleich mit der Entwicklung im Berner Oberland sind zudem auch die zusammengefassten Resultate aus der Auswertung aller 19 Stationen aufgeführt (vgl. Tabelle 8.1).

Tabelle 8.2: Relative Trends ausgewählter Niederschlagsparameter im Untersuchungsgebiet Kander-Hondrich sowie im Berner Oberland (vgl. Tabelle 8.1) für die Jahre 1901-2006. Blaue Zahlen: Positiver Trend, Rote Zahlen: Negativer Trend. Fett: Signifikanter Trend (\*: Sig.niveau = 0.1 / \*\*: Sig.niveau = 0.05 / \*\*\*: Sig.niveau = 0.01). Winter: Dezember bis Februar, Frühling: März bis Mai, Sommer: Juni bis August, Herbst: September bis November.

Parameter	Jahreszeit	Kandersteg	Frutigen	Adelboden	Kiental	Berner Oberland	
Mittlere Niederschlagsverhältnisse	NSum: Saisonale Niederschlags- summe [mm]	Winter	0.191	<b>0.308**</b>	<b>0.300**</b>	0.164	++
		Frühling	0.030	0.087	0.057	-0.043	+
		Sommer	0.102	0.102	<b>0.105*</b>	0.035	+
		Herbst	0.042	0.088	0.063	0.023	+
	NEMD: Mittlere Dauer der Nieder- schlagsereignisse [d]	Winter	0.138	0.176	0.157	<b>0.154*</b>	+++
		Frühling	-0.065	0.027	-0.021	0.034	-
		Sommer	-0.045	-0.022	-0.045	-0.051	-
		Herbst	-0.092	-0.068	-0.115	-0.173	--
	NIInt: Intensität der täglichen Niederschlagsmenge [mm/d]	Winter	<b>0.132*</b>	<b>0.156*</b>	<b>0.196*</b>	0.058	++
		Frühling	0.066	0.106	0.055	0.049	++
		Sommer	<b>0.120*</b>	0.075	<b>0.108**</b>	0.003	+
		Herbst	0.082	0.101	0.064	0.053	+
Starkniederschläge	NQ95: 95%-Quantil der täglichen Niederschlagsmengen [mm]	Winter	<b>0.211**</b>	0.177	<b>0.243**</b>	0.051	++
		Frühling	0.090	0.089	0.022	0.013	++
		Sommer	<b>0.129*</b>	<b>0.139***</b>	<b>0.151**</b>	0.078	+++
		Herbst	<b>0.167*</b>	0.143	0.088	0.080	+
	NQ95Anz: Anzahl Niederschlagstage über dem 95%-Quantil [-]	Winter	0.431	0.216	0.531	0.077	+
		Frühling	0.380	-0.074	-0.147	0.027	+
		Sommer	<b>0.575**</b>	<b>0.513**</b>	<b>0.412**</b>	0.208	+++
		Herbst	0.390	0.488	0.375	-0.103	+
	NMax3d: Maximale Dreitagessumme des Niederschlags [mm]	Winter	<b>0.245*</b>	<b>0.262*</b>	<b>0.484***</b>	0.167	+++
		Frühling	-0.008	0.034	-0.010	-0.050	+
		Sommer	<b>0.229***</b>	<b>0.149**</b>	<b>0.153*</b>	0.129	++
		Herbst	<b>0.153*</b>	0.141	<b>0.180*</b>	0.007	+

- + / - : mehr als 10 von 19 Stationen weisen einen positiven bzw. negativen **nicht signifikanten** Trend auf (Sig.niveau: 0.1), d.h. leichter positiver/negativer Trend
- ++ / -- : mehr als 10 von 19 Stationen weisen einen positiven bzw. negativen Trend auf, der bei mindestens 5 Stationen **signifikant** ist (Sig.niveau: 0.1), d.h. deutlicher positiver/negativer Trend
- +++ / --- : mehr als 10 von 19 Stationen weisen einen positiven bzw. negativen **signifikanten** Trend auf (Sig.niveau: 0.1), d.h. starker positiver/negativer Trend

In dieser Übersicht (Tabelle 8.2) sind jeweils die **relativen Trends** aufgeführt, welche wie folgt berechnet werden: Anhand der Trendgeraden, welche für jede Zeitreihe berechnet wird, wird die «absolute Veränderung» über den untersuchten Zeitraum bestimmt. Die «absolute Veränderung» stellt die Differenz zwischen dem Wert der Trendgeraden für das erste Jahr und demjenigen für das letzte Jahr dar. Daneben wird der «Mittelwert» der untersuchten Grösse über den gesamten untersuchten Zeitraum berechnet. Der relative Trend stellt schliesslich den prozentualen Anteil der «absoluten Veränderung» am «Mittelwert» der untersuchten Grösse dar (vgl. SCHMIDL & FREI 2005). Der Vorteil dieses Trendmasses liegt darin, dass die für die einzelnen Stationen berechneten Werte direkt miteinander verglichen werden können und nicht mehr vom absoluten Betrag der untersuchten Grösse abhängig sind, wie das beim absoluten Trend der Fall ist. In Tabelle 8.2 weisen blaue Zahlen auf einen positiven Trend und rote Zahlen auf einen negativen Trend hin. Fett hervorgehobene Trends sind signifikant.

Aus der Zusammenstellung in Tabelle 8.2 geht hervor, dass bei den Stationen im Untersuchungsgebiet mehrheitlich die gleichen Muster auftreten, wie im ganzen Berner Oberland. Sowohl der **Trend zu feuchteren Verhältnissen im Winter** (NSum, NEMD, NInt) als auch die **verstärkten Starkniederschläge im Sommer** (NQ95, NQ95Anz, NMax3d) sind für das Einzugsgebiet der Kander ebenfalls zu beobachten.

Bei ausführlicher Analyse werden jedoch die folgenden Abweichungen ersichtlich:

- > Die Zunahme der **mittleren Dauer der Niederschlagsereignisse (NEMD)** ist im Einzugsgebiet der Kander etwas weniger stark ausgeprägt als im gesamten Berner Oberland: Im Winter weisen die positiven Trends und im Herbst die negativen Trends etwas tiefere und nur in einer einzigen Ausnahme signifikante Werte auf.
- > Die Zunahme der **Intensität der täglichen Niederschlagsmenge (NInt)** ist im Einzugsgebiet Kander-Hondrich im Frühling etwas schwächer und im Sommer etwas stärker ausgeprägt als im gesamten Berner Oberland.
- > Beim **95%-Quantil der täglichen Niederschlagsmengen (NQ95)** ist im Frühling eine leicht schwächere und im Herbst eine leicht stärkere Zunahme als im Berner Oberland zu beobachten.
- > Die **maximale Dreitagessumme des Niederschlags (NMax3d)** weist für den Sommer und Herbst eine stärker ausgeprägte Zunahme auf als bei den Stationen im Berner Oberland.

Die Station Kiental weist am wenigsten signifikante Trends auf. Bei dieser Station verläuft die Entwicklung der meisten Parameter zwar gleich wie bei den anderen Stationen im Einzugsgebiet der Kander bzw. des Berner Oberlands, doch sind die Veränderungen weniger stark ausgeprägt.

Bei den übrigen Stationen im Untersuchungsgebiet ist grösstenteils gute Übereinstimmung der Entwicklungen zu beobachten. Unterschiede treten meistens dort auf, wo die Trends auch für die ganze Region des Berner Oberlands unsicher bzw. nicht signifikant sind.

## 8.7 Entwicklung der extremen Starkniederschläge im Einzugsgebiet Kander-Hondrich seit 1901

Mit Hilfe der extremwertstatistischen Auswertung von Starkniederschlägen unterschiedlicher Ereignisdauer kann eine Abschätzung der zu erwartenden Starkniederschlagsmenge verschiedener Wiederkehrperiode durchgeführt werden. Mit den Auswertungen von ZELLER ET AL. (1976-1991) liegt heute bereits eine schweizweite Datengrundlage zu diesen Kenngrössen vor. Allerdings wird in den entsprechenden Auswertungen nur der Zeitraum von 1901 bis 1970 berücksichtigt. Auf Grund der festgestellten Veränderungen bei den Niederschlagsverhältnissen der letzten Jahrzehnte (z.B. GAMMETER 2008, SCHMIDLI & FREI 2005) stellt sich die Frage, ob und in welchem Masse sich auch im untersuchten Einzugsgebiet die extremen Starkniederschlagsmengen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperiode verändert haben.

So weisen z.B. auch HEGG & VOGT (2005) in ihren Untersuchungen darauf hin, dass der von ZELLER ET AL. (1976-1991) untersuchte Zeitraum von 1901 bis 1970 gegenüber den aktuell vorherrschenden Verhältnissen eine Phase mit deutlich reduzierten Starkniederschlagsmengen darstellt und dass die daraus extrapolierten Werte die aktuellen Verhältnisse zum Teil deutlich unterschätzen. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde deshalb auch überprüft, ob und in welchem Ausmass die von HEGG & VOGT (2005) für weite Teile der Schweiz gefundene Zunahme der extremen Starkniederschlagsmengen für die Verhältnisse im Einzugsgebiet der Kander zutreffen.

### 8.7.1 Methode

Aus den langen Niederschlagsmessreihen der meteorologischen Messstationen im Einzugsgebiet Kander-Hondrich (Kiental, Frutigen, Adelboden und Kandersteg) wurden für die vorgesehenen Analysen die **jährlichen Maxima unterschiedlicher Ereignisdauer** (1, 2, 3 und 5 Tage) herausgesucht. Die in den Untersuchungen von ZELLER ET AL. (1976-1991) verwendete Umrechnung der kalendarischen Werte auf nichtkalendarische Werte nach dem Ansatz von WEISS (1964) wurde in der vorliegenden Untersuchung nicht eingesetzt. Im Weiteren wurde anstelle der von ZELLER ET AL. (1976-1991) verwendeten 1. oder 2. Extremwertverteilung durchwegs die Allgemeine Extremwertverteilung angewendet. Dies in erster Linie, um die Vergleichbarkeit der Resultate für die verschiedenen untersuchten Perioden und Messreihen zu gewährleisten.

Es ist jedoch zu beachten, dass der direkte Vergleich zu den Auswertungen von HEGG & VOGT (2005) von untergeordneter Bedeutung ist. Dies deshalb, weil im Rahmen der vorliegenden Untersuchung in erster Linie die absolute Veränderung der extremen Starkniederschläge unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperiode im Verlaufe der letzten 100 Jahre untersucht werden sollte. Diese Veränderungen wurden nur anhand der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Niederschlagsreihen von 1901-2008 analysiert.

Die Ergebnisse der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen werden anhand der Niederschlagsdaten der Station **Frutigen** erläutert. Für die anderen Stationen, welche im Einzugsgebiet der Kander liegen und über lange Messreihen verfügen (Kiental, Adelboden, Kandersteg), wurden jeweils vergleichbare Werte erzielt.

Abbildung 8.2 zeigt die **Ergebnisse der extremwertstatistischen Auswertungen** der langen Messreihen der Station Frutigen bzw. die Entwicklung des 30-, 100- und 300-jährlichen Starkniederschlags von 1, 2, 3 und 5 Tagen Dauer. Die Auswertung der Datenreihen von 1901 bis 2006

erfolgte für immer **größer werdende Zeitfenster** mit konstantem Startjahr 1901, beginnend mit dem Zeitfenster von 30 Jahren Länge. Somit umfasst das erste ausgewertete Zeitfenster die Jahre von 1901 bis 1930, das zweite Zeitfenster umfasst die Jahre von 1901 bis 1931, etc. Die Ergebnisse zeigen den Einfluss des zeitlichen Umfangs der ausgewerteten Periode.

Mit diesem Ansatz ergeben sich für jede Datenreihe insgesamt 77 Zeitfenster von 30 bis 106 Jahren Länge. In den vier Teilgrafiken in Abbildung 8.2 sind jeweils die Resultate der extremwertstatistischen Auswertung für das Ende des untersuchten Zeitfensters angegeben. Das bedeutet, dass die Resultate für die ausgewertete Periode von 1901 bis 1930 im Jahr 1930 eingetragen sind. Auf die Angabe des Konfidenzintervalls wurde in dieser Darstellung verzichtet.

**Frutigen: Tagesmittelwerte, kalendarische Werte**

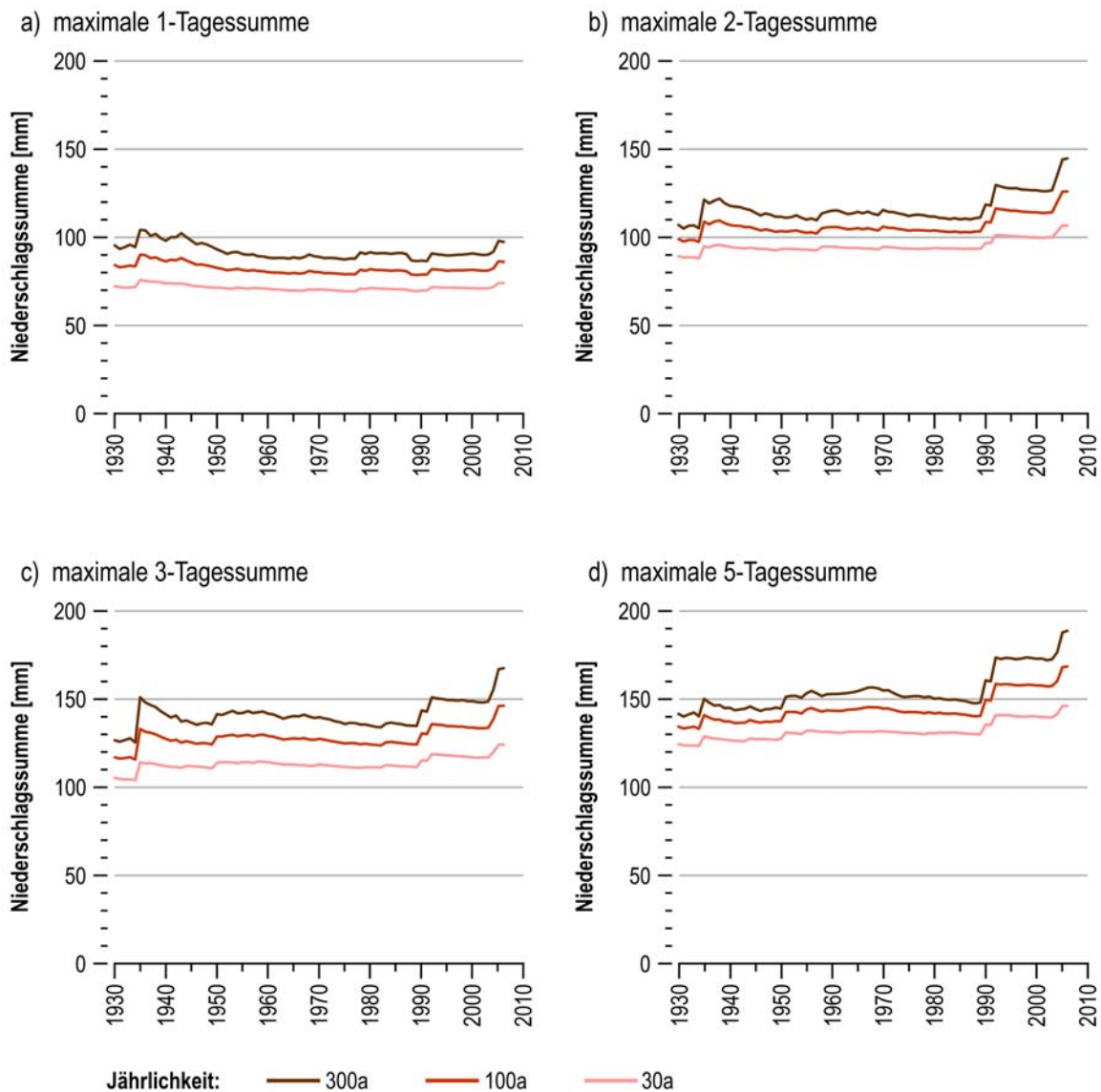


Abbildung 8.2: Entwicklung der Starkniederschläge unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperiode für die Station Frutigen. Die Ergebnisse zeigen den Einfluss des zeitlichen Umfangs der ausgewerteten Periode. Es wurden alle Perioden mit mindestens 30 Jahren Umfang und Anfangsjahr 1901 ausgewertet, die Resultate sind am letzten Jahr der ausgewerteten Periode eingetragen.



### 8.7.2 Resultate

Wie aus Abbildung 8.2 hervorgeht, sind die zu beobachtenden Veränderungen für die untersuchten Niederschlagsdauern (1, 2, 3 und 5 Tage) von unterschiedlichem Ausmass: Während bei den aus den 1-tägigen Niederschlagssummen extrapolierten Werten unterschiedlicher Jährlichkeit die Veränderungen ab 1970 nur noch gering ausfallen (Abbildung 8.2 a), lassen sich bei den mehrtägigen Niederschlagssummen grössere Unterschiede beobachten. So ist z.B. die 100-jährliche, 2-tägige Niederschlagssumme für die Station Frutigen seit 1970 von rund 100 mm bis ins Jahr 2006 auf etwa 130 mm gestiegen, was einem Zuwachs von 30% entspricht (Abbildung 8.2 b).

Veränderungen gleicher Grössenordnung lassen sich auch für die beiden anderen Niederschlagsdauern von 3 und 5 Tagen beobachten (Abbildung 8.2 c und d). Aus den Auswertungen aller Stationen geht zudem Folgendes hervor:

- > Die **Veränderungen haben sich nicht kontinuierlich entwickelt**, es treten verschiedene Sprünge in den Reihen auf. Die markantesten davon liegen einerseits im Zeitraum zwischen 1990 und 1992 sowie im Jahr 2005. In diesen Jahren traten im Einzugsgebiet grössere Starkniederschlagsereignisse auf, welche sich jedoch nur im Jahr 2005 direkt im Abflussgeschehen äusserten (vgl. Kapitel 9.5).
- > Die **grössten Veränderungen** treten bei den Starkniederschlägen von 2, 3 und 5 Tagen Dauer mit grösserer Wiederkehrperiode (mehr als 100 Jahre) auf. In diesem Bereich liegen die Veränderungen deutlich höher als bei den Werten mit kürzerer Wiederkehrdauer. Dieser Sachverhalt wird besonders deutlich in Tabelle 8.3 ersichtlich, welche die numerischen Resultate der Auswertungen der Stationen Frutigen und Kiental enthält.

Neben den absoluten Werten der extremwertstatistischen Auswertungen für die Perioden 1901-1970 bzw. 1901-2006 sind in Tabelle 8.3 zudem die prozentualen Zunahmen zwischen den beiden Werten aufgeführt. Bei dieser Zusammenstellung wird deutlich ersichtlich, dass die Zunahme für die grösseren Wiederkehrperioden (100a, 300a) und die Niederschlagsmengen längerer Dauer (2- bis 5-Tagessumme) stärker ausgeprägt ist als bei den kleineren Wiederkehrperioden (2.33a, 30a) und den Niederschlagsmengen kürzerer Dauer (1-Tagessumme).

Die im Rahmen der Arbeiten von HEGG & VOGT (2005) beschriebenen **Tendenzen zu veränderten Starkniederschlagsverhältnissen seit 1970** lassen sich auch für das Einzugsgebiet der Kander nachweisen. Die Veränderungen im Einzugsgebiet der Kander sind allerdings nur bei den mehrtägigen Niederschlagssummen zu beobachten. Für Niederschlagsereignisse kürzerer Dauer (z.B. 1 Tag) kann davon ausgegangen werden, dass die von ZELLER ET AL. (1976-1991) berechneten Werte auch unter den heute vorherrschenden Bedingungen noch Gültigkeit besitzen. Dies ist insbesondere für die Abschätzung von Hochwasserabflüssen in kleineren Einzugsgebieten von Bedeutung, da auf dieser räumlichen Skala die Starkniederschläge kürzerer Dauer die Hochwasserabflüsse im Wesentlichen prägen (vgl. Kapitel 9.5).

Tabelle 8.3: Extremwertstatistische Auswertung der jährlichen maximalen Ein- und Mehrtagesummen der Stationen Frutigen und Kiental. Aufgeführt sind die Resultate für die beiden Perioden 1901-1970 und 1901-2006 sowie die prozentuale Veränderung zwischen den beiden Resultaten.

Untersuchte Grösse	Wiederkehrperiode	Frutigen			Kiental		
		1901-1970	1901-2006	Veränderung	1901-1970	1901-2006	Veränderung
Tagessumme	2.33 Jahre	47.1 mm	47.3 mm	<b>0 %</b>	48.7 mm	48.5 mm	<b>0 %</b>
	30 Jahre	70.5 mm	74.0 mm	<b>+5 %</b>	82.7 mm	85.4 mm	<b>+3 %</b>
	100 Jahre	80.3 mm	86.2 mm	<b>+7 %</b>	99.2 mm	104.2 mm	<b>+5 %</b>
	300 Jahre	88.9 mm	97.5 mm	<b>+10 %</b>	115.1 mm	122.9 mm	<b>+7 %</b>
2-Tagessumme	2.33 Jahre	64.1 mm	65.7 mm	<b>+3 %</b>	64.2 mm	65.5 mm	<b>+2 %</b>
	30 Jahre	94.8 mm	106.7 mm	<b>+15 %</b>	96.5 mm	109.2 mm	<b>+13 %</b>
	100 Jahre	106.2 mm	126.2 mm	<b>+21 %</b>	109.8 mm	131.3 mm	<b>+20 %</b>
	300 Jahre	115.6 mm	144.9 mm	<b>+28 %</b>	121.4 mm	153.2 mm	<b>+26 %</b>
3-Tagessumme	2.33 Jahre	75.0 mm	76.9 mm	<b>+4 %</b>	74.8 mm	75.8 mm	<b>+1 %</b>
	30 Jahre	112.7 mm	123.9 mm	<b>+11 %</b>	108.8 mm	124.0 mm	<b>+14 %</b>
	100 Jahre	127.3 mm	146.2 mm	<b>+15 %</b>	121.2 mm	148.2 mm	<b>+22 %</b>
	300 Jahre	139.6 mm	167.4 mm	<b>+20 %</b>	131.4 mm	172.1 mm	<b>+31 %</b>
5-Tagessumme	2.33 Jahre	92.3 mm	94.5 mm	<b>+3 %</b>	89.3 mm	91.0 mm	<b>+2 %</b>
	30 Jahre	131.6 mm	145.9 mm	<b>+11 %</b>	127.9 mm	145.3 mm	<b>+14 %</b>
	100 Jahre	144.6 mm	168.3 mm	<b>+16 %</b>	143.5 mm	174.3 mm	<b>+21 %</b>
	300 Jahre	154.7 mm	188.6 mm	<b>+20 %</b>	157.2 mm	204.1 mm	<b>+30 %</b>

## 8.8 Entwicklung der Temperatur im Berner Oberland seit 1901

In mehreren Untersuchungen zu den Veränderungen der Lufttemperatur im letzten Jahrhundert (z.B. BADER & BANTLE 2004, BEGERT ET AL. 2005, REBETEZ & REINHARD 2007) wurde für die Alpennordseite der Schweiz und für die verschiedenen Jahreszeiten ein signifikant positiver Trend für das 20. Jahrhundert gefunden. Die Ergebnisse dieser Analysen zeigen, dass für das nördliche Alpenrandgebiet von einem durchschnittlichen Anstieg der Jahresmitteltemperatur von 0.9 bis 1.1 °C / 100 Jahre ausgegangen werden muss.

Diese Entwicklung wird auch aus den Resultaten der von GAMMETER (2008) untersuchten Messreihen von Château-d'Oex und Engelberg klar ersichtlich (vgl. Tabelle 8.4). Für alle Jahreszeiten ist ein **signifikanter positiver Trend** der mittleren saisonalen Temperatur (MT) zu beobachten. Die berechnete Veränderung der saisonalen Temperatur ist noch stärker ausgeprägt als diejenige in den gesamtschweizerischen Untersuchungen, was sich an den Werten des absoluten Trends in Tabelle 8.4 deutlich zeigt. Die Zunahme beträgt über die ausgewerteten 106 Jahre zwischen 1.14 und 2.20 °C. Anhand der relativen aber auch der absoluten Trends kann festgestellt werden, dass für Château-d'Oex die Veränderungen leicht stärker ausgeprägt sind als für Engelberg.

Tabelle 8.4: Entwicklung der mittleren saisonalen Temperatur in der Region des Berner Oberlandes. Monatliche Temperaturmittelwerte von Château-d'Oex und Engelberg (1901-2006). Blaue Zahlen: Positiver Trend, Rote Zahlen: Negativer Trend. Fett: Signifikanter Trend (\*: Signifikanzniveau = 0.1, \*\*: Signifikanzniveau = 0.05, \*\*\*: Signifikanzniveau = 0.01). Winter: Dezember bis Februar, Frühling: März bis Mai, Sommer: Juni bis August, Herbst: September bis November. Daten: GAMMETER (2008).

	Château-d'Oex		Engelberg	
	absoluter Trend [°C]	relativer Trend #	absoluter Trend [°C]	relativer Trend #
Winter	1.84***	0.87***	1.61***	0.75***
Frühling	1.58***	0.30***	1.14***	0.22***
Sommer	2.20***	0.16***	1.36***	0.10***
Herbst	2.15***	0.33***	1.72***	0.28***

# gemäss SCHMIDLI & FREI (2005) (vgl. auch Definition in Kapitel 8.6)

Obschon bei diesen Messreihen von stark autokorrelierten Daten ausgegangen werden muss, was zu einer Überschätzung der Trends führen kann (VON STORCH 1995), können den berechneten Werten auf Grund ihrer starken Ausprägung, dem grossen zeitlichen Umfang der Messreihe bzw. den hohen Signifikanzniveaus eine hohe Zuverlässigkeit zugesprochen werden (vgl. z.B. YUE ET AL. 2002).

## 8.9 Fazit

Aus den Untersuchungen zur Entwicklung der klimatischen Verhältnisse im Berner Oberland sowie im Einzugsgebiet Kander-Hondrich geht Folgendes hervor:

- > Für die Periode 1901-2006 zeigt sich im Berner Oberland und im Einzugsgebiet Kander-Hondrich für alle Jahreszeiten eine Entwicklung zu deutlich **feuchteren Verhältnissen**, welche im Winter besonders stark ausgeprägt ist. Diese Entwicklung stimmt gut mit den gesamtschweizerisch beobachteten Veränderungen überein.
- > Die **Starkniederschläge** nahmen im Verlauf der letzten gut 100 Jahre **mengenmässig deutlich zu** und sind auch **häufiger** aufgetreten. Diese Zunahmen sind besonders deutlich im Sommer aber auch im Winter zu erkennen. Der festgestellte Trend entspricht demjenigen, welcher an den meisten Stationen in der Schweiz beobachtet werden kann, ist aber im Berner Oberland und im Einzugsgebiet Kander-Hondrich vergleichsweise stärker ausgeprägt. Dies kann jedoch auch daran liegen, dass die extremen Niederschläge der letzten Jahre in den Datenreihen der gesamtschweizerisch durchgeführten Untersuchungen noch nicht enthalten sind.
- > Die extremen Starkniederschläge unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperiode weisen besonders in den letzten Jahren eine deutliche mengenmässige Zunahme auf, welche insbesondere bei den **mehrtägigen Niederschlagsereignissen** beobachtet werden kann.
- > Im Einzugsgebiet Kander-Hondrich lassen sich in den letzten 100 Jahren generell die gleichen Veränderungen der Niederschlagsverhältnisse beobachten wie im gesamten Berner Oberland. Kleinere Abweichungen können aber festgestellt werden.

- > Die **Temperatur** hat im Berner Oberland während der untersuchten Periode von 1901-2006 **deutlich zugenommen**. Die festgestellten saisonalen Veränderungen im Untersuchungsraum sind stärker ausgeprägt als im gesamtschweizerischen Durchschnitt.

## 9 Entwicklung der Abflussverhältnisse

In diesem Kapitel wird auf die Veränderung der Abflussverhältnisse im Untersuchungsgebiet während den letzten 100 Jahren eingegangen. Insbesondere werden die Resultate der Trendanalysen und der extremwertstatistischen Auswertungen dargestellt, welche die Veränderung und die kontinuierliche Entwicklung verschiedener ausgewählter Kenngrößen aufzeigen.

Während in Kapitel 9.1 die untersuchten Datenreihen, in Kapitel 9.2 die analysierten Parameter und in Kapitel 9.3 die verwendeten Methoden vorgestellt werden, enthalten Kapitel 9.4 sowie Kapitel 9.5 die Resultate zu den Veränderungen der Abflussverhältnisse im Mittel- und Hochwasserbereich.

### 9.1 Daten

Die Analysen wurden von GAMMETER (2008) anhand der langen Abflussmessreihen für die beiden Stationen Kander-Hondrich (1903-2008) und Kander-Kandersteg (1917-2005) durchgeführt, deren Daten im Rahmen der vorliegenden Arbeit digitalisiert wurden (vgl. Kapitel 3.1).

Damit die Auswertungen der beiden Datenreihen direkt miteinander verglichen werden können, wurde die Messreihe der Station **Kander-Hondrich** nur für die Jahre 1917-2005 untersucht. Da die Messreihe der Station **Kander-Kandersteg** in den Jahren 2002-2005 zudem für mehrere Phasen fehlende Messwerte aufweist (vgl. Kapitel 3.2), wurden die Daten für diesen Zeitraum anhand der Abflussmessungen an der Station Kander-Frutigen korrigiert. Dadurch wurde es möglich, auch für die Station Kander-Kandersteg die ganze Periode 1917-2005 auszuwerten. Die Berechnungen basieren auf Grund der Datenverfügbarkeit auf Tagesmittelwerten.

### 9.2 Untersuchte hydrologische Parameter

Für den Abfluss wurden die folgenden Parameter für alle Jahreszeiten (vgl. Kapitel 8.3.1) untersucht:

- > Mittlerer saisonaler Abfluss (MQ)
- > Grösster monatlicher Abflussmittelwert pro Saison (HQmon)
- > Grösster täglicher Abflussmittelwert pro Saison (HQ1d)
- > 5%-Quantil aller täglichen Abflussmittelwerte pro Saison (QQ5)
- > 99%-Quantil aller täglichen Abflussmittelwerte pro Saison (QQ99)

Während die Parameter «mittlerer Abfluss», «grösster monatlicher Abflussmittelwert» «5%-Quantil aller täglichen Abflussmittelwerte», Aussagen zu den **Abflussverhältnissen im Mittel- und Niedrigwasserbereich** ermöglichen, können aus den Analysen der Parameter «Grösster täglicher Abflussmittelwert» und «99%-Quantil aller täglichen Abflussmittelwerte» Aussagen zur Entwicklung der **Hochwasserverhältnisse** abgeleitet werden.

### 9.3 Methoden

Zur Untersuchung der Abflussverhältnisse bzw. der verschiedenen hydrologischen Parameter wurden die gleichen Methoden eingesetzt wie für die Auswertung der klimatischen Parameter (vgl. Kapitel 8.3.1). Im Wesentlichen handelt es sich dabei um Trendanalysen mit Hilfe des Mann-Kendall Trendtests (vgl. MANN 1945, KENDALL 1970, THEIL 1950, SEN 1968) bzw. mit logistischer Regression (SCHMIDLI & FREI 2005) sowie um extremwertstatische Auswertungen unter Anwendung der Allgemeinen Extremwertverteilung (vgl. COLES 2001).

### 9.4 Entwicklung der Abflussverhältnisse in den Einzugsgebieten Kander-Hondrich und Kander-Kandersteg seit 1917

Die Zusammenstellung in Tabelle 9.1 enthält die Auswertungen aller Parameter für die beiden Stationen mit den längsten Messreihen Kander-Hondrich und Kander-Kandersteg und umfassen die Periode 1917-2005. Es sind sowohl die **absoluten Trends** (absolute Veränderung des untersuchten Parameters über den ausgewerteten Zeitraum) als auch die **relativen Trends** aufgeführt (vgl. Kapitel 8.3.1). Die relativen Trends können direkt miteinander verglichen werden, was für die absoluten Trends auf Grund der unterschiedlichen Grössenordnung der beiden ausgewerteten Datengrundlagen nicht möglich ist. In Tabelle 9.1 weisen blaue Zahlen auf einen positiven Trend hin, rote Zahlen zeigen, dass es sich um einen negativen Trend handelt. Fett formatierte Zahlen entsprechen signifikanten Trends, das Signifikanzniveau wird aus der Anzahl Sterne ersichtlich.

Aus Tabelle 9.1 geht hervor, dass bei den Abflussverhältnissen im Mittel- und Niedrigwasser sowie bei den Hochwasserverhältnissen verschiedene saisonale Unterschiede bei der Entwicklung der ausgewerteten Parameter bestehen:

- > Der **mittlere saisonale Abfluss (MQ)** weist im Winter bei beiden ausgewerteten Stationen einen signifikanten Anstieg auf. Während im Frühling der positive Trend etwas schwächer ausgeprägt ist, sind im Sommer bei beiden Stationen schwache rückläufige Tendenzen zu erkennen. Während ein schwacher Rückgang des mittleren saisonalen Abflusses für Kander-Hondrich auch im Herbst festgestellt werden kann, ist der Rückgang der Abflussmenge in dieser Jahreszeit für Kander-Kandersteg hochsignifikant.
- > Beim **grössten monatlichen Abflussmittelwert pro Saison (HQmon)** sind bei beiden Stationen im Winter signifikante Zunahmen zu beobachten, während die Entwicklung in den übrigen Jahreszeiten einen Rückgang anzeigt. Im Sommer ist der Rückgang dieser Kenngrösse für Kander-Hondrich signifikant und im Herbst für Kander-Kandersteg sogar hochsignifikant.
- > Das **5%-Quantil der täglichen Abflussmittelwerte (QQ5)** zeigt sowohl für den Winter als auch für den Frühling und den Herbst bei beiden Stationen eine Zunahme. Diese ist bei Kander-Kandersteg im Winter und Frühling signifikant bis hochsignifikant. Bei Kander-Hondrich ist im Winter ebenfalls ein signifikanter Trend zu beobachten. Bei beiden Stationen tritt im Sommer eine rückläufige Tendenz auf, welche für Kander-Kandersteg hochsignifikant ist.

Tabelle 9.1: Entwicklung der hydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet der Kander. Untersuchung der Trends für ausgewählte Parameter. Daten: Tagesmittelwerte (Kander-Hondrich 1917-2005, Kander-Kandersteg 1917-2005). Blaue Zahlen: Positiver Trend, Rote Zahlen: Negativer Trend. Fett: Signifikanter Trend (\*: Sig.niveau = 0.1 / \*\*: Sig.niveau = 0.05 / \*\*\*: Sig.niveau = 0.01). Winter: Dezember bis Februar, Frühling: März bis Mai, Sommer: Juni bis August, Herbst: September bis November.

Parameter	Jahreszeit	Kander-Hondrich		Kander-Kandersteg		
		absoluter Trend	relativer Trend	absoluter Trend	relativer Trend	
MQ: Mittlerer Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	Winter	<b>1.482**</b>	<b>0.207**</b>	<b>0.246**</b>	<b>0.138**</b>	
	Frühling	0.453	0.022	0.100	0.027	
	Sommer	-4.025	-0.105	-0.306	-0.020	
	Herbst	-0.334	-0.022	<b>-1.128***</b>	<b>-0.191***</b>	
Hqmon: Grösster monatlicher Abflussmittelwert [m <sup>3</sup> /s]	Winter	<b>2.165**</b>	<b>0.244**</b>	<b>0.279*</b>	<b>0.126*</b>	
	Frühling	-0.887	-0.028	-0.316	-0.044	
	Sommer	<b>-4.681*</b>	<b>-0.104*</b>	-0.068	-0.004	
	Herbst	-0.920	-0.042	<b>-2.838***</b>	<b>-0.300***</b>	
QQ5: 5%-Quantil aller täglichen Abflussmittelwerte [m <sup>3</sup> /s]	Winter	<b>0.762*</b>	<b>0.150*</b>	<b>0.224***</b>	<b>0.173***</b>	
	Frühling	1.034	0.159	<b>0.225**</b>	<b>0.179**</b>	
	Sommer	-0.397	-0.017	<b>-1.676***</b>	<b>-0.189***</b>	
	Herbst	0.517	0.067	0.162	0.063	
Hochwasser	HQ1d: Grösster täglicher Abflussmittelwert [m <sup>3</sup> /s]	Winter	<b>9.871**</b>	<b>0.520**</b>	<b>0.395*</b>	<b>0.172*</b>
	Frühling	-8.269	-0.151	-0.291	-0.042	
	Sommer	2.151	0.028	<b>4.477***</b>	<b>0.200***</b>	
	Herbst	0.215	0.005	-1.312	-0.139	
Hochwasser	QQ99: 99%-Quantil aller täglichen Abflussmittelwerte [m <sup>3</sup> /s]	Winter	<b>6.373**</b>	<b>0.400**</b>	0.280	0.098
	Frühling	-7.735	-0.153	-1.172	-0.097	
	Sommer	2.027	0.029	<b>3.715**</b>	<b>0.158**</b>	
	Herbst	-0.958	-0.024	<b>-2.147*</b>	<b>-0.156*</b>	

\* Einheiten der Trendwerte: absoluter Trend: [m<sup>3</sup>/s], relativer Trend: [-]

- > Der **grösste tägliche Abflussmittelwert (HQ1d)** hat im Winter seit 1917 sowohl bei Kander-Hondrich als auch bei Kander-Kandersteg signifikant zugenommen. Eine Zunahme dieses Parameters ist auch im Sommer zu beobachten. Die Zunahme ist in dieser Jahreszeit bei Kander-Hondrich schwach ausgeprägt und für Kander-Kandersteg hochsignifikant. Im Frühling sind die Tendenzen bei beiden Stationen leicht rückläufig. Im Herbst sind die Veränderungen ebenfalls schwach ausgeprägt und weisen bei Kander-Hondrich eine sehr geringe zunehmende und bei Kander-Kandersteg eine abnehmenden Tendenz auf.
- > Die Veränderungen des **99%-Quantils der täglichen Abflussmittelwerte (QQ99)** weisen bei beiden Stationen für den Winter sowie für den Sommer auf eine Zunahme hin. Diese ist im Winter für Kander-Hondrich sowie im Sommer für Kander-Kandersteg signifikant. Im Frühling wie im Herbst ist jeweils ein negativer Trend zu beobachten, welcher für die Station Kander-Kandersteg im Herbst signifikant ist.

Die Entwicklung der verschiedenen saisonalen Abflusskennwerte weist auf **erhöhte mittlere Abflüsse und verstärkte Hochwasserabflüsse** im **Winter** hin, was an der Zunahme bei allen Parametern für diese Jahreszeit ersichtlich wird. Im **Sommer** ist ein **Rückgang der mittleren Abflussmengen** aber eine **Zunahme bei den Hochwasserabflüssen** – insbesondere für die Station Kander-Kandersteg zu beobachten. Zudem ist für diese Jahreszeit bei beiden Stationen eine verstärkte Variabilität der täglichen Abflussmengen festzustellen, was aus dem Rückgang des 5%-Quantils und aus der Zunahme des 99%-Quantils deutlich hervorgeht.

Im **Frühling** und im **Herbst** sind die Veränderungen sehr ähnlich. Insbesondere ist zu beobachten, dass die **Abflussverhältnisse** im Verlauf des letzten Jahrhunderts **ausgeglichen** wurden, was aus der Zunahme beim 5%-Quantil und aus dem Rückgang des 99%-Quantils ersichtlich wird. In diesen Jahreszeiten tritt zudem ein **Rückgang der Hochwasserabflussmenge** auf.

Die im Einzugsgebiet Kander-Hondrich festgestellten Veränderungen lassen sich in vielen Punkten mit den Ergebnissen aus der gesamtschweizerischen Untersuchung von BIRSAN ET AL. (2005) vergleichen. Im **Winter** kann die zunehmende Tendenz der kleinen und der grossen Abflussmengen (QQ5, QQ99), welche an der Kander auftreten, auch in zahlreichen anderen Einzugsgebieten der Schweiz beobachtet werden. Auch im **Sommer** passen die Resultate für das Einzugsgebiet der Kander gut in den gesamtschweizerischen Kontext. Allerdings ist bei der Kander im Gegensatz zu den meisten Einzugsgebieten der Schweiz auch bei den grossen Abflüssen (HQ1d, QQ99) eine stark ausgeprägte Zunahme zu beobachten. Dieser stärkere positive Trend für das Einzugsgebiet der Kander wird auch bei der Untersuchung der Jahreshochwasser von DIEZIG & KAN (2010) für die Periode von 1971-2007 ersichtlich.

Die Entwicklung im **Frühling** und im **Herbst** weicht gegenüber den Resultaten aus den Untersuchungen von BIRSAN ET AL. (2005) in einzelnen Punkten ab: Während an der Kander im Frühling eine leichte Abnahme der grossen Abflüsse zu beobachten ist, lässt sich bei den meisten Einzugsgebieten der Schweiz eine geringe Zunahme feststellen. Im Herbst trat an der Kander dagegen bei den kleinen Abflüssen eine Zunahme auf, wogegen die meisten untersuchten Einzugsgebiete in der Schweiz eine leichte Abnahme in diesem Wertebereich der täglichen Abflussmengen zeigen.



## 9.5 Entwicklung der seltenen Hochwasserabflüsse in den Einzugsgebieten Kander-Hondrich und Kander-Kandersteg

Neben den Trenduntersuchungen der Parameter, welche zur Beschreibung der Entwicklung der Hochwasserverhältnisse in Kapitel 9.2 beigezogen wurden, soll in diesem Kapitel die Veränderung bei den seltenen Hochwasserabflüssen unterschiedlicher Wiederkehrperiode während den letzten 100 Jahren aufgezeigt werden. Diese Auswertungen können mit denjenigen der extremen Starkniederschläge unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperiode (vgl. Kapitel 8.7) verglichen werden. Insbesondere geht aus diesen Untersuchungen hervor, wie sich der zunehmende Umfang der Abflussmessreihe auf die geschätzten Hochwasserabflüsse auswirkt.

In Abbildung 9.1 sind die Auswertungen für die **Jahreshochwasser** der Stationen Kander-Hondrich (Periode 1903-2008) und Kander-Kandersteg (Periode 1917-2005) enthalten. Beide Reihen setzen sich aus den jährlich grössten Spitzenabflüssen zusammen. Unter Anwendung der Allgemeinen Extremwertverteilung wurden aus diesen Datenreihen die Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit (HQ30, HQ100 und HQ300) abgeschätzt. Zur Schätzung der Parameter der Extremwertverteilung wurde die Maximum-Likelihood-Methode eingesetzt (vgl. COLES 2001). Vergleichbar zur Auswertung der Starkniederschläge wurde die Abschätzung für zahlreiche und unterschiedlich lange Intervalle jedoch mit zwei verschiedenen Ansätzen durchgeführt.

Beim **ersten Ansatz** erfolgte die Anpassung der Allgemeinen Extremwertverteilung für alle immer **grösser werdenden Zeitfenster** mit konstantem Startjahr, beginnend mit dem Zeitfenster von 30 Jahren Länge. Das Startjahr entspricht dabei immer dem Beginn der Messreihe (Kander-Hondrich: 1903, Kander-Kandersteg: 1917). Mit diesem Ansatz wurden z.B. für die Station Kander-Hondrich insgesamt 77 Intervalle unterschiedlicher Länge ausgewertet, wobei das erste Intervall die Jahre 1903 bis 1932, das zweite Intervall die Jahre 1903 bis 1933, etc. umfasst. Für die Station Kander-Kandersteg wurden mit dem gleichen Ansatz insgesamt 60 Intervalle analysiert. Die Resultate für die durchgeführten Auswertungen sind in Abbildung 9.1 a und c enthalten. Die Ergebnisse der extremwertstatistischen Abschätzungen (HQ30, HQ100, HQ300) sind jeweils im letzten Jahr der ausgewerteten Periode eingetragen. Das bedeutet, dass die bei der Station Kander-Hondrich beim Jahr 1932 aufgeführten Resultate der Abschätzung für die Periode 1903-1932 entsprechen.

Beim **zweiten Ansatz** basiert die Anpassung der Allgemeinen Extremwertverteilung auf allen Intervallen der Messperiode, welche genau 30 Jahre umfassen (**30-jähriges Zeitfenster**). Die erste ausgewertete Periode umfasst somit z.B. für die Station Kander-Hondrich die Jahre 1903-1932, die zweite Periode umfasst die Jahre 1904-1933, etc. Auch mit diesem Ansatz wurden für die Station Kander-Hondrich 78 Intervalle und für die Station Kander-Kandersteg 60 Intervalle ausgewertet. Die Resultate sind wiederum am Ende der jeweils untersuchten Periode eingetragen (vgl. Abbildung 9.1 b und d).

Aus Abbildung 9.1 wird ersichtlich, dass die Entwicklung der extremen Hochwasserabflussspitzen unterschiedlicher Jährlichkeit (HQ30, HQ100, HQ300) bei beiden untersuchten Stationen einen ähnlichen Verlauf zeigen. Sowohl für die Station **Kander-Hondrich** wie auch für die Station **Kander-Kandersteg nehmen die Werte der abgeschätzten Hochwasserabflüsse im Verlauf der gesamten Messperiode deutlich zu**. Dies zeigt sich bei der Auswertung mit beiden Ansätzen, wobei das Muster bei den Auswertungen mit dem 30-jährigen Fenster wesentlich ausgeprägter ist.

Allerdings verläuft die **Zunahme nicht stetig**: Bei der Entwicklung zu grösseren Hochwasserabflüssen lassen sich verschiedene Sprünge beobachten. Während z.B. bei der Station Kander-Hondrich Ende der 1990er Jahre deutliche Zunahmen festgestellt werden können, ist diese Entwicklung bei der Station Kander-Kandersteg bereits ab Beginn der 1990er Jahre zu beobachten.

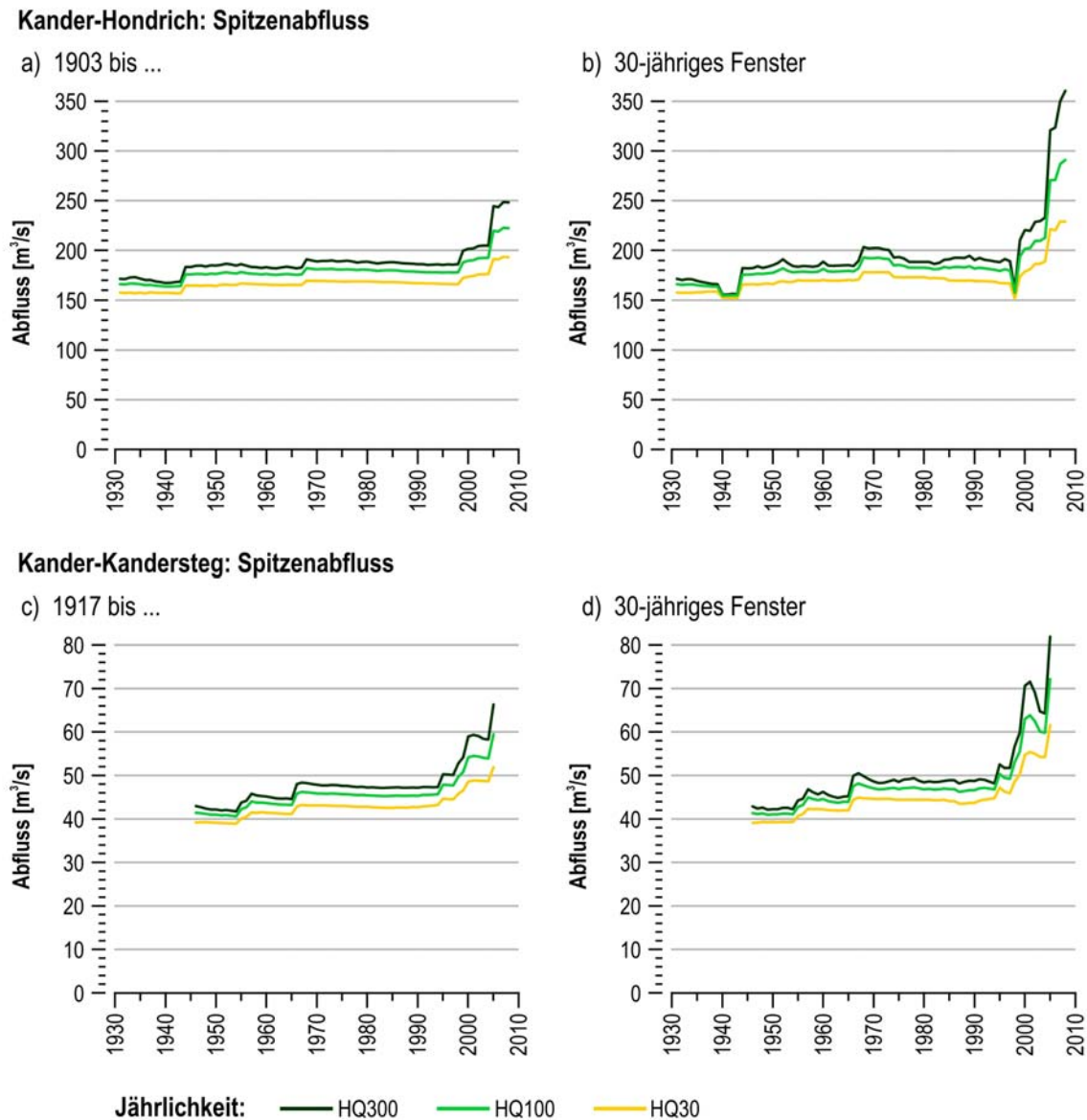


Abbildung 9.1: Entwicklung der extremen Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Wiederkehrperiode für die Stationen Kander-Hondrich (a und b, Periode 1903-2008) und Kander-Kandersteg (c und d, Periode 1917-2005). a und c: Hochwasserabschätzung für länger werdende Zeitfenster, b und d: Hochwasserabschätzung für alle 30-jährigen Zeitfenster)

Die Veränderungen der Hochwasserspitzenabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit sind in Tabelle 9.2 numerisch angegeben. Dabei werden die prozentualen Zu- und Abnahmen der Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Wiederkehrdauer miteinander verglichen, welche für die Perioden 1903-1970 und 1903-2006 (Kander-Hondrich) bzw. für die Perioden 1917-1970 und 1917-2005 (Kander-Kandersteg) berechnet wurden. Diese Perioden wurden gewählt, um den Vergleich zu den Auswertungen in Kapitel 8 (Tabelle 8.3) zu ermöglichen.

Aus Tabelle 9.2 geht für beide Stationen hervor, dass bei den grösseren Wiederkehrperioden (HQ300) die Zunahme ausgeprägter ist, als bei den kleinen Wiederkehrperioden (HQ2.33 bis HQ30). So ist beispielsweise bei der Auswertung der Periode 1903-2006 gegenüber der Periode 1903-1970 für das HQ100 der Station Kander-Hondrich eine Zunahme von 21% zu beobachten. Die gleiche Auswertung zeigt für Kander-Kandersteg eine Zunahme von 30%. Das könnte einerseits an den verschiedenen Ausgangspunkten der beiden Zeitreihen liegen oder andererseits eine Auswirkung der unterschiedlichen Grösse des Einzugsgebietes sein.

Tabelle 9.2: Extremwertstatistische Auswertung der Jahreshochwasser der Kander-Hondrich und der Kander-Kandersteg. Aufgeführt sind die Resultate für die beiden Perioden 1901-1970 und 1901-2006 sowie die Veränderung zwischen den beiden entsprechenden Resultaten.

Untersuchte Grösse	Wiederkehr- periode	Kander-Hondrich			Kander-Kandersteg		
		1903-1970	1903-2006	Veränderung	1917-1970	1917-2005	Veränderung
HQ2.33	2.33 Jahre	124.5 m <sup>3</sup> /s	123.1 m <sup>3</sup> /s	-1%	33.2 m <sup>3</sup> /s	34.4 m <sup>3</sup> /s	+4%
HQ30	30 Jahre	169.3 m <sup>3</sup> /s	191.0 m <sup>3</sup> /s	+13%	43.1 m <sup>3</sup> /s	51.8 m <sup>3</sup> /s	+20%
HQ100	100 Jahre	181.0 m <sup>3</sup> /s	219.0 m <sup>3</sup> /s	+21%	45.8 m <sup>3</sup> /s	59.4 m <sup>3</sup> /s	+30%
HQ300	300 Jahre	189.0 m <sup>3</sup> /s	243.6 m <sup>3</sup> /s	+29%	47.8 m <sup>3</sup> /s	66.3 m <sup>3</sup> /s	+39%

## 9.6 Fazit

Die Abflussverhältnisse in den beiden Einzugsgebieten Kander-Hondrich und Kander-Kandersteg haben sich im Verlauf des letzten Jahrhunderts wie folgt verändert:

- > Die **mittleren saisonalen Abflüsse** haben sich insbesondere im Winter und teilweise auch im Frühling erhöht. In den beiden anderen Jahreszeiten ist eine Abnahme zu verzeichnen.
- > Aus der Entwicklung der **Abflussquantile** lässt sich ableiten, dass im Frühling und Herbst die Abflussverhältnisse ausgeglichener und im Sommer deutlich variabler wurden. Im Winter ist sowohl eine Zunahme der kleinen als auch der grossen Abflüsse zu beobachten.
- > Die **Hochwasserabflussmengen** haben in den letzten knapp 100 Jahren sowohl im Winter als auch im Sommer **deutlich zugenommen**, wobei die Entwicklung nicht kontinuierlich sondern mit Sprüngen verlaufen ist.
- > Bei den Trends verschiedener Parameter, welche für beide Stationen für die Periode 1917-2005 berechnet wurden, lassen sich nur geringfügige Unterschiede zwischen Kander-Kandersteg und Kander-Hondrich feststellen.



# 10 Vergleich der Entwicklung von Niederschlag und Abfluss

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Untersuchungen zu den Veränderungen des Klimas (vgl. Kapitel 8, Tabelle 8.2 und Tabelle 8.4) und des Abflusses (vgl. Kapitel 9, Tabelle 9.1) miteinander verglichen werden. Damit sollen die bei den Abflussdaten erkannten Entwicklungen anhand der Veränderungen von Niederschlag und Temperatur erklärt werden. Dieser Vergleich soll vor allem die Veränderungen der Hochwasserverhältnisse aber auch die Entwicklung im Mittel- und Niedrigwasserbereich beleuchten. Er wird anhand der Trends ausgewählter Parameter (Kapitel 10.1) und der Gegenüberstellung der Entwicklung von Hochwassern und Starkniederschlägen (Kapitel 10.2) während den letzten 100 Jahren durchgeführt. Das Fazit, welches sich aus diesem Vergleich ergibt ist in Kapitel 10.3 enthalten.

## 10.1 Vergleich der Trends von ausgewählten Parametern

Der Vergleich ausgewählter Parameter von Niederschlag, Temperatur und Abfluss wurde nur für die Ergebnisse des gesamten Untersuchungsgebietes **Kander-Hondrich** durchgeführt. Zur Beurteilung der Entwicklung des Niederschlags im Einzugsgebiet wurden die Auswertungen der Stationen Kandersteg, Kiental, Frutigen und Adelboden (vgl. Tabelle 8.2) zusammengefasst. Der Vergleich beschränkt sich ausschliesslich auf die qualitative Beurteilung der verschiedenen Entwicklungsmuster der verwendeten Parameter; eine Berücksichtigung weiterer prozessrelevanter Einflussfaktoren (z.B. Verdunstung, Schnee- und Gletscherschmelze, etc.) konnte aufgrund fehlender Daten nicht durchgeführt werden. Es ist zu beachten, dass die Trends der hydrologischen und der klimatischen Parameter nicht für die gleiche Periode berechnet wurden (1917-2005 bzw. 1901-2006). Weiterführende Auswertungen haben gezeigt, dass sich bei den meisten klimatischen Parametern nur geringfügige Unterschiede bei den für die Periode 1917-2005 berechneten Trends gegenüber den in Kapitel 8 aufgeführten Werten für die Periode 1901-2006 entstehen. Daher werden an dieser Stelle die Trends der klimatischen Parameter für die Periode 1901-2006 verwendet.

In Tabelle 10.1 ist der Vergleich der Ergebnisse für die Auswertung der langen Messreihen von Niederschlag, Temperatur und Abfluss dargestellt. Die Resultate der verschiedenen Stationen sind vereinfacht in Form von Pfeilen eingetragen. Die Bedeutung der Pfeile, mit welchen auch die Resultate der vier ausgewerteten Stationen (Kiental, Frutigen, Adelboden, Kandersteg) zusammenfassend dargestellt werden, wird aus der Legende in Tabelle 10.1 ersichtlich. Die Abkürzungen der ausgewerteten klimatischen und hydrologischen Parameter werden in Tabelle 10.2 erläutert. Aus Tabelle 10.1 werden die folgenden **Zusammenhänge zwischen Niederschlag, Temperatur und Abfluss** für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich ersichtlich:

- > **Winter (DJF):** Im Winter können für sämtliche Parameter signifikante positive Trends festgestellt werden. Dies zeigt, dass sowohl die grössten Niederschlagsereignisse als auch die Hochwasserabflüsse in dieser Jahreszeit deutlich zugenommen haben. Es ist davon auszugehen, dass der signifikante Anstieg der mittleren saisonalen Temperatur (MT) den zunehmenden Trend des mittleren saisonalen Abflusses (MQ) verstärkt und/oder auslöst, indem

die ebenfalls erhöhte saisonale Niederschlagssumme (NSum) vermehrt in flüssiger und deshalb in direkt abflusswirksamer Form anfällt.

Tabelle 10.1: Vergleich der Trends von ausgewählten Parametern zu Niederschlag, Temperatur und Abfluss für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich in den letzten 100 Jahren. Abkürzungen der Parameter siehe Tabelle 10.2. Winter: Dezember bis Februar, Frühling: März bis Mai, Sommer: Juni bis August, Herbst: September bis November.

Kander-Hondrich Jahreszeit	Niederschlag					Temp.	Abfluss			
	NSum	NEMD	NInt	NQ95	NMax3d	MT	MQ	QQ5	QQ99	HQ1d
Winter	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Frühling	↗	→	↗	↗	↘	↗	↗	↗	↘	↘
Sommer	↗	↘	↗	↗	↗	↗	↘	↘	↗	↗
Herbst	↗	↘	↗	↗	↗	↗	↘	↗	↘	↗

- ↗ Trend signifikant positiv. Für **Niederschlag**: Bei mindestens 3 Stationen positiver Trend, einzelne davon signifikant.
- ↗ Trend positiv. Für **Niederschlag**: Bei mindestens 3 Stationen positiver Trend, keiner signifikant.
- Trend unklar. Für **Niederschlag**: Trend nur sehr schwach ausgeprägt oder ausgeglichene Verhältnisse.
- ↘ Trend negativ. Für **Niederschlag**: Bei mindestens 3 Stationen negativer Trend, keiner signifikant.
- ↘ Trend signifikant negativ. Für **Niederschlag**: Bei mindestens 3 Stationen negativer Trend, einzelne davon signifikant.

Tabelle 10.2: Erläuterung der Abkürzungen der in Tabelle 10.1 verwendeten klimatischen und hydrologischen Parameter

Abkürzung	Erläuterung
NSum	Saisonale Niederschlagssumme
NEMD	Mittlere Dauer von zusammenhängenden Niederschlagstagen pro Saison
NInt	Mittlere Intensität eines Niederschlagstages pro Saison (Definiert als saisonale Niederschlagssumme aller Tage mit mind. 1 mm Niederschlag geteilt durch die Anzahl Tage mit mind. 1 mm Niederschlag)
NQ95	95%-Quantil aller täglichen Niederschlagssummen pro Saison
NMax3d	Maximale Dreitagessumme des Niederschlags pro Saison
MT	Mittlere saisonale Temperatur
MQ	Mittlerer saisonaler Abfluss
QQ5	5%-Quantil aller täglichen Abflussmittelwerte pro Saison
QQ99	99%-Quantil aller täglichen Abflussmittelwerte pro Saison
HQ1d	Grösster täglicher Abflussmittelwert pro Saison

- > **Frühling (MAM):** Im Gegensatz zu ausschliesslich signifikanten Zunahmen, welche für die Wintermonate beobachtet werden können, treten im Frühling bei verschiedenen Parametern weniger stark ausgeprägte positive und auch negative Trends auf. Besonders bei den Hochwasserkennwerten (QQ99 und HQ1d) sind Rückgänge zu verzeichnen, welche aber mit der reduzierten maximalen Dreitagessumme des Niederschlags (NMax3d) erklärt werden können. Daneben lässt sich feststellen, dass die Abflussverhältnisse der Kander im letzten

Jahrhundert aufgrund der Zunahme bei den kleinen Abflüssen (QQ5) und der Abnahme bei den grossen Abflüssen (QQ99) in dieser Jahreszeit ausgeglichener geworden sind.

- > **Sommer (JJA):** In dieser Jahreszeit können sowohl signifikante Zunahmen bzw. eine Intensivierung der Starkniederschlagsverhältnisse (NIInt, NQ95, NMax3d) sowie verstärkte Hochwasserabflüsse (QQ99, HQ1d) beobachtet werden. Der Rückgang der beiden Abflussparameter (MQ, QQ5) bei gleichzeitiger signifikanter Zunahme der mittleren saisonalen Niederschlagssumme (NSum) ist nur schwierig zu erklären. Allenfalls könnten reduzierte Beträge aus der Schnee- und Gletscherschmelze oder durch erhöhte Temperatur (MT) hervorgerufene Verdunstungszunahme (SPREAFICO & WEINGARTNER 2005) zu diesem allgemeinen Rückgang beigetragen haben (vgl. auch Kapitel 20.2.1).
- > **Herbst (SON):** Sowohl beim Abfluss als auch beim Niederschlag weisen einzelne Parameter einen leichten negativen Trend auf (NEMD, MQ, QQ99). Für die restlichen Parameter lassen sich Zunahmen beobachten, welche zum Teil auch signifikant sind (NQ95, NMax3d, MT). Wie im Sommer kann trotz der leichten Zunahme der saisonalen Niederschlagssumme (NSum) eine Abnahme beim mittleren saisonalen Abfluss (MQ) festgestellt werden. Diese Entwicklung könnte auch in dieser Jahreszeit anhand der Auswirkungen der signifikant erhöhten mittleren Temperatur (MT) erklärt werden. Die deutliche Zunahme bei der maximalen Niederschlagssumme über drei Tage (NMax3d) wirkt sich nicht eindeutig auf die Entwicklung der Hochwasserparameter aus, wo einerseits ein leichter Rückgang (QQ99) bzw. eine leichte Zunahme (HQ1d) zu beobachten ist. Insgesamt zeigt sich in dieser Jahreszeit wie im Frühling ein Trend zu ausgeglicheneren Abflussverhältnissen, was an der Zunahme der kleinen Abflüsse (QQ5) und einer Abnahme der grossen Abflüsse (QQ99) ersichtlich wird.

## 10.2 Entwicklung von Starkniederschlägen und Hochwassern

In Kapitel 8.7 wurde die Entwicklung der extremen Starkniederschläge und in Kapitel 9.5 diejenige der Hochwasser im letzten Jahrhundert untersucht. Aus diesen Analysen geht hervor, dass sowohl ein **Trend zu grösseren Starkniederschlagsmengen** wie auch eine **Zunahme bei den extremen Hochwasserabflussspitzen** erkennbar wird. Bei beiden Parametern zeigt sich eine **sprunghafte Zunahme** zu einzelnen Zeitpunkten, welche vor allem in den 1990er Jahren wesentlich zum Anstieg der beiden Grössen geführt hat.

Aus dem direkten Vergleich der Resultate in Abbildung 8.2 (Starkniederschläge) und Abbildung 9.1 (Hochwasser) geht hervor, dass der Anstieg der Hochwasser gut durch die Veränderungen bei den Starkniederschlägen erklärt werden kann. Allerdings wird die Entwicklung der Hochwasser (Zunahme der Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit seit den 1990er Jahren) nur bei den Starkniederschlägen längerer Dauer (2, 3 oder 5 Tage) ersichtlich. Bei den 1-Tages-Starkniederschlägen ist – im Gegensatz zu den Hochwasserabflussspitzen – seit Ende der 1970er Jahre keine wesentliche Steigerung mehr festzustellen. Diese Zusammenhänge zeigen sich auch bei den prozentualen Veränderungen dieser Werte, welche für die Periode bis 1970 bzw. bis ans jeweilige Ende der Messreihe für die Hochwasserabflüsse und die Starkniederschlagsmengen berechnet wurden und in der gleichen Grössenordnung liegen (vgl. Tabelle 8.3 bzw. Tabelle 9.2).

Es ist jedoch zu beachten, dass die zeitliche Übereinstimmung der Veränderungen der beiden Parameter nicht über den ganzen Untersuchungszeitraum gegeben ist. Insbesondere treten bei den Hochwasserabflüssen unterschiedlicher Jährlichkeit einzelne Sprünge auf, welche bei der Entwick-

lung der Starkniederschläge nicht erkennbar sind. Daraus lässt sich einerseits schliessen, dass die Entwicklung der Hochwasser im Wesentlichen von den Starkniederschlägen längerer Dauer gesteuert wird. Andererseits zeigt sich aber auch, dass nicht alle Starkniederschläge direkt abflusswirksam werden und für das Hochwassergeschehen im Einzugsgebiet nicht alleine bestimmend sind.

### 10.3 Fazit

Aus der Gegenüberstellung der Entwicklung von ausgewählten Parametern von Abfluss, Niederschlag und Temperatur im Einzugsgebiet Kander-Hondrich wird ersichtlich, dass die beim **Abfluss** erkannten Muster für alle Jahreszeiten weitgehend **mit den Veränderungen der klimatischen Verhältnisse erklärt** werden können.

Es wird zudem ersichtlich, dass die verwendeten **Parameter des Niederschlags** nicht ausreichen, um die im Sommer und Herbst beim Abfluss erkannten Trends vollumfänglich zu erklären. Offenbar sind in diesen Jahreszeiten weitere (temperaturbedingte) Prozesse an der Abflussbildung beteiligt, welche mit den durchgeführten Analysen nicht erfasst werden konnten (z.B. Speicherung oder Schmelze von Schnee bzw. Gletscherschmelze).

Die **Entwicklung** der seltenen **Hochwasserabflüsse** und der **Starkniederschlagsmengen** zeigen für die letzten gut 100 Jahre einen **ähnlichen Verlauf**. Es wird ersichtlich, dass die beobachtete Zunahme bei den seltenen Hochwasserabflüssen seit Mitte der 1990er Jahre im Einzugsgebiet Kander-Hondrich ebenfalls bei den mehrtägigen Starkniederschlagsmengen erkennbar ist. Zudem sind die prozentualen Veränderungen der mehrtägigen extremen Starkniederschläge und der extremen Hochwasserabflussspitzen seit 1970 von gleicher Grössenordnung.

Die Auswertung und Gegenüberstellung der langen klimatischen und hydrologischen Messreihen zeigt zudem folgendes Muster deutlich auf:

- > **Winter:** Die Zunahme aller untersuchten Niederschlags- und Abflussparameter weist auf eine Entwicklung in Richtung deutlich feuchtere Verhältnisse mit grösseren Hochwassern hin.
- > **Sommer:** Die bei den Starkniederschlagsparametern und der saisonalen Niederschlagssumme zu beobachtende Zunahme äussert sich in einer leichten Erhöhung der Hochwasserabflüsse. Demgegenüber ist in dieser Jahreszeit eine Abnahme der mittleren und kleinen Abflussmengen zu beobachten, was zu variableren Abflussverhältnissen führt.
- > **Frühling und Herbst:** Der Zunahme der Abflussmengen im Niedrigwasserbereich steht eine Reduktion der Abflüsse im Hochwasserbereich gegenüber. Insgesamt weist diese Entwicklung auf eine geringere Variabilität der Abflussverhältnisse hin. Die saisonale Niederschlagssumme und die Starkniederschlagsparameter weisen einen unterschiedlich stark ausgeprägten positiven Trend auf.
- > **Für alle Jahreszeiten** ist im untersuchten Einzugsgebiet zudem eine Zunahme der Temperatur festzustellen, welche über dem gesamtschweizerischen Durchschnitt liegt.



# 11 Modellierung von langen Abflussreihen

In diesem Kapitel wird auf die Modellierung der langen hydrologischen Reihen eingegangen, welche unter Anwendung der langen Messreihen von Niederschlag und Temperatur für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich sowie für drei Teileinzugsgebiete berechnet wurden. Anhand dieser modellierten Abflussdaten kann die raum-zeitliche Information zum Hochwassergeschehen im Untersuchungsraum wesentlich erweitert werden.

Während in Kapitel 11.1 das Vorgehen und in Kapitel 11.2 die verwendeten Daten beschrieben werden, wird in Kapitel 11.3 auf die Kalibrierung und in Kapitel 11.4 bzw. Kapitel 11.5 auf die Validierung der hydrologischen Modelle eingegangen. Kapitel 11.6 enthält die Resultate der hydrologischen Modellierung mit langen meteorologischen Messreihen.

## 11.1 Vorgehen

In Kapitel 9 wurde auf die Entwicklung der Abflussverhältnisse im Einzugsgebiet der Kander seit 1917 eingegangen. Grundlage für diese Analysen bilden die **langen Abflussmessreihen** der beiden Stationen **Kander-Hondrich (1903-2008)** und **Kander-Kandersteg (1917-2005)**. Die für diese Stationen beschriebene Entwicklung ermöglicht jedoch noch keine räumlich differenzierte Aussage zu den Veränderungen der Hochwasserverhältnisse innerhalb des untersuchten Gesamteinzugsgebietes Kander-Hondrich.

Zur Erweiterung der raum-zeitlichen Informationen wurden deshalb mit Hilfe des hydrologischen Modellsystems **PREVAH** (vgl. Kapitel 6) für weitere Stationen im Untersuchungsgebiet möglichst lange Abflussreihen generiert. Das Vorgehen orientiert sich weitgehend an der Untersuchung von SÄGESSER & WEINGARTNER (2005), welche mit dem Modellsystem WASIM (SCHULLA & JASPER 2000) lange hydrologische Abflussreihen für das Einzugsgebiet Aare-Brienzwiler modelliert haben.

Mit Hilfe des eingesetzten hydrologischen Modells wurde es möglich, das Zusammenspiel der beiden meteorologischen Grössen (Niederschlag und Temperatur) prozessorientiert in eine hydrologische Systemantwort umzusetzen und die Auswirkungen der klimatischen Veränderungen auf die hochwasserhydrologischen Verhältnisse in den verschiedenen Teileinzugsgebieten zu untersuchen.

Für die durchgeführten hydrologischen Modellierungen wurden die digitalisierten **langen meteorologischen Datenreihen** (vgl. Kapitel 3.1) verwendet. Als Eingabegrössen bilden diese Daten die entscheidende und limitierende Grundlage für mehrere Aspekte der hydrologischen Modellierung:

- > Die **zeitliche Auflösung** der meteorologischen Eingabedaten bestimmt die maximale zeitliche Auflösung der hydrologischen Modellierung.
- > Der **Zeitraum**, für welchen die meteorologischen Eingabedaten (Temperatur und Niederschlag) verfügbar sind, bestimmt die Periode, für welche die hydrologische Modellierung durchgeführt werden kann.
- > Die **Verfügbarkeit der verschiedenen meteorologischen Parameter** (z.B. Globalstrahlung, Luftfeuchtigkeit) bestimmt, welche Ansätze zur Modellierung der hydrologischen Prozesse eingesetzt werden können.

Auf Grund der Datenverfügbarkeit und der oben aufgeführten Voraussetzungen ergeben sich für die hydrologische Modellierung der langen Abflussreihen folgende Auswirkungen:

- > Die Modellierung kann wegen der zeitlichen Auflösung der vor 1983 verfügbaren meteorologischen Daten ausschliesslich für Tagesmittelwerte durchgeführt werden (vgl. Kapitel 3.1, Abbildung 3.3).
- > In der Region des untersuchten Einzugsgebietes veränderte sich die **Stationsdichte** während des letzten Jahrhunderts markant: Um 1900 waren deutlich weniger Stationen in Betrieb als heute. Dementsprechend liegen nicht für alle Stationen im Untersuchungsraum Messreihen vor, welche den gesamten Beobachtungszeitraum abdecken. Es empfiehlt sich jedoch, für die hydrologische Modellierung ein über den Modellierungszeitraum homogenes Set an meteorologischen Eingabedaten zu verwenden. Deshalb wurden nur diejenigen Datenreihen eingesetzt, welche über den ganzen Modellierungszeitraum verfügbar sind (vgl. Kapitel 3.1). Auf Grund der geringen Anzahl an Stationen, welche diese Bedingung erfüllen, ist die räumliche Differenzierung der interpolierten meteorologischen Daten gegenüber den Eingabedaten, welche für die Modellierungen von 1983 bis 2005 verwendet wurden (vgl. Kapitel 3.1), deutlich reduziert.

Für die hydrologische Modellierung ist die räumliche Differenzierung der meteorologischen Eingabedaten deshalb von Bedeutung, weil davon ausgegangen werden muss, dass kleinere Einzugsgebiete mit räumlich weniger hoch aufgelösten Eingabedaten nicht mehr zuverlässig modelliert werden können (vgl. z.B. WEHREN 2005, VIVIROLI 2007). Aus diesem Grund wurde die hydrologische Modellierung langer Abflussreihen nur für Einzugsgebiete, welche eine Grösse von mindestens 100 km<sup>2</sup> aufweisen, durchgeführt.

- > Als **Eingabegrössen** für die langen hydrologischen Modellierungen mit PREVAH müssen mindestens Niederschlags- und Temperaturdaten vorliegen. Wie aus der in Kapitel 3.1 dargestellten Datenlage hervorgeht, reichen die Niederschlagsdaten zum Teil bis vor 1900 zurück. Im Gegensatz dazu existieren aber nur wenige meteorologische Stationen in der Region des Untersuchungsgebietes, welche über lange Temperaturmessreihen verfügen. Insbesondere für die Temperaturmessungen ist zudem wichtig, dass die Stationen einen grösseren Höhenbereich abdecken, damit die bei der Temperatur zu beobachtenden Höhengradienten zuverlässig erfasst werden können (vgl. z.B. BARRY 2008). Wie Abbildung 3.3 und Abbildung 3.4 zeigen, sind im Berner Oberland erst ab 1933 mehrere Messstationen verfügbar, welche einerseits zusammen einen grösseren Höhenbereich abdecken und andererseits über Temperaturmessungen verfügen. Der Zeitraum der hydrologischen Modellierung von langen Reihen ist deshalb auf die **Periode 1933-2008** beschränkt.
- > Zur **Kalibrierung der freien Parameter** des hydrologischen Modellsystems müssen die meteorologischen Daten und Abflussmessungen für den gleichen Zeitraum von mehreren Jahren vorliegen. Das Regionalisierungsverfahren von VIVIROLI (2007) (vgl. Kapitel 6.3), welches die Bestimmung der freien Modellparameter für Einzugsgebiete ohne Abflussmessungen ermöglicht, konnte für die Simulation der langen hydrologischen Reihen nicht eingesetzt werden, da diese Methode nicht für die Modellierung mit Tagesmittelwerten entwickelt wurde.

Aus der Kombination dieser Voraussetzungen konnten im Einzugsgebiet der Kander für den Zeitraum von **1933-2008** unter Verwendung der Daten der in Kapitel 11.2 aufgeführten meteorologi-

schen Messstationen und für die **vier folgenden Abflussmessstationen** hydrologische Modellierungen durchgeführt werden (vgl. Abbildung 3.7):

- > Kander-Hondrich
- > Kander-Frutigen
- > Kander-Kandersteg
- > Engstlige-Frutigen

Da für die Stationen Kander-Hondrich und Kander-Kandersteg für den Zeitraum 1933-2005 bereits Messdaten vorliegen, wurden die Abflussreihen für diese Einzugsgebiete mit der durchgeführten hydrologischen Modellierung nicht erweitert.

Allerdings wurde es, anhand der langen Messreihen dieser Stationen möglich, die Güte der modellierten hydrologischen Datenreihen für den ganzen Zeitraum zu überprüfen (vgl. Kapitel 11.5). Demgegenüber konnten die kürzeren Abflussmessreihen von Kander-Frutigen (1993-2008) und Engstlige-Frutigen (1995-2008) durch die hydrologische Modellierung jedoch um mehrere Jahrzehnte verlängert werden.

## 11.2 Daten

Als Eingabedaten für die Modellierung aller langen hydrologischen Reihen wurden die meteorologischen Datenreihen verwendet, welche einen möglichst langen Zeitraum abdecken und die in Kapitel 11.1 aufgeführten Bedingungen erfüllen. Wie in Kapitel 11.1 erwähnt, wurden somit die Daten für den Zeitraum von 1933-2008 verwendet. Dabei kamen auch zahlreiche Messreihen zum Einsatz, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit digitalisiert wurden (vgl. Kapitel 3.1).

Da vor dem Jahr 1980 die Daten von verschiedenen meteorologischen Grössen (z.B. Globalstrahlung, Luftfeuchtigkeit) nicht verbreitet verfügbar sind, wurde die hydrologische Modellierung nur basierend auf **Tageswerten von Niederschlag und Temperatur** durchgeführt. Auf weitere Aspekte, die sich für die hydrologische Modellierung aus dieser reduzierten Datenlage ergeben, wird vertieft in Kapitel 18.3 eingegangen.

Abbildung 11.1 und Tabelle 11.1 ist zu entnehmen, welche Daten der meteorologischen Messstationen als Eingabedaten für die hydrologische Modellierung verwendet wurden. Aus dieser Zusammenstellung wird ersichtlich, dass für die hydrologische Modellierung auch Daten von einigen meteorologischen Messstationen verwendet wurden, welche in grösserer Distanz zum Einzugsgebiet liegen (z.B. Château-d'Oex, Grimsel). Es muss davon ausgegangen werden, dass insbesondere die Niederschlagsmessreihen dieser Stationen die Verhältnisse im Einzugsgebiet nicht zuverlässig repräsentieren. Diese Daten wurden jedoch hauptsächlich dazu verwendet, allfällige Datenlücken in den näher gelegenen Stationen aufzufangen. Zudem ist der Einfluss dieser Daten durch die grosse Distanz zum Einzugsgebiet und durch die gewählte Interpolationsmethode der meteorologischen Eingabedaten (IDW, vgl. Kapitel 6.1.3) als gering einzustufen.

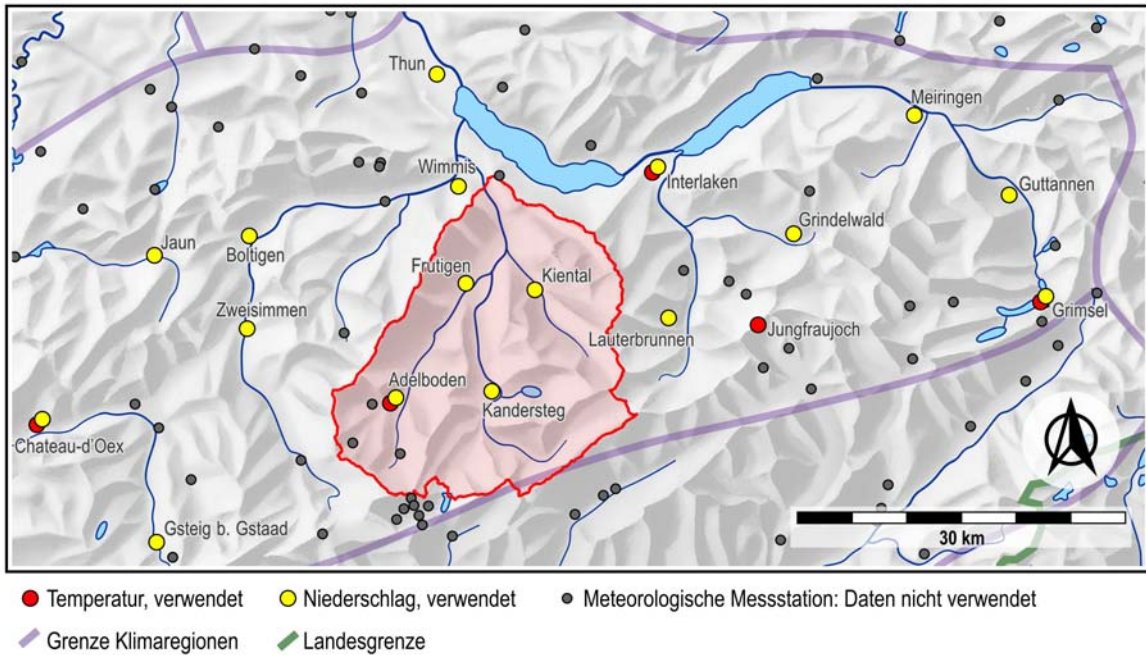


Abbildung 11.1: Meteorologische Messstationen, deren Daten für die Modellierung der langen Abflussreihen verwendet wurden. (Übersichtskarte: swisstopo 2007)

Tabelle 11.1: Verwendete Stationen für die hydrologische Modellierung mit langen meteorologischen Reihen

Stationsname	Höhe [m ü.M.]	Temperaturdaten verfügbar		Niederschlagsdaten verfügbar	
		von ...	bis ...	von ...	bis ...
Adelboden	1320	1928	2008	1901	2008
Boltigen	855			1900	2008
Château-d'Oex	985	1901	2008	1896	2008
Frutigen	815			1901	2008
Grimsel	1980	1932	2008	1932	2008
Grindelwald	1158	1961	1989	1911	2008
Gsteig	1195			1900	2008
Guttannen	1055			1872	2008
Interlaken	580	1901	2008	1901	2008
Jaun	1030			1900	2008
Jungfrauoch	3580	1933	2008		
Kandersteg	1176			1901	2008
Kiental	955			1901	2008
Lauterbrunnen	818			1899	2008
Meiringen	595			1889	2008
Thun	560			1875	2008
Wimmis	622			1901	2008
Zweisimmen	940			1901	2008

## 11.3 Kalibrierung der hydrologischen Modelle

Die Kalibrierung der hydrologischen Modelle für die verschiedenen Einzugsgebiete wurde gemäss dem in Kapitel 6.2 beschriebenen Verfahren durchgeführt. Für jedes Einzugsgebiet konnte ein Modell gefunden werden, für welches die Resultate gegenüber den anderen Varianten deutlich besser ausfielen.

Als **Kalibrierungszeitraum** wurde für alle Stationen die **Periode 1999-2002** gewählt, wobei zusätzlich das Jahr 1998 zur Initialisierung der verschiedenen Speicher verwendet wurde. Damit basiert die Modelleichung für alle Stationen auf der gleichen Periode, was dazu beiträgt, dass die Resultate aus der Analyse der verschiedenen Messreihen besser miteinander verglichen werden können (vgl. VIVIROLI 2007).

Aus den Ergebnissen der verschiedenen Kalibrierungen wurde ersichtlich, dass diejenigen Modellvarianten, welche zur Interpolation der meteorologischen Eingabegrössen die Methode «IDW» verwenden, wesentlich besser abschneiden, als diejenigen, welche auf der «DTIDW»-Methode beruhen (vgl. Kapitel 6.1.2). Dies wird auch deutlich an den Resultaten in Kapitel 19 erkennbar.

Die Modellierungsqualität der verschiedenen Modelle wird in Tabelle 11.2 anhand der berechneten Gütemasse (Angaben in Klammern) ersichtlich.

## 11.4 Validierung der hydrologischen Modelle

Die nach den in Kapitel 6.2 und Kapitel 6.4 beschriebenen Methoden kalibrierten und ausgewählten hydrologischen Modelle für das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich sowie für die drei Teileinzugsgebiete wurden anschliessend mit Hilfe gemessener Abflussdaten auf Basis von Tagesmittelwerten validiert. Als Validierungszeitraum wurden diejenigen Jahre aus dem Zeitraum von 1993 bis 2006 gewählt, für welche die jeweiligen Stationen über Abflussmessungen verfügen. Bei der Validierung wurden die Jahre, welche für die Kalibrierung verwendet wurden (1999-2002), nicht berücksichtigt. In Tabelle 11.2 sind die Resultate der Validierung anhand der berechneten Gütemasse (vgl. Kapitel 6.2.2 bzw. Kapitel 6.2.3) aufgeführt, die entsprechenden Gütemasse, welche für den Zeitraum der Kalibrierung berechnet wurden sind jeweils in Klammern angegeben.

Tabelle 11.2: Berechnete Gütemasse zur Validierung der Modelle, welche für die Langzeitsimulationen eingesetzt wurden (Daten: Tagesmittelwerte; Gleichungen zu den Gütemassen vgl. Kapitel 6.2.2 und 6.2.3). In Klammern sind die für die kalibrierten Jahre (1999-2002) berechneten Gütemasse angegeben.

Gütemasse		Kander-Hondrich	Kander-Kandersteg	Kander-Frutigen	Engstlige-Frutigen
Validierte Jahre		1993-1998, 2003-2006	1993-1998, 2003-2005	1993-1998, 2003-2006	2003-2006
Mittelwasser-Gütemasse	NSE	<b>0.871</b> (0.902)	<b>0.756</b> (0.876)	<b>0.817</b> (0.901)	<b>0.689</b> (0.723)
	NSE-In	<b>0.861</b> (0.907)	<b>0.767</b> (0.824)	<b>0.570</b> (0.914)	<b>0.754</b> (0.741)
	DVOL	<b>375</b> (7)	<b>708</b> (-8)	<b>-1655</b> (34)	<b>973</b> (-786)
Hochwasser-Gütemasse	PQT	<b>10.6</b> (7.6)	<b>9.0</b> (7.4)	<b>12.6</b> (5.3)	<b>7.8</b> (5.7)
	PSAE	<b>33.8</b> (23.3)	<b>43.5</b> (12.8)	<b>69.2</b> (14.8)	<b>42.8</b> (24.5)
	WAE	<b>24672</b> (16219)	<b>64618</b> (31362)	<b>67277</b> (24596)	<b>21178</b> (31361)
	PSR	<b>0.493</b> (0.210)	<b>0.071</b> (0.077)	<b>0.288</b> (0.650)	<b>-0.150</b> (0.357)

Aus dieser Zusammenstellung geht hervor, dass alle Modelle sowohl für den kalibrierten als auch für den validierten Zeitraum gute und teilweise sogar sehr gute Modellqualität aufweisen. Die Modellierung ist insbesondere für das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich sowie das Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen gut gelungen. Beim Teileinzugsgebiet Kander-Kandersteg ist bereits eine reduzierte Qualität der Modellierung zu beobachten, was allenfalls auf die kleinere Einzugsgebietsgrösse zurückgeführt werden kann.

Insbesondere für das Teileinzugsgebiet Engstlige-Frutigen, für welches die Modellierung am schlechtesten gelungen ist, ist zu berücksichtigen, dass die Validierung auf wenigen Jahren beruht und dass dadurch die entsprechenden Angaben mit Vorsicht zu interpretieren sind.

In Tabelle 11.2 wird zudem der Güteverlust zwischen dem kalibrierten und dem validierten Zeitraum ersichtlich, welcher bei allen Modellen und bei allen Gütemassen als geringfügig bezeichnet werden kann.

## 11.5 Beurteilung der Modellgüte für die Langzeitsimulationen

Die Beurteilung der Güte der hydrologischen Langzeitsimulationen ist für die in der vorliegenden Arbeit vorgesehene Zeitreihenverlängerung von vorrangigem Interesse. Bei diesem Vergleich wurden die langen Abflussmessreihen dem modellierten Abfluss gegenüber gestellt und die Abweichungen zwischen den beiden Datenreihen mit verschiedenen Ansätzen beurteilt. Diese Auswertungen konnten also nur für diejenigen Stationen durchgeführt werden, welche über lange Abflussmessreihen verfügen (Kander-Hondrich: 1903-2008, Kander-Kandersteg: 1917-2005).

Die Beurteilung umfasste drei verschiedene Ansätze:

- > Beurteilung anhand von spezifischen **Gütemassen** (Kapitel 11.5.1)
- > **direkter Vergleich** von modellierten und gemessenen Werten (Kapitel 11.5.2)
- > Gegenüberstellung der beiden **Extremwertstatistiken der Jahreshochwasser**, welche aus modellierten und aus beobachteten Daten abgeleitet wurden (Kapitel 11.5.3)

In den nachfolgenden Abschnitten beschränken sich die Ausführungen auf die Ergebnisse der Beurteilung der langen modellierten Abflussreihen von Kander-Hondrich und Kander-Kandersteg. Es werden die Resultate der drei verschiedenen Ansätze aufgezeigt.

### 11.5.1 Beurteilung anhand von Gütemassen

In Abbildung 11.2 sind die Resultate der Beurteilung mit den beiden Gütemassen «lineares und logarithmisches Gütemass» nach NASH & SUTCLIFFE (1970) (NSE-lin, NSE-log) dargestellt (vgl. Kapitel 6.2). Während das lineare Gütemass besonders sensitiv auf die Modellierungsqualität im Hochwasserbereich ist, ist der Einfluss der grossen Abflüsse beim logarithmischen Gütemass durch Logarithmieren der beurteilten und beobachteten Grössen wesentlich reduziert.

In Abbildung 11.2 a und c sind die Resultate der Beurteilung für die Modellierung von Kander-Hondrich dargestellt. Abbildung 11.2 b und d enthält die Resultate für die Station Kander-Kandersteg. Die Teilgrafiken enthalten die auf Basis von Tagesmitteln berechneten Gütemasse für jedes modellierte Jahr. In den beiden oberen Teilgrafiken sind die Resultate für NSE-lin und in den beiden unteren diejenigen für NSE-log enthalten. Der graue Bereich, welcher in allen Grafiken enthalten ist, zeigt den Kalibrierungszeitraum der Modellierungen.

Um den Einfluss der inhomogenen meteorologischen Datenlage für die Periode vor 1933 auf die Qualität der hydrologischen Modellierung aufzuzeigen (vgl. Kapitel 11.1), wurde die Modellierung auch für den Zeitraum vor 1933 und bis zum jeweiligen Beginn der Abflussmessreihe erweitert (Kander-Hondrich: 1903, Kander-Kandersteg: 1917). Dazu wurden sämtliche meteorologischen Daten verwendet, welche an den in Tabelle 11.1 aufgeführten Stationen verfügbar waren. Das bedeutet, dass sich die Anzahl verwendeter meteorologischer Stationen für die Periode vor 1933 bzw. für den Zeitraum danach zum Teil deutlich unterscheiden. Das Jahr 1933 ist in Abbildung 11.2 mit einer gestrichelten Linie markiert, um den Zeitpunkt ab welchem die Inhomogenität auftritt, sichtbar zu machen.

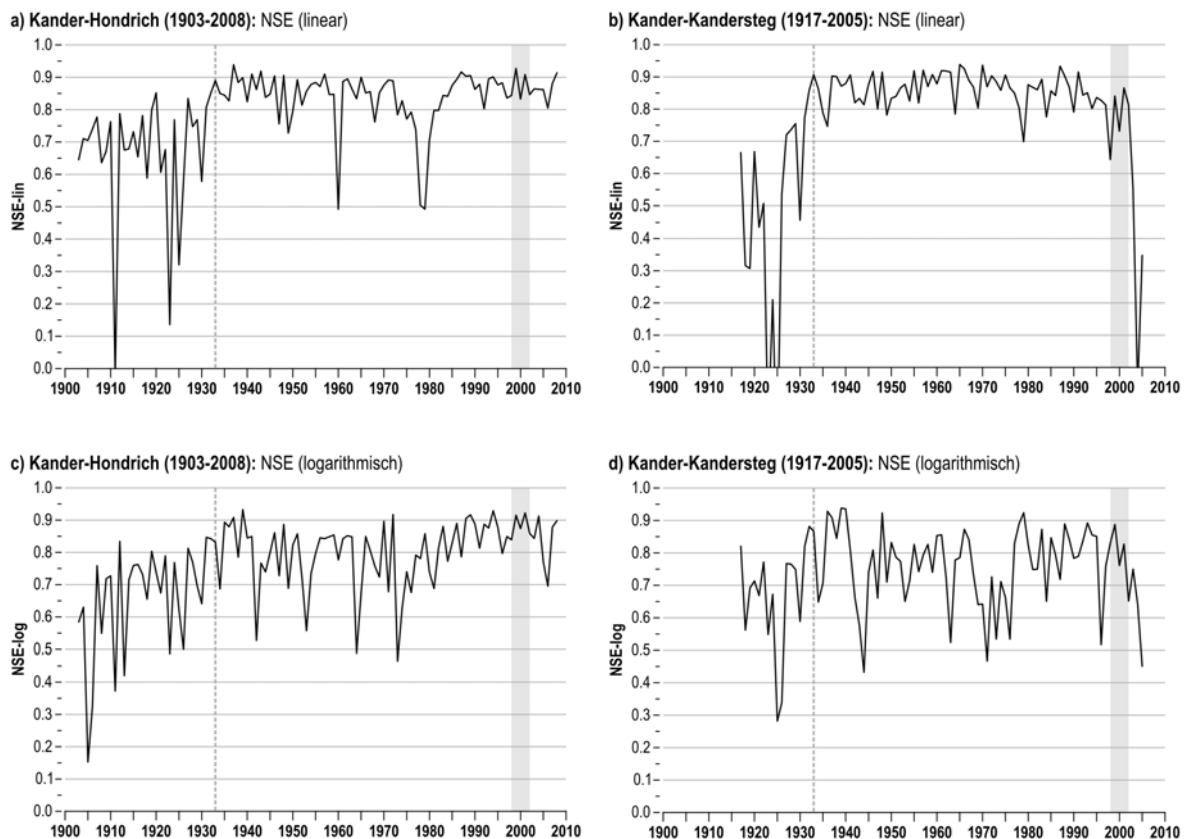


Abbildung 11.2: Beurteilung der hydrologischen Modellierungen für Kander-Hondrich und Kander-Kandersteg mit langen meteorologischen Reihen anhand von Gütemassen (NSE, linear und logarithmisch). Der graue Balken entspricht dem Kalibrierungszeitraum von 1999 bis 2002. Die graue Linie bei 1933 zeigt an, dass sich hier die meteorologischen Eingabedaten ändern.

Aus der Zusammenstellung in Abbildung 11.2 geht Folgendes hervor:

- > **Resultate für die Periode 1933-2002:** Die Werte des **linearen Gütemasses** (NSE-lin, Abbildung 11.2 a und b) verlaufen bei beiden Modellierungen mit geringeren Schwankungen als diejenigen des logarithmischen Gütemasses (Abbildung 11.2 c und d). Bei beiden modellierten Datenreihen (Kander-Hondrich, Kander-Kandersteg) befindet sich das lineare Gütemass für die meisten Jahre der Periode 1933-2002 in einem Bereich zwischen 0.8 und 0.9, was auf eine sehr gute Modellierungsqualität hinweist. Allerdings lassen sich auch einzelne Ausreisser beobachten, wobei aber nie Werte unter 0.5 erzielt werden. Die Resultate des **logarithmischen Gütemasses** (NSE-log) zeigen grössere Schwankungen und liegen für die meisten Jahre in einem Bereich von 0.5 bis 0.9, einzelne Werte liegen auch leicht

darunter. Insgesamt kann also für die meisten modellierten Jahre des Zeitraums 1933-2002 sowie insbesondere für die Hochwasserverhältnisse von einer guten Modellierungsqualität ausgegangen werden, welche allerdings von Jahr zu Jahr deutlich variieren kann.

- > **Resultate für die Periode ab 2002:** Bei der Beurteilung der modellierten Abflussdaten für die Station **Kander-Kandersteg** (Abbildung 11.2 b und d) sind für das lineare und das logarithmische Gütemass ab 2002 deutlich tiefere Werte festzustellen, als für die Periode davor. Dieser Sachverhalt lässt sich mit fehlerhaften Abflussmessungen in dieser Periode erklären, welche durch morphologische Veränderungen am Gerinne hervorgerufen wurden (WALTHER 2007). Da das hydrologische Modell von diesen morphologischen Veränderungen nicht beeinflusst wird und der Kalibrierungszeitraum vor dem Beginn der einsetzenden Veränderungen am Gerinne liegt, ist den modellierten Abflusswerten eine höhere Plausibilität zuzusprechen als den gemessenen.
- > **Resultate für die Periode vor 1933:** Bei beiden modellierten Stationen sind die Werte der Gütemasse NSE-lin und NSE-log für die Periode vor 1933 deutlich tiefer als für den Zeitraum danach. Dies deutet darauf hin, dass für die Periode vor 1933 mit den verwendeten Modellen und den verfügbaren Eingabedaten die Abflusswerte nicht in zufriedenstellender Qualität modelliert werden konnten, was auf die inhomogene Datenlage zurückgeführt werden kann. Wesentlich bessere Modellierungsqualität dürfte durch eine zusätzliche Kalibrierung des Modells auf die veränderte Datenlage vor 1933 zu erwarten sein.

### 11.5.2 Beurteilung anhand des Vergleichs von beobachteten und modellierten Kenngrößen

Neben der Beurteilung anhand von Gütemassen ist für die Beurteilung der Modellqualität auch der **direkte Vergleich von modellierten und beobachteten Größen** aufschlussreich. Zu diesem Zweck wurden für beide Stationen (Kander-Hondrich und Kander-Kandersteg) die Jahreshochwasser (HQA, Abbildung 11.3 a und b) sowie die mittlere jährliche Abflussmenge (MQa, Abbildung 11.3 c und d) aus Modellierung und Beobachtung miteinander verglichen. Auch bei dieser Beurteilung wurde zusätzlich der Zeitraum vor 1933 untersucht. Die modellierten Werte sind jeweils als rote Linie in die Grafiken eingetragen, die beobachteten Werte sind als schwarze Linie dargestellt.

Aus den Zusammenstellungen in Abbildung 11.3 wird Folgendes ersichtlich:

- > Bei beiden Stationen (Kander-Hondrich, Kander-Kandersteg) ist sowohl bei den Jahreshochwassern als auch bei den mittleren jährlichen Abflussmengen **gute Übereinstimmung zwischen Modellierung und Beobachtung** festzustellen. Die Modellierungsqualität für Kander-Hondrich ist sowohl bei den Jahreshochwassern (a und b), als auch bei den mittleren jährlichen Abflussmengen (c und d) etwas besser als bei Kander-Kandersteg.
- > Für die modellierte Periode **vor 1933** konnten vor allem bei den Simulationen für die Station Kander-Kandersteg nur **schlechte Resultate** erzielt werden. Die inhomogene Datenlage hat sich für den Zeitraum vor 1933 auf die Modellierungen der Station Kander-Hondrich etwas weniger stark ausgewirkt.



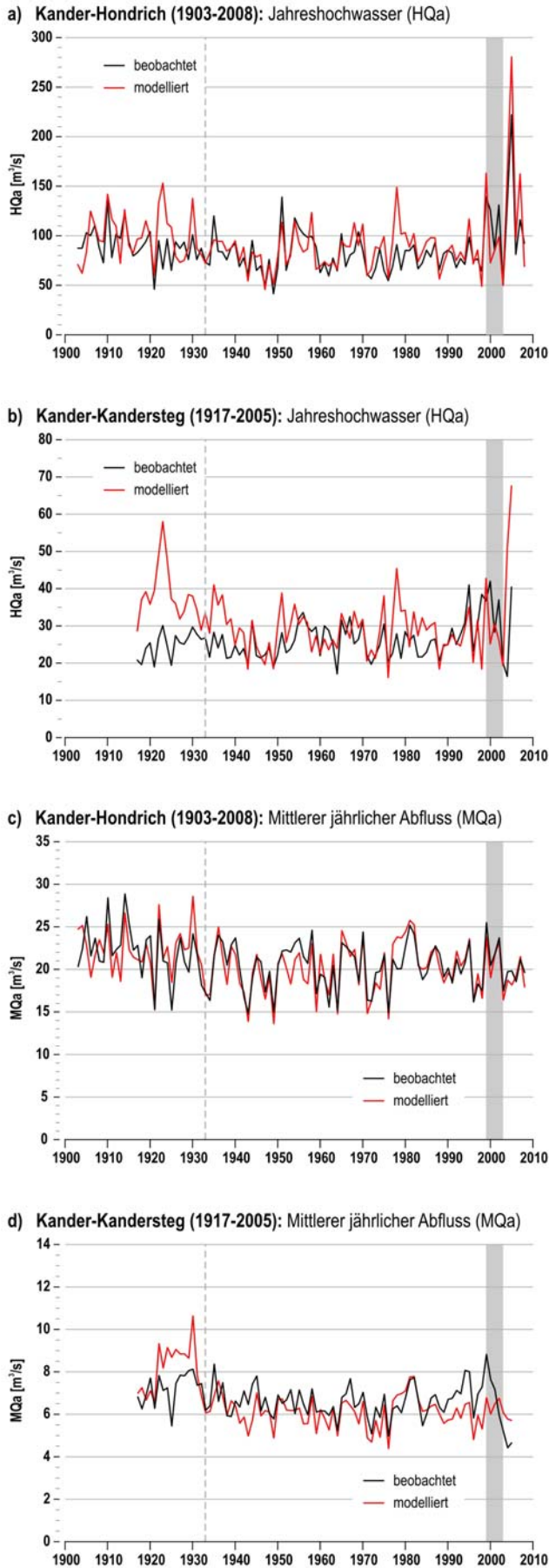


Abbildung 11.3: Beurteilung der hydrologischen Modellierungen für Kander-Hondrich und Kander-Kandersteg mit langen meteorologischen Reihen anhand des direkten Vergleichs von modellierten und beobachteten Daten.

Der graue Balken entspricht dem Kalibrierungszeitraum von 1999 bis 2002. Die graue Linie bei 1933 zeigt an, dass sich hier die meteorologischen Eingabedaten ändern.

a und b: Vergleich der Jahreshochwasser;  
c und d: Vergleich der mittleren jährlichen Abflussmenge

### 11.5.3 Beurteilung anhand der Hochwasserstatistik aus beobachteten und modellierten Werten

Der Vergleich der beiden extremwertstatistischen Auswertungen von modellierten und beobachteten Jahreshochwassern ist für beide Stationen (Kander-Hondrich und Kander-Kandersteg) in Abbildung 11.4 dargestellt. Diese Gegenüberstellung, welche auch in den Untersuchungen von LAMB (1999) angewendet wird, ermöglicht die Beurteilung der Modellierungsqualität für die Zielgrößen (HQ30, HQ100 bzw. HQ300), für welche die hydrologischen Modellierungen in erster Linie durchgeführt wurden. Die **extremwertstatistischen Auswertungen der Jahreshochwasser**, welche auf Basis der modellierten Werte (MOD) durchgeführt wurden, sind in Abbildung 11.4 in roter Farbe eingetragen, die Statistik aus den beobachteten Jahreshochwassern (OBS) sind in schwarz eingezeichnet. In beiden Grafiken ist zudem das 90%-Konfidenzintervall der verschiedenen Auswertungen, welche mit der Software «HQ-EX» (WASY 2005) durchgeführt wurden, abgebildet.

Für die Station Kander-Kandersteg (b) ist zu beachten, dass die Hochwasserstatistik auf Grund der fehlerhaften Daten ab 2002 nur für die Periode von 1917 bis 2002 berechnet wurde (vgl. Kapitel 11.5.1).

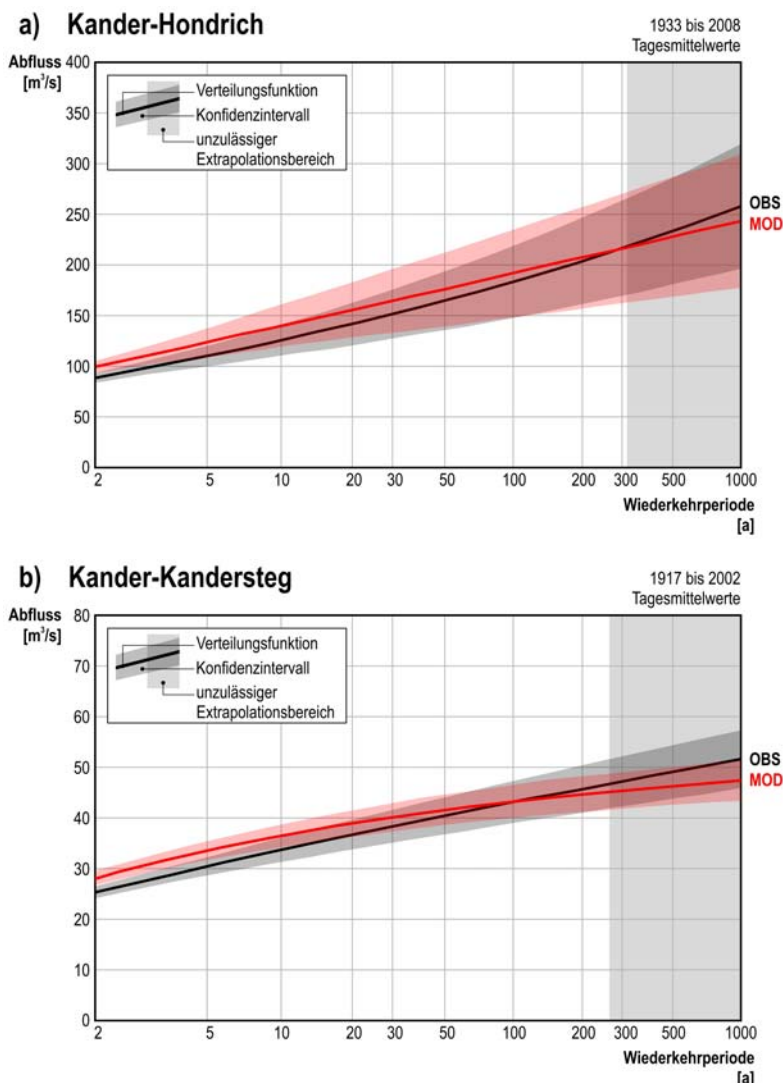


Abbildung 11.4: Beurteilung der modellierten hydrologischen Reihen anhand extremwertstatistischer Auswertungen der Jahreshochwasser.

a: Kander-Hondrich  
b: Kander-Kandersteg

OBS (schwarz): beobachtete Werte  
MOD (rot): modellierte Werte

Dargestellt ist auch das 90%-Konfidenzintervall.

Auch bei diesem Vergleich lässt sich für die beiden Stationen Kander-Hondrich (Abbildung 11.4 a) und Kander-Kandersteg (Abbildung 11.4 b) **gute Übereinstimmung** zwischen modellierten und beobachteten Werten feststellen. Dies gilt sowohl für die jeweils geschätzte Verteilungsfunktion als auch für die Spannweite des entsprechenden Konfidenzintervalls. Dies ist ein Hinweis darauf, dass sich die Verteilungen der modellierten und beobachteten Grundlagedaten sehr ähnlich sind.

#### 11.5.4 Fazit zur Beurteilung der Langzeitsimulationen

Die Beurteilung der hydrologischen Modellierungen mit langen meteorologischen Reihen zeigt, dass sowohl für das gesamte Einzugsgebiet (Kander-Hondrich) als auch für das Teileinzugsgebiet (Kander-Kandersteg) **gute Modellierungsqualität** erzielt werden konnte. Dies geht aus der Beurteilung mit den drei Ansätzen (Gütemasse, direkter Vergleich von gemessenen und modellierten Daten, Vergleich der extremwertstatistischen Auswertungen) deutlich hervor.

Die Modellierung ist für die Station Kander-Hondrich etwas besser gelungen als für die Station Kander-Kandersteg, was insbesondere aus dem direkten Vergleich der modellierten und beobachteten Jahreshochwasser bzw. der mittleren jährlichen Abflussmengen ersichtlich wird (Abbildung 11.3).

Für die Periode vor 1933 wäre eine erneute Kalibrierung des hydrologischen Modells anhand der veränderten meteorologischen Eingabedaten nötig, da durch die veränderte Datenlage vor 1933 die Modellierung eine deutlich schlechtere Qualität aufweist.

Auf Grund dieser Erkenntnisse kann auch für die beiden anderen Teileinzugsgebiete (Kander-Frutigen und Engstlige-Frutigen) eine gute Qualität der hydrologischen Modellierung mit langen meteorologischen Datenreihen erwartet werden. Damit verbunden wird sich auch für die aus den langen modellierten Abflussreihen abgeleiteten Grössen (MQa, HQa, HQ30, HQ100 und HQ300) eine hohe Plausibilität ergeben.

### 11.6 Resultate

Das primäre Ziel der Modellierung der langen Abflussreihen ist es, die Information zum Hochwassergeschehen räumlich und zeitlich zu erweitern. Da die beiden Stationen Kander-Hondrich und Kander-Kandersteg bereits über Abflussmessungen verfügen und deshalb in erster Linie zur Validierung der modellierten Werte verwendet wurden (vgl. Kapitel 11.5), konzentriert sich die Darstellung der Resultate vorwiegend auf die beiden anderen modellierten Teileinzugsgebiete **Kander-Frutigen** und **Engstlige-Frutigen**. Für diese beiden Messstationen konnte die jeweils rund 15 Jahre umfassende Messreihe um mehrere Jahrzehnte verlängert werden.

In diesem Unterkapitel werden zuerst die langen Reihen der modellierten Jahreshochwasser für alle untersuchten Einzugsgebiete verglichen (Kapitel 11.6.1), anschliessend wird auf die aus den modellierten Abflusswerten abgeleiteten Hochwasserstatistiken der beiden Teileinzugsgebiete Kander-Frutigen und Engstlige-Frutigen eingegangen (Kapitel 11.6.2). Schliesslich wird aufgezeigt, wie die zeitliche Erweiterung der Information zum Hochwassergeschehen die abgeschätzten Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Wiederkehrperioden beeinflussen (Kapitel 11.6.3).

### 11.6.1 Vergleich der langen modellierten Abflussreihen

In Abbildung 11.5 sind alle modellierten langen Reihen der Jahreshochwasser im direkten Vergleich dargestellt. Es handelt sich jeweils um die grössten modellierten Tagesmittelwerte jeden Jahres.

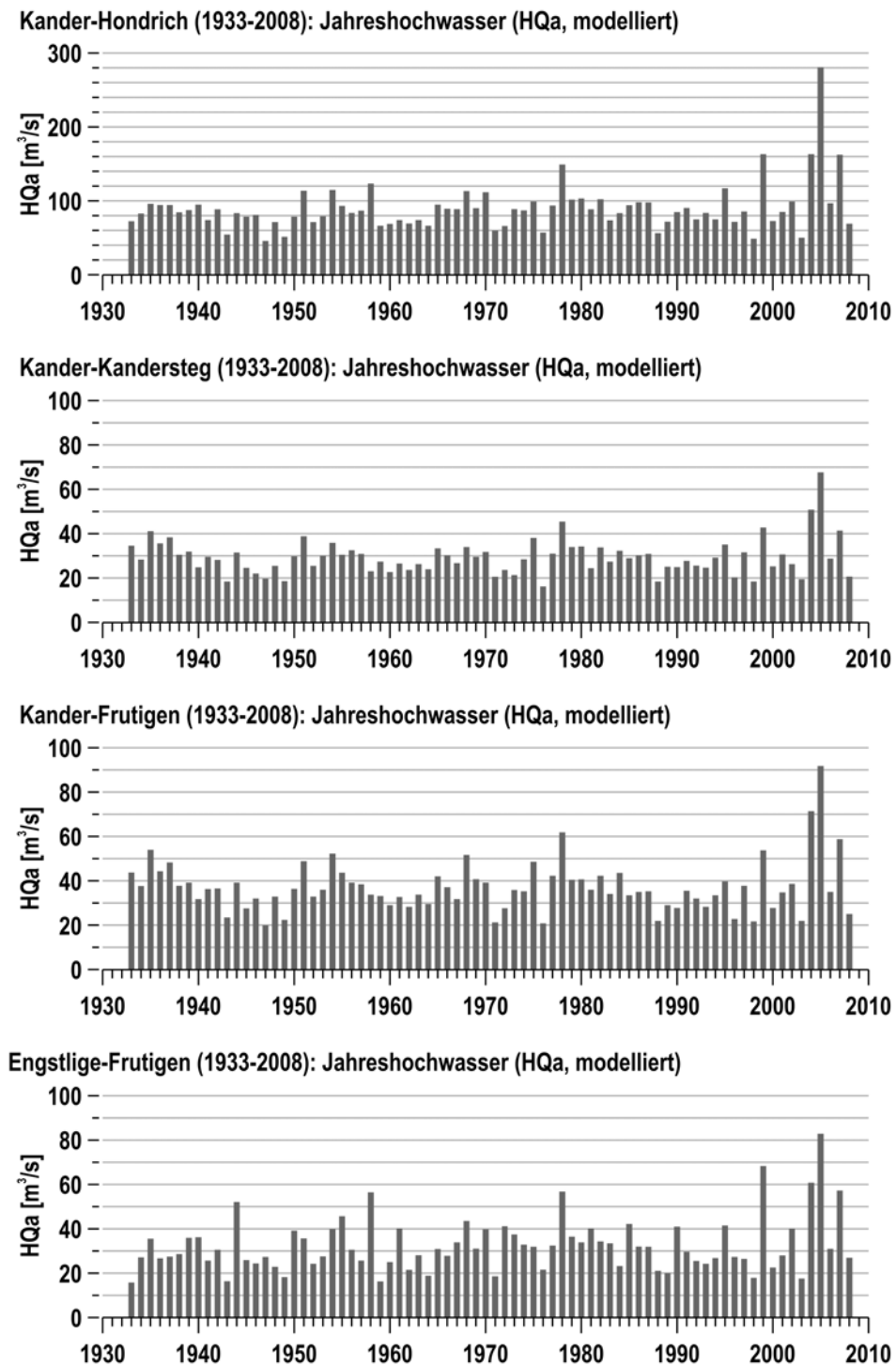


Abbildung 11.5: Gegenüberstellung der modellierten Jahreshochwasser für die vier (Teil-)Einzugsgebiete Kander-Hondrich, Kander-Kandersteg, Kander-Frutigen und Engstlige-Frutigen für den Zeitraum von 1933 bis 2008 (Tagesmittelwerte).

Aus der Zusammenstellung in Abbildung 11.5 wird Folgendes ersichtlich:

- > Bei allen modellierten Reihen der Jahreshochwasser ist eine **hohe zeitliche Übereinstimmung** des Verlaufs zu beobachten. Insbesondere befinden sich bei allen Stationen die grössten Jahreshochwasser am Ende der Modellierungsperiode.
- > Die beiden Teileinzugsgebiete Kander-Frutigen und Kander-Kandersteg weisen das ähnlichste Muster beim Verlauf der Jahreshochwasser auf, was auch anhand der in Tabelle 11.3 angegebenen Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman (vgl. z.B. SCHÖNWIESE 2006) deutlich ersichtlich wird. Da die beiden Messstationen einerseits am gleichen Fluss und andererseits nur in geringer Distanz zueinander liegen, ist diese Ähnlichkeit der Resultate plausibel.
- > Beim Teileinzugsgebiet **Engstlige-Frutigen** lassen sich im Verlauf der über 70 Jahre umfassenden modellierten Reihe mehrere Ereignisse beobachten, welche sich von den Jahreshochwassern der anderen Jahre abheben, jedoch den maximalen Wert von 2005 nicht erreichen (z.B. 1944, 1958, 1999). Im Vergleich zu den drei anderen modellierten Stationen ist die **Variabilität der Jahreshochwasser** für diese Datenreihe **am grössten**, was beim Vergleich der Variationskoeffizienten in Tabelle 11.4 ersichtlich wird.

Tabelle 11.3: Zusammenhang zwischen den langen Zeitreihen der modellierten Jahreshochwasser (vgl. Abbildung 11.5) berechnet anhand des Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman (vgl. z.B. SCHÖNWIESE 2006).

	Kander-Hondrich	Kander-Kandersteg	Kander-Frutigen	Engstlige-Frutigen
Kander-Hondrich	1.000	0.767*	0.799*	0.766*
Kander-Kandersteg		1.000	0.935*	0.524*
Kander-Frutigen			1.000	0.575*
Engstlige-Frutigen				1.000

\* = p-Wert < 0.001, Korrelation hochsignifikant; N = 76

## 11.6.2 Hochwasserstatistik der modellierten Jahreshochwasser

Die Resultate der extremwertstatistischen Auswertungen, welche auf Basis der modellierten Jahreshochwasser (Tagesmittelwerte) der Jahre 1933–2008 durchgeführt wurden, sind in Abbildung 11.6 dargestellt. Während die obere Teilgrafik (a) die Resultate für das Einzugsgebiet Kander-Frutigen enthält, zeigt die untere Teilgrafik (b) die Abschätzungen für das Einzugsgebiet Engstlige-Frutigen. Analog zu den Auswertungen in Kapitel 11.5 wurden die Abschätzungen mit der Software HQ-EX (WASY 2005) durchgeführt.

Es wird ersichtlich, dass für die beiden Einzugsgebiete Hochwasserabflüsse der gleichen Grössenordnung erzielt werden, obschon das Einzugsgebiet Kander-Frutigen (184 km<sup>2</sup>) etwas grösser ist als das Einzugsgebiet Engstlige-Frutigen (145 km<sup>2</sup>). So beträgt der 100-jährliche Hochwasserabfluss (HQ100) für Kander-Frutigen 73.4 m<sup>3</sup>/s und für Engstlige-Frutigen 75.0 m<sup>3</sup>/s. Dies bedeutet andererseits, dass die Engstlige im Hochwasserfall gegenüber der Kander eine verstärkte Abflussbereitschaft zeigt, was an der grösseren Abflusspende ersichtlich wird (vgl. Hq100, Tabelle 11.4). Die berechneten Hochwasserabflussmengen liegen zwischen denjenigen, welche für die beiden Einzugsgebiete Kander-Hondrich und Kander-Kandersteg resultieren (vgl. Abbildung 11.4, Tabelle 11.4)

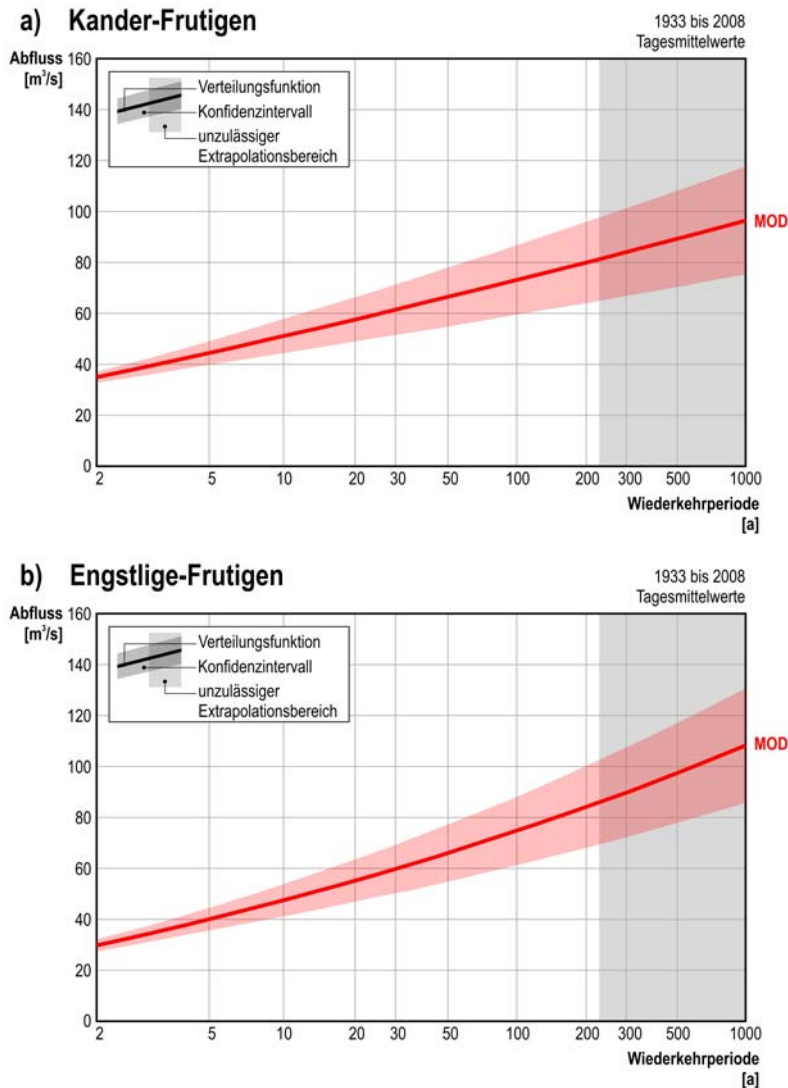


Abbildung 11.6: Extremwertstatistische Auswertung der modellierten Jahreshochwasser (1933-2008).

a: Kander-Frutigen  
b: Engstlige-Frutigen

MOD (rot): modellierte Werte

Dargestellt ist auch das 90%-Konfidenzintervall.

Tabelle 11.4: Hochwasserstatistische Kennwerte der modellierten langen Abflussreihen (Periode 1933-2008) für die vier Einzugsgebiete Kander-Hondrich, Kander-Kandersteg und Kander-Frutigen und Engstlige-Frutigen. (Daten: Jährlich maximale Tagesmittelwerte)

Untersuchte Grösse	Kander-Hondrich	Kander-Kandersteg	Kander-Frutigen	Engstlige-Frutigen
Fläche [km <sup>2</sup> ]	498.0	142.7	183.1	145.2
HQ30 [m <sup>3</sup> /s]	164.9	40.3	61.8	60.1
HQ100 [m <sup>3</sup> /s]	191.7	43.4	73.4	75.0
HQ300 [m <sup>3</sup> /s]	216.4	45.6	84.4	90.2
Hq30 [m <sup>3</sup> /(s·km <sup>2</sup> )]	0.33	0.28	0.34	0.41
Hq100 [m <sup>3</sup> /(s·km <sup>2</sup> )]	0.38	0.31	0.40	0.52
Hq300 [m <sup>3</sup> /(s·km <sup>2</sup> )]	0.43	0.32	0.46	0.62
Standardabweichung HQa [m <sup>3</sup> /s]	32.3	8.0	11.6	12.2
MHQ [m <sup>3</sup> /s]	89.9	29.3	37.1	32.5
Variationskoeffizient HQa [-]	0.359	0.271	0.313	0.374

### 11.6.3 Auswirkung der Reihenverlängerung auf die Hochwasserstatistik

Analog zu den Auswertungen in Kapitel 9.5 wurde für die modellierten Reihen der beiden Einzugsgebiete **Kander-Frutigen** und **Engstlige-Frutigen** die Entwicklung der Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit während dem letzten Jahrhundert untersucht. Im Gegensatz zu Kapitel 9.5, wo die Auswertungen anhand von absoluten Spitzenabflusswerten durchgeführt wurden, wurden an dieser Stelle Tagesmittelwerte des Abflusses verwendet. Dazu wurde die Allgemeine Extremwertverteilung an alle Perioden mit mindestens 30 Jahren Umfang und festem Ausgangsjahr 1933 (Abbildung 11.7, a und c) sowie für alle 30 Jahre umfassenden Zeitfenster (Abbildung 11.7, b und d) an die entsprechenden Jahreshochwasser angepasst. Aus der geschätzten Verteilungsfunktion wurden jeweils die Hochwasserabflüsse mit Wiederkehrperioden von 30, 100 und 300 Jahren abgeleitet und am Ende des untersuchten Zeitraumes in die Grafik eingetragen (Methode vgl. Kapitel 9.5).

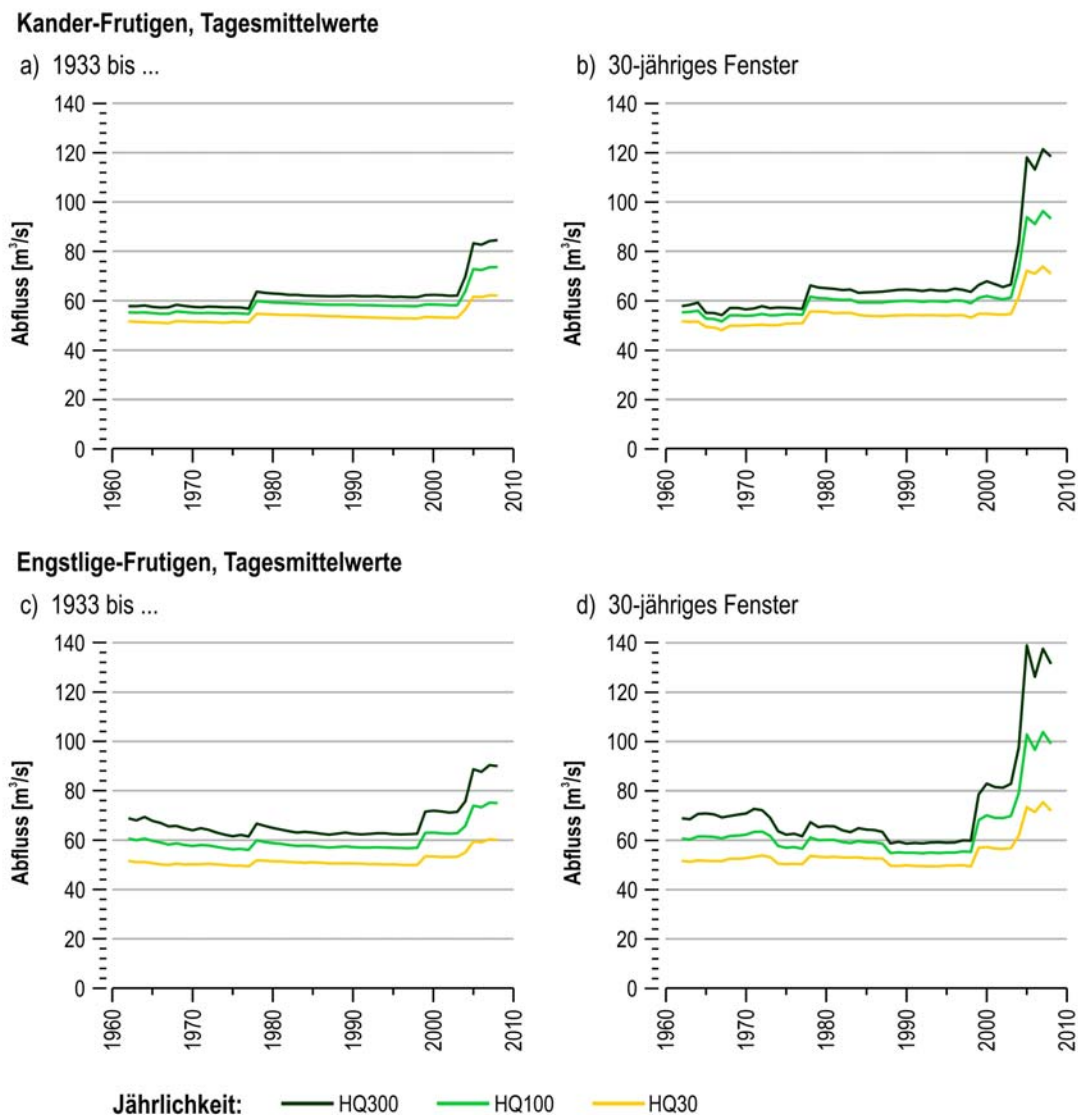


Abbildung 11.7: Entwicklung der Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit für die Stationen Kander-Frutigen (a, b) und Engstlige-Frutigen (c, d) für Perioden unterschiedlicher Länge. Dargestellt sind die Hochwasserabflüsse mit 30-, 100- und 300-jährlicher Wiederkehrperiode (Daten: Modellierte Jahreshochwasser, Periode 1933-2008, Tagesmittelwerte).

Aus dieser Zusammenstellung wird ein sehr ähnliches Bild ersichtlich, wie bei den gemessenen Jahreshochwassern (Abflussspitzen) von Kander-Hondrich und Kander-Kandersteg (vgl. Abbildung 9.1): Die **Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit wurden in den letzten zehn Jahren deutlich grösser**. Ausschlaggebend ist in diesem Zusammenhang vor allem das extreme Hochwasser vom August 2005. Das bedeutet, dass die Hochwasserabschätzung, welche auf Basis der letzten 30 Jahre durchgeführt wurde und somit den Auswertungen der gemessenen Daten ähnlich ist, deutlich höhere Werte liefert, als die Hochwasserabschätzung für die langjährige Abflussreihe.

Anhand von Tabelle 11.5 wird dieser Sachverhalt verdeutlicht. In dieser Zusammenstellung sind für die beiden Stationen Kander-Frutigen und Engstlige-Frutigen die aus den unterschiedlichen Perioden geschätzten Hochwasserabflüsse verschiedener Jährlichkeit eingetragen. Die ausgewerteten Perioden umfassen die Jahre 1933-2008 sowie 1979-2008.

Aus Tabelle 11.5 geht zudem hervor, dass die Hochwasserabschätzungen, welche auf Basis der Daten der letzten drei Jahrzehnte (1979-2008) durchgeführt werden, die Abschätzungen aus den langjährigen Messreihen (1933-2008) deutlich übertreffen. Wie dieser Tabelle auch entnommen werden kann, wird die prozentuale Veränderung zwischen den beiden entsprechenden Werten, mit zunehmender Wiederkehrperiode grösser. Die prozentuale Zunahme liegt für die beiden Einzugsgebiete jeweils in der gleichen Grössenordnung und beträgt für den 100-jährlichen Hochwasserabfluss (HQ100) +27% (Kander-Frutigen) bzw. +32% (Engstlige-Frutigen). Die geringeren Zunahmen bzw. die leichte Abnahme von -3% bei der Station Kander-Frutigen bei den häufigeren Hochwasserabflüssen ist zudem ein Hinweis darauf, dass die Variabilität der Hochwasserabflussmengen in den letzten Jahren deutlich zugenommen hat.

Tabelle 11.5: Auswirkungen der ausgewerteten Periode auf die Hochwasserabschätzung von Kander-Frutigen bzw. Engstlige-Frutigen.

Untersuchte Grösse	Wiederkehrperiode	Kander-Frutigen			Engstlige-Frutigen		
		1933-2008	1979-2008	Veränderung	1933-2008	1979-2008	Veränderung
HQ2.33	2.33 Jahre	36.9 m <sup>3</sup> /s	35.9 m <sup>3</sup> /s	<b>-3%</b>	31.8 m <sup>3</sup> /s	32.7 m <sup>3</sup> /s	<b>+3%</b>
HQ30	30 Jahre	62.1 m <sup>3</sup> /s	71.0 m <sup>3</sup> /s	<b>+14%</b>	60.1 m <sup>3</sup> /s	72.0 m <sup>3</sup> /s	<b>+20%</b>
HQ100	100 Jahre	73.7 m <sup>3</sup> /s	93.2 m <sup>3</sup> /s	<b>+27%</b>	75.0 m <sup>3</sup> /s	99.1 m <sup>3</sup> /s	<b>+32%</b>
HQ300	300 Jahre	84.5 m <sup>3</sup> /s	118.4 m <sup>3</sup> /s	<b>+40%</b>	90.1 m <sup>3</sup> /s	131.4 m <sup>3</sup> /s	<b>+46%</b>

## 11.7 Fazit

Für die **hydrologische Modellierung der langen Abflussreihen** unter Anwendung von langen meteorologischen Datenreihen konnte **gute Qualität** erzielt werden. Sowohl für die Jahreshochwasser als auch für die mittleren jährlichen Abflussmengen zeigt die Validierung mit den langen Abflussmessreihen gute Übereinstimmung zwischen modellierten und beobachteten Werten. Dies obschon die Modellierungen mit nur zwei meteorologischen Parametern (Temperatur, Niederschlag), mit einer geringen Anzahl Stationen und in täglicher Auflösung durchgeführt wurde. Aus den Resultaten der Validierung wird ersichtlich, dass die Qualität der Modellierung für das (kleinere) Teileinzugsgebiet Kander-Kandersteg weniger gut gelungen ist, als für das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich.



Die **zeitliche und räumliche Erweiterung** der hochwasserhydrologischen Informationen zeigt die folgenden Ergebnisse:

- > Die Hochwasserabflüsse sind an allen Stationen der Kander und der Engstlige in den letzten Jahren deutlich grösser geworden. In der Phase zwischen 1933 und 2008 stellt bei allen Teileinzugsgebieten das Hochwasser vom August 2005 das deutlich grösste Jahreshochwasser dar.
- > Für die Engstlige ist gegenüber der Kander eine höhere Variabilität der jährlich grössten Hochwasserabflussmenge zu beobachten; ebenso traten im Verlauf der Periode von 1933 bis 2008 immer wieder grosse Jahreshochwasser auf, die in den anderen Teileinzugsgebieten nicht in vergleichbarer Grösse festgestellt werden konnten.
- > Die Hochwasserabschätzungen, welche anhand der Daten der letzten 20 bis 30 Jahre durchgeführt werden und den Zeitraum der Messreihen abdecken, liegen deutlich über denjenigen, welche aus den verlängerten Reihen abgeleitet wurden. Die Abweichung beträgt je nach Wiederkehrperiode bis über +50%.



## 12 Schlussfolgerungen zu Teil II

Aus den historischen Untersuchungen sowie aus der Analyse und Modellierung der langen hydrologischen und klimatologischen Datenreihen ergeben sich die folgenden Schlussfolgerungen:

- > Die Untersuchungen zu den **historischen Hochwassern** im Einzugsgebiet der Kander von BÜTSCHI (2008) zeigen, dass während den letzten Jahrhunderten grössere Variationen der Häufigkeit und des Ausmasses der Hochwasserabflüsse festgestellt werden können. Die Entwicklung in den letzten Jahren weist darauf hin, dass die Häufigkeit der extremen Hochwasser an der Kander deutlich zugenommen hat. Die extremen Hochwasserabflüsse der letzten Jahre stellen jedoch schweizweit kein aussergewöhnliches Phänomen dar. Auch in anderen Einzugsgebieten der Schweiz lassen sich diese Veränderungen, welche auf ein natürliches zyklisches Muster hinweisen, erkennen.
- > Die **Trendanalysen** verschiedener klimatischer wie auch hydrologischer Kenngrössen, die aus den über 100 Jahren umfassenden Messreihen abgeleitet wurden, hat gezeigt, dass die zu beobachtenden Entwicklungen im Einzugsgebiet Kander-Hondrich gut mit denjenigen aus gesamtschweizerischen Untersuchungen übereinstimmen.

Aus diesen Auswertungen geht zudem hervor, dass **im Winter** ein deutlich erkennbarer Trend zu grösseren Niederschlagssummen und erhöhten mittleren Abflussmengen festzustellen ist. Auch **im Sommer** lassen sich vermehrt grössere Niederschlagssummen und Starkniederschlagsmengen beobachten, welche sich in dieser Jahreszeit aber ausschliesslich in grösseren Hochwasserabflüssen äussern. Im Gegensatz dazu weist in dieser Jahreszeit der mittlere Abfluss im Untersuchungsgebiet einen leicht rückläufigen Trend auf. Daneben lässt sich anhand der Trends der Abflussquantile feststellen, dass im Frühling und im Herbst die Abflussverhältnisse ausgeglichener wurden.

- > Bei der Veränderung der Kenngrössen zum Niederschlagsgeschehen während des letzten Jahrhunderts kann insbesondere seit den 1990er Jahren eine Zunahme der **Starkniederschlagsmengen** beobachtet werden. Allerdings beschränkt sich diese Zunahme ausschliesslich auf die mehrtägigen Niederschlagssummen. Die gleiche Entwicklung lässt sich auch für die Hochwasser nachweisen: Insbesondere seit den 1990er Jahren ist eine starke Zunahme bei den **seltenen Hochwasserabflüssen** unterschiedlicher Wiederkehrperiode zu beobachten.

Die hydrologischen Modellierungen mit PREVAH unter Anwendung der langen meteorologischen Datenreihen führen zu folgenden Ergebnissen:

- > Wie die **Beurteilung der Modellierungsqualität** mit verschiedenen Ansätzen zeigt, ist die hydrologische Modellierung sowohl für die Simulation der Jahreshochwasser als auch der mittleren jährlichen Abflussmengen in guter Qualität gelungen. Dies obschon die Eingabedaten bezüglich Anzahl verwendeter meteorologischer Parameter sowie bezüglich Umfang der eingesetzten Stationen stark reduziert wurden. Die Modellqualität konnte mit wenigen Ausnahmen für alle Jahre der modellierten Periode aufrecht erhalten werden.

- > Unter Einsatz der hydrologischen Modellierung mit langen meteorologischen Datenreihen konnte die **raum-zeitliche Information** zu den hochwasserhydrologischen Verhältnissen im Einzugsgebiet Kander-Hondrich zusätzlich **erweitert** werden.
- > Die Entwicklung der jährlich grössten Abflussmenge zeigt für alle untersuchten Einzugsgebiete das gleiche Muster; die grössten **Jahreshochwasser** traten in den letzten Jahren auf. Insbesondere an der Engstlige sind seit 1933 immer wieder grössere Hochwasserabflüsse aufgetreten, welche aber das Ausmass von 2005 nie erreicht haben.
- > Die **Hochwasserabschätzungen**, welche aus den Jahreshochwassern der letzten 30 Jahre abgeleitet werden, liefern Werte die deutlich über den Hochwasserabschätzungen der langen modellierten Abflussreihen der Jahre 1933-2008 liegen. Die Abweichungen können je nach Wiederkehrperiode bis über 50% betragen.

# Teil III

## **Die Hydrologie der Kander – heute**

Analyse der aktuellen hochwasserhydrologischen  
Verhältnisse und ihrer räumlichen Variabilität

## Übersicht Teil III

Dieser Teil der Arbeit umfasst die Untersuchungen und Resultate zu den aktuellen hochwasserhydrologischen Verhältnissen, welche auf unterschiedlicher räumlicher Skala und mit verschiedenen methodischen Ansätzen untersucht wurden:

- > Für die elf mesoskaligen Teileinzugsgebiete sowie für das gesamte Einzugsgebiet Kander-Hondrich wurden Hochwasserabschätzungen anhand von extremwertstatistischen Auswertungen modellierter bzw. beobachteter Abflussdaten sowie mit HQx\_meso\_CH durchgeführt. Die entsprechenden Resultate und der Vergleich verschiedener Methoden sind in **Kapitel 13: Hochwasserabschätzung für die mesoskaligen Teileinzugsgebiete** enthalten.
- > Auf die Resultate der Hochwasserabschätzungen mit drei methodischen Ansätzen für die kleinen Teileinzugsgebiete wird in **Kapitel 14: Hochwasserabschätzung für 99 kleine Teileinzugsgebiete** eingegangen. Das aus den Auswertungen resultierende Muster ermöglicht eine Beurteilung der räumlichen Variabilität der hochwasserhydrologischen Verhältnisse im gesamten Untersuchungsgebiet.
- > Mit Hilfe von digitalen Grundlagendaten zu verschiedenen Gebietseigenschaften wurden die dominierenden Abflussprozesse für das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich flächendeckend und räumlich hoch aufgelöst modelliert (vgl. **Kapitel 15: Flächendeckende Modellierung der Abflussprozesse**). Dadurch gelang es, die Information zu den hochwasserhydrologischen Verhältnissen räumlich weiter aufzulösen. Anhand der auf Basis der kleinen Teileinzugsgebiete räumlich und inhaltlich generalisierten Resultate wurde ein Vergleich mit den Hochwasserabschätzungen aus Kapitel 14 möglich.
- > In **Kapitel 16: Synthese – Teil III** wird einerseits auf die räumliche Variabilität der hochwasserhydrologischen Verhältnisse, welche sich auf den verschiedenen räumlichen Skalen zeigen, eingegangen und andererseits mögliche Erklärungen für die verschiedenen Abweichungen gegeben.

# 13 Hochwasserabschätzung für die mesoskaligen Teileinzugsgebiete

Dieses Kapitel beleuchtet die aktuellen hochwasserhydrologischen Verhältnisse der mesoskaligen Teileinzugsgebiete sowie des Gesamteinzugsgebietes Kander-Hondrich. Nach dem einleitenden Kapitel 13.1 wird in Kapitel 13.2 das gewählte Vorgehen beschrieben. In Kapitel 13.3 sind die Resultate und die Gegenüberstellungen der Hochwasserabschätzungen aus den verschiedenen Methoden dargestellt. Das abschliessende Kapitel 13.4 zeigt die Entwicklung der Hochwasserabflüsse entlang des Hauptflusses, auf welchen die Arbeiten im Projekt Kander.2050 fokussiert sind.

## 13.1 Ausgangslage

Im untersuchten Einzugsgebiet sind nur wenige Abflussmessstationen mit langen Messreihen verfügbar, für welche zuverlässige Hochwasserabschätzungen mit Hilfe von extremwertstatistischen Auswertungen erstellt werden können. Zudem decken die verfügbaren Messreihen oft unterschiedliche Zeiträume ab. Wie bereits in Kapitel 11 besprochen, lassen sich deshalb alleine auf Grund der verfügbaren Abflussmessreihen keine vergleichbaren und gut abgestützten Aussagen über die räumlich differenzierten hochwasserhydrologischen Verhältnisse machen.

Für jedes Teileinzugsgebiet wurden deshalb **modellierte Abflussdaten** (für den Zeitraum 1984-2005) extremwertstatistisch ausgewertet. Wie aus Kapitel 6.1.3 bzw. aus Kapitel 3.1.2 hervorgeht, ergibt sich dieser Zeitraum auf Grund der Verfügbarkeit der zeitlich hoch aufgelösten meteorologischen Daten, welche die Eingabegrößen für die hydrologische Modellierung bilden. Bei Anwendung von meteorologischen und hydrologischen Datenreihen aus diesem Zeitraum sind zudem die Resultate der Auswertungen in Kapitel 8.7 und Kapitel 9.5 zu beachten. Diese zeigen deutlich auf, dass die Periode von 1984-2005 im Berner Oberland bzw. im untersuchten Einzugsgebiet durch intensive Starkniederschläge und Hochwasserabflüsse gekennzeichnet ist. Hochwasserabschätzungen, welche auf Grund dieser Periode durchgeführt werden, liegen deutlich über denjenigen, welche aus langjährigen Messreihen basieren.

Unabhängig der Datenlage wurde zudem eine Hochwasserabschätzung mit HQx\_meso\_CH (BARBEN 2003) durchgeführt. Mit dem Vergleich von extremwertstatistischen Auswertungen beobachteter Abflussdaten für die gleiche Periode konnte zudem für einzelne Teileinzugsgebiete und das Gesamteinzugsgebiet aufgezeigt werden, wie gut die Übereinstimmung der Hochwasserabschätzungen aus modellierten und beobachteten Werten ist. Die räumlichen Muster im Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich, welche sich aus den Ergebnissen für die Abschätzungen des 100-jährlichen Hochwassers ableiten lassen, wurden miteinander verglichen. Anhand der berechneten Abweichungen zwischen den Ergebnissen der einzelnen Methoden lassen sich die Unsicherheiten, welche bei der Bestimmung seltener Hochwasserabflüsse vorhanden sind, quantifizieren.

**Ziel** der durchgeführten Hochwasserabschätzungen ist es einerseits, hydrologische Berechnungsgrundlagen für die Arbeiten im Projekt Kander.2050 bereitzustellen und andererseits Aussagen über das räumliche Muster der hochwasserhydrologischen Verhältnisse zu machen.

## 13.2 Vorgehen

### 13.2.1 Verwendete Methoden

Zur räumlich differenzierten Beurteilung der hochwasserhydrologischen Verhältnisse im untersuchten Einzugsgebiet Kander-Hondrich wurden für alle elf in Kapitel 2.2 bestimmten mesoskaligen Teileinzugsgebiete Hochwasserabschätzungen durchgeführt. Die dazu verwendeten und nachfolgend erläuterten Methoden wurden gemäss Kapitel 5.1 (Abbildung 5.1) auf Grund der Verfügbarkeit der hydrologischen und meteorologischen Daten gewählt:

- > **ExAwOBS** – Extremwertstatistische Auswertung beobachteter Abflussdaten: Für alle Abflussmessreihen mit mehr als 30 Jahren Umfang können gemäss DVWK (1999) zuverlässige Hochwasserabschätzungen mit Hilfe extremwertstatistischer Auswertungen durchgeführt werden. Im untersuchten Einzugsgebiet erfüllen die fünf Stationen Kander-Gasteretal, Kander-Kandersteg, Kander-Hondrich, Allenbach-Adelboden, und Gonerewasser-Kiental diese Voraussetzung. Allerdings ist zu beachten, dass für die beiden Messreihen von Kander-Gasteretal und Gonerewasser-Kiental die Messungen ab 1982 nicht mehr verfügbar sind und die entsprechenden Auswertungen von den aktuell vorherrschenden Hochwasserverhältnissen deutlich abweichen können (vgl. Kapitel 3.2 sowie WEHREN & WEINGARTNER 2007). Aus diesem Grund kann ein aussagekräftiger räumlicher Vergleich der hochwasserhydrologischen Verhältnisse nicht anhand von Messreihen, welche unterschiedliche Zeiträume abdecken, durchgeführt werden. Die in diesem Kapitel zur Beurteilung der Hochwasserverhältnisse verwendeten Hochwasserabschätzungen beschränken sich deshalb auf die gemessenen Abflussdaten der Periode von 1984-2005 und damit auf die Messreihen der folgenden drei Stationen: **Kander-Hondrich, Kander-Kandersteg** und **Allenbach-Adelboden**. Durch die Berücksichtigung dieser Periode können die Resultate auch mit den Auswertungen der modellierten Abflussdaten verglichen werden (vgl. unten). Die extremwertstatistischen Auswertungen für sämtliche verfügbaren Messreihen mit mehr als 30 Jahren Umfang im Einzugsgebiet Kander-Hondrich können WEHREN & WEINGARTNER (2007) entnommen werden.
- > **ExAwMOD** – Extremwertstatistische Auswertung modellierter Abflussdaten: Für diejenigen Teileinzugsgebiete, für welche im Zeitraum zwischen 1983 und 2005 **Abflussmessreihen von wenigen Jahren** verfügbar sind, wurden mit dem hydrologischen Modell PREVAH zeitlich hochaufgelöste Modellierungen durchgeführt (vgl. Kapitel 6.1). Im Einzugsgebiet Kander-Hondrich sind dies die folgenden Teileinzugsgebiete: **Kander-Kandersteg, Kander-Frutigen, Kander-Hondrich, Allenbach-Adelboden, Engstlige-Adelboden** und **Engstlige-Frutigen**. Für diese Teilräume wurde das hydrologische Modell jeweils kalibriert (vgl. Kapitel 6.2) und für den Zeitraum von 1983 bis 2005 eingesetzt. Weil für die Hochwasserabschätzungen das Initialisierungsjahr der Modellierung (1983) nicht berücksichtigt wurde, konnte schliesslich für jedes Teileinzugsgebiet die modellierte Abflussreihe für den Zeitraum von 1984 bis 2005 extremwertstatistisch ausgewertet werden.

Für diejenigen Teileinzugsgebiete, für welche **keine Abflussmessungen** verfügbar sind und für welche deshalb das hydrologische Modell nicht kalibriert werden konnte, wurde zur Bestimmung der Modellparameter der **Regionalisierungsansatz** von VIVIROLI (2007) angewendet (vgl. Kapitel 6.3). Für die folgenden Teileinzugsgebiete wurden mit dieser Methode hydrologische Modellierungen durchgeführt: **Kander-Gasteretal, Kander-Chluse, Chie-**



**ne-Kien, Spiggebach-Kiental, Gornerewasser-Kiental** und **Suld-Mülenen**. Analog zu den kalibrierten Teileinzugsgebieten wurde der Zeitraum von 1983 bis 2005 hydrologisch modelliert; die Hochwasserabschätzungen basieren auf den extremwertstatistischen Auswertungen der modellierten Abflussreihen für den Zeitraum von 1984-2005.

Anhand der extremwertstatistischen Auswertungen der mit kalibrierten bzw. regionalisierten Modellparametern modellierten Abflussdaten für den Zeitraum von 1984-2005 konnte eine flächendeckende Datengrundlage erstellt werden, welche die hochwasserhydrologischen Verhältnisse im untersuchten Einzugsgebiet aufzeigt.

- > Hochwasserabschätzungen mit **HQx\_meso\_CH**: Unabhängig der Verfügbarkeit hydrologischer Daten wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchung für sämtliche Teileinzugsgebiete eine Hochwasserabschätzung mit HQx\_meso\_CH (BARBEN 2003, SPREAFICO ET AL. 2003) durchgeführt. Die daraus resultierende flächendeckend verfügbare Datengrundlage kann als Vergleichsgrösse für die extremwertstatistischen Abschätzungen mit Hilfe der modellierten und gemessenen Abflussreihen (ExAwOBS, ExAwMOD) verwendet werden.

Der angestrebte räumliche Vergleich, welcher die Beurteilung der hochwasserhydrologischen Verhältnisse ermöglichen soll, muss wie bereits erwähnt auf flächendeckend verfügbaren und methodisch homogenen Datengrundlagen basieren. Mit den Hochwasserabschätzungen anhand der extremwertstatistischen Auswertungen der modellierten Abflussreihen sowie den Hochwasserabschätzungen mit HQx\_meso\_CH liegen für alle Teileinzugsgebiete je zwei Werte vor, welche diese Voraussetzungen erfüllen. Wie die Untersuchungen von BARBEN (2003) und VIVIROLI (2007) zudem zeigen, liefern sowohl HQx\_meso\_CH sowie die extremwertstatistischen Auswertungen der modellierten Abflussdaten grundsätzlich zuverlässige Hochwasserabschätzungen. Dadurch wird es möglich, dass die flächendeckend verfügbaren Resultate aus beiden Ansätzen gut miteinander verglichen werden können (vgl. Kapitel 13.3.3).

### 13.2.2 Beispiel: Resultate für das Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen

Anhand des Beispiels für das Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen soll das Vorgehen bei den Hochwasserabschätzungen sowie der Methoden-Vergleich, welcher für alle beurteilten Teilräume durchgeführt wurde, illustriert werden. Die Resultate für alle Teileinzugsgebiete sowie für das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich sind Anhang C zu entnehmen.

Für das Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen sind seit 1995 Abflussmessungen verfügbar. Die Messreihe ist mit 15 Jahren Umfang jedoch zu kurz, um statistisch aussagekräftige Auswertungen durchführen zu können. Aus diesem Grund wurde für dieses Teileinzugsgebiet das hydrologische Modell für die Periode 1998-2002 kalibriert, für die übrigen verfügbaren Jahre validiert (vgl. Kapitel 6.5) und anschliessend für die hydrologische Modellierung des Zeitraumes 1983-2005 verwendet. Dadurch konnte die ursprünglich vorhandene Datengrundlage um über zehn Jahre verlängert werden. Die modellierten Abflussdaten wurden nach der von DVWK (1999) empfohlenen Methode mit Hilfe der Software HQ-EX (WASY 2005) für den Zeitraum 1984-2005 extremwertstatistisch ausgewertet. In Abbildung 13.1 sind die entsprechenden Resultate dargestellt bzw. in Tabelle 13.1 numerisch aufgeführt.

Die neben den extremwertstatistischen Auswertungen durchgeführten Hochwasserabschätzungen mit HQx\_meso\_CH (vgl. Kapitel 13.3.2) sind in Tabelle 13.2 enthalten. Die resultierenden Werte für den 100-jährlichen Hochwasserabfluss werden auch an den hellen Balken ersichtlich. HQx\_meso\_CH ermöglicht Hochwasserabschätzungen mit fünf verschiedenen Modellen. Während

der Median aus den fünf entsprechenden Abschätzungen als definitive Abschätzung verwendet wird (im Beispiel von Kander-Frutigen die Abschätzung mit Kölla meso: 87.1 m<sup>3</sup>/s) wird die Streuung durch den Bereich definiert, welcher durch alle fünf Abschätzungen des 100-jährlichen Hochwasserabflusses abgedeckt werden. Dieser Streubereich kann auch mit einem Konfidenzintervall verglichen werden (vgl. BARBEN 2003).

In Abbildung 13.1 sind zum Vergleich der Resultate aus beiden Methoden sowohl die **extremwertstatistische Auswertung der modellierten Daten** als auch die fünf **Abschätzungen** des 100-jährlichen Hochwasserabflusses mit **HQx\_meso\_CH** als Punkte eingetragen; der Bereich, welcher von den fünf Abschätzungen abgedeckt wird, ist mit einem grauen Balken dargestellt.

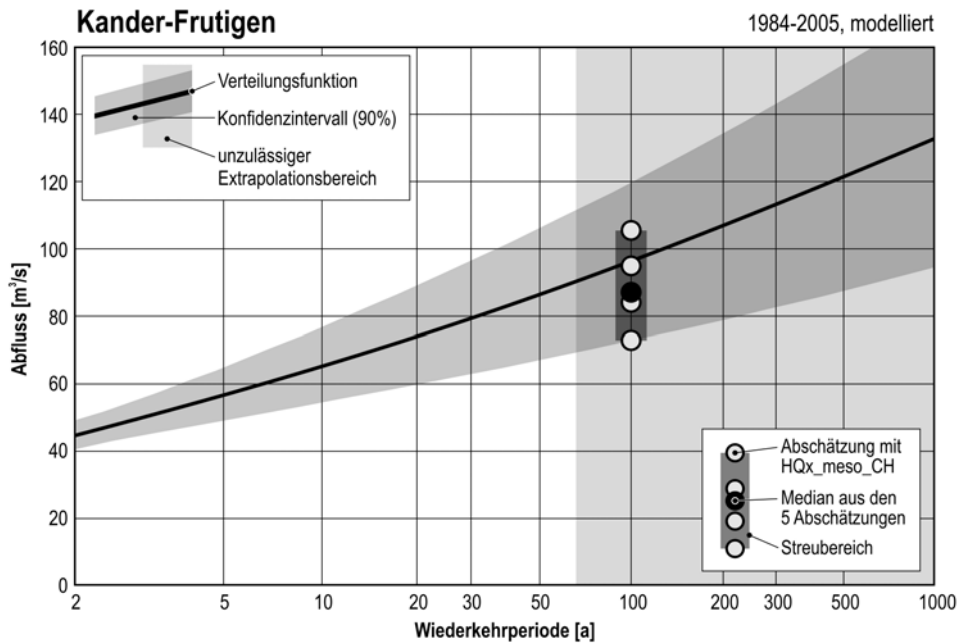


Abbildung 13.1: Beispiel Kander-Frutigen: Extremwertstatistische Hochwasserabschätzung anhand modellierter Daten (Periode: 1984-2005) und Hochwasserabschätzung mit HQx\_meso\_CH. Die numerischen Angaben dieser Abschätzungen sind in Tabelle 13.1 bzw. in Tabelle 13.2 aufgeführt.

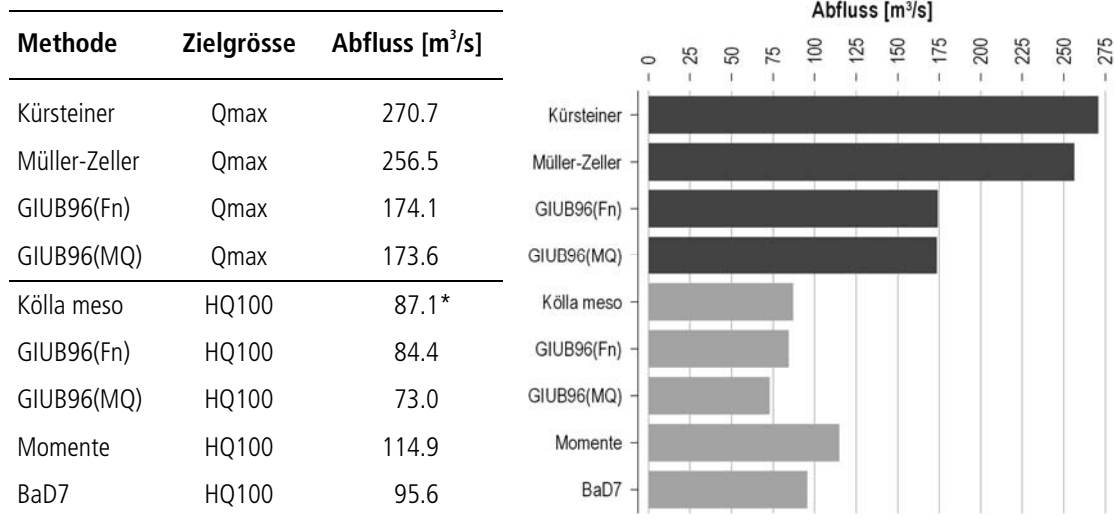
Tabelle 13.1: Extremwertstatistische Hochwasserabschätzung modellierter Abflussdaten (ExAwMod) für das Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen. Periode: 1984-2005.

Wiederkehrperiode [a]	unteres Konfidenzintervall [m <sup>3</sup> /s]	Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	oberes Konfidenzintervall [m <sup>3</sup> /s]
2	40.6	44.9	49.2
30	62.9	79.7	96.5
100	72.7	96.2	119.7
300	82.5	112.7	143.0
500	87.3	121.0	154.7

Verteilungsfunktion: Log-Pearson-3; Parameterschätzmethode: Maximum-Likelihood

Aus dieser Zusammenstellung geht hervor, dass für die Station Kander-Frutigen gute Übereinstimmung der Resultate aus beiden Methoden auftritt. Während für die extremwertstatistische Auswertung der modellierten Abflussdaten ein HQ100 von 96.2 m<sup>3</sup>/s resultiert (vgl. Tabelle 13.1), liefert HQx\_meso\_CH für die gleiche Zielgrösse einen Wert von 87.1 m<sup>3</sup>/s (vgl. Tabelle 13.2), was einem Unterschied von etwa 10% entspricht. Der Streubereich von HQx\_meso\_CH unterschätzt denjenigen der extremwertstatistischen Hochwasserabschätzung leicht.

Tabelle 13.2: Hochwasserabschätzungen für das Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen mit HQx\_meso\_CH (Dunkle Balken: Abschätzung für Qmax; Helle Balken: Abschätzung für HQ100)



\* = Median aus allen fünf Abschätzungen für das HQ100

### 13.3 Räumliches Muster der Hochwasserhältnisse

In diesem Unterkapitel werden für jede der drei durchgeführten Hochwasserabschätzungen (ExAw-OBS, ExAwMOD, HQx\_meso\_CH) die Resultate und das daraus abgeleitete räumliche Muster aufgezeigt. Während zuerst auf die Resultate der extremwertstatistischen Auswertungen der modellierten Abflussdaten (ExAwMOD, Kapitel 13.3.1) eingegangen wird, werden anschliessend diese Ergebnisse mit den Abschätzungen aus HQx\_meso\_CH verglichen (Kapitel 13.3.2). Abschliessend werden die Resultate der beiden Methoden den extremwertstatistischen Hochwasserabschätzungen aus den gemessenen Abflussdaten (ExAwOBS) gegenübergestellt.

Anhand dieses Methodenvergleichs kann einerseits die Unsicherheit der Abschätzungen für ein einzelnes Einzugsgebiet quantitativ bestimmt werden. Andererseits kann dadurch auch das räumliche Muster der hochwasserhydrologischen Verhältnisse plausibilisiert werden.

#### 13.3.1 Extremwertstatistische Auswertung modellierter Abflussdaten

Abbildung 13.2 zeigt in der Übersicht die Resultate der extremwertstatistischen Auswertungen der **modellierten Abflussdaten** (ExAwMOD), welche sowohl mit kalibrierten als auch mit regionalisierten hydrologischen Modellen bereitgestellt wurden (vgl. Kapitel 13.2.1). Die für alle elf mesoskaligen Teileinzugsgebiete sowie das gesamte Einzugsgebiet ausgewertete Periode umfasst die Jahre 1984-2005. Bei den Übersichtskarten in Abbildung 13.2 ist zu berücksichtigen, dass die

Hochwasserabschätzungen immer für das gesamte Teileinzugsgebiet durchgeführt wurden. Die dargestellte Abflussspende bezieht sich deshalb auf die gesamte Einzugsgebietsfläche. In der Übersichtskarte in Abbildung 13.2 sind die flächenhaft dargestellten Werte jeweils durch die abgeschätzten Abflussspenden der oberliegenden Teileinzugsgebiete überlagert. Die räumliche Gliederung der Teileinzugsgebiete wird aus Anhang A bzw. aus Kapitel 2.2 ersichtlich.

In Abbildung 13.2 zeigt sich beim **räumlichen Muster der Hochwasserabflussspenden** für alle Wiederkehrperioden (Hq30 bis Hq300, a bis c) ein ähnliches Bild: Die Teileinzugsgebiete der Suld und der Chiene (vgl. Abbildung 2.3) weisen durchwegs höhere Abflussspenden auf als diejenigen der Engstlige-Frutigen und Kander-Frutigen. Sowohl bei der Engstlige als auch bei der Kander fällt aber auf, dass die Teilräume im oberen Bereich der Teileinzugsgebiete (Engstlige-Adelboden und Allenbach-Adelboden bzw. Kander-Chluse und Kander-Gasteretal) ebenfalls höhere Hochwasserabflussspenden aufweisen als das gesamte Einzugsgebiet. Für das Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen wird zudem erkennbar, dass die Unterschiede zwischen den berechneten Abflussspenden der verschiedenen Teilräume nicht so stark ausgeprägt sind, wie beim Teileinzugsgebiet Engstlige-Frutigen. Die höchsten Hochwasserabflussspenden sind bei allen dargestellten Wiederkehrperioden beim Teileinzugsgebiet Allenbach-Adelboden zu beobachten.

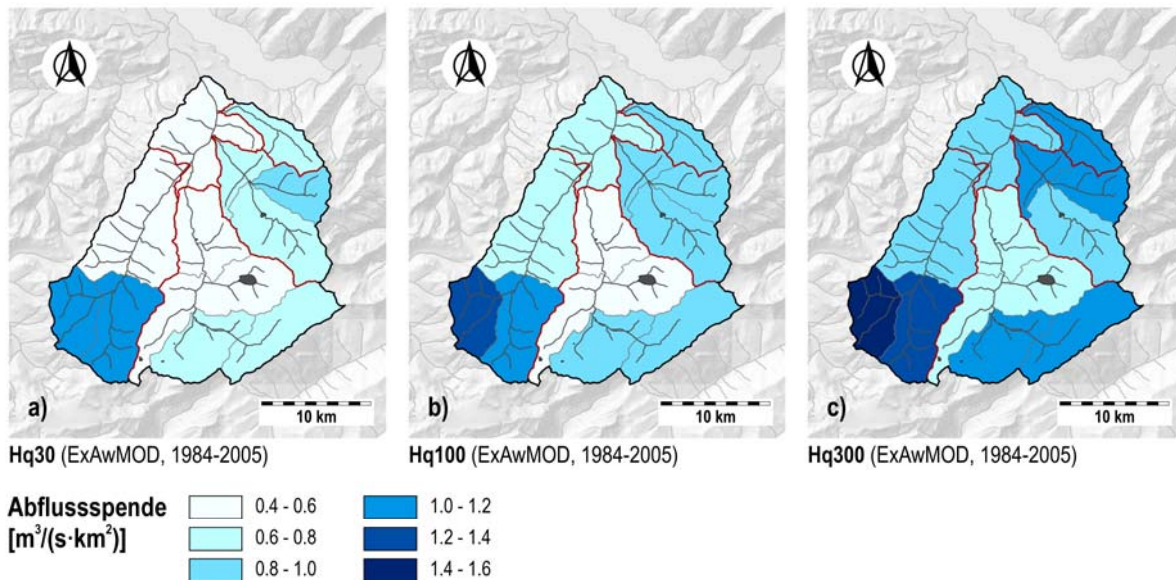


Abbildung 13.2: Extremwertstatistische Hochwasserabschätzungen unterschiedlicher Wiederkehrperiode aus modellierten Abflussdaten (ExAwMod; Hq30, Hq100 und Hq300, Periode: 1984-2005) für die elf Teileinzugsgebiete sowie das gesamte Einzugsgebiet Kander-Hondrich.

### 13.3.2 Hochwasserabschätzungen mit HQx\_meso\_CH

In Abbildung 13.3 a sind die Resultate der Hochwasserabschätzungen mit HQx\_meso\_CH dargestellt. Die für jedes Teileinzugsgebiet berechnete Hochwasserabflussspende 100-jährlicher Wiederkehrperiode basiert auf dem Median der fünf Abschätzungen für den 100-jährlichen Hochwasserspitzenabfluss (vgl. Kapitel 5.3). Bei dieser Zusammenstellung wird das in Abbildung 13.3 b beobachtete räumliche Muster weitgehend bestätigt: Während für den Allenbach-Adelboden die höchste Hochwasserabflussspende resultiert, treten für das Teileinzugsgebiet Suld-Mülenen und für die beiden Teileinzugsgebiete der Chiene (Spiggebach-Kiental, Gornerewasser-Kiental) erhöhte

Hochwasserabflusspenden auf. Die kleinsten Hochwasserabflusspenden resultieren bei dieser Methode ebenfalls für das Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen sowie für das gesamte untersuchte Einzugsgebiet Kander-Hondrich. Daneben sind jedoch für die Teileinzugsgebiete Chiene-Kien und Kander-Gasteretal tiefere Werte zu beobachten.

Die prozentualen Abweichungen zwischen den Abschätzungen mit HQx\_meso\_CH (Abbildung 13.3 a) und den extremwertstatistischen Auswertungen der modellierten Abflussdaten (ExAwMOD, Abbildung 13.3 b) sind in Abbildung 13.3 c dargestellt. Die aufgeführte prozentuale Abweichung gibt die Differenz der 100-jährlichen Hochwasserabflusspenden (Hq100) aus beiden Methoden an. Eine positive Abweichung (grüne Fläche) bedeutet, dass der Wert aus HQx\_meso\_CH über demjenigen der extremwertstatistischen Auswertung der modellierten Abflussdaten liegt, die gelben Flächen zeigen negative Abweichungen für die entsprechenden Teileinzugsgebiete an.

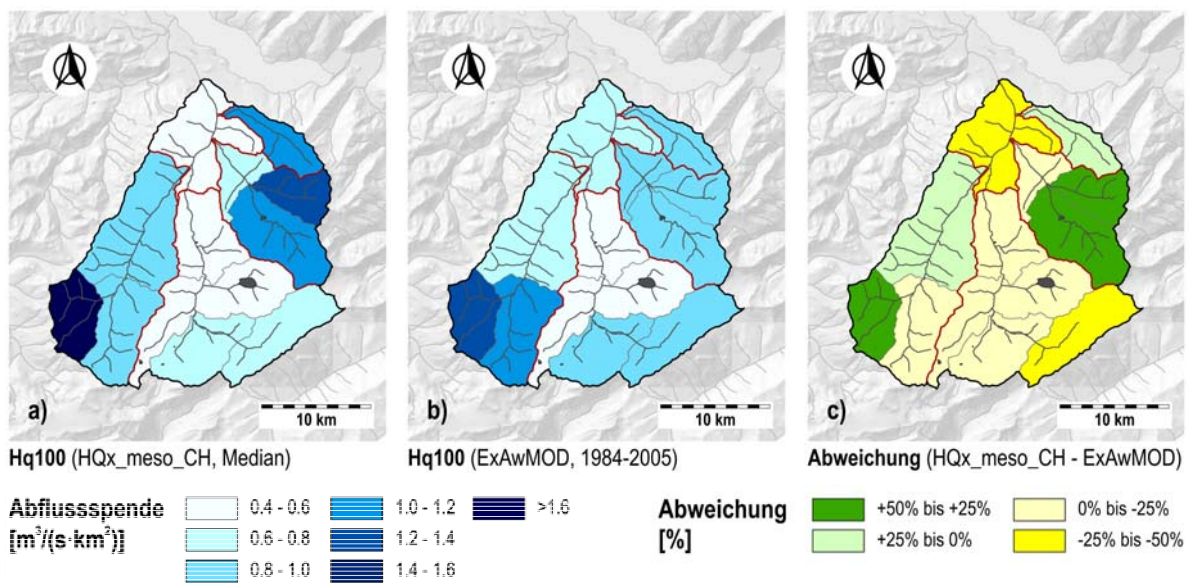


Abbildung 13.3: Abschätzung der 100-jährlichen Hochwasserabflusspende (Hq100) mit HQx\_meso\_CH (a) und mit extremwertstatistischer Auswertung von modellierten Daten (ExAwMOD (b), Periode: 1984-2005) sowie prozentuale Abweichungen zwischen den beiden Abschätzungen (c).

Beim Vergleich der Resultate aus beiden Ansätzen werden **für mehrere Teileinzugsgebiete grössere prozentuale Abweichungen** ersichtlich. Die grössten positiven Abweichungen treten bei den Teileinzugsgebieten Allenbach-Adelboden sowie im hinteren Teil der Chiene (Gornerewasser-Kiental, Spiggebach-Kiental; vgl. Anhang A) auf, wo die Abschätzungen von HQx\_meso\_CH um bis zu 50% über denjenigen der extremwertstatistischen Auswertungen liegen. Ein Grund für diese deutliche Abweichung könnte darin liegen, dass diese Einzugsgebiete mit regionalisierten Modellparametern modelliert wurden und deshalb das spezifische hydrologische Systemverhalten durch das hydrologische Modell nicht exakt nachgebildet werden konnte.

Ebenso grosse Unterschätzungen sind auch für das gesamte Einzugsgebiet (Kander-Hondrich) sowie für das Teileinzugsgebiet Kander-Gasteretal zu beobachten. Für die übrigen Gebiete liegen die Abweichungen in einem Bereich von -25% bis +25%. Die Hochwasserabschätzungen mit HQx\_meso\_CH liegen mehrheitlich unter denjenigen der extremwertstatistischen Auswertungen der modellierten Abflussdaten.

### 13.3.3 Extremwertstatistische Auswertung gemessener Abflussdaten

Für die drei Abflussmessstationen (Kander-Hondrich, Kander-Kandersteg und Allenbach-Adelboden), für welche lange Abflussmessreihen bis 2005 vorliegen, wurden extremwertstatistische Auswertungen der gemessenen Abflussdaten durchgeführt. Damit der Vergleich zu den extremwertstatistischen Auswertungen der modellierten Abflussdaten möglich ist, beschränkt sich die Auswertung der beobachteten Daten auf die Periode von 1984 bis 2005. Da nur drei Stationen ausgewertet werden konnten, sind die aus den verschiedenen Vergleichen abgeleiteten Aussagen mit entsprechender Vorsicht zu interpretieren.

Aus Abbildung 13.4 a wird das **räumliche Muster der 100-jährlichen Hochwasserabfluss-spende**, welche anhand der beobachteten Abflussdaten der Periode 1984-2005 berechnet wurde, ersichtlich. Die räumliche Differenzierung der Auswertungen ist auf Grund der kleinen Anzahl verfügbarer Stationen sehr gering. Während für die beiden ausgewerteten Datenreihen von Kander-Hondrich und Kander-Kandersteg tiefe Werte bei den Hochwasserabflussspenden auftreten, ist für das Teileinzugsgebiet Allenbach-Adelboden ein wesentlich höherer Wert zu beobachten.

In Abbildung 13.4 sind zum Vergleich des räumlichen Musters die Resultate der extremwertstatistischen Abschätzungen mit HQx\_meso\_CH (Abbildung 13.4 b) und die Abschätzungen anhand der modellierten Daten (Abbildung 13.4 c) dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Abschätzungen mit den beobachteten Daten insbesondere mit den Abschätzungen aus HQx\_meso\_CH gut übereinstimmen. Für die drei beurteilten Teileinzugsgebiete resultieren die gleichen Werte. Beim Vergleich zu den extremwertstatistischen Auswertungen der modellierten Daten zeigt sich, dass die Abschätzungen für das Teileinzugsgebiet Kander-Kandersteg gut übereinstimmen und bei den anderen beiden Teileinzugsgebieten Abweichungen auftreten: Während die Abschätzung für Kander-Hondrich aus den beobachteten Daten unter derjenigen mit den modellierten Daten liegt, ist für die Abschätzung für Allenbach-Adelboden gerade das umgekehrte Verhältnis zu beobachten.

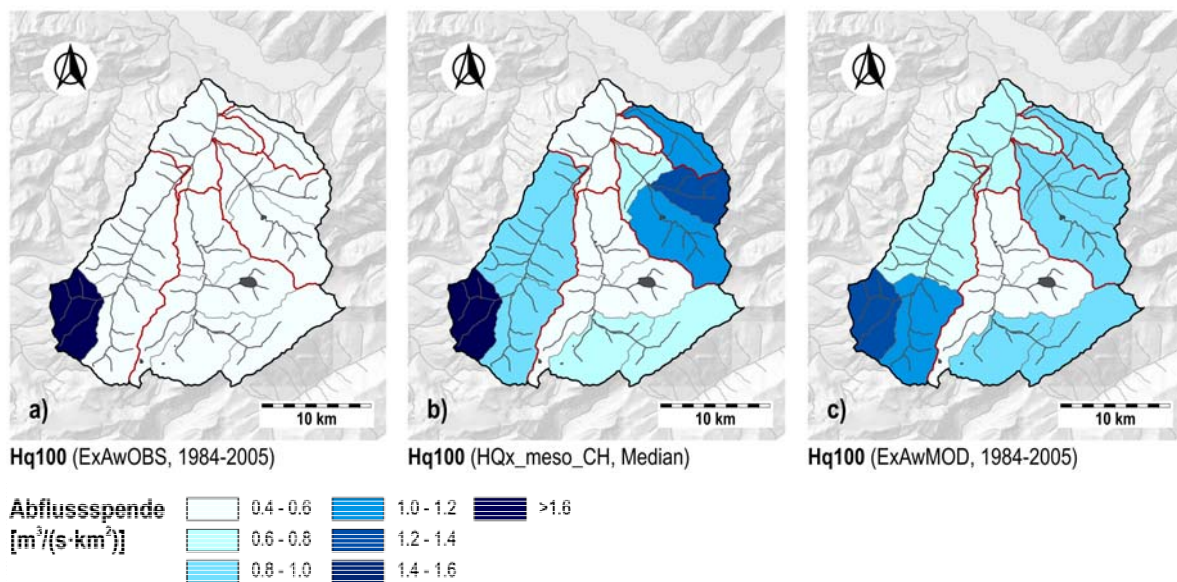


Abbildung 13.4: Extremwertstatistische Hochwasserabschätzungen aus beobachteten und modellierten Abflussdaten (Periode 1984-2005) sowie Hochwasserabschätzung mit HQx\_meso\_CH. Dargestellt ist die Hochwasserabflussspende mit 100-jährlicher Wiederkehrperiode (Hq100)

### 13.3.4 Fazit

Anhand der Hochwasserabschätzungen mit den beiden Methoden (ExAwMOD, HQx\_meso\_CH) konnte für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich ein räumlich differenziertes Muster der hochwasserhydrologischen Verhältnisse erstellt werden, welches gegenüber demjenigen aus den extremwertstatistischen Abschätzungen mit beobachteten Abflussdaten (ExAwOBS) wesentlich höher aufgelöst ist.

Das räumliche Muster zeigt, dass im Hochwasserfall in den nordöstlichen Teileinzugsgebieten (Suld-Mülenen, Spiggebach-Kiental, Gornerewasser-Kiental, Chiene-Kien) sowie in der südwestlichen Region (Teileinzugsgebiet Engstlige-Adelboden, Allenbach-Adelboden) mit überdurchschnittlichen Abflusspenden gerechnet werden muss. Im Gegensatz dazu treten für das Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen Hochwasserabflusspenden auf, die deutlich geringer sind. Allerdings sind bei den höher gelegenen und kleineren Teilräumen dieses Teileinzugsgebietes (Kander-Chluse, Kander-Gasteretal) ebenfalls grössere Hochwasserabflusspenden zu beobachten.

Beim Vergleich der Resultate aus den drei verschiedenen Ansätzen, welche für die Hochwasserabschätzungen eingesetzt wurden (ExAwOBS, ExAwMOD, HQx\_meso\_CH), wird ersichtlich, mit welchen Unsicherheiten bei den abgeschätzten Werten für die verschiedenen Teileinzugsgebiete gerechnet werden muss. Generell ist bei den meisten beurteilten Teileinzugsgebieten gute Übereinstimmung zwischen den beiden Abschätzungen aus ExAwMOD und HQx\_meso\_CH zu beobachten. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass die Hochwasserabschätzungen von zahlreichen Teileinzugsgebieten eine hohe Zuverlässigkeit aufweisen. Allerdings treten bei einzelnen untersuchten Teilräumen (z.B. Allenbach-Adelboden, Spiggebach-Kiental) auch grössere Unterschiede auf, was ein Hinweis dafür ist, dass für diese Teileinzugsgebiete eine Hochwasserabschätzung mit grösseren Unsicherheiten verbunden ist.

Auf Grund der zu beobachtenden Unsicherheiten, welche bei den Hochwasserabschätzungen mit den verschiedenen Methoden bestehen, kann die **definitive Hochwasserabschätzung** für die verschiedenen Teileinzugsgebiete nicht auf einen einzigen Wert festgelegt bzw. reduziert werden. Als **hochwasserhydrologische Bemessungsgrösse** für ein ausgewähltes Teileinzugsgebiet empfiehlt es sich deshalb, alle vorliegenden und durchgeführten Abschätzungen zu berücksichtigen und in Kombination einzusetzen (vgl. Angaben in Anhang C). Je nach Anwendung und Situation kann aus allen vorliegenden Abschätzungen ein Wert gewählt und für die weitere Massnahmenplanung verwendet werden. Auf das entsprechende **Vorgehen**, welches aus den in der vorliegenden Arbeit gemachten Erfahrungen abgeleitet und für die Anwendung in der Praxis empfohlen werden kann, wird in Kapitel 23 vertieft eingegangen.

Bei den verschiedenen vorliegenden Hochwasserabschätzungen, kann vor allem für die grösseren Teileinzugsgebiete (z.B. Kander-Frutigen, Engstlige-Frutigen) davon ausgegangen werden, dass die extremwertstatistischen Auswertungen der **modellierten Abflussdaten** zuverlässigere Werte liefern als die Hochwasserabschätzungen mit HQx\_meso\_CH. Dies deshalb, weil mit dem verwendeten hydrologischen Modell PREVAH die Hochwasserabflüsse prozessorientiert nachgebildet werden konnten. Für die kleinen Einzugsgebiete ist die exakte Nachbildung der hydrologischen Prozesse bzw. der Hochwasserabflüsse mit Hilfe der hydrologischen Modellierung hingegen noch mit grösseren Schwierigkeiten und Unsicherheiten verbunden. Zudem ist zu berücksichtigen, dass für kleinere Einzugsgebiete die zeitlich hoch aufgelösten meteorologischen Einflussgrössen oftmals nicht mehr in ausreichender Genauigkeit erfasst und für die hydrologische Modellierung aufbereitet werden können (vgl. WEHREN 2005, VIVROLI 2007).

## 13.4 Entwicklung der Hochwasser entlang der Kander

Für die Planung und Umsetzung von wasserbaulichen Massnahmen und zum Schutz vor Hochwassergefahren ist die Verfügbarkeit von **hochwasserhydrologischen Bemessungsgrössen** zwingend notwendig. Wie aus Abbildung 13.4 hervorgeht, lassen sich diese Angaben im Einzugsgebiet Kander-Hondrich aber nur für wenige Stationen direkt aus Messdaten ableiten (vgl. auch WEHREN & WEINGARTNER 2007). Aus diesem Grund wurde für den Flusslauf der Kander – auf welchen die vorliegende Untersuchung und das Projekt «Kander.2050» primär fokussieren – eine Datengrundlage erstellt, welche einen räumlichen Vergleich der in der Praxis verbreitet verwendeten hochwasserhydrologischen Bemessungsgrössen (z.B. HQ100) ermöglicht. Dazu wurde für jedes Teileinzugsgebiet entlang der Kander aus den modellierten Abflussdaten der Periode 1984-2005 die 30-, 100- und 300-jährliche Hochwasserabflussspitze extremwertstatistisch abgeschätzt und die entsprechende Hochwasserabflusspende berechnet. Auf die entsprechenden Resultate soll in diesem Kapitel vertieft eingegangen werden. Insbesondere soll anhand dieser Datengrundlage aufgezeigt werden, wie sich die Hochwasserverhältnisse entlang der Kander verändern. Für eine Anwendung der dargestellten Daten sei auf die Bemerkungen in Kapitel 13.3.4 verwiesen.

In Abbildung 13.5 wird anhand der blauen Linien der Verlauf der Hochwasserabflussspitze unterschiedlicher Jährlichkeit (HQ30, HQ100, HQ300) sowie anhand der roten Linien derjenige der Hochwasserabflusspende (Hq30, Hq100, Hq300) ersichtlich. Der Gebietsausfluss des untersuchten Einzugsgebietes Kander-Hondrich ist in der Grafik ganz links eingetragen (Flusskilometer 0), der erste untersuchte Pegel im Quellgebiet des Flusses (Kander-Gasteretal) befindet sich ganz rechts in der Grafik (Flusskilometer 32, vgl. auch Anhang A). Die numerischen Angaben der Hochwasserabschätzungen sind Tabelle 13.3 zu entnehmen.

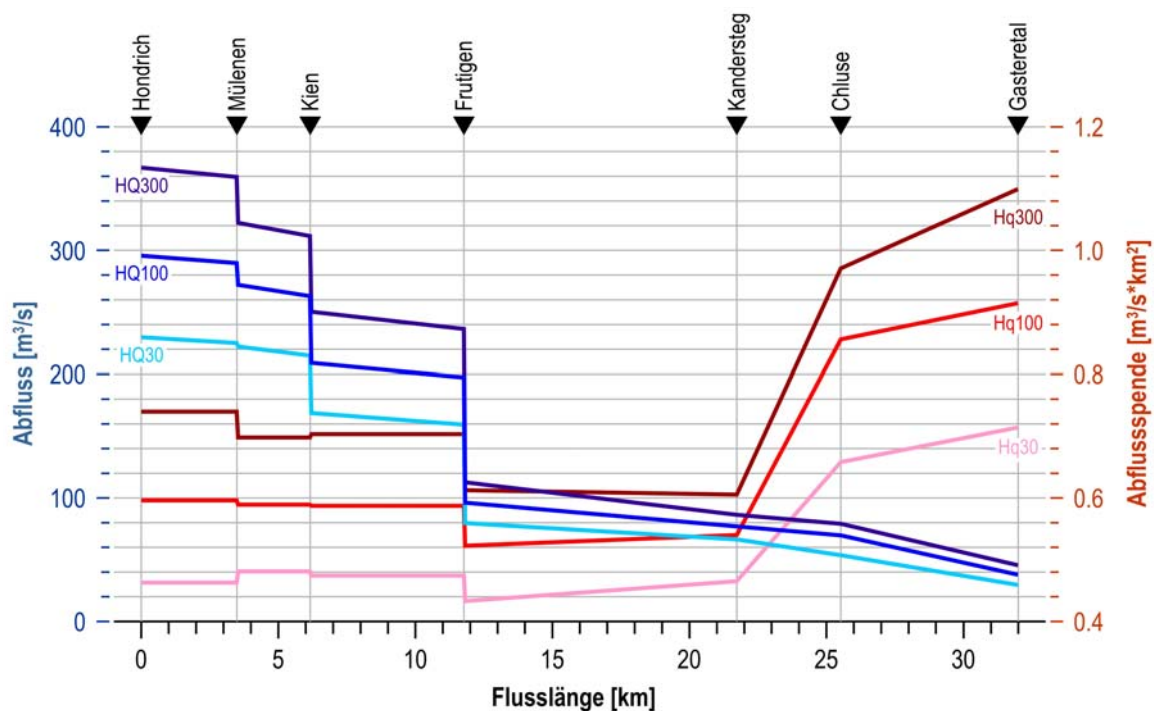


Abbildung 13.5: Entwicklung der Hochwasserabflüsse (HQ, blaue Linien) und der Hochwasserabflusspenden (Hq, rote Linien) unterschiedlicher Jährlichkeit (HQ30, HQ100, HQ300 sowie Hq30, Hq100, Hq300) entlang des Flusslaufes der Kander von Kander-Gasteretal bis Kander-Hondrich.



Aus der Zusammenstellung in Abbildung 13.5 geht hervor, dass die **Hochwasserabflussspenden** unterschiedlicher Jährlichkeiten über den Flusslauf stärkere Veränderungen aufweisen: Während die Beträge der Hochwasserabflussspenden unterschiedlicher Jährlichkeit im Quellgebiet der Kander (Kander-Gasteretal) am grössten sind, nehmen diese bis Kander-Frutigen kontinuierlich ab. Nach dem Zusammenfluss mit der Engstlige in Frutigen tritt jedoch eine deutliche Zunahme dieser Kenngrössen auf, die Werte bleiben anschliessend auch nach dem Zusammenfluss mit der Chiene in Kien bis zum Gebietsausfluss auf konstantem Niveau.

Die Zunahme der **Hochwasserabflussmengen** unterschiedlicher Jährlichkeit entlang des Flusslaufs verläuft teilweise sprunghaft: Insbesondere beim Zusammenfluss mit der Engstlige bei Frutigen und mit der Chiene bei Kien werden die Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit deutlich grösser. Dies bestätigt die Erkenntnis aus Kapitel 4.6, dass diese Teileinzugsgebiete den Hochwasserabfluss des gesamten Einzugsgebietes Kander-Hondrich wesentlich beeinflussen können.

Bei der in Abbildung 13.5 dargestellten Zusammenstellung muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass die extremwertstatistischen Auswertungen der modellierten Daten auf der Periode von 1984 bis 2005 beruhen. Dieser Zeitraum musste auf Grund der Datenverfügbarkeit verwendet werden. Dadurch basieren die durchgeführten Auswertungen auf der gleichen Periode, womit eine homogene Datengrundlage vorliegt, mit deren Hilfe auch räumliche Vergleiche durchgeführt werden können.

Wie den Auswertungen in Kapitel 9.5 entnommen werden kann, muss aber bei Anwendung der in Abbildung 13.5 enthaltenen Hochwasserabschätzungen unterschiedlicher Jährlichkeit berücksichtigt werden, dass diese Werte tendenziell grösser sind als die entsprechenden Hochwasserabschätzungen aus den langen hydrologischen Reihen (z.B. Periode 1903-2007). Wie aus den Ergebnissen in Kapitel 11 ebenfalls hervorgeht, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das räumliche Muster, welches sich aus den Abschätzungen mit langen hydrologischen Reihen ergibt, sehr ähnlich ausfallen würde. Allerdings würden die entsprechenden Werte auf einem tieferen Niveau liegen.

Tabelle 13.3: Übersicht über die Hochwasserabschätzungen für die Teileinzugsgebiete der Kander (ExAwMOD, Periode: 1984-2005; HQx\_meso\_CH).

Einzugsgebiet	Fläche [km <sup>2</sup> ]	ExAwMOD			HQx_meso_CH
		HQ30 [m <sup>3</sup> /s]	HQ100 [m <sup>3</sup> /s]	HQ300 [m <sup>3</sup> /s]	HQ100 [m <sup>3</sup> /s]
Kander-Gasteretal	41.4	29.6	<b>37.9</b>	45.6	<b>25.0</b>
Kander-Chluse	81.5	53.6	<b>69.7</b>	89.1	<b>62.5</b>
Kander-Kandersteg	142.7	66.5	<b>76.7</b>	85.9	<b>59.7</b>
Kander-Frutigen (ohne Engstlige)	184.0	79.7	<b>96.2</b>	112.7	<b>87.1</b>
Kander-Frutigen (mit Engstlige)	336.0	159.3	<b>197.3</b>	236.4	<b>192.5</b>
Kander-Kien (mit Chiene)	446.4	214.8	<b>263.0</b>	311.6	<b>244.8</b>
Kander-Hondrich	496.0	274.9	<b>342.7</b>	412.8	<b>233.6</b>

Die Bandbreite der Hochwasserabschätzungen, welche sich aus den verwendeten Methoden (ExAwMOD oder HQx\_meso\_CH) ergibt, wird aus Abbildung 13.5 nicht ersichtlich. Wie jedoch Tabelle 13.3 zeigt, liegen die Resultate aus beiden Methoden für die meisten untersuchten Teileinzugsgebiete des Hauptflusses in der gleichen Grössenordnung; grössere Abweichungen bestehen jedoch bei den kleineren Einzugsgebiete der Nebenflüsse (z.B. Allenbach-Adelboden, Gornerewas-

ser-Kiental, Spiggebach-Kiental; vgl. Abbildung 13.3 c). Für die Abschätzungen des Einzugsgebietes Kander-Hondrich und des Teileinzugsgebietes Kander-Gasteretal fallen die prozentualen Unterschiede entlang des Hauptflusses jeweils am grössten aus.

Für alle Messstationen, besonders aber für diejenigen, welche grössere Abweichungen zwischen den einzelnen Abschätzungen aufweisen (Kander-Hondrich, Kander-Gasteretal) empfiehlt es sich, wie in Kapitel 13.3.4 erwähnt, die Werte in Kombination und der jeweiligen Situation angepasst einzusetzen (vgl. Kapitel 23).

# 14 Hochwasserabschätzung für 99 kleine Teileinzugsgebiete

In diesem Kapitel wird auf die für die kleinen Teileinzugsgebiete von wenigen Quadratkilometern Flächeninhalt durchgeführten Hochwasserabschätzungen eingegangen. Während in Kapitel 14.1 die Ausgangslage zu den durchgeführten Abschätzungen beschrieben wird, wird in Kapitel 14.2 vertieft auf die verschiedenen Datengrundlagen sowie in Kapitel 14.3 auf die Bestimmung der untersuchten Teilräume eingegangen. Danach werden in Kapitel 14.4 und in Kapitel 14.5 die Resultate der verschiedenen Methoden miteinander verglichen und in Kapitel 14.6 und Kapitel 14.7 räumlich differenzierte Aussagen zu den hochwasserhydrologischen Verhältnissen im Einzugsgebiet der Kander gemacht.

## 14.1 Ausgangslage

Neben der Beurteilung der Hochwasserabflüsse aller in Kapitel 13 untersuchten mesoskaligen Teileinzugsgebiete wurden im Rahmen der Diplomarbeit von ZGRAGGEN (2009) auch Abschätzungen von seltenen Hochwasserspitzenabflüssen für kleine Teileinzugsgebiete mit einer Fläche zwischen 0.5 und 20 km<sup>2</sup> durchgeführt. Die entsprechenden Resultate sollen zur räumlich differenzierten Beurteilung der Hochwasserverhältnisse innerhalb der grösseren Teileinzugsgebiete (vgl. Kapitel 2.2) beitragen und allfällige für die Hochwasserentstehung besonders relevante Räume aufzeigen.

Als Grundlage für die Arbeit von ZGRAGGEN (2009) wurden im Einzugsgebiet der Kander 99 kleine Teileinzugsgebiete ausgeschieden. Ziel war es, für jedes dieser Gebiete mindestens eine Abschätzung des Hochwasserspitzenabflusses mit 100-jährlicher Wiederkehrperiode (HQ100) zu erstellen. Dazu wurden – falls vorhanden – entweder die bestehenden Abschätzungen aus den bereits vorliegenden Technischen Berichten zu den Naturgefahrenkarten der Gemeinden (TBA 2003-2005) übernommen und/oder für Einzugsgebiete dieser Grössenordnung geeignete Methoden eingesetzt. Da im Einzugsgebiet der Kander keine Abflussmessungen für Einzugsgebiete unter 25 km<sup>2</sup> vorliegen, handelt es sich dabei um Methoden der Regionalen Übertragung (vgl. Kapitel 5.3).

Da ohne Abflussmessungen die «wahren», gemessenen Hochwasserabflüsse nicht bekannt sind, ist eine eigentliche Validierung der verschiedenen Methoden grundsätzlich nicht möglich. Auf Grund der fehlenden Daten wurde deshalb in Anlehnung an den Ansatz des «Multimodelling» (vgl. z.B. AJAMI ET AL. 2006) in der vorliegenden Arbeit eine Plausibilisierung der einzelnen Hochwasserabschätzungen anhand der Resultate aus den verschiedenen eingesetzten Methoden verfolgt.

Eine weitere Plausibilisierung ergibt sich auch aus dem Vergleich mit anderen Ansätzen, welche zur Beurteilung der hochwasserhydrologischen Verhältnisse dienen und stärker auf den naturräumlichen Informationen basieren (vgl. Kapitel 15). Auf die entsprechenden Ergebnisse wird in den Schlussfolgerungen zu diesem Teil der Arbeit (Kapitel 16) eingegangen.

## 14.2 Datengrundlagen und Hochwasserabschätzmethoden

### 14.2.1 Technische Berichte für Naturgefahrenkarten der Gemeinden

Für die meisten kleinen Teileinzugsgebiete im Einzugsgebiet Kander-Hondrich, welche die Siedlungsräume tangieren, wurden für die Erstellung der Naturgefahrenkarten der verschiedenen Gemeinden (TBA 2003-2005) Abschätzungen von Hochwasserspitzenabflüssen unterschiedlicher Jährlichkeit durchgeführt. Für diese Abschätzungen wurden – in Abhängigkeit der Grösse des Einzugsgebietes – folgende Methoden verwendet (Formeln siehe Anhang C):

- > **Einzugsgebiete mit einer Fläche unter 2.5 km<sup>2</sup>:** Für die kleineren Teileinzugsgebiete wurde das modifizierte Fliesszeitverfahren nach Forster eingesetzt, welches ausführlicher in BAUMANN ET AL. (1992), RICKLI & FORSTER (1997) oder SPREAFICO ET AL. (2003) beschrieben wird und auf der «Rational Formula» (CHOW 1964) basiert. Die zentrale Grösse dieser Methode stellt der Spitzenabflusskoeffizient dar, welcher für jedes Einzugsgebiet separat nach der Methode von RICKLI & FORSTER (1997) und somit auf Grund von Geländeuntersuchungen bestimmt werden muss. Grundsätzlich können mit dieser Methode Hochwasserspitzenabflüsse beliebiger Jährlichkeit abgeschätzt werden; die Angaben in den Technischen Berichten zu den Gefahrenkarten beschränkt sich aber auf die Spitzenabflüsse mit 30- bzw. 100-jährlicher Wiederkehrperiode (HQ30 bzw. HQ100).
- > **Einzugsgebiete mit einer Fläche zwischen 2.5 und 20 km<sup>2</sup>:** Zur Hochwasserabschätzung für Einzugsgebiete dieser Grössenordnung wurde im Rahmen der Technischen Berichte die Methode nach KÖLLA (1986) verwendet. Dieser Ansatz gehört ebenfalls zu den Fliesszeitverfahren und unterscheidet sich von der Methode nach Forster vor allem in folgendem Punkt: Bei der Methode nach KÖLLA (1986) wird davon ausgegangen, dass im Ereignisfall nur die gerinnenahen Teilgebiete zum Abfluss beitragen. Als gerinnenah werden diejenigen Flächen bezeichnet, welche in einer Distanz von 120 m zu den Gerinneästen liegen, welche im Hochwasserfall wasserführend sind. Der auch bei dieser Methode verwendete Abflusskoeffizient wird ebenfalls nach der Methode von RICKLI & FORSTER (1997) abgeschätzt und basiert wiederum auf Felduntersuchungen. Mit der Methode nach KÖLLA (1986) können Hochwasserspitzenabflüsse 20- und 100-jährlicher Wiederkehrperiode (HQ20 und HQ100) berechnet werden.

Für alle Einzugsgebiete, für welche Hochwasserabschätzungen im Rahmen der Erstellung der Naturgefahrenkarten durchgeführt wurden, wurde eine dieser beiden Methoden angewendet. Bei diesen Angaben kann auf Grund der zentralen Bedeutung für die Gefahrenbeurteilung davon ausgegangen werden, dass die Abschätzungen durch die beauftragten Experten in bestmöglicher Qualität erarbeitet wurden. Da die eingesetzten Methoden zudem auf Felduntersuchungen beruhen, kann den berechneten Werten eine höhere Plausibilität zugesprochen werden, als Abschätzungen, welche auf rein statistischen Zusammenhängen beruhen.

Berücksichtigt werden muss jedoch, dass nicht alle Abschätzungen von der gleichen Person durchgeführt wurden. Dies kann sich insbesondere bei der subjektiven Beurteilung und Festlegung zentraler Modellparameter wie z.B. den Abflusskoeffizienten auswirken. Daneben muss auch beachtet werden, dass eine Hochwasserabschätzung im Rahmen einer Naturgefahrenkarte nicht immer alleine auf Grund von hydrologischen Gesichtspunkten durchgeführt werden kann. Es ist nicht auszu-

schliessen, dass bei Teileinzugsgebieten, für die mehrere und Schäden verursachende Hochwasserereignisse bekannt sind, die Abschätzungen mit zusätzlichen Sicherheitsmargen versehen wurden.

## 14.2.2 HAKESCH

Das Softwarepaket «HAKESCH» (**H**ochwasser**a**bschätzung für **k**leine **E**inzugsgebiete der **S**chweiz; VOGT 2001, VOGT ET AL. 2002, SPREAFICO ET AL. 2003) beinhaltet fünf verschiedene Methoden, welche die Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten zwischen 0.5 und 10 km<sup>2</sup> ermöglichen. Die meisten dieser Abschätzmethode basieren auf dem Abflusskoeffizienten, welcher nach dem Ansatz von RICKLI & FORSTER (1997) bestimmt wird. Zur zuverlässigen Bestimmung dieser Kenngrösse und zur Erhebung dessen räumlicher Differenzierung sind Untersuchungen im Gelände unumgänglich und von zentraler Bedeutung (vgl. SPREAFICO ET AL. 2003, SURY 2006 oder DOBMANN 2009).

Die fünf in der Software integrierten Methoden sind z.B. in DOBMANN (2009), SPREAFICO ET AL. (2003) oder ZGRAGGEN (2009) ausführlich beschrieben. Es ist zu beachten, dass die beiden in Kapitel 14.2.1 beschriebenen Ansätze, welche für die Hochwasserabschätzungen im Rahmen der Naturgefahrenkarten verwendet wurden, ebenfalls enthalten sind. Weitere Angaben zur Anwendung der einzelnen Modelle können den originalen Publikationen entnommen werden, weshalb an dieser Stelle nur eine kurze Charakterisierung der implementierten Verfahren gegeben wird:

- > **Müller modifiziert:** Hierbei handelt es sich um ein von MÜLLER (1943) entwickeltes Hüllkurvenverfahren, welches die Abschätzung des grössten zu erwartenden Hochwassers im Einzugsgebiet ( $Q_{max}$ ) ermöglicht. Das Verfahren lässt sich auf Einzugsgebiete mit einer Fläche über 1 km<sup>2</sup> anwenden.
- > **Taubmann/Thiess/Chow:** Der von TAUBMANN (1986) auf die hydrologischen Verhältnisse der Schweiz adaptierte Berechnungsansatz basiert einerseits auf dem SCS-Verfahren (z.B. CHOW 1964) und andererseits auf dem Fliesszeitverfahren. Unter Anwendung dieser Methode lassen sich für Einzugsgebiete der Grösse zwischen 0.5 und 30 km<sup>2</sup> Hochwasserabflüsse mit Wiederkehrperioden von 5, 10, 25, 50 und 100 Jahren abschätzen.
- > **Modifiziertes Fliesszeitverfahren:** Dieses Verfahren entspricht im Wesentlichen dem Fliesszeitverfahren (Rational Formula; vgl. CHOW 1964). Mit dieser Methode können Hochwasserabflüsse beliebiger Jährlichkeit abgeschätzt werden. HEGG & FORSTER (2002) empfehlen, die Anwendung auf Einzugsgebiete mit einer Fläche unter 5 km<sup>2</sup> zu beschränken. Die Methode ist ausführlicher in BAUMANN ET AL. (1992) bzw. in RICKLI & FORSTER (1997) beschrieben.
- > **Kölla:** Wie in Kapitel 14.2.1 beschrieben, basiert diese Methode auf dem Fliesszeitverfahren, wobei die ursprüngliche Laufzeitformel aufgenommen und angepasst wurde (KÖLLA 1986). Bei diesem Ansatz wird nur diejenige Gebietsfläche berücksichtigt, welche in einer Distanz von 120 m zu dem im Hochwasserfall wasserführenden Gerinnenetz liegen. Das Verfahren ist gemäss SPREAFICO ET AL. (2003) für Einzugsgebiete mit Flächen zwischen 0.5 und 100 km<sup>2</sup> geeignet. Es lassen sich Hochwasserspitzenabflüsse mit einer Wiederkehrperiode von 20 bzw. 100 Jahren abschätzen.
- > **Clark-WSL:** Dieses Verfahren wurde von VOGT (2001) für die Anwendung in Einzugsgebieten bis 5 km<sup>2</sup> entwickelt. Es stellt ein einfaches Konzeptmodell dar, welches den Abflussprozess als Kombination von linearer Speicherung und linearer Translation beschreibt (vgl. auch KOEHLER 1976, VOGT & FORSTER 1999, VOGT ET AL. 2002). Mit dieser Methode können Hochwasserabflüsse beliebiger Jährlichkeit berechnet werden.

Der **Vorteil von HAKESCH** liegt gemäss SPREAFICO ET AL. (2003) darin, dass durch die Kombination der Resultate aus den verschiedenen Verfahren für die Abschätzung eines Einzugsgebietes ein Streubereich sowie ein gemittelter Wert angegeben werden kann. Da davon ausgegangen werden muss, dass die einzelnen Methoden nicht für alle Einzugsgebiete gleich gut geeignet sind, wird durch die Methodenkombination die Unsicherheit der einzelnen Ansätze deutlich reduziert. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass der gemittelte Wert im Durchschnitt zuverlässiger ist, als die Abschätzungen aus einzelnen Methoden. Als **Nachteil** muss erwähnt werden, dass die Hochwasserabschätzung mit HAKESCH durch die Anwendung der verschiedenen auf Feldarbeit beruhenden Methoden mit einem relativ hohen Zeitaufwand verbunden ist.

Bei der Anwendung und Interpretation der Methoden ist zu berücksichtigen, dass die Methode «Taubmann» systematisch tiefe Resultate liefert und somit als **unteres Grenzwertverfahren** bezeichnet werden kann. Dagegen stellt die Methode «Müller modifiziert» ein **oberes Grenzwertverfahren** dar. Die definitive Hochwasserabschätzung für das zu beurteilende Einzugsgebiet wird in HAKESCH als Mittelwert aus denjenigen Werten berechnet, welche zwischen den Resultaten der beiden Grenzwertverfahren liegen. Allerdings werden auch noch die Werte in die Berechnung einbezogen, welche knapp (bzw. +/- 10%) über bzw. unter den Werten der beiden Grenzwertverfahren liegen.

Für einige Einzugsgebiete, welche räumlich nicht sinnvoll weiter unterteilt werden konnten und grösser als 10 km<sup>2</sup> sind, wurde an Stelle der Abschätzung mit HAKESCH eine Hochwasserabschätzung mit HQx\_meso\_CH (BARBEN 2003, SPREAFICO ET AL. 2003) durchgeführt (vgl. Kapitel 5.3).

### 14.2.3 Methode Schaffner

SCHAFFNER (2007) hat für kleine und steile Einzugsgebiete der Schweiz eine Methode für die Abschätzung des Hochwasserspitzenabflusses mit einer **Wiederkehrperiode von 100 Jahren** entwickelt. Diese Methode basiert auf **Regressionsbeziehungen** (vgl. Gleichung 14.1 bis Gleichung 14.6), welche auf Basis von Abflussmessungen und Gebietskennwerten aus 44 kleinen Einzugsgebieten erstellt wurden. Die verwendeten Einzugsgebiete umfassen je eine Fläche zwischen 0.5 und 20 km<sup>2</sup> und weisen eine mittlere Neigung von mehr als 10° auf, weshalb sich die Anwendung auf Einzugsgebiete mit diesen Eigenschaften beschränkt.

Die von SCHAFFNER (2007) entwickelten Regressionsbeziehungen beschreiben den Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Gebietskennwerten, welche aus schweizweit verfügbaren Grundlagendaten abgeleitet werden und den aus beobachteten Abflussdaten berechneten 100-jährlichen Spitzenabflüssen. SCHAFFNER (2007) hat zwei verschiedene Berechnungsansätze erstellt, welche je nach Grösse des Einzugsgebietes verwendet werden. Für Einzugsgebiete mit einer Fläche unter 10 km<sup>2</sup> wird ausschliesslich der erste Ansatz (Kapitel 14.2.3 a) eingesetzt, für Einzugsgebiete zwischen 10 und 20 km<sup>2</sup> wird sowohl der erste wie auch der zweite Ansatz (Kapitel 14.2.3 b) verwendet.

#### a) Abschätzung für Einzugsgebiete mit einer Fläche kleiner als 10 km<sup>2</sup>

Für die Hochwasserabschätzung für Einzugsgebiete mit einer Fläche unter 10 km<sup>2</sup> wird Gleichung 14.1 angewendet. Der 100-jährliche Hochwasserspitzenabfluss wird dabei aus der kumulierten Gerinnelänge, dem Waldanteil und der minimalen Gebietshöhe berechnet. Diese Kenngrössen werden aus digital verfügbaren Geodaten abgeleitet. Daneben werden zusätzlich auch die für das Einzugsgebiet erwarteten 100-jährlichen 1-stündigen Niederschlagsintensität verwendet, welche den Karten von GEIGER ET AL. (1992) oder JENSEN ET AL. (1997) entnommen werden kann.

$$HQ_{100} = GL^{0.470} \cdot N_{Int}^{1.175} \cdot 10^{A \cdot (F_{Wald})^2 + B \cdot (H_{min})^2 + C} \quad \text{Gleichung 14.1}$$

mit:

$HQ_{100}$	=	100-jährlicher Hochwasserspitzenabfluss [ $m^3/s$ ]
$GL$	=	kumulierte Gerinnelänge [ $km$ ]
$N_{Int}$	=	100-jährliche 1-stündige Niederschlagsintensität [ $mm/h$ ]
$F_{Wald}$	=	Waldanteil [%]
$H_{min}$	=	minimale Gebietshöhe [ $m \text{ ü.M.}$ ]
$A$	=	$- 6.72 \cdot 10^{-5}$
$B$	=	$- 1.17 \cdot 10^{-7}$
$C$	=	$- 1.205$

Zur Überprüfung des mit dieser Gleichung abgeleiteten 100-jährlichen Spitzenabflusses hat SCHAFFNER (2007) ein spezielles Validierungsschema entwickelt (vgl. Abbildung 14.1). Dazu wird einerseits die **«Elongation Ratio»** ( $R_e$ ) berücksichtigt, welche nach ASCHWANDEN (1996) gemäss Gleichung 14.2 berechnet wird. Daneben wird der **«Shape Factor»** ( $L_l$ ) verwendet, welcher sich nach MCCUEN (2005) gemäss Gleichung 14.3 bestimmen lässt. Beide Grössen beschreiben die Gebietsform. Die dem Validierungsschema zu Grunde liegenden Grenzwerte der beiden Kenngrössen sind aus den Analysen von SCHAFFNER (2007) empirisch festgelegt worden. Der Autor empfiehlt, diese mit einer gewissen Toleranz zu verwenden, was in der vorliegenden Untersuchung dadurch berücksichtigt wurde, dass die Grenzen jeweils mit einem Übergangsbereich von +/- 10% versehen wurden.

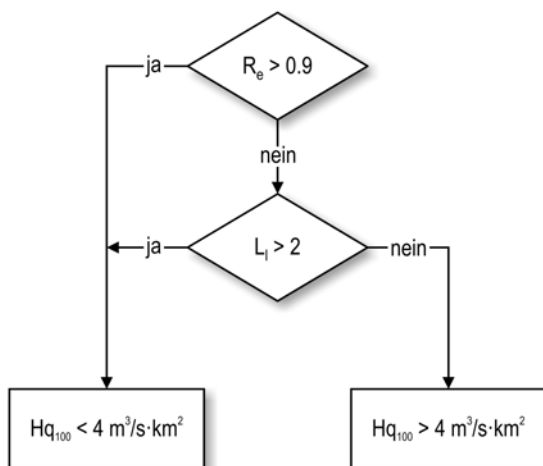


Abbildung 14.1: Validierungsschema für die mit der Methode Schaffner abgeschätzten Hochwasserabflussspenden ( $Hq_{100}$ ) (nach SCHAFFNER 2007;  $R_e$  = Elongation Ratio,  $L_l$  = Shape Factor).

$$R_e = \frac{2 \cdot \sqrt{Fn}}{L_r \cdot \sqrt{\pi}} \quad \text{Gleichung 14.2}$$

mit:

$R_e$	=	Elongation Ratio (vgl. ASCHWANDEN 1996)
$Fn$	=	Einzugsgebietsfläche [ $km^2$ ]
$L_r$	=	Radiale Länge des Einzugsgebietes [ $km$ ] (vgl. ASCHWANDEN 1996)

$$L_l = (L_h \cdot L_{GS})^{0.3} \quad \text{Gleichung 14.3}$$

mit:

$L_l$	=	Shape Factor (vgl. MCCUEN 2005)
$L_h$	=	Hydrologische Länge des Einzugsgebietes [ $km$ ] (vgl. SEYHAN 1976)
$L_{GS}$	=	Länge des Hauptflusses bis zum Gebietsschwerpunkt [ $km$ ] (vgl. MCCUEN 2005)

Durch den Vergleich der 100-jährlichen Hochwasserabflusssspende ( $Hq_{100}$ ), welche anhand der Regressionsbeziehung in Gleichung 14.1 berechnet wurde und dem Wert, welcher gemäss Validierungsschema (Abbildung 14.1) zu erwarten ist, kann beurteilt werden, wie zuverlässig die durchgeführte Abschätzung ist: Liegt die berechnete Abflusssspende nicht in dem Grössenbereich, die vom Validierungsschema vorgegeben wird, muss der berechnete Wert angezweifelt bzw. überprüft werden. Andernfalls kann von einer plausiblen Abschätzung ausgegangen werden.

In Abbildung 14.2 sind die **Validierungsergebnisse** für die berechneten Abschätzungen der kleinen Teileinzugsgebiete der Kander dargestellt. Die dunkelgrauen Flächen umfassen diejenigen Bereiche, welche gemäss Validierungsschema den plausiblen Abschätzungen entsprechen. Die hellgrauen Flächen stellen den Toleranzbereich von  $\pm 10\%$  der jeweiligen Grösse dar. Die berechneten Abschätzungen, die in diesem Toleranzbereich liegen, wurden in der vorliegenden Untersuchung ebenfalls als plausibel erachtet.

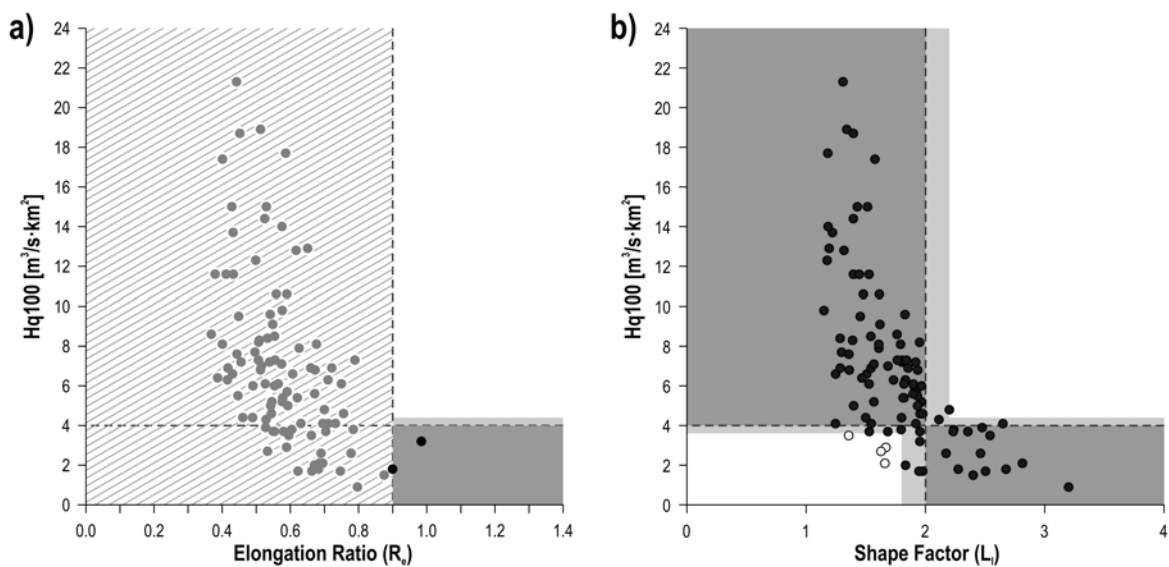


Abbildung 14.2: Validierung der mit der Methode Schaffner berechneten 100-jährlichen Hochwasserabflusssspenden (a: Validierung anhand der Elongation Ratio, b: Validierung anhand des Shape Factors). Dunkelgraue Flächen: Bereiche für plausible Abschätzungen. Hellgraue Flächen: Toleranzbereich für plausible Abschätzungen. Grau schraffierte Fläche: Bereich für Abschätzungen, für welche der zweite Validierungsschritt (b) durchgeführt werden muss. Schwarze Punkte: Abschätzung plausibel. Graue Punkte: Für Abschätzung muss zweiter Validierungsschritt (b) durchgeführt werden. Weisse Punkte: Abschätzung unplausibel, muss überprüft werden.

Während in Abbildung 14.2 a die Validierung der berechneten 100-jährlichen Hochwasserabflusssspende ( $Hq_{100}$ ) anhand der Elongation Ratio ( $R_e$ ) dargestellt ist, wird aus Abbildung 14.2 b die Validierung mit Hilfe des Shape Factors ( $L_s$ ) ersichtlich. Es zeigt sich, dass beim ersten Schritt der Validierung auf Grund des  $R_e$  nur für zwei der 99 Einzugsgebiete bereits abschliessend eine plausible Abschätzung ersichtlich wird. Beim zweiten Schritt der Validierung, welcher für alle Einzugsgebiete mit  $R_e < 0.9$  und anhand des Kennwertes  $L_s$  durchgeführt wurde, resultiert eine grosse Anzahl an plausiblen Abschätzungen (schwarze Punkte). Wie aus Abbildung 14.2 b hervorgeht, mussten die Abschätzungen für vier Einzugsgebiete (weisse Punkte) überprüft werden. Der Vergleich mit den Angaben in den Technischen Berichten ergab jedoch keinen Grund, weshalb die mit der Methode Schaffner berechneten 100-jährlichen Hochwasserabflusssspenden als unplausibel beurteilt



werden mussten. Die Werte wurden deshalb beibehalten und für die weiteren Auswertungen verwendet.

### b) Abschätzung für Einzugsgebiete mit einer Fläche zwischen 10 und 20 km<sup>2</sup>

Für Einzugsgebiete zwischen 10 und 20 km<sup>2</sup> wird nach der Methode von SCHAFFNER (2007) der 100-jährliche Hochwasserspitzenabfluss neben dem Regressionsansatz (Gleichung 14.1) zusätzlich mit dem so genannten **Momentenansatz** bestimmt (Gleichung 14.4). Dieser Ansatz basiert auf der hydrologischen Grundgleichung (vgl. z.B. DÜSTER 1994 bzw. WEINGARTNER 1998). Die beiden Momente «**mHQ**» (mittlerer Jahreshochwasserabfluss) und «**s(HQ)**» (Standardabweichung der Jahreshochwasserabflüsse) werden bei diesem Ansatz wiederum mit je einer separaten Regressionsgleichung ermittelt (Gleichung 14.5 und Gleichung 14.6).

Hydrologische Grundgleichung (vgl. auch DÜSTER 1994 oder WEINGARTNER 1998):

$$HQ_{100} = mHQ + 3.14 \cdot s(HQ) \quad \text{Gleichung 14.4}$$

Berechnung der beiden Momente «mHQ» und «s(HQ)» anhand der Regressionsbeziehungen von SCHAFFNER (2007):

$$mHQ = GL^{0.832} \cdot N_{Hoe}^{1.854} \cdot 10^{A \cdot \sqrt{I_{25}} + B \cdot (mWSV)^2 + C} \quad \text{Gleichung 14.5}$$

mit:	<i>mHQ</i>	=	<i>mittlerer jährlicher Hochwasserabfluss [m<sup>3</sup>/s]</i>
	<i>GL</i>	=	<i>kumulierte Gerinnelänge [km]</i>
	<i>N<sub>Hoe</sub></i>	=	<i>jährliche Niederschlagshöhe [mm]</i>
	<i>I<sub>25</sub></i>	=	<i>Flächenanteil mit Hangneigung &gt; 25° [%]</i>
	<i>mWSV</i>	=	<i>mittleres Wasserspeichervermögen des Bodens [mm]</i>
	<i>A</i>	=	<i>- 4.37 · 10<sup>-2</sup></i>
	<i>B</i>	=	<i>5.79 · 10<sup>-5</sup></i>
	<i>C</i>	=	<i>- 6.311</i>

$$s(HQ) = GL^{0.627} \cdot 10^{A \cdot N_{Int} + B \cdot (mWSV)^2 + C} \quad \text{Gleichung 14.6}$$

mit:	<i>s(HQ)</i>	=	<i>Standardabweichung der Jahreshochwasserspitzen</i>
	<i>GL</i>	=	<i>kumulierte Gerinnelänge [km]</i>
	<i>N<sub>Int</sub></i>	=	<i>100-jährliche, 1-stündige Niederschlagsintensität [mm/h]</i>
	<i>mWSV</i>	=	<i>mittleres Wasserspeichervermögen des Bodens [mm]</i>
	<i>A</i>	=	<i>1.06 · 10<sup>-2</sup></i>
	<i>B</i>	=	<i>5.61 · 10<sup>-5</sup></i>
	<i>C</i>	=	<i>- 1.151</i>

Als definitiver Wert für das HQ100 des untersuchten Einzugsgebietes wird jeweils die **grössere Abschätzung** aus den mit dem Regressions- bzw. mit dem Momentenansatz berechneten Werten verwendet. Das Validierungsschema (Abbildung 14.1) kann für diesen Ansatz nicht angewendet werden.

### 14.3 Untersuchte Einzugsgebiete und verwendete Methoden

Für die Arbeit von ZGRAGGEN (2009) wurden im Einzugsgebiet der Kander insgesamt 99 kleine Teileinzugsgebiete bestimmt und untersucht (Abbildung 14.3). Bei der Festlegung dieser Teilräume standen die folgenden Kriterien im Vordergrund:

- > Der **Pegel** des untersuchten Einzugsgebietes soll am Zusammenfluss mit dem nächsten Gewässer liegen, welches von vergleichbarer Grössenordnung oder grösser ist.
- > Die Einzugsgebiete sollen **geschlossen** sein und nicht von Zuflüssen aus anderen Einzugsgebieten beeinflusst werden.
- > Die **Einzugsgebiete** sollen eine Fläche zwischen 0.5 und 10 km<sup>2</sup> aufweisen. Da gemäss BAUMGARTNER & LIEBSCHER (1996) die Grösse des Einzugsgebietes einen wesentlichen Einfluss auf die Abflusspende im Hochwasserfall haben kann, wurde darauf geachtet, dass die Fläche der Einzugsgebiete, immer in der gleichen Grössenordnung liegt.

Aus der Übersicht in Abbildung 14.3 a werden die unter Anwendung dieser Kriterien bestimmten Einzugsgebiete ersichtlich. Hierbei fällt auf, dass sich um den Öschinensee sowie im Suld- und im Kiental grössere Regionen befinden, in denen keine Einzugsgebiete ausgeschieden werden konnten, welche die vorgegebenen Kriterien erfüllen.

Die wichtigsten Gebietskennwerte sowie die Namen der untersuchten Teileinzugsgebiete sind in Anhang B enthalten. Dort sind auch die Ergebnisse der Hochwasserabschätzungen mit den verschiedenen Methoden im Detail aufgeführt.

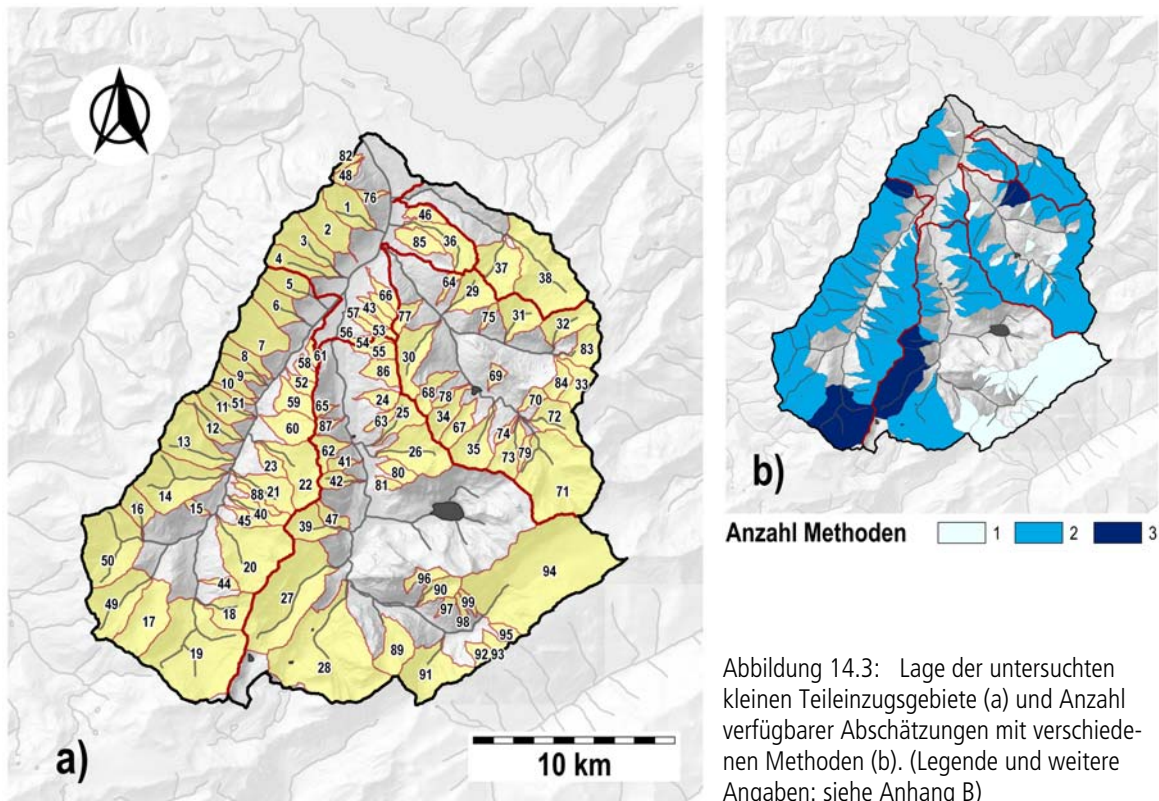


Abbildung 14.3: Lage der untersuchten kleinen Teileinzugsgebiete (a) und Anzahl verfügbarer Abschätzungen mit verschiedenen Methoden (b). (Legende und weitere Angaben: siehe Anhang B)

Aus Abbildung 14.3 b geht zudem hervor, wie viele verschiedene Abschätzungen des 100-jährlichen Hochwasserabflusses pro Teileinzugsgebiet vorliegen. Es zeigt sich, dass für die meisten Einzugsgebiete zwei Hochwasserabschätzungen aus verschiedenen Methoden verfügbar sind. Für einige Einzugsgebiete ist nur eine Abschätzung verfügbar (hellblaue Flächen), für andere liegen sogar drei Abschätzungen vor (dunkelblaue Flächen).

Tabelle 14.1 zeigt, aus welcher Quelle die verschiedenen Abschätzungen stammen: Für die meisten der 99 beurteilten Teileinzugsgebiete ist eine Abschätzung mit der Methode Schaffner (98 Einzugsgebiete) bzw. aus den Technischen Berichten (64 Einzugsgebiete) verfügbar. Bei ausgewählten Einzugsgebieten, für die keine Angabe in den Technischen Berichten enthalten ist, wurden Abschätzungen mit HAKESCH durchgeführt (16 Einzugsgebiete). Diese Auswahl musste getroffen werden, weil der zeitliche Aufwand für eine Abschätzung mit dieser Methode relativ gross ist. Für die sechs Einzugsgebiete mit einer Fläche über 10 km<sup>2</sup> wurde zudem eine Abschätzung mit HQx\_meso\_CH durchgeführt.

Tabelle 14.1: Anzahl der Teileinzugsgebiete, für welche mit verschiedenen Methodenkombinationen Hochwasserabschätzungen durchgeführt wurden.

Anzahl Einzugsgebiete	Technische Berichte	HAKESCH	HQx_meso_CH	Methode Schaffner
3	X	X		X
2	X		X	X
59	X			X
13		X		X
3			X	X
18				X
1			X	

Aus Tabelle 14.1 wird zudem die Anzahl der verschiedenen **Methodenkombinationen**, mit welchen die Einzugsgebiete beurteilt wurden, ersichtlich. Daraus geht hervor, dass für die meisten Einzugsgebiete eine Abschätzung aus den Technischen Berichten vorliegt und gleichzeitig eine mit der Methode Schaffner durchgeführt wurde (insgesamt für 59 Einzugsgebiete). Für drei weitere Einzugsgebiete wurde neben den Abschätzungen aus den Technischen Berichten und derjenigen mit der Methode Schaffner eine Beurteilung mit HAKESCH durchgeführt bzw. für zwei grössere Einzugsgebiete eine mit HQx\_meso\_CH.

Zur Beurteilung der Plausibilität der Abschätzungen, welche aus den verschiedenen Methoden resultieren, wurden die Ergebnisse pro Teileinzugsgebiet miteinander verglichen. Da sich die Datengrundlage für die einzelnen Teileinzugsgebiete jedoch stark unterscheidet und für einen aussagekräftigen Vergleich eine grössere Anzahl an Wertepaaren vorhanden sein muss, waren nur die folgenden Vergleiche möglich:

- > **Technische Berichte – Schaffner:** Für diesen Vergleich ist mit 59 Wertepaaren die grösste Grundgesamtheit vorhanden.
- > **HAKESCH – Schaffner:** Für diesen Vergleich liegen mit 16 Wertepaaren bereits deutlich weniger Daten vor, was die Aussagekraft stark einschränkt.

Alle weiteren Vergleiche (z.B. HAKESCH – Technische Berichte) konnten auf Grund der kleinen Anzahl vorliegender Abschätzungen nicht durchgeführt werden. Während in Kapitel 14.4 auf die Resultate der einzelnen Methoden eingegangen wird, werden in Kapitel 14.5 die Ergebnisse der verschiedenen Methodenvergleiche besprochen.

## 14.4 Resultate der einzelnen Methoden

In Abbildung 14.4 sind die Resultate der Abschätzungen mit den verschiedenen Methoden in der Übersicht dargestellt. Aus dieser Zusammenstellung wird zudem ersichtlich, welche Einzugsgebiete mit welchen Methoden beurteilt wurden.

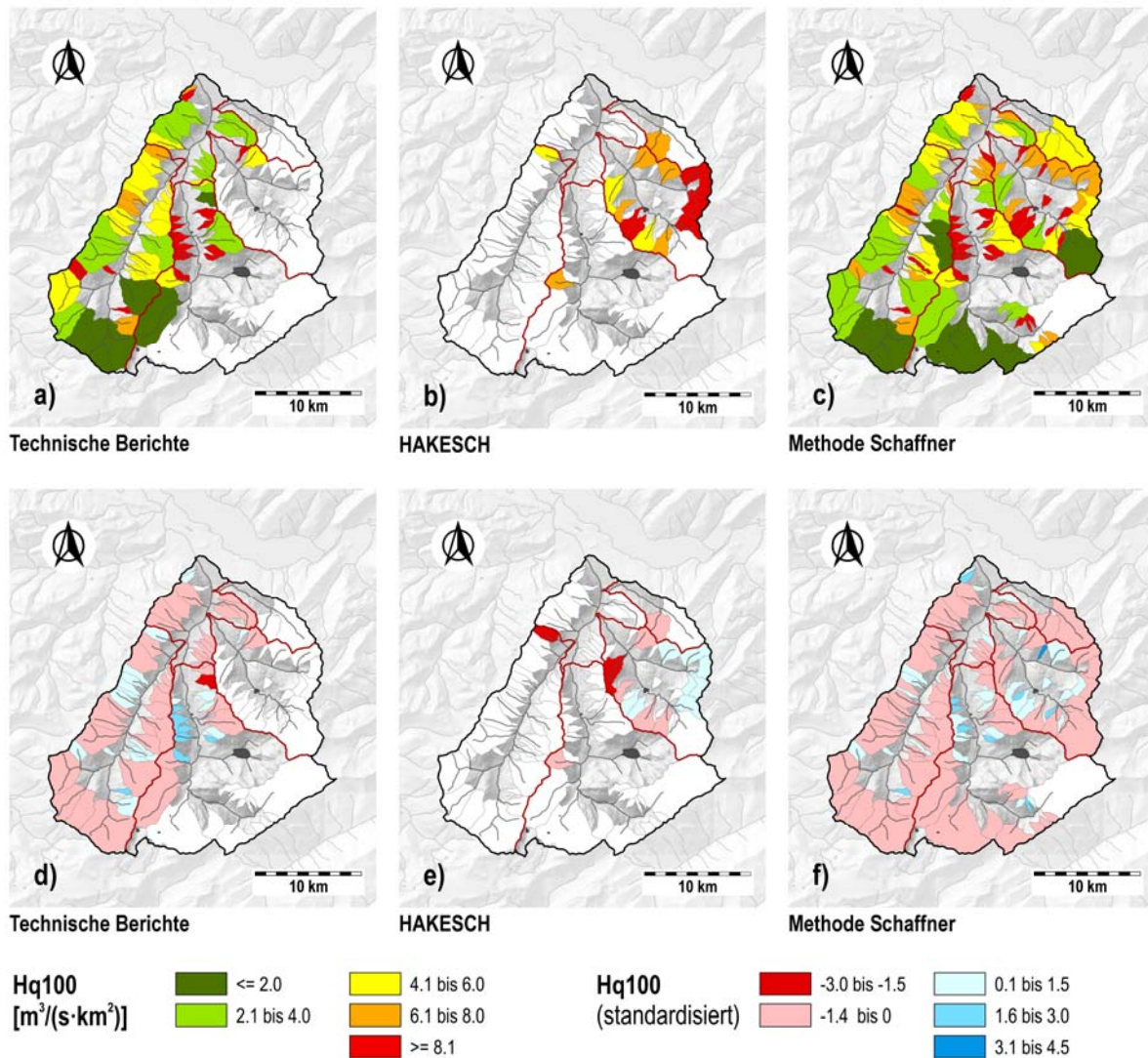


Abbildung 14.4: Resultate der Abschätzung der 100-jährlichen Hochwasserabflusspende (Hq100) mit unterschiedlichen Methoden. a bis c: absolute Werte, d bis f: standardisierte Werte. (Daten: ZGRAGGEN 2009)

Für die schwach besiedelten Regionen im hinteren Kandertal, im Kien- und im Suldtal (vgl. Anhang A) sind keine Abschätzungen aus den Technischen Berichten verfügbar (Abbildung 14.4 a). Deshalb wurden vor allem im Kiental Abschätzungen mit HAKESCH durchgeführt (Abbildung

14.4 b). Ein wesentlicher Vorteil der Methode Schaffner wird aus Abbildung 14.4 c ersichtlich: Die Hochwasserabschätzungen können für sämtliche Einzugsgebiete, welche kleiner als 20 km<sup>2</sup> sind, ohne grossen zeitlichen Aufwand durchgeführt werden. Deshalb liegen für fast alle kleinen Einzugsgebiete Hochwasserabschätzungen mit dieser Methode vor. Die Ergebnisse für das Teileinzugsgebiet im hinteren Gasterntal, welche mit HQx\_meso\_CH berechnet wurden, sind in Anhang C aufgeführt.

Die räumlichen Muster, welche bei den Abschätzungen mit den verschiedenen Methoden entstehen, werden durch **Standardisierung** (Abbildung 14.4 d bis f) der Hochwasserabflusssspenden (vgl. Gleichung 15.3) noch deutlicher ersichtlich und können besser untereinander verglichen werden. Gleichzeitig werden durch die Standardisierung allfällige systematische Abweichungen einzelner Methoden reduziert. Bei dieser Darstellung deuten die blau dargestellten Einzugsgebiete auf die höchsten Abflusssspenden bei einem 100-jährlichen Hochwasserereignis hin, die rot dargestellten Gebiete entsprechen den kleinsten berechneten Abflusssspenden.

Bei den einzelnen Methoden lässt sich das folgende **räumliche Muster** beobachten:

- > Bei den Angaben aus den **Technischen Berichten** (a bzw. d) zeigt sich, dass für Einzugsgebiete im vorderen Kandertal und vereinzelt in der Region Adelboden sehr grosse Hochwasserabflusssspenden abgeschätzt wurden. Während im vorderen Engstligental im Raum Frutigen hohe Werte abgeschätzt werden, sind die Angaben im hintersten Engstligental sowie im nördlichen Bereich des Gesamteinzugsgebietes zwischen Frutigen und Mülönen am kleinsten.
- > Bei den Abschätzungen mit **HAKESCH** (b bzw. e) zeigt sich, dass für alle mit dieser Methode abgeschätzten Teileinzugsgebiete, besonders aber für diejenigen im hinteren Kiental mit erhöhten Hochwasserabflusssspenden gerechnet werden muss. Im vorderen Teil des Kientals sowie in den übrigen beurteilten Einzugsgebieten des Engstligen- und Kandertals werden etwas tiefere Werte abgeschätzt. Es fällt auf, dass mit dieser Methode nur Abschätzungen erzielt werden, die über einer 100-jährlichen Hochwasserabflusssspende ( $H_q100$ ) von 4 m<sup>3</sup>/(s·km<sup>2</sup>) liegen.
- > Das räumliche Muster, welches sich aus den Abschätzungen anhand der **Methode Schaffner** (c bzw. f) ergibt, bestätigt diejenigen aus den anderen beiden Methoden für viele Bereiche des Einzugsgebietes. Differenzen treten z.B. im hinteren Kiental auf.

## 14.5 Synthesekarte

### 14.5.1 Herleitung der definitiven Hochwasserabflusssspende

ZGRAGGEN (2009) hat für jedes der untersuchten Teileinzugsgebiete die in Abbildung 14.4 dargestellten Abschätzungen der 100-jährlichen Hochwasserabflusssspende zusammengeführt und eine definitive Abschätzung pro Einzugsgebiet erstellt. Die Resultate sind in Abbildung 14.8 als **Synthesekarte** dargestellt. Die erstellte Synthesekarte soll dazu dienen, die Hochwasserabschätzungen der einzelnen Teileinzugsgebiete besser miteinander vergleichen und somit eine räumliche Beurteilung der hochwasserhydrologischen Verhältnisse auf dieser räumlichen Skala vornehmen zu können. Anhand dieser Datengrundlage wird zudem auch ein Vergleich zu anderen Ansätzen (vgl. Kapitel 15) ermöglicht. Zur Festlegung einer definitiven hochwasserhydrologischen Bemessungsgrösse wird jedoch auf die Empfehlungen in Kapitel 23.2.2 verwiesen.

Auf Grund der fehlenden, gemessenen «wahren» Abflusswerte (vgl. Kapitel 14.1), musste der definitive Wert in der Synthesekarte gutachterlich mit Hilfe eines erstellten Entscheidungsbaums, welcher aus Abbildung 14.5 ersichtlich wird, aus den vorliegenden Abschätzungen abgeleitet werden. Die verwendeten Kriterien, welche dem Entscheidungsbaum zu Grunde liegen, beruhen auf Erfahrungen, welche aus der Arbeit von ZGRAGGEN (2009) resultierten.

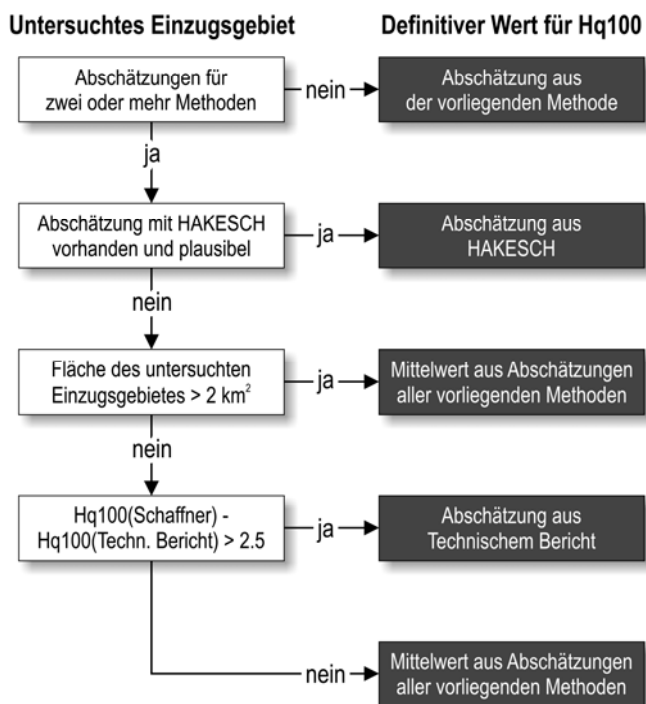


Abbildung 14.5: Schema zur Bereitstellung der Synthesekarte der 100-jährlichen Hochwasserabflussspende (Hq100) (vgl. Abbildung 14.8)

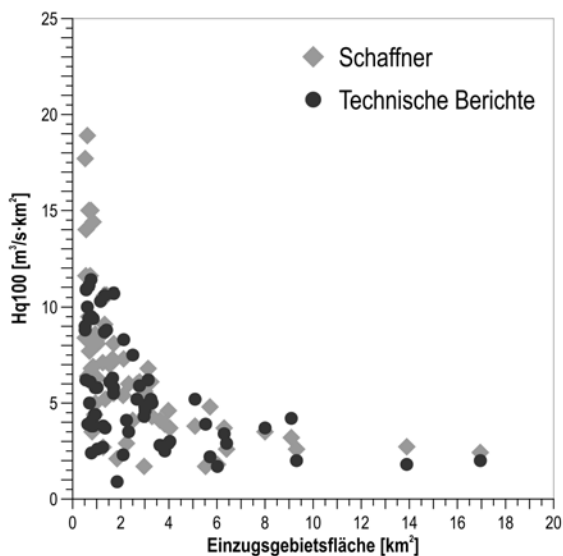


Abbildung 14.6: Vergleich der 100-jährlichen Hochwasserabflussspende: Abschätzung mit der Methode Schaffner und Angabe aus den Technischen Berichten in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgrösse. (Daten: ZGRAGGEN 2009)

Das erste Kriterium zur Festlegung des definitiven Werts des 100-jährlichen Hochwasserspitzenabflusses bildet die **Anzahl der Abschätzungen**, welche für ein Einzugsgebiet vorliegen. Falls die Abschätzung nur anhand einer Methode durchgeführt wurde, wird diese als definitiver Wert in die Synthesekarte übernommen. Bei mehreren vorliegenden Abschätzungen wird – falls vorhanden

und plausibel – der definitive Wert von **HAKESCH** in die Synthesekarte aufgenommen. Dies, weil auf Grund der für diese Methode notwendigen Feldarbeit und damit verbundener, vertiefter Gebietskenntnis, davon ausgegangen werden kann, dass die Abschätzung zuverlässiger ist, als die Resultate aus dem statistischen Modell der Methode Schaffner.

Falls keine Abschätzung mit HAKESCH vorliegt und das Gebiet grösser als 2 km<sup>2</sup> ist, wird für die Synthesekarte der Mittelwert aus den bestehenden Abschätzungen übernommen. Diesem Kriterium liegt die Beobachtung zu Grunde, dass die Abschätzungen aus der Methode Schaffner für kleine Einzugsgebiete zum Teil sehr hohe Werte liefern. Wie aus Abbildung 14.6 hervor geht, sind die Differenzen zwischen den Abschätzungen aus den beiden Datengrundlagen bei einer Einzugsgebietsgrösse über 2 km<sup>2</sup> wesentlich kleiner.

Das letzte Kriterium, welches für die Erstellung der Synthesekarte verwendet wird, stellt die Differenz zwischen der Abschätzung mit der Methode Schaffner und den Angaben aus den Technischen Berichten dar. Falls das Gebiet kleiner als 2 km<sup>2</sup> und die Differenz der abgeschätzten Hochwasserabflusspende grösser als 2.5 m<sup>3</sup>/(s·km<sup>2</sup>) ist, wird nur der Wert aus den Technischen Berichten in die Synthesekarte übernommen. Andernfalls werden wiederum die Abschätzungen aus den vorliegenden Methoden gemittelt.

### 14.5.2 Analyse der Methodenkombinationen

Wie aus Abbildung 14.7 hervor geht, können die Einzugsgebiete anhand der verwendeten Kombination an Hochwasserabschätzmethode in zwei fast gleich grosse Gruppen eingeteilt werden. Für etwas mehr als die Hälfte aller Einzugsgebiete (51%; in violetten Farben dargestellt) wurde die definitive Hochwasserabflusspende in der Synthesekarte aus zwei Methoden abgeleitet. Der grösste Teil davon (44%) wurde als Mittelwert aus den Abschätzungen der Technischen Berichte und denjenigen aus der Methode Schaffner berechnet.

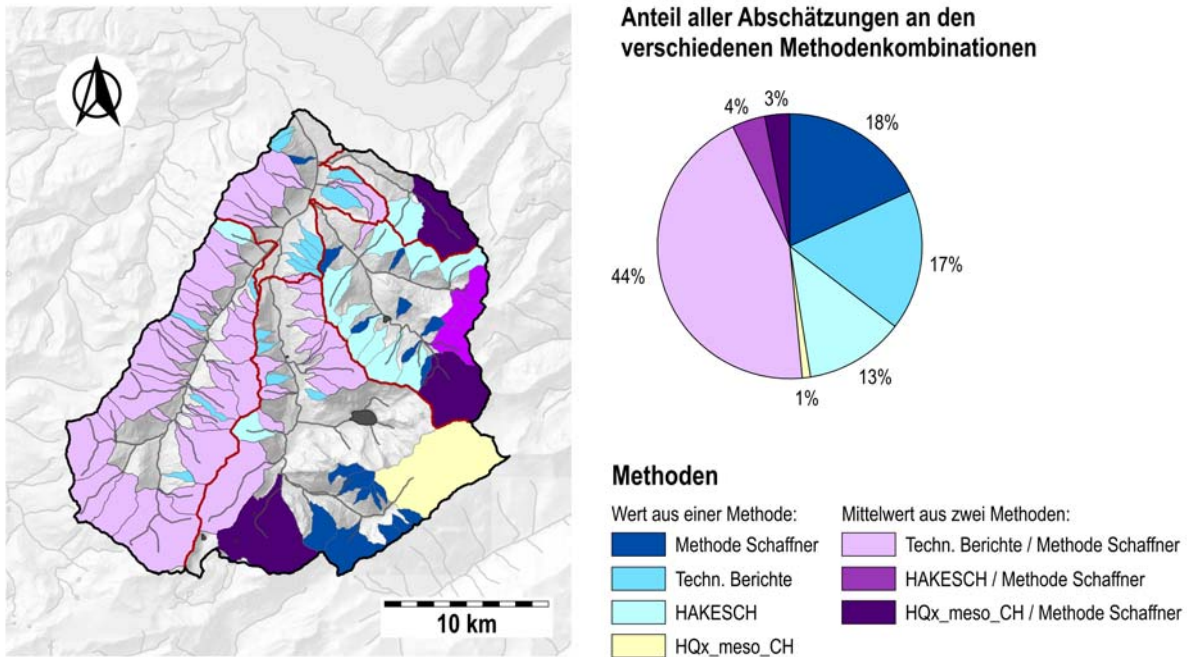


Abbildung 14.7: Verwendete Methoden(-kombinationen) zur Herleitung der Synthesekarte

Für die andere Hälfte der Einzugsgebiete (49%; in blauer und gelber Farbe dargestellt) wurde der Wert direkt von einer Methode in die Synthesekarte übernommen. Wo Abschätzungen mit HAKESCH durchgeführt wurden, floss der entsprechende Wert in den meisten Fällen in die Synthesekarte ein (13%). Ausnahmen bestehen aber im hinteren Kiental, wo auf Grund des dort anzutreffenden Karsts keine plausiblen Resultate mit der Methode HAKESCH erzielt werden konnten. Bei den beiden weiteren, etwa gleich grossen Gruppen, wurde entweder die Angabe aus den Technischen Berichten (17%) oder die Abschätzung mit der Methode Schaffner (18%) übernommen.

Aus Abbildung 14.7 wird ersichtlich, dass die Synthesekarte insgesamt eine grosse Vielfalt an Methodenkombinationen aufweist. Auf die vorhandene inhomogene Datenlage und deren Einfluss auf die Qualität der Abschätzung wird in Kapitel 14.6 eingegangen.

### 14.5.3 Resultate der Methodenkombination (Synthesekarte)

Die aus der in Kapitel 14.5.1 dargestellten Methodenkombination resultierende Synthesekarte (Abbildung 14.8) zeigt die definitive Abschätzung pro Einzugsgebiet in der Übersicht.

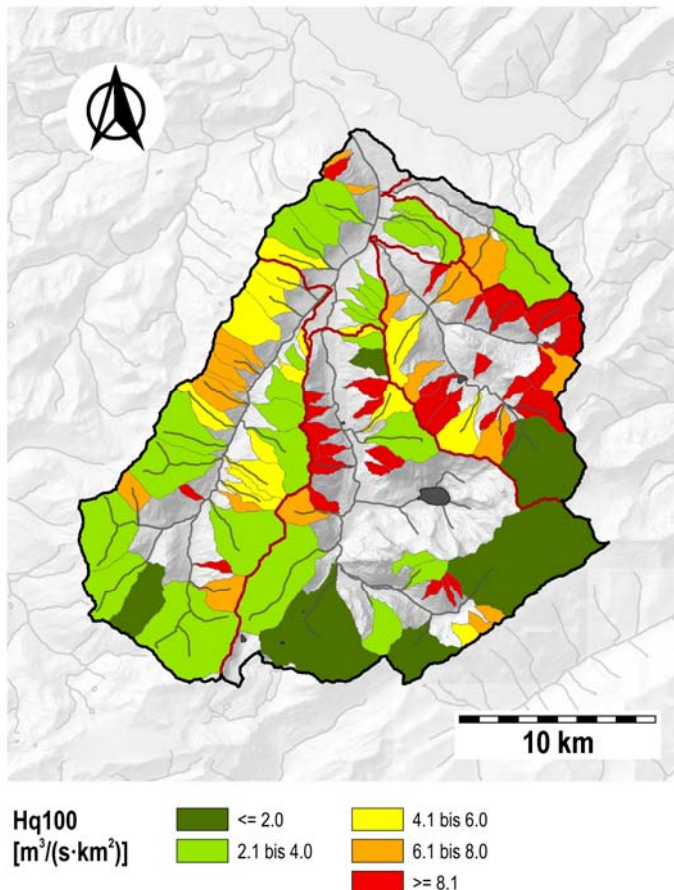


Abbildung 14.8: Synthesekarte der abgeschätzten 100-jährlichen Hochwasserabfluss-spenden für die kleinen Teileinzugsgebiete im Einzugsgebiet Kander-Hondrich. (Daten: ZGRAGGEN 2009)

Es fällt auf, dass das räumliche Muster demjenigen der einzelnen Methoden (vgl. Abbildung 14.4 a bis c) in weiten Teilen sehr ähnlich ist:

- > **Hochwasserabfluss-spenden (Hq100) > 4 m<sup>3</sup>/(s·km<sup>2</sup>) (gelbe, orange und rote Flächen):** Grössere Hochwasserabfluss-spenden können bei mehreren Teileinzugsgebieten im



Kiental, im vorderen Kander- und im vorderen Engstligental beobachtet werden. Im Gebiet zwischen Kandersteg und Kandergrund, im hinteren Kiental sowie im Einzugsgebiet des Spiggebachs treten diese sogar verbreitet auf.

- > **Hochwasserabflusspenden ( $H_q100$ )  $< 4 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$  (grüne Flächen):** Im hinteren Kanderental (Gasterental) und teilweise auch im hinteren Engstligental sowie im Gebiet zwischen Frutigen und Mülenen sind bei den entsprechenden kleinen Teileinzugsgebieten geringere Abflusspenden zu beobachten.

Allerdings ist bei dieser Beurteilung zu beachten, dass auch eine Abhängigkeit der abgeschätzten Hochwasserabflusspende von der Einzugsgebietsgrösse besteht: Während für die kleineren Einzugsgebiete unter ca.  $5 \text{ km}^2$  sowohl grosse wie auch kleinere Werte auftreten können, sind bei den grösseren Einzugsgebieten über ca.  $5 \text{ km}^2$  nur Werte der Klassen bis  $4 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$  vertreten.

## 14.6 Methodenvergleich

In diesem Unterkapitel werden die Hochwasserabschätzungen der verschiedenen Methoden untereinander sowie mit den definitiven Abschätzungen aus der Synthesekarte verglichen. Da im Einzugsgebiet der Kander keine Abflussmessungen für die untersuchten kleinen Einzugsgebiete vorliegen, beschränkt sich die Beurteilung auf den Vergleich der Resultate aus den verschiedenen Methoden. Dazu wurden zwei verschiedene Kriterien beigezogen:

- > Die **Ähnlichkeit des räumlichen Muster**, aus zwei verschiedenen Methoden, wird anhand des Pearson-Korrelationskoeffizienten, welcher anhand der Abschätzungen für alle Teileinzugsgebiete berechnet wird, beurteilt (vgl. Kapitel 14.6.1). Allerdings lässt sich mit diesem Kriterium die absolute Übereinstimmung der einzelnen Abschätzungen bzw. eine systematische Über- oder Unterschätzung der Resultate einer Methode gegenüber denjenigen einer anderen nicht beurteilen.
- > Für die Beurteilung der **Abweichungen zwischen den Hochwasserabschätzungen** mit den verschiedenen Methoden wurden die relativen Differenzen berechnet (vgl. Kapitel 14.6.2). Anhand dieses Gütemasses können allenfalls vorliegende systematische Über- und Unterschätzungen beurteilt werden.

In Unterkapitel 14.6.3 werden zudem für die Gebiete mit drei Hochwasserabschätzungen aus verschiedenen Methoden die Resultate qualitativ miteinander verglichen.

Anhand der beiden Gütemasse (Korrelationskoeffizient, absolute Abweichung) sowie des qualitativen Methodenvergleichs sollen schliesslich Aussagen zur Plausibilität und zur Anwendung der einzelnen Methoden gemacht werden (vgl. Kapitel 14.7).

### 14.6.1 Ähnlichkeit des räumlichen Musters

In Tabelle 14.2 sind die **Pearson-Korrelationskoeffizienten** aufgeführt, welche die Ähnlichkeit des räumlichen Musters aufzeigt, welches jeweils aus den Hochwasserabschätzungen der verschiedenen Datengrundlagen und Methoden resultiert. Die hoch signifikanten Korrelationskoeffizienten, welche einen p-Wert unter 0.001 aufweisen, sind mit zwei Sternen gekennzeichnet. In Klammern unter dem Korrelationskoeffizienten ist die Anzahl der für die Berechnung verfügbaren Wertepaare angegeben.

Aus Tabelle 14.2 wird ersichtlich, dass die Korrelationen zwischen den Abschätzungen mit den verschiedenen Methoden und der Abschätzung in der Synthesekarte durchwegs höher sind, als diejenigen zwischen den einzelnen Abschätzungen mit den verschiedenen Methoden. Dies kann damit erklärt werden, dass für die Hochwasserabschätzung in der Synthesekarte die Werte aller Methoden und Grundlagendaten verwendet und zusammengeführt wurden. Ebenfalls an den leicht höheren Korrelationskoeffizienten wird ersichtlich, dass die Abschätzungen mit HAKESCH und die Angaben aus den Technischen Berichten bevorzugt in die Synthesekarte übernommen wurden. Dieser Sachverhalt ist eine direkte Auswirkung des Schemas, welches der Methodenkombination zu Grunde liegt (Abbildung 14.5). So ist zum Beispiel die Korrelation zwischen den Resultaten aus HAKESCH und der definitiven Abschätzung aus der Synthesekarte deshalb so hoch, weil nahezu alle Abschätzungen mit HAKESCH unverändert als definitiver Wert in die Synthesekarte übernommen wurden.

Tabelle 14.2: Korrelationsmatrix für die Hochwasserabschätzungen aus den verschiedenen Methoden und den definitiven Abschätzungen aus der Synthesekarte

	Synthesekarte	Methode Schaffner	Technische Berichte	HAKESCH
Synthesekarte	1.000 (99)	0.870* (98)	0.964* (64)	0.972* (16)
Methode Schaffner		1.000 (98)	0.772* (64)	0.637* (16)
Technische Berichte			1.000 (64)	-0.949 (3)
HAKESCH				1.000 (16)

\*: p-Wert < 0.001, Korrelation hochsignifikant; in Klammern: Anzahl verfügbarer Wertepaare

Bei den Korrelationen zwischen den Abschätzungen mit der Methode Schaffner und denjenigen mit HAKESCH bzw. mit den Angaben aus den Technischen Berichten werden deutlich tiefere, jedoch noch hochsignifikante Werte erzielt. Dies zeigt auf, dass bei der Bestimmung der Hochwasserabflussspenden unter Einbezug von prozessorientierten Gebietskennwerten ein anderes räumliches Muster entsteht, als bei der Anwendung des rein statistischen Modells von Schaffner. Allerdings ist zu beachten, dass der Vergleich zwischen den Abschätzungen mit HAKESCH und denjenigen mit der Methode Schaffner auf nur 16 Werten beruht und deshalb mit entsprechender Vorsicht zu interpretieren ist. Für den Vergleich des räumlichen Musters zwischen den Abschätzungen mit HAKESCH und den Angaben aus den Technischen Berichten können auf Grund der geringen Anzahl verfügbarer Wertepaare (3) keine Aussagen bezüglich der Ähnlichkeit des räumlichen Musters gemacht werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die Abschätzungen aus den verschiedenen Methoden stärker unterscheiden als die kombinierten, definitiven Werte in der Synthesekarte und die Abschätzungen der verschiedenen Methoden. Die in der **Synthesekarte** dargestellten Hochwasserabflussspenden stellen einen **Kompromiss** dar, welcher das aus den einzelnen Methoden resultierende räumliche Muster gut repräsentiert und für die Beurteilung der räumlich differenzierten Hochwasserverhältnisse im untersuchten Einzugsgebiet angewendet werden kann.

## 14.6.2 Abweichungen zwischen den Hochwasserabschätzungen

Zur Beurteilung der Differenzen zwischen den verschiedenen Methoden wurden die **prozentualen Abweichungen** zwischen den Resultaten der einzelnen Methoden und den definitiven Abschätzungen aus der Synthesekarte berechnet. Die entsprechenden Resultate sind in Abbildung 14.9 in der Übersicht dargestellt.

Abbildung 14.9 a bis c zeigen die Abweichungen zwischen der Synthesekarte und den Angaben aus den Technischen Berichten, den Abschätzungen mit HAKESCH und den Resultaten der Methode Schaffner. In Abbildung 14.9 d und e sind die berechneten Abweichungen zwischen den Angaben aus den Technischen Berichten und den Resultaten der Methode Schaffner sowie zwischen den Resultaten aus HAKESCH und der Methode Schaffner dargestellt. Auf den Vergleich der Angaben aus den Technischen Berichten und den Resultaten aus HAKESCH wird auf Grund der geringen Anzahl an Wertepaaren verzichtet.

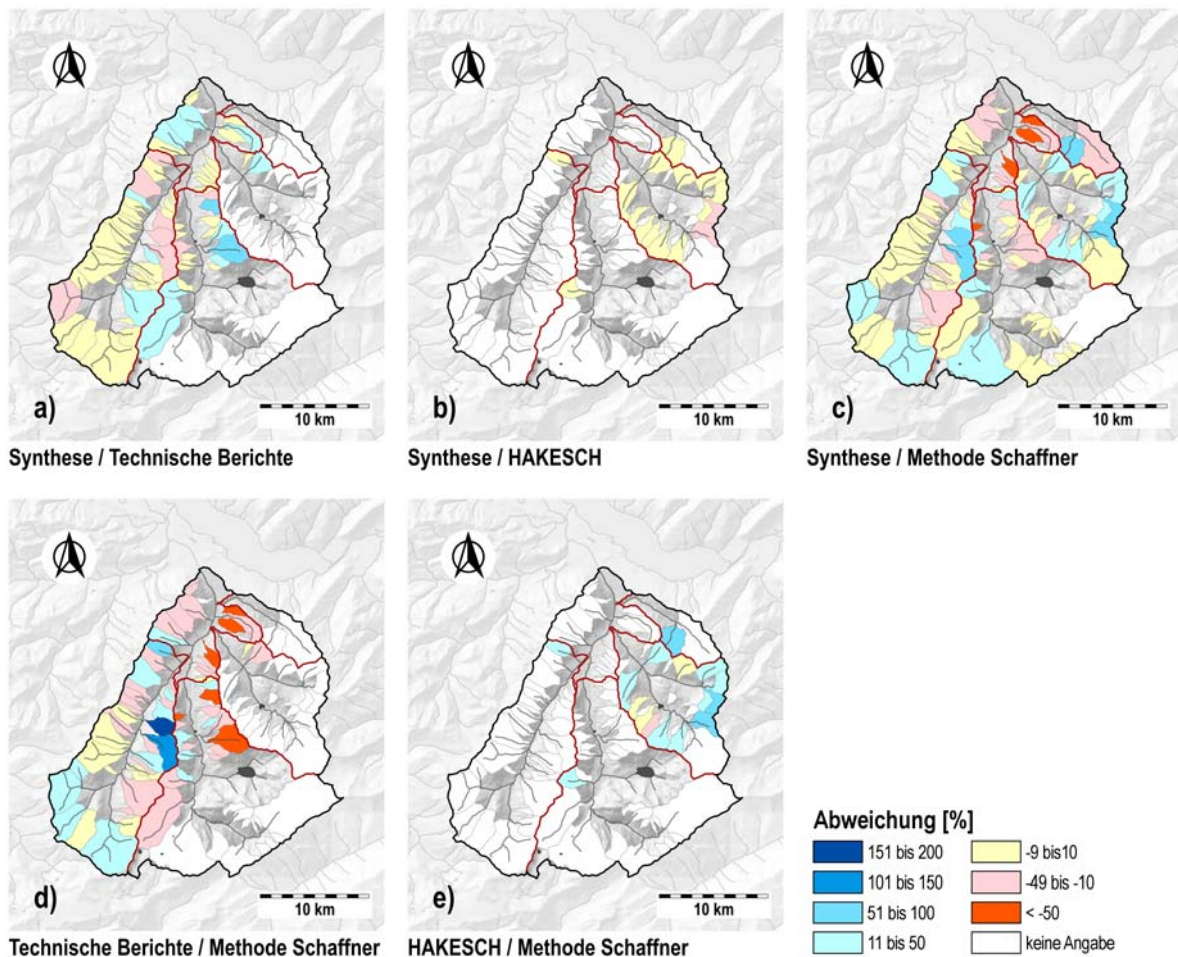


Abbildung 14.9: Prozentuale Abweichungen zwischen den Abschätzungen der 100-jährlichen Hochwasserabflussspende aus verschiedenen Methoden und der definitiven Abschätzung in der Synthesekarte.

In den verschiedenen Karten in Abbildung 14.9 sind geringe Abweichungen von +/- 10% in gelber, positive Abweichungen in blauer und negative Abweichungen in roter Farbe dargestellt. Ein blau eingefärbtes Einzugsgebiet bedeutet z.B. in Abbildung 14.9 a, dass die Abschätzung in der Synthesekarte (= Synthese) deutlich über der Angabe in den Technischen Berichten liegt.

Aus Abbildung 14.9 a bis c wird ersichtlich, dass die Abweichungen zwischen der Synthesekarte und den Abschätzungen, welche unter Einbezug von Felduntersuchungen berechnet wurden (Technische Berichte und HAKESCH), etwas geringer ausfallen, als die Differenzen zwischen der Synthese und der Methode Schaffner. Dies ist wiederum auf das Schema, welches für die Erstellung der Synthesekarte verwendet wurde, zurückzuführen. Gleichzeitig fällt bei diesen Zusammenstellungen auf, dass bei allen Vergleichen für eine grosse Anzahl an Einzugsgebieten kleine Abweichungen (in gelber Farbe dargestellt) auftreten; extreme positive und negative Abweichungen treten nur in einzelnen Fällen auf.

Im Gegensatz dazu tritt beim Vergleich zwischen den Angaben aus den Technischen Berichten und den Abschätzungen mit der Methode Schaffner eine ausgeprägte Variation an Abweichungen auf (Abbildung 14.9 d). Hier sind sowohl deutliche Über- wie auch Unterschätzungen festzustellen. Beim Vergleich der Hochwasserabflussspenden, welche mit den Methoden HAKESCH und Schaffner abgeschätzt wurden (e), kann festgestellt werden, dass die Werte aus HAKESCH in den meisten Fällen über diejenigen aus der Methode Schaffner liegen. Bei den verschiedenen Vergleichen in Abbildung 14.9 fällt auf, dass das räumliche Muster der Abweichungen keine klar ersichtliche Struktur aufweist. Es lässt sich kein Zusammenhang zwischen der räumlichen Lage und den berechneten Abweichungen feststellen. Die Interpretation wird allerdings dadurch erschwert, dass nicht für alle Methoden flächendeckende Abschätzungen vorliegen.

Zusammenfassend können aus Abbildung 14.9 die folgenden **wesentlichen Beobachtungen** festgehalten werden:

- > Die Synthesekarte repräsentiert die Resultate der verschiedenen Methoden gut, was auf den verwendeten Entscheidungsbaum, welcher der Synthesekarte zu Grunde liegt, zurückgeführt werden kann (vgl. Abbildung 14.5). Dies zeigt sich daran, dass für zahlreiche Einzugsgebiete geringe prozentuale Abweichungen zwischen dem Wert in der Synthesekarte und den Resultaten aus den verschiedenen Methoden zu beobachten ist.
- > Beim Vergleich der Hochwasserabflussspenden, welche aus den verschiedenen Methoden resultieren, fällt auf, dass die Abschätzungen mit HAKESCH häufig über diejenigen mit der Methode Schaffner liegen.
- > Die Angaben aus den Technischen Berichten sind mehrheitlich tiefer, als die Abschätzungen welche aus der Methode Schaffner resultieren, wobei bei diesem Vergleich auch einzelne sehr grosse Überschätzungen zu beobachten sind.

### 14.6.3 Methodenvergleich in Gebieten mit drei Abschätzungen

Der Vergleich der Hochwasserabflussspenden in den Gebieten, mit drei verschiedenen Abschätzungen, ist in Abbildung 14.10 für **Einzugsgebiete mit einer Fläche bis 10 km<sup>2</sup>** und in Abbildung 14.11 für **Einzugsgebiete mit einer Fläche über 10 km<sup>2</sup>** dargestellt.

Aus Abbildung 14.10 geht hervor, dass bei den beiden Einzugsgebieten **«Erlibach»** (a) und **«Allmebach»** (b) die Verhältnisse zwischen den Resultaten der verschiedenen Methoden sehr ähnlich sind: Während die Abschätzungen aus den Technischen Berichten jeweils den kleinsten Wert darstellen, resultiert aus HAKESCH der grösste Wert. Die Methode Schaffner liefert jeweils einen Wert, welcher zwischen den beiden anderen Abschätzungen liegt. Es gilt auch zu beachten, dass beim «Erlibach» durchwegs leicht grössere Werte abgeschätzt wurden als beim «Allmebach», was auf Grund der leicht unterschiedlichen Gebietsgrösse plausibel erscheint. Die von ZGRAGGEN (2009) für die

Synthesekarte erstellte, definitive Abschätzung berücksichtigt gemäss dem verwendeten Schema (vgl. Abbildung 14.5) jeweils den Wert aus HAKESCH.

Dagegen ist beim «**Leimbach**» (Abbildung 14.10 c) zu beachten, dass die Angabe aus den Technischen Berichten deutlich über den beiden anderen Werten liegt. Dies obschon in den gleichen Quellen (TBA 2003-2005) für zwei angrenzende und aus Sicht der Gebietseigenschaften sehr ähnliche Einzugsgebiete tiefere Hochwasserabflussspitzen angegeben werden. Wie auch bei den beiden anderen Gebieten (Erlibach und Allmebach) ist ebenfalls eine höhere Abschätzung von HAKESCH gegenüber der Abschätzung aus der Methode Schaffner zu beobachten. Die erhöhte Angabe für den «Leimbach» aus den Technischen Berichten dürfte wohl darauf zurückzuführen sein, dass an diesem Wildbach in Frutigen bei verschiedenen Hochwasserereignissen wiederholt verheerende Schäden aufgetreten sind und die Abschätzung deshalb vermutlich mit entsprechenden Sicherheitsmargen versehen wurde.

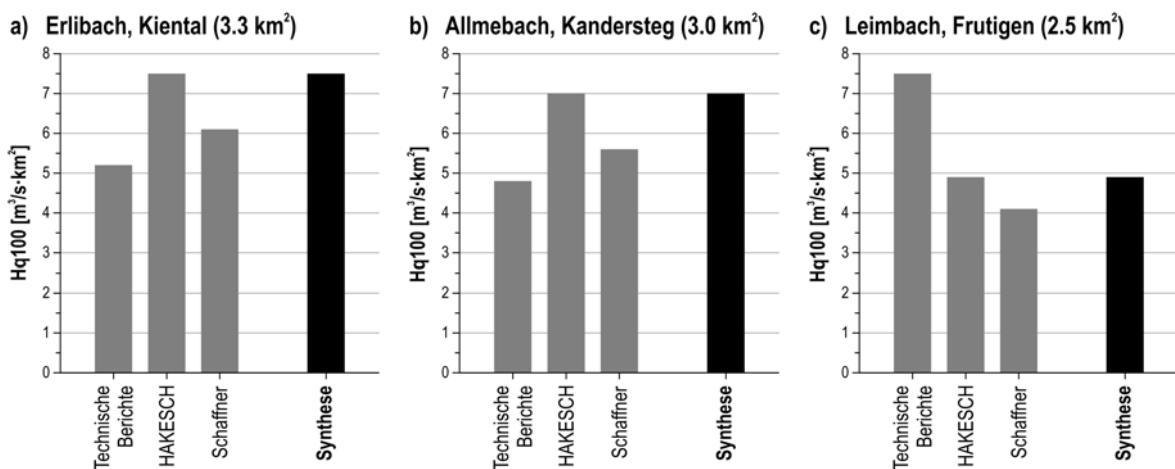


Abbildung 14.10: Hochwasserabflussspenden für die Teileinzugsgebiete < 10 km² mit drei verschiedenen Abschätzungen (Daten: ZGRAGGEN 2009)

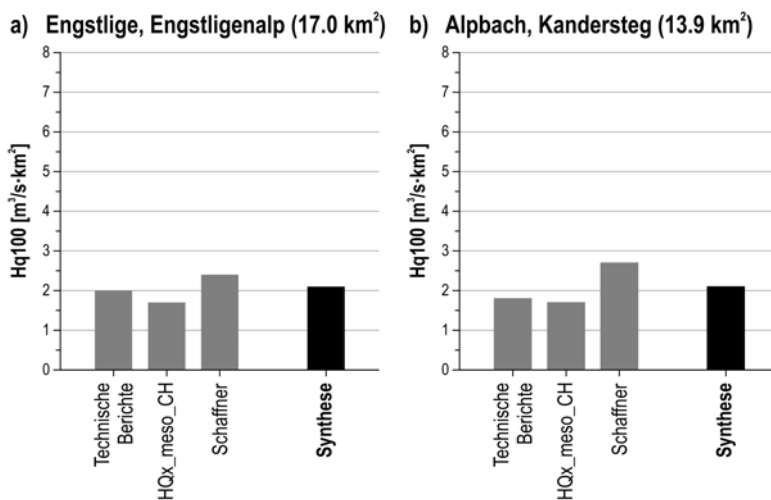


Abbildung 14.11: Hochwasserabflussspenden für die Teileinzugsgebiete > 10 km² mit drei verschiedenen Abschätzungen (Daten: ZGRAGGEN 2009)

Die Ergebnisse für die beiden Gebiete mit einer Fläche über 10 km<sup>2</sup>, für welche ebenfalls mehrere Abschätzungen durchgeführt wurden, sind in Abbildung 14.11 a und b dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Methode Schaffner für diese beiden Beispiele jeweils die grössten Werte liefert, während die beiden Werte aus den Technischen Berichten bzw. aus HQx\_meso\_CH kleiner sind. Die Abschätzungen mit HQx\_meso\_CH fallen in diesen beiden Beispielen jeweils am kleinsten aus; der Unterschied ist allerdings gering. Die definitive Abschätzung für die Synthesekarte wurde von ZGRAGGEN (2009) bei diesen Einzugsgebieten als Mittelwert aus den drei verschiedenen Resultaten berechnet.

Aus den in Abbildung 14.10 und Abbildung 14.11 dargestellten Resultaten wird Folgendes ersichtlich:

- > Aus der Methode Schaffner resultieren für die kleinen **Einzugsgebiete bis 10 km<sup>2</sup>** durchschnittliche Abschätzungen. Die mit HAKESCH abgeschätzten Werte liegen immer über den Resultaten aus der Methode Schaffner. Bei den Angaben aus den Technischen Berichten ist kein eindeutiges Muster zu erkennen. Bei dieser Datenquelle ist davon auszugehen, dass die Abschätzungen auch Einflüssen unterliegen, welche bei den anderen Methoden nicht vorhanden sind (z.B. Gewährleisten von zusätzlicher Sicherheit vor Schäden bei Hochwasserereignissen).
- > Für **Einzugsgebiete über 10 km<sup>2</sup>** resultieren aus der Methode Schaffner tendenziell höhere Werte als aus den beiden anderen Datenquellen. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Abschätzungen fallen für diesen Skalenbereich allerdings nicht so hoch aus wie bei den kleineren Einzugsgebieten. Die Angaben aus den Technischen Berichten sowie die Resultate aus HQx\_meso\_CH liegen in einer vergleichbaren Grössenordnung und unterscheiden sich nur geringfügig.
- > Beim Vergleich der Resultate für die verschiedenen räumlichen Skalenbereiche fällt auf, dass für die grösseren Einzugsgebiete geringere Abflusspenden abgeschätzt werden als für die kleineren Einzugsgebiete. Diese beobachtete Abhängigkeit der Hochwasserabflusspende von der Einzugsgebietsgrösse wird von den Angaben in BAUMGARTNER & LIEBSCHER (1996) bestätigt und scheint deshalb plausibel. Dies ist auch ein Hinweis darauf, dass der räumliche Vergleich auf Basis von kleinen Einzugsgebieten sehr stark durch deren Grösse beeinflusst werden kann.

Bei allen Aussagen ist zu beachten, dass diese auf einer sehr kleinen Stichprobe beruhen und sich die Resultate somit nur mit grosser Vorsicht verallgemeinern lassen.

## 14.7 Fazit

### 14.7.1 Räumliche Muster

Die aus den verschiedenen Methoden resultierenden Abschätzungen (vgl. Synthesekarte, Abbildung 14.8) weisen auf das folgende räumliche Muster der hochwasserhydrologischen Verhältnisse hin:

- > In den nordöstlichen Regionen und im zentralen Teil des Einzugsgebietes Kander-Hondrich (**Chiene, vordere Kander**) ist für ein 100-jährlichen Hochwasserereignis mit **sehr hohen**

**Abflusspenden** zu rechnen. So liegen z.B. die Werte im Kiental fast durchwegs in der höchsten Klasse, was auf ein  $H_q100$  von mehr als  $8 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$  hinweist.

- > Für den hinteren Bereich des Teileinzugsgebietes Kander-Frutigen (**Gasteretal, Schwarzbach und Alpbach**) treten verbreitet tiefe Werte bei den Hochwasserabschätzungen auf. Allerdings lassen sich auch hier in den kleinen Einzugsgebieten vereinzelt hohe Hochwasserabflusspenden beobachten.
- > Im Einzugsgebiet der **Engstlige** resultieren für den vorderen Teil bzw. die westliche Talseite höhere Abschätzungen als für die im hinteren Bereich und auf der östlichen Talseite liegenden Einzugsgebiete.

Das räumliche Muster der definitiven Hochwasserabschätzungen in der Synthesekarte (Abbildung 14.8) repräsentiert die Resultate der verschiedenen Methoden und Datenquellen sehr gut, was einerseits an hohen Korrelationskoeffizienten und andererseits an geringen prozentualen Abweichungen ersichtlich wird (vgl. Kapitel 14.6). Dies kann mit dem zur Festlegung des definitiven Werts gewählten Schema (Abbildung 14.5) erklärt werden, welches die verschiedenen Abschätzungen und Angaben berücksichtigt. Obschon also die Synthesekarte auf Grund einer heterogenen Datengrundlage erstellt wurde, kann den verschiedenen Werten eine hohe Plausibilität zugesprochen werden. Dies vor allem deshalb, weil es mit dem Kombinationsschema gelang, die Stärken und Schwächen der einzelnen Methoden bzw. der verschiedenen Methodenkombinationen, welche für ein einzelnes Einzugsgebiet vorliegen, auszugleichen.

Daneben sind bei den Resultaten der verschiedenen Methoden in weiten Teilen ähnliche räumliche Muster (Abbildung 14.4) zu beobachten, was sich durch hohe Korrelationskoeffizienten ausdrückt. Allerdings können die abgeschätzten Hochwasserabflusspenden für einzelne Teileinzugsgebiete von Methode zu Methode stark variieren, was sich in zum Teil sehr grossen prozentualen Abweichungen äussert. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass das räumliche Muster der Hochwasserabschätzungen – zumindest auf grösserer räumlicher Skala – als plausibel erachtet werden kann.

### 14.7.2 Beurteilung der Methoden

Die Beurteilung der Qualität der verschiedenen Methoden musste auf Grund der Datenverfügbarkeit ohne Abflussmessungen durchgeführt werden; eine eigentliche Validierung der Resultate war aus diesem Grund nicht möglich. Es muss deshalb davon ausgegangen werden, dass die Resultate der Methoden, deren Eingabeparameter auf Felduntersuchungen beruhen (z.B. HAKESCH) eine höhere Plausibilität besitzen, als diejenigen aus dem statistischen Modell der Methode Schaffner. Allerdings sind auch der Anwendung von Methoden wie HAKESCH im Untersuchungsraum Grenzen gesetzt, da sie nicht für verkarstete oder hochalpine und teilweise vergletscherte Einzugsgebiete entwickelt wurden, wie sie im Einzugsgebiet der Kander auch anzutreffen sind.

Die Differenzen zwischen den Abschätzungen aus der Methode Schaffner und den Angaben aus den Technischen Berichten sind sowohl in den sehr kleinen als auch in den grösseren Gebieten besonders ausgeprägt: Die Abschätzung mit der Methode Schaffner liefert in diesen Fällen jeweils die höheren Werte, wobei die Abweichungen teilweise sehr gross sind. Der Methodenvergleich zwischen der Methode Schaffner und HAKESCH zeigt, dass die Abschätzungen mit der Methode Schaffner für die untersuchten Einzugsgebiete einer Fläche zwischen  $2.5$  bis  $5 \text{ km}^2$  durchwegs unter den Abschätzungen mit HAKESCH liegen. Beträgt die Einzugsgebietsfläche zwischen  $0.5$  und  $2.5 \text{ km}^2$ , sind die Abweichungen nur noch gering.

Die Angaben aus den Technischen Berichten sind mit Vorsicht zu interpretieren und müssen je nach Anwendung überprüft werden. Dies deshalb, weil die Abschätzungen auch durch subjektive Aspekte (z.B. zusätzliche Sicherheitsmargen verschiedener Bearbeiter) beeinflusst sein können.

Diese Beurteilung führt zu den nachfolgenden Schlüssen:

- > Die **Methode Schaffner** liefert für kleine Einzugsgebiete unter 2 km<sup>2</sup> und grössere Einzugsgebiete über 10 km<sup>2</sup> zum Teil sehr hohe Abflussspenden, welche deutlich über den Angaben aus den Technischen Berichten liegen. Falls das Einzugsgebiet zwischen 2 und 10 km<sup>2</sup> gross ist, resultieren aus der Methode Schaffner im Vergleich zu den Ergebnissen aus HAKESCH oder aus den Technischen Berichten vergleichbare Werte.
- > **HAKESCH** liefert im Vergleich zu den Ergebnissen der Methode Schaffner und zu den Angaben aus den Technischen Berichten für Einzugsgebiete mit einer Fläche zwischen 2 und 5 km<sup>2</sup> die grössten Werte.
- > Das **räumliche Muster der Abweichungen** zwischen den verschiedenen Werten konnte im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht erklärt werden. Zudem zeigt sich keine klar erkennbare Struktur, welche auf einen signifikanten räumlichen bzw. topographischen Zusammenhang schliessen lassen würde. Es ist denkbar, dass weitere Faktoren bzw. Einzugsgebietseigenschaften (z.B. Gerinnetichte) einen grösseren Einfluss auf die Resultate der verschiedenen Abschätzungen haben.
- > Für eine weiterführende und zuverlässige **Validierung** der verschiedenen Methoden ist eine breiter abgestützte Datenlage notwendig. Insbesondere sollten für zahlreiche Einzugsgebiete Hochwasserabschätzungen mit allen Methoden vorliegen. Da aber vor allem die Anwendung der Methoden, welche auf Feldarbeit beruhen, mit einem sehr grossen Zeitaufwand verbunden sind, ist dies nur schwierig umsetzbar. Ebenso wäre ein Vergleich mit Einzugsgebieten für welche Abflussmessungen vorliegen, für eine vertiefte Validierung der Methoden zwingend notwendig.
- > Die Vermutung liegt nahe, dass das räumlichen Muster, welches aus der **Synthesekarte** ersichtlich wird, auf Grund der inhomogenen Datenlage vorwiegend durch die jeweils verwendeten Methoden geprägt wird. So könnte kritisiert werden, dass für die Teileinzugsgebiete im Kiental nur deshalb so hohe Werte resultieren, weil für die Hochwasserabschätzungen in dieser Region mit HAKESCH vorwiegend eine Methode verwendet wurde, welche in den anderen Regionen des Einzugsgebiets nicht verbreitet zum Einsatz kam. Wie in Kapitel 14.2 erwähnt, sind in HAKESCH aber auch diejenigen Methoden enthalten, welche für die Abschätzungen in den Technischen Berichten zu den Naturgefahrenkarten der Gemeinden verwendet wurden (Methode Kölla und Modifiziertes Fliesszeitverfahren nach Forster). Für die kleinen Teileinzugsgebiete im Kiental ist daher auch ein Vergleich zwischen den definitiven Abschätzungen mit HAKESCH und den Abschätzungen aus den Methoden, welche für die Technischen Berichte verwendet wurden, möglich (vgl. Anhang C). Daraus geht hervor, dass mit HAKESCH und den Methoden Kölla und Modifiziertes Fliesszeitverfahren nach Forster sehr ähnliche Resultate erzielt werden. Dies führt auch zur Schlussfolgerung, dass die hohen Abflussspenden im Kiental nicht nur auf die Methodenwahl zurückzuführen sind und in dieser Hinsicht als plausibel erachtet werden können.



### 14.7.3 Empfehlungen

Aus den Erkenntnissen dieses Kapitels lassen sich die folgenden Empfehlungen für weitere Anwendungen in der Praxis ableiten:

Plausible Hochwasserabschätzungen, welche für die Beurteilung der räumlich differenzierten Hochwasserverhältnisse auf Ebene der kleinen Teileinzugsgebiete innerhalb eines mesoskaligen Einzugsgebietes verwendet werden sollen, lassen sich ohne grossen zeitlichen Aufwand mit der **Methode Schaffner** herleiten. Allerdings sind bei der Anwendung dieser Methode auch die folgenden Punkte zu beachten:

- > Die Werte, welche für die kleinen Einzugsgebiete berechnet werden, müssen in den anhand der Validierungsschemata vorgegebenen Bereichen liegen (vgl. Abbildung 14.2). Falls die Werte ausserhalb der vorgegebenen Bereiche liegen, müssen die Abschätzungen überprüft werden.
- > Für sehr kleine Einzugsgebiete ( $< 2 \text{ km}^2$ ) bzw. grössere Einzugsgebiete ( $> 10 \text{ km}^2$ ) ist eine zusätzliche Abschätzung mit einer weiteren Methode (z.B. mit HAKESCH bzw. HQx\_meso\_CH) durchzuführen. Das Schema in Abbildung 14.5 kann zur Herleitung eines definitiven Werts verwendet werden.

Unter Anwendung der **Methode HAKESCH** sind in der Regel zuverlässige Hochwasserabschätzungen zu erwarten. Dies insbesondere deshalb, weil die Methode auf einer Geländebeurteilung beruht und verschiedene Modelle kombiniert. Der Einsatz des Modells ist jedoch mit einem grossen zeitlichen Aufwand verbunden, weshalb es sich aufdrängt, HAKESCH nur für ausgewählte Teileinzugsgebiete einzusetzen, für welche mit den anderen Ansätzen keine plausiblen Resultate erzielt werden können.

Auch für die Hochwasserabschätzung in kleinen Teileinzugsgebieten lohnt es sich, Hochwasserabschätzungen aus verschiedenen Methoden in Kombination zu verwenden und den definitiven Wert der jeweiligen Situation angepasst festzulegen. Das entsprechende Vorgehen wird in Kapitel 23 erläutert.



# 15 Flächendeckende Modellierung der Abflussprozesse

In diesem Kapitel werden die Resultate der räumlich hoch aufgelösten Modellierung der dominierenden Abflussprozesse für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich aufgezeigt. Ziel dieser Untersuchung ist es, die Resultate aus Kapitel 13 und Kapitel 14 zu den beobachteten räumlichen Mustern der hochwasserhydrologischen Verhältnisse in meso- und mikroskaligen Teileinzugsgebieten zu erklären und zu plausibilisieren. Anhand der durchgeführten Modellierung soll zudem untersucht werden, ob im Einzugsgebiet Kander-Hondrich Regionen bestimmt werden können, welche für die Hochwasserentstehung von herausragender Bedeutung sind.

Nach dem einleitenden Kapitel 15.1 werden die Methode sowie die Datengrundlage erläutert, welche verwendet wurden, um die dominierenden Abflussprozesse in hoher räumlicher Auflösung zu modellieren (Kapitel 15.2 und Kapitel 15.3). Die Generalisierung der räumlich hoch aufgelösten Abflussprozesse erfolgte mit zwei verschiedenen Ansätzen und wird in Kapitel 15.4 ausgeführt. Die hochwasserhydrologische Beurteilung und Interpretation, welche den Vergleich zu den Resultaten aus den anderen Kapiteln ermöglicht, erfolgte mit Hilfe ausgewählter räumlich hoch aufgelöster Informationen auf der Ebene der kleinen Teileinzugsgebiete. Dazu wurden zwei verschiedene Ansätze verwendet. Während in Kapitel 15.5 das Vorgehen unter Anwendung dieser beiden Ansätze erläutert wird, enthält Kapitel 15.6 die entsprechenden Resultate.

## 15.1 Ausgangslage

Bei Starkniederschlagsereignissen tragen Flächen, die sich in ihrer naturräumlichen Ausstattung (Landnutzung, Geologie, Relief, Bodeneigenschaften) unterscheiden, in unterschiedlichem Ausmass zum Abfluss bei. Bei gleichem Niederschlagseintrag ist z.B. für gering durchlässige Böden rascher oder leicht verzögerter Abfluss zu erwarten, wogegen bei stark durchlässigen Böden ein grosser Anteil des Wassers infiltriert und zeitlich verzögert zum Abfluss gelangt (SCHERRER 2006). Das Zusammenwirken sowie die räumliche Verteilung der verschiedenen Teilflächen entscheidet schliesslich darüber, von welchem Ausmass ein Hochwasserabfluss in einem Einzugsgebiet sein wird.

Zu diesem Themenbereich der **Abflussentstehung** wurden in den letzten Jahren zahlreiche Untersuchungen durchgeführt (z.B. PESCHKE ET AL. 1998, FAEH 1997, SCHERRER 1997). In verschiedenen Arbeiten wurde zudem versucht, mit digital verfügbaren Geoinformationen die räumlich differenzierten Abflussverhältnisse zu regionalisieren oder bodenhydrologische Informationen herzuleiten (PESCHKE ET AL. 1998, LÖHMANNSRÖBEN 2000, SCHMOCKER-FACKEL 2004, MARGRETH ET AL. 2008, KHEIR ET AL. 2010). Die in diesen Arbeiten entwickelten Methoden wurden in der Diplomarbeit von STUCKI (2009) für die Modellierung der Abflussprozesse im Einzugsgebiet der Kander aufgenommen, in einem Geographischen Informationssystem (GIS) umgesetzt und dadurch automatisiert. Somit gelang es, die Abflussprozesse für das Einzugsgebiet der Kander flächendeckend zu modellieren und räumlich hoch aufgelöste **Aussagen über die Abflussbereitschaft** zu machen.

Im Rahmen der Diplomarbeit von STUCKI (2009) wurden für das Einzugsgebiet der Kander verschiedene Ansätze zur flächendeckenden Modellierung bzw. Regionalisierung der Abflussprozesse erprobt. Das Ziel der Diplomarbeit lag darin, die während einem Starkniederschlagsereignis dominierenden hydrologischen Prozesse für das untersuchte Einzugsgebiet flächendeckend auszuweisen und somit die räumliche Variabilität des potentiellen Hochwassergeschehens aufzuzeigen. Die von STUCKI (2009) verwendeten, bereits vorliegenden methodischen Ansätze wurden sowohl auf den alpinen Untersuchungsraum als auch auf die zur Verfügung stehenden Grundlagendaten adaptiert (vgl. Kapitel 15.3).

Auf Grund der Grösse des untersuchten Einzugsgebietes basiert die Diplomarbeit von STUCKI (2009) ausschliesslich auf einer **GIS-Analyse**. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die resultierenden Abflussprozesskarten nicht mit einer Validierung anhand einer flächendeckenden Felduntersuchung überprüft wurden. Anhand der Resultate der Arbeiten von BEYELER (2009), SPIESS (2009) und CADUFF (2010), welche in einem kleinen Teileinzugsgebiet bei Kandergrund mehrere bodenhydrologische Untersuchungen durchgeführt haben, kann für diese Region jedoch auch ein Vergleich zu den Abflussprozesskarten von STUCKI (2009) gemacht werden. Eine weitere qualitative Beurteilung bzw. Plausibilisierung bietet sich auch auf Grund der Abflussprozesskarte an, welche von NAEF ET AL. (1999) für das Teileinzugsgebiet Allenbach-Adelboden erstellt wurde.

## 15.2 Verwendete Methode

STUCKI (2009) hat zwei verschiedene Ansätze zur Modellierung der Abflussprozesse für das Einzugsgebiet der Kander eingesetzt. Einerseits wurde der Ansatz von PESCHKE ET AL. (1998) angewendet, mit welchem die vorhandenen digitalen Geodaten anhand einer regelbasierten Klassierung in verschiedene Zonen vorherrschender Abflussprozesse unterteilt werden. Besser bewährt hat sich aber der Ansatz von SCHERRER & NAEF (2003), welcher auf der Anwendung von so genannten Prozessbeurteilungsschemata (PBS) beruht. Die folgenden Ausführungen beschränken sich deshalb auf diese Methode.

Die Grundlage dieser Methode basiert auf den von SCHERRER (1997) und FAEH (1997) durchgeführten grossflächigen Berechnungsversuchen auf unterschiedlichen natürlichen Standorten. Anhand der Auswertung dieser Feldversuche konnte eine Datengrundlage geschaffen werden, welche es ermöglicht, die hydrologische Reaktion von Flächen mit unterschiedlichen Standorteigenschaften auf ein Starkniederschlagsereignis zu analysieren. Der Versuchsaufbau sowie die wesentlichen Resultate sind z.B. NAEF ET AL. (1999) zu entnehmen. Eine zentrale Erkenntnis dieser Untersuchung ist, dass **Schlüsselgrössen** im Bodenprofil darüber entscheiden, welcher Abflussprozess sich bei eintretendem Starkniederschlag vorwiegend einstellt (SPREAFICO ET AL. 2003). Bei den Schlüsselgrössen handelt es sich z.B. um die Landnutzung, die Hangneigung, die Lagerungsdichte des Bodens, die Bodenmächtigkeit, etc. – sie werden durch die am entsprechenden Standort vorherrschenden Bedingungen geprägt.

Darauf basierend haben SCHERRER & NAEF (2003) verschiedene **Prozessbeurteilungsschemata** entwickelt, welche es ermöglichen, mit Hilfe der verfügbaren Informationen zur Landnutzung sowie zu verschiedenen topographischen, pedologischen und geologischen Kenngrössen auf den am untersuchten Standort dominierenden Abflussprozess zu schliessen. Eine wichtige Rolle spielt bei dieser Methode aber auch Expertenwissen, welches auf Beobachtungen und Untersuchungen im Feld basiert. SCHERRER (2006) hat verschiedene Prozessbeurteilungsschemata für unterschiedliche Landnutzungen (z.B. Wiesen und Weiden, Acker, Wald) aufbereitet, welche zur Differenzierung der in

Tabelle 15.1 zusammengestellten Abflussprozesse führen. In dieser Tabelle werden auch die verschiedenen Abflussprozesse beschrieben und die jeweils vorherrschenden Fließwege des Wassers bzw. die entsprechenden Prozessgruppen aufgeführt.

Tabelle 15.1: Übersicht über die verschiedenen Abflussprozesse, welche anhand der Prozessbeurteilungsschemata unterschieden werden können (nach SCHERRER 2006).

Fließweg	Prozessgruppe	Abk.	Beschreibung des Abflussprozesses
Oberfläche	Hortonscher Oberflächenabfluss	HOF 1	Sofortiger Oberflächenabfluss als Folge von Infiltrationshemmnissen
		HOF 2	Verzögerter Oberflächenabfluss als Folge von Infiltrationshemmnissen
	Gesättigter Oberflächenabfluss	SOF 1	Sofortiger Oberflächenabfluss als Folge sich sättigender Flächen
		SOF 2	Verzögerter Oberflächenabfluss als Folge sich sättigender Flächen
		SOF 3	Stark verzögerter Oberflächenabfluss als Folge sich sättigender Flächen
	Unterirdisch	Laterale Fließprozesse im Boden	SSF 1
SSF 2			Verzögerter Abfluss im Boden
SSF 3			Stark verzögerter Abfluss im Boden
Tiefensickerung		DP	Tiefensickerung in geologische Schichten

Im Rahmen der Arbeiten von SCHMOCKER-FACKEL (2004) wurde der Ansatz der Prozessbeurteilungsschemata weitergeführt und für eine automatische Anwendung in einem Geographischen Informationssystem (GIS) vereinfacht (vgl. auch SCHMOCKER-FACKEL ET AL. 2007). Ähnliche Ansätze wurden auch von LÖHMANNSRÖBEN (2000), TILCH ET AL. (2002, 2006) oder MÜLLER ET AL. (2009) für Einzugsgebiete unterschiedlicher Grössenordnung und naturräumlicher Ausstattung angewendet.

In Anlehnung an die Methode von SCHERRER & NAEF (2003) und an die Arbeit von SCHMOCKER-FACKEL ET AL. (2007) wurden von STUCKI (2009) für das Einzugsgebiet der Kander verschiedene Prozessbeurteilungsschemata für die Beurteilung der im Hochwasserfall dominierenden Abflussprozesse übernommen und adaptiert. Die Umsetzung und Automatisierung in GIS erfolgte durch Anwendung der Software ModelBuilder (ESRI 2008). Die Prozessbeurteilungsschemata sind in Form von Entscheidungsbäumen aufgebaut und berücksichtigen die spezifischen hydrologischen Verhältnisse sowie die Datenlage im alpinen Untersuchungsraum. Insgesamt wurden drei verschiedene Prozessbeurteilungsschemata für die folgenden **Landnutzungskategorien** entwickelt:

- > Freiflächen (Wiese, Weide, Krautvegetation)
- > Wald (Laub- bzw. Mischwald, Nadelwald)
- > Übrige Flächen (Fels, Geröll, Siedlung)

Durch Differenzierung dieser drei Kategorien war es möglich, das gesamte Untersuchungsgebiet (mit Ausnahme der Gletscherflächen) bezüglich der vorherrschenden Abflussprozesse zu beurteilen.

Die Bestimmung der Abflussprozesse erfolgt bei der Methode von STUCKI (2009) durch Anwendung der in GIS implementierten Entscheidungsbäume bzw. Prozessbeurteilungsschemata. Beim Durchlaufen dieser Modelle werden die folgenden hydrologisch relevanten Aspekte berücksichtigt:

- > Bodenbedeckung (Landnutzung, Vegetationstyp)
- > Hangneigung
- > Permeabilität des Bodens
- > Bodenmächtigkeit
- > Permeabilität des geologischen Untergrundes

Die Kriterien und Grenzwerte, welche zur Beurteilung der verschiedenen Aspekte und damit zur Entwicklung der Entscheidungsbäume verwendet wurden (z.B. kritische Hangneigung), konnten weitgehend aus der Literatur übernommen werden (z.B. KIRKBY 1978, ZUIDEMA 1985, KÖLLA 1986, TILCH ET AL. 2002, SCHERRER 2006, SCHERRER ET AL. 2007, SCHMOCKER-FACKEL ET AL. 2007, MÜLLER ET AL. 2009) oder wurden durch Feldbegehungen und anhand von Expertenwissen festgelegt.

### 15.3 Datengrundlagen und hochaufgelöste Abflussprozesskarte

Die digitalen Grundlagendaten, welche als Eingabegrößen der Modellierung bzw. zur Herleitung der Abflussprozesse verwendet wurden, sind in Tabelle 15.2 aufgeführt. Aus dieser Zusammenstellung geht hervor, dass die verschiedenen Datensätze unterschiedliche räumliche Auflösungen und Massstäbe aufweisen. Während z.B. die Informationen zur Topographie in sehr hoher räumlicher Auflösung verfügbar sind, liegen die für das Untersuchungsgebiet flächendeckend verfügbaren Bodeneignungskarten in sehr geringer Auflösung bzw. in grossem Massstab vor.

Tabelle 15.2: Verwendete Grundlagendaten zur Modellierung der Abflussprozesse (nach STUCKI 2009)

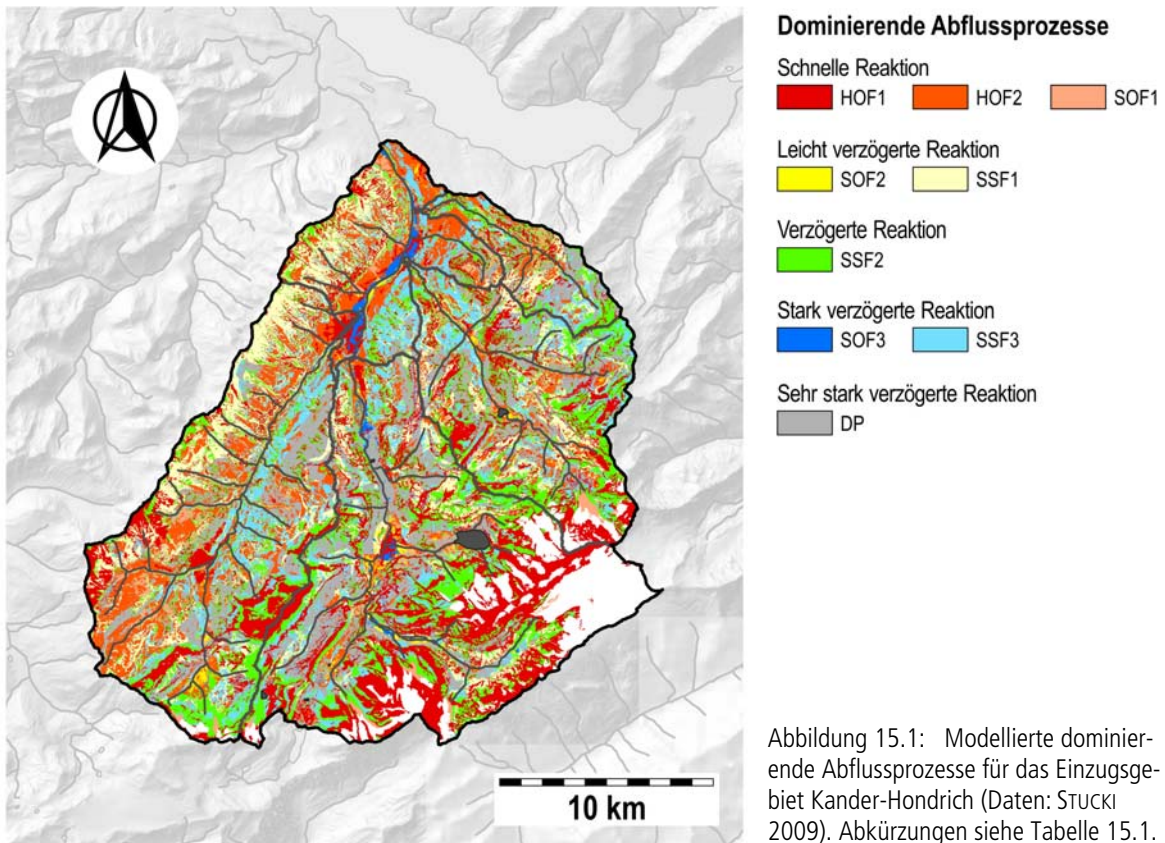
Thema	Datengrundlage	Massstab, Auflösung	Datenquelle
Topographie	Digitales Höhenmodell (DHM25_10)	10 x 10 Meter	SWISSTOPO (1996)
	Digitales Geländemodell (DTM-AV2)	2 x 2 Meter	SWISSTOPO (2003A)
Hydrologie	Gewässernetz des Kantons Bern (GN5)	1:5'000	TBA (2003)
Landnutzung	Landeskarte der Schweiz (VEC25)	1:25'000	SWISSTOPO (1998B)
	Waldmischungsgrad	1:200'000	BFS (2004B)
	Luftbilder, Orthofoto-Mosaik der Schweiz (SWISSIMAGE)	0.5 x 0.5 Meter	SWISSTOPO (2004)
Boden	Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz (BEK)	1:200'000	BFS (2004A)
	Trockenstandorte des Kantons Bern (TROSTA)	1:10'000	NSI (2005B)
	Feuchtgebiete des Kantons Bern (FEUGEB)	1:5'000	NSI (2005A)
Geologie	Vereinfachte Geotechnische Karte	1:200'000	BFS (2004C)
	Geologische Karte der Schweiz (GEOK500)	1:500'000	SWISSTOPO (2008)

Diese unterschiedliche Auflösung der digitalen Geodaten wurde im Rahmen der Diplomarbeit von STUCKI (2009) dadurch teilweise behoben, dass mit Hilfe des räumlich hoch aufgelösten Höhenmodells weitere Grundlagendaten hergeleitet wurden:

- > Das digitale Geländemodell (DHM25\_10, SWISSTOPO 1996) wurde dazu verwendet, um die hydrologisch ebenfalls wirksamen **Oberflächenformen** (z.B. Kuppen oder Mulden, vgl. HÖRSCH 2001 oder SCHMIDT & HEWITT 2004) abzuleiten und für die Modellierung der Abflussprozesse einzusetzen.

- > Das hoch aufgelöste Geländemodell (DTM-AV2, SWISSTOPO 2003) wurde in Anlehnung an KLINGL (1996) auch für die Modellierung verschiedener **Bodeneigenschaften** verwendet. Hierbei wurde der Ansatz von GIAMBONI (2008) zur Modellierung der **Bodentiefe** bzw. derjenige von FREI ET AL. (1980) für die Herleitung der **Permeabilität des Bodens** verwendet. Durch die Berücksichtigung von zwei verschiedenen methodischen Ansätzen kann davon ausgegangen werden, dass die Resultate inhaltlich weitgehend unabhängig voneinander sind und sich nicht gegenseitig beeinflussen. Anhand dieser Modellierungen gelang es, die räumliche Auflösung und Differenzierung der beiden Bodenparameter wesentlich zu erhöhen. Allerdings ist bei den modellierten Grundlagendaten zu berücksichtigen, dass diese mit grösseren inhaltlichen Unsicherheiten behaftet sein können. Darauf machen auch EGLI ET AL. (2004) aufmerksam, welche mit einem vergleichbaren Ansatz Modellierungen von Bodeneigenschaften für ein voralpines Gebiet durchgeführt haben.
- > Zusätzlich wurde auch das bereits grossmasstäbliche **Gewässernetz** (GN5, TBA 2003) unter Verwendung spezifischer GIS-Funktionen automatisch um die im Hochwasserfall ebenfalls wasserführenden **Trockenrunsen** erweitert und anschliessend unter Einbezug räumlich hoch aufgelöster Luftbilder (SWISSIMAGE, SWISSTOPO 2004) manuell überprüft und korrigiert.

Die in Abbildung 15.1 dargestellte modellierte **Abflussprozesskarte** bildet das Resultat der GIS-Modellierung anhand der von STUCKI (2009) entwickelten Prozessbeurteilungsschemata. Diese Karte liefert für das Einzugsgebiet des Allenbachs-Adelboden beim Vergleich mit den Resultaten von NAEF ET AL. (1999) bzw. für das kleine Teileinzugsgebiet beim Vergleich mit den Ergebnissen von BEYELER (2009), SPIESS (2009) und CADUFF (2010) die plausibelsten Resultate. Für die Modellierung der im Hochwasserfall dominierenden Abflussprozesse wurden die modellierte Bodenmächtigkeit sowie die modellierte Permeabilität des Bodens verwendet.



Während im westlichen Teil des Einzugsgebietes (Engstlige-Frutigen), entlang der südostexponierten Hänge (= «Niesenkette», vgl. Anhang A) die schnellen bzw. die leicht verzögert reagierenden Abflussprozesse (HOF1, HOF2, SOF1 sowie SOF2 bzw. SSF1, vgl. Tabelle 15.1) dominieren, sind auf den gegenüberliegenden Hängen vorwiegend langsamere Abflussprozesse (SSF3 und DP) verbreitet. Im östlichen und zentralen Teil des Einzugsgebietes (Kiental, Suldtal und vorderes Kandertal) sind vermehrt die verzögert bzw. stark verzögert reagierenden Flächen zu beobachten, welche den Abflussprozessen SSF2, SOF3, SSF3 bzw. DP entsprechen. Besonders im südöstlichen Teil des Untersuchungsgebietes (Kander-Kandersteg, Kander-Chluse, Kander-Gasteretal) ist wiederum der schnell reagierende Abflussprozess HOF1 verbreitet, welcher hier vor allem auf Grund der Landnutzung «Fels» auftritt.

## 15.4 Generalisierung der Abflussprozesse

Wie in Kapitel 15.3 erwähnt, ist bei der Interpretation der modellierten Abflussprozesse in Abbildung 15.1 zu berücksichtigen, dass die räumliche Auflösung der verschiedenen Grundlagendaten sehr unterschiedlich ist. Zur Reduktion dieser Unsicherheiten bietet sich eine **inhaltliche und räumliche Generalisierung** an, welche in der Diplomarbeit von STUCKI (2009) in zwei Ansätzen umgesetzt wurde:

- > Der **erste Ansatz** (vgl. Kapitel 15.4.1) umfasst eine inhaltliche und räumliche Generalisierung der modellierten Abflussprozesse.
- > Beim **zweiten Ansatz** (vgl. Kapitel 15.4.2) erfolgt für jedes kleine Teileinzugsgebiet eine Interpretation der hochwasserhydrologischen Verhältnisse auf Grund der Beurteilung des mittleren Wasserspeichervermögens sowie der mittleren Länge der Fliesswege.

Diese beiden Generalisierungen ermöglichen es zudem, die Resultate der flächendeckend modellierten Abflussprozesse einfacher zu interpretieren und mit den Ergebnissen der Hochwasserabschätzungen für die kleinen Teileinzugsgebiete zu vergleichen (vgl. Kapitel 14).

### 15.4.1 Inhaltliche und räumliche Generalisierung

Die erste Generalisierung der modellierten Abflussprozesse umfasst die beiden folgenden Bereiche:

- > **Inhaltliche Generalisierung:** Die in neun Klassen detailliert ausgewiesenen Abflussprozesse (Tabelle 15.1) werden bei diesem Schritt anhand ihrer Reaktionsweise zu fünf Abflusstypen zusammengefasst (Tabelle 15.3). Gleichzeitig kann diesen Abflusstypen in Anlehnung an die Untersuchungen von MARGRETH ET AL. (2008) bzw. SCHMOCKER-FACKEL (2004), jeweils ein mittleres Wasserspeichervermögen zugewiesen.
- > **Räumliche Generalisierung:** Die Abflussprozesse können an Stelle einer auf Zellen bezogenen Modellierung auch auf Basis kleiner Teileinzugsgebiete ausgewiesen werden. Für jedes kleine Teileinzugsgebiet werden dabei die prozentualen Flächenanteile der verschiedenen Abflusstypen bestimmt. Die Gliederung der kleinen Teileinzugsgebiete orientiert sich an derjenigen von ZGRAGGEN (2009) (vgl. Kapitel 14.2, Abbildung 14.3), womit ein Vergleich zwischen den entsprechenden Resultaten ermöglicht wird.



Tabelle 15.3: Inhaltliche Generalisierung der Abflussprozesse zu Abflusstypen und entsprechendes Wasserspeichervermögen (aus STUCKI 2009, verändert nach SCHMOCKER-FACKEL 2004, MARGRETH ET AL. 2008)

Abflussprozess	Abflusstyp	Wasserspeichervermögen
HOF1, HOF2, SOF1	Schnell reagierend	20 mm
SOF2, SSF1	Leicht verzögert reagierend	70 mm
SSF2	Verzögert reagierend	100 mm
SOF3, SSF3	Stark verzögert reagierend	150 mm
DP	Sehr stark verzögert reagierend	250 mm

Aus dieser inhaltlichen und räumlichen Generalisierung, deren Resultat in Abbildung 15.2 zusammenfassend dargestellt ist, ergibt sich grundsätzlich das gleiche Bild wie in Abbildung 15.1: Im Einzugsgebiet der Engstlige-Frutigen bzw. entlang der Niesenkette bilden die schnell reagierenden und die leicht verzögert reagierenden Flächen den weitaus grössten Anteil der Gebietsflächen (zum Teil bis über 75%). Im Einzugsgebiet Kander-Frutigen dominieren hingegen die verzögert und stark verzögert reagierenden Abflusstypen. Vor allem im zentralen Bereich bei Kandersteg sind die Flächenanteile der verzögerten Abflusstypen besonders gross (bis 70%). Im östlichen Teil (Einzugsgebiete der Suld und Chiene) überwiegen flächenmässig ebenfalls die verzögert und stark verzögert reagierenden Abflusstypen.

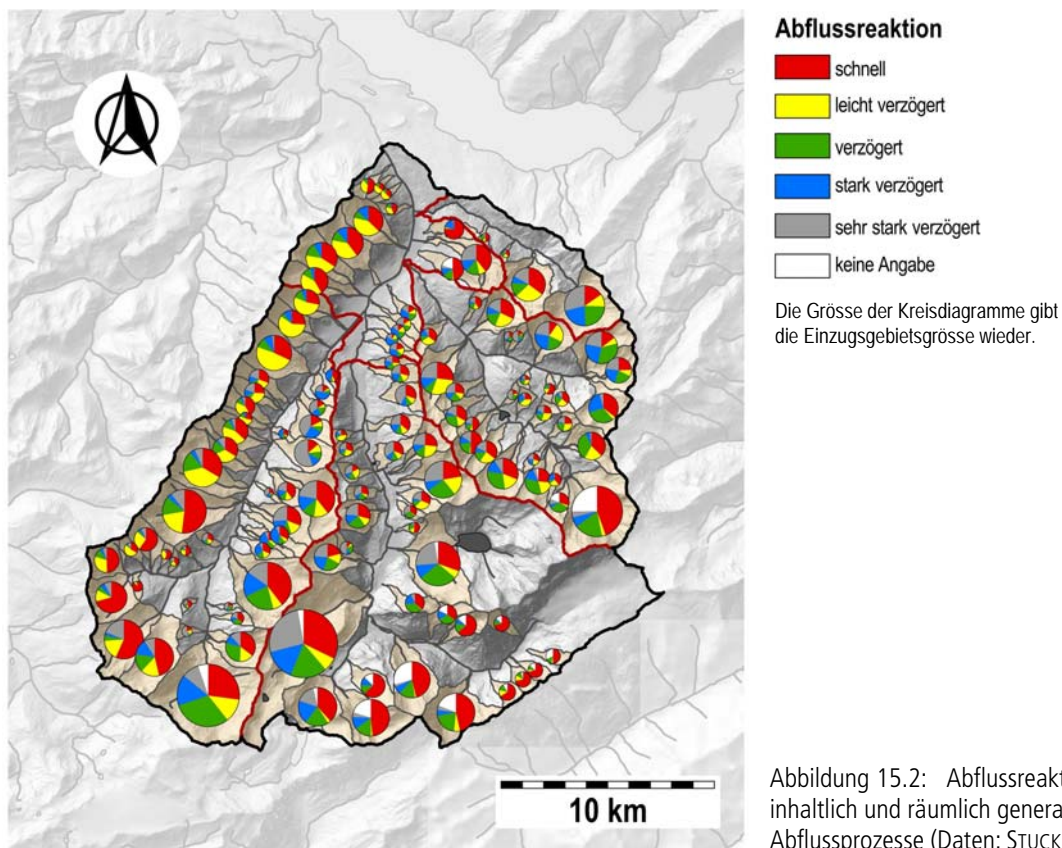


Abbildung 15.2: Abflussreaktion bzw. inhaltlich und räumlich generalisierte Abflussprozesse (Daten: STUCKI 2009)

### 15.4.2 Wasserspeichervermögen und Länge des Fließweges

Die Zuordnung eines mittleren Wasserspeichervermögens zu einem Abflusstyp (vgl. Tabelle 15.3) ermöglicht es, für jedes Teileinzugsgebiet das **mittlere Wasserspeichervermögen** zu bestimmen, was einer weiteren inhaltlichen Generalisierung entspricht (vgl. Abbildung 15.3 a). Das mittlere Wasserspeichervermögen wird als Mittelwert aus den für jede Zelle im untersuchten Teileinzugsgebiet angegebenen Wasserspeichervermögen berechnet.

Neben dem Wasserspeichervermögen kann für die Entstehung eines Hochwassers aber auch die Flusssichte (vgl. z.B. HORTON 1945, GREGORY & WALLING 1968) bzw. die mittlere Länge des Fließweges von jeder Zelle im untersuchten Teileinzugsgebiet bis ins Gerinne von entscheidender Bedeutung sein (z.B. BAKER ET AL. 1988, GREEN & NELSON 2002, PALLARD ET AL. 2009). Anhand der **mittleren Länge des Fließweges** kann beurteilt werden, wie gut die einzelnen Zellen des untersuchten Einzugsgebietes ans Gerinne angeschlossen sind (vgl. Abbildung 15.3 b). Der entsprechende Wert wird als Mittelwert aus der Länge des Fließweges von jeder Zelle im untersuchten Teileinzugsgebiet bis ins Gerinne berechnet, wobei als Gerinne das automatisch hergeleitete und mit den Trockenrunsen erweiterte Gewässernetz von STUCKI (2009) verwendet wurde (vgl. Kapitel 15.3). Je kleiner die mittlere Länge des Fließweges eines Teileinzugsgebietes, umso grösser ist das Hochwasserpotential einzustufen bzw. desto schneller wird die Reaktionsweise dieses Teilraums sein.

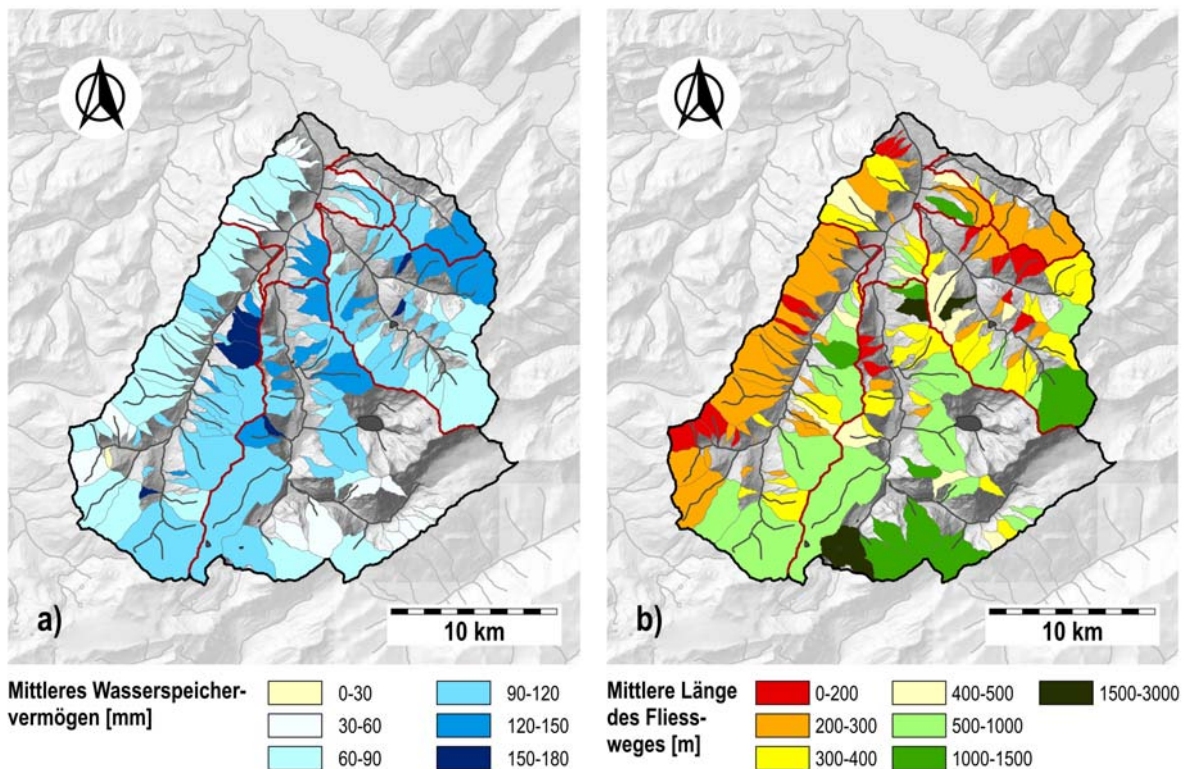


Abbildung 15.3: Mittleres Wasserspeichervermögen (a) und mittlere Länge des Fließweges (b) der kleinen Teileinzugsgebiete im Einzugsgebiet Kander-Hondrich (Daten: STUCKI 2009)

Aus beiden Übersichtskarten in Abbildung 15.3 (a und b) wird ersichtlich, dass sowohl das mittlere Wasserspeichervermögen als auch die mittlere Länge des Fließweges entlang der Niesenkette tiefste Werte aufweisen. Während das mittlere Wasserspeichervermögen im hinteren Bereich der beiden Einzugsgebiete Spiggebach-Kiental bzw. Suld-Mülenen überdurchschnittlich hoch ist, sind die

mittleren Fließdistanzen für die gleichen Teileinzugsgebiete relativ kurz. Die Kombination von hohen mittleren Wasserspeichervermögen und langen mittleren Fließwegen sind sowohl auf der rechten Talseite des Teileinzugsgebietes Engstlige-Frutigen als auch im zentralen Bereich des Einzugsgebietes Kander-Frutigen anzutreffen. In den hintersten Regionen der Teileinzugsgebiete der Kander bzw. des Gornerewassers lassen sich überdurchschnittlich lange mittlere Fließwege und geringe mittlere Speichervermögen beobachten.

## 15.5 Kombination von Wasserspeichervermögen und Fließweg

Ein weiterer Schritt bei der Beurteilung der hochwasserhydrologischen Verhältnisse auf Basis der kleinen Teileinzugsgebiete bildet die **kombinierte Berücksichtigung des Wasserspeichervermögens und der Fließwege**. Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass eine Zelle mit geringem Speichervermögen, welche nahe am Gerinnenetz liegt, mehr zum Hochwasserabfluss des untersuchten Teileinzugsgebietes beiträgt, als eine Zelle mit hohem Speichervermögen in grosser Distanz zum Gerinnenetz. Dieses Konzept stützt sich auch auf die Untersuchungen verschiedener Autoren (z.B. GARDINER & GREGORY 1982, BAKER ET AL. 1988, BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996, MERZ & BLÖSCHL 2009 oder PALLARD ET AL. 2009), welche auf einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Gerinnettdichte bzw. der Fließdistanz und den Hochwasserverhältnissen in unterschiedlichen Einzugsgebieten hinweisen.

STUCKI (2009) hat das Wasserspeichervermögen und den Fließweg bzw. die Fließdistanz mit zwei verschiedenen Ansätzen kombiniert (Kapitel 15.5.1 und Kapitel 15.5.2). Die Resultate aus beiden Ansätzen werden in Kapitel 15.6 mit dem mittleren Wasserspeichervermögen verglichen.

### 15.5.1 Mittleres gewichtetes Wasserspeichervermögen

Die Berechnung des **«mittleren gewichteten Wasserspeichervermögens»** ( $WSV_{GEW}$ ), erfolgt in Anlehnung an das Verfahren von DÜSTER (1994) zur Bestimmung des relativen Flächenanteils. Während bei DÜSTER (1994) neben der Distanz zum Gerinne die Fließgeschwindigkeit zur Bestimmung des relativen Flächenbeitrages in die Berechnungen einfließt, hat STUCKI (2009) das Wasserspeichervermögen und die Länge des Fließweges verwendet. Die berechnete Grösse ( $WSV_{GEW}$ ) entspricht dem Mittelwert aus den Quotienten des Wasserspeichervermögens einer Zelle ( $WSV_i$ ) und der Länge des Fließweges von dieser Zelle bis zum Gerinne ( $L_i$ ), welche für alle Zellen des untersuchten Einzugsgebietes berechnet wurden (Gleichung 15.1). Aus der schematischen Darstellung in Abbildung 15.4 wird das Vorgehen zur Bestimmung der beiden Parameter ersichtlich.

$$WSV_{GEW} = \frac{I}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{WSV_i}{L_i} \quad \text{Gleichung 15.1}$$

mit:  $WSV_{GEW}$  = Mittleres gewichtetes Wasserspeichervermögen für das untersuchte Einzugsgebiet  
 $WSV_i$  = Wasserspeichervermögen der i-ten Zelle  
 $L_i$  = Länge des Fließweges von der i-ten Zelle bis zum Gerinne  
 $N$  = Anzahl Zellen im Einzugsgebiet

Bei diesem Ansatz werden als Datengrundlage das räumlich hoch aufgelöste, mit Trockenrunsen ergänzte Gewässernetz (vgl. Kapitel 15.3) sowie die Karte der klassierten Wasserspeichervermögen (Abbildung 15.3 a) verwendet.

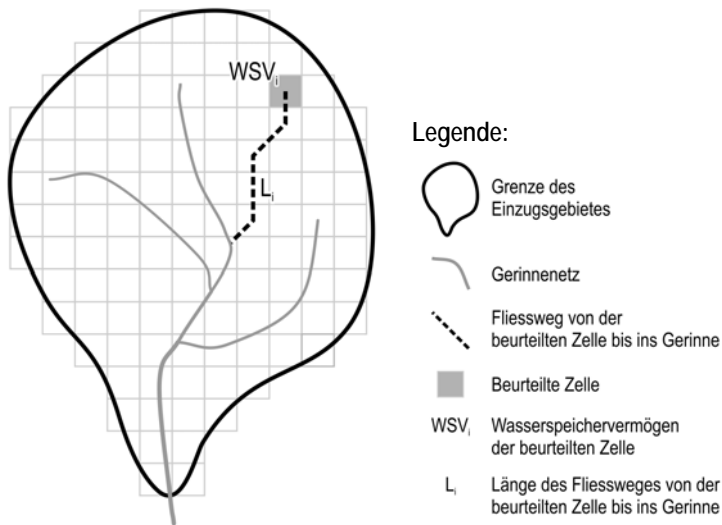


Abbildung 15.4: Schematische Darstellung zur Berechnung des mittleren gewichteten Speichervermögens ( $WSV_{GEW}$ ) für die kleinen Teileinzugsgebiete im Einzugsgebiet Kander-Hondrich.

Der resultierende Wert des  $WSV_{GEW}$  nimmt für Einzugsgebiete, bei welchen die meisten Zellen mit geringem Wasserspeichervermögen nahe am Gerinnenetz liegen, kleine Werte an. Bei Einzugsgebieten, bei welchen die meisten Zellen mit grossem Wasserspeichervermögen über einen langen Fließweg ins Gerinne entwässern, nimmt  $WSV_{GEW}$  grosse Werte an. Je kleiner das  $WSV_{GEW}$  eines Einzugsgebietes, umso grösser ist die Abflussbereitschaft im Hochwasserfall einzustufen. Die Ergebnisse der Auswertung mit diesem Ansatz sind als standardisierte Werte in Abbildung 15.6 b dargestellt.

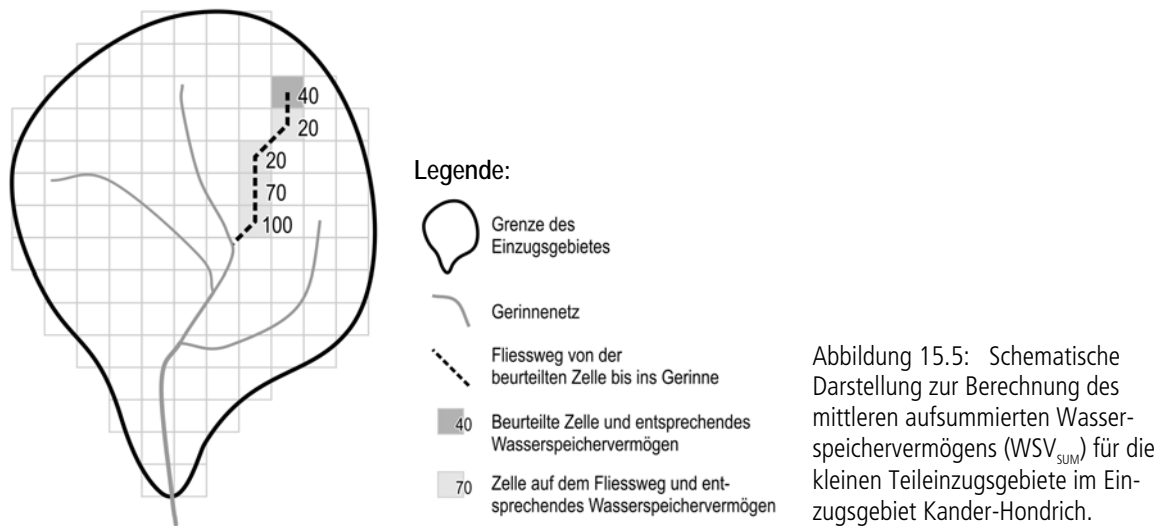
### 15.5.2 Mittleres aufsummiertes Wasserspeichervermögen

Ein weiterer Ansatz zur Berücksichtigung der Lage der unterschiedlich reagierenden Teilflächen gegenüber dem Gerinnenetz bildet die Analyse des **mittleren aufsummierten Wasserspeichervermögens ( $WSV_{SUM}$ )**. Zur Berechnung dieses Kennwerts werden für alle Zellen im Einzugsgebiet entlang des jeweiligen Fließweges ins Gerinne die Werte des Wasserspeichervermögens der durchflossenen Zellen aufsummiert (vgl. Gleichung 15.2). Im Beispiel in Abbildung 15.5 beträgt der Wert des aufsummierten Wasserspeichervermögens für die beurteilte Zelle 250 mm. Der Kennwert  $WSV_{SUM}$  wird schliesslich als Mittelwert der aufsummierten Wasserspeichervermögen aller Zellen im Einzugsgebiet bestimmt.

$$WSV_{SUM} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} WSV_{i,j} \quad \text{Gleichung 15.2}$$

mit:  $WSV_{SUM}$  = Mittleres aufsummiertes Wasserspeichervermögen für das untersuchte Einzugsgebiet  
 $WSV_{i,j}$  = Speichervermögen der j-ten Zelle auf dem Fließweg der i-ten Zelle ins Gerinne  
 $N$  = Anzahl der Zellen im Einzugsgebiet  
 $M_i$  = Anzahl der Zellen auf dem Fließweg der i-ten Zelle ins Gerinne

Bei diesem Ansatz wird einer Zelle, welche auf dem Weg ins Gerinne über Zellen mit grossem Speichervermögen entwässert, ein höherer Wert zugewiesen, als einer Zelle, die in gleicher Distanz zum Gerinne liegt, aber über Zellen mit geringem Speichervermögen entwässert. Die Kenngrösse berücksichtigt also sowohl das Speichervermögen der Zellen auf dem Fliessweg bis ins Gerinne als auch die Länge dieses Fliessweges. Je grösser  $WSV_{SUM}$ , desto geringer ist die Abflussbereitschaft eines Einzugsgebietes einzuschätzen. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in Abbildung 15.6 c als standardisierte Werte dargestellt.



## 15.6 Resultate

Mit Hilfe der drei Kenngrössen «mittleres Wasserspeichervermögen» (Abbildung 15.6 a), «mittleres gewichtetes Wasserspeichervermögen» (Abbildung 15.6 b) und «mittleres aufsummiertes Wasserspeichervermögen» (Abbildung 15.6 c) soll die **Abflussbereitschaft der kleinen Teileinzugsgebiete** beurteilt werden. Es ist hierbei zu berücksichtigen, dass sich der Wertebereich sowie die Einheiten der drei Kennwerte unterscheiden und ein Vergleich der Methoden nicht direkt möglich ist. Um einen Vergleich dennoch zu ermöglichen, wurden die drei verschiedenen Werte gemäss Gleichung 15.3 standardisiert.

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

Gleichung 15.3

mit:	$Z$	=	<i>Standardisierter Wert</i>
	$X$	=	<i>Ursprünglicher Wert</i>
	$\mu$	=	<i>Mittelwert der Grundgesamtheit</i>
	$\sigma$	=	<i>Standardabweichung der Grundgesamtheit</i>

In Abbildung 15.6 a bis c sind die standardisierten Werte der drei verschiedenen Kennwerte in der Übersicht dargestellt. Im Wesentlichen sind bei allen drei Kennwerten die gleichen räumlichen Muster zu erkennen, die sich jedoch in einigen Details unterscheiden. Während im Bereich der Niesenkette bei allen drei Kenngrössen fast durchwegs unterdurchschnittliche Ausprägung und somit grosse Abflussbereitschaft zu beobachten ist, sind im zentralen und südlichen Bereich des Untersu-

chungsgebietes (z.B. in der Region um Kandersteg) durchwegs überdurchschnittliche Werte bzw. eine reduzierte Abflussbereitschaft zu beobachten.

Daneben treten aber auch Unterschiede beim Vergleich der Ergebnisse aus den drei Methoden auf. So werden z.B. in den Teileinzugsgebieten Spiggebach-Kiental, Suld-Mülenen aber auch in den vorderen Bereichen des Teileinzugsgebietes Kander-Frutigen Abweichungen ersichtlich. Während das mittlere Wasserspeichervermögen (Abbildung 15.6 a) in diesen Regionen teilweise noch überdurchschnittlich gross ist, sind die beiden anderen Kenngrössen ( $WSV_{GEW}$ ,  $WSV_{SUM}$ ) mehrheitlich unterdurchschnittlich ausgeprägt (Abbildung 15.6 b und c). Dies wird auch durch die bereits in Abbildung 15.3 b beobachteten Verhältnisse der mittleren Länge der Fliesswege bestätigt, welche in diesen Teileinzugsgebieten von unterdurchschnittlicher Länge sind.

Im hinteren Bereich des Teileinzugsgebietes Gornerewasser-Kiental sowie im Gasteretal ist für einzelne kleine Teileinzugsgebiete das umgekehrte Verhalten zu beobachten: Die Zellen mit kleinen Speichervermögen befinden sich hier in grösserer Distanz zum Gerinne. Die kleinen Teileinzugsgebiete im Einzugsgebiet der Engstlige-Frutigen, welche bei  $WSV_{GEW}$  (Abbildung 15.6 b) sowie bei  $WSV_{SUM}$  (Abbildung 15.6 c) durch überdurchschnittlich hohe standardisierte Werte auffallen, entstehen durch die Kombination von hohem Wasserspeichervermögen und überdurchschnittlich langen Fliesswegen. In diesem Bereich lässt sich in den hochgelegenen Regionen der kleinen Teileinzugsgebiete oft kein Gerinnenetz mehr bestimmen, so dass dadurch die Fliesswege von den entsprechenden Zellen bis ins Gerinne deutlich verlängert werden.

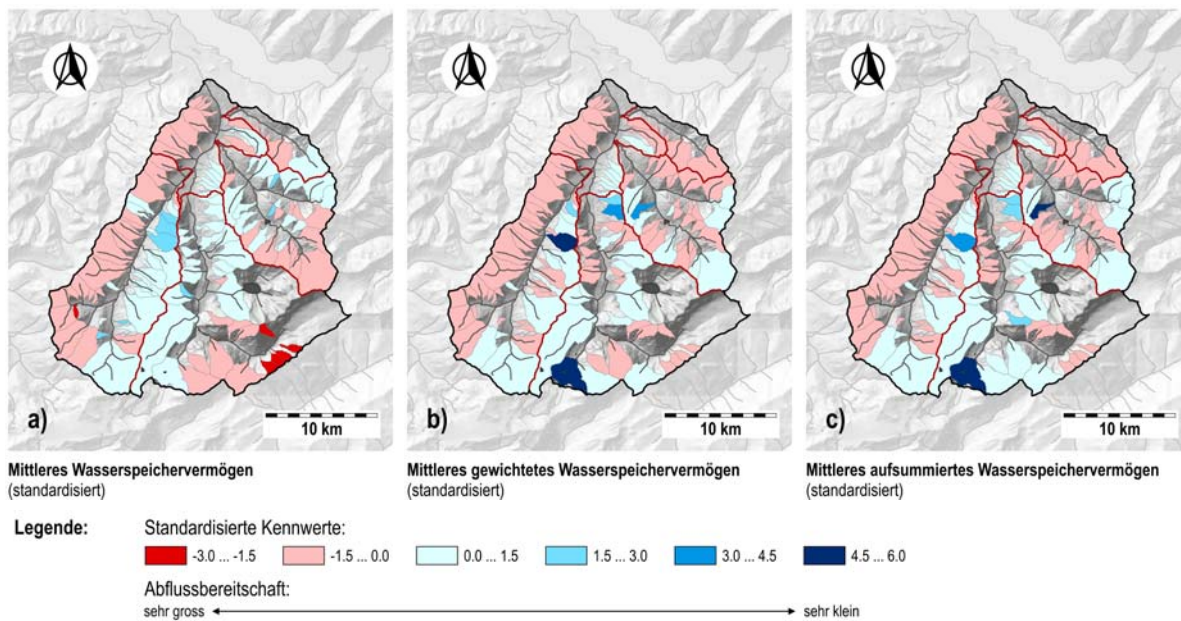


Abbildung 15.6: Standardisierte Kennwerte zur Beurteilung der Abflussbereitschaft im Hochwasserfall für die kleinen Teileinzugsgebiete im Einzugsgebiet Kander-Hondrich (Daten: Stucki 2009). a: Mittleres Wasserspeichervermögen, b: Mittleres gewichtetes Wasserspeichervermögen, c: Mittleres aufsummiertes Wasserspeichervermögen.

Insgesamt sind zwischen den beiden Ansätzen, welche das Wasserspeichervermögen und die Länge des Fliessweges verbinden (Abbildung 15.6 b und c) nur geringe Unterschiede im räumlichen Muster zu erkennen. Grössere Abweichungen treten beim Vergleich dieser beiden Kenngrössen und dem mittleren Wasserspeichervermögen auf (Abbildung 15.6 a). Besonders im hinteren Kandertal sowie im Teileinzugsgebiet Spiggebach-Kiental lassen sich grössere Differenzen beobachten.

Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die kleinen Teileinzugsgebiete entlang der **Niesenkette** sowie diejenigen in den Teileinzugsgebieten **Spiggebach-Kiental** sowie **Suld-Mülenen** eine **überdurchschnittlich hohe Abflussbereitschaft** aufweisen. Andererseits ist anhand dieser Resultate besonders im **zentralen Bereich** des Teileinzugsgebietes **Kander-Frutigen** von einer **geringen Abflussbereitschaft** auszugehen, was sowohl durch die erhöhten Speichervermögen wie auch durch die längeren Fliesswege zu erklären ist.

## 15.7 Fazit

Aus den Resultaten der flächendeckenden Modellierung der dominierenden Abflussprozesse geht hervor, dass insbesondere entlang der Niesenkette sowie im Suld- und teilweise auch im Kiental mit erhöhter Abflussbereitschaft im Hochwasserfall gerechnet werden muss. Im zentralen südlichen Teil des Einzugsgebietes (hinterste Region und rechte Talseite des Engstligentals hinteres und zentrales Kandental, hinterste Region des Kientals) ist auf Grund der Gebietseigenschaften von verzögerter Abflussreaktion auszugehen.

Die Beurteilung der von STUCKI (2009) verwendeten Methode zeigt, dass die durchgeführte Modellierung der dominierenden Abflussprozesse eine flächendeckende Beurteilung der hochwasserhydrologischen Verhältnisse ermöglicht. Auf Grund der Grösse des untersuchten Einzugsgebietes musste die Methode ohne aufwändige Feldarbeit durchgeführt werden; die Modellierung beruht alleine auf verfügbaren digitalen Geodaten.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass bei diesem Ansatz die zum Teil **hohe räumliche Auflösung** der modellierten Abflussprozesse **nicht überinterpretiert** werden darf. Da grosse Differenzen im Massstab bzw. in der räumlichen Auflösung der Grundlagendaten vorhanden sind und keine detaillierten geologischen und pedologischen Karten vorhanden sind, ist die räumlich exakten Lokalisierung der Abflussprozesse mit grösseren Unsicherheiten verbunden. Daneben ist auch zu berücksichtigen, dass die Beschreibung der Abflussprozesse für die Modellierung in GIS stark vereinfacht werden mussten. So wurden weder die hangparallelen Wasserflüsse noch die zeitliche Veränderung der Abflussprozesse während eines Starkniederschlagsereignisses berücksichtigt. Es ist davon auszugehen, dass sich insbesondere eine Berücksichtigung der lateralen Fliesskomponente auf die entsprechenden Resultate auswirken könnte (vgl. z.B. SCHERRER 2006).

Aus diesen Gründen ist den räumlich und inhaltlich **generalisierten Abflussprozesskarten** eine grössere Zuverlässigkeit zuzusprechen als den räumlich hoch aufgelösten Resultaten. Eine vertiefte Überprüfung dieser GIS-Modellierung anhand von Felduntersuchungen oder anhand der Ergebnisse aus den Untersuchungen von BEYELER (2009), SPIESS (2009) und CADUFF (2010) ist für eine weiterführende Validierung der Ergebnisse unbedingt notwendig. Wie der Vergleich zu anderen Methoden in Kapitel 16 noch zeigen wird, lässt sich mit der Methode von STUCKI (2009) jedoch ein **plausibles Muster** der zu erwartenden Abflussreaktion auf der Skala der kleinen Teileinzugsgebiete erzielen.

Die **mittlere Länge des Fliessweges** und das **Wasserspeichervermögen** stellen wichtige Grössen zur Beurteilung der Hochwasserdisposition eines Einzugsgebietes dar. Der im Rahmen der Diplomarbeit von STUCKI (2009) entwickelte Ansatz geht über die Analyse hochwasserrelevanter Gebiets-eigenschaften (z.B. pedologische Kenngrössen) hinaus und versucht, die hydrologischen Prozesse unter Berücksichtigung verschiedener Schlüsselstellen im Bodenprofil abzubilden. Für eine Modellierung, welche die Abflussprozesse ausführlicher und vertieft berücksichtigen kann, sind in erster Linie detaillierte Untersuchungen im Feld sowie weitere Forschungsarbeiten zu den vorherrschenden bzw. bodenhydrologisch relevanten Prozessen notwendig. Ebenso würde die Verfügbarkeit von

räumlich hoch aufgelösten Grundlagendaten – insbesondere zu geologischen und pedologischen Kennwerten – die flächendeckende Modellierung der dominierenden Abflussprozesse zusätzlich optimieren und wesentlich vereinfachen (vgl. z.B. SCHMOCKER-FACKEL ET AL. 2007).



## 16 Schlussfolgerungen zu Teil III

In Abbildung 16.1 sind in der Übersicht und zum direkten Vergleich die hochwasserhydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet Kander-Hondrich in unterschiedlicher räumlicher Differenzierung dargestellt. Die drei Karten (a bis c) fassen die Resultate aus Kapitel 13 bis 15 zusammen – die entsprechenden Werte basieren auf unterschiedlichen methodischen Ansätzen.

Die folgenden inhaltlichen Ergebnisse werden aus dieser Zusammenstellung ersichtlich:

Das **räumliche Muster der 100-jährlichen Hochwasserabflusspende** der mesoskaligen Teileinzugsgebiete, welches auf Grund der extremwertstatistischen Auswertungen der modellierten Abflussdaten entstand (ExAwMOD, Abbildung 16.1 a), unterscheidet sich deutlich von demjenigen der Hochwasserabschätzungen für die kleinen Teileinzugsgebiete (Synthesekarte, Abbildung 16.1 b): Bei den Hochwasserabschätzungen für die **mesoskaligen Teileinzugsgebiete** (ExAwMOD), resultieren für das Teileinzugsgebiet Allenbach-Adelboden die höchsten 100-jährlichen Hochwasserabflusspenden. Für die Teileinzugsgebiete Kander-Frutigen und Kander-Kandersteg sind dagegen die tiefsten Werte zu beobachten. Bei den Hochwasserabschätzungen für die **kleinen Teileinzugsgebiete** (Synthesekarte) treten jedoch die höchsten Werte im Kiental (Spiggebach, Gornere-wasser) auf. Zudem sind die abgeschätzten Werte für die kleinen Teileinzugsgebiete zwischen Kandersteg und Kandergrund ebenfalls sehr hoch.

Aus diesem Vergleich wird ersichtlich, dass das räumliche Muster der hochwasserhydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet Kander-Hondrich entscheidend von der **räumlichen Skala**, auf welcher die Beurteilung durchgeführt wird, abhängig ist. Neben der zu erwartenden Abhängigkeit der Hochwasserabflusspende von der Einzugsgebietsgrösse (vgl. z.B. BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996) können die Unterschiede, welche zwischen den beiden räumlichen Skalen erkennbar werden, auch durch die Gebietsform sowie durch die topographischen Verhältnisse in den mesoskaligen Teileinzugsgebieten erklärt werden:

- > Die **Gebietsform** der beurteilten mesoskaligen Teileinzugsgebiete beeinflusst das Zusammenwirken der kleinen Teileinzugsgebiete (vgl. z.B. DYCK 1980b): Während eine langgestreckte Gebietsform die Hochwasserabflüsse tendenziell reduziert, sind für Einzugsgebiete mit runden Gebietsformen eher höhere Hochwasserabflussmengen zu beobachten. Die im mesoskaligen Teileinzugsgebiet Spiggebach-Kiental gegenüber den Hochwasserabflusspenden der kleinen Teileinzugsgebiete reduzierte Hochwasserabflusspende kann deshalb auf die langgestreckte Gebietsform zurückgeführt werden. Die geringeren Unterschiede im hinteren Engstligental zwischen den Hochwasserabschätzungen für die meso- und mikroskaligen Teileinzugsgebiete lassen sich ebenfalls durch die Gebietsform des mesoskaligen Einzugsgebiets erklären: Die eher runde Gebietsform von Allenbach-Adelboden und Engstlige-Adelboden führen dazu, dass die Unterschiede zwischen den kleinen und den beiden mesoskaligen Teilräumen weniger stark ausgeprägt sind.

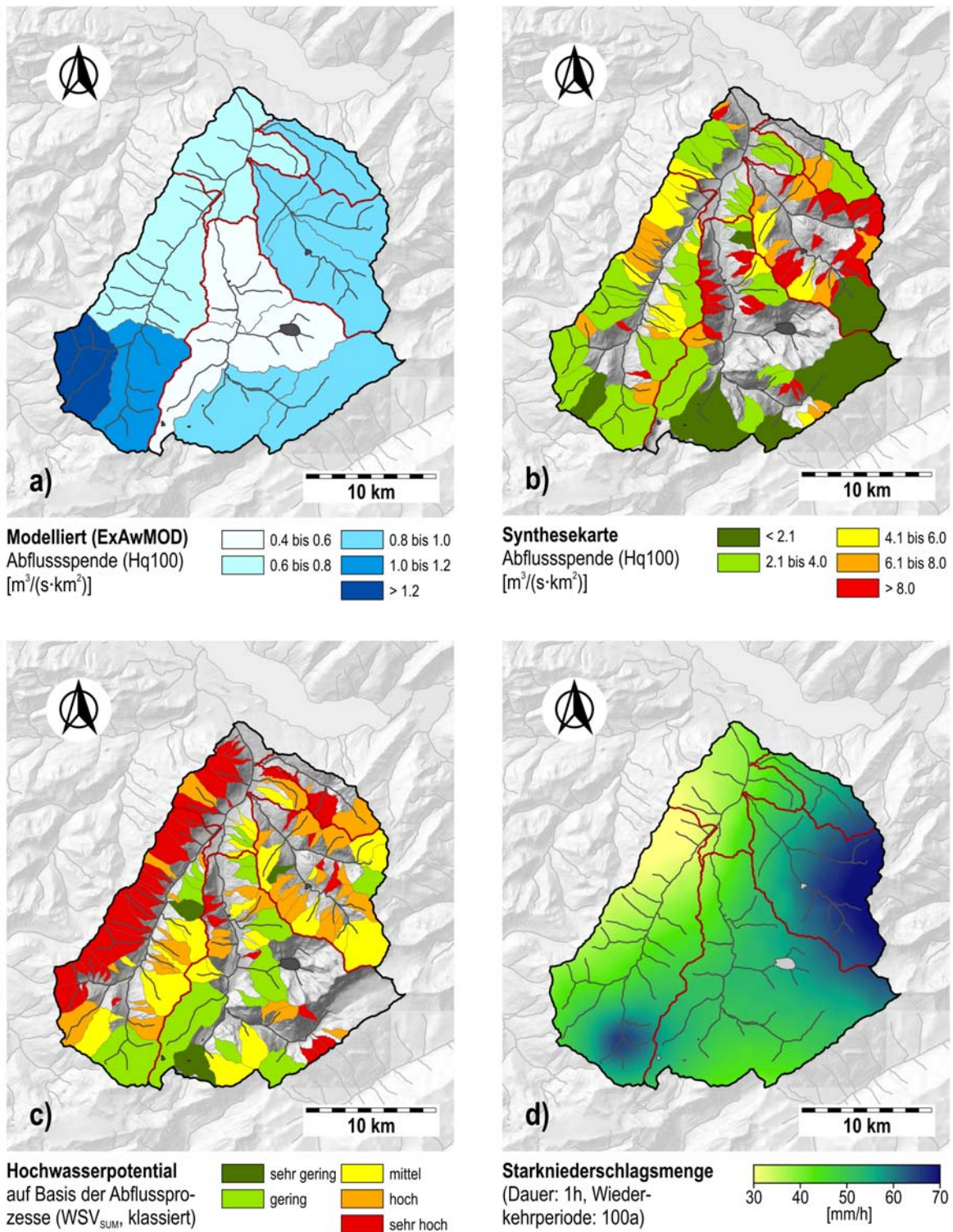


Abbildung 16.1: Vergleich der hochwasserhydrologischen Verhältnisse auf unterschiedlichen räumlichen Skalen. a: Hochwasserabflusspende (Hq100) für die mesoskaligen Einzugsgebiete basierend auf extremwertstatistischer Auswertung modellierter Abflussdaten, b: Hochwasserabflusspende für kleine Teileinzugsgebiete aus der Synthesekarte (Daten: ZGRAGGEN 2009), c: Klassiertes Hochwasserpotential auf Basis der modellierten Abflussprozesse bzw. des mittleren summierten Wasserspeichervermögens (Daten: STUCKI 2009), d: 100-jährliche Starkniederschlagsmenge von 1 Stunde Dauer (Daten: GEIGER ET AL. 1992).

- > Die Unterschiede im vorderen Bereich des Teileinzugsgebietes Kander-Frutigen lassen sich andererseits durch die **topographischen Verhältnisse** erklären. Es ist davon auszugehen, dass auf Grund der topographischen Gegebenheiten im Teileinzugsgebiet Kander-Frutigen, welches sich in verschiedene Geländekammern unterteilen lässt, die Hochwasserabflüsse entweder durch die vordere Region (Frutigen bis Kandersteg) oder durch den hinteren Bereich des Teileinzugsgebietes (Gasteretal) geprägt werden. Dass beide Teilräume gleichzeitig zum Hochwasserabfluss beitragen, scheint unwahrscheinlich. Deshalb bewirkt die hohe Abflussbereitschaft der kleinen Teileinzugsgebiete in der vorderen Region des Teileinzugsgebietes Kander-Frutigen keine zusätzliche Erhöhung des Hochwasserabflusses gegenüber demjenigen von Kander-Kandersteg. Dies deshalb, weil die kleinen Teileinzugsgebiete zwischen Frutigen und Kandersteg nur hochwasserwirksam sind, wenn die hinteren Regionen des Teileinzugsgebietes reduziert zum Hochwasserabfluss beitragen.

In Abbildung 16.1 ist zudem der Vergleich zwischen den Hochwasserabschätzungen für die kleinen Teileinzugsgebiete (**Synthesekarte**, Abbildung 16.1 b) und dem entsprechenden **Hochwasserpotential** (Abbildung 16.1 c) dargestellt. Letzteres wird an dieser Stelle mit dem mittleren aufsummierten Wasserspeichervermögen ( $WSV_{SUM}$ ), welches in fünf Klassen unterteilt wurde, gleichgesetzt. Auch bei dieser Gegenüberstellung treten grössere Abweichungen zwischen den beiden räumlichen Mustern auf: Entlang der Niesenkette wird z.B. bei  $WSV_{SUM}$  das grösste Hochwasserpotential ersichtlich, während bei den Hochwasserabschätzungen für die kleinen Teileinzugsgebiete (Synthese) in dieser Region nur mittlere Werte resultieren. Dagegen wird das Hochwasserpotential im Kiental durch die Beurteilung anhand  $WSV_{SUM}$  nur als hoch eingestuft, während hier bei den Hochwasserabschätzungen für die kleinen Teileinzugsgebiete die grössten Werte im gesamten Einzugsgebiet Kander-Hondrich resultieren.

Die Abweichungen zwischen diesen beiden räumlichen Mustern (Synthesekarte, Hochwasserpotential) können dadurch erklärt werden, dass bei den Hochwasserabschätzungen für die kleinen Einzugsgebiete (Synthesekarte) die Starkniederschlagsverhältnisse in die Beurteilungen einfließen. Im Gegensatz dazu werden bei der Beurteilung des Hochwasserpotentials, welches in erster Linie auf den modellierten Abflussprozessen basiert, nur Gebietseigenschaften zur Pedologie, Topographie, Geologie und zur Landnutzung berücksichtigt.

Abbildung 16.1 verdeutlicht diesen Sachverhalt: Die hohen 100-jährlichen Hochwasserabflussspenden ( $Hq_{100}$ , Abbildung 16.1 b), welche im hinteren Teil des Kientals zu beobachten sind, lassen sich auch durch die sehr hohen **Starkniederschlagsmengen** kurzer Dauer (nach GEIGER ET AL. 1992, Abbildung 16.1 d), welche für die Hochwasserabflüsse in kleinen Einzugsgebieten von zentraler Bedeutung sind, begründen. Zudem fällt auf, dass entlang der Niesenkette die Starkniederschlagsmengen weniger hoch ausfallen, was sich auch in teilweise reduzierten Hochwasserabflussspenden ausdrückt. In dieser Region ist allerdings die Übereinstimmung von Starkniederschlagsmenge und Hochwasserabfluss weniger stark ausgeprägt und kann auch nicht über die räumlichen Unterschiede des Hochwasserpotentials erklärt werden; weitere Grössen sind offenbar für die Hochwasserabflüsse in dieser Region entscheidend.

Die Beurteilung der räumlich differenzierten, aktuellen hochwasserhydrologischen Verhältnissen im Einzugsgebiet Kander-Hondrich mit verschiedenen methodischen Ansätzen und auf unterschiedlichen räumlichen Skalen führt zu folgenden Schlüssen:

- > Die höchsten 100-jährlichen Hochwasserabflussspenden treten auf der Skala der **kleinen Teileinzugsgebiete** im Einzugsgebiet der Chiene sowie in der vorderen Region des Teileinzugsgebietes Kander-Frutigen auf. Dagegen ist im zentralen und hinteren Bereich des Teil-

einzugsgebietes Kander-Frutigen (Region Kandersteg) sowie in den hinteren Regionen des Teileinzugsgebietes Engstlige-Frutigen mit vergleichsweise geringeren Hochwasserabflüssen zu rechnen.

- > Bei den **mesoskaligen Teileinzugsgebieten** sind die grössten 100-jährlichen Hochwasserabflussspenden für die Teileinzugsgebiete Engstlige-Adelboden bzw. für den Allenbach-Adelboden zu beobachten. Grosse Werte treten auch bei den Teileinzugsgebieten der Chiene, der Suld sowie im hinteren Kandertal auf. Die kleinsten Werte treten bei den Teileinzugsgebieten Kander-Frutigen und Kander-Kandersteg auf.
- > Die hochwasserhydrologischen Verhältnisse innerhalb eines mesoskaligen Teileinzugsgebietes können stark von denjenigen abweichen, welche für das gesamte Teileinzugsgebiet abgeschätzt werden. Um ein räumlich differenziertes Bild der hochwasserhydrologischen Verhältnisse zu erhalten, ist deshalb eine Beurteilung auf Basis von kleinen Teileinzugsgebieten notwendig. Dieser Sachverhalt bestätigt das in der Hydrologie bekannte Problem der Prozessübertragung zwischen den verschiedenen räumlichen Skalen (z.B. BLÖSCHL 2001).
- > Die zu beobachtenden Unterschiede bei den räumlichen Mustern der hochwasserhydrologischen Verhältnisse auf unterschiedlicher räumlicher Skala lassen sich im Einzugsgebiet Kander-Hondrich durch die **Gebietsform** und die **topographischen Verhältnisse** der mesoskaligen Teileinzugsgebiete erklären. Die Abweichungen bei den kleinen Teileinzugsgebieten, welche zwischen dem Hochwasserpotential und den Hochwasserabschätzungen auftreten, lassen sich jedoch nicht vollständig auf die unterschiedliche Berücksichtigung der Starkniederschlagsverhältnisse zurückführen.

Zusammenfassend lassen sich aus den erzielten Resultaten folgende **Empfehlungen** für die räumlich differenzierte Beurteilung der hochwasserhydrologischen Verhältnisse auf unterschiedlichen räumlichen Skalen **ableiten**:

- > Um eine vertiefte, räumlich hoch aufgelöste und differenzierte Beurteilung der **potenziellen Hochwasserdisposition** für das ganze untersuchte Einzugsgebiet Kander-Hondrich durchzuführen, müssen die Informationen zu den Starkniederschlagsverhältnissen (vgl. z.B. GEIGER ET AL. 1992) und diejenigen zu den dominierenden Abflussprozessen (vgl. STUCKI 2009) miteinander kombiniert werden.
- > Angaben zu den zu erwartenden **seltene Hochwasserabflüssen** auf Ebene der kleinen Teileinzugsgebiete können aus den durchgeführten Hochwasserabschätzungen (z.B. mit HAKESCH) bzw. aus der erstellten Synthesekarte (vgl. ZGRAGGEN 2009) abgeleitet werden.
- > Um eine **Gesamtbeurteilung der räumlich differenzierten hochwasserhydrologischen Verhältnisse** durchzuführen, müssen sowohl die potentielle Hochwasserdisposition als auch die vorliegenden Hochwasserabschätzungen berücksichtigt werden. Dadurch wird sowohl eine methodisch wie auch inhaltlich breit abgestützte Einschätzung der zu erwartenden Hochwasserabflüsse ermöglicht.

# Teil IV

## **Die Hydrologie der Kander – morgen**

Modellierungen und Analysen zu den  
Auswirkungen der Klimaänderung  
auf die Hydrologie der Kander

## Übersicht Teil IV

Dieser Teil der Arbeit behandelt die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Hydrologie des Gesamteinzugsgebietes Kander-Hondrich. Die hydrologische Modellierung von Klimaänderungsszenarien wurde mit Hilfe einer Modellkaskade, bestehend aus einem Wettergenerator und dem hydrologischen Modellsystem PREVAH, durchgeführt. Folgende Kapitel sind in Teil IV enthalten:

- > In **Kapitel 17: Szenarien der Klimaänderung** wird zuerst der aktuelle Stand des Wissens zur erwarteten Klimaänderung in der Schweiz bis ins Jahr 2050 zusammengefasst. Zudem werden in diesem Kapitel auch die bisher bekannten Auswirkungen der Klimaänderungen auf ausgewählte hydrologische Kenngrößen alpiner Einzugsgebiete dargelegt.
- > Das Vorgehen sowie die Methode, welche gewählt wurde um die überregionalen Klimaszenarien für das Jahr 2050 auf das Einzugsgebiet Kander-Hondrich zu übertragen und in eine hydrologische Systemantwort umzusetzen, werden in **Kapitel 18: Entwicklung und Anwendung der Modellkaskade** erläutert.
- > Unter Anwendung von drei verschiedenen Ansätzen wurden die acht verschiedenen Varianten der entwickelten Modellkaskade (Wettergenerator-hydrologisches Modell) validiert. Gleichzeitig wurden in diesem Schritt die acht Modellkaskaden für die weiteren Anwendungen auf vier Varianten reduziert. Auf die Resultate dieser Beurteilung der Modellierungsqualität wird in **Kapitel 19: Validierung der Modellkaskade** eingegangen.
- > **Kapitel 20: Sensitivitätsanalysen** enthält die Resultate der Sensitivitätsanalysen, welche die hydrologische Systemantwort von zahlreichen Kenngrößen für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich gegenüber systematisch veränderten Niederschlags- und Temperaturbedingungen aufzeigen. Die zum Teil extremen Klimaszenarien geben einen Hinweis darauf, wie das Einzugsgebiet auf massive klimatische Veränderungen reagiert.
- > In **Kapitel 21: Auswirkungen realistischer Klimaszenarien auf die Hydrologie der Kander** werden die Auswirkungen von saisonal differenzierten und realistischen Klimaszenarien für das Jahr 2050 auf verschiedene hydrologische Kenngrößen für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich behandelt.
- > Die abschliessende Synthese in **Kapitel 22: Synthese – Teil IV** fasst die Resultate aus allen Kapiteln in diesem Teil zusammen, gibt einen Überblick über die an der Kander bis ins Jahr 2050 zu erwartenden Veränderungen und vergleicht die Resultate zu denjenigen aus bestehenden Untersuchungen. Zudem wird auch ein Fazit zu der verwendeten Methode gezogen.

# 17 Szenarien der Klimaänderung

In diesem Kapitel wird der aktuelle Wissensstand zu den Veränderungen von Klima und Hydrologie in der Schweiz in den nächsten Jahrzehnten aufgezeigt (Kapitel 17.1). Zudem wird das in der vorliegenden Untersuchung verwendete Prinzip erläutert, mit welchem die erwarteten klimatischen Veränderungen in eine hydrologische Systemantwort der Kander umgesetzt wurden (Kapitel 17.2).

## 17.1 Stand des Wissens zur Klimaänderung

### 17.1.1 Globale, überregionale und regionale Klimaänderung

Von welchen klimatischen Verhältnissen in den nächsten Jahrzehnten auf globaler und überregionaler Ebene ausgegangen werden muss, lässt sich heute aus zahlreichen Klimamodellierungen, welche das Klima unter Berücksichtigung verschiedener Emissionsszenarien prognostizieren, abschätzen (JOOS & STOCKER 2008). Im «Assessment Report 4» (AR4) des IPCC (2007) sind die wesentlichen Ergebnisse solcher Auswertungen zusammengefasst. Daraus geht beispielsweise hervor, mit welchen saisonalen Temperatur- und Niederschlagsänderungen in **Europa** für das Jahr 2100 bei einem bestimmten Emissionsszenario (hier: A1B, Abbildung 17.1) gerechnet werden muss.

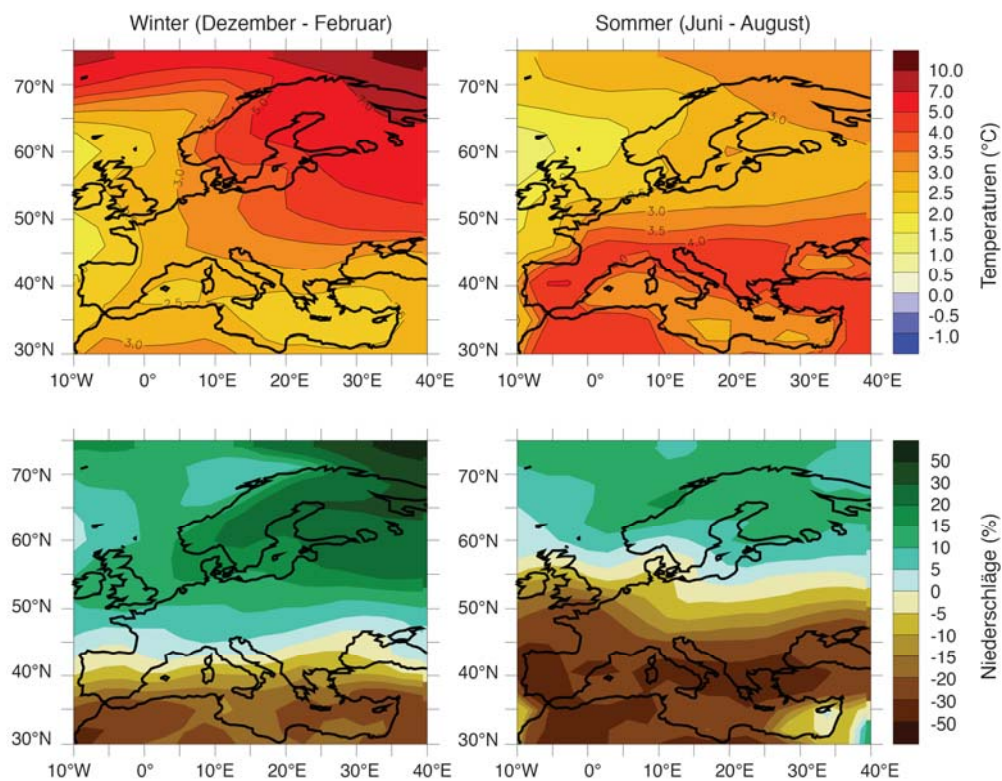


Abbildung 17.1: Erwartete Änderung der mittleren Sommer- und Wintertemperatur (oben) sowie der entsprechenden jahreszeitlichen Niederschlagsmenge (unten) in Europa für die Jahre 2080-2099 (Veränderungen gegenüber 1980-1999, Szenario A1B, Grafik nach SOLOMON ET AL. 2007).

Abbildung 17.1 zeigt, dass bis ins Jahr 2100 in Nordeuropa besonders im Winter eine deutliche Erwärmung zu erwarten ist. Dagegen ergibt sich im Sommer für den Mittelmeerraum die grösste Temperaturzunahme. Bei den Niederschlagsänderungen lassen sich sowohl im Sommer wie auch im Winter feuchtere Bedingungen in Nordeuropa und deutlich trockenere Verhältnisse im Mittelmeerraum beobachten.

Es stellt sich im Rahmen der vorliegenden Untersuchung aber die Frage, von welchen Veränderungen im **Alpenraum**, in der Schweiz bzw. im Einzugsgebiet der Kander im Jahr 2050 ausgegangen werden muss. Grundsätzlich ist nämlich zu erwarten, dass sich die Auswirkungen des Klimawandels auf der regionalen Ebene des Alpenraums aus mehreren Gründen nicht gleich äussern werden, wie auf globaler oder kontinentaler Ebene (z.B. OCCC 2008). Einerseits wird das Klima im Alpenraum massgeblich durch Prozesse beeinflusst, welche durch die komplexe Topographie ausgelöst werden und durch die globalen Klimamodelle nicht nachgebildet werden können (z.B. räumlich differenzierte Niederschlagsbildung). Andererseits ist zu beachten, dass sich die Alpen im Übergangsbereich zwischen dem gemässigten Klima der mittleren Breiten und dem Mittelmeerklima befinden. Das kann dazu führen, dass sich der Klimawandel räumlich inhomogen äussert, was die Modellierung der künftigen Klimaverhältnisse deutlich erschwert (GOBIET & TRUHETZ 2008).

Für eine weiterführende Abschätzung der Klimaänderung auf regionaler Ebene wurden deshalb regionale Klimamodelle entwickelt (z.B. CHRISTENSEN & CHRISTENSEN 2007), welche in der Regel mit globalen Klimamodellen gekoppelt werden (z.B. SCHÄR 2003). Die daraus resultierenden Szenarien können dann hinsichtlich der zukünftigen Klimaentwicklung für eine Teilregion ausgewertet werden. Mit diesem Ansatz lassen sich z.B. auch quantitative Abschätzungen der Klimaänderung für die Schweiz bzw. den Alpenraum durchführen (z.B. OCCC, PROCLIM 2007 bzw. FREI 2005).

### 17.1.2 Klimaänderung in der Schweiz

Für die in der Schweiz in den nächsten Jahrzehnten zu erwartenden Veränderungen bei Temperatur und Niederschlag wurden von FREI (2005) Klimaszenarien mit einem **probabilistischen Ansatz** aus mehreren regionalen Klimamodellierungen abgeleitet. Die gewählte Methode hat gegenüber der Auswertung eines einzelnen Klimamodells den Vorteil, dass die Unsicherheiten, welche in einzelnen globalen und regionalen Klimamodellen enthalten sind, berücksichtigt werden. Diese **Unsicherheiten** können gemäss FREI (2005) die folgenden Bereiche umfassen:

- > Unsicherheiten in der sozioökonomischen, demographischen und technologischen Entwicklung bzw. bei den Emissionsszenarien
- > Unsicherheiten in der physikalischen Beschreibung und Modellierung der Prozesse
- > Unsicherheiten bei den natürlichen Klimaschwankungen

Bei den probabilistischen Auswertungen von FREI (2005) basiert die Abschätzung dieser bestehenden Unsicherheiten darauf, dass mehrere modellierte Klimaszenarien berücksichtigt werden, welche unter verschiedenen realistischen Annahmen berechnet wurden (vgl. z.B. EKSTRÖM ET AL. 2005, FOWLER ET AL. 2007, MURPHY ET AL. 2007). Aus der Streuung der modellierten Klimagrössen (hier von Interesse: Temperatur und Niederschlag) lassen sich schliesslich Wahrscheinlichkeitsaussagen für die zu erwartenden Werte ableiten. Die Auswertungen für die Schweiz basieren auf Simulationen mit 16 verschiedenen sogenannten Klimamodellketten, welche im Rahmen des europäischen Projekts PRUDENCE (CHRISTENSEN ET AL. 2007) durchgeführt wurden.



Aus Abbildung 17.2 gehen die Resultate dieser Auswertungen für die Alpennordseite der Schweiz hervor. Diese Darstellung zeigt, welche Veränderungen bei der mittleren saisonalen Temperatur bzw. bei der mittleren saisonalen Niederschlagssumme für verschiedene Zeitpunkte des 21. Jahrhunderts (2030, 2050 und 2070) zu erwarten sind. Die Angaben sind immer als Veränderungen gegenüber den mittleren Verhältnissen der Periode von 1980 bis 1999 zu verstehen. Anhand der farbigen Säulen wird das 95%-Konfidenzintervall ersichtlich, welches den Bereich zwischen dem 2.5%- und 97.5%-Quantil umfasst. Damit werden die Unsicherheiten der erwarteten Veränderungen beschrieben. Die horizontale schwarze Linie entspricht jeweils der besten Schätzung der erwarteten saisonalen Veränderung. Während für die Temperatur die absoluten Abweichungen in °C angegeben sind, wurden beim Niederschlag die Umrechnungsfaktoren gegenüber den Verhältnissen der Periode 1980-1999 aufgeführt (vgl. OCCC, PROCLIM 2007).

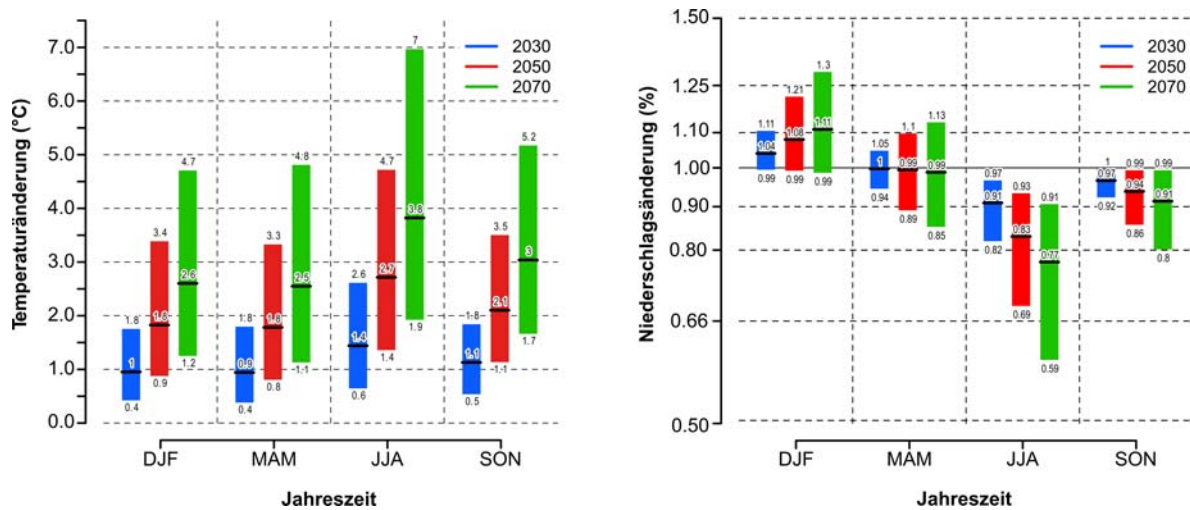


Abbildung 17.2: Erwartete Änderung der mittleren saisonalen Temperatur (links) und relative Änderung der mittleren saisonalen Niederschlagssumme (rechts) auf der Alpennordseite der Schweiz für die Jahre 2030, 2050 und 2070. Winter (DJF: Dezember-Februar), Frühling (MAM: März-Mai), Sommer (JJA: Juni-August), Herbst (SON: September-November) Die Änderungen beziehen sich auf die Verhältnisse der Periode 1980-1999. (Grafik aus FREI 2005)

Tabelle 17.1: Erwartete Änderungen der mittleren saisonalen und jährlichen Temperatur und der Niederschlagssumme auf der Alpennordseite der Schweiz im Jahr 2050 (nach FREI 2005). Aufgeführt sind jeweils die mittleren Veränderungen gegenüber der Periode 1980-1999 sowie die obere und untere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls der probabilistischen Auswertungen. Die Jahreswerte sind aus den saisonalen Angaben abgeleitet.

Jahreszeit	Temperaturänderung [°C]			Niederschlagsänderung [%]		
	2.5%-Quantil	Mittelwert	97.5%-Quantil	2.5%-Quantil	Mittelwert	97.5%-Quantil
Winter (Dez. bis Feb.)	+0.9	<b>+1.8</b>	+3.4	- 1%	<b>+ 8%</b>	+ 21%
Frühling (März bis Mai)	+0.8	<b>+1.8</b>	+3.3	- 11%	<b>- 1%</b>	+ 10%
Sommer (Juni bis Aug.)	+1.4	<b>+2.7</b>	+4.7	- 31%	<b>- 17%</b>	- 7%
Herbst (Sep. bis Nov.)	+1.1	<b>+2.1</b>	+3.5	- 14%	<b>- 6%</b>	- 1%
Ganzes Jahr	+1.1	<b>+2.1</b>	+3.7	-14%	<b>- 4%</b>	+ 6%

Die Veränderungen von Temperatur und Niederschlag bis ins Jahr 2050, welche für die vorliegende Arbeit von vorrangigem Interesse sind, weisen folgende Werte auf (vgl. Tabelle 17.1):

- > Bei den mittleren saisonalen **Temperaturen** wird bis ins Jahr 2050 für die Jahreszeiten Winter, Frühling und Herbst von nahezu den gleichen Änderungsbeträgen ausgegangen. Diese liegen zwischen +0.8 °C und +3.5 °C, die mittlere Veränderung wird für das ganze Jahr auf +2.1 °C geschätzt. Für den Sommer (Juni bis August) ist von leicht grösseren Veränderungen auszugehen (+1.4 °C bis +4.7 °C; Mittelwert: +2.7 °C).
- > Bei der mittleren saisonalen **Niederschlagssumme** ist mit einer erheblichen Veränderung des Jahresgangs zu rechnen. So wird im Sommer (Juni bis August) eine markante Abnahme erwartet, welche für das Jahr 2050 bis zu -31% betragen kann. Dagegen kann für den Winter (Dezember bis Februar) eine Zunahme bis zu +21% beobachtet werden; für die übrigen Jahreszeiten treten Veränderungen auf, die zwischen diesen Werten liegen. Die mittlere Veränderung über alle Jahreszeiten beträgt -4%.

Den Auswertungen von FREI (2005) sind daneben keine Angaben zur Entwicklung von weiteren klimatischen Grössen (z.B. Intensität der Starkniederschläge, Anzahl Niederschlagstage) zu entnehmen. Auch aus anderen Untersuchungen geht hervor, dass die Variabilität der Modellierungsergebnisse für diese und ähnliche Parameter heute noch zu gross ist, um verlässliche Aussagen machen zu können (z.B. FREI ET AL. 2006).

### 17.1.3 Erwartete Auswirkungen auf die Hydrologie der Schweiz

Für die Schweiz liegen heute verschiedene Untersuchungen vor, welche die Auswirkungen von Klimaszenarien auf die Hydrologie mit Hilfe von prozessorientierten hydrologischen Modellen quantitativ aufzeigen (z.B. GURTZ ET AL. 1997, JASPER ET AL. 2004, KLEINN ET AL. 2005, ZIERL & BUGMANN 2005, HORTON ET AL. 2006, BAVAY ET AL. 2009). Daneben haben ALLAMANO ET AL. (2009) mittels probabilistischer Modellierung die **quantitativen Veränderungen** der Hochwasserverhältnisse grösserer Fließgewässer in der Schweiz abgeschätzt. Allerdings handelt es sich bei diesen Forschungsarbeiten entweder um lokale Fallstudien oder es fehlen konkrete Angaben zu den zu erwartenden Veränderungen verschiedener hochwasserhydrologischer Kenngrössen. Damit ist eine direkte Übertragung dieser Resultate auf das Untersuchungsgebiet Kander-Hondrich und auf die Fragestellungen der vorliegenden Arbeit nicht möglich.

**Qualitative Angaben** zu den erwarteten Veränderungen in der Schweiz sind z.B. in den Arbeiten von PETRASCHECK (2003) und KOHS (2007) enthalten. Letztere fasst die zu erwartenden Folgen in saisonaler und regionaler Differenzierung zusammen und ist heute für die qualitative Beurteilung der (hochwasser-)hydrologischen Auswirkungen der Klimaänderung in der Schweiz in erster Linie zu berücksichtigen. Die im Standortpapier der KOHS (2007) enthaltenen qualitativen Angaben basieren auf den probabilistischen Klimaprojektionen von FREI (2005) (vgl. Kapitel 17.1.2) und entsprechen damit dem aktuellen Stand des Wissens. An dieser Stelle werden die für das Untersuchungsgebiet relevanten Angaben aufgeführt:

- > **Abflussregime (gültig für die ganze Schweiz):** Aufgrund des reduzierten Niederschlagseintrags und der durch die höheren Temperaturen intensivierten Verdunstung wird davon ausgegangen, dass das mittlere jährliche Abflussvolumen um ca. 10% verringert wird.
- > **Hochwasser (gültig für Gebiete in den Nordalpen über 1500 m ü.M.):** Im Winter wird generell von etwas grösseren Abflussmengen ausgegangen. Im Frühling werden

kleine Hochwasser erwartet, die durch die Schneeschmelze ausgelöst werden und etwas grösser sein dürften als heute. Die Jahreshochwasser werden wie heute im Sommer und in gleicher Grössenordnung auftreten. Für den Herbst werden keine Veränderungen erwartet.

KOHS (2007) ist zudem zu entnehmen, dass künftig **vermehrt Hochwasser** auftreten können und mit einer **Zunahme der Extremwerte** zu rechnen ist. Es wird deshalb empfohlen, die Bemessungsgrössen, welche z.B. für die Dimensionierung von Hochwasserschutzmassnahmen verwendet werden, im oberen Entscheidungsbereich (oberes Konfidenzintervall der Hochwasserabschätzung) festzulegen.

Auch die Ergebnisse von HORTON ET AL. (2005) und von ZIERL & BUGMANN (2005) zeigen, dass die Abflussregimes alpiner Einzugsgebiete unter dem Einfluss der Klimaänderung massgeblich verändert werden können. Insbesondere ist von einer Zunahme der mittleren Abflüsse im Winter als auch von einem Rückgang der mittleren Abflussmengen im Herbst auszugehen. Durch den verstärkten nivalen und pluvialen Einfluss, wird das jährliche Abflussregime deutlich variabler. Auch SCHÄDLER ET AL. (2007) weisen darauf hin, dass sich die Abflussregimes unter dem Einfluss der Klimaänderung um eine bis zwei Klassen in Richtung nival und pluvial verschieben werden.

## 17.2 Prinzip zur hydrologischen Modellierung mit Klimaszenarien

Wie aus Kapitel 17.1.3 hervorgeht, liegen bisher keine quantitativen Angaben zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf die Hydrologie der Kander vor. Um diese Lücke zu schliessen und die Auswirkungen der Klimaänderung auf verschiedene (hochwasser-)hydrologische Kennwerte des untersuchten Einzugsgebietes Kander-Hondrich quantitativ zu bestimmen, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit umfangreiche hydrologische Modellierungen mit zahlreichen Klimaszenarien durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde eine Methode angewendet, welche die beiden folgenden Bedingungen erfüllt:

- > Die Methode soll mit einem Downscaling die Angaben zur erwarteten regionalen Klimaänderung auf der Alpennordseite der Schweiz für das Jahr 2050 auf das Einzugsgebiet der Kander übertragen.
- > Die Klimaszenarien sollen in eine hydrologische Systemantwort der Kander in hoher zeitlicher Auflösung umgesetzt werden können.

Das Prinzip der verwendeten Methode, ist in Abbildung 17.3 schematisch. Die einzelnen Schritte werden in den nachfolgenden Kapiteln 18 bis 21 der vorliegenden Arbeit detailliert behandelt.

Die drei Schritte **Entwicklung**, **Validierung** und **Anwendung** der verwendeten Methode beinhalten die folgenden wesentlichen Elemente (vgl. auch Abbildung 17.3):

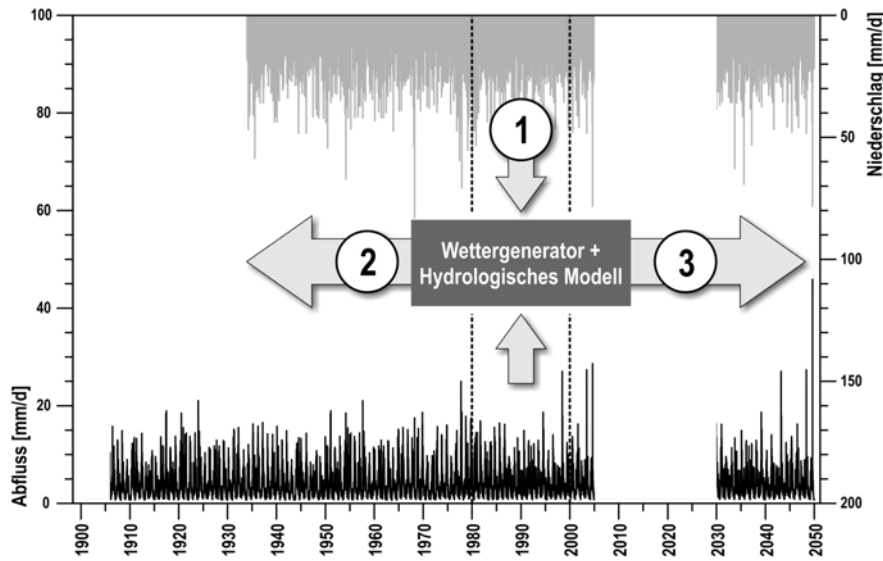


Abbildung 17.3: Methodisches Prinzip zur hydrologischen Modellierung mit Klimaszenarien.

(Ausführungen zu 1, 2 und 3 vgl. Text)

1 = Entwicklung  
2 = Validierung  
3 = Anwendung

- 1) **Entwicklung:** Im ersten Schritt wurde eine **Modellkaskade** entwickelt, welche die Kopplung eines **Wettergenerators** und des **hydrologischen Modellsystems PREVAH** darstellt. Mit dieser Modellkaskade können auf Basis von vorgegebenen monatlichen Gebietsmittelwerten von Temperatur und Niederschlag, tägliche Abflussdaten für das untersuchte Einzugsgebiet Kander-Hondrich generiert werden. Die für die beiden Modelle der Modellkaskade benötigten Parameter wurden aus gemessenen meteorologischen und hydrologischen Daten des Zeitraums 1980-1999 hergeleitet. Es ist deshalb davon auszugehen, dass mit der Modellkaskade die hydrologischen Verhältnisse dieser Periode besonders gut nachgebildet werden können. Auf die Entwicklung und Funktionsweise der Modellkaskade wird in **Kapitel 18** näher eingegangen.
- 2) **Validierung:** Die unter Schritt 1 entwickelte Modellkaskade wird im zweiten Schritt für den Zeitraum eingesetzt, für welchen sowohl gemessene Wetter- als auch Abflussdaten für das untersuchte Einzugsgebiet vorliegen. Dieser Schritt ermöglicht es, die Qualität der Modellkaskade durch **Validierung** bzw. **Vergleich von modellierten und gemessenen Abflussdaten** zu beurteilen. Als Eingabegrößen werden dazu gemessene monatliche Gebietsmittelwerte von Temperatur und Niederschlag verwendet. Die damit modellierten, täglichen Abflusswerte werden mit den entsprechenden gemessenen täglichen Abflussdaten verglichen. Anhand der Validierung für den Zeitraum von 1980-1999 kann somit eine Aussage zur Modellierungsqualität für diejenige Periode gemacht werden, für welche die Modellkaskade entwickelt wurde. Da die meteorologischen Daten in der Region des untersuchten Einzugsgebietes bis 1933 zurückreichen und die Abflussdaten von Kander-Hondrich seit 1902 verfügbar sind, konnte die Modellkaskade zudem für den Zeitraum 1933-2005 validiert werden. Die Validierung für diese Periode (1933-2005) gibt Hinweise darauf, ob die Modellkaskade auch für Zeiträume eingesetzt werden kann, welche ausserhalb der Kalibrierungsperiode liegen. Auf die Resultate der Modellvalidierung wird in **Kapitel 19** eingegangen.
- 3) **Anwendung:** Im letzten Schritt wird die Modellkaskade auf den Zeitraum angewendet, für welchen **die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Hydrologie der Kander** modelliert werden soll. Dafür wurden aus vorhandenen, aktuellen Klimaszenarien die Angaben zu den erwarteten saisonalen Änderungen von Temperatur und Niederschlag auf der Alpen-nordseite der Schweiz für das Jahr 2050 verwendet (vgl. Kapitel 17.1.2). Die von den Klima-

szenarien von FREI (2005) vorgegebenen Änderungsbeträge (vgl. Tabelle 17.1) wurden auf die gemessenen Monatsmittelwerte von Temperatur und Niederschlag der Periode 1980-1999 aufgeprägt. Das bedeutet, dass die gemessenen monatlichen Mittelwerte der beiden meteorologischen Größen entsprechend den Vorgaben der Klimaszenarien erhöht bzw. reduziert wurden. Dadurch repräsentieren diese veränderten Monatsmittelwerte die mittleren klimatischen Verhältnisse für das Jahr 2050 und bilden die neuen Eingabedaten für die Modellkaskade. Als Ausgabegrößen resultieren tägliche Abflusswerte, welche der hydrologischen Systemantwort unter den veränderten Klimabedingungen entsprechen. Diese Abflusswerte bilden die Basis für die weiteren Auswertungen von ausgewählten hydrologischen Kenngrößen (vgl. **Kapitel 20** und **Kapitel 21**). Die Modellkaskade wird somit in der vorliegenden Untersuchung nicht für eine kontinuierliche, lückenlose Modellierung z.B. des Zeitraumes von 2005 bis 2050 eingesetzt, sondern für die Modellierung eines Zeitabschnittes von 20 Jahren, welcher die zu erwartenden mittleren klimatischen Verhältnisse des Jahres 2050 repräsentiert.



# 18 Entwicklung und Anwendung der Modellkaskade

In diesem Kapitel wird auf die Möglichkeiten zur Regionalisierung von globalen und überregionalen Klimaszenarien (Kapitel 18.1) sowie auf die Entwicklung der in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Modellkaskade zur hydrologischen Modellierung mit Klimaszenarien eingegangen (Kapitel 18.2 und Kapitel 18.3). Die Modellkaskade ist eine Kombination eines Wettergenerators und eines hydrologischen Modells und ermöglicht die Modellierung von täglichen Abflusswerten auf Grund von vorgegebenen monatlichen Gebietsmittelwerten von Temperatur und Niederschlag. Welche meteorologischen Stationen für die Entwicklung und Validierung der Modellkaskade eingesetzt wurden, kann Kapitel 18.4 entnommen werden. Zudem wird im Folgenden erläutert, welche Versionen der Modellkaskade erstellt (Kapitel 18.5) und für die Modellierung der Klimaänderung anhand von zwei verschiedenen Ansätzen (Sensitivitätsanalysen, ausgewählte Klimaszenarien) eingesetzt wurden (Kapitel 18.6).

## 18.1 Methoden der Regionalisierung von Klimaszenarien

Der räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Zustand eines Klimasystems lässt sich auf Grund seiner Komplexität nur für kurze Zeiträume (Stunden bis einzelne Tage) und auf grösserer räumlicher Skala genauer vorhersagen (vgl. z.B. HASSELMANN 1990, GOBIET & TRUHETZ 2008). Andererseits sind zuverlässige Angaben zur Veränderung des Klimas für längere Zeiträume (z.B. für Jahrzehnte) nur in saisonaler Auflösung zu prognostizieren. Die räumliche Auflösung erreicht heute bei globalen Klimamodellen typischerweise 100 bis 300 km (GOBIET & TRUHETZ 2008), womit die regionalen und lokalen Auswirkungen der Klimaänderung nur unzureichend beschrieben werden können (z.B. SEMENOV & PORTER 1995).

Für viele Anwendungen der Klimafolgenforschung (z.B. hydrologische Modellierung eines mesoskaligen Einzugsgebietes) werden aber lokale meteorologische Informationen in hoher zeitlicher Auflösung benötigt. Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren Ansätze entwickelt, welche es ermöglichen, die Szenarien der globalen Klimamodelle auf die regionale und lokale Skala zu transformieren. Diese Methoden lassen sich in die folgenden Ansätze der Regionalisierung unterteilen:

- > **Dynamische Regionalisierung:** Bei diesem Ansatz wird ein regionales Klimamodell für eine begrenzte Region (z.B. Europa) unter Einbezug der Informationen eines globalen Klimamodells als Modellkette angetrieben (z.B. CHRISTENSEN & CHRISTENSEN 2007). Die dazu verwendeten regionalen Klimamodelle weisen eine räumliche Auflösung von maximal 10 bis 50 km auf. Vorteil dieses Ansatzes ist, dass die Modelle physikalisch basiert sind und dadurch regional bedeutende Prozesse abbilden können. Wesentliche Nachteile sind der relativ grosse Aufwand, welcher für die Modellentwicklung sowie zur Bereitstellung der Daten eingesetzt werden muss, sowie die Grenzen der physikalischen Prozessbeschreibung. Zudem ist die räumliche Auflösung der Modelle für die hydrologische Klimafolgenforschung in kleinen Einzugsgebieten mit wenigen Quadratkilometern Einzugsgebietsfläche heute noch nicht ausreichend (SCHÄR ET AL. 2003, GOBIET & TRUHETZ 2008).

- > **Empirisch-statistische Regionalisierung:** Die Auswirkungen globaler Klimaszenarien auf lokaler Ebene werden bei diesem Ansatz auf Grund empirischer Zusammenhänge zwischen grossräumigem Klima und lokalen Klimadaten berechnet. Dabei werden die Informationen, welche aus den Modellierungen mit globalen oder regionalen Klimamodellen stammen, empirisch interpretiert und regionalisiert (z.B. GYALISTRAS & FISCHLIN 1999). Die Formulierung der Zusammenhänge zwischen globaler/überregionaler und regionaler/lokaler Ebene erfolgt mit statistischen Methoden wie z.B. neuronalen Netzen, multiplen linearen Regressionen oder kanonischen Korrelationen (vgl. WILBY & WIGLEY 1997, ZORITA & VON STORCH 1997, MURPHY 2000). Die Vorteile dieses Ansatzes liegen darin, dass der Rechenaufwand zum Erstellen der lokalen Klimaszenarien vergleichsweise klein ist und somit auch umfangreiche Sensitivitätsanalysen für zahlreiche Szenarien durchgeführt werden können. Allerdings wird bei dieser Methode vernachlässigt, dass sich die auf Basis von aktuellen Messwerten formulierten Zusammenhänge zwischen den verschiedenen räumlichen Skalen bzw. den verwendeten Klimaparametern unter dem Einfluss der Klimaänderung verändern können (SCHÄR ET AL. 2003).

Beide Methoden werden heute in der Klimaforschung verbreitet eingesetzt (z.B. KLEINN 2002, GYALISTRAS & FISCHLIN 1999, MEZGHANI & HINGRAY 2009). Der Vergleich der Resultate aus beiden Methoden erlaubt es, weitere Informationen über die Verlässlichkeit und Plausibilität von regionalen Klimaszenarien zu erhalten (SCHÄR ET AL. 2003).

In der vorliegenden Untersuchung wurde durch Anwendung eines **stochastischen Wettergenerators** der Ansatz der **empirisch-statistischen Regionalisierung** verwendet. Im Folgenden wird zuerst auf diese Regionalisierung mit einem Wettergenerator sowie auf dessen Funktionsweise eingegangen (Kapitel 18.2). Danach wird die Kopplung des Wettergenerators mit dem hydrologischen Modell zu einer Modellkaskade erläutert (Kapitel 18.3).

## 18.2 Wettergenerator

### 18.2.1 Empirisch-statistische Regionalisierung mit einem Wettergenerator

Wettergeneratoren bieten die Möglichkeit, klimatische Zeitreihen für die Vergangenheit oder die Zukunft zu erstellen oder Lücken in Messreihen zu schliessen (WILKS & WILBY 1999). Die Methode wird heute in der Klimaforschung verbreitet eingesetzt (z.B. WOOLHISHER 1992, KILSBY ET AL. 2007, BURTON ET AL. 2008, FURRER & KATZ 2008, LEANDER & BUIHAND 2009, MEZGHANI & HINGRAY 2009, HOLZMANN ET AL. 2010).

Ein Wettergenerator erzeugt für eine untersuchte Lokalität, unter Einhaltung vorgegebener statistischer Kennwerte, plausible Datenreihen meteorologischer Parameter (z.B. Niederschlag, Temperatur). Bei den **statistischen Kennwerten** kann es sich um Mittelwerte, Extremwerte, Streuungsmasse oder Häufigkeiten bzw. Auftretenswahrscheinlichkeiten handeln, welche in der Regel aus Stationsmessungen abgeleitet werden. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass die vorgegebenen statistischen Kennwerte, welche die Eingabedaten für den Wettergenerator bilden, auf einfache Weise verändert werden können. Somit wird es möglich, für einen bestimmten Standort plausible Wetterdatenreihen zu generieren, welche sowohl vorgegebene Veränderungen (z.B. Klimaszenarien) als auch unveränderte statistische Kennwerte berücksichtigen.

Da es sich bei einem Wettergenerator um ein **stochastisches Modell** handelt, welches zufällige Datenreihen erzeugt, müssen immer mehrere Modellläufe durchgeführt werden. Erst durch eine



grössere Anzahl an zufällig generierten Datenreihen, können vorgegebene statistische Kennwerte in hinreichender Genauigkeit reproduziert werden.

Während in verschiedenen Untersuchungen Wettergeneratoren dazu verwendet wurden, meteorologische Datenreihen für eine einzelne Station zu erzeugen (z.B. GYALISTRAS ET AL. 1997, SEMENOV & STRATONOVITCH 2010), wurden für die vorliegende Untersuchung **konsistente meteorologische Reihen für einen Stationsverbund** benötigt. Diese einzelnen Reihen von Stationsdaten werden schliesslich zu meteorologischen, räumlichen Feldern interpoliert, welche die Eingabedaten für die hydrologische Modellierung bilden (vgl. Kapitel 18.3).

Die vom Wettergenerator erstellten Datenreihen müssen für die vorliegende Untersuchung zudem verschiedene **Anforderungen** erfüllen, welche sich in erster Linie aus der hydrologischen Modellierung ergeben:

- > Es werden meteorologische Datenreihen in **stündlicher oder täglicher Auflösung** benötigt, welche sowohl für mehrere Jahrzehnte als auch für mehrere Stationen im Untersuchungsraum und dessen Umgebung verfügbar sind. Die Datenreihen sollen zudem für Stationen in unterschiedlichen Höhenlagen bereitgestellt werden, damit die höhenabhängigen Gradienten der Klimaparameter erfasst werden können. Es müssen mindestens **Niederschlags- und Temperaturdaten** erstellt werden.
- > Die Datenreihen sollen so erstellt werden, dass diese **effizient für die hydrologische Modellierung eingesetzt** werden können. Die Aufbereitung der meteorologischen Daten soll mit einem geringen Rechenaufwand verbunden sein, so dass mit systematisch veränderten Klimaszenarien auch Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden können.

## 18.2.2 Funktionsweise des Wettergenerators

Der verwendete Wettergenerator, welcher für die vorliegende Untersuchung von GYALISTRAS (2008) entwickelt wurde, stellt eine Kombination zweier stochastischer Modelle dar: Einerseits wird unter Anwendung eines «**Non-homogeneous Hidden Markov Modells**» (NHMM) (z.B. KIRSHNER 2005) das grossräumige Niederschlagsmuster im Einzugsgebiet modelliert. Andererseits werden mit Hilfe des bestehenden Wettergenerators «**WeathGen**» (GYALISTRAS & FISCHLIN 1999) die meteorologischen Datenreihen für jede der berücksichtigten Stationen erzeugt. An dieser Stelle werden Aufbau und Funktionsweise des neu entwickelten Wettergenerators zusammenfassend beschrieben (Details vgl. GYALISTRAS 2008).

Um den Verbund der meteorologischen Stationen zu koordinieren bzw. das grossräumige **Niederschlagsmuster** im Einzugsgebiet zu modellieren, berechnet das NHMM unter Berücksichtigung eines **Eingabevektors** sowie eines **Zustandsvektors** für jeden Tag der modellierten Periode einen **Zielvektor**. Die einzelnen Vektoren enthalten folgende Informationen:

- > Der **Eingabevektor** enthält die Angaben zur mittleren monatlichen Gebietsniederschlagssumme sowie zur mittleren monatlichen Auftretenswahrscheinlichkeit eines Niederschlagstages (= Tag an dem 0.1 mm oder mehr Niederschlag fällt). Beide Grössen wurden aus Messwerten der verwendeten meteorologischen Stationen (Kapitel 18.4) als Gebietsmittel für jeden Monat der zu modellierenden Periode berechnet.
- > Der **Zustandsvektor** kann verschiedene vorgegebene Ausprägungen annehmen, welche das Niederschlagsmuster bzw. -verhalten im Untersuchungsraum (Menge und räumliche Verteilung) für jeden Tag bestimmen. Diese verschiedenen Ausprägungen weisen in mo-

natlicher Differenzierung unterschiedliche Auftretenswahrscheinlichkeit auf und lassen sich am einfachsten mit Wetterlagen vergleichen. Die tägliche Ausprägung des Zustandsvektors wird sowohl durch den Eingabevektor sowie durch den Zustandsvektor des Vortages beeinflusst und bildet gleichzeitig die Basis für den Zielvektor. Der Zustandsvektor des Vortages wird anhand einer Übergangswahrscheinlichkeit berücksichtigt, welche durch den gewählten stochastischen Prozess definiert wird. Zur Schätzung der verschiedenen Parameter, welche das NHMM verwendet (z.B. Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den Zustandsvektoren) wurde eine separate Software verwendet («MVNHMM-Toolbox», Version 01082007, vgl. KIRSHNER 2005).

- > Der **Zielvektor** wird für jeden Tag aus dem Zustandsvektor abgeleitet und gibt für jede Station einen Niederschlagszustand vor. Dieser kann drei verschiedene Werte aufweisen (0, 1, 2), womit die Grössenordnung der Niederschlagsmenge vorgegeben wird, die an der entsprechenden Station pro Tag anfällt:
  - 0 = weniger als 0.1 mm Niederschlag pro Tag
  - 1 = zwischen 0.1 mm und 20 mm Niederschlag pro Tag
  - 2 = mehr als 20 mm Niederschlag pro Tag

Aufgrund der Angaben im Zielvektor wurde schliesslich mit «WeathGen» für jede Station eine entsprechende tägliche Niederschlagssumme sowie eine Tagesmitteltemperatur erzeugt. Die tägliche **Niederschlagssumme** wurde dabei aus einer Verteilungsfunktion gezogen, deren Parameter separat für jede Station und jeden Monat aus vorhandenen Messdaten abgeleitet wurde. Als Verteilungsfunktion der täglichen Niederschlagsdaten wurde durchwegs die Gamma-Verteilung verwendet, welche auch in anderen Untersuchungen eingesetzt wird (z.B. GROISMAN 1999, ZOLINA 2003). Die täglichen **Temperaturmittelwerte** wurden mit Hilfe monatspezifischer autoregressiver Modelle erster Ordnung (vgl. z.B. VON STORCH & ZWIERS 2003) berechnet. Dabei wurde das Niederschlagsgeschehen an den Stationen berücksichtigt, indem die Temperaturen für Niederschlags- und Trockentage separat geschätzt wurden.

Um die stochastische Natur des Wettergenerators zu berücksichtigen, wurden jeweils **50 Datenreihen** pro modellierten Zeitraum und verwendeter meteorologischer Station bereitgestellt. Damit können die vorgegebenen statistischen Kennwerte in hinreichender Genauigkeit wiedergegeben werden.

### 18.3 Hydrologische Modellierung mit PREVAH

Die Auswirkungen der Klimaänderung wurden unter Anwendung des Modellsystems PREVAH hydrologisch modelliert (VIVROLI ET AL. 2007, vgl. Kapitel 6). Alle Modellierungen wurden ausschliesslich für das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich durchgeführt. Als meteorologische **Eingabedaten** dienten die mit dem Wettergenerator modellierten Tagesmittelwerte von Temperatur und Niederschlag (vgl. Kapitel 18.2.2).

Aufgrund der stark reduzierten Anzahl meteorologischer Parameter wurde die **potentielle Evapotranspiration** (in der vorliegenden Untersuchung mit der Verdunstung gleichgesetzt) nach der Methode von HAMON (1961) modelliert, welche in PREVAH als wählbares Modul integriert ist. Dieser Ansatz benötigt als gemessene Eingabegrösse ausschliesslich die Tagesmittelwerte der Temperatur (vgl. Gleichung 18.1) und liefert als Resultat die tägliche Summe der potentiellen Evapotranspiration.

Die Anwendung dieser Methode hat sich in verschiedenen Untersuchungen bewährt und hat im Vergleich mit anderen Ansätzen gute Resultate geliefert (vgl. z.B. FEDERER ET AL. 1996, MCCABE & WOLOCK 2002, LU ET AL. 2005, OUDIN ET AL. 2005A UND 2005B, YU & WANG 2009). Zu beachten ist aber, dass die damit berechnete potentielle Evapotranspiration die effektiv zu erwartenden Verdunstungsbeträge immer überschätzt und deshalb ein oberer, maximaler Bereich der Verdunstung berechnet wird. Aus aufwändigeren Ansätzen, welche in der Regel auf einem deutlich umfangreicheren Set an Eingabedaten beruhen, wären evtl. zuverlässigere Resultate zu erwarten. Insbesondere in Zusammenhang mit Modellierungen der Klimaänderung ist aber zu beachten, dass die Bereitstellung von weiteren meteorologischen Eingabedaten durch die globalen und regionalen Klimamodelle mit grösserer Unsicherheit behaftet ist (vgl. z.B. RIND ET AL. 1990). Dagegen wird der modellierten Lufttemperatur, welche beim verwendeten Ansatz nach HAMON (1961) als einzige Variable in die Berechnungen einfließt, eine hohe Zuverlässigkeit zugesprochen (MITCHELL ET AL. 1990).

$$ETP_{Ham} = \frac{0.1651 \cdot f_i \cdot h_d \cdot 216.7 \cdot e_s}{12 \cdot (T + 273.3)} \quad \text{Gleichung 18.1}$$

- mit:
- $ETP_{Ham}$  = potentielle Evapotranspiration nach Hamon (1961) [mm/d]
  - $f_i$  = empirischer Faktor pro Monat (vgl. Tabelle 18.1)
  - $h_d$  = Tageslänge für den entsprechenden Tag [h]
  - $e_s$  = Sättigungsdampfdruck bei vorherrschender Temperatur  $T$  [hPa]
  - $T$  = Tagesmittelwert der Lufttemperatur [°C]

Tabelle 18.1: Monatliche Variabilität des empirischen Faktors  $f_i$  zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration nach HAMON (1961) (nach VVIROLI ET AL. 2007)

Monat	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
$f_i$	0.5	0.6	0.8	1.1	1.2	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.7	0.5

Die **Kalibrierung des hydrologischen Modells** erfolgte anhand des in Kapitel 6.2 beschriebenen Verfahrens für zwei unterschiedliche Zeiträume (1983-1987 und 1998-2002). Als Eingabegrößen für die Kalibrierung wurden die meteorologischen Daten verwendet, welche an den für diese Untersuchung berücksichtigten Stationen gemessen (vgl. Kapitel 18.4) und mit zwei verschiedenen Methoden (IDW, DTIDW) räumlich interpoliert wurden.

Die verschiedenen Versionen der hydrologischen Modelle, welche sich aus der Kombination der beiden variierten Einflussgrößen («Kalibrierungszeitraum» und «Methode zur Interpolation der meteorologischen Daten») ergeben, werden in Kapitel 18.5.2 ausführlicher besprochen.

## 18.4 Verwendete meteorologische Stationen

Da der Aufwand für die Berechnung der Niederschlags- und Temperaturreihen mit Hilfe des Wettergenerators von der Anzahl der verwendeten Stationen abhängig ist, wurde die Stationsauswahl für die durchgeführten Untersuchungen so weit als möglich eingeschränkt. Insgesamt wurden **acht Stationen** in die Modellierung einbezogen, wobei für vier Stationen Temperatur- und für sieben Stationen Niederschlagsmessungen verfügbar sind (vgl. Tabelle 18.2, Abbildung 18.1).

Tabelle 18.2: Verwendete meteorologische Stationen für die Modellierung mit der Modellkaskade «Wettergenerator-hydrologisches Modell»

Stationsname	Höhe [m ü.M.]	Temperaturdaten verfügbar		Niederschlagsdaten verfügbar	
		von ...	bis ...	von ...	bis ...
Adelboden	1320	1928	2008	1901	2008
Frutigen	815	n.v.	n.v.	1901	2008
Grimmel	1980	1932	2008	1932	2008
Interlaken	580	1901	2008	1901	2008
Jungfrauoch	3580	1933	2008	n.v.	n.v.
Kandersteg	1176	n.v.	n.v.	1901	2008
Kiental	955	n.v.	n.v.	1901	2008
Wimmis	622	n.v.	n.v.	1901	2008

n.v. = nicht verfügbar

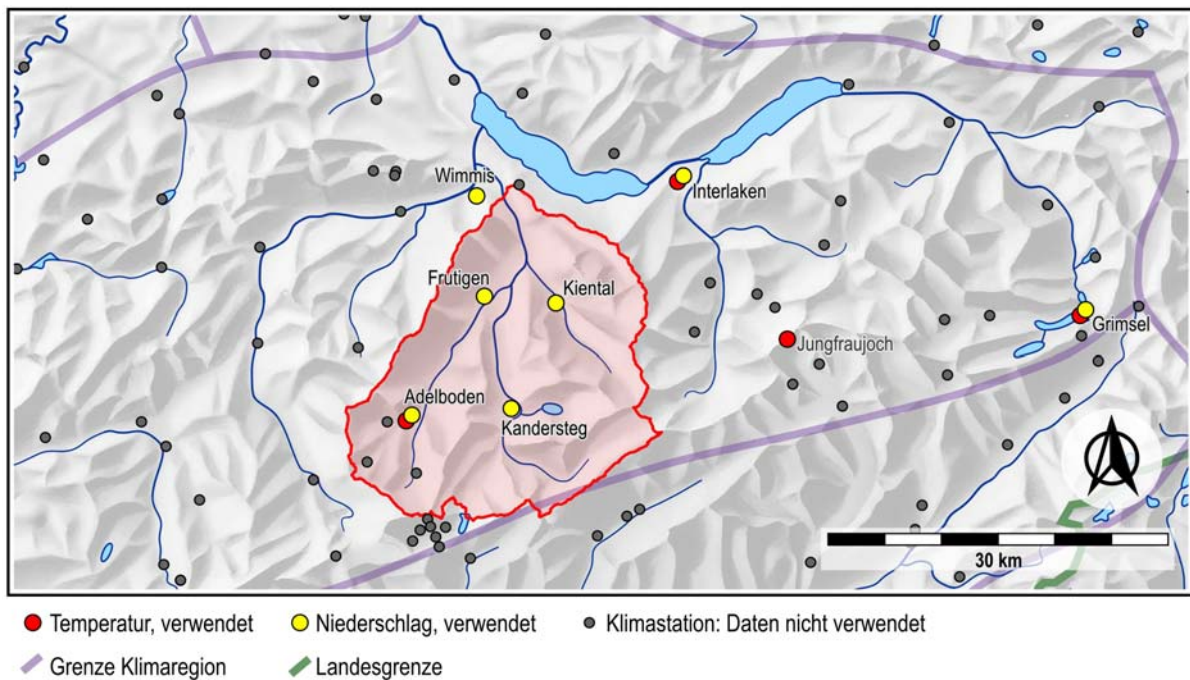


Abbildung 18.1: Verwendete meteorologische Stationen für die Modellierung mit der Modellkaskade «Wettergenerator-hydrologisches Modell» (Übersichtskarte: swisstopo 2007)

Sämtliche durchgeführten hydrologischen Modellierungen basieren also auf den gemessenen oder modellierten meteorologischen Daten für diese acht Stationen. Folgende Kriterien haben zu dieser Stationsauswahl geführt: Die Stationen müssen

- > im Untersuchungsgebiet oder in der näheren Region liegen,
- > über lange Messreihen verfügen, damit die Validierung der Modellkaskade möglich wird,
- > einen möglichst grossen Höhenbereich abdecken, damit die höhenabhängigen Gradienten der meteorologischen Grössen erfasst werden können.

Die Kombination dieser Kriterien führt zu der Stationsauswahl, welche in Tabelle 18.2 und Abbildung 18.1 aufgeführt ist.

## 18.5 Modellkaskade

### 18.5.1 Aufbau der Modellkaskade

Der beschriebene Wettergenerator (vgl. Kapitel 18.2.2) wurde in der vorliegenden Untersuchung mit dem hydrologischen Modellsystem PREVAH (vgl. Kapitel 6) zu einer Modellkaskade zusammengefügt. In Abbildung 18.2 ist der entsprechende Aufbau der gesamten Modellkaskade schematisch dargestellt:

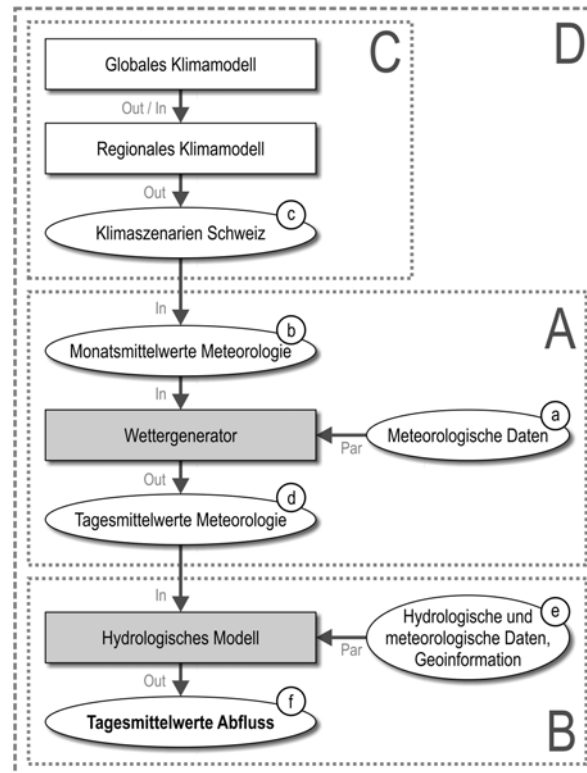


Abbildung 18.2:  
Schematischer Aufbau der gesamten Modellkaskade

A: Wettergenerator  
B: Hydrologisches Modell  
C: Klimamodelle  
D: Gesamte Modellkaskade

Out: Ausgabegrösse  
In: Eingabegrösse  
Par: Modellparameter

Der Aufbau der Modellkaskade gliedert sich in die folgenden wesentlichen Bereiche:

- > Der von GYALISTRAS (2008) entwickelte **Wettergenerator** (Teil A) und das **hydrologische Modell** (Teil B) bilden zusammen die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellte Modellkaskade.
- > Durch die verwendeten Klimaszenarien (z.B. FREI 2005), welche das Resultat der **Modellketten der Klimamodellierung** (Teil C) darstellen, wird die Modellkaskade (A und B) zusätzlich um mehrere Klimamodelle erweitert (D). Auf den Teil C wird im Folgenden nicht weiter eingegangen.

Zudem wird anhand des Schemas in Abbildung 18.2 Folgendes ersichtlich:

- > Die **Modellparameter** für den **Wettergenerator** (z.B. monatliche Parameter der Gamma-Verteilung der täglichen Niederschlagssummen) wurden aus gemessenen meteorologischen Daten (Periode 1981-1990) abgeleitet (vgl. Abbildung 18.2, Punkt a).
- > Die **Eingabedaten** für den **Wettergenerator** bilden monatliche Gebietsmittelwerte (b) (z.B. mittlere monatliche Gebietsniederschlagssumme) für die zu modellierende Periode (z.B. 1980-1999). Diese wurden ebenfalls aus Messungen abgeleitet und für die Modellierung der Klimaänderung anhand der Angaben aus den vorliegenden Klimaszenarien (c) verändert. Die Erstellung der Klimaszenarien wird vertieft in Kapitel 18.6 behandelt.
- > Als **Ausgabegrößen** des **Wettergenerators** resultieren für alle einbezogenen Stationen und jede modellierte Periode 50 verschiedene Datenreihen für die Temperatur bzw. den Niederschlag in täglicher Auflösung (d). Diese bilden ihrerseits die **Eingabedaten** für die **hydrologische Modellierung**.
- > Die **Modellparameter** für das **hydrologische Modell PREVAH** wurden durch Kalibrierung anhand gemessener Abflussdaten bestimmt bzw. aus digital verfügbaren Geoinformationen abgeleitet (e) (vgl. Kapitel 6.2).
- > Als **Ausgabedaten** aus der hydrologischen Modellierung resultieren ebenfalls jeweils 50 Datenreihen für verschiedene Wasserhaushaltskomponenten (z.B. Abfluss) in täglicher Auflösung (f), welche als Datenbasis für die weiteren Auswertungen verwendet werden.

## 18.5.2 Versionen der Modellkaskade

Die Modellkaskade (vgl. Abbildung 18.2) kann unter Veränderung verschiedener Einflussgrößen variiert werden. Wie z.B. Untersuchungen von VIVIROLI (2007) gezeigt haben, können einzelne Einflussgrößen die Qualität der modellierten Resultate wesentlich beeinflussen (z.B. Kalibrierungszeitraum des hydrologischen Modells). Zur Bereitstellung und Evaluation der besten Modellkaskade, wurden deshalb **drei Einflussgrößen** des Wettergenerators bzw. des hydrologischen Modells variiert (vgl. Abbildung 18.3):

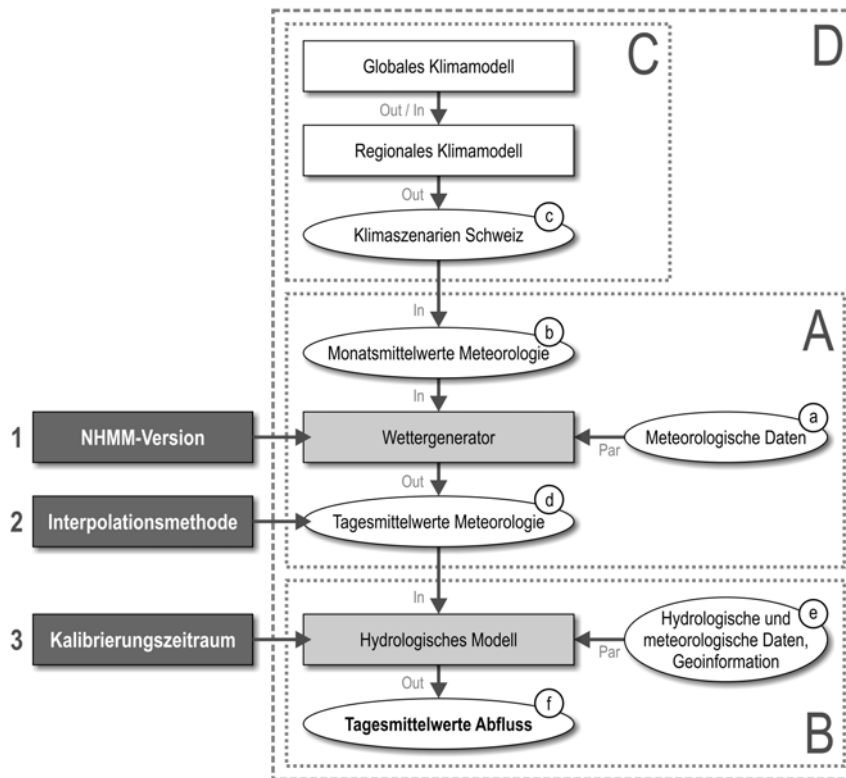


Abbildung 18.3: Veränderte Einflussgrößen der Modellkaskade zur Herleitung der besten Modellversion

A: Wettergenerator  
 B: Hydrologisches Modell  
 C: Klimamodelle  
 D: Gesamte Modellkaskade

Out: Ausgabegröße;  
 In: Eingabegröße;  
 Par: Modellparameter

Erläuterungen zum Aufbau der Modellkaskade: siehe Kapitel 18.5.1.

- 1) **NHMM-Variante:** Für den **Wettergenerator** wurden zwei verschiedene Varianten des «Non-homogeneous Hidden Markov Modell» (NHMM) entwickelt, welche sich in der Anzahl möglicher Ausprägungen des Zustandsvektors sowie im verwendeten stochastischen Prozess unterscheiden (vgl. Kapitel 18.2.2.):
  - > **«cb3c2»:** Stochastischer Prozess Bernoulli-Kette (chain-bernoulli, **cb**), **drei** mögliche Werte für den Zielvektor und **zwei** mögliche Ausprägungen für den Zustandsvektor.
  - > **«be3c3»:** Stochastischer Prozess Bernoulli (bernoulli, **be**), **drei** mögliche Werte für den Zielvektor und **drei** mögliche Ausprägungen für den Zustandsvektor.
- 2) **Interpolationsmethode:** Die räumliche Interpolation der meteorologischen Stationswerte in täglicher Auflösung als Eingabedaten für die hydrologische Modellierung wurde für den Niederschlag mit zwei verschiedenen Methoden durchgeführt (vgl. auch Kapitel 6.1.3):
  - > **«IDW»:** Die täglichen Niederschlagssummen werden mit der Methode IDW (Inverse Distance Weighted) und die Tagesmittelwerte der Temperatur mit DTIDW (Detrended Inverse Distance Weighted) interpoliert.
  - > **«DTIDW»:** Sowohl die täglichen Niederschlagssummen als auch die Tagesmittelwerte der Temperatur werden mit DTIDW (Detrended Inverse Distance Weighted) interpoliert.
- 3) **Kalibrierungszeitraum:** Schliesslich wurde das hydrologische Modell für zwei verschiedene Zeiträume kalibriert:
  - > **«8387»:** Kalibrierungszeitraum 1983-1987
  - > **«9802»:** Kalibrierungszeitraum 1998-2002

Für jede Modellversion wird anhand der Bezeichnung ersichtlich, aus welchen Variationen der Einflussgrößen sie sich zusammensetzt. So wird z.B. bei der Modellversion mit der Bezeichnung «**be3c3\_IDW\_9802**» die Wettergenerator-Variante «**be3c3**» verwendet, die meteorologischen Eingabedaten für das hydrologische Modell wurden mit der Methode «**IDW**» interpoliert und das hydrologische Modell wurde für den Zeitraum 1998-2002 («**9802**») kalibriert.

Durch Kombination der verschiedenen Einflussgrößen entstanden insgesamt **acht verschiedene Modellkaskaden**. Diese wurden anhand des Vergleichs von modellierten und beobachteten Abflusswerten und unter Anwendung von ausgewählten Gütemassen validiert. Dadurch wurde die Beurteilung der jeweiligen Modellqualität und die Auswahl der besten Modellkaskaden ermöglicht (vgl. Kapitel 19).

## 18.6 Verwendete Ansätze zur Modellierung der Klimaänderung

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten, die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Hydrologie des untersuchten Einzugsgebietes abzuschätzen: **Sensitivitätsanalysen** (Kapitel 18.6.1) und **Modellierung mit ausgewählten Klimaszenarien** (Kapitel 18.6.2). Beide Ansätze basieren auf einem räumlichen und zeitlichen Downscaling der Klimaszenarien und zeigen die hydrologische Systemantwort des Einzugsgebietes auf die jeweiligen Szenarien. Die Anwendung der beiden Ansätze zur Modellierung der Klimaänderung wird im Folgenden erläutert. Ebenso wird aufgezeigt, wie der im Zusammenhang mit der Klimaänderung zu erwartende Gletscherrückgang durch Einbezug zweier Vergletscherungsszenarien bei der Modellierung der Klimaänderung berücksichtigt wurde (Kapitel 18.6.3).

### 18.6.1 Prinzip der Sensitivitätsanalysen

Die Auswirkungen der Klimaänderung auf ausgewählte hydrologische Kennwerte wurden bei diesem Ansatz anhand von Sensitivitätsanalysen untersucht (Resultate vgl. Kapitel 20). Bei dieser Methode werden die Klimaszenarien erstellt, indem die Beträge der Temperatur- und Niederschlagsänderung über einen gewählten Bereich **systematisch variiert** und **kombiniert** werden.

Die in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Wertebereiche der Temperatur- und Niederschlagsänderung werden aus Abbildung 18.4 ersichtlich. In Abbildung 18.4 sind zudem auch diejenigen Bereiche eingezeichnet, welche von den probabilistischen Klimaszenarien von FREI (2005) für das Jahr 2050 vorgegeben werden. Die hellgraue Fläche entspricht dem Bereich der saisonalen Veränderungen, die dunkelgraue Fläche demjenigen der jährlichen Veränderungen (vgl. Tabelle 17.1). Aus Abbildung 18.4 wird ersichtlich, dass die Klimaszenarien der Sensitivitätsanalysen bzw. der Bereich der systematischen Veränderungen von Temperatur und Niederschlag über den Bereich herausgeht, welcher von den probabilistischen Klimaprojektionen für das Jahr 2050 vorgegeben wird (vgl. Kapitel 17.1.2).

Die verwendeten Wertebereiche der Temperaturänderung (-2 °C bis +6 °C) und der Niederschlagsänderung (-40% bis +40%) wurden in vier gleichmässige Segmente unterteilt. Die jeweils fünf verwendeten Änderungsbeträge der Temperatur und des Niederschlags wurden zu insgesamt **25 Klimaszenarien** kombiniert, deren klimatische Bedingungen den Werten an den **Gitterpunkten** in Abbildung 18.4 entsprechen.



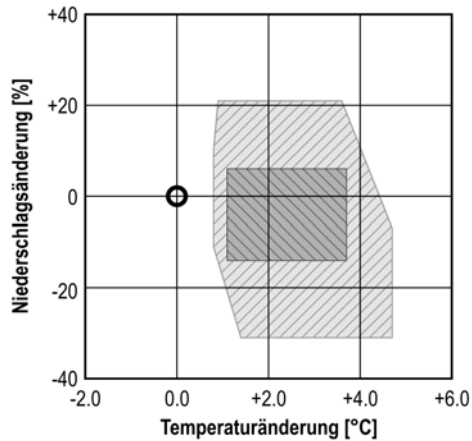


Abbildung 18.4: Bereiche der Temperatur- und Niederschlagsänderung, für welche Sensitivitätsanalysen durchgeführt wurden.

Die hellgraue Fläche deckt den Bereich der saisonalen Änderungen aus den probabilistischen Klimaszenarien von FREI (2005) für das Jahr 2050 ab. Analog dazu deckt die dunkelgraue Fläche den Bereich der möglichen jährlichen Änderungen ab (vgl. Tabelle 17.1). Der schwarze Kreis markiert den Referenzzustand der Periode 1980-1999, für welchen keine Niederschlags- und Temperaturänderung vorgenommen wurde.

Die verwendeten Änderungsbeträge von Niederschlag und Temperatur sind bei diesem Ansatz jeweils für das ganze Jahr gültig und geben die Änderung gegenüber der Periode 1980-1999 an. Das bedeutet, dass die entsprechenden Änderungsbeträge jeweils auf alle gemessenen monatlichen Gebietsmittelwerte von Niederschlag und Temperatur der Periode 1980-1999 angewendet wurden. Die **veränderten monatlichen Mittelwerte** von Niederschlag und Temperatur bilden die Eingabedaten für die Modellkaskade bzw. für den Wettergenerator, mit welchem die meteorologischen Eingabedaten in täglicher Auflösung für das hydrologische Modell aufbereitet wurden (vgl. Kapitel 18.2.2). Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 18.2.2 wurden für jedes Klimaszenario bzw. für jeden Gitterpunkt 50 Simulationen mit der Modellkaskade für jeweils 20 Jahre (1980-1999) durchgeführt. Dadurch sind für jeden Gitterpunkt modellierte Abflussdaten für 1000 Jahre und für jede Teilgrafik 25'000 Jahre an modellierten Abflussdaten verfügbar.

Das Klimaszenario in Abbildung 18.4 welches mit einem **schwarzen Kreis** markiert ist, entspricht dem modellierten **Referenzzustand** der Periode 1980-1999, für welche keine Niederschlags- und Temperaturänderungen vorgenommen wurden. Dieses Szenario gibt deshalb die unveränderten modellierten Verhältnisse der Periode 1980-1999 wieder.

Die Sensitivitätsanalysen ermöglichen die Beurteilung des Reaktionsmusters von verschiedenen hydrologischen Kenngrößen gegenüber der systematischen Variation von Temperatur und Niederschlag. Da die gewählten Temperatur- und Niederschlagsänderungen über den Bereich der probabilistischen Klimaprojektionen von FREI (2005) hinausgehen, werden anhand der durchgeführten Modellierungen auch die hydrologischen Auswirkungen von extremen Änderungen des Klimas ersichtlich. Deshalb kann aus diesen Untersuchungen auch abgeleitet werden, ob für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich klimatische Schwellenwerte existieren, ab welchen sich ein deutlich anderes Systemverhalten feststellen lässt.

## 18.6.2 Prinzip der Modellierung mit ausgewählten Klimaszenarien

Beim zweiten Ansatz wurde die Modellierung der Klimaänderung anhand von **ausgewählten Klimaszenarien** durchgeführt (Resultate vgl. Kapitel 21). Wie Abbildung 18.4 zeigt, werden bei den Sensitivitätsanalysen auch **wenig wahrscheinliche** Klimaszenarien für das Jahr 2050 modelliert (z.B. Niederschlagszunahme um +40% und Temperaturabnahme um -2 °C). Zudem weisen die Klimaszenarien der Sensitivitätsanalysen **keine innerjährliche, saisonale Differenzierung** auf. Aus diesen beiden Gründen wurden die für die Sensitivitätsanalysen bereitgestellten meteorologischen Daten neu kombiniert, indem für jede Jahreszeit andere Änderungsbeträge gewählt wurden.

Dabei wurden die Angaben aus den probabilistischen Klimaszenarien von FREI (2005) für das Jahr 2050 berücksichtigt.

In Abbildung 18.5 ist anhand eines Beispiels dargestellt, welche saisonalen Änderungsbeträge ein neu kombiniertes, realistisches Klimaszenario aufweist. Aus diesem Beispiel wird ersichtlich, dass für jede Jahreszeit separate Änderungsbeträge für den Niederschlag und die Temperatur verwendet wurden (schwarze Punkte). Insgesamt wurden mit diesem Ansatz **18 verschiedene Klimaszenarien** erstellt, welche anschliessend hydrologisch modelliert und ausgewertet wurden (vgl. Kapitel 21). Auch bei diesem Ansatz umfasst jedes Klimaszenario 50 Simulationen mit 20 Jahren Umfang, womit jeweils 1000 Jahre modellierte Abflussdaten für die weiteren Auswertungen verfügbar sind.

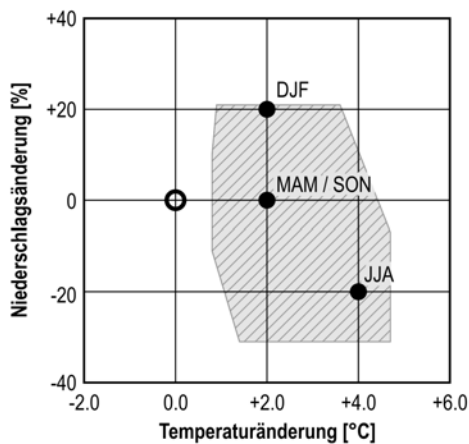


Abbildung 18.5: Beispiel für eine Kombination von ausgewählten, saisonal differenzierten Klimaszenarien unter Berücksichtigung der Angaben aus den probabilistischen Klimaszenarien von FREI (2005) für das Jahr 2050.

Die hellgraue Fläche deckt den Bereich der saisonalen Änderungen aus den probabilistischen Klimaszenarien von FREI (2005) für das Jahr 2050 ab.

(DJF: Dezember bis Februar, MAM: März bis Mai, JJA: Juni bis August, SON: September bis Oktober)

### 18.6.3 Berücksichtigung des Gletscherrückgangs

Sowohl aus verschiedenen Untersuchungen (z.B. ZEMP ET AL. 2006, ZEMP ET AL. 2007) als auch aus langjährigen Messungen (vgl. Kapitel 2.5.2) geht hervor, dass für das Jahr 2050 im Einzugsgebiet der Kander von einem deutlich **geringeren Gletscheranteil** ausgegangen werden muss. So ist z.B. OCCC, PROCLIM (2007) zu entnehmen, dass im Schweizer Alpenraum das Gletschervolumen im Jahr 2050 um bis zu 75% reduziert sein wird.

Zur Berücksichtigung dieser Entwicklung wurden zwei Varianten der Landnutzung erstellt, welche sowohl bei den Sensitivitätsanalysen als auch bei der Modellierung mit ausgewählten Klimaszenarien verwendet wurden:

- > **Mit Gletscher «mGL»:** Diese Variante der Landnutzung enthält die aktuelle Vergletscherung des Einzugsgebietes. Sie wurde im Preprocessing der Modellierung aus den vorliegenden Geodaten abgeleitet (vgl. Kapitel 6.1.2).
- > **Ohne Gletscher «oGL»:** Für diese Variante wurden bei den Eingabedaten der Landnutzung alle vergletscherten Flächen im Einzugsgebiet durch Felsflächen ersetzt und die bodenhydrologischen Eigenschaften entsprechend angepasst.

## 18.7 Fazit

Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung entwickelte **Modellkaskade** für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich besteht aus der Kombination eines Wettergenerators und des hydrologischen Modellsystems PREVAH. Unter Anwendung dieser Modellkaskade wird es möglich, aus monatlichen Gebietsmittelwerten von Temperatur und Niederschlag Abflusswerte in täglicher Auflösung zu generieren. Der entwickelte Wettergenerator ermöglicht die Modellierung von Niederschlags- und Temperaturdaten für einen Verbund von mehreren Stationen und stellt somit eine Weiterentwicklung bestehender Ansätze zur Modellierung von Datenreihen an einem einzigen Standort dar (vgl. z.B. GYALISTRAS ET AL. 1997). Diese Methode zur Regionalisierung der Klimaszenarien entspricht dem empirisch-statistischen Ansatz und ermöglicht ein räumliches und zeitliches Downscaling von regionalen und saisonalen Angaben zur Klimaänderung.

Durch **Variation von drei Einflussgrößen** (Variante des Wettergenerators, Interpolationsmethode der meteorologischen Eingabedaten für das hydrologische Modell und Kalibrierungszeitraum des hydrologischen Modells) wurden insgesamt **acht Versionen der Modellkaskade** erstellt.

Um die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Hydrologie der Kander zu analysieren wurde die Modellkaskade für zwei Ansätze eingesetzt (Sensitivitätsanalyse und Modellierung mit ausgewählten Klimaszenarien). Der bis ins Jahr 2050 zu erwartende Gletscherrückgang im Einzugsgebiet wurde anhand von **zwei Vergletscherungsszenarien** berücksichtigt (mit Gletscher und ohne Gletscher).



# 19 Validierung der Modellkaskade

In diesem Kapitel wird auf die Validierung der acht verschiedenen Versionen der Modellkaskade «Wettergenerator-hydrologisches Modell» eingegangen (vgl. Kapitel 18.5.2). Für die Beurteilung der Modellqualität wurden drei verschiedene Ansätze verwendet:

- > Modellvalidierung mit Gütemassen (Kapitel 19.2)
- > Modellvalidierung mit Q-Q-Plots (Kapitel 19.3)
- > Modellvalidierung mit direktem, optischen Vergleich (Kapitel 19.4)

Während beim ersten Ansatz die Validierung für alle acht Modellkaskaden durchgeführt wurde, beschränkt sich die Validierung bei den beiden anderen Ansätzen auf eine Auswahl von vier Modellkaskaden. Die Modellvalidierung wurde bei allen Ansätzen für die Periode 1934 bis 2005 durchgeführt. Bei der Validierung mit Gütemassen wurde zusätzlich der Zeitraum 1981 bis 1999 untersucht, für welchen die Modellkaskaden entwickelt wurden.

Ziel der durchgeführten Modellvalidierungen ist es, Aussagen zur Qualität der Modellkaskaden zu gewinnen. Zudem sollen mit Hilfe dieser Informationen, aus den acht verschiedenen Modellkaskaden diejenigen bestimmt werden, welche für die Modellierungen der Klimaänderung verwendet werden sollen.

## 19.1 Grundlagen der Modellvalidierung

### 19.1.1 Validierte Daten

Die durchgeführten Validierungen basieren durchwegs auf dem Vergleich von modellierten und beobachteten Abflusswerten und beschränken sich deshalb auf den Zeitraum, für welchen Messwerte vorliegen. Die hydrologischen Modelle bzw. die Modellkaskaden werden bei der Validierung also danach beurteilt, wie gut diese die beobachteten hydrologischen Verhältnisse nachbilden können.

Folgende Daten wurden bei der Validierung jeweils verwendet bzw. miteinander verglichen:

- > **Beobachteter Abfluss (QOBS):** Basis für alle durchgeführten Validierungen bilden die beobachteten Abflussdaten des untersuchten Einzugsgebietes Kander-Hondrich. Diese liegen in täglicher Auflösung seit 1902 vor.
- > **Modellierter Abfluss mit beobachteten meteorologischen Daten (QSimOBS):** Diese modellierten Abflussdaten resultieren aus der hydrologischen Modellierung, welche mit beobachteten meteorologischen Tageswerten von Temperatur und Niederschlag durchgeführt wurden (vgl. Kapitel 18.3). Anhand des Vergleichs dieser modellierten Abflussdaten mit den beobachteten Abflussdaten kann die **Modellierungsqualität des hydrologischen Modells** (Teil B in Abbildung 18.2) beurteilt werden. Wie aus Kapitel 18.5.2 hervorgeht, bestehen insgesamt **vier verschiedene Varianten für das hydrologische Modell**, welche sich anhand der Interpolationsmethode für die meteorologischen Daten

(IDW, DTIDW) und des Kalibrierungszeitraumes (1983-1987, 1998-2002) unterscheiden. Durch die Validierung kann entschieden werden, welches der vier hydrologischen Modelle am besten für die Modellierung geeignet ist und welche Qualitätsunterschiede gegenüber dem modellierten Abfluss resultierend aus der gesamten Modellkaskade (Wettergenerator-hydrologisches Modell) auftreten.

- > **Modellierter Abfluss mit modellierten meteorologischen Daten (QSimSIM):** Dieser modellierte Abfluss stellt das Ergebnis der Modellkaskade (Wettergenerator-hydrologisches Modell) dar. Die Eingabegrößen für die entsprechende Modellierung bilden beobachtete monatliche Gebietsmittelwerte von Niederschlag und Temperatur (vgl. Kapitel 18.5.1). Unter Anwendung des Wettergenerators werden zuerst Tageswerte von Niederschlag und Temperatur für alle verwendeten Stationen modelliert. Diese Daten werden räumlich interpoliert (vgl. Kapitel 6.2) und bilden die Grundlage für die anschließende hydrologische Modellierung. Der Vergleich der so modellierten Abflussdaten (QSimSIM) mit den beobachteten Abflussdaten (QOBS) ermöglicht die Beurteilung der **Modellierungsqualität der gesamten Modellkaskade** (Teile A und B in Abbildung 18.2). Insgesamt bestehen **acht verschiedene Versionen der Modellkaskade**, welche sich in der Variante des Wettergenerators (be3c3, cb3c2), der Interpolationsmethode der meteorologischen Eingabedaten für das hydrologische Modell (IDW, DTIDW) und des Kalibrierungszeitraumes des hydrologischen Modells (1983-1987, 1998-2002) unterscheiden (vgl. Kapitel 18.5.2). Da aus der Modellierung mit der gesamten Modellkaskade jeweils 50 modellierte Abflussganglinien entstehen (vgl. Kapitel 18.5.1), wurde für die Validierung immer die Medienganglinie aus allen 50 Simulationen verwendet.

Der Vergleich von QSimOBS und QSimSIM ermöglicht es zudem die Veränderung der Modellierungsqualität zu beurteilen, welche unter Verwendung des Wettergenerators zusätzlich auftritt. Daneben ist zu beachten, dass ein direkter Vergleich zwischen beobachtetem Abfluss (QOBS) und Abflussdaten, welche mit Wettergeneratordaten modelliert wurden (QSimSIM), **für Tagesmittelwerte nicht sinnvoll** durchgeführt werden kann. Dies weil der Wettergenerator die meteorologischen Tageswerte als Zufallsreihe erzeugt und somit die zeitliche Übereinstimmung zwischen modellierten und beobachteten meteorologischen Daten für Tageswerte nicht mehr vorhanden ist. Deshalb werden auch die modellierten und beobachteten Tagesmittelwerte des Abflusses keine zeitliche Übereinstimmung aufweisen. Bei der Modellvalidierung anhand von Q-Q-Plots (vgl. Kapitel 19.3), welche ausschliesslich auf dem Vergleich der beiden Verteilungen von beobachteten und modellierten täglichen Abflusswerten beruht, konnte die Validierung von Abflussdaten in täglicher Auflösung trotzdem durchgeführt werden. Bei diesem Vergleich wird der zeitliche Zusammenhang zwischen den beiden Datengrundlagen nicht berücksichtigt.

Grundsätzlich würde es sich auch anbieten, den Wettergenerator anhand der modellierten und beobachteten meteorologischen Daten zu validieren. Auf diesen Vergleich wird jedoch verzichtet, weil für die vorliegende Untersuchung die Modellierungsqualität des Abflusses im Vordergrund steht.

Bei der **Interpretation der Validierungsergebnisse** ist zu beachten, dass **systematische Abweichungen** (z.B. konstante Differenz) zwischen modelliertem und beobachtetem Abfluss für die Modellierung der Klimaszenarien grundsätzlich nicht problematisch sind. Wichtig ist in erster Linie, dass die gemessenen und modellierten Abflussdaten gute Übereinstimmung beim zeitlichen Verlauf zeigen. Dies deshalb, weil die Auswirkungen der Klimaänderung auch als prozentuale Abweichun-

gen zwischen modelliertem Klimaszenario und modelliertem Referenzzustand (ohne Temperatur- und Niederschlagsänderung gegenüber der Periode 1980-1999) angegeben werden können.

### 19.1.2 Validierungszeitraum

Die Validierung wurde jeweils für zwei **Zeiträume** durchgeführt:

- > **1981-1999:** Die Validierung dieser Periode gibt an, wie gut die aktuellen hydrologischen Verhältnisse mit den verschiedenen Modellversion reproduziert werden können. Die Validierung dieser Periode ist deshalb von speziellem Interesse, weil dieser Zeitraum für die Modellierung der Klimaszenarien verwendet wird. Gleichzeitig wurden die Parameter für den Wettergenerator und für das hydrologische Modell speziell auf die hydrometeorologischen Verhältnisse dieser Jahrzehnte geeicht, weshalb gute Modellierungsqualität für diesen Zeitraum erwartet werden kann. Da für die hydrologische Modellierung ein Initialisierungsjahr zum Füllen der verschiedenen Speicher benötigt wird, wurde das erste Jahr der Modellierung (1980) nicht für die Validierung verwendet.
- > **1934-2005:** Aus der Validierung für diese Periode geht hervor, wie gut die Modellierung mit der Modellkaskade bzw. mit dem hydrologischen Modells für längere und weiter zurück reichende Zeiträume gelingt. Damit wird untersucht, ob die Modellierung von Abflussdaten auch für Zeiträume ausserhalb der Entwicklungsperiode (1980-1999) in ausreichender Qualität gelingt. Aus den Resultaten kann abgeleitet werden, ob die Modellkaskaden für die Modellierung der Klimaszenarien, welche ebenfalls veränderte hydrometeorologische Verhältnisse ausserhalb der Entwicklungsperiode darstellen, grundsätzlich geeignet sind. Die gewählte Validierungsperiode ergibt sich aus der maximalen zeitlichen Überlappung der meteorologischen Messreihen der verwendeten Stationen (vgl. Kapitel 18.4). Auch bei dieser Periode wurde das erste Jahr der Modellierung (1933) nicht für die Validierung berücksichtigt.

## 19.2 Modellvalidierung mit Gütemassen

### 19.2.1 Verwendete Gütemasse

Bei diesem Ansatz zur Validierung aller acht Versionen der Modellkaskade sowie der vier Varianten des hydrologischen Modells (vgl. Kapitel 18.5.2) wurden verschiedene Gütemasse verwendet. Die Beurteilung der Modellqualität erfolgte bei diesem Ansatz anhand von zwei **Abflusskennwerten** (mittlerer monatlicher Abfluss und monatlicher Hochwasserabfluss) und wurde für zwei **Zeiträume** durchgeführt (1981-1999 und 1934-2005) (vgl. Kapitel 19.1.2).

Bei den für die Validierung der Modellkaskade verwendeten Gütemassen lassen sich zwei Kategorien unterscheiden (vgl. z.B. WILLMOT 1982): **Korrelationsbasierte Gütemasse** beurteilen die Ähnlichkeit des zeitlichen Verlaufs zwischen der modellierten und der beobachteten Ganglinie. **Abweichungsbasierte Gütemasse** beurteilen die Abweichungen zwischen der modellierten und der beobachteten Ganglinie.

Beide Gütemasse haben Vor- und Nachteile (vgl. z.B. LEGATES & MCCABE 1999, KRAUSE ET AL. 2005, JAIN & SUDHEER 2008):

- > Bei den meisten **korrelationsbasierten Gütemassen** fallen die Abweichungen bei den grossen Werten stärker ins Gewicht als diejenigen bei den kleinen Werten. Das bedeutet, dass mit Modellen, welche vor allem bei den grossen Werten gute Übereinstimmungen zeigen und in den übrigen Wertebereichen weniger gut korrelieren, trotzdem hohe Gütemasse erzielt werden. Daneben ist zu beachten, dass bei diesen Gütemassen systematische Differenzen zwischen Beobachtung und Modellierung nicht berücksichtigt werden. Dadurch kann auch hohe Korrelation bei grosser Abweichung zwischen Modellierung und Beobachtung erzielt werden.
- > Unter dem Einsatz von **abweichungsbasierten Gütemassen** können diese systematischen Differenzen bzw. die absolute Abweichungen erfasst und beurteilt werden. Diese Gütemasse ermöglichen jedoch keine Aussage zur Übereinstimmung des zeitlichen Verlaufs der beiden Ganglinien.

Aus den Untersuchungen von LEGATES & MCCABE (1999) geht deshalb die Empfehlung hervor, dass bei der Beurteilung der Modellqualität immer mindestens je ein Gütemass zu verwenden ist, welches die Übereinstimmung der Ganglinie bzw. die absolute Abweichung aufzeigt.

Im Folgenden werden die Gütemasse beschrieben, welche in der vorliegenden Untersuchung beigezogen wurden, um die Modellierungsqualität der Modellkaskade zu beurteilen. Es handelt sich dabei sowohl um korrelations- (z.B. NSE,  $R^2$ ) als auch um abweichungsbasierte Gütemasse (z.B. MSE, MWAE).

### a) Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE) – Gütemass nach Nash-Sutcliffe

Das in der hydrologischen Modellierung oft verwendete Gütemass nach NASH & SUTCLIFFE (1970) (vgl. auch Kapitel 6.2.2) gewichtet die Fehler im Hochwasserbereich sehr stark (vgl. Gleichung 19.1). Dies, weil die Abweichung zwischen Modellierung und Beobachtung quadriert in die Berechnung einfließt, womit das Gütemass sehr sensitiv auf die Modellierungsqualität im Hochwasserbereich ist (vgl. LEGATES & MCCABE 1999). Der Wertebereich reicht von **1.0 bis**  $-\infty$  (minus unendlich); wobei der Wert **1.0 bei exakter Übereinstimmung** von Modellierung und Beobachtung erzielt wird. Ein Wert von 0.0 zeigt an, dass die modellierte Ganglinie eine ebenso gute Modellierungsqualität aufweist, wie der konstante Mittelwert aus den beobachteten Daten. Werte die kleiner als Null sind weisen darauf hin, dass das verwendete Modell weniger gut geeignet ist, um die beobachteten Daten zu reproduzieren als der konstante Mittelwert aus den beobachteten Daten (WILCOX ET AL. 1990).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad NSE \in [-\infty \dots 1] \quad \text{Gleichung 19.1}$$

mit:  $O$  = beobachteter Wert  
 $P$  = modellierter Wert  
 $N$  = Anzahl Wertepaare

Zwar berücksichtigt NSE systematische Abweichungen, ist aber gegenüber Differenzen in grossen Wertebereichen noch stärker sensitiv als der Pearson-Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient (vgl.



Kapitel 19.2.1 g). Zudem hängt dieses Gütemass stark von der Varianz des beurteilten Abflusses ab (ECKHARDT 2002), weshalb es nicht für den Vergleich von Resultaten aus verschiedenen Teileinzugsgebieten geeignet ist.

### b) Volumetric Efficiency (VE) – Volumetrisches Gütemass

Das Gütemass «Volumetric Efficiency» (CRISS & WINSTON 2008) gibt an, welcher relative Volumenfehler zwischen beobachtetem und modelliertem Wert vorliegt. Hierzu werden die Beträge aller paarweisen Differenzen zwischen modellierten und beobachteten Werten addiert und durch die Summe aller Beobachtungen geteilt (vgl. Gleichung 19.2). Dieser Quotient wird schliesslich von Eins subtrahiert. Das Gütemass kann Werte im Bereich zwischen **0.0 und 1.0** annehmen, wobei **ein Wert von 1.0 perfekte Übereinstimmung** zwischen Modellierung und Beobachtung bedeutet. Die Abweichungen werden nach ihrem absoluten Betrag berücksichtigt und fliessen sowohl für den Hoch- wie für den Niedrigwasserbereich gleich gewichtet in die Beurteilung ein.

$$VE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad VE \in [0...1] \quad \text{Gleichung 19.2}$$

mit:  $O$  = beobachteter Wert  
 $P$  = modellierter Wert  
 $N$  = Anzahl Wertepaare

### c) Index of Agreement (IOA) – Übereinstimmungsindex

Der «Index of Agreement» nach WILLMOT (1982) berücksichtigt – wie das NSE auch – die linearen und proportionalen Differenzen zwischen Beobachtung und Modellierung (vgl. Gleichung 19.3). Der IOA liegt im Bereich zwischen **0.0 und 1.0; je grösser der Wert, desto besser** ist die Übereinstimmung zwischen Modell und Beobachtung. Bei diesem Gütemass ist wiederum zu beachten, dass grössere Abweichungen – durch die Quadrierung der Differenz – überproportionalen Einfluss auf das berechnete Gütemass haben.

$$IOA = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad IOA \in [0...1] \quad \text{Gleichung 19.3}$$

mit:  $O$  = beobachteter Wert  
 $P$  = modellierter Wert  
 $N$  = Anzahl Wertepaare

### d) Weighted Index of Agreement (IOAw) – Gewichteter Übereinstimmungsindex

Um den verstärkten Einfluss der grösseren Abweichungen auf die Berechnung des Gütemasses beim «Index of Agreement» zu minimieren, haben LEGATES & MCCABE (1999) den IOA wie folgt modifiziert: Anstelle der fest vorgegebenen quadratischen Potenz wurde ein frei wählbarer Exponent  $w$

eingeführt (Gleichung 19.4). Dieser bezieht sich auf den absoluten Betrag der paarweisen Differenzen zwischen Beobachtung und Simulation. In der vorliegenden Arbeit wurde zur Beurteilung der Modellgüte ausschliesslich der IOA1 ( $w = 1$ ) verwendet, welcher auch von LEGATES & MCCABE (1999) empfohlen wird.

$$IOAw = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - P_i|^w}{\sum_{i=1}^N \left( |P_i - \overline{O'}| + |O_i - \overline{O'}| \right)^w} \quad IOAw \in [0...1] \quad \text{Gleichung 19.4}$$

mit:

$O$	=	beobachteter Wert
$P$	=	modellierter Wert
$N$	=	Anzahl Wertepaare
$w$	=	frei wählbarer Exponent
$O'$	=	Funktion, aus beobachteten Daten abgeleitet

### e) Mean Square Error (MSE) – Mittlerer quadratischer Fehler

Der «Mean Square Error» (LEGATES & MCCABE 1999) gibt die mittlere quadratische Abweichung zwischen Beobachtung und Modellierung an (Gleichung 19.5). Es ist zu berücksichtigen, dass grosse Abweichungen stärker ins Gewicht fallen als kleine. Die Werte können in einem Bereich zwischen **0** und  $+\infty$  liegen, wobei **0 perfekte Übereinstimmung** zwischen Modellierung und Beobachtung bedeutet.

$$MSE = N^{-1} \cdot \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2 \quad MSE \in [0...+\infty] \quad \text{Gleichung 19.5}$$

mit:

$O$	=	beobachteter Wert
$P$	=	modellierter Wert
$N$	=	Anzahl Wertepaare

### f) Mean Weighted Absolute Errors (MWAE) – Mittlere gewichtete Abweichungen

Zur Beurteilung der Modellqualität im Hochwasserbereich hat LAMB (1999) das Gütemass «Mean Weighted Absolute Errors» (MWAE) entwickelt (Gleichung 19.6).

$$MWAE = N^{-1} \cdot \sum_{i=1}^N O_i^k \cdot |O_i - P_i| \quad MWAE \in [0...+\infty] \quad \text{Gleichung 19.6}$$

mit:

$O$	=	beobachteter Wert
$P$	=	modellierter Wert
$N$	=	Anzahl Wertepaare
$k$	=	Exponent, frei wählbar

Hierbei wird der Betrag der Differenz zwischen beobachteten und modellierten Werten mit dem potenzierten beobachteten Wert multipliziert, wobei der Exponent frei wählbar ist. LAMB (1999) schlägt in seinen Arbeiten einen Wert für den Exponenten von 1.5 vor, welcher auch in der vorliegenden Untersuchung angewendet wurde. In Abweichung zu LAMB (1999) wurde in der vorliegenden Arbeit die Summe der Fehlerprodukte zusätzlich durch die Anzahl Wertepaare geteilt. Die Wer-

te von MWAE können zwischen **0 und  $+\infty$**  liegen, wobei **0 vollständige Übereinstimmung** von Modellierung und Beobachtung bedeutet.

### g) Coefficient of Determination ( $R^2$ ) – Bestimmtheitsmass

Das Bestimmtheitsmass entspricht dem Quadrat des Pearson Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten (Gleichung 19.7, vgl. z.B. LEGATES & MCCABE 1999). Es beschreibt den Anteil der Varianz, welcher für die beobachteten Daten durch das Modell erklärt werden kann. Der Wertebereich reicht von **0.0 bis 1.0**, wobei **grössere Werte auf bessere Modellierungsqualität** hinweisen. Auch mit diesem Gütemass wird die lineare Beziehung zwischen Modell und Beobachtung beurteilt, wobei systematische Differenzen zwischen den beiden Grössen nicht erfasst werden (LEGATES & MCCABE 1999).

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - \bar{P})}{\left[ \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \cdot \left[ \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad R^2 \in [0..1] \quad \text{Gleichung 19.7}$$

mit:

$O$	=	beobachteter Wert
$P$	=	modellierter Wert
$N$	=	Anzahl Wertepaare

## 19.2.2 Validierte Abflusskennwerte und Zeiträume

Alle vorgängig beschriebenen Gütemasse (vgl. Kapitel 19.2.1) wurden zur Validierung der acht Modellkaskaden und vier hydrologischen Modelle verwendet, wobei ausschliesslich die beiden **monatlichen** Abflusskennwerte **«mittlerer monatlicher Abfluss»** (MQm) und **«monatlicher Hochwasserabfluss»** (HQm) berücksichtigt wurden. Damit lassen sich Aussagen zur Modellqualität im Mittel- und Hochwasserbereich machen.

Folgende Abflussdaten wurden **validiert** (vgl. Kapitel 19.1):

- > **QSimOBS:** Abflussdaten, welche mit beobachteten meteorologischen Daten modelliert wurden. Diese Validierung ermöglicht die Beurteilung der vier Varianten des hydrologischen Modells, welche sich in der Interpolationsmethode der meteorologischen Daten (IDW, DTIDW) und dem Kalibrierungszeitraum (1983-1987, 1998-2002) unterscheiden (vgl. Kapitel 18.5.2).
- > **QSimSIM:** Abflusswerte, welche unter Anwendung der meteorologischen Daten des Wettergenerators modelliert wurden. Aus dieser Validierung wird die Modellierungsqualität der acht Versionen der Modellkaskade ersichtlich (vgl. Kapitel 18.5.2). Es wurde jeweils der Medianwert aus den 50 Simulationen für die Validierung verwendet (vgl. Kapitel 18.6).

Die Validierung wurde für die **beiden Zeiträume 1981-1999 und 1934-2005** durchgeführt (vgl. Kapitel 19.1.2).

In Tabelle 19.2 bis Tabelle 19.9 sind die berechneten Gütemasse bzw. die Resultate aller Validierungen aufgeführt. Tabelle 19.1 gibt einen Überblick über die Validierungsperioden, die validierten Abflusskennwerte und den unterschiedlich modellierten Abflussdaten dieser Tabellen.

Tabelle 19.1: Übersicht über die Tabellen, welche die Resultate der Modellvalidierung enthalten

<b>Tabelle</b>	<b>Validierungsperiode</b>	<b>Abflusskennwert</b>	<b>Validierung für ...</b>
Tabelle 19.2	<b>1981-1999</b>	<b>HQm</b>	<b>QSimOBS</b>
Tabelle 19.3	<b>1981-1999</b>	<b>HQm</b>	QSimSIM
Tabelle 19.4	<b>1981-1999</b>	MQm	<b>QSimOBS</b>
Tabelle 19.5	<b>1981-1999</b>	MQm	QSimSIM
Tabelle 19.6	1934-2005	<b>HQm</b>	<b>QSimOBS</b>
Tabelle 19.7	1934-2005	<b>HQm</b>	QSimSIM
Tabelle 19.8	1934-2005	MQm	<b>QSimOBS</b>
Tabelle 19.9	1934-2005	MQm	QSimSIM

HQm: monatlicher Hochwasserabfluss, MQm: mittlerer monatlicher Abfluss, restliche Abkürzungen siehe Text.

### 19.2.3 Resultate

#### a) Validierung der Periode 1981-1999

In Tabelle 19.2 und Tabelle 19.4 sind die Resultate der Validierung für die vier Varianten des hydrologischen Modells enthalten (QSimOBS), Tabelle 19.3 und Tabelle 19.5 enthalten diejenigen für die acht Versionen der Modellkaskade (QSimSIM).

Die beurteilten Abflusskennwerte sind die monatlichen Hochwasser (HQm) sowie die monatlichen Abflussmittelwerte (MQm). In der hintersten Spalte jeder Tabelle ist als Interpretationshilfe der Rang der jeweiligen Modellversion innerhalb der entsprechenden Tabelle angegeben. Dieser wurde aufgrund der Rangsummen über alle Gütemasse bestimmt. Die beste Modellversion ist mit Rang 1 gekennzeichnet.

Für die Validierung der Periode 1981-1999 lassen sich die folgenden **Ergebnisse** festhalten:

- > Bei fast allen Versionen des hydrologischen Modells und der Modellkaskade wurden **gute Werte** bei den verschiedenen Gütemassen erzielt. Ausnahmen lassen sich aber bei den Versionen beobachten, welche das hydrologische Modell «DTIDW\_9802» verwenden (vgl. Kapitel 18.5.2). Bei diesen Versionen (DTIDW\_9802, be3c3\_DTIDW\_9802 und cb3c2\_DTIDW\_9802) zeigen die Auswertungen bezüglich monatlicher Hochwasser (HQm) die deutlich schlechtesten Resultate (Tabelle 19.2, Tabelle 19.3), was jeweils am tiefsten Rang und an sehr schlechten Gütemassen ersichtlich wird. Die Unterschiede bei der Modellqualität bezüglich mittlerer monatlicher Abflüsse (MQm) sind hingegen weniger stark ausgeprägt (Tabelle 19.4, Tabelle 19.5): Die Ränge sind zwar immer noch sehr tief, jedoch fallen die Werte der verschiedenen Gütemasse im Vergleich zu den anderen Versionen nicht mehr so stark ab.

- > Sowohl bei den Ergebnissen für die Validierung anhand der monatlichen Hochwasser (HQm) als auch bei denjenigen anhand der mittleren monatlichen Abflüsse (MQm) wird ersichtlich, dass die hydrologischen Modelle, welche die **IDW-interpolierten** meteorologischen Daten verwenden (IDW\_8387, IDW\_9802), **bessere Gütemasse** aufweisen, als diejenigen mit DTIDW-interpolierten Eingabedaten (DTIDW\_8387, DTIDW\_9802) (vgl. Tabelle 19.2 und Tabelle 19.4).
- > Bei den Modellversionen, die sich nur bezüglich den **Kalibrierungszeiträumen des hydrologischen Modells** unterscheiden (z.B. be3c3\_IDW\_8387 und be3c3\_IDW\_9802), sind keine regelmässigen Unterschiede zu beobachten. Während beispielsweise in Tabelle 19.2 die Modelle, welche für die Periode 1983-1987 kalibriert wurden, gegenüber den vergleichbaren Modellen, welche für die Periode 1998-2002 kalibriert wurden, leicht bessere Resultate zeigen, ist dies bei den Auswertungen in Tabelle 19.4 gerade umgekehrt.
- > Die Resultate für die Modelle, welche sich ausschliesslich in der **Variante des Wettergenerators** unterscheiden (z.B. be3c3\_IDW\_9802 und cb3c2\_IDW\_9802), fallen immer sehr ähnlich aus.
- > Die Gütemasse für die Validierung bezüglich **mittlerer monatlicher Abflüsse** (MQm) (Tabelle 19.4 und Tabelle 19.5) sind durchwegs etwas besser, als diejenigen bezüglich **monatlicher Hochwasserabflüsse** (HQm) (Tabelle 19.2 und Tabelle 19.3).

## b) Validierung der Periode 1934-2005

Fast alle Modellversionen weisen für die Validierung der Periode 1934-2005 (Tabelle 19.6 bis Tabelle 19.9) leicht schlechtere Gütemasse auf als für die Validierung der Periode 1981-1999. Die Modellierungsqualität ist aber in den meisten Fällen immer noch gut und in einigen Fällen sogar sehr gut.

Die in Kapitel 19.2.3 a) für die Validierung der Periode 1981-1999 beobachteten Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellen, welche auf Grund der variierten Einflussgrössen (z.B. Methode zur räumlichen Interpolation der meteorologischen Daten) auftreten, werden für diese Periode ebenfalls ersichtlich.

Zusammenfassend lässt sich für die Validierung der Periode 1934-2005 Folgendes festhalten:

- > Mit den Varianten der hydrologischen Modelle, welche mit **IDW-interpolierten** meteorologischen Daten angetrieben werden, werden **bessere Gütemasse** erzielt als mit denjenigen mit DTIDW-interpolierten Daten. Auch für diese Validierungsperiode entstehen die schlechtesten Ergebnisse für die Modellversionen, welche das hydrologische Modell «DTIDW\_9802» verwenden.
- > Die Modelle, welche für den Zeitraum von **1998-2002** kalibriert wurden, weisen leicht **bessere Gütemasse** auf, als die Modelle, die auf der Kalibrierung für die Periode von 1983-1987 beruhen.
- > Bei den Modellversionen, welche sich ausschliesslich in der **Variante des Wettergenerators** unterscheiden, sind nur geringfügige Unterschiede der Modellierungsqualität zu beobachten.

Tabelle 19.2: Validierung der Versionen des hydrologischen Modells. (1981-1999, HQm, Gütemasse vgl. Kapitel 19.2.1)

Modellversion	NSE	VE	IOA	IOA <sub>w</sub>	MSE	MWAE	R <sup>2</sup>	Rang
DTIDW_8387	0.672	0.743	0.910	0.757	5.9	50.1	0.724	3
DTIDW_9802	0.232	0.638	0.858	0.707	13.7	64.4	0.669	4
IDW_8387	0.843	0.810	0.961	0.822	2.8	32.8	0.857	1
IDW_9802	0.763	0.788	0.949	0.814	4.2	39.3	0.849	2

Tabelle 19.3: Validierung der Versionen der Modellkaskade. (1981-1999, HQm, Gütemasse vgl. Kapitel 19.2.1)

Modellversion	NSE	VE	IOA	IOA <sub>w</sub>	MSE	MWAE	R <sup>2</sup>	Rang
be3c3_DTIDW_8387	0.625	0.724	0.899	0.745	6.7	53.3	0.704	5
be3c3_DTIDW_9802	0.489	0.675	0.897	0.731	9.1	57.9	0.710	7
be3c3_IDW_8387	0.672	0.740	0.914	0.761	5.9	48.7	0.742	3
be3c3_IDW_9802	0.692	0.750	0.926	0.778	5.5	45.2	0.761	1
cb3c2_DTIDW_8387	0.622	0.721	0.898	0.742	6.8	53.6	0.699	6
cb3c2_DTIDW_9802	0.474	0.670	0.894	0.728	9.4	58.8	0.703	8
cb3c2_IDW_8387	0.662	0.734	0.909	0.754	6.0	50.1	0.738	4
cb3c2_IDW_9802	0.693	0.746	0.923	0.772	5.5	46.4	0.758	2

Tabelle 19.4: Validierung der Versionen des hydrologischen Modells. (1981-1999, MQm, Gütemasse vgl. Kapitel 19.1.2)

Modellversion	NSE	VE	IOA	IOA <sub>w</sub>	MSE	MWAE	R <sup>2</sup>	Rang
DTIDW_8387	0.879	0.831	0.968	0.851	658	35164	0.915	4
DTIDW_9802	0.889	0.834	0.975	0.862	603	33594	0.921	3
IDW_8387	0.925	0.859	0.982	0.877	405	25958	0.940	2
IDW_9802	0.938	0.878	0.984	0.894	339	23066	0.946	1

Tabelle 19.5: Validierung der Versionen der Modellkaskade. (1981-1999, MQm, Gütemasse vgl. Kapitel 19.1.2)

Modellversion	NSE	VE	IOA	IOA <sub>w</sub>	MSE	MWAE	R <sup>2</sup>	Rang
be3c3_DTIDW_8387	0.891	0.834	0.973	0.856	594	33017	0.916	6
be3c3_DTIDW_9802	0.838	0.810	0.967	0.847	879	40719	0.920	7
be3c3_IDW_8387	0.902	0.836	0.977	0.861	534	30652	0.927	4
be3c3_IDW_9802	0.919	0.854	0.981	0.875	442	28442	0.936	2
cb3c2_DTIDW_8387	0.894	0.837	0.974	0.859	576	32470	0.916	5
cb3c2_DTIDW_9802	0.821	0.801	0.964	0.842	970	43602	0.920	8
cb3c2_IDW_8387	0.902	0.837	0.977	0.862	535	30801	0.927	3
cb3c2_IDW_9802	0.919	0.855	0.981	0.876	438	28301	0.936	1

Tabelle 19.6: Validierung der Versionen des hydrologischen Modells. (1933-2005, HQm, Gütemasse vgl. Kapitel 19.1.2)

<b>Modellversion</b>	<b>NSE</b>	<b>VE</b>	<b>IOA</b>	<b>IOA<sub>w</sub></b>	<b>MSE</b>	<b>MWAE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Rang</b>
DTIDW_8387	0.624	0.723	0.890	0.749	7.6	63.1	0.676	3
DTIDW_9802	0.319	0.647	0.870	0.727	13.7	64.2	0.678	4
IDW_8387	0.799	0.786	0.949	0.810	4.0	44.7	0.822	1
IDW_9802	0.739	0.771	0.944	0.810	5.3	48.6	0.826	2

Tabelle 19.7: Validierung der Versionen der Modellkaskade. (1933-2005, HQm, Gütemasse vgl. Kapitel 19.1.2)

<b>Modellversion</b>	<b>NSE</b>	<b>VE</b>	<b>IOA</b>	<b>IOA<sub>w</sub></b>	<b>MSE</b>	<b>MWAE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Rang</b>
be3c3_DTIDW_8387	0.560	0.702	0.868	0.732	8.8	69.9	0.635	4
be3c3_DTIDW_9802	0.512	0.663	0.891	0.729	9.8	66.0	0.668	4
be3c3_IDW_8387	0.585	0.713	0.876	0.740	8.3	67.5	0.669	3
be3c3_IDW_9802	0.627	0.724	0.896	0.758	7.5	62.4	0.692	1
cb3c2_DTIDW_8387	0.542	0.700	0.863	0.730	9.2	71.5	0.616	8
cb3c2_DTIDW_9802	0.497	0.662	0.886	0.728	10.1	67.9	0.654	7
cb3c2_IDW_8387	0.555	0.706	0.864	0.732	9.0	70.9	0.650	6
cb3c2_IDW_9802	0.594	0.717	0.882	0.748	8.2	66.5	0.669	2

Tabelle 19.8: Validierung der Versionen des hydrologischen Modells. (1933-2005, MQm, Gütemasse vgl. Kapitel 19.1.2)

<b>Modellversion</b>	<b>NSE</b>	<b>VE</b>	<b>IOA</b>	<b>IOA<sub>w</sub></b>	<b>MSE</b>	<b>MWAE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Rang</b>
DTIDW_8387	0.855	0.809	0.963	0.832	726.8	36405	0.902	4
DTIDW_9802	0.870	0.820	0.972	0.851	650.7	33606	0.914	3
IDW_8387	0.895	0.831	0.974	0.853	523.9	29411	0.928	2
IDW_9802	0.912	0.851	0.978	0.868	440.1	27490	0.934	1

Tabelle 19.9: Validierung der Versionen der Modellkaskade. (1933-2005, MQm, Gütemasse vgl. Kapitel 19.1.2)

<b>Modellversion</b>	<b>NSE</b>	<b>VE</b>	<b>IOA</b>	<b>IOA<sub>w</sub></b>	<b>MSE</b>	<b>MWAE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Rang</b>
be3c3_DTIDW_8387	0.868	0.816	0.968	0.840	659.6	34325	0.906	6
be3c3_DTIDW_9802	0.828	0.802	0.965	0.841	861.7	38778	0.915	7
be3c3_IDW_8387	0.868	0.814	0.969	0.840	658.9	32902	0.913	5
be3c3_IDW_9802	0.891	0.834	0.973	0.856	547.4	30324	0.923	1
cb3c2_DTIDW_8387	0.873	0.819	0.969	0.844	637.5	33663	0.907	3
cb3c2_DTIDW_9802	0.817	0.798	0.964	0.838	918.6	40193	0.916	8
cb3c2_IDW_8387	0.869	0.814	0.969	0.840	657.3	33084	0.913	4
cb3c2_IDW_9802	0.890	0.834	0.973	0.856	550.1	30624	0.922	2

## 19.2.4 Fazit zur Modellvalidierung mit Gütemassen

Die Resultate der Validierung anhand der Gütemasse führen zu folgenden Schlüssen:

- > Die Methoden, die zur Interpolation der meteorologischen Daten verwendet werden, haben den grössten Einfluss auf die Modellqualität. Mit den Modellen, welche mit IDW-interpolierten Daten angetrieben werden, können die besten Resultate erzielt werden.
- > Der gewählte Kalibrierungszeitraum für das hydrologische Modell hat nur einen geringen Einfluss auf die Modellqualität. Welche der beiden Kalibrierungsperioden bessere Modellierungsqualität liefert, hängt von der modellierten Periode ab.
- > Die Unterschiede der berechneten Gütemasse für diejenigen Modelle, welche sich nur in der verwendeten Wettergeneratorvariante unterscheiden, sind sehr gering.
- > Sowohl für die Periode 1981-1999 als auch für die Periode 1934-2005 lassen sich Modellversionen finden, welche eine gute bis sehr gute Modellierungsqualität liefern.

Um den Aufwand für alle nachfolgenden Validierungen (Kapitel 19.3 und Kapitel 19.4) und Modellierungen (Kapitel 20 und Kapitel 21) der Modellkaskade zu reduzieren, wurde die Anzahl der Modellversionen von acht auf vier reduziert. Die **Auswahl** fiel dabei auf die folgenden **Modellversionen**:

- > be3c3\_IDW\_8387
- > be3c3\_IDW\_9802
- > cb3c2\_IDW\_9802
- > cb3c2\_DTIDW\_9802

Damit wurden die drei Modelle berücksichtigt, welche sowohl bei der Validierung für die beiden modellierten Perioden (1981-1999, 1934-2005) als auch bezüglich der beiden Zielgrössen (MQm, HQm) die beste Modellierungsqualität aufweisen («be3c3\_IDW\_8387», «be3c3\_IDW\_9802», «cb3c2\_IDW\_9802»). Gleichzeitig wurde aber auch das Modell ausgewählt, welches die schlechtesten Resultate aufweist («cb3c2\_DTIDW\_9802»). Aus dieser Modellauswahl wird auch ersichtlich, in welchem Bereich sich die modellierten Daten und die darauf basierenden Auswertungen bewegen bzw. wie gross die maximale Modellierungsunsicherheit ist.

## 19.3 Modellvalidierung mit Q-Q-Plots

### 19.3.1 Vorgehen

Die Qualität der verschiedenen Versionen der Modellkaskade und des hydrologischen Modells wird hier durch den Vergleich der modellierten und beobachteten Abflussdaten anhand sogenannter Quantil-Quantil-Diagramme (Q-Q-Plots) (z.B. CHAMBERS ET AL. 1983) beurteilt. Im Gegensatz zur Modellvalidierung mit Gütemassen (Kapitel 19.2), werden bei diesem Ansatz alle **Tagesmittelwerte des modellierten Abflusses** in den Vergleich einbezogen. Bei einem Q-Q-Plot werden die empirischen Verteilungen der modellierten und beobachteten Tagesmittelwerte des Abflusses optisch miteinander verglichen. Dazu werden die modellierten und die beobachteten Abflussdaten separat



nach Grösse sortiert, die geordneten Daten zu Wertepaaren zusammengefasst und anschliessend grafisch gegeneinander abgetragen.

Bei diesem explorativen, optischen Verfahren wird **gute Übereinstimmung** von Modellierung und Beobachtung daran ersichtlich, dass die Punkteschar eine Gerade nahe der Winkelhalbierenden bildet. Es ist zu beachten, dass die Übereinstimmung des zeitlichen Verlaufs der beiden Datengrundlagen durch die separate und grössenabhängige Sortierung bei dieser Beurteilung nicht berücksichtigt wird und sich der Vergleich ausschliesslich auf die empirische Verteilung der modellierten und beobachteten Daten beschränkt.

In Abbildung 19.1 sind jeweils folgende Daten für den validierten Zeitraum von 1934 bis 2004 dargestellt:

- > **rote Punkte:** Vergleich von Abflussdaten, welche mit beobachteten meteorologischen Daten modelliert wurden (**QSimOBS**), und beobachteten Abflussdaten (**QOBS**). Zu diesen Wertepaaren sind in den Abbildungen jeweils auch die Werte, welche dem 50%- bzw. dem 99%-Quantil entsprechen, mit gestrichelten Linienpaaren markiert. Diese Angabe ermöglicht eine Einschätzung, ab welchem Wertebereich bei der entsprechenden Modellierung Abweichungen gegenüber dem beobachteten Abfluss auftreten.
- > **hellblaue Punkte:** Vergleich von Abflussdaten, welche mit den meteorologischen Daten aus dem Wettergenerator modelliert wurden (**QSimSIM**), und beobachteten Abflussdaten (**QOBS**). Es sind alle Werte der 50 Simulationen mit der jeweiligen Version der Modellkaskade dargestellt.
- > **dunkelblaue Punkte:** Vergleich des **Medians** aus den 50 Simulationen (**QSimSIM**) mit der jeweiligen Modellkaskade und den beobachteten Abflussdaten (**QOBS**).

Die modellierte Periode von 1933 bis 2005 wurde für die Validierung auf den Zeitraum 1934-2004 beschränkt, weil die extremen Abflusswerte aus dem Jahr 2005 die Skalierung der Grafik stark verändert und dadurch die Interpretation deutlich erschwert hätten. Das erste Jahr der Modellierung (1933) wurde zudem als Initialisierungsjahr zum Füllen der verschiedenen Speicher des hydrologischen Modells verwendet und für die Validierung ebenfalls nicht berücksichtigt.

### 19.3.2 Resultate

In Abbildung 19.1 sind die Q-Q-Plots für die in Kapitel 19.2.4 ausgewählten vier Modellversionen dargestellt. Beim Vergleich der vier Teilgrafiken werden die zwischen den verschiedenen Versionen vorhandenen Unterschiede der Modellierungsqualität deutlich ersichtlich: Die beste Übereinstimmung zwischen den empirischen Verteilungen von beobachteten und modellierten Abflussdaten tritt bei der Version «**be3c3\_IDW\_8387**» auf (Abbildung 19.1 d). Dies gilt sowohl für QSimSIM (dunkelblaue Punkte) als auch für QSimOBS (rote Punkte) und für den gesamten Wertebereich (0 bis 30 mm/d).

Bei den Modellversionen «**be3c3\_IDW\_9802**» (Abbildung 19.1 c) und «**cb3c2\_IDW\_9802**» (Abbildung 19.1 b) sind jeweils schlechtere Übereinstimmungen zwischen den empirischen Verteilungen der modellierten und beobachteten Abflussdaten festzustellen. Grössere Abweichungen von QSimOBS (rote Punkte) sind bei beiden Modellversionen insbesondere über dem 99%-Quantil, d.h. bei den extremen Abflusswerten, zu beobachten. Es lassen sich nur geringe Unterschiede zwischen den beiden Modellversionen, welche sich ausschliesslich im verwendeten Wettergenerator unterscheiden, erkennen.

Bei der Modellierung «**cb3c2\_DTIDW\_9802**» (Abbildung 19.1 a) treten sowohl bei QSimOBS (rote Punkte) wie auch bei QSimSIM (dunkelblaue Punkte) bereits zwischen dem 50%- und dem 99%-Quantil deutliche Abweichungen von der Winkelhalbierenden auf, was ein deutlicher Hinweis auf schlechte Modellierungsqualität ist.

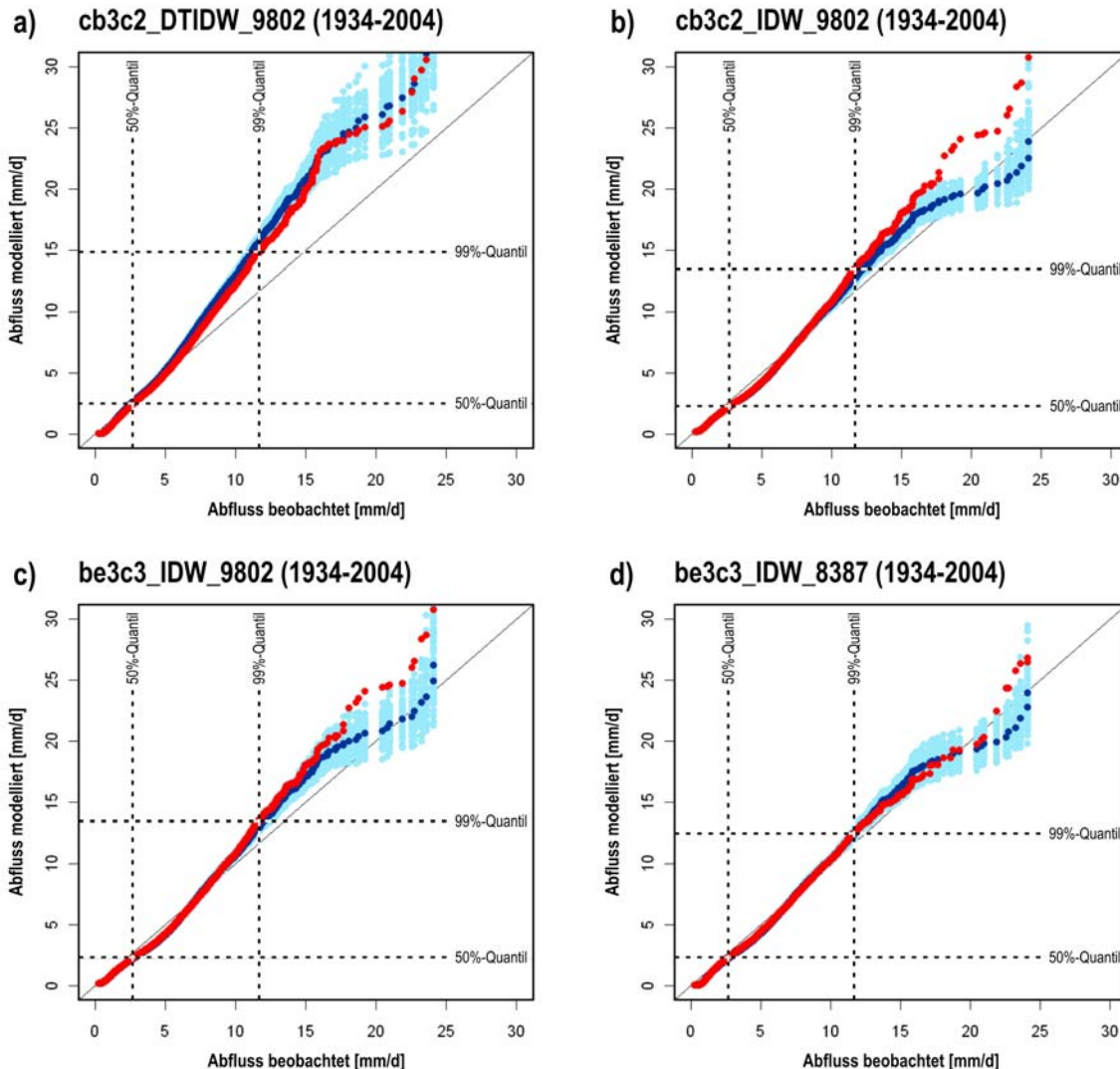


Abbildung 19.1: Q-Q-Plots für die vier Modellversionen gemäss Kapitel 19.2.4 (rot: QSimOBS, hellblau: QSimSIM, dunkelblau: Median aus allen 50 Simulationen von QSimSIM)

Aus dem Vergleich der vier Q-Q-Plots in Abbildung 19.1 resultieren die folgenden Erkenntnisse:

- > Die Modellierung des Wertebereichs bis zum 50%-Quantil gelingt für alle Modellversionen gut. Bei der schlechtesten Modellversion «**cb3c2\_DTIDW\_9802**» (a) sind ab dem 50%-Quantil grössere Abweichungen zwischen modellierten und beobachteten Werten zu beobachten. Die Modellversion «**be3c3\_IDW\_8387**» (d) ergibt auch über dem 99%-Quantil noch gute Übereinstimmungen zum beobachteten Abfluss und kann bezüglich dieser Auswertung als **beste Version** der Modellkaskaden bezeichnet werden.

- > Die **Variante des Wettergenerators** beeinflusst die Qualität der hydrologischen Modellierung nur geringfügig. Dies wird daran ersichtlich, dass die beiden Modellversionen, welche sich ausschliesslich in der verwendeten Version des Wettergenerators unterscheiden, nahezu die gleichen Punktemuster zeigen («cb3c2\_IDW\_9802» (b) und «be3c3\_IDW\_9802» (c)).
- > Die gewählte **Kalibrierungsperiode für das hydrologische Modell** (1983-1987 und 1998-2002) hat einen erkennbaren Einfluss auf die Modellierungsqualität. Dies wird beim Vergleich der beiden Modellversionen «be3c3\_IDW\_9802» (c) und «be3c3\_IDW\_8387» (d) ersichtlich, welche sich ausschliesslich im Kalibrierungszeitraum unterscheiden. Bei der Modellversion «be3c3\_IDW\_9802» (c) liegen die modellierten, maximalen Abflüsse über den beobachteten Werten während bei der Modellversion «be3c3\_IDW\_8387» (d) gute Übereinstimmung festgestellt werden kann.
- > Den grössten Einfluss auf die Qualität der Modellierung hat die **Methode zur räumlichen Interpolation der meteorologischen Eingabedaten** für das hydrologische Modell (DTIDW und IDW). Aus dem Vergleich der Q-Q-Plots der beiden Modellversionen «cb3c2\_DTIDW\_9802» (a) und «cb3c2\_IDW\_9802» (b) wird dies ersichtlich, da sich die beiden Modelle nur in dieser Einflussgrösse unterscheiden. Die mit der Modellversion «cb3c2\_DTIDW\_9802» (a) modellierten Abflüsse liegen deutlich über denjenigen der Modellversion «cb3c2\_IDW\_9802» (b) sowie über den beobachteten Werten.

### 19.3.3 Fazit zur Modellvalidierung mit Q-Q-Plots

Aus der Validierung der vier ausgewählten Modellkaskaden anhand der Q-Q-Plots können folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- > Den grössten Einfluss auf die Modellierungsqualität hat die Methode zur räumlichen Interpolation der meteorologischen Daten. Mit der Variante «DTIDW» werden deutlich schlechtere Ergebnisse erzielt als mit der Variante «IDW».
- > Der verwendete Kalibrierungszeitraum hat auf die Modellierungsqualität geringe Auswirkungen. Die auf den Zeitraum 1983-1987 kalibrierten Modellversionen erzielen leicht bessere Resultate, als die Versionen welche für die Periode 1998-2002 kalibriert wurden.
- > Die beiden Varianten des Wettergenerators führen zu sehr geringen Unterschieden bei der Modellierungsqualität.
- > Bei der Validierung anhand der Q-Q-Plots kann die Modellkaskade «be3c3\_IDW\_8387» als beste Version bezeichnet werden.

## 19.4 Modellvalidierung mit direktem optischem Vergleich

### 19.4.1 Vorgehen

Eine weitere Möglichkeit zur Beurteilung der Modellierungsqualität besteht im direkten, optischen Vergleich von modellierten und beobachteten Abflusswerten. Damit können sowohl die mengenmässigen Abweichungen als auch die Übereinstimmung des zeitlichen Verlaufs überprüft werden.

In der vorliegenden Untersuchung wurde dieser Vergleich anhand von zwei ausgewählten Abflusskennwerten durchgeführt: Einerseits wurden die modellierten und beobachteten **Jahreshochwasser (HQa, Abbildung 19.2)** miteinander verglichen, andererseits aber auch die modellierte und beobachtete jährliche Abflusshöhe, welche dem **mittleren jährlichen Abfluss** entspricht (**MQa, Abbildung 19.3**). Diese Validierung wurde für die Periode 1934-2005 und für die vier Versionen der Modellkaskade durchgeführt («cb3c2\_DTIDW\_9802», «cb3c2\_IDW\_9802», «be3c3\_IDW\_9802», «be3c3\_IDW\_8387»), welche in Kapitel 19.2.4 ausgewählt wurden.

In Abbildung 19.2 und Abbildung 19.3 sind die beobachteten Abflusswerte (**QOBS**) als **schwarze** Linie dargestellt. Diese ist für alle vier Diagramme pro Abbildung identisch. Die mit den beobachteten meteorologischen Daten modellierten Abflusswerte (**QSimOBS**) sind als **rote** Linie in die beiden Abbildungen eingetragen. Die **blaue** Linie entspricht dem Median aus den 50 Simulationen, welche mit den modellierten meteorologischen Daten des Wettergenerators hydrologisch modelliert wurden (**QSimSIM**). Zudem umfasst das hellblaue Band die entsprechenden Maxima und Minima aus allen 50 Simulationen von QSimSIM.

### 19.4.2 Resultate

Aus der Validierung mit dem direkten Vergleich von modellierten und beobachteten Abflussdaten wird Folgendes ersichtlich:

- > Für die meisten Modelle ist bei beiden Kenngrössen (Abbildung 19.2: HQa, Abbildung 19.3: MQa) und für die meisten Jahre der Periode 1934-2005 eine **gute Übereinstimmung von modellierten und beobachteten Abflusswerten** zu erkennen. Bei beiden Abbildungen ist zu beobachten, dass die **interannuelle Variabilität** der beobachteten Abflussdaten (QOBS, schwarze Linie), sowohl durch QSimOBS (rote Linie) als auch durch QSimSIM (blaue Linie) weitgehend nachgebildet werden kann. Bei fast allen Modellen können für die gleichen Perioden grössere Abweichungen zwischen modellierten und beobachteten Werten festgestellt werden (z.B. HQa: 1975-1980; MQa: 1950-1960).
- > Die Unterschiede beim **modellierten mittleren jährlichen Abfluss** (MQa, Abbildung 19.3) sind zwischen den Modellversionen «cb3c2\_IDW\_9802» (b), «be3c3\_IDW\_9802» (c) und «be3c3\_IDW\_8387» (d) sowohl für QSimOBS (rot) als auch für QSimSIM (blau) sehr gering. Grössere Abweichungen sind zwischen diesen drei Modellen und der Modellversion «cb3c2\_DTIDW\_9802» (a) festzustellen. Dies zeigt sich ansatzweise auch bei den modellierten **Jahreshochwassern** (HQa, Abbildung 19.2). Bei dieser Kenngrösse fallen aber vielmehr die grossen Unterschiede bei den Streuungen der jeweils 50 Simulationen von QSimSIM (blau) auf, welche anhand der unterschiedlichen Breite des hellblauen Bandes ersichtlich wird.

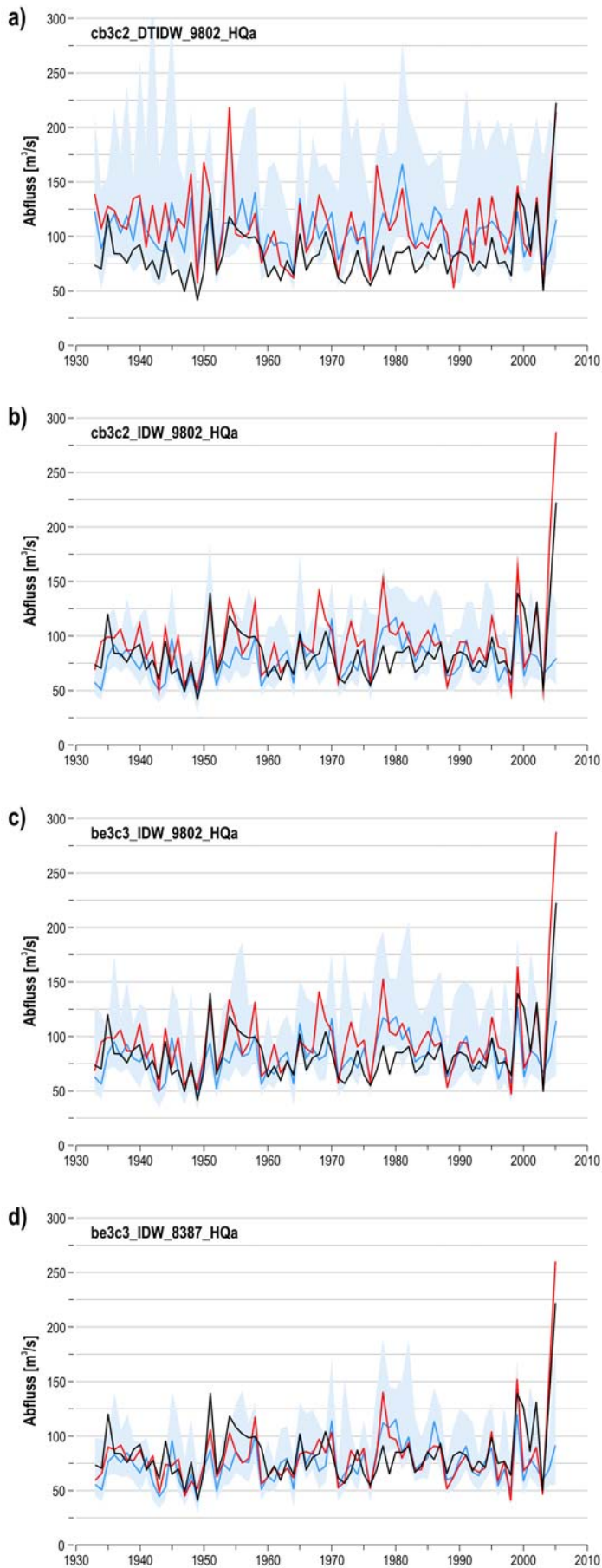


Abbildung 19.2: Vergleich von modellierten und beobachteten Jahreshochwassern (HQA) für die Periode von 1934 bis 2005.

schwarze Linie: QOBS, rote Linie: QSimOBS, blaue Linie: Median aus den 50 Simulationen von QSimSIM, blaues Band: Bereich zwischen Maximum und Minimum der 50 Simulationen von QSimSIM

Gütemasse: siehe Anhang D

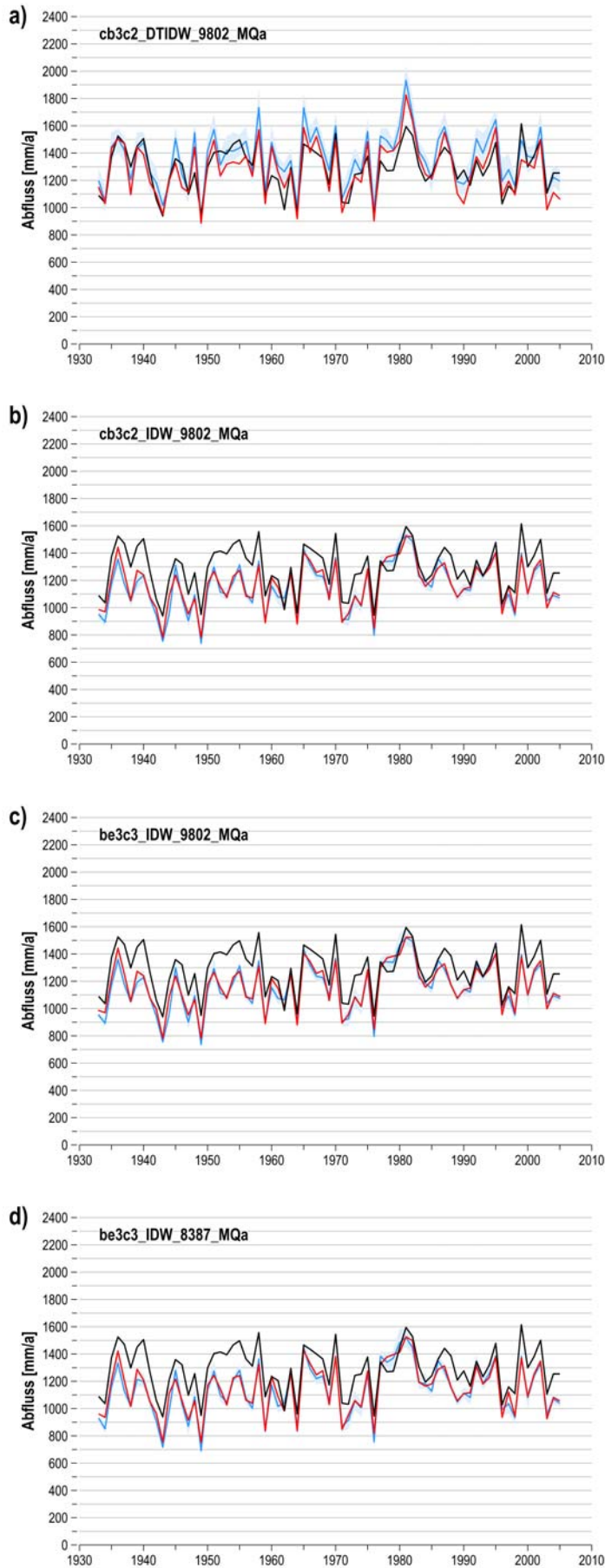


Abbildung 19.3: Vergleich von modelliertem und beobachtetem mittleren jährlichen Abfluss (MQa) für die Periode von 1934 bis 2005.

schwarze Linie: QOBS, rote Linie: QSimOBS, blaue Linie: Median aus den 50 Simulationen von QSimSIM, blaues Band: Bereich zwischen Maximum und Minimum der 50 Simulationen von QSimSIM

Gütemasse: siehe Anhang D

- > Bei QSimSIM (blau) unterscheidet sich zudem auch die **Streuung** der jeweils 50 Simulationen der jährlichen Abflusshöhe (MQa, Abbildung 19.3) und der Jahreshochwasser (HQa, Abbildung 19.2). Während bei den **Jahreshochwassern** eine grosse Streuung zwischen den maximalen und minimalen Werten beobachtet werden kann, ist das hellblaue Band beim **mittleren jährlichen Abfluss** (hier dargestellt anhand der jährlichen Abflusshöhe) wesentlich schmaler. Dies weist darauf hin, dass es besonders für die Modellierung der Jahreshochwasser wichtig ist, dass eine grössere Anzahl Simulationen durchgeführt wird: Eine einzelne Simulation kann in einen grösseren Streubereich fallen und somit eine grössere Abweichung zu den beobachteten Abflussdaten aufweisen. Zur alleinigen Modellierung des mittleren jährlichen Abflusses könnte die Modellierung hingegen auf wenige Simulationen beschränkt werden, da alle 50 Simulationen in einen ähnlichen, schmalen Streubereich fallen.
- > Die **grössten** beobachteten **Jahreshochwasser** (vgl. Abbildung 19.2) werden durch die modellierten Werte der Modellversion «cb3c2\_DTIDW\_9802» (a) teilweise deutlich überschätzt. Bessere Übereinstimmung zwischen grössten beobachteten und modellierten Jahreshochwassern lässt sich bei den drei anderen Modellversionen «cb3c2\_IDW\_9802» (b), «be3c3\_IDW\_9802» (c) und «be3c3\_IDW\_8387» (d) beobachten. Zudem fällt auf, dass unter Anwendung der Variante «be3c3» des Wettergenerators leicht höhere Jahreshochwasser erzielt werden als bei Anwendung der Variante «cb3c2» (vgl. Abbildung 19.2 b und c). Die Anwendung der Methode «DTIDW» zur räumlichen Interpolation von meteorologischen Eingabedaten führt jedoch zu grossen Abweichungen zwischen modellierten und beobachteten Werten der Jahreshochwasser.
- > Insbesondere bei den modellierten jährlichen Abflusshöhen (MQa, Abbildung 19.3) wird ersichtlich, dass die **Unterschiede zwischen den modellierten Abflussdaten** (QSimSIM (blau) und QSimOBS (rot)) kleiner sind als die **Unterschiede zwischen den modellierten und den beobachteten Abflussdaten** (QOBS, schwarz). Dies zeigt, dass unter Anwendung des Wettergenerators das beobachtete Wetter gut nachgebildet werden kann und dass die hydrologische Modellierung sowohl mit beobachteten als auch mit modellierten Wetterdaten in vergleichbarer Qualität gelingt. Die hydrologische Modellierung mit beobachteten meteorologischen Daten (QSimOBS, rot) führt allerdings noch zu Abweichungen bezüglich den beobachteten Abflusswerten (QOBS, schwarz). Aus den durchgeführten Untersuchungen kann jedoch nicht abgeleitet werden, ob die Fehlerquellen vorwiegend im hydrologischen Modell oder in den beobachteten meteorologischen Daten liegen.

### 19.4.3 Fazit zur Modellvalidierung mit direktem optischem Vergleich

Die Validierung anhand des direkten optischen Vergleichs zwischen modellierten und beobachteten Abflusswerten (HQa, MQa) führt zu folgenden Erkenntnissen:

- > Die interannuelle Variabilität der beobachteten Daten kann mit den modellierten Daten weitgehend nachgebildet werden. Für einzelne Perioden sind bei allen Modellversionen grössere Abweichungen zwischen modellierten und beobachteten Werten ersichtlich.
- > Bei den mittleren jährlichen Abflussmengen (MQa) sind weitgehende Übereinstimmungen zwischen QSimOBS und QSimSIM zu beobachten. Ebenso fallen die Resultate für die drei Modellversionen mit «IDW» sehr ähnlich aus.

- > Für die Jahreshochwasser (HQa) lassen sich Unterschiede bei der Streuung der modellierten Werte von QSimSIM zwischen den verschiedenen Modellversionen feststellen. Insbesondere für die zuverlässige Modellierung der Jahreshochwasser sind mehrere Modellläufe zwingend notwendig. Die Variante «be3c3» des Wettergenerators liefert für die Modellierung der Jahreshochwasser leicht höhere Werte als die Variante «cb3c2».

## 19.5 Fazit

Zur Validierung der Modellkaskade «Wettergenerator-hydrologisches Modell» wurden drei unterschiedliche Ansätze eingesetzt (Validierung mit Gütemassen, mit Q-Q-Plots und mit direktem Vergleich). Aus den Resultaten der Validierungen lässt sich ableiten, dass die Variation verschiedener Einflussgrößen die Modellierungsqualität wesentlich beeinflussen kann:

- > Die **Methode zur Interpolation der meteorologischen Daten** (DTIDW oder IDW) hat den grössten Einfluss auf die Modellierungsqualität der Modellkaskade. Es wird ersichtlich, dass die Methode «DTIDW» nicht für diese Anwendung geeignet ist, da die entsprechenden Modelle für alle validierten Zeiträume und Kenngrößen die schlechtesten Resultate liefern.
- > Daneben hat auch die **Kalibrierungsperiode** des hydrologischen Modells (1983-1987 oder 1998-2002) einen Einfluss auf die Modellierungsqualität. Hierbei kann allerdings nicht abschliessend beurteilt werden, welche Periode besser geeignet ist. Je nach Validierungsperiode oder Kenngrösse lassen sich mit beiden Modellvarianten sehr gute Resultate erzielen.
- > Den geringsten Einfluss auf die Modellierungsqualität hat die Variation des **Wettergenerators**. Sowohl mit dem Wettergenerator «be3c3» als auch mit «cb3c2» lässt sich das beobachtete Wetter in vergleichbarer Qualität modellieren. Abweichungen ergeben sich ausschliesslich bei der Modellierung der Jahreshochwasser, wo die Variante «be3c3» leicht bessere Werte liefert.

Wie aus den Modellvalidierungen anhand der Gütemasse oder der Q-Q-Plots hervorgeht, gelingt die **Modellierung** der monatlichen und täglichen Abflusswerte unter Anwendung der Modellkaskade **in sehr guter Qualität** und ist vergleichbar mit den Resultaten der hydrologischen Modellierung unter Anwendung der beobachteten Wetterdaten. Aus dem direkten Vergleich von modellierten und beobachteten Werten wird zudem ersichtlich, dass sowohl die Jahreshochwasser (HQa) als auch die mittleren jährlichen Abflussmengen (MQa) in ihrem Ausmass und der interannuellen Variabilität gut nachgebildet werden können. Verschiedene Versionen der Modellkaskade liefern sowohl für die Periode 1981-1999 als auch für die Validierungsperiode 1934-2005 Resultate in vergleichbarer Qualität. Diese Modellkaskaden sind deshalb auch für die Modellierung von Klimaänderungsszenarien geeignet.

Für die Modellierung der Klimaänderung anhand von Sensitivitätsanalysen (vgl. Kapitel 20) sowie von ausgewählten Klimaänderungsszenarien (vgl. Kapitel 21) wurden deshalb **vier Modellversionen gewählt**: Während für die drei Versionen «be3c3\_IDW\_9802», «be3c3\_IDW\_8387» und «cb3c2\_IDW\_9802» die besten Modellresultate erwartet werden können, kann unter Einbezug der schlechtesten Version «cb3c2\_DTIDW\_9802» das gesamte Spektrum der Modellresultate bzw. die aus der Modellierung resultierende Unsicherheit der Ergebnisse aufgezeigt werden.



## 20 Sensitivitätsanalysen

In diesem Kapitel werden die Methode (Kapitel 20.1) und die Resultate (Kapitel 20.2) der Sensitivitätsanalysen besprochen, welche für verschiedene hydrologische Kenngrössen durchgeführt wurden. Sie zeigen Reaktionsmuster der Kenngrössen auf die **systematische Variation von Niederschlag und Temperatur** auch unter extremen Veränderungen. Von herausragendem Interesse sind dabei, das Ausmass der Veränderungen bei den hydrologischen Kenngrössen bis ins Jahr 2050 sowie deren Abhängigkeit von Temperatur und Niederschlag, welche durch Variation der beiden Parameter ersichtlich wird. Die Untersuchung wurde für ausgewählte hydrologische Kennwerte sowohl zu den mittleren Abflussverhältnissen als auch zur Beurteilung der Hoch- und Niedrigwasserhältnisse für das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich durchgeführt.

### 20.1 Methode und Darstellung

Die Auswertung der verschiedenen hydrologischen Kennwerte basiert jeweils auf den Modellierungen mit den vier in Kapitel 19.2.4 gewählten Versionen der Modellkaskade. Alle verwendeten meteorologischen Eingabedaten wurden unter Anwendung des Wettergenerators (Kapitel 18.2.2) erstellt, wobei die systematischen Veränderungen von Temperatur und Niederschlag immer über den gleichen und fest gewählten Wertebereich vorgenommen wurden (vgl. Kapitel 18.6). Dieser Bereich geht zum Teil deutlich über die Werte aus den Klimaszenarien von FREI (2005) für das Jahr 2050 (vgl. Abbildung 18.4) hinaus; die entsprechenden Auswertungen erlauben daher auch die Abschätzung der **Auswirkungen von extremen klimatischen Veränderungen auf die hydrologischen Kennwerte**. Die verwendeten Änderungsbeträge sind jeweils für das ganze Jahr gültig und wurden auf die beobachteten monatlichen Gebietsmittelwerte der Periode 1980-1999 übertragen. Insgesamt wurden **25 verschiedene Klimaszenarien** modelliert. Diese Klimaszenarien entsprechen den Gitterpunkten des Netzes, welches bei allen Sensitivitätsflächen dargestellt ist (vgl. Kapitel 18.6).

Die Resultate, welche für jedes Klimaszenario aus modellierten Abflussdaten für 1000 Jahre abgeleitet wurden, sind sowohl in Form von Übersichtsgrafiken als auch als Sensitivitätsflächen dargestellt:

- > Die **Übersichtsgrafiken** beinhalten jeweils die Resultate einer ausgewählten Modellversion. Für jede der 25 modellierten Kombinationen der Niederschlags- und Temperaturänderungen ist bei diesen Darstellungen eine Abbildung enthalten, welche die Reaktionsweise von mehreren hydrologischen Kennwerten jeweils zusammengefasst aufzeigen. So sind z.B. in Abbildung 20.2 die Veränderungen des Abflussregimes dargestellt. Diese Darstellung beinhaltet die Kennwerte «mittlerer jährlicher Abfluss» (MQ) und «Variabilität der Abflussverhältnisse» (q95-q5) (vgl. Kapitel 20.2.2 sowie Kapitel 20.2.3).
- > In den meisten Fällen wurden die Resultate als **Sensitivitätsflächen** dargestellt (vgl. z.B. Abbildung 20.4), welche z.B. auch von ARNELL (1996) verwendet wurden. Diese Abbildungen enthalten die Ergebnisse der vier in Kapitel 19.2.4 gewählten Modellversionen und zeigen jeweils die Resultate für eine einzige hydrologische Kenngrösse (z.B. «mittlerer jährlicher Abfluss», MQ).

Am Beispiel von Abbildung 20.1 werden Aufbau und Interpretationsmöglichkeiten der Sensitivitätsflächen erläutert (vgl. Buchstaben in Abbildung 20.1):

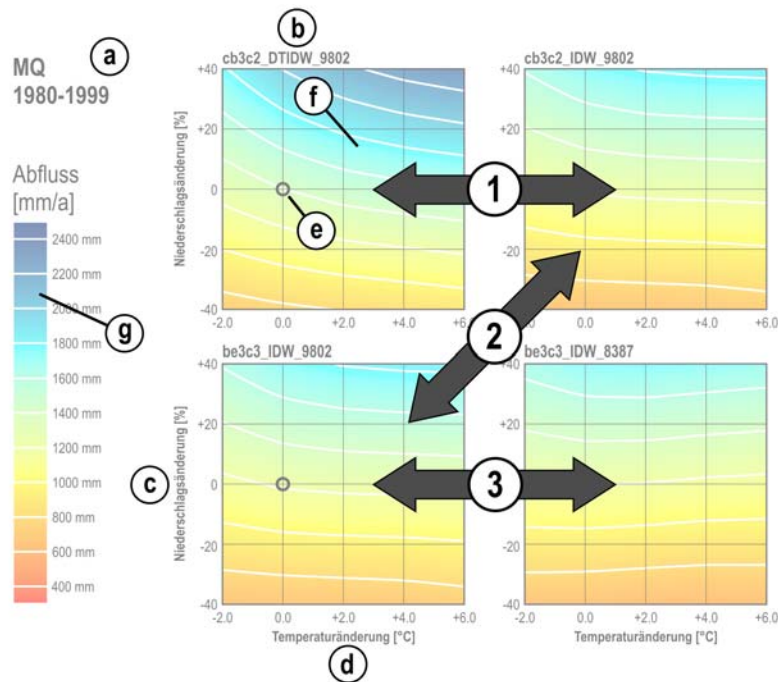


Abbildung 20.1: Aufbau, wesentliche Elemente und Interpretationsmöglichkeiten der Sensitivitätsflächen

- Titel:** Hier wird die jeweils untersuchte hydrologische Kenngrösse (MQ = mittlerer jährlicher Abfluss) und der modellierte Zeitraum (1980-1999), auf welchen sich die Änderungen von Niederschlag, Temperatur und der hydrologischen Kenngrösse beziehen, angegeben. Als zeitliche Basis wurde für die vorliegende Untersuchung immer der Zeitraum von 1980 bis 1999 gewählt. Dieser Zeitraum entspricht auch demjenigen, auf welchen sich die Angaben der Klimaänderungsszenarien von FREI (2005) beziehen (vgl. Kapitel 17.1.2).
- Modellversion:** Die Beschriftung der einzelnen Teilgrafik gibt die Version der verwendeten Modellkaskade an (vgl. Kapitel 18.5.2). Die Abkürzung ist folgendermassen zu interpretieren: Der erste Teil bezeichnet die Variante des Wettergenerators («cb3c2» bzw. «be3c3»), der zweite Teil zeigt die Interpolationsart der meteorologischen Grössen («DTIDW» bzw. «IDW») und der dritte Teil gibt die Jahre an, für welche das hydrologische Modell kalibriert wurde («8387» bzw. «9802»).
- Niederschlagsänderung:** Die Niederschlagsänderung erstreckt sich über einen Bereich von -40% bis +40%. Die Änderungsbeträge wurden, wie in Kapitel 18.6 beschrieben, auf alle gemessenen monatlichen Gebietsmittelwerte der Periode 1980-1999 angewendet. Der angegebene Wertebereich der Niederschlagsänderung wurde gleichmässig unterteilt, so dass die folgenden Bedingungen modelliert wurden: -40%, -20%, 0%, +20%, +40%.
- Temperaturänderung:** Analog zur Niederschlagsänderung wurde bei der Temperatur der Bereich zwischen -2 °C bis +6 °C verwendet und die folgenden Zustände modelliert: -2 °C, 0 °C, +2 °C, +4 °C, +6 °C. Analog zu Punkt c) wurden auch diese Änderungsbeträge auf die gemessenen Monatsmittelwerte der Periode 1980-1999 übertragen.

- e) **Referenzzustand:** Der schwarze Kreis innerhalb der interpolierten, farbigen Fläche markiert den modellierten Referenzzustand, welcher die unveränderten Bedingungen der Periode von 1980-1999 repräsentiert (Niederschlagsänderung: 0%, Temperaturänderung: 0 °C). Für verschiedene hydrologische Kennwerte wurden auch die prozentualen Veränderungen gegenüber diesem Punkt als Sensitivitätsflächen dargestellt. Der Vorteil der so berechneten Abweichungen liegt darin, dass sie unabhängig von der systematischen Abweichung zwischen Modellierung und Beobachtung, direkt auf die entsprechenden Verhältnisse der Periode 1980-1999 übertragen werden können.
- f) **Interpolierte Fläche:** Jeder Gitterpunkt repräsentiert das Resultat einer Modellierung unter den entsprechenden Bedingungen. Die Werte an den Gitterpunkten wurden mit Hilfe der Methode «Natural Neighbour» (SIBSON 1981, WATSON 1992), welche der IDW-Interpolation (vgl. Kapitel 6.1.3) sehr ähnlich ist, in einem GIS räumlich interpoliert. Die zusätzlich eingetragenen Isolinien (weisse Linien) zeigen die Abhängigkeit der Kenngrösse von der Niederschlags- und Temperaturänderung deutlich auf und vereinfachen zudem den Vergleich zwischen den vier Teilgrafiken.
- g) **Legende:** Die Legende zeigt den Bereich über den sich die Veränderungen der dargestellten hydrologischen Kenngrösse erstreckt. Zudem können aus der Legende auch die Werte für alle in der interpolierten Fläche enthaltenen Isolinien abgelesen werden.

Jede Abbildung besteht aus vier Teilgrafiken, welche die Resultate der verschiedenen Modellversionen enthalten (vgl. Abbildung 20.1). Bei der vergleichenden Interpretation dieser vier Teilgrafiken ist darauf zu achten, in welchen Einflussgrössen sich die jeweiligen Modellversionen unterscheiden (vgl. Kapitel 18.5.2). Bei den folgenden Vergleichen, welche in Abbildung 20.1 jeweils mit einem Pfeil symbolisiert sind, unterscheiden sich die Modelle in je einer Einflussgrösse:

- 1) Der Vergleich zwischen den beiden Teilgrafiken oben zeigt die Unterschiede, welche sich aus der gewählten räumlichen **Interpolationsmethode zur Bereitstellung der meteorologischen Eingabedaten** für das hydrologische Modell ergeben (DTIDW vs. IDW).
- 2) Aus dem Vergleich der Teilgrafiken oben rechts und unten links werden die **Auswirkungen der Wettergeneratorvariante** (be3c3 vs. cb3c2) auf die hydrologische Kenngrösse ersichtlich. Die Modelle unterscheiden sich ausschliesslich in diesem Punkt.
- 3) Der dritte Vergleich bezieht sich auf die Teilgrafiken unten. Durch den Vergleich dieser beiden Teilgrafiken zeigt sich der Einfluss der unterschiedlichen **Kalibrierungszeiträume** (1983-1987 vs. 1998-2002) auf die ausgewerteten hydrologischen Kenngrössen.

Ein weiterer Vergleich ergibt sich aus den Ergebnissen für die Modellierungen, welche **mit aktueller bzw. ohne Vergletscherung** (mGL, oGL) durchgeführt wurden (vgl. Kapitel 18.6.3). Die beiden entsprechenden Abbildungen, welche sich jeweils aus vier Teilgrafiken zusammensetzen, sind immer auf der gleichen Seite direkt übereinander dargestellt (z.B. Abbildung 20.4 und Abbildung 20.5). Der Vergleich zeigt den Einfluss der Gletscherveränderung auf die Resultate der entsprechenden hydrologischen Kenngrösse.

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird auf die Resultate der Sensitivitätsanalyse eingegangen. Die Ergebnisse sind vorwiegend als Sensitivitätsflächen, aber auch in Form von Übersichtsgrafiken dargestellt.

## 20.2 Resultate

### 20.2.1 Abflussregime

Anhand der beiden Übersichtsgrafiken in Abbildung 20.2 und Abbildung 20.3 werden am Beispiel der Resultate einer ausgewählten Modellversion (be3c3\_IDW\_9802) die **Auswirkungen der systematischen Temperatur- und Niederschlagsänderungen auf das Abflussregime** der Kander-Hondrich aufgezeigt. In jeder der 25 Teilgrafiken pro Abbildung sind jeweils die mittleren monatlichen Abflüsse sowie der Interquartilbereich als Band zwischen oberem (= 75%-Quantil) und unterem Quartil (= 25%-Quantil) dargestellt. Die Werte jeder Teilgrafik wurden aus den modellierten Abflussdaten, welche insgesamt 1000 Jahre umfassen, berechnet (vgl. Kapitel 18.6).

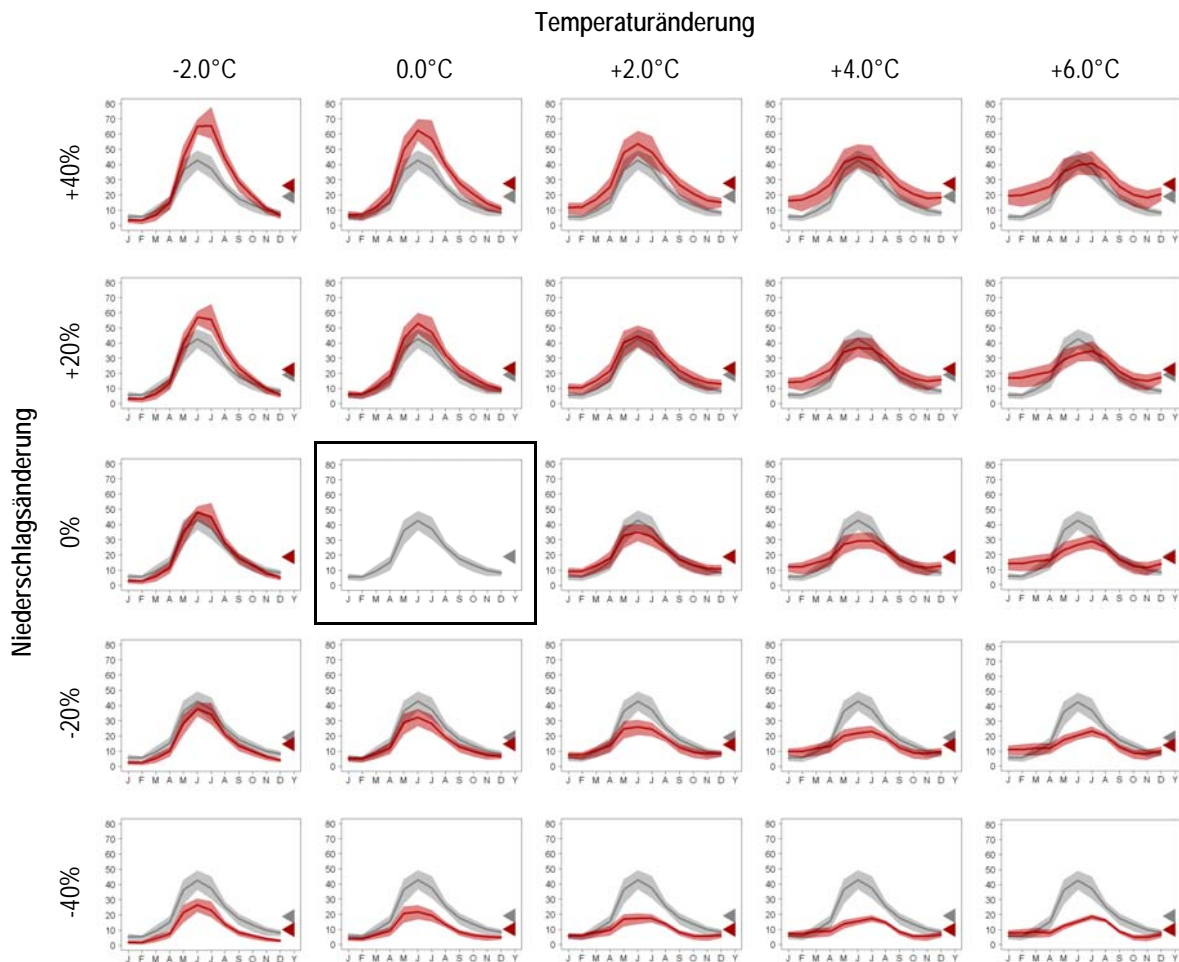


Abbildung 20.2: Übersichtsgrafik: Sensitivitätsanalyse für das Abflussregime mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, 1980-1999, Modellversion: be3c3\_IDW\_9802). Darstellung der Teilgrafiken: x-Achse: Monate (Januar bis Dezember) und Jahr (Y). y-Achse: Abfluss in m<sup>3</sup>/s. Rot: Szenario mit aktueller Vergletscherung, Grau: Referenzzustand. Das graue und das farbige Band zeigen jeweils den Bereich zwischen dem 25%- und 75%-Quantil. Die Dreiecke am rechten Rand zeigen den jährlichen Mittelwert von modelliertem Referenzzustand und Szenario. Der Referenzzustand ist mit einem schwarzen Rahmen markiert.

In Abbildung 20.2 ist in roter Farbe das Szenario mit aktueller Vergletscherung, welches die entsprechende Temperatur- und Niederschlagsänderung aufweist, dargestellt. Zum Vergleich ist jeweils in grauer Farbe der modellierte Referenzzustand abgebildet, welcher ohne Temperatur- und Niederschlagsänderung modelliert wurde und somit die unveränderten Verhältnisse der Periode 1980-1999 zeigt. Die Teilgrafik, in welcher der modellierte Referenzzustand enthalten ist, ist mit einem schwarzen Rahmen gekennzeichnet. Die Dreiecke, welche ganz rechts in jeder Teilgrafik eingetragen sind, zeigen den mittleren jährlichen Abfluss der entsprechenden Modellierung (farbig) bzw. des Referenzzustandes (grau). In Abbildung 20.3 sind in blauer Farbe zusätzlich die entsprechenden Resultate der Modellierungen ohne Vergletscherung eingetragen.

In den 25 Teilgrafiken pro Abbildung sind mehrere Informationen bzw. hydrologische Kenngrößen enthalten, welche im Folgenden in Form von Sensitivitätsflächen vertieft analysiert werden (z.B. mittlerer jährlicher Abfluss in Kapitel 20.2.2 oder mittlerer saisonaler Abfluss im Winter in Kapitel 20.2.4).

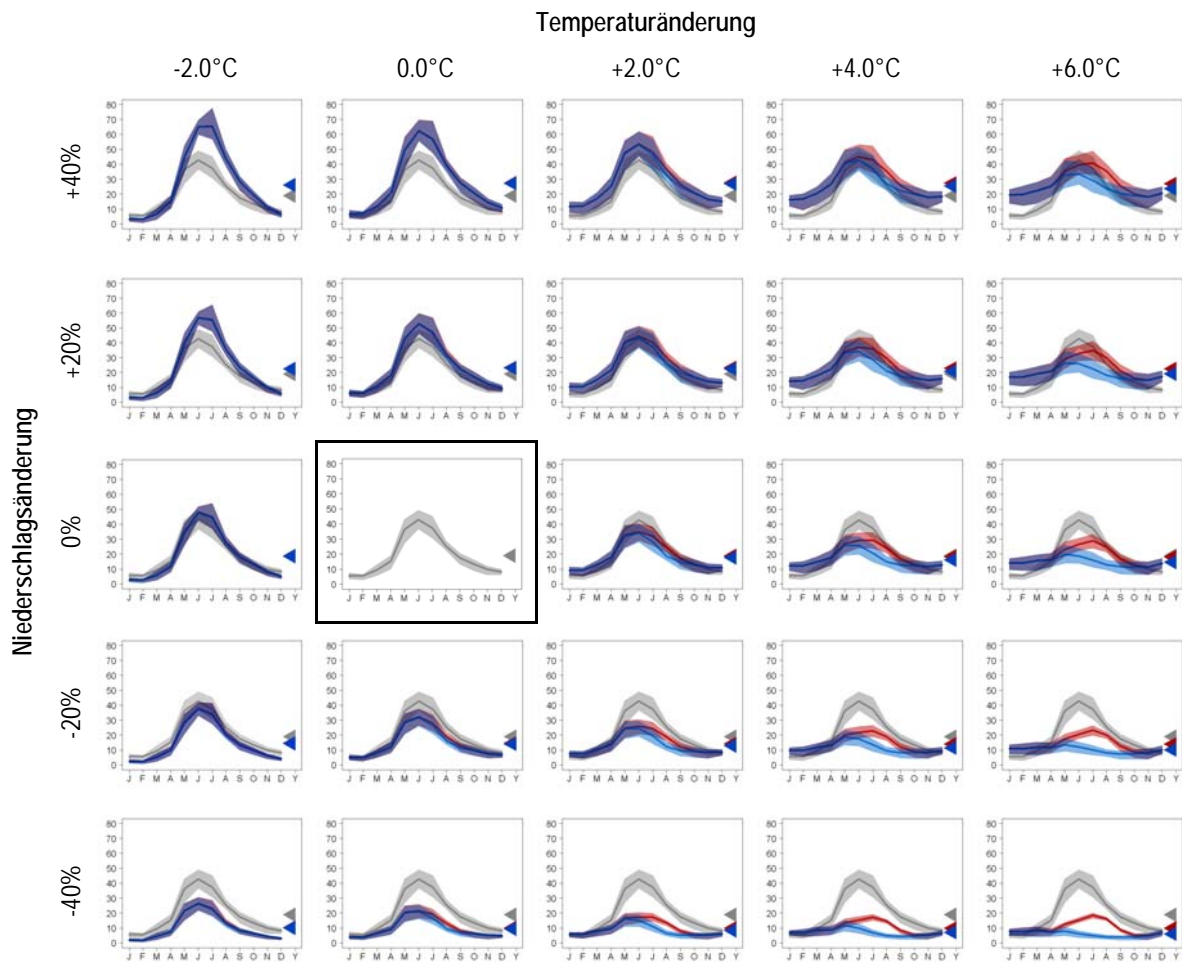


Abbildung 20.3: Übersichtsgrafik: Sensitivitätsanalyse für das Abflussregime mit aktueller (rot) und ohne Vergletscherung (blau) (Kander-Hondrich, 1980-1999, Modellversion: be3c3\_IDW\_9802). Legende Darstellung der Teilgrafiken: x-Achse: Monate (Januar bis Dezember) und Jahr (Y). y-Achse: Abfluss in m<sup>3</sup>/s. Rot: Szenario mit aktueller Vergletscherung, Blau: Szenario ohne Vergletscherung, Grau: Referenzzustand. Das graue und die farbigen Bänder zeigen jeweils den Bereich zwischen dem 25%- und 75%-Quantil. Die Dreiecke am rechten Rand zeigen den jährlichen Mittelwert von modelliertem Referenzzustand und Szenario. Der Referenzzustand ist mit einem schwarzen Rahmen markiert.

**a) Veränderung des Abflussregimes mit aktueller Vergletscherung (mGL)**

Aus Abbildung 20.2 geht hervor, dass das Abflussregime des Gesamteinzugsgebietes Kander-Hondrich durch die Temperatur- und Niederschlagsänderungen deutlich modifiziert wird. Bei zunehmender Temperatur und/oder reduziertem Niederschlag werden die Abflussverhältnisse gegenüber dem modellierten Referenzzustand wesentlich ausgeglichener, was sich in einer Abflachung der roten Kurve äussert. Dies bedeutet, dass Abflussmengen im Sommer reduziert werden und im Winter und Frühling zunehmen. Am stärksten ausgeprägt ist die Saisonalität des Abflussregimes bei kühleren Temperaturen und höheren Niederschlagsmengen. Bei Temperaturzunahme und reduzierten Niederschlagsmengen tritt ein deutlicher Unterschied gegenüber dem Referenzzustand auf, welcher sich insbesondere als Abflussrückgang im Sommer und in einem deutlich kleineren Interquartilbereich äussert. Bei Temperatur- und Abflusszunahme ist die Abflachung des jährlichen Abflussgangs mit einer deutlichen Abflusszunahme im Winter und Frühling verbunden. Die jährlichen Abflussmengen werden direkt durch die Niederschlagsänderung gesteuert.

**b) Veränderung des Abflussregimes ohne Vergletscherung (oGL)**

Bei den Modellierungen ohne Vergletscherung (oGL, Abbildung 20.3, blau) und den Szenarien mit Temperaturzunahme und verringertem Niederschlag werden deutliche Unterschiede sowohl gegenüber den Modellierungen mit aktueller Vergletscherung (mGL, rot) als auch gegenüber dem modellierten Referenzzustand (grau) ersichtlich. Insbesondere in den Monaten Juni bis September ergeben die Modellierungen ohne Vergletscherung geringere Abflussmengen als die Modellierungen mit aktueller Vergletscherung. Im Bereich der unveränderten oder reduzierten Temperaturen sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Modellvarianten (mGL, oGL) zu beobachten. Die mittlere jährliche Abflussmenge wird ohne Vergletscherung zusätzlich durch die Temperatur gesteuert, wobei eine Zunahme der Temperatur zu einer verstärkten Abflussreduktion führt.

**c) Fazit**

Der Vergleich der beiden Modellvarianten (mGL, oGL) zeigt deutlich, dass das aus der Gletscherschmelze stammende Wasser bei Temperaturzunahme einen wesentlichen Einfluss auf das Abflussregime der Kander hat: Während bei den Modellierungen ohne Vergletscherung die Abflussmengen bei erhöhten Temperaturen in den Sommer- und Herbstmonaten stark zurückgehen, kann dieser Rückgang bei den Modellierungen mit aktueller Vergletscherung teilweise kompensiert werden. Die Resultate der Modellierungen ohne Vergletscherung weisen dadurch einen Rückgang der Saisonalität und der mittleren jährlichen Abflussmengen auf. Für die Szenarien, welche von reduzierten Temperaturen ausgehen, können dagegen keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Modellvarianten (mGL, oGL) festgestellt werden. Sowohl die Modellierungen mit als auch diejenigen ohne Vergletscherung zeigen in diesem Bereich der Temperaturänderung bei Niederschlagszunahme eine verstärkte Saisonalität des Abflusses. Die jährlichen Abflussmengen werden massgeblich durch die Niederschlagsänderung und ohne Vergletscherung auch leicht durch die Temperaturänderung gesteuert (vgl. auch Kapitel 20.2.2).

## 20.2.2 Mittlerer jährlicher Abfluss (MQ)

Wie Abbildung 20.4 zeigt, ist über den gesamten modellierten Bereich und für alle Modellversionen zu erkennen, dass der mittlere jährliche Abfluss der Kander-Hondrich stärker von den Niederschlagsänderungen als von den Temperaturänderungen gesteuert wird.

### a) Veränderung des mittleren jährlichen Abflusses mit aktueller Vergletscherung

Aus Abbildung 20.4 geht hervor, dass sich die Veränderung der mittleren jährlichen Abflussmenge bei den Modellierungen mit aktueller Vergletscherung nahezu direkt proportional zur Niederschlagsänderung verhält. Eine Zunahme der Niederschlagsmenge um +20% bewirkt dadurch eine Zunahme beim Abfluss um +20 bis +30%. Aus dem Vergleich der vier Teilgrafiken in Abbildung 20.4 wird zudem ersichtlich, dass die Modellversion «cb3c2\_DTIDW\_9802» (oben links) gegenüber den anderen drei Modellierungen ein unterschiedliches Muster zeigt: So ist beispielsweise der Gradient der Änderung der mittleren jährlichen Abflussmenge bei dieser Version stärker ausgeprägt. Zudem ist für diese Modellversion eine leicht stärkere Temperaturabhängigkeit zu erkennen.

### b) Veränderung des mittleren jährlichen Abflusses ohne Vergletscherung

Die Ergebnisse der Modellierungen ohne Vergletscherung (Abbildung 20.5) zeigen gegenüber den Modellierungen mit Vergletscherung auffällige Unterschiede. Besonders im Bereich der grossen Temperaturzunahmen ist ein verstärkter Einfluss der Temperatur auf den mittleren jährlichen Abfluss festzustellen. Dieser äussert sich in einer Abnahme des Abflusses um bis zu -5% pro °C Temperaturzunahme.

Dies lässt sich damit erklären, dass bei den Modellversionen mit Vergletscherung unter Temperaturerhöhung aus den Gletscherflächen des Modells überdurchschnittlich viel Abfluss entsteht. Der Grund für diese überproportionale Eisschmelze liegt darin, dass der Gletscher mit dem verwendeten hydrologischen Modell nicht dynamisch modelliert wird. Das bedeutet, ein vergletschertes Hydrotop behält immer diese Landnutzung, auch wenn der Gletscher auf Grund der klimatischen Verhältnisse abschmelzen sollte. Somit verfügen die vergletscherten Hydrotope über einen unerschöpflichen Wasservorrat, der bei steigenden Temperaturen freigesetzt wird. Wenn der Gletscher hingegen aus dem Modell eliminiert wird, fällt dieser Effekt weg.

Dadurch ergibt sich für die Modellversion ohne Vergletscherung eine Abnahme des mittleren jährlichen Abflusses bei unverändertem Niederschlag (0%) und erhöhter Temperatur. Dieser Rückgang der mittleren jährlichen Abflussmengen kann auf die gesteigerte Verdunstung zurückgeführt werden.

### c) Fazit

Der mittlere jährliche Abfluss wird bei den Modellversionen mit aktueller Vergletscherung direkt durch die Niederschlagsänderung gesteuert. Bei unvergletscherten Verhältnissen wird der Abfluss bei Temperaturzunahme zusätzlich leicht reduziert, was auf die gesteigerten Verdunstungsbeträge zurückgeführt werden kann.

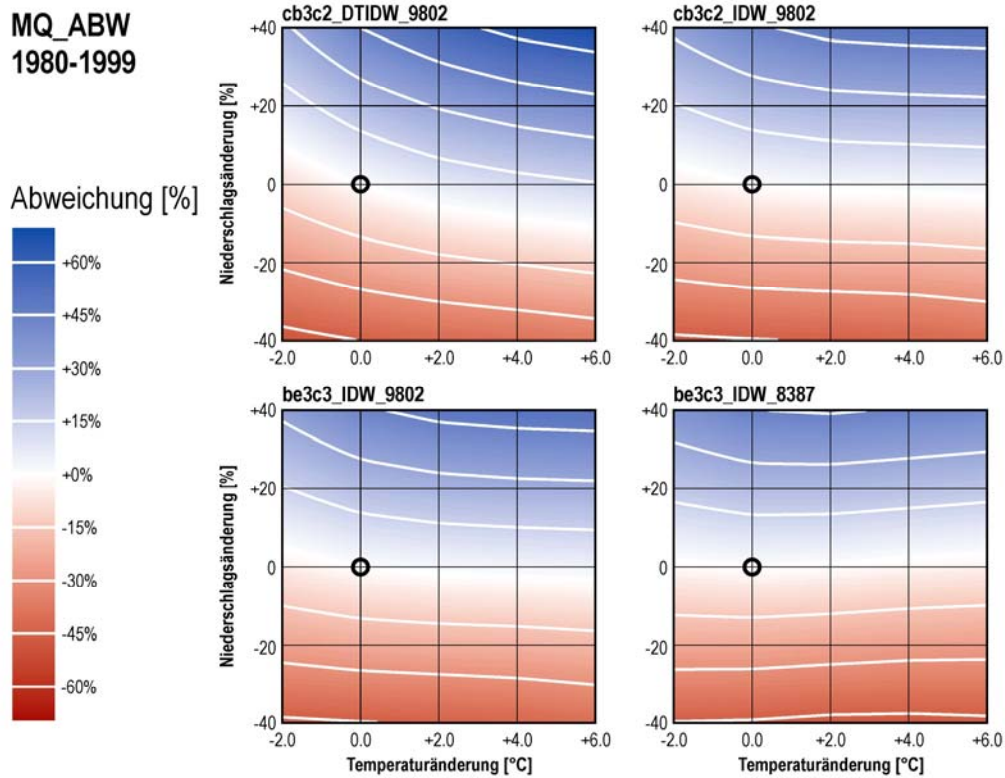


Abbildung 20.4: Sensitivitätsanalyse der mittleren jährlichen Abflusshöhe mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, 1980-1999, Tagesmittel). Prozentuale Abweichungen vom Referenzzustand (schwarzer Kreis).

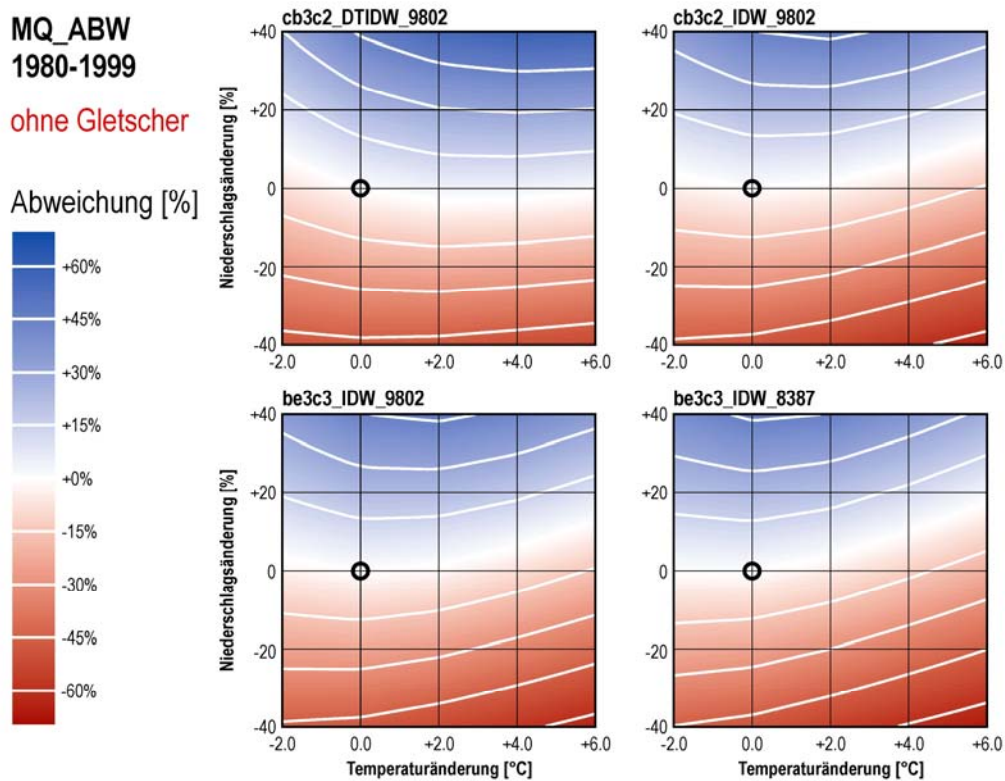


Abbildung 20.5: Sensitivitätsanalyse der mittleren jährlichen Abflusshöhe ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, 1980-1999, Tagesmittel). Prozentuale Abweichungen vom Referenzzustand (schwarzer Kreis).



### 20.2.3 Streuung der täglichen Abflussmengen (q95-q5)

Anhand der Differenz zwischen dem 95%- und dem 5%-Quantil aller modellierten täglichen Abflussmengen (q95-q5) soll die Streuung bzw. die Variabilität der Abflussverhältnisse der Kander-Hondrich beschrieben werden. Der Wert gibt die Spannweite zwischen den kleinen und grossen Abflüssen an. Je grösser dieser Interquantiilsbereich ist, desto grösser wird auch die Variabilität der täglichen Abflussmengen sein. Da sich die Angaben auf die Abflusshöhe beziehen, ist die Differenz (dQ) in [mm] ausgewiesen.

#### a) Veränderung der Streuung der täglichen Abflussmengen mit aktueller Vergletscherung

In Abbildung 20.6 ist die Variabilität der Abflussverhältnisse für das untersuchte Einzugsgebiet Kander-Hondrich mit aktueller Vergletscherung dargestellt. Es ist sowohl eine Temperatur- als auch eine Niederschlagsabhängigkeit zu beobachten, welche für die Modellversionen «cb3c2\_IDW\_9802» (oben rechts), «be3c3\_IDW\_9802» (unten links) und «be3c3\_IDW\_8387» (unten rechts) etwa gleich stark ausgeprägt ist. Bei steigender Temperatur und abnehmendem Niederschlag wird die Variabilität reduziert. Bei Veränderungen von +6 °C bei der Temperatur und -40% beim Niederschlag reduziert sich der Interquantiilsbereich der täglichen Abflusshöhe von aktuell 50 mm auf bis zu 20 mm. Umgekehrt nimmt die Streuung gegenüber den heutigen Verhältnissen (Referenzzustand) mit abnehmender Temperatur und gesteigertem Niederschlag zu. Die Gradienten fallen für die Modellversion «cb3c2\_DTIDW\_9802» (oben links) etwas stärker aus als für die anderen Modellierungen. Zudem zeigen die Ergebnisse dieser Version eine geringere Temperaturabhängigkeit bzw. eine verstärkte Niederschlagsabhängigkeit.

#### b) Veränderung der Streuung der täglichen Abflussmengen ohne Vergletscherung

Für die Modellierungen ohne Vergletscherung tritt die Abhängigkeit der Niederschlags- und Temperaturänderung immer noch auf (Abbildung 20.7). Allerdings wird ersichtlich, dass im Bereich der Temperaturzunahme die Gradienten leicht stärker ausgeprägt sind: Der Interquantiilsbereich der täglichen Abflusshöhen sinkt für die meisten Modellversionen bei extremer Temperaturzunahme und extremer Niederschlagsabnahme auf unter 20 mm. Die Unterschiede der Streuung der täglichen Abflussmengen gegenüber den Resultaten der Modellierungen mit aktueller Vergletscherung sind bei gleich bleibender oder reduzierter Temperatur nur sehr gering. Das fehlende Schmelzwasser des Gletschers kann je nach Temperaturänderung dazu führen, dass die Variabilität der Tagesabflüsse deutlich kleiner wird.

#### c) Fazit

Die Streuung der täglichen Abflussmengen wird sowohl durch Niederschlags- als auch durch Temperaturänderungen beeinflusst. Temperaturzunahme und Niederschlagsabnahme führen zu ausgeglichenen Abflussverhältnissen. Ohne Gletscher wird der Einfluss der Temperaturänderung auf die Streuung der Tagesabflüsse zusätzlich leicht verstärkt.

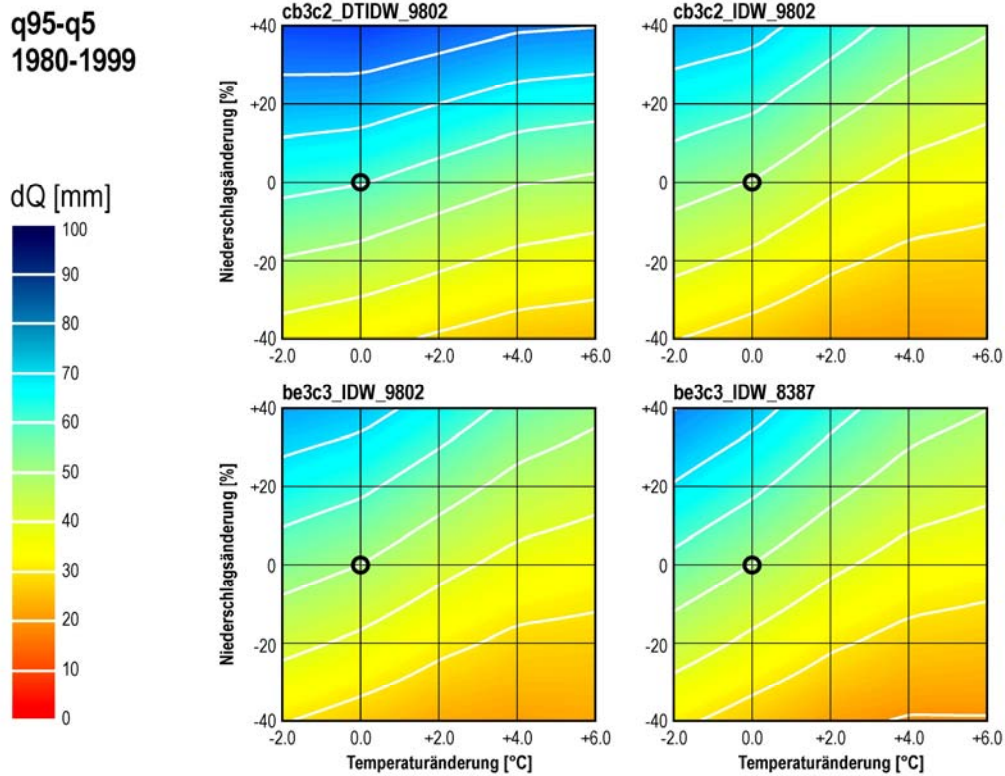


Abbildung 20.6: Sensitivitätsanalyse der Variabilität der täglichen Abflusshöhen mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999, q95-q5: Interquantilsbereich zwischen 95%-Quantil und 5%-Quantil)

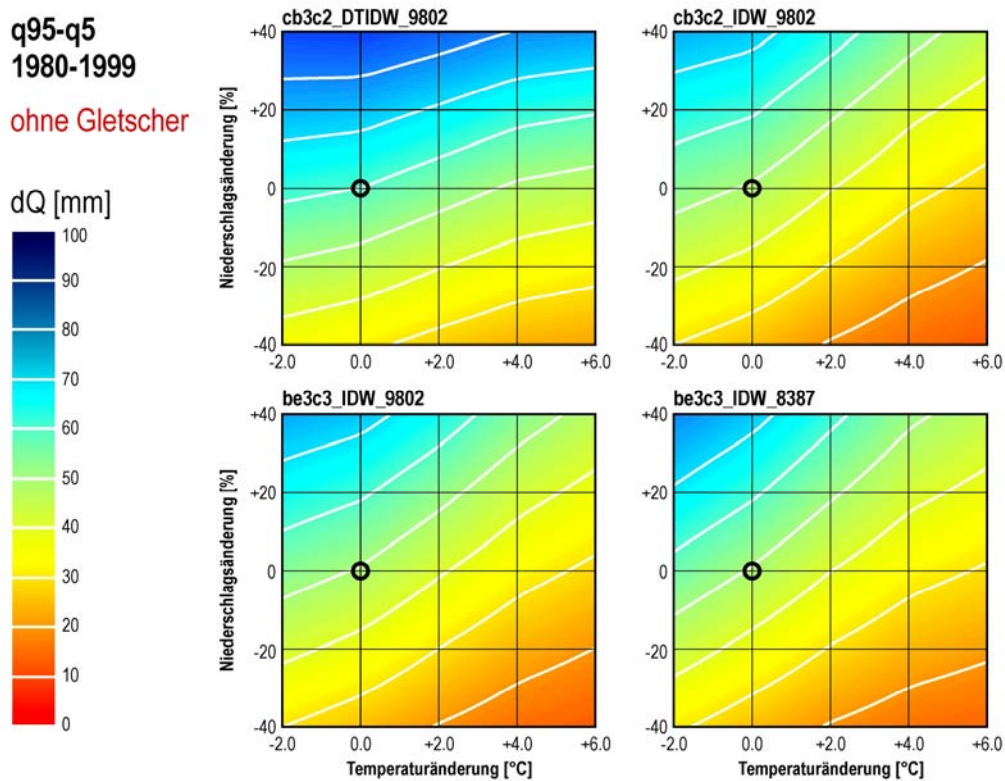


Abbildung 20.7: Sensitivitätsanalyse der Variabilität der täglichen Abflusshöhen ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999, q95-q5: Interquantilsbereich zwischen 95%-Quantil und 5%-Quantil)

### 20.2.4 Saisonale Abflussmengen (MQ-DJF, MQ-JJA)

Die Abhängigkeit der saisonalen Abflussmengen der Kander-Hondrich von den Temperatur- und Niederschlagsänderungen wurde anhand der mittleren Abflüsse in den Winter- bzw. in den Sommermonaten untersucht. Dazu wurden die Abflusshöhen von Dezember bis Januar (Winter, MQ-DJF, Abbildung 20.8 und Abbildung 20.9) und von Juni bis August (Sommer, MQ-JJA, Abbildung 20.10 und Abbildung 20.11) zusammengefasst und die prozentualen Abweichungen gegenüber dem modellierten Referenzzustand (ohne Temperatur- und Niederschlagsänderung) berechnet.

#### a) Veränderung der saisonalen Abflussmengen mit aktueller Vergletscherung

Die Auswertung der Modellierungen mit aktueller Vergletscherung sind in Abbildung 20.8 für die Winter- und in Abbildung 20.10 für die Sommermonate dargestellt. Im **Winter** kann bei den meisten Modellen eine Zunahme der mittleren saisonalen Abflüsse bei erhöhter Temperatur und grösserem Niederschlagseintrag um bis zu +200% gegenüber den unveränderten Verhältnissen von 1980 bis 1999 festgestellt werden. Reduzierte Temperaturen wirken sich erst deutlich bei vermindertem Niederschlagseintrag auf die mittleren saisonalen Abflussverhältnisse der Kander-Hondrich aus. Hier kann der Rückgang bis zu -50% betragen.

Bei den mittleren saisonalen Abflussmengen des vergletscherten Einzugsgebietes wirken sich die Temperatur- und Niederschlagsänderungen im **Sommer** anders aus: Die Änderungen der Temperatur haben einen geringeren Einfluss auf die Abflussmengen als diejenigen des Niederschlags. So ist bei gesteigertem Niederschlag und reduzierter Temperatur bei den meisten Modellversionen eine Zunahme der mittleren Abflussmengen um ca. +50% festzustellen. Dagegen ist bei Temperaturzunahmen von +6 °C und Niederschlagsreduktionen von -40% ein Rückgang des mittleren saisonalen Abflusses um mehr als -45% zu beobachten.

#### b) Veränderung der saisonalen Abflussmengen ohne Vergletscherung

Die Modellierungen ohne Vergletscherung sind in Abbildung 20.9 für die mittleren Winterabflüsse und in Abbildung 20.11 für die mittleren Sommerabflüsse dargestellt. Während für den **Winter** keine Unterschiede gegenüber den Modellierungen mit aktueller Vergletscherung festgestellt werden können, hat das fehlende Schmelzwasser des Gletschers im **Sommer** deutliche Auswirkungen. In dieser Jahreszeit sind ohne Vergletscherung bei Temperaturzunahmen deutlich stärker ausgeprägte Gradienten festzustellen als bei aktueller Vergletscherung. Zudem ist im Sommer der Abfluss stärker von der Temperaturänderung geprägt: Nimmt die Temperatur um +6 °C zu, kann der Abfluss in dieser Jahreszeit bei gleichbleibendem Niederschlagseintrag – auch durch die gesteigerte Verdunstung – um bis zu -50% reduziert werden. Während bei den Modellversionen mit aktueller Vergletscherung diese Veränderungen beim Abfluss durch das Schmelzwasser des Gletschers teilweise noch kompensiert werden können, macht sich das Ausbleiben dieses zusätzlichen Eintrags ohne Gletscher deutlich bemerkbar.

#### c) Fazit

Die mittleren saisonalen Abflussmengen der Kander-Hondrich nehmen im Winter bei steigenden Temperaturen und Niederschlagsmengen zu. Im Sommer werden die mittleren saisonalen Abflussmengen stärker durch die Niederschlagsänderung gesteuert, der Einfluss der Temperaturänderung wird beim unvergletscherten Einzugsgebiet verstärkt.

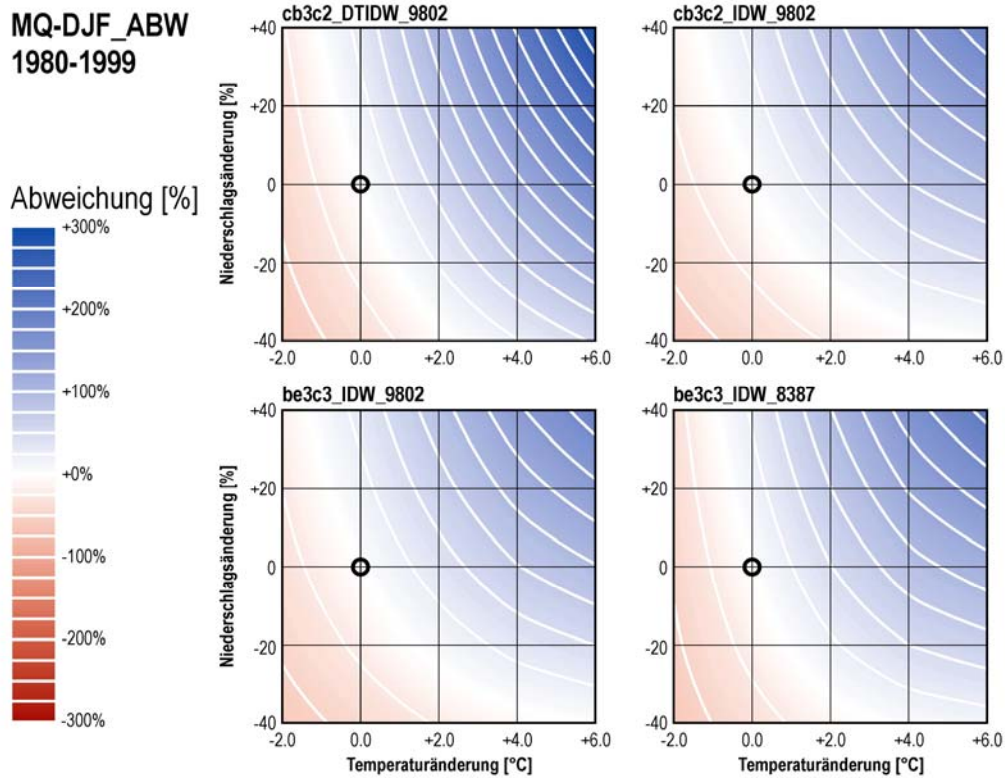


Abbildung 20.8: Sensitivitätsanalyse der mittleren saisonalen Abflussmenge im Winter mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999). Prozentuale Abweichungen vom Referenzzustand (schwarzer Kreis).

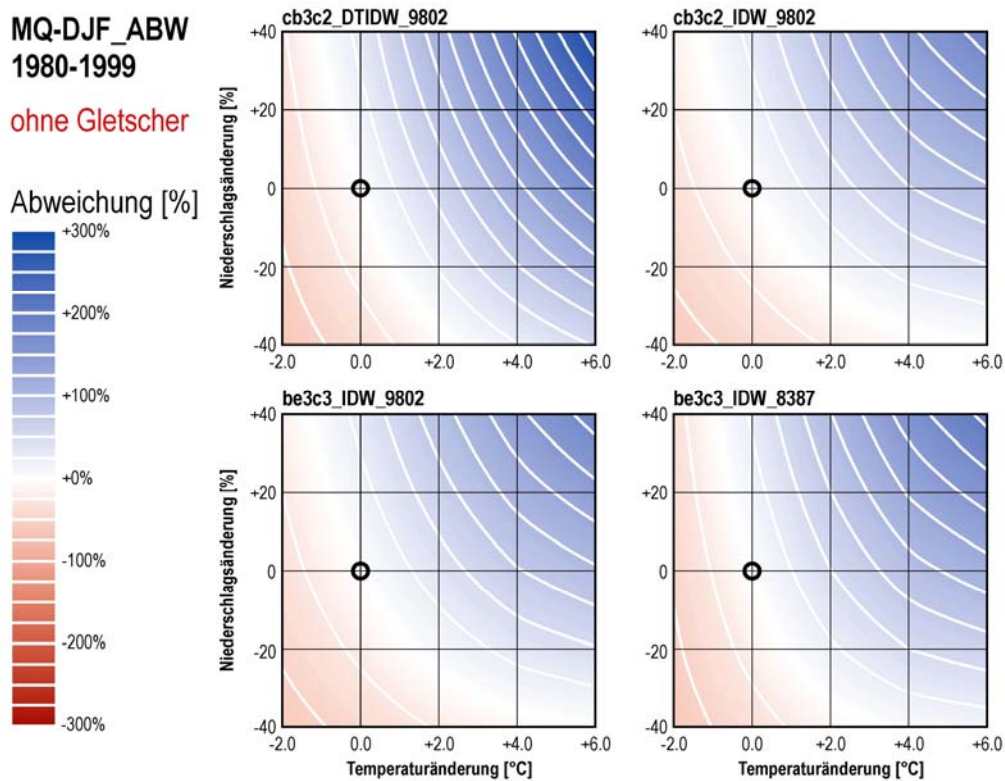


Abbildung 20.9: Sensitivitätsanalyse der mittleren saisonalen Abflussmenge im Winter ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999). Prozentuale Abweichungen vom Referenzzustand (schwarzer Kreis).

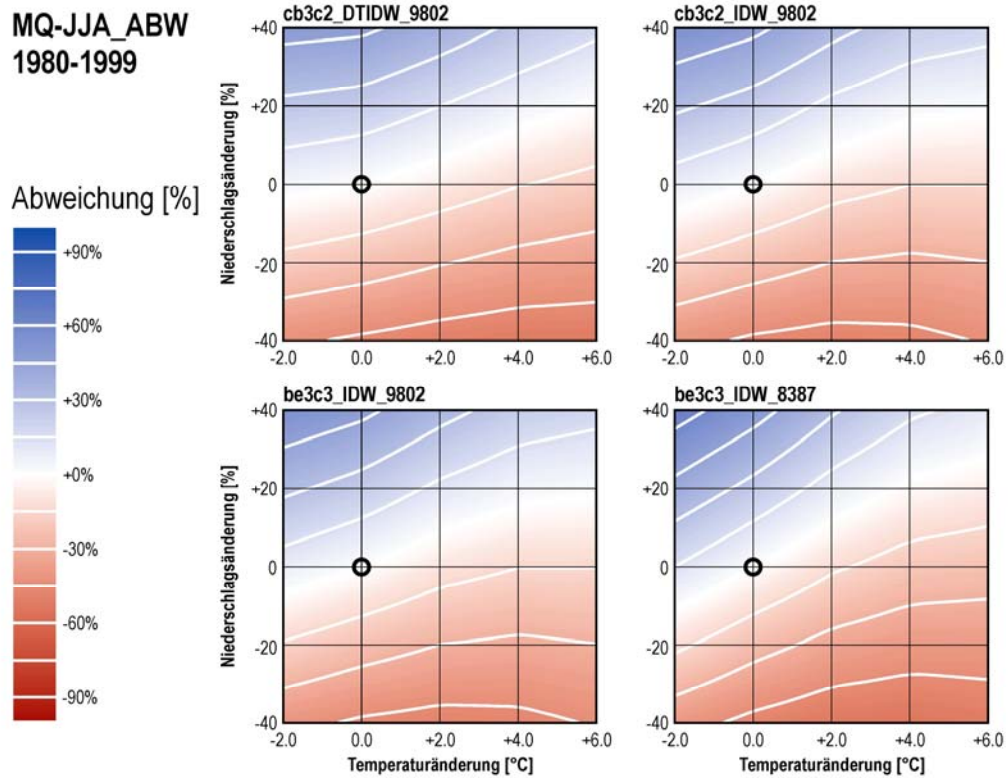


Abbildung 20.10: Sensitivitätsanalyse der mittleren saisonalen Abflussmenge im Sommer mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999). Prozentuale Abweichungen vom Referenzzustand (schwarzer Kreis).

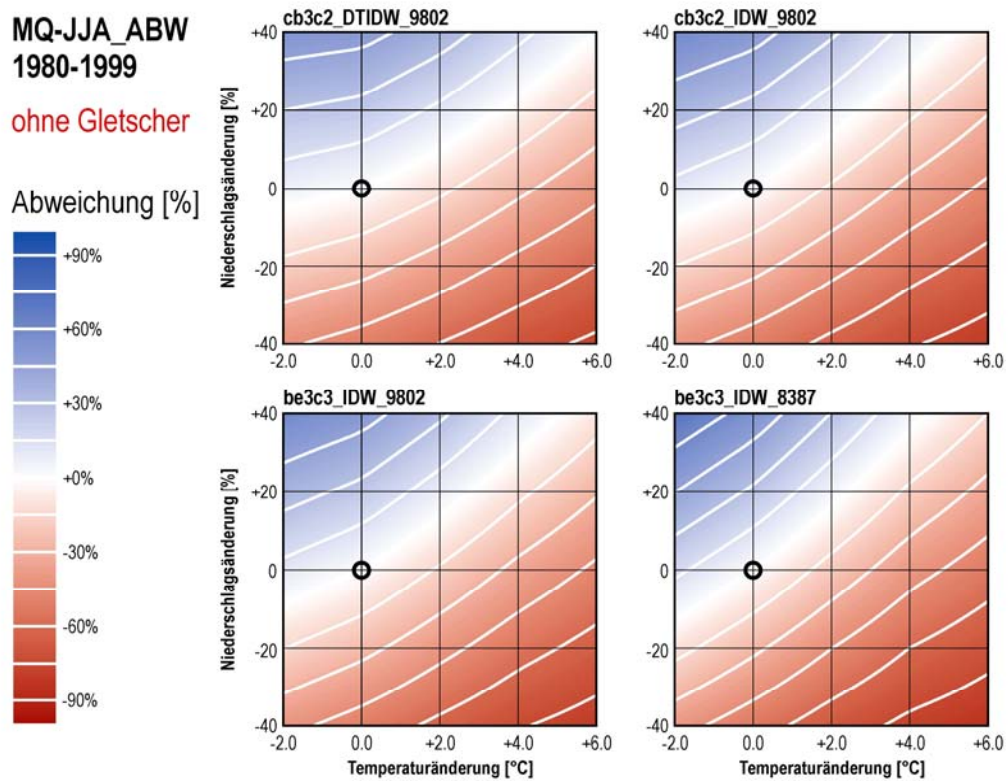


Abbildung 20.11: Sensitivitätsanalyse der mittleren saisonalen Abflussmenge im Sommer ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999). Prozentuale Abweichungen vom Referenzzustand (schwarzer Kreis).

## 20.2.5 Wasserhaushalt

Als Ergänzung zu den Untersuchungen der Abflussverhältnisse (Kapitel 20.2.1 bis Kapitel 20.2.4) soll an dieser Stelle der Einfluss der Temperatur- und Niederschlagsänderungen auf die wichtigsten Wasserhaushaltskomponenten für das untersuchte Einzugsgebiet Kander-Hondrich aufgezeigt werden. In Abbildung 20.12 (mit aktueller Vergletscherung) und Abbildung 20.13 (ohne Vergletscherung) sind die prozentualen Abweichungen der mittleren jährlichen Niederschlags-, Verdunstungs- und Abflussmengen sowie der mittleren jährlichen Schneeschmelze gegenüber dem modellierten Referenzzustand der Periode 1980-1999 (schwarzer Kreis) angegeben. Die dargestellten Resultate stammen aus der Modellversion «be3c3\_IDW\_9802».

### a) Niederschlag

Die Veränderungen beim Niederschlag werden durch den gewählten Wertebereich vorgegeben und bilden eine Eingabegrösse der durchgeführten Modellierungen (vgl. Kapitel 20.1).

### b) Verdunstung

Auf Grund der zur Modellierung der Verdunstung verwendeten Methode nach HAMON (1961) (vgl. Kapitel 18.3) wird die Veränderung der potentiellen Evapotranspiration ausschliesslich durch die Temperatur beeinflusst. Die Verdunstung nimmt pro °C Temperaturzunahme um etwas mehr als 10% zu. Somit können bei einer Steigerung der Temperatur um 4 °C bis zu 45% höhere Evapotranspirationsbeträge auftreten. Die Veränderung des Vergletscherungsgrades hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Verdunstungsbeträge.

### c) Abfluss

Der mittlere jährliche Abfluss der Kander-Hondrich weist, vor allem bei den Modellierungen mit aktueller Vergletscherung und wie in Kapitel 20.2.2 beschrieben, eine deutliche Abhängigkeit von der Niederschlagsänderung auf (vgl. auch Abbildung 20.5). Die Änderungsbeträge des Abflusses zeigen einen annähernd linearen Zusammenhang zur Veränderung des Niederschlags. Bei einer Niederschlagsänderung um +40% und gleichzeitiger Temperaturänderung um mehr als +2 °C wird somit der mittlere jährliche Abfluss um rund +50% gesteigert.

Im Gegensatz zu den übrigen Grössen sind beim mittleren jährlichen Abfluss auch deutliche Veränderungen zwischen den Modellierungen mit und ohne Vergletscherung zu beobachten. Es wird ersichtlich, dass die mittlere jährliche Abflussmenge ohne Vergletscherung eine verstärkte Abhängigkeit von den Temperaturänderungen zeigt.

### d) Schneeschmelze

Die Schneeschmelze – als Indikator für die kurzfristige Speicherung des Niederschlags – zeigt eine deutliche Abhängigkeit von Temperatur und Niederschlagsmenge. Bei extremen Temperaturzunahmen über +4 °C sowie bei Niederschlagsreduktion ist ausschliesslich ein Rückgang der Schneeschmelze zu beobachten. Dagegen nimmt die Schneeschmelze je nach Niederschlagszuwachs und Temperaturänderungen zwischen -2 °C und +4 °C um bis zu +50% zu. Da die Gletscher- und Schneeschmelze in dieser Auswertung nicht zusammengefasst wurden, entsteht kein Unterschied zwischen den Modellierungen mit bzw. ohne Vergletscherung.

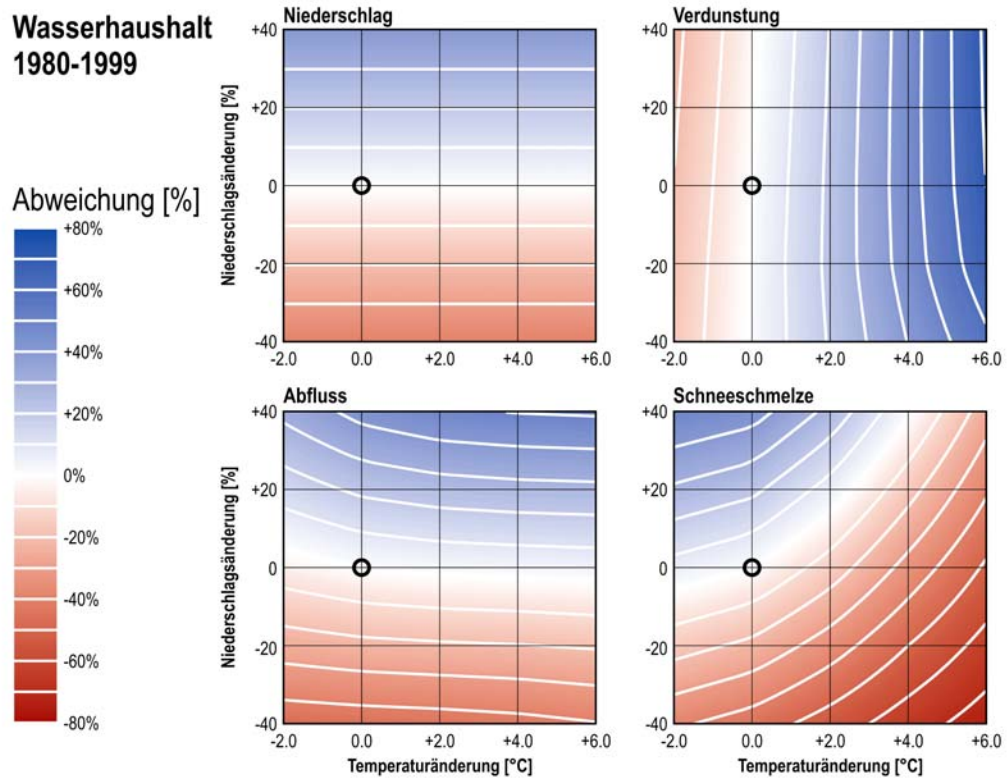


Abbildung 20.12: Sensitivitätsanalyse ausgewählter Wasserhaushaltskomponenten mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999, Modellversion be3c3\_IDW\_9802)

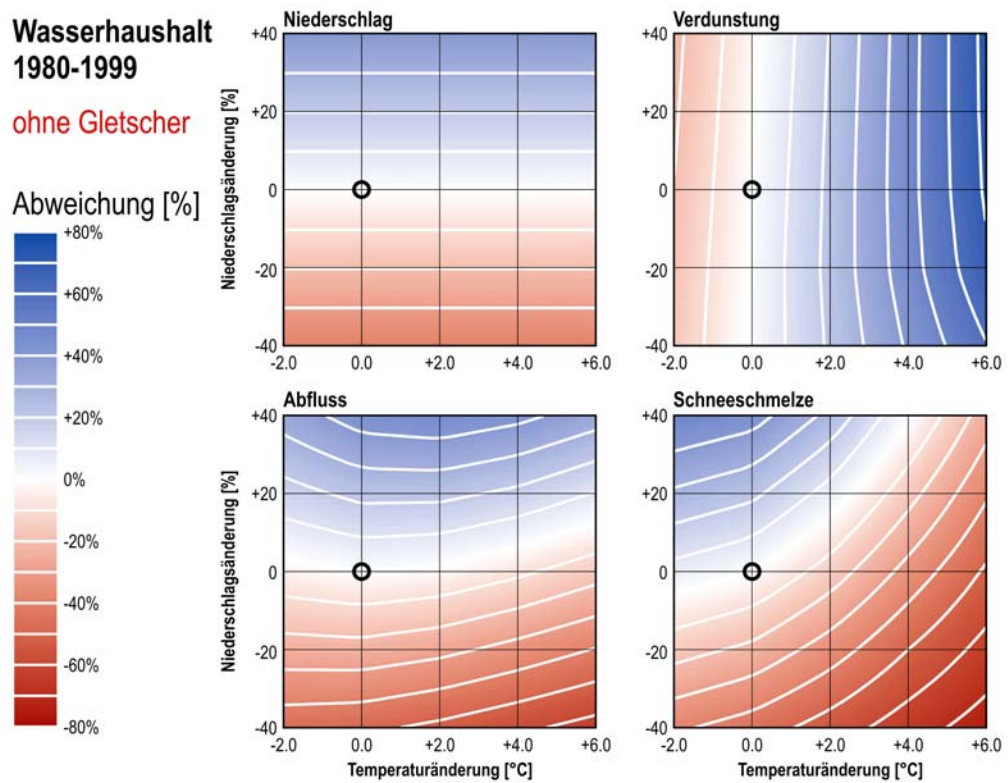


Abbildung 20.13: Sensitivitätsanalyse ausgewählter Wasserhaushaltskomponenten ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999, Modellversion be3c3\_IDW\_9802)

### 20.2.6 Hochwasserabfluss mit 100-jährlicher Wiederkehrperiode (HQ100)

Die Hochwasserabflüsse mit 100-jährlicher Wiederkehrperiode (HQ100), wurden mit Hilfe der **Allgemeinen Extremwertverteilung** (AEV, Gleichung 20.1., vgl. z.B. COLES 2001, ZWIERS & KHARIN 1998) abgeschätzt. Diese Verteilungsfunktion wurde für alle Auswertungen verwendet. Die Abschätzungen basieren jeweils auf 1000 Jahreshochwassern, welche aus den modellierten Abflussdaten jedes Szenarios abgeleitet wurden. Mit dieser umfangreichen Datenbasis könnten die Hochwasserabflüsse mit 100-jährlicher Wiederkehrperiode grundsätzlich auch empirisch abgeleitet werden. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde aber die Anpassung der Verteilungsfunktion an die Jahreshochwasser trotzdem durchgeführt.

$$F(x; \xi, \alpha; \kappa) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \kappa \cdot \left( \frac{x - \xi}{\alpha} \right) \right]^{-1/\kappa} \right\} \quad \text{wobei: } 1 + \kappa \cdot \left( \frac{x - \xi}{\alpha} \right) > 0 \quad \text{Gleichung 20.1}$$

mit:  $\xi$  = Lageparameter  
 $\alpha$  = Skalierungsparameter  
 $\kappa$  = Formparameter

Die verwendete Allgemeine Extremwertverteilung gilt als robust, kann dank dreifacher Parametrisierung ( $\xi, \alpha, \kappa$ ) sehr variabel angepasst werden und eignet sich deshalb auch für viele verschiedene Datengrundlagen – unabhängig ihrer Eigenschaften (FREI 2009). Die Schätzung der Parameter erfolgte in der vorliegenden Untersuchung durchwegs mit der Maximum-Likelihood-Methode, welche insbesondere für grosse Grundgesamtheiten gut geeignet ist (vgl. z.B. COLES 2001).

Zur Illustration, welche Auswirkungen die drei Parameter ( $\xi, \alpha, \kappa$ ) auf die Verteilungsfunktion haben, wurde in Abbildung 20.14 jeweils ein Parameter gezielt variiert.

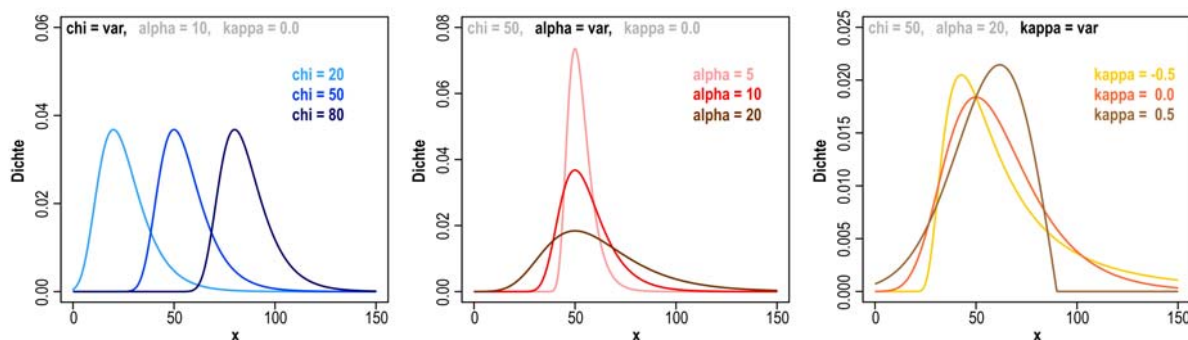


Abbildung 20.14: Auswirkung der drei Parameter  $\xi, \alpha, \kappa$  der Allgemeinen Extremwertverteilung (AEV) auf die Lage, die Skalierung und die Form der Verteilung.

Da für die vorliegende Untersuchung auch die Streuung der Hochwasserabflüsse bzw. die Veränderungen in den extremen Bereichen der Verteilung von herausragendem Interesse sind, wurde neben dem 100-jährlichen Hochwasserabfluss auch der Skalierungsparameter  $\alpha$  (Alpha) auf Sensitivität gegenüber den Veränderungen von Niederschlag und Temperatur untersucht (vgl. Kapitel 20.2.7). Allerdings muss bei dieser Auswertung auch der Lageparameter  $\xi$  (Chi) berücksichtigt



werden, welcher die Veränderungen im extremen Wertebereich der Hochwasserabflüsse ebenfalls massgeblich bestimmt.

### **a) Veränderung des HQ100 mit aktueller Vergletscherung**

In Abbildung 20.15 sind für das untersuchte Einzugsgebiet Kander-Hondrich die prozentualen Abweichungen des Hochwasserabflusses mit 100-jährlicher Wiederkehrperiode (HQ100) gegenüber dem entsprechenden Wert des modellierten Referenzzustandes (Periode 1980-1999, schwarzer Kreis) dargestellt. Die Resultate stammen aus den Modellierungen mit aktueller Vergletscherung.

Aus Abbildung 20.15 wird ersichtlich, dass das HQ100 vorwiegend von den Niederschlagsänderungen und in deutlich geringerem Ausmass von der Temperaturänderung abhängig ist. Bei unveränderter Temperatur gegenüber den Bedingungen der Periode 1980-1999 (0 °C) ist ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Zunahme der Niederschlagsmenge und dem HQ100 festzustellen. Das bedeutet, dass eine Niederschlagsänderung von +20% beim HQ100 eine Zunahme von +20% hervorruft. Dieser Zusammenhang verändert sich aber bei zunehmender Temperatur, so dass sich im Bereich der maximalen Temperaturänderung die Abnahme der Hochwasserabflüsse bei reduziertem Niederschlagseintrag deutlich verstärkt. In diesem Bereich kann eine Niederschlagsreduktion von -20% zu einer Abnahme des HQ100 um bis zu -50% führen.

Die Modellversionen «cb3c2\_IDW\_9802» (oben rechts), «be3c3\_IDW\_9802» (unten links), «be3c3\_IDW\_8387» (unten rechts) zeigen vergleichbare Muster, während «cb3c2\_DTIDW\_9802» (oben links) deutlich unterschiedliche Resultate liefert. Hier ist ein wesentlich grösserer Einfluss der Temperaturänderung festzustellen: Die Hochwasserabflüsse nehmen bei diesen Auswertungen sowohl mit der Temperatur als auch mit den Niederschlagsmengen zu. Die prozentualen Veränderungen können je nach Änderungsbeträgen von Temperatur und Niederschlag auch wesentlich grösser sein.

### **b) Veränderung des HQ100 ohne Vergletscherung**

Die Ergebnisse für die Modellierungen ohne Vergletscherung weisen gegenüber denjenigen der Modellierungen mit aktueller Vergletscherung nur geringe Unterschiede auf. Dies ist ein Hinweis darauf, dass der Beitrag der Gletscherschmelze zu den Jahreshochwassern bzw. zum HQ100 von untergeordneter Bedeutung ist.

### **c) Fazit**

Das HQ100 der Kander-Hondrich wird in erster Linie durch die Niederschlagsänderungen gesteuert, wobei ein fast linearer Zusammenhang zwischen den beiden Grössen festgestellt werden kann. Eine Abhängigkeit des HQ100 von der Temperatur ist erst bei grösserer Temperaturzunahme zu erkennen. Hier wirkt sich eine erhöhte Temperatur als zusätzliche Reduktion des HQ100 bei gleichzeitiger extremer Niederschlagsabnahme aus. Der Gletscher hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Veränderung des HQ100.

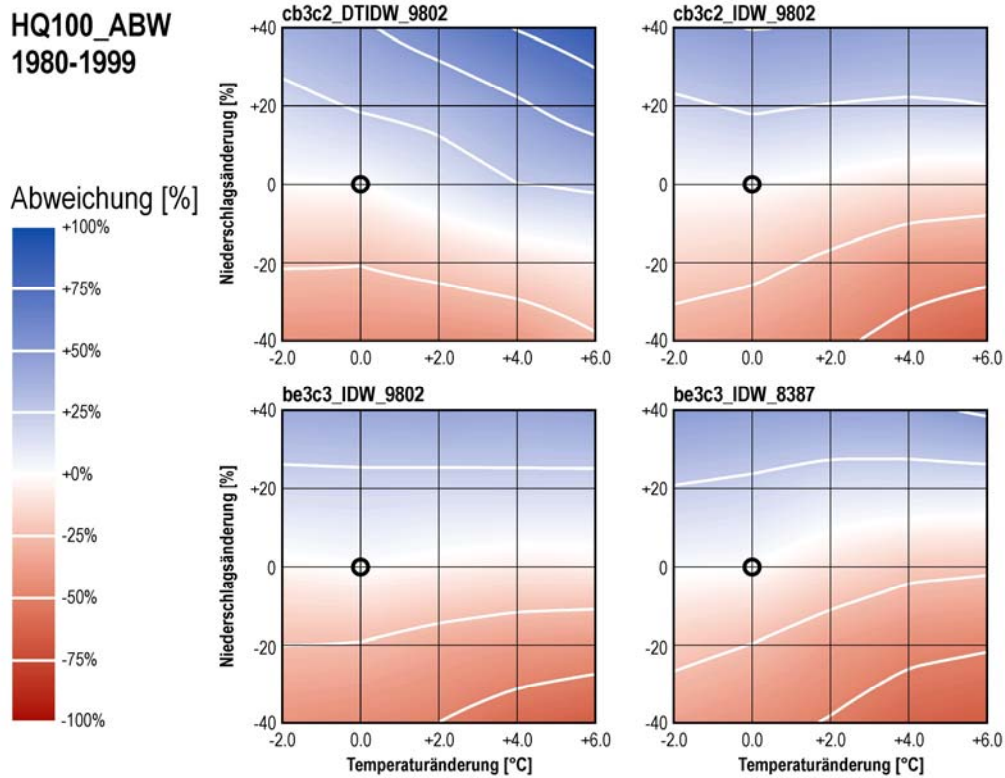


Abbildung 20.15: Sensitivitätsanalyse der 100-jährlichen Hochwasserabflüsse mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999). Prozentuale Abweichungen vom Referenzzustand (schwarzer Kreis).

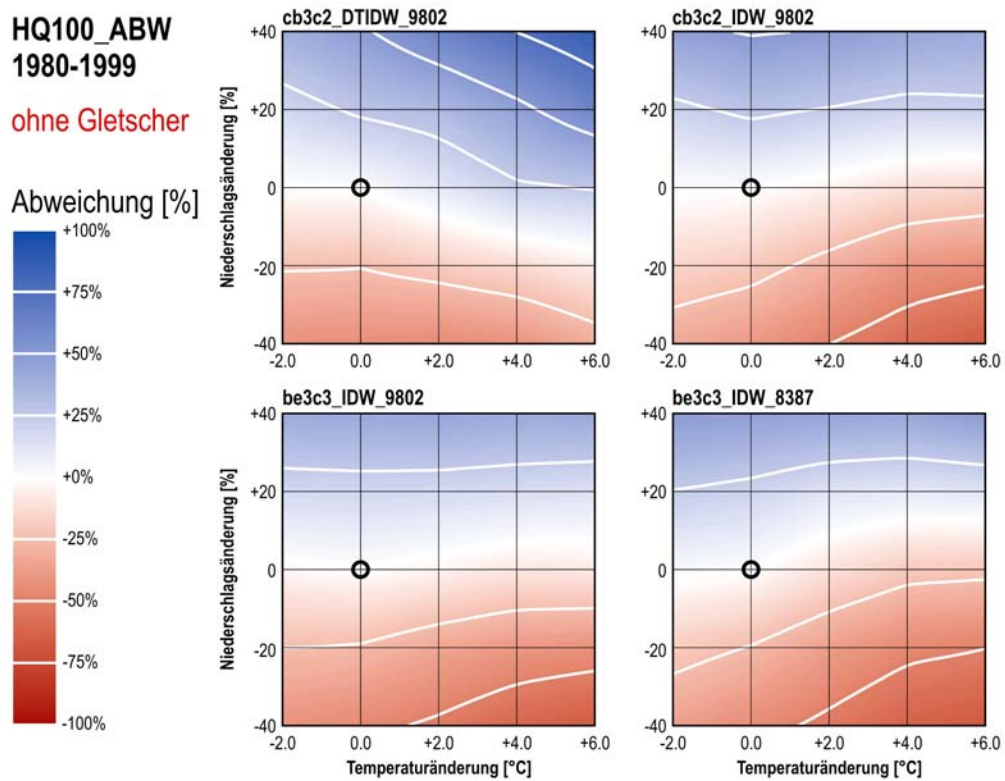


Abbildung 20.16: Sensitivitätsanalyse der 100-jährlichen Hochwasserabflüsse ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999). Prozentuale Abweichungen vom Referenzzustand (schwarzer Kreis).

### 20.2.7 Streuung und Mittelwert der Hochwasserabflüsse (Alpha, Chi)

Wie in Kapitel 20.2.6 beschrieben, wird an dieser Stelle auf die Sensitivität des Skalierungsparameters «Alpha» sowie des Lageparameters «Chi» der Allgemeinen Extremwertverteilung (AEV) gegenüber den Veränderungen bei Temperatur und Niederschlag eingegangen. Wie in Abbildung 20.14 dargestellt, weist ein grosser Wert von «Alpha» auf eine grosse Streuung der Verteilungsfunktion hin. Bei konstantem Lageparameter «Chi» ist ein grösserer Wert von «Alpha» mit einer Zunahme bei den extremen Hochwasserabflüssen verbunden. Andererseits beschreibt «Chi» auch die Veränderung bei den mittleren jährlichen Hochwasserabflüssen.

#### a) Veränderung von Alpha und Chi mit aktueller Vergletscherung

Die Resultate der Modellierungen für das untersuchte Einzugsgebiet Kander-Hondrich mit aktueller Vergletscherung sind in Abbildung 20.17 (für «Alpha») und in Abbildung 20.19 (für «Chi») enthalten. Es wird ersichtlich, dass der Skalierungsparameter **«Alpha»** bei den meisten Modellversionen eine geringe Temperaturabhängigkeit und eine stärker ausgeprägte Niederschlagsabhängigkeit aufweist. Bei unveränderten Temperaturen (Temperaturänderung 0 °C) ist bei grösseren Niederschlagsmengen eine Zunahme von «Alpha» zu erwarten. Nimmt jedoch nur die Temperatur zu, so wird die Streuung bei den meisten Modellversionen leicht kleiner. Bei extremer Temperaturzu- und Niederschlagsabnahme ist die Streuung der Hochwasserabflüsse am kleinsten, wogegen die maximale Streuung für die grössten modellierten Niederschlagszunahmen auftritt und die Abhängigkeit gegenüber der Temperaturänderung nahezu nicht mehr ersichtlich ist. Ein ähnliches Muster ist auch beim Lageparameter **«Chi»** zu beobachten. Wobei auch noch bei extremer Niederschlagsänderung eine leichte Temperaturabhängigkeit festgestellt werden kann.

Die beiden Modellversionen «cb3c2\_IDW\_9802» (oben rechts) und «be3c3\_IDW\_8387» (unten rechts) zeigen ein sehr ähnliches Muster. Dagegen sind beim Modell «be3c3\_IDW\_9802» (unten links) etwas grössere Werte von Alpha bei extremer Niederschlagszunahme zu beobachten. Die Resultate der Modellversion «cb3c2\_DTIDW\_9802» (oben links) weisen ein deutlich anderes Muster auf.

#### b) Veränderung von Alpha und Chi ohne Vergletscherung

Bei den Modellierungen ohne Vergletscherung (Abbildung 20.8, Abbildung 20.10) sind bei **«Alpha»** und **«Chi»** nur geringe Abweichungen von den beschriebenen Verhältnissen der Modellierungen mit aktueller Vergletscherung zu beobachten. Differenzen zeigen sich vorwiegend bei der Kombination von extremer Temperaturzunahme zwischen +4 °C und +6 °C und Niederschlagsreduktion von -20 bis -40%, wo die Gradienten bei «Alpha» etwas schwächer ausgeprägt sind und bei «Chi» die Temperaturabhängigkeit noch leicht verstärkt wird.

#### c) Fazit

Der Skalierungsparameter «Alpha» und der Lageparameter «Chi» werden stärker durch Niederschlags- als durch Temperaturänderungen geprägt. Aus den Sensitivitätsflächen geht hervor, dass erhöhte Niederschlagsmengen zu grösseren mittleren Hochwasserabflüssen (Chi) und zu einer Zunahme bei den extremen Ereignissen (Alpha) führen. Temperaturzunahme führt bei den mittleren Hochwasserabflüssen zu einer leichten Reduktion und zu weniger extremen Hochwasserabflüssen. Einen sehr geringen Einfluss hat die Änderung der Vergletscherung.

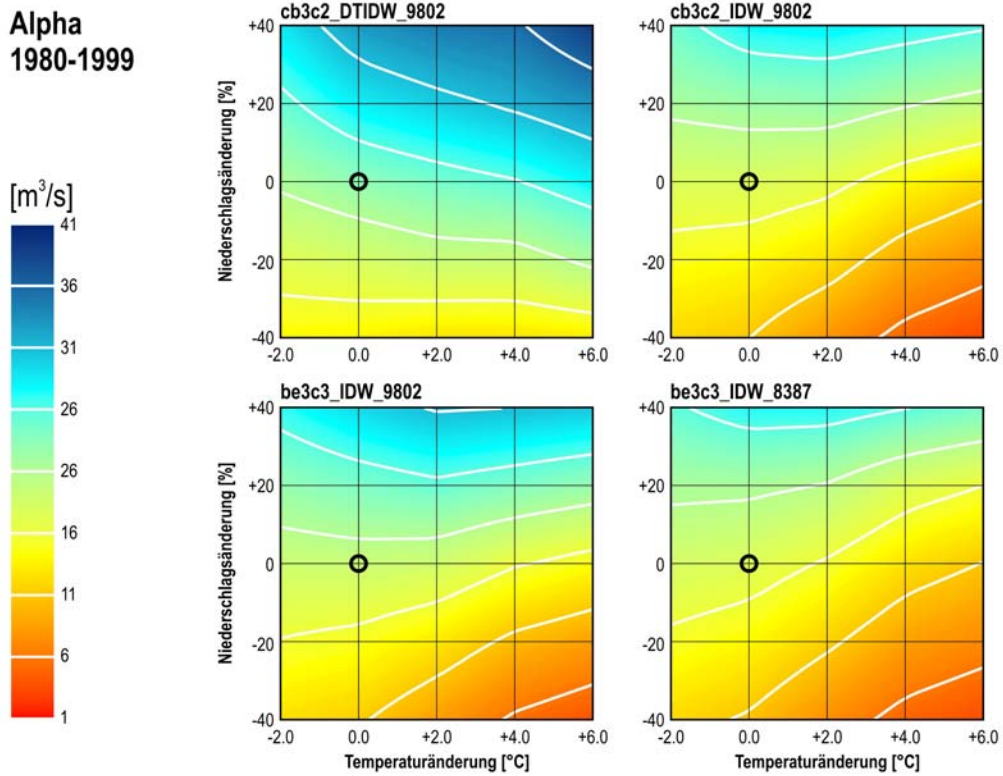


Abbildung 20.17: Sensitivitätsanalyse des Skalierungsparameters Alpha mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999)

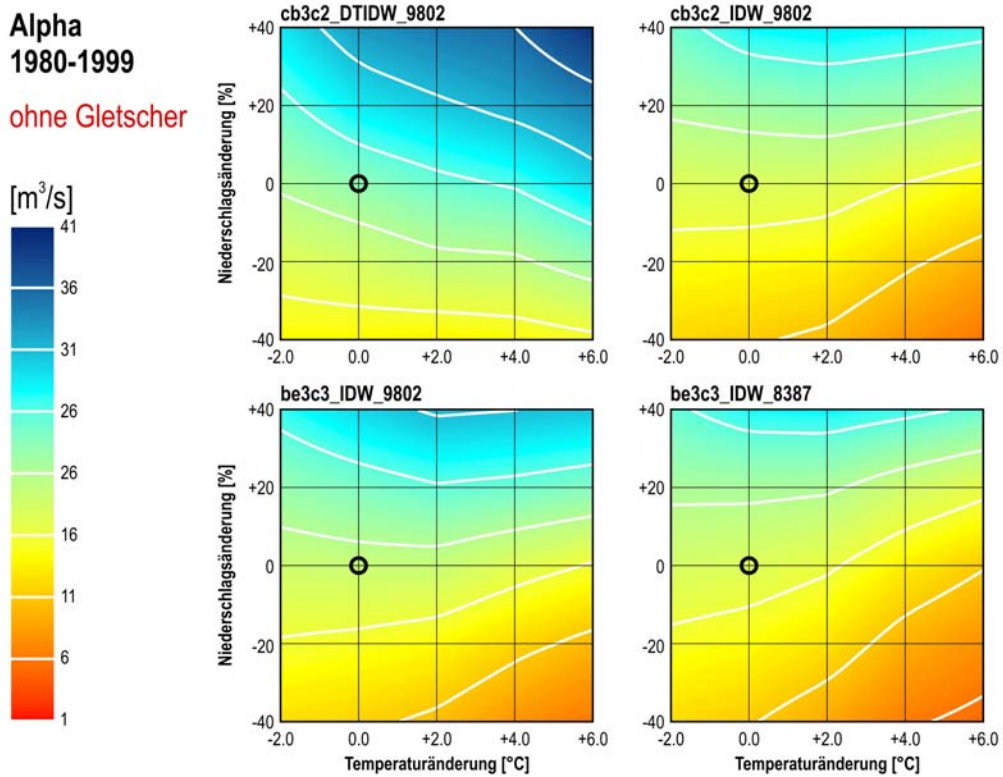


Abbildung 20.18: Sensitivitätsanalyse des Skalierungsparameters Alpha ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999)

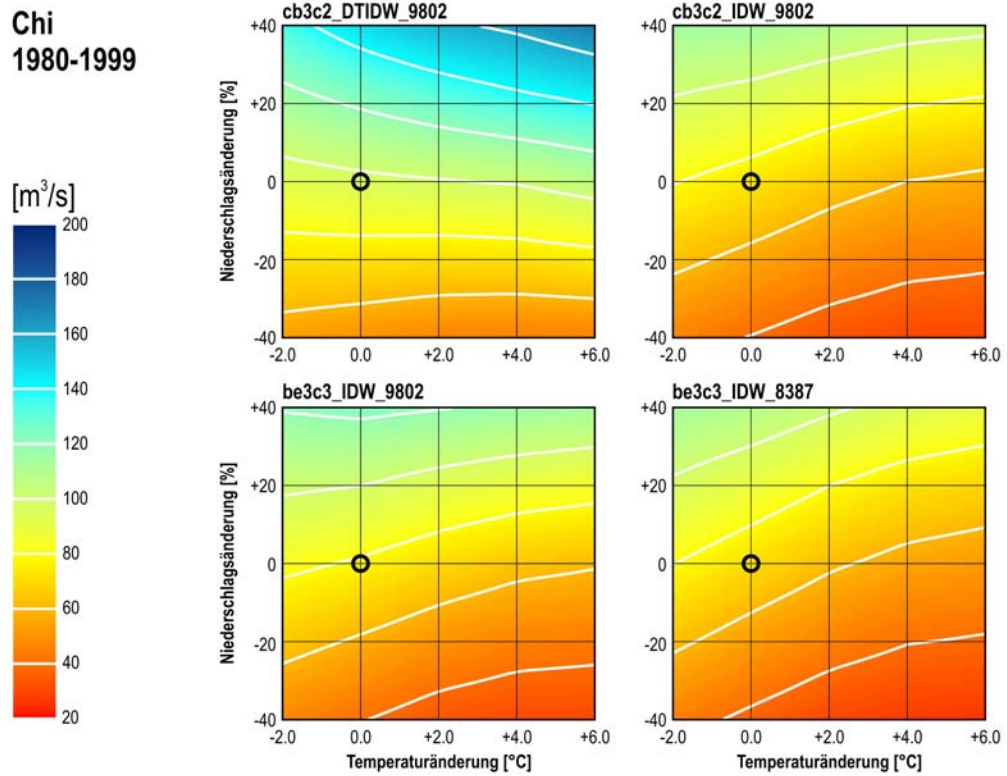


Abbildung 20.19: Sensitivitätsanalyse des Lageparameters Chi mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999)

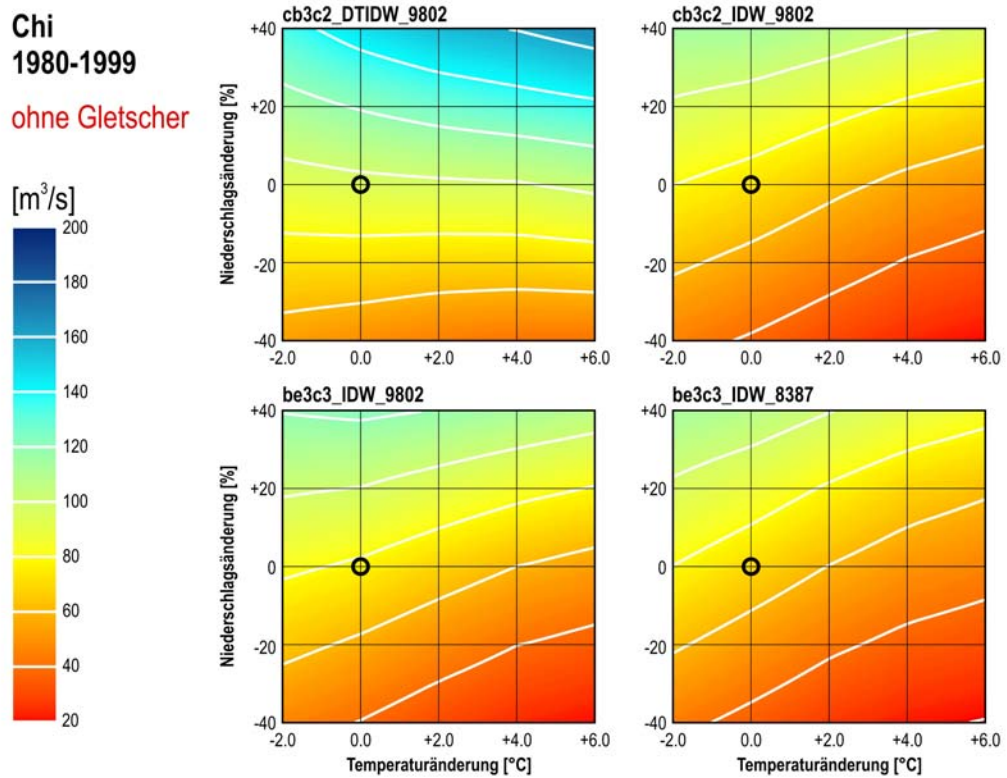


Abbildung 20.20: Sensitivitätsanalyse des Lageparameters Chi ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999)

## 20.2.8 Mittlerer Zeitpunkt und zeitliche Streuung der Jahreshochwasser (HQa\_MD und HQa\_r)

Die Resultate in diesem Unterkapitel werden zuerst in Form von zwei Übersichtsgrafiken dargestellt, welche die Ergebnisse der Modellversion «be3c3\_IDW\_9802» enthalten (Abbildung 20.21 und Abbildung 20.22). Auf die vertiefte Auswertung der beiden in den Übersichtsgrafiken ersichtlichen Kennwerte HQa\_MD (Mittlerer Tag) und HQa\_r (zeitliche Streuung der Eintretenszeitpunkte) wird danach in Form von Sensitivitätsflächen eingegangen (Abbildung 20.23 bis Abbildung 20.26).

### a) Darstellung anhand des Burn-Kreises

Der mittlere Zeitpunkt der Jahreshochwasser wurde mit der Methode nach BURN (1997) berechnet. Dabei wird der Julianische Tag, an welchem das jährlich grösste Hochwasserereignis auftritt in ein entsprechendes Winkelmass (hier: Bogenmass) umgerechnet (Gleichung 20.2). Dieser Wert entspricht der Richtung eines Vektors mit Einheitslänge 1. Aus den Winkeln aller Vektoren lässt sich einerseits der direktionale Mittelwert, welcher dem mittleren Tag der Jahreshochwasser entspricht (Gleichung 20.3 bis Gleichung 20.8), sowie der Kennwert  $r$  berechnen, welcher ein Mass für die zeitliche Streuung der Eintretenszeitpunkte der Jahreshochwasser darstellt (Gleichung 20.9). Nimmt dieser Kennwert  $r$  einen Wert nahe 0 an, so weist dies auf eine grosse Streuung hin, bei einem Wert von 1 konzentrieren sich die Jahreshochwasser auf einen einzigen Tag und die zeitliche Streuung der Jahreshochwasser ist entsprechend gering. Für die Darstellung der Ergebnisse in einem sogenannten «Burn-Kreis» (vgl. BURN 1997, Abbildung 20.21 und Abbildung 20.2) wurden die berechneten Koordinaten durch Transformation anschliessend soweit angepasst, dass sich ein möglichst einfach zu erfassendes Bild ergibt: Der Jahresbeginn (1.1.) weist in die positive Richtung der y-Achse und die Orientierung folgt dem Uhrzeigersinn.

Bei der Interpretation dieser Auswertungen sind also jeweils zwei Kennwerte zu berücksichtigen: Der **mittlere Tag der Jahreshochwasser** (HQa\_MD) sowie die **zeitliche Streuung der Jahreshochwasser** (HQa\_r), welche am Betrag der Kenngrösse  $r$  ersichtlich wird.

$$\theta_i = JD_i \cdot (2\pi \cdot ND) \qquad 0 \leq \theta_i \leq 2\pi \qquad \text{Gleichung 20.2}$$

mit:  $\theta$  = Bogenmass für den Tag des  $i$ -ten Jahreshochwassers  
 $JD$  = Julianischer Tag des  $i$ -ten Jahreshochwassers  
 $ND$  = Anzahl Tage des entsprechenden Jahres

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \cos(\theta_i) \qquad \text{Gleichung 20.3}$$

mit:  $\bar{x}$  =  $x$ -Koordinate des mittleren Tages der Jahreshochwasser  
 $N$  = Anzahl Jahre

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \sin(\theta_i) \qquad \text{Gleichung 20.4}$$

mit:  $\bar{y}$  =  $y$ -Koordinate des mittleren Tages der Jahreshochwasser  
 $N$  = Anzahl Jahre

$$\bar{\theta} = \arctan(\bar{y} / \bar{x}) \quad \text{falls im 1. Quadrant } (\bar{x} > 0, \bar{y} > 0) \quad \text{Gleichung 20.5}$$

$$\bar{\theta} = \arctan(\bar{y} / \bar{x}) + \pi \quad \text{falls im 2. und 3. Quadrant } (\bar{x} < 0) \quad \text{Gleichung 20.6}$$

$$\bar{\theta} = \arctan(\bar{y} / \bar{x}) + 2\pi \quad \text{falls im 4. Quadrant } (\bar{x} > 0; \bar{y} < 0) \quad \text{Gleichung 20.7}$$

mit:  $\bar{\theta}$  = Winkel für den mittleren Tag der Jahreshochwasser (im Bogenmass)

$$MD = \bar{\theta} \cdot (ND / 2\pi) \quad \text{Gleichung 20.8}$$

mit:  $\bar{\theta}$  = Winkel für den mittleren Tag der Jahreshochwasser (im Bogenmass)  
 $ND$  = Anzahl Tage eines durchschnittlichen Jahres

$$r = \sqrt{(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2} \quad 0 \leq r \leq 1 \quad \text{Gleichung 20.9}$$

mit:  $r$  = Kennwert zur Beurteilung der zeitlichen Streuung der Eintretenstage der Jahreshochwasser

Abbildung 20.21 enthält für jedes Klimaszenario der Modellierung «be3c3\_IDW\_9802» den entsprechenden Burn-Kreis (Jahresverlauf im Uhrzeigersinn). Die blauen Punkte entsprechen dem Eintretensdatum eines Jahreshochwassers, die Richtung des roten Pfeils zeigt den mittleren Tag der Jahreshochwasser und die Länge des Pfeils entspricht der Kenngrösse  $r$ . Der Monat, auf welchen der mittlere Tag der Jahreshochwasser fällt, wurde zur Verdeutlichung als farbiger Sektor hervorgehoben. Der Burn-Kreis für den modellierten Referenzzustand, welcher die unveränderten Verhältnisse von 1980 bis 1999 aufzeigt, ist mit einem schwarzen Rahmen markiert.

Folgendes Muster wird aus Abbildung 20.21, in welcher die Resultate für die Modellierungen **mit aktueller Vergletscherung** enthalten sind, ersichtlich:

- > Der mittlere Tag des Jahreshochwassers (HQa\_MD) wird sowohl von der Temperatur- als auch von der Niederschlagsänderung beeinflusst. Bei Zunahme der Temperatur und des Niederschlags verschiebt sich der **mittlere Tag der Jahreshochwasser** um wenige Tage auf einen späteren Zeitpunkt im Jahr. Durch diese geringe Verschiebung tritt der mittlere Tag der Jahreshochwasser entweder im Juni oder im Juli auf.
- > Sowohl die Zunahme der Temperatur als auch diejenige des Niederschlags bewirken, dass die **zeitliche Streuung der Jahreshochwasser** grösser wird, was sich an der unterschiedlichen Verteilung der blauen Punkte auf dem Kreis zeigt. Die Temperatur hat dabei einen wesentlich grösseren Einfluss: Die Streuung wird bei extremer Temperatur- und bei Niederschlagszunahme grösser, was sich in einer reduzierten Kenngrösse  $r$  (Länge des roten Pfeils) äussert und auf die grössere Streuung der Jahreshochwasser sowie auf die Unsicherheit bei der Bestimmung des mittleren Tages der Jahreshochwasser hinweist.

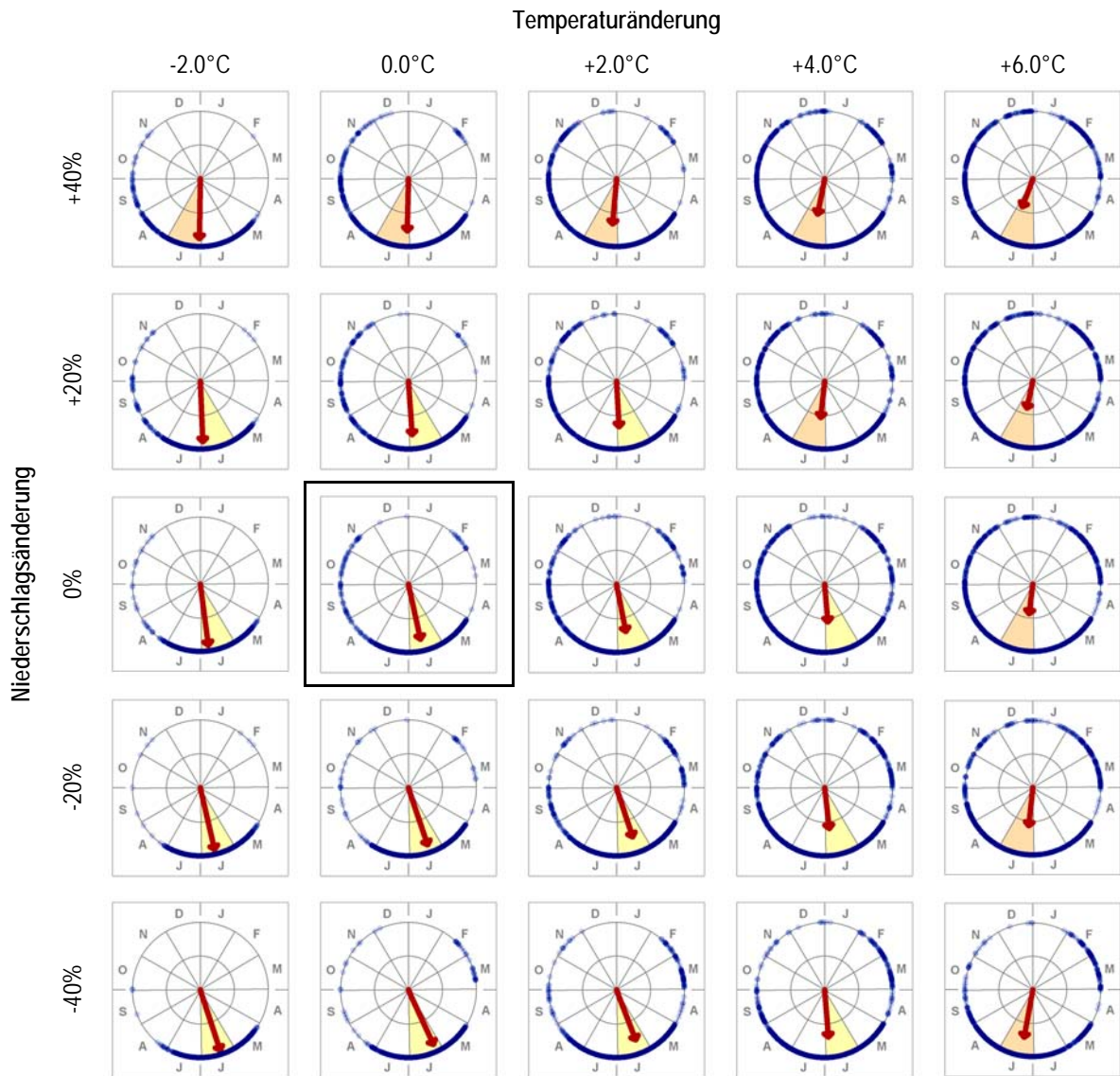


Abbildung 20.21: Übersichtgrafik: Burn-Kreise für die Eintretenstage der Jahreshochwasser mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999, Modellversion: be3c3\_IDW\_9802). Jahreskreise für verschiedene Kombinationen von Temperatur- und Niederschlagsänderungen: blaue Punkte = Eintretenstage der Jahreshochwasser; Richtung des roten Pfeils = mittlerer Tag der Jahreshochwasser; Länge des roten Pfeils = Streuungsmass; farbiger Sektor = Monat mit mittlerem Tag der Jahreshochwasser; schwarzer Rahmen = Referenzzustand.

Die Resultate der Modellierungen, welche **ohne Gletscher** durchgeführt wurden, zeigen ein ähnliches Bild (vgl. Abbildung 20.22).

- > Der **mittlere Tag der Jahreshochwasser** (MD) fällt gegenüber den Modellierungen mit aktueller Vergletscherung und insbesondere bei den Szenarien mit extremer Temperaturzunahme und gleichzeitiger Niederschlagsabnahme auf einen früheren Zeitpunkt im Jahresverlauf.
- > Bei den gleichen Klimaszenarien weist zudem die Kenngrösse  $r$  einen sehr kleinen Wert auf: Die **Streuung** der Eintretenstage wird mit zunehmender Temperatur deutlich grösser, womit auch die Unsicherheit zunimmt, mit welcher der mittlere Tag der Jahreshochwasser bestimmt werden kann.



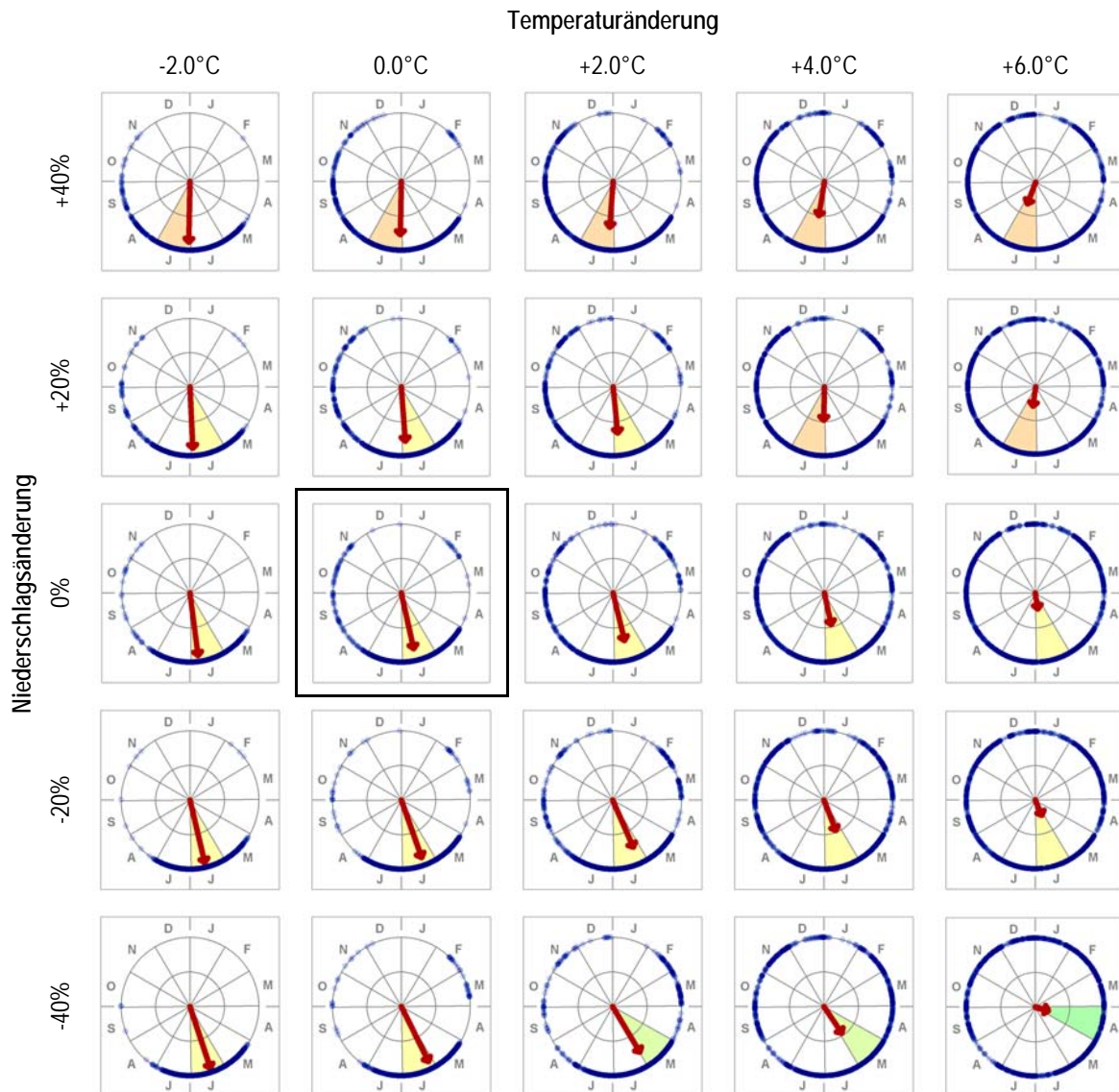


Abbildung 20.22: Übersichtsgrafik: Burn-Kreise für die Eintretenstage der Jahreshochwasser ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999, Modellversion: be3c3\_IDW\_9802). Jahreskreise für verschiedene Kombinationen von Temperatur- und Niederschlagsänderungen: blaue Punkte = Eintretenstage der Jahreshochwasser; Richtung des roten Pfeils = mittlerer Tag der Jahreshochwasser; Länge des roten Pfeils = Streuungsmass; farbiger Sektor = Monat mit mittlerem Tag der Jahreshochwasser; schwarzer Rahmen = Referenzzustand.

- > Bei den Szenarien mit unveränderten oder reduzierten Temperaturen sind gegenüber den Modellierungen mit aktueller Vergletscherung kaum Veränderungen festzustellen. Hier kann eine geringere Streuung und ein deutlich sicherer mittlerer Tag der Jahreshochwasser im Zeitraum zwischen Ende Juni und Anfangs Juli beobachtet werden. Die Pfeillänge bzw. die Kenngrösse  $r$  nehmen bei diesen Szenarien maximale Werte an. Damit verbunden treten in mehreren Monaten keine Jahreshochwasser mehr auf.

Die **Gemeinsamkeiten und Unterschiede** der Modellierungen mit bzw. ohne Vergletscherung können folgendermassen zusammengefasst werden:

- > Der mittlere Tag der Jahreshochwasser verändert sich bei den Modellierungen mit und ohne Vergletscherung für die meisten Szenarien innerhalb weniger Wochen. Nur bei extremen Temperaturzunahmen und gleichzeitiger Niederschlagsreduktion lassen sich Unterschiede feststellen. In diesem Bereich der Veränderungen kann bei den Modellierungen ohne Vergletscherung auch ein früherer Eintretenszeitpunkt des mittleren Tages der Jahreshochwasser gegenüber den Modellierungen mit aktueller Vergletscherung beobachtet werden.
- > Die Streuung der Jahreshochwasser zeigt bei den Modellierungen ohne Vergletscherung eine deutlich ausgeprägte Abhängigkeit von der Temperaturänderung, wogegen dieser Zusammenhang bei den Modellierungen mit aktueller Vergletscherung nur in abgeschwächter Form beobachtet werden kann.

## b) Sensitivitätsflächen

Die Ergebnisse der **Sensitivitätsanalyse** für den mittleren Tag der Jahreshochwasser (HQa\_MD) und die zeitliche Streuung der Eintretenstage der Jahreshochwasser (HQa\_r) der Kander-Hondrich sind in Abbildung 20.23 bis Abbildung 20.26 dargestellt. Bei der Interpretation der Resultate ist es wichtig, immer sowohl die Abbildung für HQa\_MD als auch die entsprechende Abbildung für HQa\_r zu berücksichtigen.

Bei den **Modellierungen mit aktueller Vergletscherung** (Abbildung 20.23) wird für die Modellversionen «cb3c2\_IDW\_9802» (oben rechts), «be3c3\_IDW\_9802» (unten links) und «be3c3\_IDW\_8387» (unten rechts) sowohl bei HQa\_MD als auch bei HQa\_r (Abbildung 20.25) ein sehr ähnliches Muster ersichtlich. Auch bei der Modellierung «cb3c2\_DTIDW\_9802» (oben links) ist jeweils ein vergleichbares Muster erkennbar, jedoch zeigen sich insbesondere bei HQa\_r stärker ausgeprägte Gradienten und damit auch ein grösserer Bereich, über welchen sich die Veränderungen erstrecken. Für die beiden ausgewerteten Kenngrössen (HQa\_MD, HQa\_r) wird bei den Modellierungen mit aktueller Vergletscherung folgendes Muster erkennbar:

- > Der **mittlere Tag der Jahreshochwasser** (HQa\_MD) liegt für alle Szenarien in der gleichen Grössenordnung und tritt im Bereich des 180. Tages im Jahr – also zwischen Ende Juni und Anfang Juli – auf. Bei der Modellversion «cb3c2\_DTIDW\_9802» (oben links) ist bei extremer Temperaturzunahme in Abhängigkeit der Niederschlagsänderung eine Abweichung von diesem Zeitpunkt festzustellen.
- > Die **Streuung der Eintretenstage der Jahreshochwasser** (HQa\_r) wird bei den Modellierungen mit aktueller Vergletscherung vorwiegend durch die Temperaturänderung gesteuert (Abbildung 20.25). Bei Temperaturzunahme nimmt die Streuung deutlich zu. Je stärker die Temperaturzunahme, desto grösser wird auch der Einfluss der Niederschlagsänderung, wobei die kleinsten Werte von HQa\_r bei extremer Niederschlags- und Temperaturzunahme beobachtet werden können. Auch hier tritt für die Modellversion «cb3c2\_DTIDW\_9802» (oben links) eine stärkere Ausprägung dieses Musters auf; eine deutliche Differenzierung bei der extremen Temperaturzunahme ist jedoch nicht mehr erkennbar.

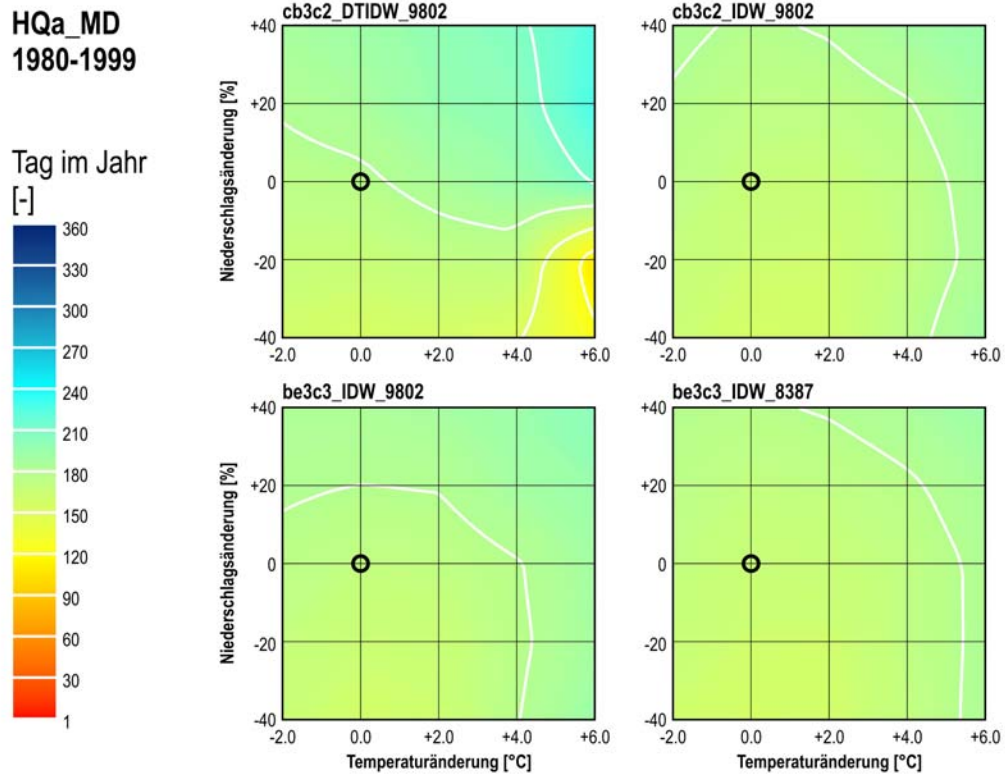


Abbildung 20.23: Sensitivitätsanalyse des mittleren Tages der Jahreshochwasser mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999)

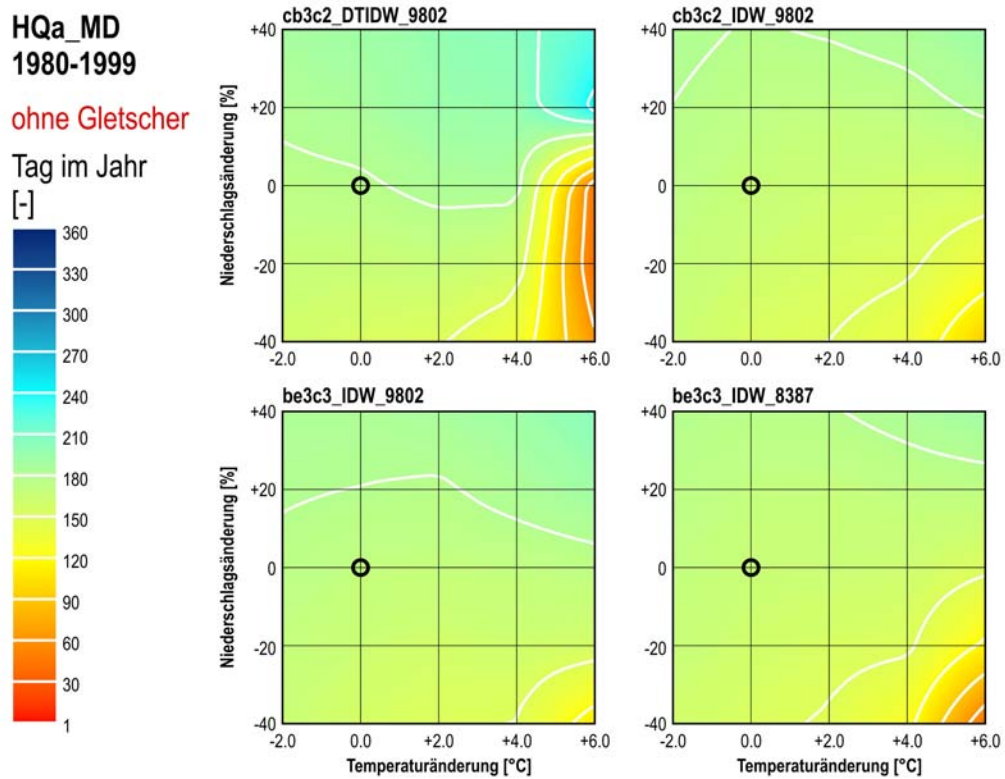


Abbildung 20.24: Sensitivitätsanalyse des mittleren Tages der Jahreshochwasser ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999)

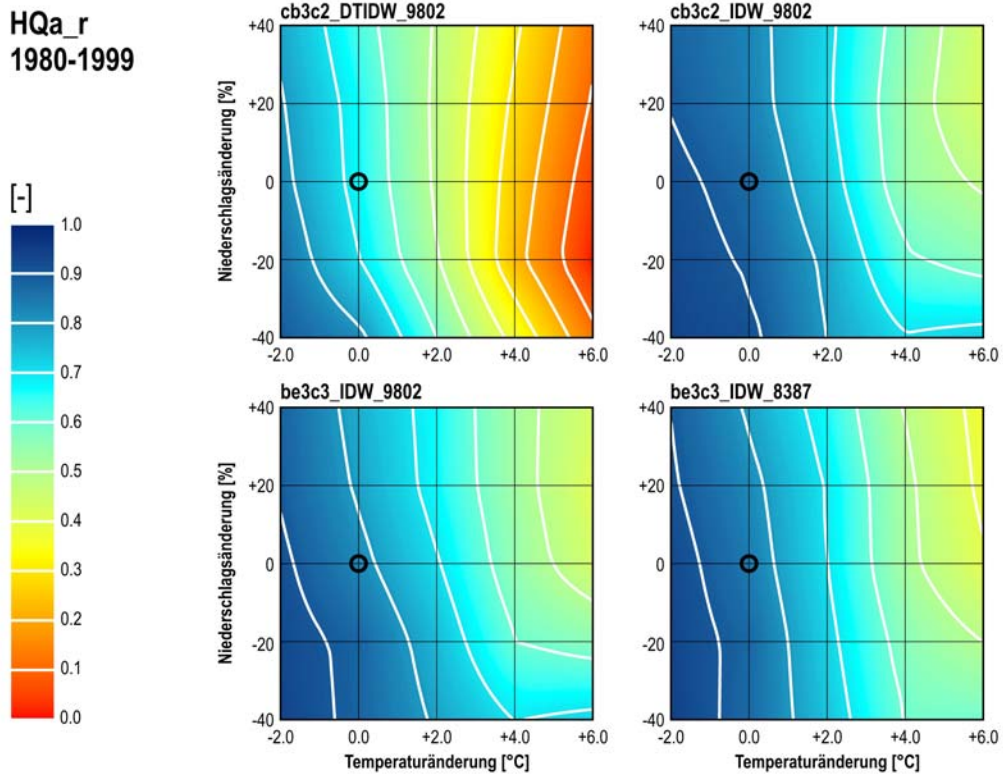


Abbildung 20.25: Sensitivitätsanalyse der zeitlichen Streuung der Eintretenstage der Jahreshochwasser (Kenngröße  $r$ ) mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999)

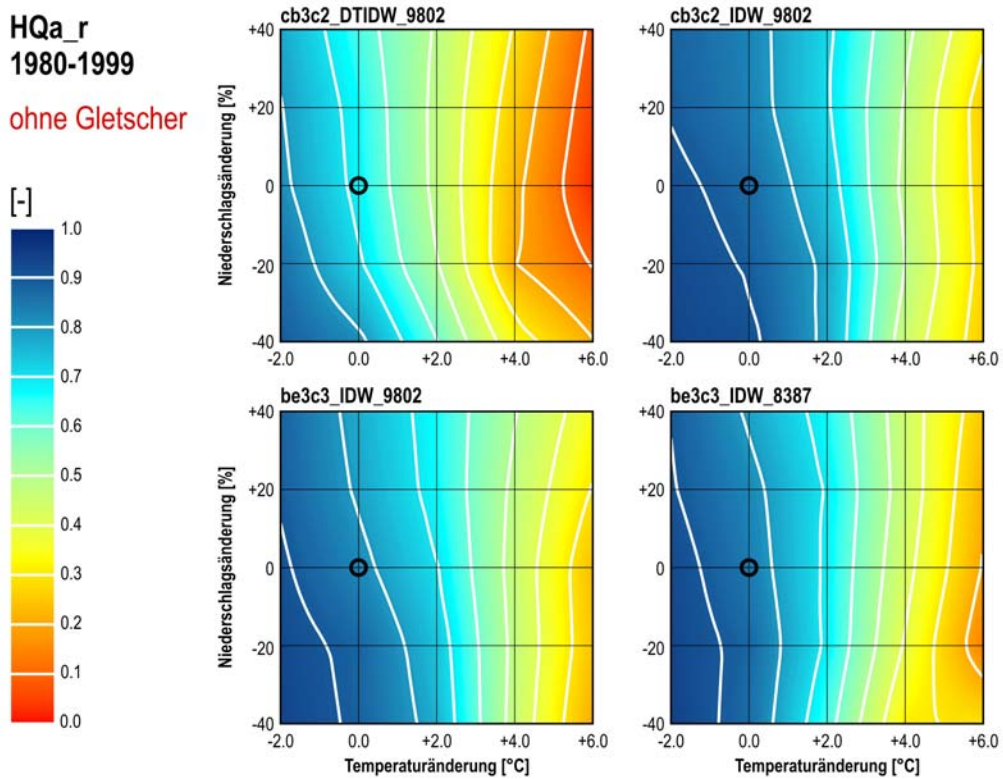


Abbildung 20.26: Sensitivitätsanalyse der zeitlichen Streuung der Eintretenstage der Jahreshochwasser (Kenngröße  $r$ ) ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999)

Die Muster bei den **Modellierungen ohne Vergletscherung** weichen von den Mustern der Modellierungen mit aktueller Vergletscherung leicht ab (Abbildung 20.24, Abbildung 20.26):

- > Insbesondere im Bereich der extremen Temperaturzu- und Niederschlagsabnahme ist gegenüber den Modellierungen mit aktueller Vergletscherung ein früherer **mittlerer Tag der Jahreshochwasser** (HQa\_MD) zu beobachten (Abbildung 20.24).
- > Die **zeitliche Streuung der Eintretenstage der Jahreshochwasser** (HQa\_r) ist nur noch von der Temperaturänderung abhängig und stärker ausgeprägt, die Differenzierung bezüglich Niederschlagsänderung ist nicht mehr erkennbar (Abbildung 20.26).

### 20.2.9 Mittlerer Eintretenstag und zeitliche Streuung des kleinsten Abflussmittelwerts über sieben Tage (NM7Q)

Für die Beurteilung der **Niedrigwasserverhältnisse** bieten sich zahlreiche Kenngrößen an (z.B. TALLAKSEN & VAN LANEN 2004, DVWK 1983 UND 1992). Die vorliegende Untersuchung beschränkt sich jedoch auf die Analyse des Kennwerts «NM7Q», der kleinste Siebentagesmittelwert des Abflusses innerhalb eines hydrologischen Niedrigwasserjahres. Der Kennwert «NM7Q» hat den Vorteil, dass er in einer vergleichbaren Größenordnung wie das kleinste Tagesmittel liegt, aber wesentlich robuster gegenüber Ausreißern und anthropogenen Einflüssen ist (HELBLING ET AL. 2007). Gemäss SCHÄDLER (2003) ist das Mass zudem sehr sensitiv für ausgeprägte Trockenphasen, denn der verwendete Zeitraum von sieben Tagen muss in eine längere relative Trockenzeit fallen, damit kleine NM7Q-Werte erreicht werden.

Zur Analyse der Niedrigwasserverhältnisse wurden die Auswirkungen der Temperatur- und Niederschlagsänderungen auf den mittleren Eintretenstag des NM7Q (Kapitel 20.2.9) sowie auf den Mittelwert des NM7Q (Kapitel 20.2.10) untersucht. Der **mittlere Eintretenstag des NM7Q** wurde analog dem Vorgehen bei den Jahreshochwassern mit der Methode nach BURN (1997) bestimmt (vgl. Kapitel 20.2.8), wobei der Beginn des Untersuchungszeitraumes bzw. des hydrologischen Niedrigwasserjahres auf den 1. Mai festgesetzt wurde. In diesem Kapitel werden nur Burn-Kreise dargestellt (Modellversion «be3c3\_IDW\_9802», vgl. Abbildung 20.27 und Abbildung 20.28); die entsprechenden Sensitivitätsflächen für die beiden damit verbundenen Parameter (NM7Q\_MD und NM7Q\_r) sind in Anhang D enthalten. Bei der Beurteilung der verschiedenen Resultate muss berücksichtigt werden, dass die verwendeten Modelle nicht spezifisch auf Niedrigwasserverhältnisse kalibriert wurden. Dadurch können zwar die groben Muster der Veränderungen als plausibel erachtet werden, vor einer weiteren Anwendung müssen die Werte allerdings kritisch überprüft werden.

#### a) Veränderung des mittleren Eintretenstages bei aktueller Vergletscherung

Wie aus Abbildung 20.27 für die Modellvarianten mit aktueller Vergletscherung hervorgeht, werden bei der Kander-Hondrich der mittlere Eintretenstag des NM7Q (NM7Q\_MD, Richtung des roten Pfeils) sowie die zeitliche Streuung der Ereignisse (NM7Q\_r, Länge des roten Pfeils) im Wesentlichen durch die Temperatur und weniger durch den Niederschlag gesteuert. Mit zunehmender Temperatur verschiebt sich NM7Q\_MD gegenüber dem Referenzzustand um mehrere Wochen auf ein früheres Datum im Niedrigwasserjahr und NM7Q\_r nimmt deutlich ab. Alleinige Niederschlagsreduktion bewirkt eine leichte Reduktion von NM7Q\_MD und eine leichte Zunahme der zeitlichen Streuung. Bei extremer Temperaturzunahme (+6 °C) kann MD auf Dezember fallen; in den Monaten zwischen Mai und September treten in diesem Fall keine NM7Q mehr auf. Beim Referenzzustand liegt NM7Q\_MD dagegen im Februar und NM7Q\_r ist deutlich grösser.

### b) Veränderung des mittleren Eintretenstages ohne Vergletscherung

Abbildung 20.28 enthält die Resultate der Modellvariante ohne Vergletscherung. Das Muster ist demjenigen in Abbildung 20.27 in den wesentlichen Merkmalen sehr ähnlich. Allerdings zeigen sich bei genauer Betrachtung auch einige Unterschiede, welche sich auf den Bereich der Temperaturzunahme beschränken. Sowohl Temperatur- wie auch Niederschlagsänderungen haben einen stärkeren Einfluss sowohl auf die Veränderungen beim mittleren Zeitpunkt (NM7Q\_MD) wie auch auf die zeitliche Streuung der Eintretenstage (NM7Q\_r). Daneben ist auch erkennbar, dass sich der mittlere Zeitpunkt des NM7Q bei den Szenarien mit extremen Temperaturveränderungen auf ein noch früheres Datum verschieben kann. Dadurch ergibt sich eine Verlagerung von Februar beim Referenzzustand bis auf Oktober bei extremer Temperaturzunahme (+6 °C) und gleichzeitiger extremer Niederschlagsreduktion (-40%).

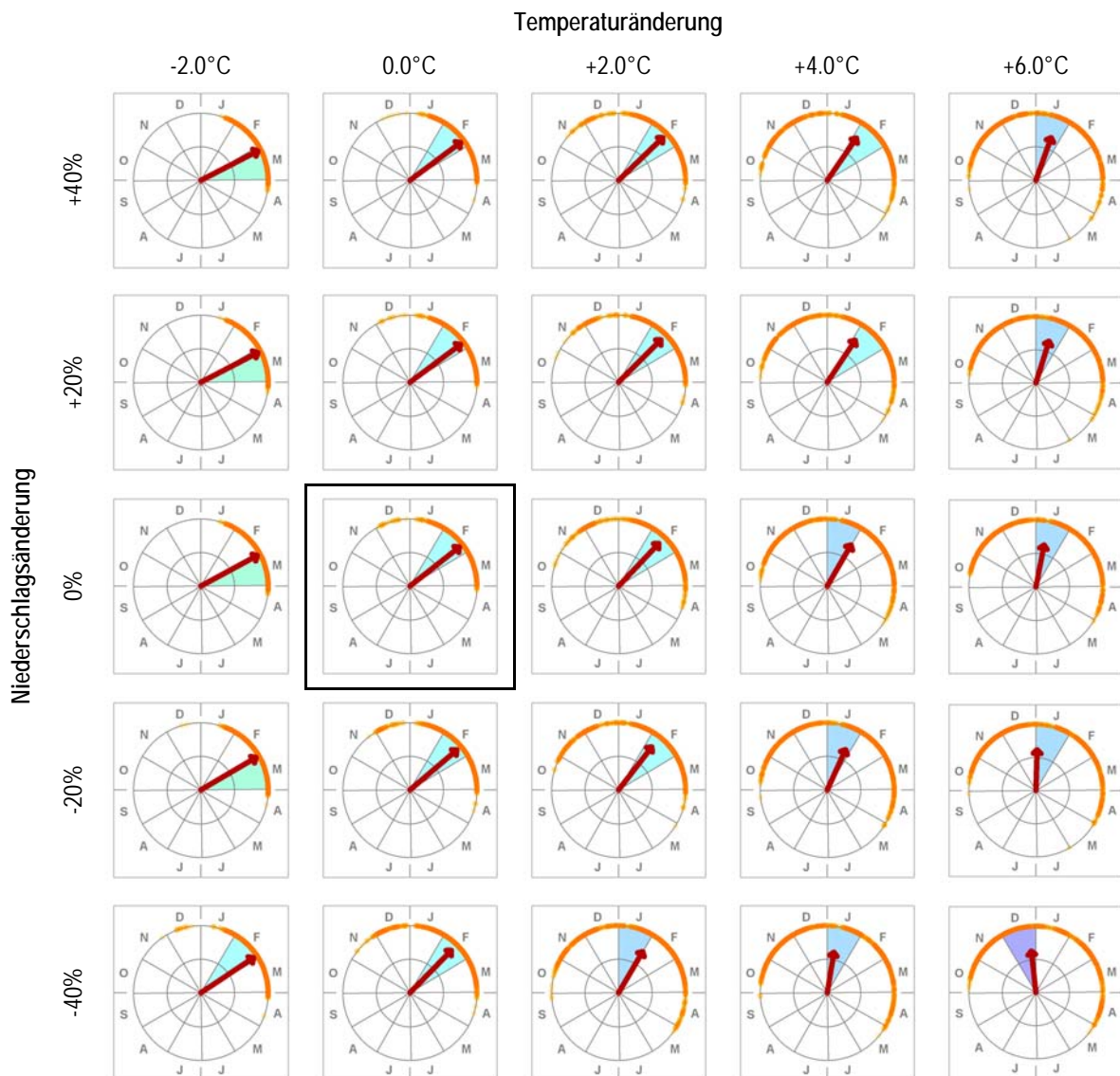


Abbildung 20.27: Übersichtsgrafik: Burn-Kreise für die Eintretenstage des kleinsten Abflussmittelwerts über sieben Tage (NM7Q) mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999, Modellversion be3c3\_IDW\_9802). Jahreskreise für verschiedene Kombinationen von Temperatur- und Niederschlagsänderungen: orange Punkte = Eintretenstage der NM7Q; Richtung des roten Pfeils = mittlerer Tag der NM7Q; Länge des roten Pfeils = Streuungsmass; farbiger Sektor = Monat mit mittlerem Tag der NM7Q; schwarzer Rahmen = Referenzzustand.

**c) Fazit**

Der mittlere Zeitpunkt des NM7Q wird in erster Linie durch Temperaturänderungen gesteuert: Bei Temperaturzunahme kann dieser um mehrere Wochen und Monate früher im Niedrigwasserjahr auftreten als beim modellierten Referenzzustand. Zudem wird die zeitliche Streuung der Eintretens-tage bei zunehmenden Temperaturen grösser. Geringeren Einfluss auf beide Kenngrössen haben Niederschlagsänderungen, welche sich im Falle einer Reduktion als Verlagerung von NM7Q\_MD auf einen früheren Tag im Niedrigwasserjahr und als Zunahme der zeitlichen Streuung auswirken. Ohne Gletscher werden die bei der Modellversion mit Gletscher beobachteten Abhängigkeiten bzw. die Reaktionsmuster sowohl beim mittleren Tag des NM7Q als auch bei der zeitlichen Streuung ver-stärkt.

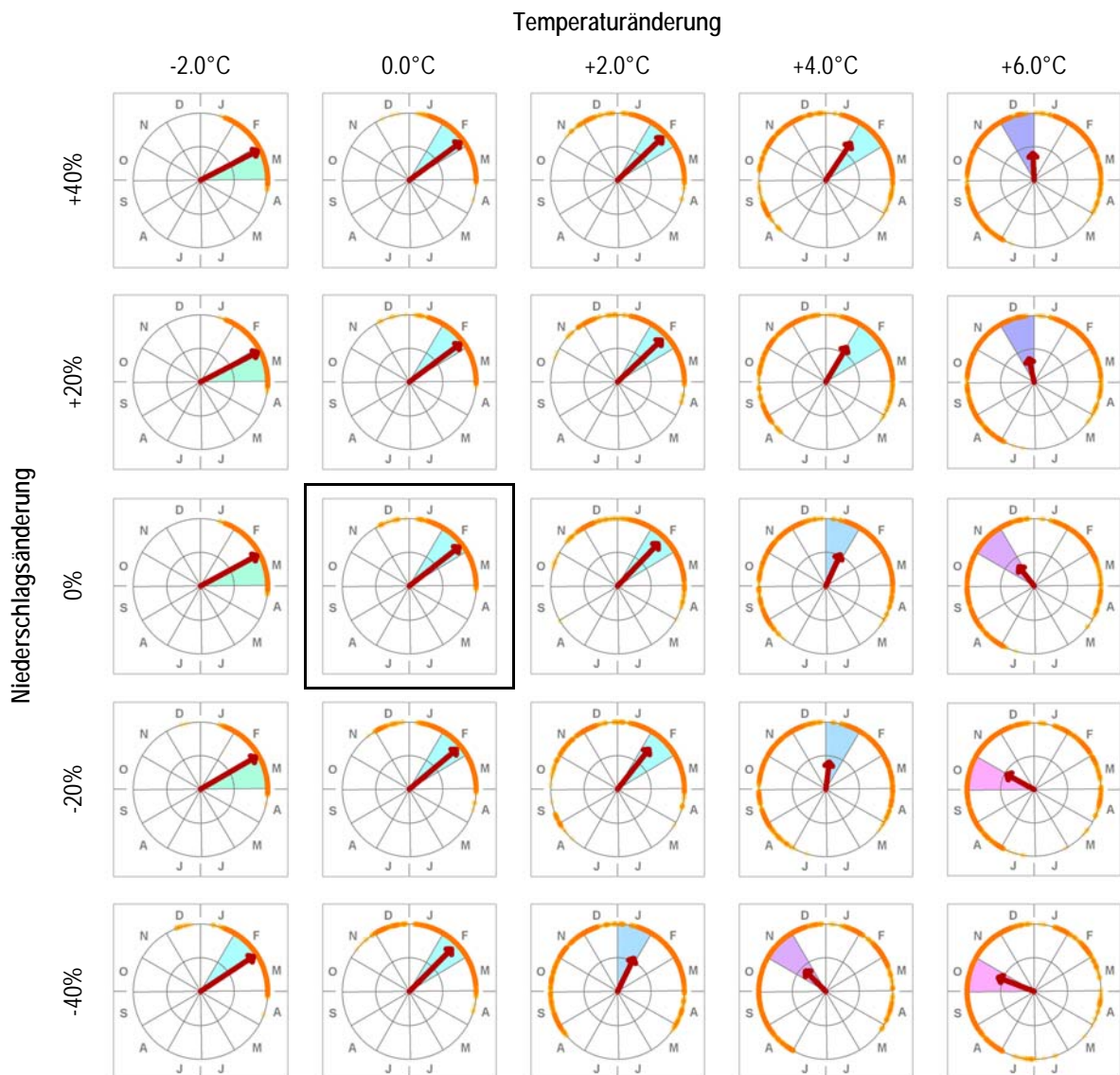


Abbildung 20.28: Übersichtsgrafik: Burn-Kreise für die Eintretenstage des kleinsten Abflussmittelwerts über sieben Tage (NM7Q) ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999, Modellversion be3c3\_IDW\_9802). Jahreskreise für verschiedene Kombinationen von Temperatur- und Niederschlagsänderungen: orange Punkte = Eintretenstage der NM7Q; Richtung des roten Pfeils = mittlerer Tag der NM7Q; Länge des roten Pfeils = Streuungsmass; farbiger Sektor = Monat mit mittlerem Tag der NM7Q; schwarzer Rahmen = Referenzzustand.

### 20.2.10 Mittelwert des NM7Q (mNM7Q)

Der Mittelwert des NM7Q (mNM7Q) wurde für das untersuchte Einzugsgebiet Kander-Hondrich für jedes Szenario und alle Modellversionen separat berechnet. Grundlage dazu bildeten die NM7Q, welche aus den 1000 modellierten Jahren jeder Modellversion bestimmt wurden. Anschliessend wurden die prozentualen Abweichungen gegenüber dem entsprechenden Wert des modellierten Referenzzustandes (Periode: 1980-1999) bestimmt. Die Ergebnisse für diese Kenngrösse sind in Form von Sensitivitätsflächen dargestellt (vgl. Abbildung 20.29 und Abbildung 20.30).

#### a) Veränderung des mittleren NM7Q mit aktueller Vergletscherung

Die Abweichungen zeigen für alle Modellversionen mit aktueller Vergletscherung ein ähnliches Muster (Abbildung 20.29), wobei die Gradienten und der Bereich, über welchen sich die Veränderungen erstrecken, bei den beiden Modellversionen «cb3c2\_DTIDW\_9802» (oben links) und «be3c3\_IDW\_8387» (unten rechts) jeweils etwas stärker ausgeprägt sind, als bei den beiden anderen Modellversionen. Der Mittelwert des NM7Q wird durch Temperatur- und Niederschlagsänderungen etwa gleich stark beeinflusst. Bei Zunahme der Temperatur und/oder der Niederschlagsmenge wird die prozentuale Abweichung des untersuchten Kennwerts grösser, wobei die Veränderung je nach Szenario bis über 200% gegenüber dem entsprechenden Wert des modellierten Referenzzustandes betragen kann. Bei extremer Temperatur- und Niederschlagsreduktion ist eine Abnahme des mittleren NM7Q um bis zu -50% zu verzeichnen.

#### b) Veränderung des mittleren NM7Q ohne Vergletscherung

Wie aus dem Vergleich von Abbildung 20.29 und Abbildung 20.30 hervorgeht, hat die Veränderung der Vergletscherung keinen wesentlichen Einfluss auf die Resultate. Einzig im Bereich der extremen Temperaturzunahme sind bei den Modellversionen ohne Vergletscherung leicht tiefere Werte gegenüber den Modellierungen mit Vergletscherung zu beobachten.

#### c) Fazit

Der Mittelwert des NM7Q wird sowohl von Temperatur- als auch von Niederschlagsänderungen gesteuert. Eine Zunahme von Temperatur und Niederschlag bewirkt einen grösseren Mittelwert des NM7Q. Der Einfluss des Gletschers ist gering und nur bei extremer Temperaturänderung erkennbar.



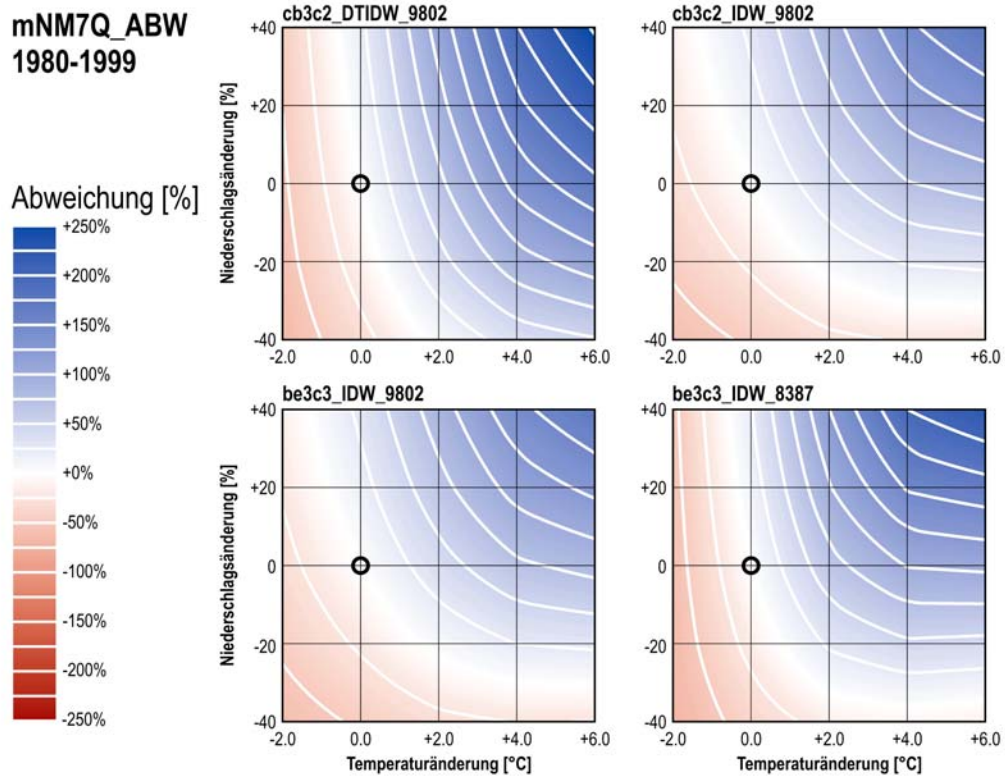


Abbildung 20.29: Sensitivitätsanalyse des mittleren NM7Q mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999). Prozentuale Abweichungen vom Referenzzustand (schwarzer Kreis).

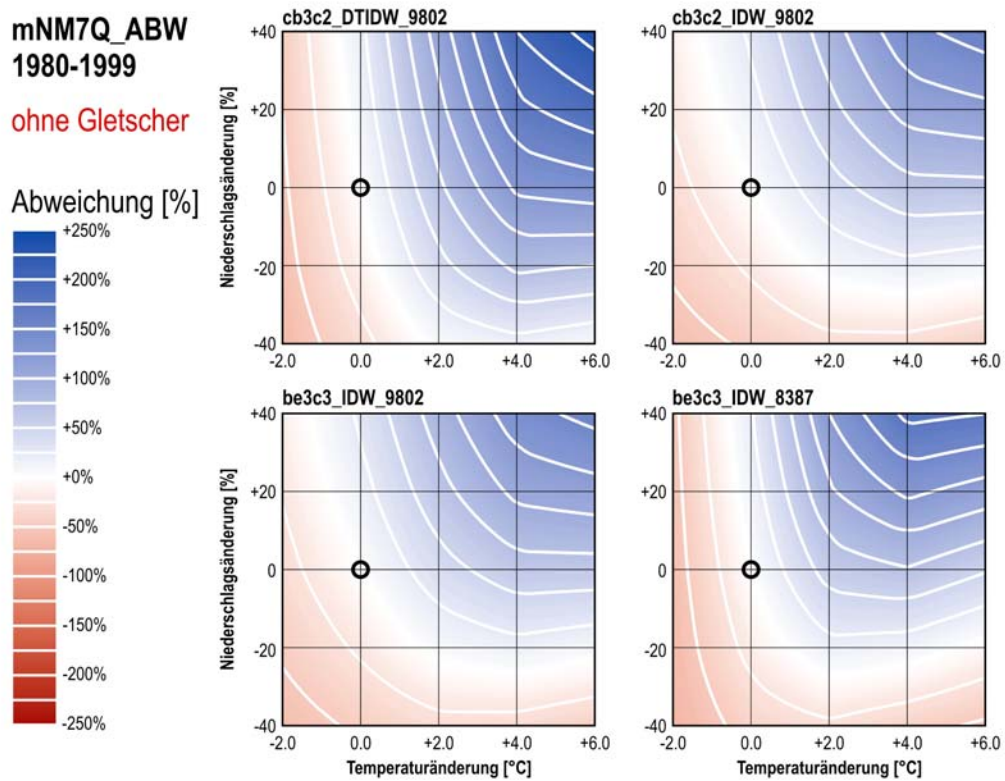


Abbildung 20.30: Sensitivitätsanalyse des mittleren NM7Q ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999). Prozentuale Abweichungen vom Referenzzustand (schwarzer Kreis).

## 20.3 Fazit

Für das untersuchte Einzugsgebiet Kander-Hondrich wurden in diesem Kapitel die Auswirkungen der systematischen Niederschlags- und Temperaturänderungen auf ausgewählte hydrologische Kenngrößen anhand von Sensitivitätsflächen dargestellt. Diese Sensitivitätsflächen können nach unterschiedlichen Reaktionsmustern typisiert werden. Mit diesem Ansatz sollen hier die wichtigsten Resultate aus den Sensitivitätsanalysen zusammengefasst und die wesentlichen Reaktionsmuster der ausgewerteten Kenngrößen hervorgehoben werden.

In Abbildung 20.31 sind vereinfachte **Reaktionstypen** auf die systematischen Veränderungen von Niederschlag- und Temperatur dargestellt. Die Pfeile weisen in die Richtung der Zunahme der meteorologischen bzw. der ausgewerteten hydrologischen Kenngrösse. Folgende Reaktionstypen können dabei erkannt werden:

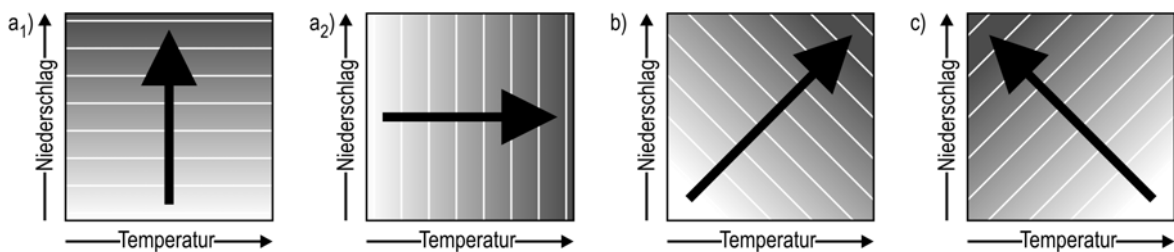


Abbildung 20.31: Reaktionstypen der hydrologischen Kenngrößen auf systematische Veränderungen von Temperatur und Niederschlag.  $a_1$ ,  $a_2$  = direkte Abhängigkeit entweder von Niederschlag oder Temperatur;  $b$  = direkte Abhängigkeit von Temperatur und Niederschlag;  $c$  = direkte Abhängigkeit von Niederschlag und inverse Abhängigkeit von Temperatur.

- Die ausgewertete hydrologische Kenngrösse (z.B. mittlerer jährlicher Abfluss) ist eindimensional, also **ausschliesslich von einer Einflussgrösse abhängig** (Niederschlag oder Temperatur). Dabei tritt direkte Abhängigkeit auf, d.h. dass je grösser die Niederschlagsänderung, desto grösser wird auch der mittlere jährliche Abfluss. In Abbildung 20.31  $a_1$ ) ist vereinfacht das Beispiel der mittleren jährlichen Abflussmenge dargestellt, welche in erster Linie durch die Änderung des Niederschlags gesteuert wird. Dieses Muster der **eindimensionalen Abhängigkeit** kann bei anderen Kenngrößen auch für die Temperatur als Einflussgrösse auftreten (z.B. Verdunstung, Abbildung 20.31  $a_2$ ).
- Diese Kenngrösse (z.B. mittlerer saisonaler Abfluss im Winter) **wird durch beide Einflussgrößen (Niederschlag und Temperatur) gesteuert** und weist für beide eine **direkte Abhängigkeit** auf. Bei einer Zunahme sowohl des Niederschlags als auch der Temperatur nimmt die ausgewertete Kenngrösse ebenfalls zu. Abbildung 20.31  $b$ ) zeigt ein vereinfachtes Beispiel dieses Musters.
- Bei dem in Abbildung 20.31  $c$ ) dargestellten Muster wird die Kenngrösse (z.B. mittlerer saisonaler Abfluss im Sommer) ebenfalls **durch beide Einflussgrößen (Niederschlag und Temperatur) gesteuert**. Allerdings ist für den Niederschlag **direkte Abhängigkeit** und für die Temperatur **inverse Abhängigkeit** festzustellen. So nimmt beispielsweise der mittlere saisonale Abfluss im Sommer bei einer Zunahme des Niederschlags und bei Reduktion der Temperatur zu.

In Tabelle 20.1 sind die Reaktionstypen aller ausgewerteten Kenngrössen in der Übersicht dargestellt. Es sind sowohl die Reaktionsmuster mit als auch ohne Vergletscherung aufgeführt, allerdings wurden für die Typisierung die Resultate der Modellversion «cb3c2\_DTIDW\_9802» nicht berücksichtigt. Für Kenngrössen, welche nicht einem eindeutigen Reaktionstypen zugeordnet werden konnten, wurden beide Symbole dargestellt (vgl. z.B. «Mittlerer jährlicher Abfluss» ohne Gletscher).

Tabelle 20.1: Zusammenfassende Darstellung der Reaktionstypen hydrologischer Kenngrössen gegenüber systematischen Temperatur- und Niederschlagsänderungen. Die Bedeutung der Pfeile ist Abbildung 20.31 zu entnehmen.

Kenngrösse	Abkürzung	Abbildung	mit aktueller Vergletscherung	ohne Vergletscherung
Wasserhaushalt, Mittelwasser	Mittlerer jährlicher Abfluss	MQ	Abbildung 20.4 Abbildung 20.5	↑ bis ↖
	Streuung der Tagesmittelwerte	q95-q5	Abbildung 20.6 Abbildung 20.7	↖
	Mittlerer saisonaler Abfluss, Winter	MQ-DJF	Abbildung 20.8 Abbildung 20.9	↗
	Mittlerer saisonaler Abfluss, Sommer	MQ-JJA	Abbildung 20.10 Abbildung 20.11	↖ bis ↑
	Verdunstung	ETR	Abbildung 20.12 Abbildung 20.13	→
	Schneeschnmelze	SWA	Abbildung 20.12 Abbildung 20.13	↖
Hochwasser	100-jährlicher Hochwasserabfluss	HQ100	Abbildung 20.15 Abbildung 20.16	↑
	Skalierungsparameter der AEV	Alpha	Abbildung 20.17 Abbildung 20.18	↖
	Lageparameter der AEV	Chi	Abbildung 20.19 Abbildung 20.20	↖ bis ↑
	Mittlerer Tag der Jahreshochwasser	HQa_MD	Abbildung 20.23 Abbildung 20.24	-
	Zeitl. Streuung der Jahreshochwasser	HQa_r	Abbildung 20.25 Abbildung 20.26	→ bis ↗
Niedrigwasser	Mittelwert der kleinsten 7-Tagesmittel	mNM7Q	Abbildung 20.29 Abbildung 20.30	↗
	Mittl. Tag der kleinsten 7-Tagesmittel	NM7Q_MD	Anhang D	→
	Zeitl. Streuung der kl. 7-Tagesmittel	NM7Q_r	Anhang D	→

AEV = Allgemeine Extremwertverteilung

Aus Tabelle 20.1 wird ersichtlich, wie unterschiedlich die ausgewerteten Kenngrössen auf die vorgenommenen Niederschlags- und Temperaturänderungen reagieren. Sie lassen sich in die folgenden Typen zusammenfassen:

- > **Typ a1:** In diese Gruppe fallen die beiden Kenngrössen «mittlerer jährlicher Abfluss» (**MQ**) und «100-jährlicher Hochwasserabfluss» (**HQ100**). Die ausgeprägte Niederschlagsabhängigkeit, welche diesen Kenngrössen zu Grunde liegt, geht aus den Auswertungen deutlich hervor.
- > **Typ a2:** Zu diesem Typ gehören die Kenngrössen «Verdunstung» (**ETR**), «Zeitliche Streuung der Jahreshochwasser» (**HQa\_r**), «Mittlerer Tag der kleinsten 7-Tagesmittel» (**NM7Q\_MD**) und «Zeitliche Streuung der kleinsten 7-Tagesmittel» (**NM7Q\_r**). Das Muster bei der Verdunstung kann durch das gewählte Modell (HAMON 1961) erklärt werden. Die anderen Kenngrössen zeigen deutlich auf, dass die Saisonalität dieser Kennwerte im Einzugsgebiet Kander-Hondrich ausschliesslich durch die Temperatur gesteuert wird. Falls die Temperatur gleichmässig über das Jahr zunimmt, wird das innerjährliche Abflussgeschehen ausgeglichener und die Saisonalität nimmt ab. Dadurch wird es möglich, dass die Hochwasserabflüsse in allen Jahreszeiten auftreten.
- > **Typ b:** Bei diesem Reaktionstypen, zu welchem die beiden Kenngrössen «Mittlerer saisonaler Abfluss, Winter» (**MQ-DJF**) und «Mittelwert der kleinsten 7-Tagesmittel» (**mNM7Q**) gehören, bewirkt sowohl eine Temperaturerhöhung als auch eine Niederschlagszunahme eine Zunahme der Kenngrösse. Dadurch wird ersichtlich, dass bei diesen Kenngrössen bei ausgeglichenerem Abflussregime und bei erhöhtem Niederschlagseintrag eine Zunahme zu beobachten ist.
- > **Typ c:** Zu dieser Gruppe gehören folgende Kenngrössen: «Streuung der Tagesmittelwerte» (**q95-q5**), «Mittlerer saisonaler Abfluss, Sommer» (**MQ-JJA**), «Schneeschnmelze» (**SWA**), «Skalierungsparameter AEV» (**Alpha**) und «Lageparameter der AEV» (**Chi**). Sie nehmen bei Niederschlagszunahme und Temperaturreduktion zu und zeigen somit eine deutliche Abhängigkeit von der Saisonalität der Abflussverhältnisse wie auch vom Niederschlagseintrag.

Aus der Zusammenstellung in Tabelle 20.1 geht zudem hervor, dass nur bei einzelnen Kenngrössen Unterschiede zwischen der Reaktionsweise des vergletscherten und unvergletscherten Einzugsgebietes zu erkennen sind. Dies betrifft die Kenngrössen «**MQa**», «**MQ-JJA**» und «**HQa\_r**», wobei die Unterschiede jeweils gering sind.

Da bei den Sensitivitätsanalysen auch die hydrologischen Auswirkungen von Klimaszenarien untersucht wurden, welche sowohl die bis ins Jahr 2050 zu erwartenden Klimaverhältnisse abdecken, aber auch deutlich darüber hinausgehen, lassen sich daraus auch die folgenden zusammenfassenden Ergebnisse ableiten:

Aus den Sensitivitätsanalysen lässt sich für jede hydrologische Kenngrösse eine **Abschätzung für die bis ins Jahr 2050 zu erwartenden Veränderungen** ableiten. Bei dieser Auswertung wurde nur der Teilbereich der Sensitivitätsfläche berücksichtigt, welcher durch die minimalen und maximalen jährlichen Änderungen von Temperatur und Niederschlag aus den Klimaszenarien von FREI (2005) abgedeckt wird (vgl. Kapitel 17.1, Abbildung 17.2). Dieser Teilbereich ist in Abbildung 18.4 anhand des dunkelgrauen Rechtecks dargestellt. Die Auswertung, welche ausschliesslich für die Sensitivitätsfläche der Modellversion «be3c3\_IDW\_9802» durchgeführt wurde, ergibt für die verschiedenen

hydrologischen Kenngrössen die folgenden Werte, wobei diese immer als Veränderungen gegenüber dem unveränderten Referenzzustand (1980-1999) zu verstehen sind:

- > **MQ:** Die Veränderungen des mittleren jährlichen Abflusses betragen je nach Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmenge zwischen +10% und -13%. Falls der Gletscheranteil kleiner wird, ist die Wahrscheinlichkeit für eine Abflussreduktion grösser.
- > **q95-q5:** Die Variabilität der mittleren täglichen Abflussmengen wird unter dem Einfluss der erwarteten jährlichen Klimaänderung bis ins Jahr 2050 geringer werden. Ohne Vergletscherung werden die Verhältnisse zusätzlich ausgeglichener.
- > **MQ-DJF:** Für den mittleren Abfluss im Winter ist ausschliesslich eine Zunahme zu erwarten, wobei die Streuung der möglichen relativen Veränderungen relativ gross ist (+5% bis +75%). Die Entwicklung ist sowohl von der zukünftigen Niederschlagsmenge als auch der Temperatur im Jahr 2050 abhängig. Eine Veränderung des Vergletscherungsgrades hat auf diese Kenngrösse keinen Einfluss.
- > **MQ-JJA:** Beim mittleren Abfluss im Sommer kann eine Veränderung zwischen 0% und -25% beobachtet werden. Ohne Vergletscherung kann die Reduktion bei gleichzeitig stark erhöhter Temperatur bis zu -45% betragen.
- > **HQ100:** Die Veränderungen beim 100-jährlichen Hochwasserabfluss bis ins Jahr 2050 können je nach Niederschlagsszenario zwischen +5% bis -25% betragen. Ein Rückgang des Vergletscherungsgrades wirkt sich auf diese Kenngrösse unwesentlich aus.
- > **Alpha, Chi:** Die bis ins Jahr 2050 zu erwartete Klimaänderung bewirkt bei den beiden Kenngrössen der Verteilungsfunktion der jährlich grössten Hochwasserabflüsse entweder eine leichte Zunahme oder einen deutlichen Rückgang, falls eine Temperaturerhöhung bei gleichzeitigem Niederschlagsrückgang eintritt. Auch auf diese Kennwerte hat die Entwicklung der Vergletscherung keine Auswirkungen.
- > **HQa\_MD:** Beim mittleren Tag der Jahreshochwasser ist für die Klimaszenarien bis ins Jahr 2050 keine Veränderung festzustellen.
- > **HQa\_r:** Im Bereich der Temperatur- und Niederschlagsänderungen, welche für das Jahr 2050 erwartet werden, ist eine deutlich grössere zeitliche Streuung des Eintretenszeitpunktes der Jahreshochwasser zu beobachten.
- > **mNM7Q:** Unabhängig des Vergletscherungsgrades ist unter dem Einfluss der Klimaänderung bis ins Jahr 2050 eine Zunahme der kleinsten 7-Tagesabflussmittelwerte pro Jahr zwischen +5% und +75% zu erwarten.
- > **NM7Q\_MD:** Der mittlere Tag des kleinsten 7-Tagesabflussmittelwertes pro Jahr wird bis 2050 um bis zu zwei Wochen früher im Niedrigwasserjahr auftreten. Ohne Vergletscherung kann der Zeitpunkt um bis zu einem Monat früher eintreten.
- > **NM7Q\_r:** Bei erhöhter Temperatur lässt sich eine deutlich grössere zeitliche Streuung der Eintretenszeitpunkte beobachten.

Bei den meisten untersuchten hydrologischen Kenngrössen sind auch unter extremen Klimaszenarien keine Abweichungen von den meist linearen Abhängigkeiten gegenüber den Temperatur- und Niederschlagsänderungen zu erkennen. Offenbar werden in dem gewählten Bereich der Temperatur- und Niederschlagsänderungen **keine Schwellenwerte** des hydrologischen Systems **über-**

**schritten**, welche beim untersuchten Einzugsgebiet Kander-Hondrich zu extremen Veränderungen bei den hydrologischen Prozessen führen könnte.

# 21 Auswirkungen ausgewählter Klimaszenarien auf die Hydrologie der Kander

In Kapitel 20 wurden die Resultate der Sensitivitätsanalysen aufgeführt, welche die Reaktionsweise verschiedener hydrologischer Kenngrößen gegenüber systematischen Veränderungen der beiden wichtigsten Einflussgrößen Temperatur und Niederschlag bis in extreme Bereiche aufzeigen. Im Gegensatz dazu werden in diesem Kapitel die Auswirkungen von **saisonal differenzierten und ausgewählten Klimaszenarien** auf die Hydrologie der Kander erläutert. Die verwendeten, ausgewählten Klimaszenarien widerspiegeln die in der Schweiz für das Jahr 2050 zu erwartenden Veränderungen von Temperatur und Niederschlag (vgl. Kapitel 21.1) und entsprechen dem aktuellen Stand des Wissens. Sie bilden für das untersuchte Einzugsgebiet Kander-Hondrich bzw. für das Berner Oberland die zurzeit detailliertesten Angaben. Unter Anwendung dieser Szenarien sollen im Speziellen die Veränderungen bei den beiden Wasserhaushaltskomponenten Abfluss und Verdunstung (vgl. Kapitel 21.2) sowie bei den Hochwasserabflüssen (vgl. Kapitel 21.3) untersucht werden.

## 21.1 Klimaszenarien für die hydrologische Modellierung

Die aktuellste und detaillierteste Grundlage um die Auswirkungen der Klimaänderung in der Schweiz für die nächsten Jahrzehnte abzuschätzen, bilden heute die **probabilistischen Klimaprojektionen von FREI (2005)** (vgl. auch OCCCPROCLIM 2007, Kapitel 17.1.2). Diese wurden aus den Resultaten verschiedener Klimamodellierungen des Projekts PRUDENCE (z.B. CHRISTENSEN & CHRISTENSEN 2007, CHRISTENSEN ET AL. 2007) abgeleitet und geben für jede Jahreszeit den Bereich an, in welchem die Veränderungen der mittleren saisonalen Temperatur und der saisonalen Niederschlagssumme mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% zu erwarten sind (vgl. Tabelle 17.1). Die angegebenen Werte sind als Veränderungen gegenüber den entsprechenden Verhältnissen der Periode 1980-1999 zu verstehen. In Abbildung 21.1 sind diese Angaben für das Jahr 2050 als farbige Säulen in die beiden Teilgrafiken eingetragen. Die horizontale schwarze Markierung in jeder Säule entspricht dem Median der erwarteten Veränderung bzw. dem Modell mit der besten Schätzung.

Die Angaben von FREI (2005) bilden die Basis für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Klimaszenarien für das Jahr 2050. Als Eingabedaten für die hydrologische Modellierung dienten die Wetterdaten (Temperatur und Niederschlag), welche mit Hilfe des Wettergenerators erstellt und für die Sensitivitätsanalysen verwendet wurden (vgl. Kapitel 18.4). Es ist allerdings zu beachten, dass bei diesen Wetterdaten die systematisch vorgenommenen Änderungen von Temperatur und Niederschlag jeweils für das ganze Jahr eingesetzt wurden: Bei einem Szenario, welches für die Sensitivitätsanalysen verwendet wurde und z.B. eine Temperaturänderung von +2 °C aufweist, wurde dieser Änderungsbetrag auf alle Monatsmittel der Periode 1980-1999 angewendet. Da aber die probabilistischen Klimaszenarien von FREI (2005) saisonal differenzierte Änderungsbeträge von Niederschlag und Temperatur aufweisen, wurden die Wetterdaten der Sensitivitätsanalysen neu zusammengestellt.

Das Vorgehen, welches zur Bereitstellung der realistischen Klimaszenarien verwendet wurde, soll im Folgenden anhand eines Beispiels sowie mit Hilfe von Abbildung 21.2 illustriert werden.

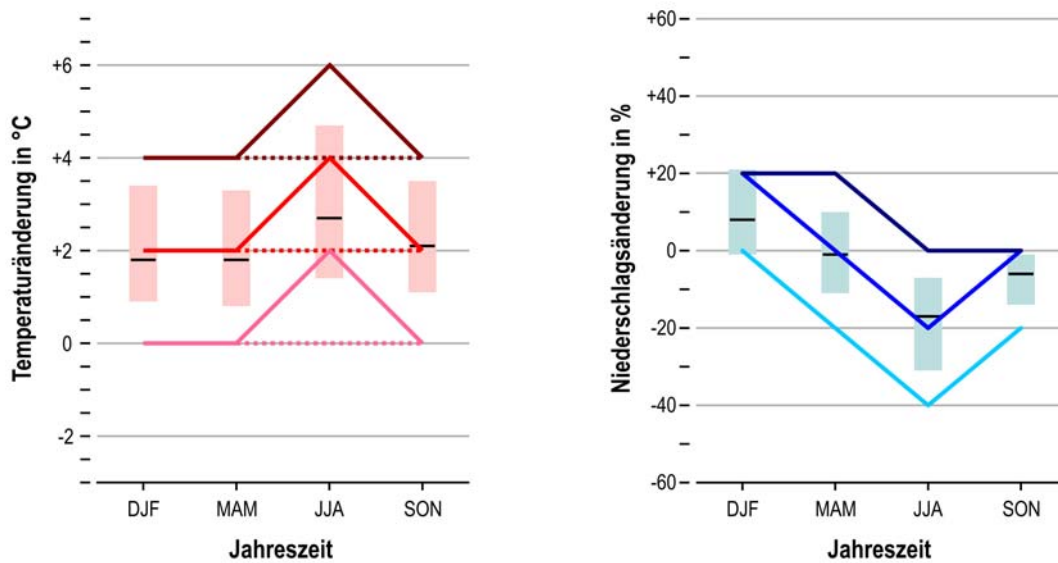


Abbildung 21.1: Erwartete Veränderungen bei Temperatur (links) und Niederschlag (rechts) für das Jahr 2050. Die Veränderungen beziehen sich auf die Verhältnisse der Periode von 1980 bis 1999. Die farbigen Linien entsprechen den in der vorliegenden Untersuchung verwendeten saisonalen Änderungen von Temperatur und Niederschlag, die farbigen Säulen umfassen für jede Jahreszeit das 95%-Konfidenzintervall der probabilistischen Klimaszenarien nach FREI (2005).

Zur Bereitstellung der verschiedenen Klimaszenarien wurden aus den Wetterdaten der Sensitivitätsanalysen für jede Jahreszeit diejenigen Daten gewählt, welche den Vorgaben von FREI (2005) entsprechen. So wurden zum Beispiel für ein ausgewähltes Klimaszenario die folgenden Daten verwendet (= schwarze Punkte in Abbildung 21.2):

- > **Winter** (= Dezember bis Februar): Niederschlag +20%, Temperatur +2 °C
- > **Frühling** (= März bis Mai) und **Herbst** (= September bis November): Niederschlag 0%, Temperatur +2 °C
- > **Sommer** (= Juni bis August): Niederschlag -20%, Temperatur +4 °C

Diese Kombination entspricht den klimatischen Verhältnissen des Szenarios, welches durch die mittlere rote und mittlere blaue Linie bei der Temperatur- und Niederschlagsänderung in Abbildung 21.1 repräsentiert wird.

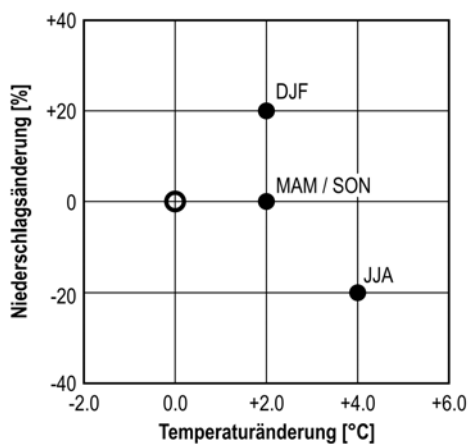


Abbildung 21.2: Schematische Darstellung zur Bereitstellung eines ausgewählten bzw. realistischen Klimaszenarios. Die schwarzen Punkte entsprechen den verwendeten saisonalen Änderungsbeträgen von Niederschlag und Temperatur für ein ausgewähltes Szenario.

(DJF: Dezember bis Februar, MAM: März bis Mai, JJA: Juni bis August, SON: September bis November; schwarzer Kreis: modellierter Referenzzustand der Periode 1980-1999 ohne Niederschlags- und Temperaturänderung)



Bei der Zusammenstellung der saisonal differenzierten Szenarien wurde darauf geachtet, dass der durch die probabilistischen Klimaszenarien von FREI (2005) vorgegebene Bereich der saisonalen Temperatur- und Niederschlagsänderungen vollständig abgedeckt werden konnte. Zu diesem Zweck wurden sowohl für die **Temperatur** als auch für den **Niederschlag je drei Szenarien** erstellt, welche die maximalen, minimalen und mittleren Veränderungen der probabilistischen Klimaszenarien für das Jahr 2050 wiedergeben. Diese Temperatur- und Niederschlagsszenarien entsprechen den farbigen, durchgezogenen Linien in Abbildung 21.1. Da die meteorologischen Daten aus den Sensitivitätsanalysen verwendet wurden (vgl. Kapitel 20.1), konnten die neuen saisonal differenzierten Klimaszenarien in einer Auflösung von 2 °C für die Temperatur bzw. von 20% für den Niederschlag abgebildet werden.

Zudem musste bei der Zusammenstellung der Klimaszenarien berücksichtigt werden, dass aus den Angaben der probabilistischen Klimaprojektionen von FREI (2005) nicht ersichtlich wird, ob ein bestimmtes Temperaturszenario mit einem vorgegebenen Niederschlagszenario verknüpft ist. Deshalb wurden in der vorliegenden Untersuchung die jeweils drei Temperatur- und Niederschlagsszenarien miteinander kombiniert, wodurch insgesamt **neun realistische Klimaszenarien** entstanden.

In Tabelle 21.1 (links) sind die saisonalen Änderungsbeträge des Niederschlags und der Temperatur für diese neun Klimaszenarien aufgeführt (Szenario Nr. 11 bis 19). Sie weisen jeweils im Sommer gegenüber den anderen Jahreszeiten eine um 2 °C höhere Temperaturänderung auf und werden deshalb in diesem Kapitel mit der Abkürzung **«TS+»** gekennzeichnet. Szenario Nr. 15 ist als Beispiel in Abbildung 21.2 dargestellt.

Tabelle 21.1: Saisonale Änderungsbeträge für Temperatur und Niederschlag für die jeweils neun Klimaszenarien von «TS+» (11 bis 19) und «TS=» (21 bis 29).

Szenario Nr.	Klimaszenarien «TS+»								Szenario Nr.	Klimaszenarien «TS=»							
	Temperaturänderung [°C]				Niederschlagsänderung [%]					Temperaturänderung [°C]				Niederschlagsänderung [%]			
	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON		DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
<b>11</b>	4.0	4.0	6.0	4.0	+20	+20	0	0	<b>21</b>	4.0	4.0	4.0	4.0	+20	+20	0	0
<b>12</b>	4.0	4.0	6.0	4.0	+20	0	-20	0	<b>22</b>	4.0	4.0	4.0	4.0	+20	0	-20	0
<b>13</b>	4.0	4.0	6.0	4.0	0	-20	-40	-20	<b>23</b>	4.0	4.0	4.0	4.0	0	-20	-40	-20
<b>14</b>	2.0	2.0	4.0	2.0	+20	+20	0	0	<b>24</b>	2.0	2.0	2.0	2.0	+20	+20	0	0
<b>15</b>	2.0	2.0	4.0	2.0	+20	0	-20	0	<b>25</b>	2.0	2.0	2.0	2.0	+20	0	-20	0
<b>16</b>	2.0	2.0	4.0	2.0	0	-20	-40	-20	<b>26</b>	2.0	2.0	2.0	2.0	0	-20	-40	-20
<b>17</b>	0.0	0.0	2.0	0.0	+20	+20	0	0	<b>27</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	+20	+20	0	0
<b>18</b>	0.0	0.0	2.0	0.0	+20	0	-20	0	<b>28</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	+20	0	-20	0
<b>19</b>	0.0	0.0	2.0	0.0	0	-20	-40	-20	<b>29</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0	-20	-40	-20

DJF: Dezember, Januar, Februar; MAM: März, April, Mai; JJA: Juni, Juli, August; SON: September, Oktober, November

Zu diesen neun Klimaszenarien wurde zudem die folgende **Variante** erstellt: Da bei den Temperaturszenarien der probabilistischen Klimaprojektionen von FREI (2005) die Unterschiede zwischen den erwarteten Änderungen der Sommertemperatur und denjenigen der übrigen Jahreszeiten gering sind, wurden drei zusätzliche Temperaturszenarien erstellt. Diese weisen **für alle Jahreszeiten die jeweils gleiche Temperaturänderung** auf (vgl. gepunktete Linien in Abbildung 21.1, links). Diese

drei Temperaturszenarien wurden mit den drei bestehenden Niederschlagszenarien (Abbildung 21.1, rechts) zu **neun weiteren realistischen Klimaszenarien** kombiniert, welche mit der Abkürzung «**TS=**» bezeichnet werden. Die saisonalen Temperatur- und Niederschlagsänderungen sind für diese Szenarien in Tabelle 21.1 (rechts) aufgeführt (Szenario Nr. 21 bis 29).

Diese insgesamt **18 verschiedenen realistischen Klimaszenarien** (neun für «TS+» und neun für «TS=») bilden zusammen die Eingabedaten für die hydrologische Modellierung. Analog zu den Sensitivitätsanalysen wurden diese in Kombination mit den **beiden unterschiedlichen Vergletscherungen** (mit Gletscher «mGL», ohne Gletscher «oGL», vgl. Kapitel 18.6.3) modelliert. Die Nummer jedes Szenarios («11») wird entsprechend der verwendeten Vergletscherung erweitert (z.B. «11oGL»).

Alle ausgewählten Klimaszenarien wurden mit den **vier verschiedenen Modellversionen** («cb3c2\_DTIDW\_9802», «cb3c2\_IDW\_9802», «be3c3\_IDW\_9802» und «be3c3\_IDW\_8387», vgl. Kapitel 19.2.4) modelliert, allerdings wird an dieser Stelle nur auf die Resultate der Modellversion «be3c3\_IDW\_9802» vertieft eingegangen.

Jede hydrologische Modellierung setzt sich auch bei diesen Untersuchungen aus 50 Modellläufen zusammen, welche ihrerseits jeweils 20 Jahre umfassen. Pro Szenario und Modellvariante liegen somit insgesamt 1000 modellierte Jahre in täglicher Auflösung vor, welche schliesslich die Datengrundlage für die Auswertung und Analyse der verschiedenen Zielgrössen bilden (z.B. mittlerer saisonaler Abfluss) (vgl. Kapitel 21.2.1).

## 21.2 Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und die Abflussverhältnisse

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen der ausgewählten Klimaszenarien auf die saisonalen Veränderungen von Abfluss und Verdunstung des untersuchten Einzugsgebietes Kander-Hondrich aufgezeigt. Gleichzeitig wird auch auf die Veränderung des Abflussregimes sowie auf diejenigen bei der Verteilung der täglichen Abflussmittelwerte eingegangen.

### 21.2.1 Saisonale Veränderungen von Abfluss und Verdunstung

#### a) Modellerte relative und absolute saisonale Veränderungen

In Abbildung 21.3 sind für alle Jahreszeiten sowie für das ganze Jahr die relativen und absoluten Veränderungen des **Abflusses** und der **Verdunstung** gegenüber dem modellierten Referenzzustand der Periode 1980-1999 dargestellt. Die Angaben zeigen für jede Jahreszeit die Reaktion des untersuchten Einzugsgebietes Kander-Hondrich auf die verwendeten Klimaszenarien (vgl. Tabelle 21.1).

Die Resultate in Abbildung 21.3 stammen aus der Modellversion «be3c3\_IDW\_9802». Für die dargestellten Resultate wurden nur die Klimaszenarien verwendet, welche die um +2 °C erhöhten Änderungen für die Sommertemperaturen aufweisen (TS+). Diese wurden in Kombination mit den beiden Vergletscherungsszenarien (mGL, oGL) modelliert.

Die Resultate der Auswertung für jede Jahreszeit sowie für diejenige des ganzen Jahres sind für alle Teilgrafiken in Abbildung 21.3 dargestellt. Es sind folgende Punkte zu beachten:

- > Pro Zeitraum (Jahreszeit oder ganzes Jahr) sind jeweils **zwei Säulen** dargestellt: Die linke Säule umfasst die Resultate der Modellierungen mit aktueller Vergletscherung (mGL\_TS+), die rechte diejenigen ohne Vergletscherung (oGL\_TS+). Die Resultate der einzelnen Szenarien sind als **schwarze Punkte** dargestellt.
- > Die **durchgezogene horizontale Linie** entspricht dem Wert des modellierten Referenzzustandes der Periode 1980-1999.
- > Die **gestrichelte horizontale Linie** zeigt den Mittelwert aus allen dargestellten Szenarien der entsprechenden Periode.

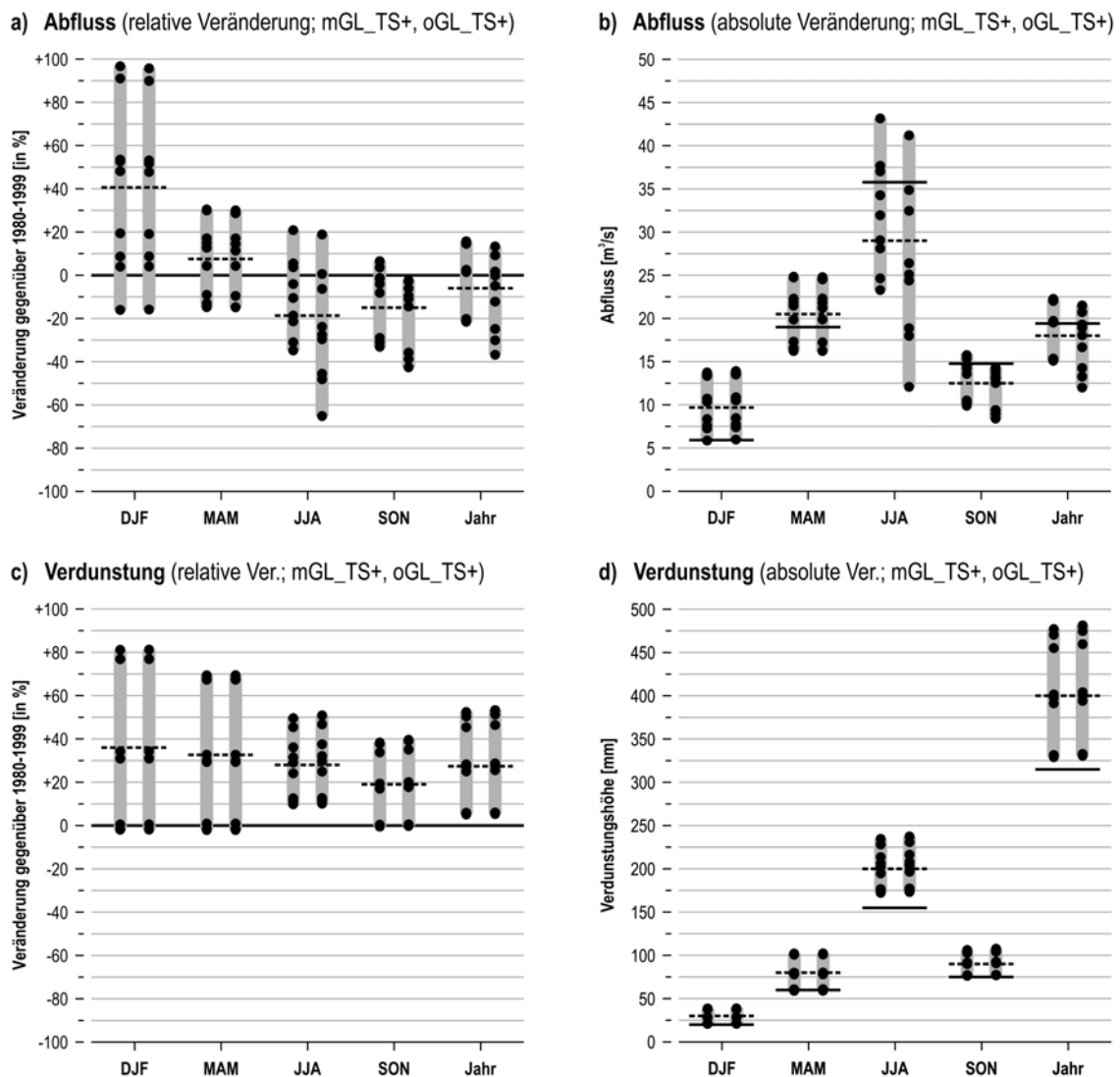


Abbildung 21.3: Auswirkungen der Klimaänderung auf den «Abfluss» (a und b) und die «Verdunstung» (c und d). Dargestellt sind die zu erwartenden saisonalen und jährlichen prozentualen (a und c) bzw. absoluten Veränderungen (b und d) gegenüber der Periode 1980-1999 für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich. Zwei Säulen pro Jahreszeit bzw. für das ganze Jahr: Veränderungen der ausgewerteten Kenngrösse bei aktueller Vergletscherung (mGL\_TS+, linke Säule), Veränderungen ohne Vergletscherung (oGL\_TS+, rechte Säule). Durchgezogene, horizontale Linien: mittlerer Wert des modellierten Referenzzustandes der Periode 1980-1999. Gestrichelte Linien: Saisonaler und jährlicher Mittelwert aus allen modellierten Szenarien (= schwarze Punkte).

Die numerischen Werte der maximalen, mittleren und minimalen relativen und absoluten Veränderungen, welche in Abbildung 21.3 dargestellt sind, können auch Tabelle 21.2 entnommen werden. Bei dieser Zusammenstellung ist zu beachten, dass bei den absoluten Veränderungen unterschiedliche Einheiten verwendet wurden. Zudem entsprechen die Veränderungen des Niederschlags denjenigen der verwendeten Klimaszenarien (vgl. Tabelle 21.1, Abbildung 21.1), welche auf Basis der Angaben von FREI (2005) erstellt und als Eingabedaten verwendet wurden. Es handelt sich dabei nicht um eine Ausgabegrösse der hydrologischen Modellierung.

Tabelle 21.2: Auswirkungen der Klimaänderung auf die saisonalen Mittelwerte ausgewählter Komponenten des Wasserhaushalts für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich. Aufgeführt sind die im Jahr 2050 zu erwartenden maximalen, mittleren und minimalen relativen bzw. absoluten Veränderungen des Niederschlags, des Abflusses und der Verdunstung gegenüber der Periode 1980-1999 (Ergebnisse der Szenarien mGL\_TS+, oGL\_TS+, Modellversion: be3c3\_IDW\_9802).

Ausgewertete Periode	Relative Veränderung			Absolute Veränderung		
	Niederschlag	Abfluss	Verdunstung	Niederschlag	Abfluss	Verdunstung
Winter (DJF, max. Veränderung)	+20%	+99%	+81%	+56 mm	+108 mm	+17 mm
<b>Winter (DJF, mittl. Veränderung)</b>	<b>+13%</b>	<b>+41%</b>	<b>+37%</b>	<b>+37 mm</b>	<b>+45 mm</b>	<b>+8 mm</b>
Winter (DJF, min. Veränderung)	0%	-16%	-2%	0 mm	-18 mm	-1 mm
Frühling (MAM, max. Veränderung)	+20%	+30%	+70%	+63 mm	+93 mm	+42 mm
<b>Frühling (MAM, mittl. Veränderung)</b>	<b>0%</b>	<b>+8%</b>	<b>+33%</b>	<b>0 mm</b>	<b>+24 mm</b>	<b>+20 mm</b>
Frühling (MAM, min. Veränderung)	-20%	-15%	-2%	-63 mm	-45 mm	-1 mm
Sommer (JJA, max. Veränderung)	0%	+21%	+51%	0 mm	+119 mm	+81 mm
<b>Sommer (JJA, mittl. Veränderung)</b>	<b>-20%</b>	<b>-19%</b>	<b>+28%</b>	<b>-87 mm</b>	<b>-107 mm</b>	<b>+44 mm</b>
Sommer (JJA, min. Veränderung)	-40%	-66%	+10%	-174 mm	-377 mm	+15 mm
Herbst (SON, max. Veränderung)	0%	+7%	+40%	0 mm	+15 mm	+31 mm
<b>Herbst (SON, mittl. Veränderung)</b>	<b>-7%</b>	<b>-15%</b>	<b>+19%</b>	<b>-19 mm</b>	<b>-35 mm</b>	<b>+15 mm</b>
Herbst (SON, min. Veränderung)	-20%	-43%	0%	-57 mm	-101 mm	0 mm
Ganzes Jahr (max. Veränderung)	+9%	+16%	+54%	+120 mm	+191 mm	+168 mm
<b>Ganzes Jahr (mittl. Veränderung)</b>	<b>-5%</b>	<b>-6%</b>	<b>+28%</b>	<b>-69 mm</b>	<b>-72 mm</b>	<b>+87 mm</b>
Ganzes Jahr (min. Veränderung)	-22%	-38%	+5%	-296 mm	-459 mm	+16 mm

DJF: Dezember, Januar, Februar; MAM: März, April, Mai; JJA: Juni, Juli, August; SON: September, Oktober, November

Aus Abbildung 21.3 bzw. Tabelle 21.2 gehen die folgenden Ergebnisse hervor:

- > Die **relativen Veränderungen des Abflusses** weisen starke saisonale Unterschiede auf: Im **Winter** (= DJF) ist unter dem Einfluss der Klimaänderung im Mittel eine Zunahme von +41% gegenüber den Verhältnissen der Periode 1980-1999 zu beobachten (vgl. Abbildung 21.3 a). Die Streuung der zu erwartenden Veränderungen (-16% bis +99% des aktuellen Winterabflusses) fällt für diese Jahreszeit zudem sehr gross aus. Dagegen ist im **Sommer** (= JJA) im Durchschnitt von einem Rückgang um -19% gegenüber den Abflussmengen des Referenzzustandes auszugehen, wobei auch in dieser Jahreszeit die Streuung der verschiedenen Szenarien gross ist (-66% bis +20%). Die Veränderungen in

den übrigen Jahreszeiten liegen zwischen denjenigen von Sommer und Winter. Beim **Jahresmittel** sind hingegen nur geringe Abflussänderungen zu erwarten: Der Mittelwert zeigt einen Rückgang von -6%, die Streuung der Veränderungen reicht von -38% bis +16%.

- > Bei den **absoluten Veränderungen des Abflusses** fällt auf, dass die grössten mengenmässigen Veränderungen ebenfalls im Sommer und im Winter zu erwarten sind (vgl. Abbildung 21.3 b). Während im Sommer von einer durchschnittlichen Reduktion des Abflusses um  $-7 \text{ m}^3/\text{s}$  ausgegangen werden muss, kann im Winter eine mittlere Abflusszunahme von ca.  $+3 \text{ m}^3/\text{s}$  beobachtet werden. Die Veränderungen bei den anderen Jahreszeiten und beim mittleren Jahresabfluss fallen demgegenüber gering aus.
- > Etwas weniger stark ausgeprägt sind die saisonalen Unterschiede bei den **relativen und absoluten Veränderungen der Verdunstung** (Abbildung 21.3 c und d). Während im Winter die prozentuale Zunahme bei der Verdunstung im Mittel +37% gegenüber den Verhältnissen von 1980-1999 beträgt, liegt im Sommer der entsprechende Wert auf rund +28%. Die Streuung der Veränderungen aus allen Szenarien ist jedoch im Winter sehr gross (-2% bis +81%). Die absoluten Veränderungen betragen im Mittel zwischen rund +10 mm für den Winter und bis +45 mm für den Sommer. Über das ganze Jahr betrachtet nimmt somit die Verdunstungssumme im Durchschnitt um +87 mm bzw. um +28% zu.

Auffällige Unterschiede zwischen den Modellierungen mit aktueller bzw. ohne Vergletscherung sind ausschliesslich beim mittleren saisonalen Abfluss im Sommer und Herbst zu beobachten (Abbildung 21.3 a und b). Auf diesen Punkt wird im Folgenden vertieft eingegangen.

## b) Zuverlässigkeit der Angaben

Für die in Kapitel 21.2 dargestellten saisonalen und jährlichen Veränderungen der Wasserhaushaltskomponenten wurde ausschliesslich die Modellversion «be3c3\_IDW\_9802» in Kombination mit den Szenarien «mGL\_TS+» und «oGL\_TS+» verwendet. Wie aus den Resultaten der Sensitivitätsanalysen in Kapitel 20 hervorging, können sich aber bei den modellierten Werten unter Anwendung einer anderen Modellversion grössere Unterschiede ergeben. Weitere Unsicherheiten der Angaben in Abbildung 21.3 bzw. Tabelle 21.2 bestehen bei der verwendeten Vergletscherung sowie bei den Varianten der Sommertemperatur. Im Folgenden wird auf diese Punkte eingegangen und aufgezeigt, in welchem Bereich sich die Resultate durch Variation dieser Einflussgrössen bewegen bzw. mit welcher Unsicherheit die Angaben aus Abbildung 21.3 bzw. Tabelle 21.2 behaftet sind.

**Einfluss der verwendeten Modellversion:** Wie in Kapitel 18.5.2 erwähnt, kann die Modellkaskade «Klimamodell-Wettergenerator-Hydrologisches Modell» durch Variation verschiedener Einflussgrössen zu unterschiedlichen Modellversionen kombiniert werden. Zur Abschätzung der daraus resultierenden Unsicherheiten, wurden die Klimaszenarien mit den vier Modellversionen, welche auch für die Sensitivitätsanalysen verwendet wurden (vgl. Kapitel 20.1), modelliert und ausgewertet.

Aus Abbildung 21.4 wird der Einfluss der gewählten Modellversion auf die relativen Veränderungen der saisonalen und jährlichen Mittelwerte des Abflusses und der Verdunstung gegenüber dem Referenzzustand der Periode 1980-1999 ersichtlich. Dargestellt sind die Ergebnisse der Modellversion «be3c3\_IDW\_8387», «be3c3\_IDW\_9802», «cb3c2\_IDW\_9802» und «cb3c2\_DTIDW\_9802», wel-

che mit aktueller Vergletscherung (mGL) und den Klimaszenarien mit erhöhter Sommertemperatur (TS+) modelliert wurden. Für jede Jahreszeit und für das gesamte Jahr sind jeweils vier graue Säulen dargestellt, welche den Bereich der Veränderungen aus den neun Klimaszenarien für jede Modellversion umfassen. Die schwarzen Punkte entsprechen den Resultaten der einzelnen Szenarien. Das schwarze Dreieck markiert jeweils die Modellversion «be3c3\_IDW\_9802», welche für alle Auswertungen in diesem Kapitel eingesetzt wurde.

Zudem wird aus dieser Zusammenstellung ersichtlich, dass beim **Abfluss** (Abbildung 21.4 a) Unterschiede zwischen den Resultaten der verschiedenen Modellversionen zu beobachten sind. Diese können in erster Linie auf die gewählte **Methode der räumlichen Interpolation** (DTIDW vs. IDW) der meteorologischen Eingabedaten zurückgeführt werden. Im Winter und weniger stark ausgeprägt auch im Frühling, weist das Modell «cb3c2\_DTIDW\_9802» für einzelne Klimaszenarien höhere Veränderungen auf, als dies aus den anderen Modellversionen hervorgeht. Daneben weist aber auch die Version «be3c3\_IDW\_8387» im Winter leichte Abweichungen gegenüber den Ergebnissen der anderen Modelle auf. Die Resultate der beiden Modellversionen «be3c3\_IDW\_9802» und «cb3c2\_IDW\_9802» liefern für alle Jahreszeiten sehr ähnliche Resultate, d.h. die verschiedenen Versionen des Wettergenerators führen zu vergleichbaren Ergebnissen (vgl. Kapitel 19.2.4).

Bei der **Verdunstung** (Abbildung 21.4 b) lassen sich zwischen den verschiedenen Modellversionen keine grösseren Unterschiede feststellen, was auf die gewählte Methode zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration nach HAMON (1961) zurückgeführt werden kann.

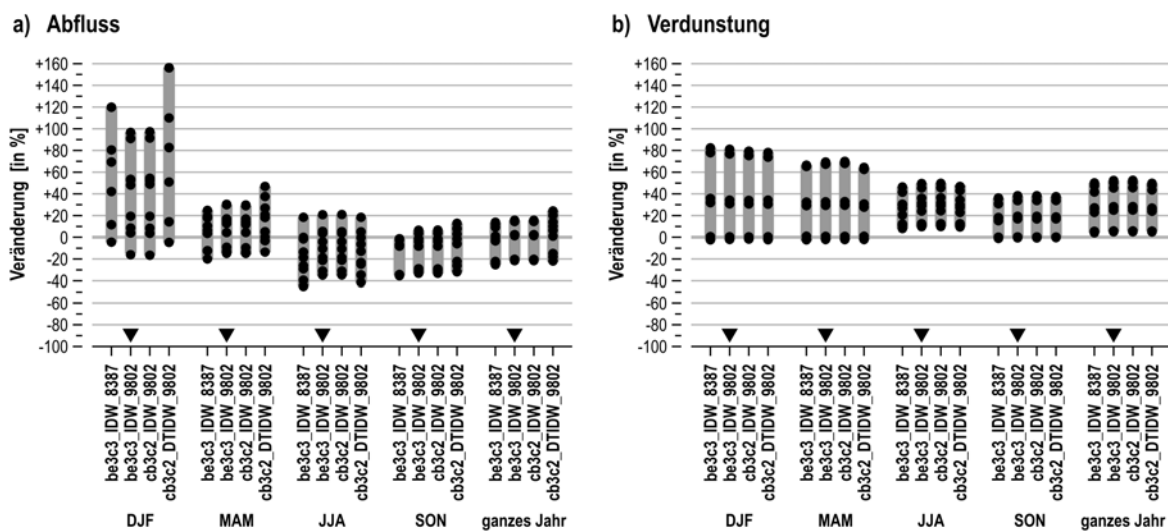


Abbildung 21.4: Einfluss der Modellversion auf die modellierten Werte von Abfluss (a) und Verdunstung (b). (Kander-Hondrich, 1980-1999, Tagesmittelwerte. Modellversion: be3c3\_IDW\_9802. DJF: Dez. bis Feb.; MAM: März bis Mai; JJA: Juni bis Aug.; SON: Sept. bis Nov. Die schwarzen Dreiecke markieren die im gesamten Kapitel 21 verwendete Modellversion.)

Aus diesem Vergleich geht hervor, dass die Werte, welche mit der Modellversion «be3c3\_IDW\_9802» berechnet wurden (vgl. Abbildung 21.4: Version mit schwarzem Dreieck), gut mit den Ergebnissen der anderen Modellversionen verglichen und somit in dieser Hinsicht als zuverlässig betrachtet werden können. Sämtliche Modelle zeigen für alle Jahreszeiten das gleiche Muster der Veränderungen und stimmen auch in den numerischen Angaben weitgehend überein. Gewisse Einschränkungen bestehen aber für die Veränderungen des Abflusses im Winter, wo mit der ver-

wendeten Modellversion im Vergleich zu den anderen Modellen zum Teil unterdurchschnittliche Werte erzielt wurden und die Angaben deshalb mit Vorsicht zu verwenden sind. Es ist jedoch zu beachten, dass die absoluten Differenzen zwischen den Modellen auf Grund der geringen Abflussmengen in dieser Jahreszeit eher klein sein dürften.

**Einfluss von Vergletscherung und Sommertemperatur:** Welche Auswirkungen die verschiedenen Kombinationen von Vergletscherungsvariante (**mGL**, **oGL**) und Klimaszenario (**TS=**, **TS+**) auf die saisonalen und jährlichen Abfluss- bzw. Verdunstungsmengen haben, wird aus Abbildung 21.5 ersichtlich. Für die entsprechenden Modellierungen wurde immer die Modellversion «be3c3\_IDW\_9802» verwendet. Auch in dieser Abbildung sind für jede Jahreszeit und für das ganze Jahr vier graue Säulen dargestellt. Jede Säule deckt den Bereich der Ergebnisse ab, die aus der Modellierung der verschiedenen Variantenkombinationen (mGL\_TS+, mGL\_TS=, oGL\_TS+, oGL\_TS=) resultieren. Die schwarzen Punkte entsprechen den Resultaten der einzelnen Klimaszenarien, die schwarzen Dreiecke markieren die in Kapitel 21.2.1 a) verwendeten Kombinationen.

Aus Abbildung 21.5 geht hervor, dass die unterschiedliche Sommertemperatur bzw. Vergletscherung vor allem im Sommer und Herbst grössere Unterschiede bei Abfluss und Verdunstung hervorrufen können.

Beim **mittleren Abfluss im Sommer** (Abbildung 21.5 a, JJA) ergeben sich bei aktueller Vergletscherung durch die erhöhte Sommertemperatur (mGL\_TS+) leichte Zunahmen von ca. 10% gegenüber den Modellierungen mit gleichmässiger Temperatur bei allen Jahreszeiten (mGL\_TS=). Bei den beiden Modellierungen ohne Vergletscherung (oGL\_TS+, oGL\_TS=) sind gegenüber den Modellierung mit aktueller Vergletscherung für den mittleren Sommerabfluss sowohl eine grössere Streuung der Veränderungsbeträge als auch grössere Reduktionen von mehr als -65% zu beobachten. Für den **mittleren Abfluss im Herbst** ergeben sich ebenfalls leichte Unterschiede, wobei eine stetige Abnahme der Abflussmengen von «mGL\_TS=» bis «oGL\_TS+» beobachtet werden kann.

Dadurch ergeben sich auch beim **mittleren jährlichen Abfluss** leichte Veränderungen, welche sich bei den Modellierungen ohne Vergletscherung (oGL\_TS=, oGL\_TS+) als grössere Streuung der Änderungsbeträge niederschlagen.

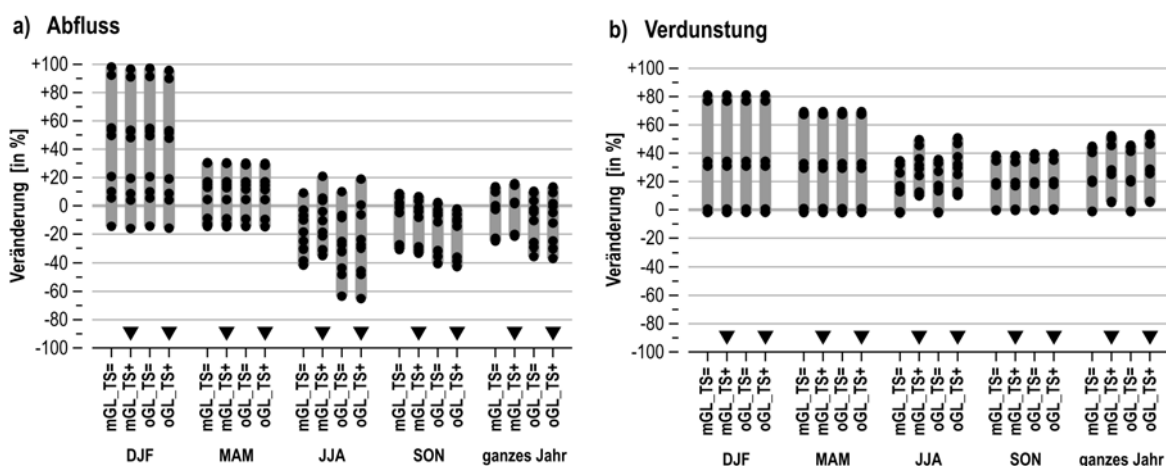


Abbildung 21.5: Einfluss von erhöhter Sommertemperatur und unterschiedlicher Vergletscherung auf die modellierten Werte von Abfluss (a) und Verdunstung (b) (Kander-Hondrich, 1980-1999, Modellversion: be3c3\_IDW\_9802, Tagesmittelwerte). TS=: Sommertemp. gleich wie bei anderen Jahreszeiten, TS+: erhöhte Sommertemperatur, mGL: mit aktueller Vergletscherung, oGL: ohne Vergletscherung, DJF: Dez. bis Feb.; MAM: März bis Mai; JJA: Juni bis Aug.; SON: Sept. bis Nov. Die schwarzen Dreiecke markieren die verwendeten Varianten.

Die **Verdunstung** (Abbildung 21.5 b) wird durch das verwendete Modell nach HAMON (1961) direkt durch die Temperatur beeinflusst (vgl. Kapitel 18.3). Deshalb ist bei den Modellierungen «mGL\_TS+» und «oGL\_TS+», welche im **Sommer** (JJA) gegenüber den anderen Jahreszeiten eine erhöhte Temperatur aufweisen, eine Zunahme bei der Verdunstung um ca. 10% zu beobachten. Diese zusätzliche Verdunstungsmenge wird auch bei der jeweiligen Jahressumme der entsprechenden Modellvarianten ersichtlich. Die Veränderung der Vergletscherung (mGL, oGL) wirkt sich dagegen nicht auf die saisonalen und jährlichen Verdunstungswerte aus.

Zur Bestimmung der Auswirkungen der Klimaänderung auf die saisonalen Mittelwerte von Abfluss und Verdunstung (vgl. Kapitel 21.2.1 a), wurden die Klimaszenarien mit den erhöhten Veränderungen der Sommertemperatur (TS+) in Kombination mit den beiden Vergletscherungszuständen (mGL, oGL) verwendet. Wie der Vergleich in Abbildung 21.5 zeigt, kann mit diesen Varianten (markiert mit schwarzen Dreiecken) nahezu das gesamte Spektrum der Veränderungen sowohl beim Abfluss als auch bei der Verdunstung erfasst werden. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die in Tabelle 21.2 und Abbildung 21.3 aufgeführten Werte repräsentative Resultate darstellen.

## 21.2.2 Veränderung des Abflussregimes

In diesem Unterkapitel wird anhand der modellierten mittleren monatlichen Abflüsse vertieft auf die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Jahresgang des Abflusses im untersuchten Einzugsgebiet Kander-Hondrich eingegangen. Durch den Vergleich der Modellierungen mit unterschiedlicher Vergletscherung (mGL, oGL) sowie verschiedener Sommertemperaturänderung (TS=, TS+) können zudem Aussagen zu den Auswirkungen dieser beiden Einflussgrößen auf das Abflussregime und die damit verbundenen Abflussprozesse gemacht werden.

In Abbildung 21.6 sind die Resultate von sämtlichen modellierten Klimaszenarien und Vergletscherungszuständen für die Modellversion «be3c3\_IDW\_9802» dargestellt. Die grauen Linien entsprechen den Ergebnissen der realistischen Klimaszenarien (vgl. Kapitel 21.1, Tabelle 21.1), die gestrichelte Linie zeigt den Mittelwert aus allen Szenarien und die schwarze Linie, welche für alle Teilgrafiken identisch ist, zeigt den modellierten Referenzzustand (1980-1999).

Aus Abbildung 21.6 geht hervor, dass die bereits bei den saisonalen Auswertungen aufgetretenen Veränderungen (vgl. Kapitel 21.2.1 a) auch für die monatlichen Mittelwerte zu erkennen sind. Für alle Modellvarianten zeigt sich beim Vergleich des Mittelwertes der Szenarien (gestrichelte Linie) mit dem modellierten Referenzzustand (schwarze Linie), dass die Abflussmengen im Sommer und Herbst (Mai bis Oktober) generell reduziert werden und die mittleren monatlichen Abflüsse von Dezember bis April zunehmen. Im **Winter** unterscheiden sich die Resultate der verschiedenen Modellierungsvarianten (mGL\_TS+, mGL\_TS=, oGL\_TS+, oGL\_TS=) nur geringfügig, da die variierten Größen auf die hydrologischen Prozesse in dieser Jahreszeit keinen Einfluss haben. Im **Sommer** werden aber grössere Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellierungen ersichtlich, weshalb sich die nachfolgenden Ausführungen vorwiegend auf die Abflüsse in dieser Jahreszeit beschränken (vgl. Abbildung 21.6):

- a) Bei den Modellierungen mit **aktueller Vergletscherung** und gleichmässiger saisonaler Temperaturänderung (mGL\_TS=) wird ersichtlich, dass die monatlichen Abflussmengen der Klimaszenarien von Juni bis August zum Teil deutlich reduziert werden und unter den Werten des Referenzzustandes der Periode 1980-1999 liegen. Mit wenigen Ausnahmen ist dieses Muster für alle Szenarien zu beobachten.



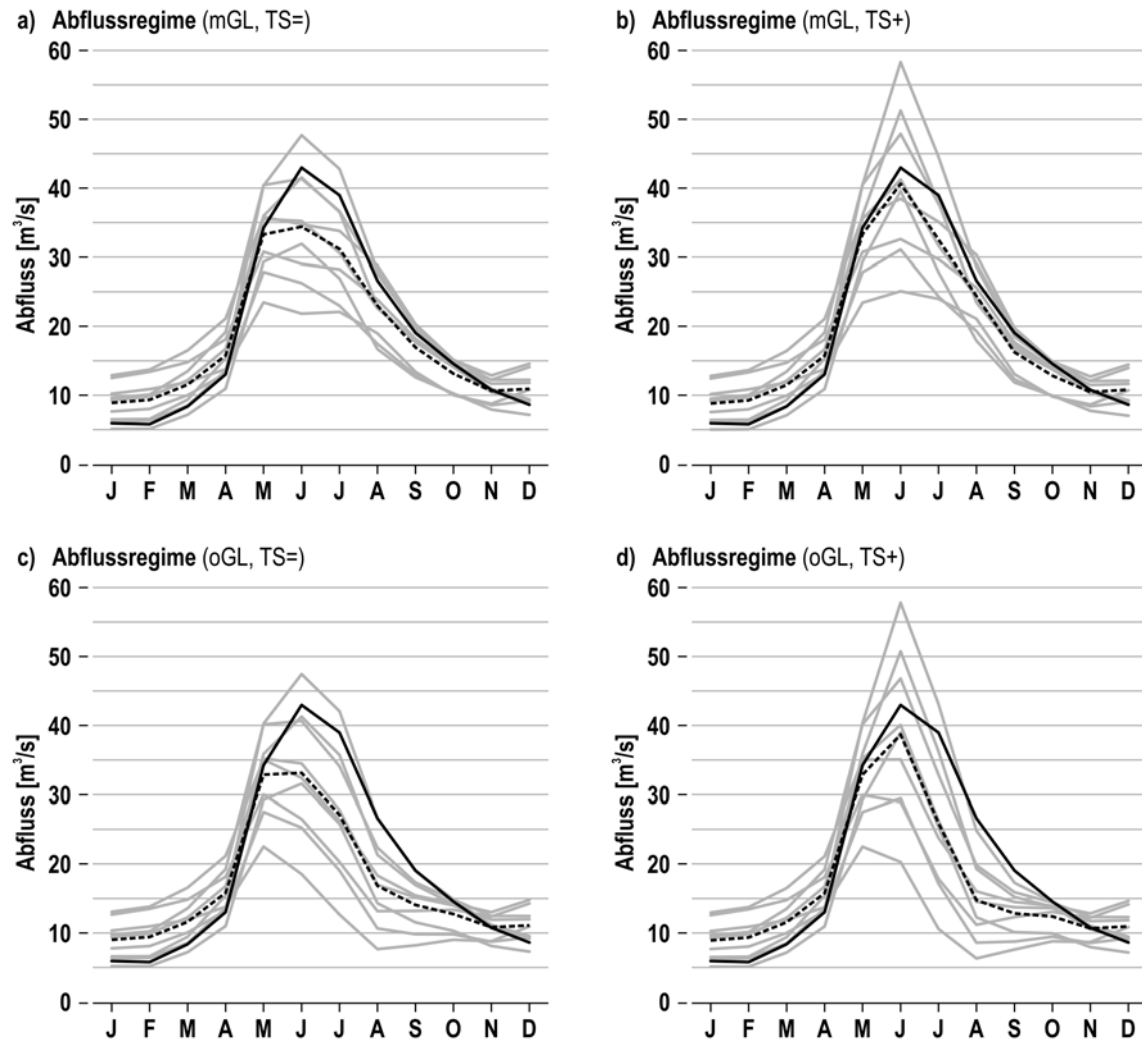


Abbildung 21.6: Auswirkung der Klimaänderung auf das Abflussregime der Kander-Hondrich (Modellversion «be3c3\_IDW\_9802», Monatsmittelwerte). Dargestellt sind die Ergebnisse für die modellierten ausgewählten Klimaszenarien (graue Linien). Die gestrichelte schwarze Linie zeigt den Mittelwert aus diesen Szenarien, die durchgezogene schwarze Linie entspricht dem modellierten Referenzzustand (1980-1999).

- b) Der Mittelwert der Szenarien mit **aktueller Vergletscherung und erhöhten Veränderungen der Sommertemperatur** (mGL\_TS+) zeigt für den Sommer und Herbst (Juni bis Oktober) nur eine geringe Reduktion des Abflusses gegenüber den Werten des Referenzzustandes (schwarze Linie). Bei mehreren Szenarien nehmen die Abflussmengen im Vergleich zum Referenzzustand sogar zu, was sich in teilweise sehr hohen Abflusswerten im Juni äußert. Die Konzentration des Abflusses in diesem Monat wird durch die Kombination von erhöhten Sommertemperaturen (Juni bis August), hohem Niederschlagseintrag im Winter und unveränderten Niederschlagsverhältnissen im Sommer hervorgerufen. Die Verknüpfung dieser Verhältnisse bewirkt, dass die Schneeschmelze im Juni konzentriert anfällt und dadurch der mittlere monatliche Abfluss stark ansteigt. Damit können auch die zu beobachtenden Unterschiede gegenüber der Modellvariante «mGL\_TS=» (Abbildung 21.6 a), welche von weniger hohen Temperaturen im Sommer ausgeht, erklärt werden. Auch die durch die höheren Temperaturen verstärkte Verdunstung kann diese zusätzlich anfallenden Abflussmengen nicht wesentlich reduzieren. Es ist aber auch zu beachten, dass die Streuung der

Szenarien in diesen Sommermonaten sehr gross ist. Dies ist ein Hinweis darauf, dass Aussagen zu den im Jahr 2050 zu erwartenden Abflussverhältnissen im Sommer mit grosser Unsicherheit behaftet sind. Im Vergleich zu den Modellierungen ohne Vergletscherung (Abbildung 21.6 c und d, oGL\_TS=, oGL\_TS+) wird auch ersichtlich, dass die erhöhten Sommertemperaturen zusätzlichen Abfluss in den Monaten Juli bis August hervorrufen. Aus dieser Gegenüberstellung geht hervor, dass diese erhöhten Abflussmengen aus der Gletscherschmelze stammen müssen, womit die Defizite beim Wasserdargebot, welche durch den reduzierten Niederschlagseintrag und die erhöhte Verdunstung entstehen, weitgehend kompensiert werden können.

- c) Bei den Modellierungen **ohne Vergletscherung und mit gleichmässiger Temperaturänderung für alle Jahreszeiten** (oGL\_TS=) wird das Fehlen dieser zusätzlichen Abflussmengen aus der Gletscherschmelze deutlich sichtbar. In den Monaten Juli bis September treten beim Mittelwert der Szenarien (gestrichelte Linie) Abweichungen zu den vergleichbaren Modellierungen mit aktueller Vergletscherung auf (Abbildung 21.6 a). Daneben wird auch ersichtlich, dass die Streuung der Szenarien ohne Vergletscherung in diesen Monaten markant grösser wird und stärker durch die Niederschlagsverhältnisse gesteuert wird.
- d) Auch die Modellierungen **ohne Vergletscherung und mit erhöhten Veränderungen der Sommertemperatur** (oGL\_TS+) zeigen in den Monaten Juli bis September grössere Abflussdefizite gegenüber den Werten des modellierten Referenzzustandes sowie denjenigen der Modellierungen mit aktueller Vergletscherung (Abbildung 21.6 a und b). Die erhöhten Sommertemperaturen bewirken, dass bei diesen Modellierungen die Schneeschmelze vorwiegend im Juni auftritt, der Abfluss in diesem Monat konzentriert anfällt und somit die Saisonalität immer noch deutlich ausgeprägt ist. Somit erreicht im Juni der Mittelwert der Szenarien (gestrichelte Linie) das Monatsmittel des Referenzzustandes (schwarze Linie) annähernd und einzelne Szenarien (graue Linien) übertreffen dieses sogar deutlich. In den Monaten Juli bis September können bei einzelnen Szenarien aber auch sehr tiefe Abflussmengen auftreten, da die Schneeschmelze für diesen Zeitraum nun deutlich tiefer ausfällt. Dadurch ergibt sich bei dieser Modellierung die am stärksten ausgeprägte Streuung der monatlichen Abflussmittelwerte.

In Abbildung 21.7 sind als Zusammenfassung die **Mittelwerte der Szenarien** aus den verschiedenen Modellvarianten (farbige Linien) sowie die Werte des modellierten Referenzzustandes (schwarze Linie) dargestellt. Die folgenden wesentlichen Punkte lassen sich aus dieser Zusammenstellung ableiten:

- > Durch die erhöhten Temperaturen fallen bei den Modellvarianten mit aktueller Vergletscherung grössere Mengen an **Schmelzwasser aus der Schnee- und Gletscherschmelze** an (blaue und rote Linie). Diese zusätzlichen Abflussmengen vermögen bei den Modellvarianten mit aktueller Vergletscherung die Abflussdefizite, welche bei den Modellvarianten ohne Gletscher gegenüber dem modellierten Referenzzustand (1980-1999) im Sommer auftreten, weitgehend zu kompensieren. Die Ursache für die zu beobachtenden Abflussdefizite im Sommer liegen bei der innerjährlichen Verlagerung des Abflusses auf den Winter, bei der reduzierten saisonalen Niederschlagsmenge, der verstärkten Verdunstung und dem ausbleibenden Schmelzwasser. Ohne Vergletscherung (grüne und gelbe Linie) entsteht somit in den Monaten Juli bis September ein deutliches Abflussdefizit im Vergleich zum modellierten Referenzzustand.

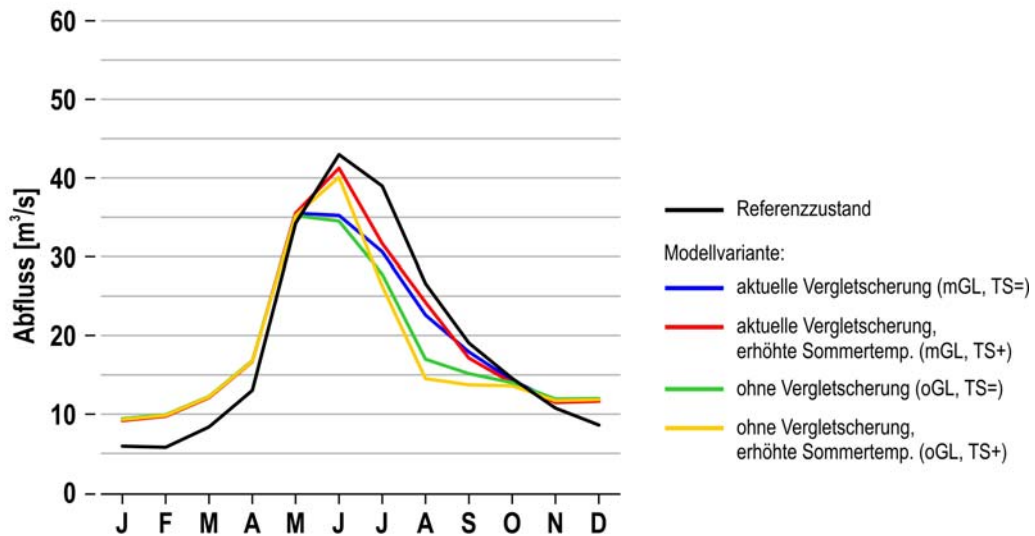


Abbildung 21.7: Mittlere Auswirkungen der Klimaänderung auf die mittleren monatlichen Abflüsse für das Jahr 2050 (Kander-Hondrich). Berücksichtigt wurden unterschiedliche Vergletscherungszustände sowie unterschiedliche Szenarien für die Veränderung der mittleren Sommertemperatur.

- > Die **erhöhten Temperaturen im Sommer** führen zu einer Konzentration der Schneeschmelze in dieser Jahreszeit und insbesondere im Juni (rote und gelbe Linie, TS+). Dies trägt dazu bei, dass sich auch die Saisonalität des Abflussregimes im Sommer gegenüber den Modellierungen mit gleichmässigen saisonalen Temperaturänderungen deutlich verstärkt (blaue und grüne Linien, TS=).
- > Diese hydrologischen Veränderungen äussern sich insgesamt auch als **Veränderungen im Abflussregime**. Während das Abflussregime für das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich entsprechend der Typisierung von ASCHWANDEN & WEINGARTNER (1985) unter den aktuellen klimatischen und hydrologischen Bedingungen dem Typ «nivo-glaciaire» entspricht (vgl. Kapitel 4.3), kann unter den zukünftigen hydrologischen Verhältnissen auch ein Abflussregime des Typs «nival alpin» (rote und gelbe Linien, TS+) bzw. «nival de transition» (blaue und grüne Linien, TS=) auftreten. Die zu erwartenden Regimetypen zeigen gegenüber den aktuellen Verhältnissen erhöhte Abflussmengen im Winter und leicht bzw. deutlich reduzierte Abflussmengen im Sommer.

### 21.2.3 Veränderung bei Quantilen der täglichen Abflussmittelwerte

Neben den Auswirkungen der Klimaänderung auf die saisonalen Abflussmittelwerte (Kapitel 21.2.1) und auf das Abflussregime (Kapitel 21.2.2) wird in diesem Unterkapitel auf die Veränderungen bei verschiedenen Quantilen der täglichen Abflussmittelwerte eingegangen. Dadurch werden die Auswirkungen der veränderten Klimaverhältnisse auf die **extremen Abflussmengen im Niedrig- und Hochwasserbereich** unabhängig ihres Eintretenszeitpunktes ersichtlich. Die Ergebnisse der durchgeführten Analysen sind in Tabelle 21.3 (Modellierungen mit aktueller Vergletscherung, mGL) bzw. Tabelle 21.4 (Modellierungen ohne Vergletscherung, oGL) aufgeführt. Alle Resultate basieren auf den Modellierungen mit der Modellversion «be3c3\_IDW\_9802». Die beiden Tabellen sind nach dem folgenden Muster aufgebaut:

- > Die Ergebnisse des modellierten Referenzzustandes (Periode 1980-1999, «Referenz») sind in der ersten Zeile jeder Tabelle aufgeführt. In den Zeilen darunter folgen die Modellierungen der **Szenarien mit erhöhter Temperaturänderung im Sommer** (TS+, «11mGL» bis «19mGL», bzw. «11oGL» bis «19oGL»). Die Resultate der Szenarien, welche für alle Jahreszeiten **die gleichen Temperaturänderungen** aufweisen, sind in den nachfolgenden Zeilen (TS=, «21mGL» bis «29mGL» bzw. «21oGL» bis «29oGL») enthalten.
- > Aus den vorderen Spalten der Tabellen werden die verschiedenen berechneten Quantile (1%-, 25%-, 50%-, 75%- und 99%-Quantil) ersichtlich. Blaue Zahlen weisen jeweils auf Werte hin, welche **fünf und mehr Prozent grösser** sind als die Werte des modellierten Referenzzustandes. Resultate, die **fünf und mehr Prozent kleiner** sind als der entsprechende Wert des Referenzzustandes, sind rot dargestellt. Die schwarzen Zahlen liegen dementsprechend in einem Bereich von  $\pm 5\%$  um die berechneten Quantile des Referenzzustandes. Aus den hinteren Spalten werden die verwendeten saisonalen Temperatur- (in  $^{\circ}\text{C}$ ) und Niederschlagsänderungen (in %) der verschiedenen Szenarien ersichtlich.

Tabelle 21.3: Auswirkung der Klimaänderung auf verschiedene Quantile der täglichen Abflussmittelwerte mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, 1980-1999, Modellversion: be3c3\_IDW\_9802, Tagesmittelwerte). Blaue Zahlen: mind. 5 Prozent über dem Wert des Referenzzustandes, Rote Zahlen: mind. 5 Prozent unter dem Wert des Referenzzustandes, Schwarze Zahlen: zwischen  $\pm 5$  Prozent um den Wert des Referenzzustandes.

Modell	Quantile der täglichen Abflussmittel					Temperaturänderung [ $^{\circ}\text{C}$ ]				Niederschlagsänderung [%]				
	1% [m <sup>3</sup> /s]	25% [m <sup>3</sup> /s]	50% [m <sup>3</sup> /s]	75% [m <sup>3</sup> /s]	99% [m <sup>3</sup> /s]	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	
<b>Referenz</b>	2.5	7.3	13.4	26.2	77.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	
<b>Klimaszenario (TS+)</b>	<b>11mGL</b>	<b>4.8</b>	<b>11.2</b>	<b>18.3</b>	<b>29.9</b>	<b>69.7</b>	4.0	4.0	6.0	4.0	+20	+20	0	0
	<b>12mGL</b>	<b>4.3</b>	<b>10.5</b>	<b>16.7</b>	<b>26.3</b>	<b>59.8</b>	4.0	4.0	6.0	4.0	+20	0	-20	0
	<b>13mGL</b>	<b>3.1</b>	<b>8.1</b>	<b>13.0</b>	<b>21.1</b>	<b>45.2</b>	4.0	4.0	6.0	4.0	0	-20	-40	-20
	<b>14mGL</b>	<b>3.6</b>	<b>9.7</b>	<b>16.5</b>	<b>29.9</b>	<b>82.4</b>	2.0	2.0	4.0	2.0	+20	+20	0	0
	<b>15mGL</b>	<b>3.4</b>	<b>9.0</b>	<b>15.0</b>	<b>26.2</b>	<b>71.9</b>	2.0	2.0	4.0	2.0	+20	0	-20	0
	<b>16mGL</b>	<b>2.6</b>	<b>7.0</b>	<b>11.7</b>	<b>20.5</b>	<b>55.3</b>	2.0	2.0	4.0	2.0	0	-20	-40	-20
	<b>17mGL</b>	<b>2.5</b>	<b>7.7</b>	<b>14.1</b>	<b>29.7</b>	<b>94.5</b>	0.0	0.0	2.0	0.0	+20	+20	0	0
	<b>18mGL</b>	<b>2.3</b>	<b>7.1</b>	<b>13.0</b>	<b>25.8</b>	<b>83.2</b>	0.0	0.0	2.0	0.0	+20	0	-20	0
	<b>19mGL</b>	<b>1.8</b>	<b>5.6</b>	<b>10.1</b>	<b>19.8</b>	<b>66.5</b>	0.0	0.0	2.0	0.0	0	-20	-40	-20
<b>Klimaszenario (TS=)</b>	<b>21mGL</b>	<b>4.9</b>	<b>11.4</b>	<b>18.2</b>	<b>28.6</b>	<b>68.9</b>	4.0	4.0	4.0	4.0	+20	+20	0	0
	<b>22mGL</b>	<b>4.4</b>	<b>10.6</b>	<b>16.5</b>	<b>25.1</b>	<b>58.8</b>	4.0	4.0	4.0	4.0	+20	0	-20	0
	<b>23mGL</b>	<b>3.2</b>	<b>8.2</b>	<b>12.8</b>	<b>19.7</b>	<b>44.2</b>	4.0	4.0	4.0	4.0	0	-20	-40	-20
	<b>24mGL</b>	<b>3.7</b>	<b>9.9</b>	<b>16.5</b>	<b>28.6</b>	<b>78.7</b>	2.0	2.0	2.0	2.0	+20	+20	0	0
	<b>25mGL</b>	<b>3.5</b>	<b>9.2</b>	<b>15.0</b>	<b>25.0</b>	<b>68.5</b>	2.0	2.0	2.0	2.0	+20	0	-20	0
	<b>26mGL</b>	<b>2.7</b>	<b>7.2</b>	<b>11.7</b>	<b>19.2</b>	<b>52.8</b>	2.0	2.0	2.0	2.0	0	-20	-40	-20
	<b>27mGL</b>	<b>2.6</b>	<b>7.8</b>	<b>14.4</b>	<b>28.7</b>	<b>86.1</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	+20	+20	0	0
	<b>28mGL</b>	<b>2.4</b>	<b>7.3</b>	<b>13.1</b>	<b>25.0</b>	<b>75.9</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	+20	0	-20	0
	<b>29mGL</b>	<b>1.9</b>	<b>5.8</b>	<b>10.2</b>	<b>18.8</b>	<b>60.2</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0	-20	-40	-20

DJF: Dezember, Januar, Februar; MAM: März, April, Mai; JJA: Juni, Juli, August; SON: September, Oktober, November

Aus den Resultaten in Tabelle 21.3 (mGL) und Tabelle 21.4 (oGL) wird Folgendes ersichtlich:

- > Die meisten Szenarien weisen eine **Zunahme bei den kleinen Quantilen** (1% und 25%) und eine **Abnahme bei den grossen Quantilen** (75% und 99%) der täglichen Abflussmittelwerte auf. Die Veränderungen beim 75%-Quantil sind jedoch von der Vergletscherung abhängig: Während bei den Modellierungen mit aktueller Vergletscherung die Zu- und Abnahmen bei den Szenarien ausgeglichen sind und durch das Niederschlagszenario gesteuert werden, kann bei den Modellierungen ohne Vergletscherung für fast alle Szenarien eine Abnahme bei diesem Quantil festgestellt werden.
- > Unterschiede zwischen den Modellierungen mit erhöhter Änderung der Sommertemperatur (TS+, obere Tabellenhälfte) und denjenigen mit gleichmässiger Temperaturänderung (TS=, untere Tabellenhälfte) sind kaum vorhanden. Geringe Abweichungen sind bei den grossen Quantilwerten (75%, 99%) ersichtlich. Allerdings lässt sich hier nicht eindeutig erkennen, welche Modellvariante zu grösseren Abflussmengen bei diesen Quantilen führt.

Tabelle 21.4: Auswirkung der Klimaänderung auf verschiedene Quantile der täglichen Abflussmittelwerte ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, 1980-1999, Modellversion: be3c3\_IDW\_9802, Tagesmittelwerte). Blaue Zahlen: mind. 5 Prozent über dem Wert des Referenzzustandes, Rote Zahlen: mind. 5 Prozent unter dem Wert des Referenzzustandes, Schwarze Zahlen: zwischen  $\pm 5$  Prozent um den Wert des Referenzzustandes.

Modell	Quantile der täglichen Abflussmittel					Temperaturänderung [°C]				Niederschlagsänderung [%]				
	1% [m <sup>3</sup> /s]	25% [m <sup>3</sup> /s]	50% [m <sup>3</sup> /s]	75% [m <sup>3</sup> /s]	99% [m <sup>3</sup> /s]	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	
<b>Referenz</b>	2.5	7.3	13.4	26.2	77.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	
<b>Klimaszenario (TS+)</b>	11oGL	4.7	10.4	14.9	24.1	67.9	4.0	4.0	6.0	4.0	+20	+20	0	0
	12oGL	4.0	9.1	13.0	20.7	58.3	4.0	4.0	6.0	4.0	+20	0	-20	0
	13oGL	2.5	6.3	9.5	14.8	43.8	4.0	4.0	6.0	4.0	0	-20	-40	-20
	14oGL	3.7	9.5	14.7	26.5	81.4	2.0	2.0	4.0	2.0	+20	+20	0	0
	15oGL	3.5	8.6	12.9	22.7	70.9	2.0	2.0	4.0	2.0	+20	0	-20	0
	16oGL	2.6	6.3	9.5	16.3	54.5	2.0	2.0	4.0	2.0	0	-20	-40	-20
	17oGL	2.7	7.8	13.6	28.2	93.7	0.0	0.0	2.0	0.0	+20	+20	0	0
	18oGL	2.4	7.3	12.3	24.3	82.5	0.0	0.0	2.0	0.0	+20	0	-20	0
	19oGL	1.8	5.6	9.2	17.5	65.7	0.0	0.0	2.0	0.0	0	-20	-40	-20
<b>Klimaszenario (TS=)</b>	21oGL	4.9	10.8	15.6	24.6	67.1	4.0	4.0	4.0	4.0	+20	+20	0	0
	22oGL	4.3	9.6	13.6	21.1	57.5	4.0	4.0	4.0	4.0	+20	0	-20	0
	23oGL	2.7	6.8	9.9	15.1	42.9	4.0	4.0	4.0	4.0	0	-20	-40	-20
	24oGL	3.9	9.9	15.4	26.8	78.0	2.0	2.0	2.0	2.0	+20	+20	0	0
	25oGL	3.6	9.0	13.7	23.1	67.7	2.0	2.0	2.0	2.0	+20	0	-20	0
	26oGL	2.8	6.8	10.0	16.7	52.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0	-20	-40	-20
	27oGL	2.7	8.0	14.2	28.1	85.5	0.0	0.0	0.0	0.0	+20	+20	0	0
	28oGL	2.5	7.4	13.0	24.4	75.3	0.0	0.0	0.0	0.0	+20	0	-20	0
	29oGL	2.0	5.8	9.7	17.9	59.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0	-20	-40	-20

DJF: Dezember, Januar, Februar; MAM: März, April, Mai; JJA: Juni, Juli, August; SON: September, Oktober, November

- > Diese Ergebnisse widerspiegeln die Resultate der monatlichen Auswertungen (vgl. Kapitel 21.2.2). Unter dem Einfluss der Klimaänderung werden die Abflussverhältnisse der Kander im Vergleich zum modellierten Referenzzustand (1980-1999) für viele Szenarien **ausgeglicher**. Dies äussert sich darin, dass bei den meisten Szenarien eine Zunahme bei den kleinen und eine Abnahme bei den grossen Quantilen der täglichen Abflussmittelwerte zu verzeichnen ist. Daneben gibt es aber auch Szenarien, für welche bei allen Quantilen eine Zunahme auftritt (14mGL, 17mGL, 24mGL, 27mGL). Dabei handelt es sich um diejenigen, welche von einer Zunahme der jährlichen Niederschlagsmenge und schwachen bis mittleren Temperaturzunahmen ausgehen.

## 21.2.4 Fazit

Der Wasserhaushalt des Einzugsgebietes Kander-Hondrich kann unter dem Einfluss der Klimaänderung wesentlich modifiziert werden. Im jährlichen Mittel muss von leicht reduzierten Abflussmengen (-6%) und wesentlich grösseren Verdunstungsbeträgen (+28%) ausgegangen werden. Die Mehrheit der Szenarien weist darauf hin, dass der **Jahresgang des Abflusses** gegenüber den aktuellen Verhältnissen wesentlich **ausgeglicher** sein wird: Während die mittlere Abflussmenge im Winter markant zunimmt (+41%), ist im Sommer mit einem deutlichen Rückgang der mittleren saisonalen Abflussmenge zu rechnen (-19%).

Für die Veränderung der Abflussverhältnisse im **Winter** gehen aus allen Szenarien ähnliche Resultate hervor. Die Veränderung der Abflussverhältnisse im **Sommer** ist jedoch von verschiedenen Einflussgrössen abhängig: Die Veränderung der Sommertemperatur, das Ausmass der Vergletscherung sowie die künftige jährliche Niederschlagssumme und deren saisonale Verteilung werden die Abflussverhältnisse im Sommer wesentlich bestimmen. Je nach Szenario können in dieser Jahreszeit markante Abflussdefizite oder auch -überschüsse gegenüber dem Referenzzustand (1980-1999) beobachtet werden. Das Spektrum der möglichen hydrologischen Entwicklungen im Sommer ist für die verwendeten Szenarien sehr breit, was ein Hinweis auf die vorhandene Unsicherheit bei der Bestimmung der mittleren saisonalen Abflussverhältnisse für diese Jahreszeit ist. Während für den **Frühling** im Durchschnitt leicht höhere Abflüsse zu erwarten sind (+8%), muss für den **Herbst** von reduzierten Abflussmengen ausgegangen werden (-15%). Dieses Muster wird durch die meisten Modellierungen bestätigt, wobei bei einzelnen aber auch deutliche Abweichungen davon auftreten können.

Die Auswertung der Abflussquantile bestätigt, dass die künftigen Abflussverhältnisse deutlich ausgeglichener sein werden. Bei nahezu allen Szenarien können für die kleinen Quantile (1%, 25%) und den Median (50%-Quantil) grössere tägliche Abflussmittelwerte beobachtet werden. Fast ebenso deutlich fällt die Entwicklung bei den Abflussmengen der grösseren ausgewerteten Quantile aus (75%, 99%): Für eine Mehrheit der Szenarien ist ein teilweise markanter Rückgang in diesem Quantilbereich zu beobachten. Zudem tritt bei diesen Veränderungen auch ein Einfluss des Gletschers auf: Für das unvergletscherte Einzugsgebiet sind die Abflussverhältnisse deutlich ausgeglichener als für dasjenige mit aktueller Vergletscherung.

## 21.3 Auswirkungen auf die Hochwasserverhältnisse

In diesem Unterkapitel werden die Auswirkungen der ausgewählten, realistischen Klimaszenarien auf die Hochwasserverhältnisse der Kander-Hondrich erläutert. Sämtliche Resultate wurden mit der Modellversion «be3c3\_IDW\_9802» berechnet, wobei beide Varianten der Vergletscherung (oGL, mGL) und der unterschiedlichen Sommertemperaturänderung (TS=, TS+) verwendet wurden. Datengrundlage für die durchgeführten Modellierungen bilden somit die **18 realistischen Klimaszenarien**, gemäss Kapitel 21.1.

Mit den durchgeführten Auswertungen soll insbesondere aufgezeigt werden, von welcher Größenordnung die Veränderungen bei den Hochwasserabflüssen unterschiedlicher Wiederkehrperiode unter dem Einfluss der Klimaänderung sein können (Kapitel 21.3.1). Daneben werden auch die Auswirkungen auf die extremen (Kapitel 21.3.2) sowie die morphologisch wirksamen Hochwasserabflüsse (Kapitel 21.3.3) aufgezeigt.

### 21.3.1 Veränderung bei Hochwasserabflüssen unterschiedlicher Jährlichkeit

In Tabelle 21.6 bis Tabelle 21.10 sowie in Abbildung 21.8 und Abbildung 21.9 sind die Ergebnisse der Hochwasserabschätzungen für die 18 realistischen Klimaszenarien enthalten. Die entsprechenden extremwertstatischen Auswertungen wurden mit folgendem Vorgehen – und wie bereits ausführlicher in Kapitel 20.2.6 beschrieben – durchgeführt:

Für jedes Szenario wurde an die Grundgesamtheit der 1000 modellierten Jahreshochwasser, welche aus den Tagesmittelwerten bestimmt wurden, eine **Allgemeine Extremwertverteilung** (AEV) angepasst. Die Parameter wurden mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Methode geschätzt (vgl. COLES 2001). Aus der daraus resultierenden Verteilungsfunktion konnten anschliessend die Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit mit Hilfe der entsprechenden Quantile abgeleitet werden.

Welche Modellierungsvarianten und Szenarien den Resultaten in den nachfolgenden Tabellen und Abbildungen zu Grunde liegen, kann Tabelle 21.5 entnommen werden.

Tabelle 21.5: Übersicht über die verschiedenen Modellierungsvarianten, welche zur Abschätzung der Auswirkungen der Klimaänderung auf die Hochwasserverhältnisse verwendet wurden.

Tabelle	Abbildung	Szenarien	Vergletscherung	Veränderung der Sommertemperatur
Tabelle 21.6 oben Tabelle 21.9 oben	Abbildung 21.8 a	11 bis 19	mit aktuellem Gletscher (mGL)	2 °C höher als andere Jahreszeiten (TS+)
Tabelle 21.6 unten Tabelle 21.9 unten	Abbildung 21.8 b	21 bis 29	mit aktuellem Gletscher (mGL)	gleich wie andere Jahreszeiten (TS=)
Tabelle 21.7 oben Tabelle 21.10 oben	Abbildung 21.9 a	11 bis 19	ohne Gletscher (oGL)	2 °C höher als andere Jahreszeiten (TS+)
Tabelle 21.7 unten Tabelle 21.10 unten	Abbildung 21.9 b	21 bis 29	ohne Gletscher (oGL)	gleich wie andere Jahreszeiten (TS=)

Erläuterungen zu den Szenarien (11 bis 29) vgl. Kapitel 21.1.

Der **Aufbau von Tabelle 21.6 bis Tabelle 21.10**, welche die Resultate der Hochwasserabschätzungen enthalten, folgt dem in Kapitel 21.2.3 beschriebenen Muster. In den vorderen Spalten der Tabelle sind die Ergebnisse der Hochwasserabschätzung (Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Wiederkehrperiode bzw. Parameter der Verteilungsfunktion «Chi», «Alpha», vgl. Kapitel 20.2.6) aufgeführt.

Während Tabelle 21.6 und Tabelle 21.7 bzw. Abbildung 21.8 und Abbildung 21.9 ausschliesslich Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Wiederkehrperioden (HQ2.33, HQ30, HQ100, HQ300) enthalten, sind in Tabelle 21.9 und Tabelle 21.10 die beiden geschätzten Parameter «Chi» und «Alpha», welche die Lage und die Skalierung der Allgemeinen Extremwertverteilung beschreiben, sowie die sehr seltenen Hochwasserabflüsse mit Jährlichkeiten von 300 und 500 Jahren (HQ300, HQ500) aufgeführt. Anhand von Tabelle 21.9 und Tabelle 21.10 können somit die Veränderungen, welche sich durch den Einfluss der Klimaänderung bei den extremen Hochwasserabflüssen ergeben, beurteilt werden.

Aus den **Resultaten** in Tabelle 21.6 und Tabelle 21.7 sowie in Abbildung 21.8 und Abbildung 21.9 lassen sich die folgenden Ergebnisse ableiten:

- > Die **Unterschiede zwischen den Hochwasserabschätzungen** für vergleichbare Szenarien, welche sich nur in der Vergletscherung und/oder der Sommertemperatur unterscheiden (mGL\_TS+, mGL\_TS=, oGL\_TS+, oGL\_TS=) sind gering (z.B. 11mGL vs. 21mGL vs. 11oGL vs. 21oGL). Sowohl die Vergletscherung als auch die höhere Sommertemperatur haben auf den Betrag der Hochwasserabflüsse keinen wesentlichen Einfluss. Dies wird auch anhand des Vergleichs von Abbildung 21.8 und Abbildung 21.9 deutlich ersichtlich.
- > Beim Vergleich mit den Werten des modellierten Referenzzustandes können je nach **Szenario** entweder Zu- oder Abnahmen bei den Hochwasserabflüssen unterschiedlicher Wiederkehrperiode beobachtet werden: **Zunahmen bei den Hochwasserabflüssen** (blau) treten vermehrt bei denjenigen Klimaszenarien auf, welche im Winter und Frühling von grösseren Niederschlagsmengen sowie im Sommer und Herbst von unveränderten Niederschlagsverhältnissen ausgehen (vgl. z.B. 11mGL, 14mGL, 17mGL). Im Gegensatz dazu treten bei den Szenarien, welche zwischen Frühling und Herbst einen reduzierten Niederschlagseintrag aufweisen (vgl. z.B. 13mGL, 16mGL, 19mGL) **reduzierte Hochwasserabflüsse** (rot) auf. Dies bestätigt die Erkenntnis aus den Sensitivitätsanalysen (vgl. Kapitel 20.2.6), wonach die Höhe der seltenen Hochwasserabflüsse nahezu alleine durch die Veränderung der Niederschlagsmenge gesteuert wird.

Als Ergänzung zu den Auswertungen in Tabelle 21.6 und Tabelle 21.7 wurden zusätzlich auch die prozentualen Zu- und Abnahmen der Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit (HQ2.33, HQ30, HQ100, HQ300, HQ500) gegenüber den entsprechenden Werten des modellierten Referenzzustandes (1980-1999) berechnet (vgl. Tabelle 21.8).

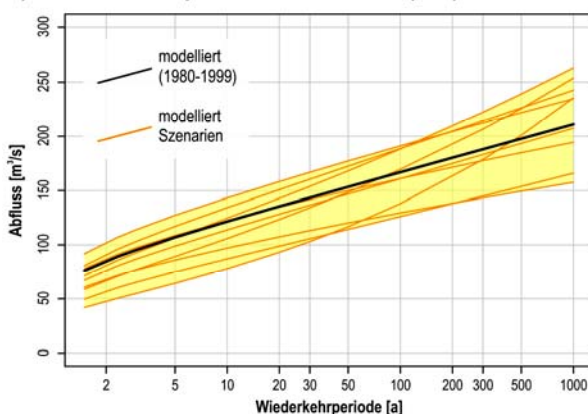


Tabelle 21.6: Einfluss der Klimaänderung auf die Hochwasserabflüsse mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, 1980-1999, Modellversion: be3c3\_IDW\_9802, Tagesmittelwerte). Blaue Zahlen: mind. 5 Prozent über dem Wert des Referenzzustandes, Rote Zahlen: mind. 5 Prozent unter dem Wert des Referenzzustandes, Schwarze Zahlen: zwischen ±5 Prozent um den Wert des Referenzzustandes.

Modell	Hochwasserabfluss				Temperaturänderung [°C]				Niederschlagsänderung [%]				
	HQ2.33 [m³/s]	HQ30 [m³/s]	HQ100 [m³/s]	HQ300 [m³/s]	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	
<b>Referenz</b>	89.1	143.4	166.8	188.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	
<b>Klimaszenario (TS+)</b>	11mGL	85.3	153.5	188.0	222.2	4.0	4.0	6.0	4.0	+20	+20	0	0
	12mGL	70.5	133.9	169.2	206.4	4.0	4.0	6.0	4.0	+20	0	-20	0
	13mGL	49.9	102.7	137.6	178.3	4.0	4.0	6.0	4.0	0	-20	-40	-20
	14mGL	95.6	160.1	188.4	214.1	2.0	2.0	4.0	2.0	+20	+20	0	0
	15mGL	80.2	136.2	160.6	182.9	2.0	2.0	4.0	2.0	+20	0	-20	0
	16mGL	59.8	105.3	125.7	144.6	2.0	2.0	4.0	2.0	0	-20	-40	-20
	17mGL	106.6	166.5	190.8	212.1	0.0	0.0	2.0	0.0	+20	+20	0	0
	18mGL	91.0	141.3	160.8	177.3	0.0	0.0	2.0	0.0	+20	0	-20	0
	19mGL	71.2	112.8	129.1	143.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0	-20	-40	-20
<b>Klimaszenario (TS=)</b>	21mGL	85.0	153.2	187.5	221.5	4.0	4.0	4.0	4.0	+20	+20	0	0
	22mGL	70.0	133.7	169.2	206.5	4.0	4.0	4.0	4.0	+20	0	-20	0
	23mGL	49.2	102.2	137.1	177.6	4.0	4.0	4.0	4.0	0	-20	-40	-20
	24mGL	92.4	158.9	189.1	217.2	2.0	2.0	2.0	2.0	+20	+20	0	0
	25mGL	77.2	135.2	161.8	186.7	2.0	2.0	2.0	2.0	+20	0	-20	0
	26mGL	57.2	104.7	127.5	149.4	2.0	2.0	2.0	2.0	0	-20	-40	-20
	27mGL	98.4	162.7	192.0	219.2	0.0	0.0	0.0	0.0	+20	+20	0	0
	28mGL	84.0	137.8	161.4	182.8	0.0	0.0	0.0	0.0	+20	0	-20	0
	29mGL	65.0	108.9	128.6	146.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0	-20	-40	-20

DJF: Dezember, Januar, Februar; MAM: März, April, Mai; JJA: Juni, Juli, August; SON: September, Oktober, November

a) Extremwertanalyse: 11mGL bis 19mGL (TS+)



b) Extremwertanalyse: 21mGL bis 29mGL (TS=)

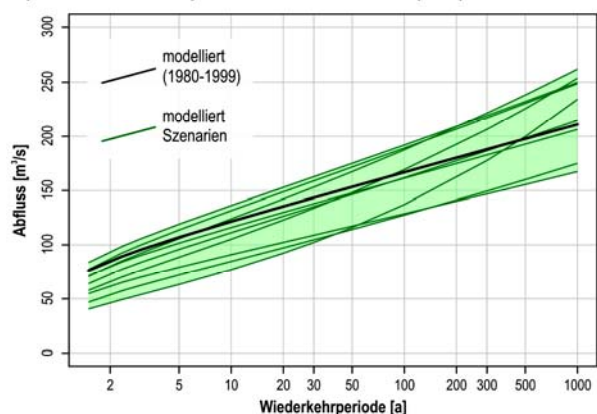


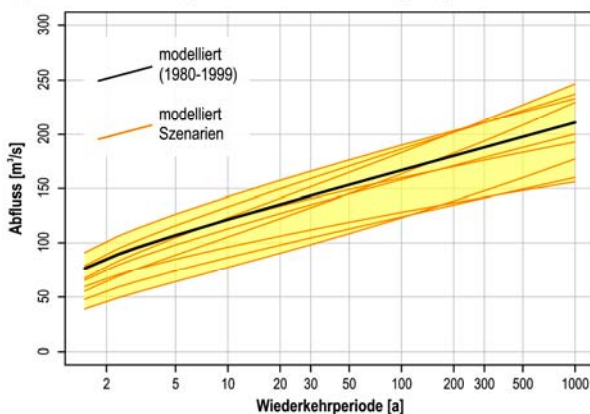
Abbildung 21.8: Extremwertanalyse der 1000 grössten jährlichen Hochwasserabflüsse unter dem Einfluss der Klimaänderung mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, 1980-1999, Modellversion: be3c3\_IDW\_9802, Tagesmittelwerte). a) erhöhte Temperaturänderung im Sommer (mGL\_TS+), b) gleiche Temperaturänderungen für das ganze Jahr (mGL\_TS=).

Tabelle 21.7: Einfluss der Klimaänderung auf die Hochwasserabflüsse ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, 1980-1999, Modellversion: be3c3\_IDW\_9802, Tagesmittelwerte). Blaue Zahlen: mind. 5 Prozent über dem Wert des Referenzzustandes, Rote Zahlen: mind. 5 Prozent unter dem Wert des Referenzzustandes, Schwarze Zahlen: zwischen ±5 Prozent um den Wert des Referenzzustandes.

Modell	Hochwasserabfluss				Temperaturänderung [°C]				Niederschlagsänderung [%]				
	HQ2.33 [m³/s]	HQ30 [m³/s]	HQ100 [m³/s]	HQ300 [m³/s]	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	
<b>Referenz</b>	89.1	143.4	166.8	188.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	
<b>Klimaszenario (TS+)</b>	11oGL	82.6	151.4	183.1	212.8	4.0	4.0	6.0	4.0	+20	+20	0	0
	12oGL	68.7	132.1	163.3	193.7	4.0	4.0	6.0	4.0	+20	0	-20	0
	13oGL	48.8	98.0	122.9	147.5	4.0	4.0	6.0	4.0	0	-20	-40	-20
	14oGL	94.1	158.9	186.3	210.7	2.0	2.0	4.0	2.0	+20	+20	0	0
	15oGL	79.0	134.9	158.0	178.5	2.0	2.0	4.0	2.0	+20	0	-20	0
	16oGL	58.6	104.3	123.8	141.2	2.0	2.0	4.0	2.0	0	-20	-40	-20
	17oGL	105.9	165.7	189.9	210.9	0.0	0.0	2.0	0.0	+20	+20	0	0
	18oGL	90.2	140.4	159.8	176.1	0.0	0.0	2.0	0.0	+20	0	-20	0
	19oGL	70.2	111.8	128.0	141.8	0.0	0.0	2.0	0.0	0	-20	-40	-20
<b>Klimaszenario (TS=)</b>	21oGL	82.7	151.2	183.4	214.0	4.0	4.0	4.0	4.0	+20	+20	0	0
	22oGL	68.2	132.5	165.5	198.5	4.0	4.0	4.0	4.0	+20	0	-20	0
	23oGL	47.9	98.6	125.9	153.9	4.0	4.0	4.0	4.0	0	-20	-40	-20
	24oGL	91.2	158.1	187.9	215.4	2.0	2.0	2.0	2.0	+20	+20	0	0
	25oGL	76.2	134.2	159.9	183.7	2.0	2.0	2.0	2.0	+20	0	-20	0
	26oGL	56.2	103.6	125.6	146.3	2.0	2.0	2.0	2.0	0	-20	-40	-20
	27oGL	97.8	162.2	191.4	218.7	0.0	0.0	0.0	0.0	+20	+20	0	0
	28oGL	83.4	137.2	160.7	182.2	0.0	0.0	0.0	0.0	+20	0	-20	0
	29oGL	64.3	108.1	127.7	146.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	-20	-40	-20

DJF: Dezember, Januar, Februar; MAM: März, April, Mai; JJA: Juni, Juli, August; SON: September, Oktober, November

a) Extremwertanalyse: 11oGL bis 19oGL (TS+)



b) Extremwertanalyse: 21oGL bis 29oGL (TS=)

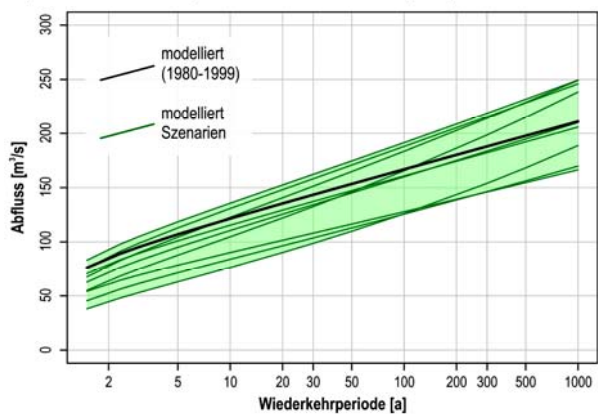


Abbildung 21.9: Extremwertanalyse der 1000 grössten jährlichen Hochwasserabflüsse unter dem Einfluss der Klimaänderung ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, 1980-1999, Modellversion: be3c3\_IDW\_9802, Tagesmittelwerte). a) erhöhte Temperaturänderung im Sommer (oGL\_TS+), b) gleiche Temperaturänderungen für das ganze Jahr (oGL\_TS=).

Aus den in Tabelle 21.8 aufgeführten Werten werden für alle Szenariengruppen (z.B. mGL\_TS+ oder mGL\_TS=) sowie für alle Szenarien zusammengefasst die maximale prozentuale Zunahme, die mittlere prozentuale Veränderung und die maximale prozentuale Reduktion für die Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Wiederkehrperiode ersichtlich. Bei dieser Zusammenstellung zeigt sich, dass unter dem Einfluss der Klimaänderung die **prozentualen Zu- und Abnahmen** der Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Wiederkehrperiode nicht alle gleich stark ausgeprägt sind (vgl. Tabelle 21.8):

- > Die **maximalen Zunahmen** liegen für alle Wiederkehrperioden und alle Szenarien in einem Bereich von +10% bis +20%, wobei die grössten Werte bei den extrem seltenen (HQ300, HQ500) sowie bei den sehr häufigen Ereignissen (HQ2.33) zu beobachten sind.
- > Dagegen nimmt die **maximale Reduktion** der Hochwasserabflüsse mit grösser werdender Wiederkehrperiode stetig ab: So beträgt dieser Wert beim HQ2.33 bis zu -46% und verringert sich bis zum HQ500 auf maximale -25%.
- > Die **mittleren Veränderungen** für das HQ2.33 sind mit -14% stärker ausgeprägt als im Bereich zwischen HQ30 und HQ500 (-7% bis 0%).

Die Veränderungen für die in der Praxis oft angewendeten Bemessungsgrössen (HQ30, HQ100, HQ300) sind für die Fragestellung der vorliegenden Arbeit von zentralem Interesse. Es lässt sich beobachten, dass die mittleren Veränderungen sehr gering sind (-7% bis -2%). Jedoch können bei diesen Wiederkehrperioden auch grössere Zunahmen (bis zu +18%) bzw. Reduktionen (bis zu -32%) festgestellt werden. Die möglichen Veränderungen liegen also in einem grösseren Bereich.

Auch bei dieser Auswertung der prozentualen Veränderungen sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellierungsvarianten bei allen Wiederkehrperioden gering.

Tabelle 21.8: Prozentuale Veränderungen bei den Hochwasserabflüssen unterschiedlicher Wiederkehrperiode unter dem Einfluss der Klimaänderung (Kander-Hondrich, maximale Zunahme, mittlere Veränderung und maximale Reduktion).

Modellvariante	Veränderung	HQ2.33	HQ30	HQ100	HQ300	HQ500
11mGL –19mGL (TS+)	maximale Zunahme	+20%	+16%	+14%	+18%	+21%
	<b>mittlere Veränderung</b>	<b>-8%</b>	<b>-4%</b>	<b>-2%</b>	<b>+1%</b>	<b>+1%</b>
	maximale Reduktion	-44%	-28%	-25%	-24%	-25%
21mGL –29mGL (TS=)	maximale Zunahme	+10%	+13%	+15%	+18%	+20%
	<b>mittlere Veränderung</b>	<b>-13%</b>	<b>-5%</b>	<b>-1%</b>	<b>+3%</b>	<b>+3%</b>
	maximale Reduktion	-45%	-29%	-24%	-22%	-21%
11oGL –19oGL (TS+)	maximale Zunahme	+19%	+16%	+14%	+13%	+15%
	<b>mittlere Veränderung</b>	<b>-10%</b>	<b>-5%</b>	<b>-4%</b>	<b>-3%</b>	<b>-4%</b>
	maximale Reduktion	-45%	-32%	-26%	-25%	-25%
21oGL –29oGL (TS=)	maximale Zunahme	+10%	+13%	+15%	+16%	+17%
	<b>mittlere Veränderung</b>	<b>-14%</b>	<b>-6%</b>	<b>-3%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>
	maximale Reduktion	-46%	-31%	-25%	-22%	-22%
Alle Szenarien	maximale Zunahme	+20%	+16%	+15%	+18%	+21%
	<b>mittlere Veränderung</b>	<b>-14%</b>	<b>-7%</b>	<b>-4%</b>	<b>-2%</b>	<b>0%</b>
	maximale Reduktion	-46%	-32%	-26%	-25%	-25%

### 21.3.2 Veränderung bei extremen Hochwasserabflüssen

In Tabelle 21.9 und Tabelle 21.10 sind neben den sehr seltenen Hochwasserabflüssen (HQ300, HQ500) auch die Parameter «Chi» und «Alpha» der Allgemeinen Extremwertverteilung aufgeführt. Diese Parameter beschreiben die Lage («Chi») sowie die Skalierung bzw. die Streuung («Alpha») der jeweils geschätzten Allgemeinen Extremwertverteilung (vgl. Kapitel 20.2.6). Daraus lassen sich Aussagen zu den Veränderungen bei den extremen Hochwasserabflüssen ableiten:

- > Während der **Lageparameter** «Chi» für die meisten Szenarien kleiner wird (rot), sind beim **Skalierungsparameter** «Alpha» die Zu- (blau) und Abnahmen (rot) über alle Szenarien betrachtet ausgeglichen. Das bedeutet, dass durch die grösseren Veränderungen des Lageparameters «Chi» eine Beurteilung der Veränderung bei den extremen Hochwasserabflüssen anhand des Skalierungsparameters «Alpha» schlecht möglich ist. Deshalb erfolgt diese Beurteilung anhand der geschätzten sehr seltenen Hochwasserabflüssen (HQ300, HQ500).

Tabelle 21.9: Einfluss der Klimaänderung auf die Parameter der geschätzten Verteilungsfunktion und die extremen Hochwasserabflüsse mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, 1980-1999, Modellversion: be3c3\_IDW\_9802, Tagesmittelwerte). Blaue Zahlen: mind. 5 Prozent über dem Wert des Referenzzustandes, Rote Zahlen: mind. 5 Prozent unter dem Wert des Referenzzustandes, Schwarze Zahlen: zwischen  $\pm 5$  Prozent um den Wert des Referenzzustandes.

Modell	Parameter AEV		Hochwasserabfluss		Temperaturänderung [°C]				Niederschlagsänderung [%]				
	Chi [m <sup>3</sup> /s]	Alpha [m <sup>3</sup> /s]	HQ300 [m <sup>3</sup> /s]	HQ500 [m <sup>3</sup> /s]	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	
<b>Referenz</b>	77.9	19.4	188.0	197.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	
<b>Klimaszenario (TS+)</b>	11mGL	<b>73.0</b>	<b>20.8</b>	<b>222.2</b>	<b>239.0</b>	4.0	4.0	6.0	4.0	+20	+20	0	0
	12mGL	<b>60.0</b>	<b>17.4</b>	<b>206.4</b>	<b>225.5</b>	4.0	4.0	6.0	4.0	+20	0	-20	0
	13mGL	<b>42.5</b>	<b>12.0</b>	<b>178.3</b>	<b>200.7</b>	4.0	4.0	6.0	4.0	0	-20	-40	-20
	14mGL	<b>82.4</b>	<b>22.8</b>	<b>214.1</b>	<b>226.2</b>	2.0	2.0	4.0	2.0	+20	+20	0	0
	15mGL	<b>68.7</b>	<b>19.8</b>	<b>182.9</b>	<b>193.2</b>	2.0	2.0	4.0	2.0	+20	0	-20	0
	16mGL	<b>50.7</b>	<b>15.7</b>	<b>144.6</b>	<b>153.5</b>	2.0	2.0	4.0	2.0	0	-20	-40	-20
	17mGL	<b>93.6</b>	<b>22.7</b>	<b>212.1</b>	<b>221.8</b>	0.0	0.0	2.0	0.0	+20	+20	0	0
	18mGL	<b>79.6</b>	<b>20.0</b>	<b>177.3</b>	<b>184.6</b>	0.0	0.0	2.0	0.0	+20	0	-20	0
	19mGL	<b>61.8</b>	<b>16.4</b>	<b>143.0</b>	<b>149.2</b>	0.0	0.0	2.0	0.0	0	-20	-40	-20
<b>Klimaszenario (TS=)</b>	21mGL	<b>72.7</b>	<b>20.9</b>	<b>221.5</b>	<b>238.2</b>	4.0	4.0	4.0	4.0	+20	+20	0	0
	22mGL	<b>59.5</b>	<b>17.6</b>	<b>206.5</b>	<b>225.6</b>	4.0	4.0	4.0	4.0	+20	0	-20	0
	23mGL	<b>41.6</b>	<b>12.2</b>	<b>177.6</b>	<b>199.8</b>	4.0	4.0	4.0	4.0	0	-20	-40	-20
	24mGL	<b>79.1</b>	<b>22.7</b>	<b>217.2</b>	<b>230.4</b>	2.0	2.0	2.0	2.0	+20	+20	0	0
	25mGL	<b>65.8</b>	<b>19.5</b>	<b>186.7</b>	<b>198.5</b>	2.0	2.0	2.0	2.0	+20	0	-20	0
	26mGL	<b>48.3</b>	<b>15.2</b>	<b>149.4</b>	<b>160.1</b>	2.0	2.0	2.0	2.0	0	-20	-40	-20
	27mGL	<b>85.7</b>	<b>21.9</b>	<b>219.2</b>	<b>232.1</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	+20	+20	0	0
	28mGL	<b>73.0</b>	<b>19.0</b>	<b>182.8</b>	<b>192.8</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	+20	0	-20	0
	29mGL	<b>56.3</b>	<b>15.1</b>	<b>146.9</b>	<b>155.5</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0	-20	-40	-20

DJF: Dezember, Januar, Februar; MAM: März, April, Mai; JJA: Juni, Juli, August; SON: September, Oktober, November

- > Bei den **sehr seltenen Hochwasserabflüssen (HQ300, HQ500)** treten gegenüber den Werten des modellierten Referenzzustandes geringfügig mehr Zunahmen (blaue Zahlen) als Reduktionen (rote Zahlen) auf. Zunahmen sind insbesondere bei aktueller Vergletscherung und den Szenarien, welche von grösseren oder unveränderten jährlichen Niederschlagsmengen ausgehen, zu beobachten (z.B. 11mGL, 12mGL; Tabelle 21.9). Es gibt also Hinweise darauf, dass von einer **leichten Zunahme bei den extremen Hochwasserabflüssen** ausgegangen werden muss.

Tabelle 21.10: Einfluss der Klimaänderung auf die Parameter der geschätzten Verteilungsfunktion und die extremen Hochwasserabflüsse ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, 1980-1999, Modellversion: be3c3\_IDW\_9802, Tagesmittelwerte). Blaue Zahlen: mind. 5 Prozent über dem Wert des Referenzzustandes, Rote Zahlen: mind. 5 Prozent unter dem Wert des Referenzzustandes, Schwarze Zahlen: zwischen  $\pm 5$  Prozent um den Wert des Referenzzustandes.

Modell	Parameter AEV		Hochwasserabfluss		Temperaturänderung [°C]				Niederschlagsänderung [%]				
	Chi [m <sup>3</sup> /s]	Alpha [m <sup>3</sup> /s]	HQ300 [m <sup>3</sup> /s]	HQ500 [m <sup>3</sup> /s]	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	
<b>Referenz</b>	77.9	19.4	188.0	197.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	
Klimaszenario (TS+)	11oGL	<b>69.2</b>	<b>23.0</b>	<b>212.8</b>	<b>227.0</b>	4.0	4.0	6.0	4.0	+20	+20	0	0
	12oGL	<b>57.0</b>	<b>19.9</b>	<b>193.7</b>	<b>208.6</b>	4.0	4.0	6.0	4.0	+20	0	-20	0
	13oGL	<b>40.0</b>	<b>15.0</b>	<b>147.5</b>	<b>159.7</b>	4.0	4.0	6.0	4.0	0	-20	-40	-20
	14oGL	<b>80.5</b>	<b>23.7</b>	<b>210.7</b>	<b>222.0</b>	2.0	2.0	4.0	2.0	+20	+20	0	0
	15oGL	<b>67.1</b>	<b>20.8</b>	<b>178.5</b>	<b>187.8</b>	2.0	2.0	4.0	2.0	+20	0	-20	0
	16oGL	<b>49.1</b>	<b>16.6</b>	<b>141.2</b>	<b>149.2</b>	2.0	2.0	4.0	2.0	0	-20	-40	-20
	17oGL	<b>92.8</b>	<b>22.9</b>	<b>210.9</b>	<b>220.4</b>	0.0	0.0	2.0	0.0	+20	+20	0	0
	18oGL	<b>78.7</b>	<b>20.1</b>	<b>176.1</b>	<b>183.3</b>	0.0	0.0	2.0	0.0	+20	0	-20	0
	19oGL	<b>60.8</b>	<b>16.4</b>	<b>141.8</b>	<b>148.0</b>	0.0	0.0	2.0	0.0	0	-20	-40	-20
Klimaszenario (TS=)	21oGL	<b>69.5</b>	<b>22.5</b>	<b>214.0</b>	<b>228.7</b>	4.0	4.0	4.0	4.0	+20	+20	0	0
	22oGL	<b>56.8</b>	<b>19.3</b>	<b>198.5</b>	<b>214.9</b>	4.0	4.0	4.0	4.0	+20	0	-20	0
	23oGL	<b>39.3</b>	<b>14.5</b>	<b>153.9</b>	<b>168.1</b>	4.0	4.0	4.0	4.0	0	-20	-40	-20
	24oGL	<b>77.8</b>	<b>23.2</b>	<b>215.4</b>	<b>228.3</b>	2.0	2.0	2.0	2.0	+20	+20	0	0
	25oGL	<b>64.6</b>	<b>20.1</b>	<b>183.7</b>	<b>194.8</b>	2.0	2.0	2.0	2.0	+20	0	-20	0
	26oGL	<b>46.9</b>	<b>15.9</b>	<b>146.3</b>	<b>156.1</b>	2.0	2.0	2.0	2.0	0	-20	-40	-20
	27oGL	<b>85.1</b>	<b>21.8</b>	<b>218.7</b>	<b>231.6</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	+20	+20	0	0
	28oGL	<b>72.4</b>	<b>19.0</b>	<b>182.2</b>	<b>192.2</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	+20	0	-20	0
	29oGL	<b>55.5</b>	<b>15.0</b>	<b>146.0</b>	<b>154.5</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0	-20	-40	-20

DJF: Dezember, Januar, Februar; MAM: März, April, Mai; JJA: Juni, Juli, August; SON: September, Oktober, November

### 21.3.3 Veränderung bei morphologisch wirksamen Hochwasserabflüssen

Wie in der Einleitung zur vorliegenden Arbeit erwähnt, haben in den letzten Jahren verschiedene Hochwasserereignisse an der Kander zur Unterspülung und Beschädigung der Flussverbauungen geführt (vgl. Kapitel 1.1). Insbesondere für den untersten Abschnitt der Kander (zwischen Frutigen und dem Zusammenfluss mit der Simme), welcher fast durchgehend verbaut ist, wird davon ausgegangen, dass bereits Hochwasserabflüsse kleinerer Jährlichkeit zwischen 2 und 5 Jahren (HQ2 bis HQ5) morphologische Veränderungen herbeiführen können (JUD 2009). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde deshalb untersucht, wie sich die Häufigkeit bzw. Dauer dieser morphologisch wirksamen Hochwasserabflüsse unter dem Einfluss der Klimaänderung verändert.

Für die Auswertungen in diesem Unterkapitel wurden die gleichen Modellierungen bzw. die gleichen 18 realistischen Klimaszenarien verwendet wie bei den Analysen der Hochwasserabflüsse (vgl. Kapitel 21.3.1). Aus den modellierten Abflussdaten wurde für jedes Klimaszenario (11mGL bis 29oGL) die **Anzahl mittlere Tagesabflüsse** ausgezählt, welche über einem vorgegebenen Grenzwert liegen. Als **Grenzwerte** wurden einerseits das **HQ5** (Jahreshochwasser, welches alle fünf Jahre einmal eintritt bzw. überschritten wird) des entsprechenden Szenarios und andererseits ein **fester Wert von 100 m<sup>3</sup>/s** verwendet, welcher in der Grössenordnung des HQ5 der Referenzmodellierung liegt. Dieser Auswertung anhand der beiden Grössen liegen folgende Überlegungen zu Grunde:

- > Bei der **Analyse der Überschreitungen des (variablen) HQ5** wird davon ausgegangen, dass sich die Morphologie des Gerinnes an die Verhältnisse des zukünftigen Abflussgeschehens angepasst hat. Gleichzeitig wird angenommen, dass auch unter diesen morphologischen Verhältnissen die Abflüsse über dem veränderten HQ5 zu Veränderungen am Gerinne führen können.
- > Die **Auswertung anhand des fest vorgegebenen Wertes von 100 m<sup>3</sup>/s** geht von einem Flussbett aus, welches die Morphologie über längere Zeit beibehält und dementsprechend immer noch die gleichen Abflussmengen morphologisch wirksam sind.

Es ist zu beachten, dass bei den gewählten Ansätzen nicht die Anzahl Hochwasserereignisse, sondern jeweils die Anzahl Tage über dem Grenzwert erhoben wurden. Dies ist deshalb sinnvoll, weil davon ausgegangen werden kann, dass die Morphologie des Flusses nicht nur durch die Anzahl Hochwasserereignisse, sondern auch durch die effektive Dauer bzw. die Anzahl Tage an welchen der kritische Abfluss überschritten wird, geprägt wird.

Die Resultate der Auswertungen sind in Tabelle 21.11 und Tabelle 21.12 aufgeführt, wobei der Aufbau demjenigen der Tabellen in Kapitel 21.2.3 entspricht. In den Spalten sind sowohl der mittlere jährliche Abfluss (MQ) als auch das HQ5 und HQ100 für jedes Szenario angegeben. Diese Kennwerte sollen eine Beurteilung der für diese Fragestellung relevanten Abflussverhältnisse ermöglichen. Weitere Spalten enthalten die Anzahl Tagesmittelwerte mit Abflussmengen über dem HQ5 des entsprechenden Szenarios (#Tage > HQ5) bzw. über 100 m<sup>3</sup>/s (#Tage > 100 m<sup>3</sup>/s).

Aus der Zusammenstellung in Tabelle 21.11 gehen folgende **Resultate** für die Modellierungen mit aktueller Vergletscherung (mGL) hervor:

- > Das **HQ5** ist bei den meisten Szenarien kleiner (rot) als dasjenige des modellierten Referenzzustandes. Bei den Szenarien, welche von einem erhöhten jährlichen Niederschlagsbeitrag ausgehen (z.B. 11mGL, 14mGL, 17mGL), sind leichte Zunahmen (blau) oder unveränderte Werte (schwarz) des 5-jährlichen Hochwasserabflusses zu beobachten. Sowohl

beim **HQ100** als auch beim **MQa** sind die Zu- und Abnahmen über alle Klimaszenarien betrachtet relativ ausgeglichen.

- > Die Kenngrösse «Anzahl Tage mit Abflussmengen über dem HQ5» (**#Tage > HQ5**) ist bei den meisten Szenarien grösser (blau) als beim modellierten Referenzzustand, wobei auch hier die Szenarien mit erhöhtem jährlichem Niederschlagseintrag (z.B. 11mGL, 14mGL, 17mGL) Ausnahmen bilden. Daneben ist zu beachten, dass die zweite Kenngrösse «Anzahl Tage mit Abflüssen über 100 m<sup>3</sup>/s» (**#Tage > HQ100**) für die meisten Szenarien kleiner wird (rot), wobei auch bei diesem Kennwert für die gleichen Szenarien vermehrt Zunahmen (blau) zu beobachten sind.

Die Auswertungen der Modellierungen ohne Gletscher (Tabelle 21.12) zeigen nur geringfügige Unterschiede von dem in Tabelle 21.11 zu beobachtenden Muster. Daraus wird ersichtlich, dass eine Veränderung des Vergletscherungsgrades auf die entsprechenden Parameter keinen wesentlichen Einfluss hat.

Tabelle 21.11: Auswirkung der Klimaänderung auf die morphologisch wirksamen Hochwasserabflüsse mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, 1980-1999, Modellversion: be3c3\_IDW\_9802, Tagesmittelwerte). Blaue Zahlen: mind. 5 Prozent über dem Wert des Referenzzustandes, Rote Zahlen: mind. 5 Prozent unter dem Wert des Referenzzustandes, Schwarze Zahlen: zwischen ±5 Prozent um den Wert des Referenzzustandes.

Modell	Abflussverhältnisse					Temperaturänderung [°C]				Niederschlagsänderung [%]				
	MQa [m <sup>3</sup> /s]	HQ5 [m <sup>3</sup> /s]	HQ100 [m <sup>3</sup> /s]	#Tage > HQ5	#Tage > 100 m <sup>3</sup> /s	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	
<b>Referenz</b>	19.2	107	166.8	446	737	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	
<b>Klimaszenario (TS+)</b>	11mGL	22.2	106.1	188.0	406	557	4.0	4.0	6.0	4.0	+20	+20	0	0
	12mGL	19.7	88.8	169.2	442	233	4.0	4.0	6.0	4.0	+20	0	-20	0
	13mGL	15.3	63.9	137.6	556	51	4.0	4.0	6.0	4.0	0	-20	-40	-20
	14mGL	22.2	116.7	188.4	417	1173	2.0	2.0	4.0	2.0	+20	+20	0	0
	15mGL	19.7	98.5	160.6	483	440	2.0	2.0	4.0	2.0	+20	0	-20	0
	16mGL	15.2	74.5	125.7	684	56	2.0	2.0	4.0	2.0	0	-20	-40	-20
	17mGL	22.0	126.8	190.8	457	2583	0.0	0.0	2.0	0.0	+20	+20	0	0
	18mGL	19.5	108.4	160.8	553	1079	0.0	0.0	2.0	0.0	+20	0	-20	0
	19mGL	15.1	85.5	129.1	702	164	0.0	0.0	2.0	0.0	0	-20	-40	-20
<b>Klimaszenario (TS=)</b>	21mGL	21.8	105.8	187.5	407	552	4.0	4.0	4.0	4.0	+20	+20	0	0
	22mGL	19.3	88.5	169.2	451	234	4.0	4.0	4.0	4.0	+20	0	-20	0
	23mGL	14.8	63.2	137.1	581	52	4.0	4.0	4.0	4.0	0	-20	-40	-20
	24mGL	21.6	113.8	189.1	440	958	2.0	2.0	2.0	2.0	+20	+20	0	0
	25mGL	19.1	95.8	161.8	516	389	2.0	2.0	2.0	2.0	+20	0	-20	0
	26mGL	14.7	72.1	127.5	738	55	2.0	2.0	2.0	2.0	0	-20	-40	-20
	27mGL	21.1	119.0	192.0	496	1609	0.0	0.0	0.0	0.0	+20	+20	0	0
	28mGL	18.7	101.6	161.4	581	645	0.0	0.0	0.0	0.0	+20	0	-20	0
	29mGL	14.4	79.2	128.6	780	123	0.0	0.0	0.0	0.0	0	-20	-40	-20

DJF: Dezember, Januar, Februar; MAM: März, April, Mai; JJA: Juni, Juli, August; SON: September, Oktober, November

Die Resultate in Tabelle 21.11 und Tabelle 21.12 führen in Abhängigkeit der zukünftigen Entwicklung der Gerinnemorphologie zu folgenden Schlussfolgerungen:

- > Anhand der Veränderungen bei der Kenngrösse «#Tage > 100 m<sup>3</sup>/s» wird ersichtlich, dass die Abflussmengen, welche unter den heutigen Bedingungen zu Gerinneveränderungen führen können, bei den meisten Szenarien deutlich **seltener** auftreten.
- > Falls sich die Gerinnemorphologie der Kander aber auf die neuen Abflussverhältnisse einstellt, werden die morphologisch wirksamen Abflüsse unter dem Einfluss der Klimaänderung **häufiger** auftreten. Dies wird daran ersichtlich, dass für viele Szenarien eine Zunahme bei der Kenngrösse «#Tage > HQ5» festgestellt werden kann.

Aus diesen Auswertungen lassen sich also keine abschliessenden Aussagen zu den Veränderungen der morphologisch wirksamen Abflussmengen der Kander unter dem Einfluss der Klimaänderung machen. Für präzisere Einschätzungen werden Angaben zur zukünftigen Gerinnebeschaffenheit und -entwicklung der Kander benötigt.

Tabelle 21.12: Auswirkung der Klimaänderung auf die morphologisch wirksamen Hochwasserabflüsse ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, 1980-1999, Modellversion: be3c3\_IDW\_9802, Tagesmittelwerte). Blaue Zahlen: mind. 5 Prozent über dem Wert des Referenzzustandes, Rote Zahlen: mind. 5 Prozent unter dem Wert des Referenzzustandes, Schwarze Zahlen: zwischen ±5 Prozent um den Wert des Referenzzustandes.

Modell	Abflussverhältnisse					Temperaturänderung [°C]				Niederschlagsänderung [%]				
	MQa [m <sup>3</sup> /s]	HQ5 [m <sup>3</sup> /s]	HQ100 [m <sup>3</sup> /s]	#Tage > HQ5	#Tage > 100 m <sup>3</sup> /s	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON	
<b>Referenz</b>	19.2	107	166.8	446	737	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	
Klimaszenario (TS+)	11oGL	19.3	104.5	183.1	396	501	4.0	4.0	6.0	4.0	+20	+20	0	0
	12oGL	16.6	88.3	163.3	409	224	4.0	4.0	6.0	4.0	+20	0	-20	0
	13oGL	12.0	63.8	122.9	501	51	4.0	4.0	6.0	4.0	0	-20	-40	-20
	14oGL	20.7	115.7	186.3	419	1095	2.0	2.0	4.0	2.0	+20	+20	0	0
	15oGL	18.0	97.8	158.0	477	401	2.0	2.0	4.0	2.0	+20	0	-20	0
	16oGL	13.3	73.8	123.8	664	49	2.0	2.0	4.0	2.0	0	-20	-40	-20
	17oGL	21.5	126.2	189.9	454	2478	0.0	0.0	2.0	0.0	+20	+20	0	0
	18oGL	18.9	107.6	159.8	544	1022	0.0	0.0	2.0	0.0	+20	0	-20	0
	19oGL	14.3	84.5	128.0	702	142	0.0	0.0	2.0	0.0	0	-20	-40	-20
Klimaszenario (TS=)	21oGL	19.6	104.3	183.4	396	498	4.0	4.0	4.0	4.0	+20	+20	0	0
	22oGL	17.0	87.7	165.5	435	225	4.0	4.0	4.0	4.0	+20	0	-20	0
	23oGL	12.2	62.9	125.9	537	51	4.0	4.0	4.0	4.0	0	-20	-40	-20
	24oGL	20.7	112.9	187.9	437	908	2.0	2.0	2.0	2.0	+20	+20	0	0
	25oGL	18.1	95.0	159.9	506	361	2.0	2.0	2.0	2.0	+20	0	-20	0
	26oGL	13.4	71.3	125.6	723	48	2.0	2.0	2.0	2.0	0	-20	-40	-20
	27oGL	20.9	118.5	191.4	497	1553	0.0	0.0	0.0	0.0	+20	+20	0	0
	28oGL	18.5	101.0	160.7	583	617	0.0	0.0	0.0	0.0	+20	0	-20	0
	29oGL	14.1	78.4	127.7	781	116	0.0	0.0	0.0	0.0	0	-20	-40	-20

DJF: Dezember, Januar, Februar; MAM: März, April, Mai; JJA: Juni, Juli, August; SON: September, Oktober, November



## 21.4 Fazit

Aus den für das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich hydrologisch modellierten ausgewählten Klimaszenarien, welche nach Angaben von FREI (2005) zusammengestellt wurden, wird ersichtlich, dass bis ins Jahr 2050 mit den folgenden hydrologischen Veränderungen gerechnet werden muss:

- > Beim **Wasserhaushalt** können im Durchschnitt über alle realistischen Szenarien und im Jahresmittel sowohl ein leichter Rückgang beim Niederschlag (-5%) als auch eine leicht reduzierte Abflussmenge (-6%) und ein deutlich grösserer Verdunstungsbetrag (+28%) beobachtet werden.
- > Das **Abflussregime** wird aufgrund der deutlich erhöhten Abflussmengen im Winter (+41%) und den reduzierten Abflussmengen im Sommer (-19%) ausgeglichener sein. Insbesondere die Veränderungen im Sommer sind aber mit grösserer Unsicherheit verbunden, welche hauptsächlich durch die Entwicklung des Vergletscherungsgrades sowie der Sommertemperatur hervorgerufen wird. Insbesondere die Sommertemperatur erweist sich als wesentliche Einflussgrösse auf die Saisonalität des Abflussregimes: Bei erhöhten Sommertemperaturen und unverändertem Vergletscherungsgrad ist unter extremen Klimaszenarien immer noch eine ausgeprägte Saisonalität der zukünftigen Abflussverhältnisse möglich.
- > Unter Modellierung der realistischen Klimaszenarien resultieren bei den **Quantilen der täglichen Abflussmittelwerte** wesentlich ausgeglichener Verhältnisse für das Jahr 2050: Die kleinen Quantile der Tagesmittelwerte nehmen zu, bei den grossen Quantilen ist fast bei allen Szenarien eine Abnahme festzustellen. Ohne Vergletscherung wird dieses Muster zusätzlich verstärkt.
- > Bei den **Hochwasserverhältnissen** wird ersichtlich, dass diese vorwiegend durch die Entwicklung der Niederschlagsverhältnisse beeinflusst werden. Allerdings gilt es zu beachten, dass die Auswertungen ausschliesslich auf veränderten Monatsmittelwerten des Niederschlags und nicht auf veränderten Verteilungsparametern der Starkniederschläge basieren. Sowohl der veränderte Vergletscherungsgrad als auch höhere Sommertemperaturen zeigen keine wesentlichen Auswirkungen auf die untersuchten Parameter. Die zu erwartenden prozentualen Veränderungen bei den Hochwasserabflüssen variieren je nach Wiederkehrperiode: Bei seltenen Ereignissen ist tendenziell eine grössere Zunahme zu beobachten als bei häufigen. Beim HQ100 wird auf Grund der realistischen Klimaszenarien bis ins Jahr 2050 eine maximale Zunahme von +15% zu erwarten sein, die mittlere Veränderung weist sogar auf eine leichte Abnahme hin. Die Auswirkungen der realistischen Klimaszenarien auf die **extremen Hochwasserabflüsse** mit einer Jährlichkeit von mindestens 300 Jahren zeigen eine leichte Zunahme bei den entsprechenden Abflussmengen.
- > Zuverlässige Aussagen zur Entwicklung der **morphologisch wirksamen Hochwasserabflüsse** (> HQ5 bzw. > 100 m<sup>3</sup>/s) im verbauten Unterlauf der Kander lassen sich nur unter Einbezug der Entwicklung der Gerinnemorphologie ableiten. Die Auswertungen zeigen, dass die Häufigkeit der Hochwasserabflüsse über 100 m<sup>3</sup>/s, welche unter den aktuellen Bedingungen flussmorphologisch wirksam sind, bei den meisten realistischen Klimaszenarien bis 2050 abnehmen werden.



## 22 Schlussfolgerungen zu Teil IV

### 22.1 Vergleich der Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen und der Modellierung mit ausgewählten Klimaszenarien

Die beiden verwendeten Ansätze zur Modellierung der Auswirkungen der Klimaänderung auf die hydrologischen Verhältnisse des Einzugsgebietes Kander-Hondrich unterscheiden sich in mehreren methodischen Aspekten:

- > Bei den **Sensitivitätsanalysen** wird davon ausgegangen, dass die klimatischen Veränderungen für alle Jahreszeiten gleich ausfallen. Zudem werden bei diesem Ansatz auch Klimaszenarien modelliert, welche extremen Kombinationen der Niederschlags- und Temperaturänderungen entsprechen.
- > Die **ausgewählten Klimaszenarien** bilden die aktuellen Kenntnisse der Wissenschaft ab und weisen saisonal differenzierte Veränderungsbeträge von Niederschlag und Temperatur auf.

Aus dem Vergleich der Resultate der Sensitivitätsanalysen und der Modellierungen mit realistischen Klimaszenarien ergeben sich die folgenden Erkenntnisse:

- > Die **saisonal differenzierten Änderungsbeträge der Temperatur** haben einen wesentlichen Einfluss auf verschiedene hydrologische Parameter. So bleibt z.B. je nach Vergletscherungsgrad des Einzugsgebietes die Saisonalität des Abflusses durch eine verstärkte Zunahme der Temperatur im Sommer erhalten (vgl. Kapitel 21.2.2), obschon die Sensitivitätsanalysen, bei generell erhöhter Temperatur auf ein ausgeglichenes Abflussregime hinweisen (vgl. Kapitel 20.2.3).
- > Andererseits lässt sich feststellen, dass die **mittleren jährlichen Abflussmengen** nur geringfügig von saisonalen Unterschieden bei den klimatischen Veränderungen beeinflusst werden. Dies gilt jedoch nicht für die mittleren monatlichen Abflussmengen und für die jährlich grössten Hochwasserabflüsse, welche eine direkte Abhängigkeit vom saisonalen Niederschlagsgeschehen zeigen. Die Jahresmaxima des Abflusses werden z.B. auch unter den zukünftigen klimatischen Verhältnissen vorwiegend im Sommer auftreten und somit durch die Niederschlagsverhältnissen in dieser Jahreszeit geprägt.

Es lässt sich deshalb festhalten, dass das Muster der saisonalen Veränderungen von Temperatur und Niederschlag wesentlichen Einfluss auf die zukünftigen hydrologischen Verhältnisse verschiedener Parameter haben wird. Für das Wasserdargebot des Einzugsgebietes und dessen innerjährliche Verteilung wird von vorrangiger Bedeutung sein, wie sich die Entwicklung und innerjährliche Ausprägung dieser Einflussgrößen in den nächsten Jahrzehnten gestaltet. Daneben wird aber auch die Entwicklung des Vergletscherungsgrades die zukünftigen hydrologischen Verhältnisse des untersuchten Einzugsgebietes Kander-Hondrich entscheidend beeinflussen.

Wie aus den Resultaten der Sensitivitätsanalysen zudem hervorgeht, können unter dem **Einfluss extremer Klimaszenarien**, massive Veränderungen bei verschiedenen hydrologischen Parametern

auftreten (z.B. mittlerer saisonaler Abfluss im Winter). Allerdings bleiben die Zusammenhänge, welche bei den weniger stark ausgeprägten Änderungsbeträgen zwischen den ausgewerteten hydrologischen Kenngrößen und den beiden variierten klimatischen Einflussgrößen «Niederschlag» und «Temperatur» auftreten, auch unter den extremen Bedingungen weitgehend erhalten. Daraus kann auch abgeleitet werden, dass im modellierten Wertebereich der beiden klimatischen Einflussgrößen Niederschlag und Temperatur **keine Schwellenwerte überschritten** werden, welche bei den hydrologischen Prozessen extreme Veränderungen hervorrufen würden.

Bei der Interpretation der Sensitivitätsflächen ist zu berücksichtigen, dass diese immer nur die direkten Zusammenhänge zwischen der klimatischen Einflussgröße und dem dargestellten hydrologischen Kennwert aufzeigen. Aus diesem Grund ist z.B. eine Zunahme der Temperatur nicht unmittelbar mit einer Zunahme des Hochwasserabflusses verbunden. Falls eine Temperaturzunahme aber zu deutlich intensiveren Starkniederschlägen führt (vgl. z.B. LENDERINK & VAN MEIJGAARD 2008, HAERTER ET AL. 2010), wird sich dies auch bei den Hochwasserabflüssen als deutliche Zunahme niederschlagen.

## 22.2 Vergleich zu bestehenden Untersuchungen

Sowohl die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen wie auch diejenigen der Modellierungen anhand realistischer Klimaszenarien bestätigen die Resultate aus anderen Untersuchungen weitgehend. So weisen die aus der vorliegenden Arbeit resultierenden Werte in Übereinstimmung mit KOHS (2007) auf eine **Abnahme der mittleren jährlichen Abflussmenge** sowie generell auf **unveränderte Abflussmengen der Jahreshochwasser** hin. Die qualitativen Angaben, welche KOHS (2007) zu entnehmen sind, konnten anhand der durchgeführten Analysen quantitativ bestätigt werden. Zudem wird durch die Modellierung verschiedener Klimaszenarien ersichtlich, in welchem Bereich sich die zu erwartenden hydrologischen Veränderungen im Einzugsgebiet Kander-Hondrich bewegen können.

Die **Streuung** der möglichen hydrologischen Entwicklungen (z.B. für die mittleren saisonalen Abflussverhältnisse) ist unter Einbezug der heute vorliegenden Angaben zum zukünftigen Klima insbesondere für den **Sommer** noch sehr gross. Die meisten Szenarien weisen darauf hin, dass die natürliche Wasserverfügbarkeit in dieser Jahreszeit reduziert sein wird. Mit grösserer Sicherheit lassen sich Aussagen zu den Veränderungen im **Winter** machen, wo unter dem Einfluss der prognostizierten Klimaänderung, die Abflüsse deutlich zunehmen werden. Während für den Frühling leicht höhere Abflüsse erwartet werden, ist für den Herbst von reduzierten Abflussmengen auszugehen. Dieses saisonale Muster wird durch die meisten modellierten Szenarien bestätigt, wobei aber auch einzelne deutliche Abweichungen davon auftreten. Diese Resultate stimmen mit anderen Untersuchungen (z.B. HORTON ET AL. 2005, ZIERL & BUGMANN 2005, KLIWA 2006, HOLZMANN ET AL. 2010) überein.

Wie WEINGARTNER (2008) erwähnt, ist trotz den zum Teil massiven hydrologischen Veränderungen, welche sich aus den verschiedenen Klimaszenarien ergeben, davon auszugehen, dass die alpinen Einzugsgebiete im Vergleich zum Vorland auch in Zukunft immer noch einen beträchtlichen Wasserüberschuss aufweisen werden. Allerdings ist besonders auf lokaler Ebene mit markanten Veränderungen bei den saisonalen Abflussverhältnissen bzw. der Wasserverfügbarkeit zu rechnen, was verschiedene Nutzungen beeinflussen und einschränken könnte (vgl. z.B. SCHÄDLER 2007, OCCO 2008, WEHREN ET AL. 2010A).

## 22.3 Methodisches Fazit

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte **Modellkaskade** entspricht der Kombination eines Wettergenerators und eines hydrologischen Modells. Dieser empirisch-statistische Ansatz ermöglicht das räumliche und zeitliche Downscaling von regionalen und saisonalen Klimaszenarien zu lokalen Stationsdaten in täglicher Auflösung unter veränderten klimatischen Bedingungen.

Wie die Validierung der Modellkaskade mit verschiedenen Ansätzen zeigt, resultieren sowohl für die aktuellen als auch für die hydrologischen Verhältnisse früherer Zeiträume **sehr gute Simulationsergebnisse**. Dies ist bemerkenswert, weil die hydrologischen Modellierungen mit einem sehr stark reduzierten Set an meteorologischen Eingabedaten und nur mit zwei Eingabegrößen (Niederschlag und Temperatur) durchgeführt wurden.

Anhand der Validierung mit drei verschiedenen Ansätzen kann zudem gezeigt werden, dass die Modellierungsqualität für die Jahreshochwasser etwas weniger gut ausfällt, als für die Modellierung der mittleren jährlichen Abflussmengen. Zudem wird ersichtlich, dass insbesondere die Wahl der **Interpolationsmethode der meteorologischen Daten** einen wesentlichen Einfluss auf die Modellierungsqualität hat, wobei die Methode «IDW» wesentlich besser geeignet ist, als die Methode «DTIDW». Den geringsten Einfluss auf die Modellierungsqualität hat die Variation des methodischen Ansatzes, welcher für den Wettergenerator eingesetzt wird. Beide verwendeten Versionen liefern sowohl für die Modellierung der mittleren jährlichen Abflussmengen sowie für die Modellierung der Jahreshochwasser gute Resultate.

Die beobachteten **Abweichungen zwischen Modellierung und Beobachtung** für die verschiedenen Validierungsperioden können auf das hydrologische Modell und auf fehlerhafte hydrologische oder meteorologische Messwerte zurückgeführt werden. Dies lässt sich damit begründen, dass die Ergebnisse der hydrologischen Modellierungen, welche unter Verwendung der meteorologischen Daten des Wettergenerators durchgeführt wurden, sehr gut mit den Modellierungen aus beobachteten meteorologischen Daten übereinstimmen. Daraus wird ersichtlich, dass der zusätzliche Modellfehler, welcher durch die Erweiterung des hydrologischen Modells mit dem Wettergenerator zur Modellkaskade entsteht, als gering eingestuft werden kann.

Zudem geht aus den Sensitivitätsanalysen hervor, dass die **Modellierungsunsicherheit** zwischen den verschiedenen Versionen der Modellkaskade («be3c3\_IDW\_8387», «be3c3\_IDW\_9802», «cb3c2\_IDW\_9802», «cb3c2\_DTIDW\_9802») **sehr klein ist**. Dies zeigt sich insbesondere beim Vergleich der vier Teilgrafiken der Sensitivitätsanalysen, welche die Ergebnisse der drei besten sowie der schlechtesten Modellversion enthalten. In den meisten Fällen liegen die Resultate aller Modellversionen in der gleichen Grössenordnung und weisen das gleiche Reaktionsmuster auf.

Der **Vorteil** der durchgeführten Sensitivitätsanalysen liegt darin, dass die Reaktionsweise bzw. die systematische Veränderung der hydrologischen Kenngrößen über den modellierten Bereich der verwendeten klimatischen Größen auf einfache Weise ersichtlich wird. Zudem lassen sich für beliebige Klimaszenarien im modellierten Bereich die Änderungsbeträge der untersuchten hydrologischen Kenngrösse direkt aus der Sensitivitätsfläche bestimmen. Den dargestellten Resultaten liegt also nicht nur ein bestimmtes Klimaszenario zu Grunde. Dadurch sind die Resultate losgelöst vom aktuellen Wissensstand zur Klimaentwicklung und zeigen auch die hydrologischen Auswirkungen extremer Klimaverhältnisse auf. Falls neue Erkenntnisse zur erwarteten Klimaänderung vorliegen, können die entsprechenden hydrologischen Auswirkungen direkt aus den Sensitivitätsflächen abgeleitet werden.

Der **Nachteil** der Methode liegt allerdings darin, dass saisonal differenzierte Änderungen von Temperatur und Niederschlag, wie sie in aktuellen Klimaprojektionen angegeben werden und für die Veränderungen der hydrologischen Parameter von entscheidender Bedeutung sind, nicht berücksichtigt werden können (vgl. Kapitel 22.1).

# Teil V

## Synthese

## Übersicht Teil V

Der letzte Teil der Arbeit fasst die wesentlichen Erkenntnisse, welche sich aus den vorangehenden Teilen und Kapiteln ableiten lassen, zusammen:

- > In **Kapitel 23: Diskussion und Schlussfolgerungen** wird aufgezeigt, welche Schlüsselgrößen und Schlüsselräume die hydrologischen Verhältnisse des Gesamteinzugsgebietes Kander-Hondrich vorwiegend prägen. Daneben wird erläutert, wie die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellten Hochwasserabschätzungen sowie die aus den Untersuchungen zu den Auswirkungen der Klimaänderung resultierenden Ergebnisse in der Praxis angewendet werden können. Abschliessend werden die Möglichkeiten zur zeitlichen und räumlichen Übertragung der Resultate diskutiert.
- > **Kapitel 24: Ausblick** enthält die kritische Reflexion zu den im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Methoden und zu den erzielten Ergebnissen. Gleichzeitig werden Empfehlungen für den weiteren Einsatz der verschiedenen Ansätze gegeben. Zudem wird aufgezeigt, welcher weitere Forschungsbedarf sich aus den im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen ableiten lässt.



## 23 Diskussion und Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel werden die wesentlichsten Resultate aus den vorangehenden Teilen II bis IV bzw. aus den Kapiteln 7 bis 22 der vorliegenden Arbeit diskutiert und als Schlussfolgerungen zusammengefasst. Die Ergebnisse sind wie folgt strukturiert: Kapitel 23.1 umfasst die Erkenntnisse zu den wichtigsten Einflussgrössen und zeigt auf, welche Räume im Einzugsgebiet bezüglich den (hochwasser-)hydrologischen Verhältnissen von herausragender Bedeutung sind. Kapitel 23.2 ist zu entnehmen, wie die aus der vorliegenden Arbeit resultierenden wasserbaulichen Bemessungsgrössen in der Praxis eingesetzt werden können. In Kapitel 23.3 wird auf die bestehenden Möglichkeiten der räumlichen und zeitlichen Übertragung der Resultate auf andere nordalpine Einzugsgebiete in der Schweiz sowie auf die Auswertungen von zeitlich höher aufgelösten Daten eingegangen.

### 23.1 Schlüsselgrössen und Schlüsselräume

Zur Bestimmung von Schlüsselgrössen und Schlüsselräumen werden die Resultate aus den vorangehenden Kapiteln bezüglich deren Einfluss auf ausgewählte hydrologische Kenngrössen im Hoch- und Mittelwasserbereich des Gesamteinzugsgebietes Kander-Hondrich qualitativ beurteilt. Daraus soll ersichtlich werden, welche Grössen und Teileinzugsgebiete die Hydrologie des untersuchten Einzugsgebietes Kander-Hondrich massgeblich beeinflussen. Da davon ausgegangen werden kann, dass die beiden Klimaparameter Temperatur und Niederschlag sowie der Vergletscherungsgrad zu den wesentlichen Einflussgrössen auf die Hydrologie alpiner Einzugsgebiete gehören, wird insbesondere aufgezeigt, wie diese die hydrologischen Verhältnisse im Mittelwasser bzw. im Hochwasser beeinflussen.

#### 23.1.1 Schlüsselgrössen – Mittelwasser

Die zu erwartende herausragende Bedeutung der Niederschlagsverhältnisse für die mittleren jährlichen Abflussmengen des Gesamteinzugsgebietes Kander-Hondrich wird aus den Ergebnissen in Kapitel 20 bzw. in Kapitel 21 deutlich ersichtlich. Die **Temperatur** bzw. deren innerjähriger Verlauf beeinflusst massgeblich die Ausprägung des Abflussregimes und stellt daneben eine wesentliche Einflussgrösse für die Streuung der Tagesabflussmittelwerte dar (vgl. Abbildung 20.6). Eine verstärkte Zunahme der Sommertemperatur bewirkt z.B. gegenüber den Szenarien mit gleichmässiger Temperaturzunahme eine verstärkte Saisonalität bei den mittleren monatlichen Abflussverhältnissen (vgl. Kapitel 21.2.2). Dies indem sich die Schneeschmelze auf einen kurzen Zeitraum (Mai, Juni) im Jahr konzentriert. Anhand der Unterschiede zwischen den maximalen und minimalen monatlichen Abflussmittelwerten – welche zwischen den einzelnen Szenarien markant variieren (vgl. Kapitel 21.2.2) – werden die Auswirkungen auf die Saisonalität deutlich ersichtlich.

Die Veränderung des **Gletscheranteils** (aktuell: 6.4%) hat zwar keine wesentlichen Auswirkungen auf die mittleren jährlichen Abflussmengen, beeinflusst aber das Abflussregime des Einzugsgebietes (vgl. Kapitel 21.2.2). Unterschiede zwischen dem Abflussregime des vergletscherten und unvergletscherten Einzugsgebietes zeigen sich in den Monaten Juli bis September besonders deutlich.

### 23.1.2 Schlüsselgrößen – Hochwasser

Die hochwasserhydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet Kander-Hondrich werden je nach beurteiltem Parameter entweder vorwiegend durch den Niederschlag oder durch die Temperatur gesteuert. Während sich eine **Temperaturänderung** in erster Linie auf die zeitliche Streuung der Jahreshochwasser auswirkt, beeinflusst die Veränderung der mittleren monatlichen **Niederschlagssumme** die Abflussmenge der Jahreshochwasser (vgl. Kapitel 20.2.8).

Es ist zu beachten, dass im Rahmen der vorliegenden Arbeit die hydrologischen Auswirkungen von veränderten Starkniederschlagsparametern (z.B. Niederschlagsintensität) nicht untersucht wurden. Wie jedoch die Ergebnisse aus verschiedenen Untersuchungen (z.B. LENDERINK & VAN MEIJGAARD 2008, HAERTER ET AL. 2010) zeigen, wird die im Zusammenhang mit der Klimaänderung zu erwartende Temperaturzunahme auch eine Steigerung der Niederschlagsintensität zur Folge haben, welche sich auch auf die Abflussmengen im Hochwasserfall auswirken kann. In dieser Hinsicht können die Temperatur bzw. die Starkniederschläge auch zu den hochwasserhydrologischen Schlüsselgrößen gezählt werden.

Wie aus den Resultaten in Kapitel 15 ersichtlich wird, können als weitere Einflussgrößen auf die Hochwasserabflüsse aber auch die **topographischen, pedologischen** und **geologischen** Gebietseigenschaften genannt werden. Dies zeigt sich insbesondere an den Modellierungen der Abflussprozesse sowie an den Ergebnissen der Hochwasserabschätzungen für die kleinen Teileinzugsgebiete (vgl. Kapitel 14 und Kapitel 15) und bestätigt zudem das Konzept von WEINGARTNER ET AL. (2003) (vgl. Kapitel 1.5).

### 23.1.3 Schlüsselräume

Auch die hydrologischen Schlüsselräume der Kander können entsprechend der angestrebten Zielgröße (Mittelwasser, Hochwasser) bestimmt werden:

Während die **hochwasserhydrologischen Verhältnisse** des Gesamteinzugsgebietes Kander-Hondrich vorwiegend durch die Teileinzugsgebiete Chiene-Kien sowie Engstlige-Frutigen geprägt werden (vgl. Kapitel 13), sind für die **Verhältnisse im Mittelwasserbereich** die Abflüsse des Teileinzugsgebietes Kander-Frutigen von überproportionalem Einfluss (vgl. Kapitel 4.3).

Aus den Ergebnissen in Kapitel 14 und Kapitel 15 geht zudem hervor, dass bei der Bestimmung von Schlüsselräumen die räumliche Skala, auf welcher die Beurteilung erfolgt, von entscheidender Bedeutung ist. Beim Vergleich der Hochwasserabschätzungen der Einzugsgebiete unterschiedlicher Größenordnung (Kapitel 16) wird deutlich ersichtlich, dass die hochwasserhydrologischen Verhältnisse der mesoskaligen Einzugsgebiete auch durch das **Zusammenwirken** der kleinen Teileinzugsgebiete, das wiederum durch die Gebietsform und die topographischen Gegebenheiten des übergeordneten mesoskaligen Einzugsgebietes beeinflusst wird, geprägt werden.

Daneben muss berücksichtigt werden, dass die Bestimmung von Schlüsselräumen immer nur für einen bestimmten Zeitpunkt erfolgen kann. Je nach Entwicklung der in Kapitel 23.1.1 bzw. Kapitel 23.1.2 aufgeführten Schlüsselgrößen (Niederschlag, Temperatur) sowie deren räumlichen Differenzierung kann der Einfluss der einzelnen Teileinzugsgebiete auf die unterschiedlichen hydrologischen Aspekte des Gesamteinzugsgebietes zu- oder abnehmen. Falls z.B. durch die im Zusammenhang mit der Klimaänderung erhöhten Temperaturen intensivere Starkniederschläge auftreten, könnte sich auch der Einfluss der verschiedenen Teileinzugsgebiete auf das hochwasserhydrologische Geschehen des Gesamteinzugsgebietes bzw. das Zusammenwirken der Teileinzugsgebiete verändern.

## 23.2 Bedeutung für die Praxis

Wie in Kapitel 9 beschrieben, wurde in den letzten Jahren im Einzugsgebiet der Kander bei mehreren Messreihen ein Trend zu deutlich grösseren Jahreshochwassern festgestellt. Wie aus den Ergebnissen in Kapitel 9.5 ebenfalls hervorgeht, haben diese Veränderungen Auswirkungen auf die in der Praxis verwendeten hochwasserhydrologischen Bemessungsgrössen (z.B. HQ100). Daher stellen sich für die Anwendung der in Kapitel 13 (vgl. auch Anhang C) bereitgestellten Bemessungsgrössen die folgenden Fragen:

- > Wie entwickelt sich das Hochwassergeschehen in den nächsten Jahren und Jahrzehnten?
- > Sind die angegebenen Bemessungsgrössen auch für die im Jahr 2050 vorherrschenden hydrologischen Verhältnisse gültig?
- > Wie können die hochwasserhydrologischen Bemessungsgrössen festgelegt werden, damit sie auch unter den langfristig zu erwartenden hydrologischen Veränderungen gültig sind?

Zur Beantwortung dieser Fragen werden die Ergebnisse aus Kapitel 7 und Kapitel 21 beigezogen. Damit können Aussagen zu möglichen Ursachen für die in den letzten Jahren deutlich grösseren Hochwasserabflüsse sowie zu der bisherigen und der erwarteten zukünftigen Entwicklung gemacht werden.

### 23.2.1 Entwicklung des Hochwassergeschehens in den nächsten Jahren

Wie aus Kapitel 7 ersichtlich wird, kann die Zunahme der extremen Hochwasser in den letzten Jahren bzw. Jahrzehnten heute noch nicht vollumfänglich erklärt werden (vgl. z.B. SCHMOCKER-FACKEL & NAEF 2010A, 2010B). In erster Linie kommen die folgenden Einflüsse bzw. eine Überlagerung derselben in Frage:

- > Natürliche Schwankungen der klimatischen Verhältnisse, welche phasenweise zu grossen Hochwasserereignissen führen können.
- > Die anthropogen verursachte Klimaänderung sowie deren Auswirkungen auf die hochwasserrelevanten Prozesse.

#### a) Natürliche Schwankungen der klimatischen Verhältnisse

Wie BÜTSCHI (2008) mit seinen Untersuchungen nachweisen konnte, lässt sich für das Einzugsgebiet der Kander anhand der Schadenschronik ein ansatzweise **zyklisches Muster der Hochwasseraktivität** beobachten (vgl. Kapitel 7). Dieses Muster der Hochwasseraktivität ist sowohl in der Schweiz (z.B. PFISTER 1999, SCHMOCKER-FACKEL & NAEF 2010B) als auch in weiten Teilen Europas (z.B. STURM ET AL. 2001) zu beobachten und ist mit **natürlichen Schwankungen des Klimas** in Verbindung zu bringen. Während grosse Hochwasser vor allem im 19. Jahrhundert häufiger aufgetreten sind als in der Mitte des 20. Jahrhunderts (vgl. Abbildung 7.2), kann in neuerer Zeit wiederum eine Häufung grosser Hochwasser beobachtet werden, wobei ein Rückgang der verstärkten Hochwasseraktivität heute noch nicht festgestellt werden kann (vgl. PETROW & MERZ 2009, SCHMOCKER-FACKEL & NAEF 2010A). Die Hochwasserereignisse der letzten Jahre stellen also grosse und seltene Hochwasserabflüsse dar, müssen aber in einem grösseren zeitlichen Kontext von mehreren Jahrhunderten nichts Aussergewöhnliches sein.

Dadurch kann der für die Kander festgestellte Trend zu grösseren Hochwasserabflüssen (vgl. Kapitel 9) auch als Folge natürlicher klimatischer Schwankungen interpretiert werden. Da davon ausgegangen wird, dass Klimaphasen, welche die Hochwasserhäufigkeit beeinflussen, einen natürlichen Zyklus von mehreren Jahrzehnten bis Jahrhunderten aufweisen (z.B. STURM ET AL. 2001, JACOBET ET AL. 2003, SCHULTE ET AL. 2009, ALEXANDER ET AL. 2009), besteht aus dieser Hinsicht die Möglichkeit, dass im untersuchten Einzugsgebiet auch noch in den nächsten Jahren und Jahrzehnten grössere Hochwasserabflussmengen auftreten könnten.

In diesem Zusammenhang muss beachtet werden, dass die vorliegenden langen Abflussmessreihen nur das eher ereignisarme 20. Jahrhundert umfassen (vgl. Kapitel 7 bzw. WEHREN & WEINGARTNER 2007). Daher ist in diesen Messreihen vermutlich nicht das ganze Spektrum der natürlicherweise möglichen Hochwasserabflüsse enthalten. Anders sind jedoch die Hochwasserabschätzungen zu beurteilen, welche anhand der in Kapitel 13 verwendeten **Periode von 1984-2005** durchgeführt wurden. Die entsprechenden Resultate wurden aus modellierten und beobachteten Abflussmessreihen abgeleitet, welche mehrere extreme Hochwasserabflüsse umfassen (z.B. 1999, 2005). Dieser Einfluss der extremen Hochwasserabflüsse der letzten Jahre wird auch in Kapitel 9.5 ersichtlich: Die Hochwasserabschätzungen für die Perioden bis 1998 bzw. aus den langen Reihen liegen deutlich unter den Abschätzungen für die Perioden, welche auch die Hochwasser zwischen 1999 und 2005 einbeziehen. Durch die Auswertung von aktuellen Messreihen, welche die extremen Hochwasserabflüsse der letzten Jahrzehnte enthalten (z.B. 1980-2005), werden im untersuchten Einzugsgebiet Kander-Hondrich also Hochwasserabschätzungen erzielt, welche deutlich über den Abschätzungen aus langen Messreihen (z.B. 1903-2007) liegen.

### b) Auswirkungen der Klimaänderung

Die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Hochwasserabflüsse bei Kander-Hondrich bis ins Jahr 2050 werden aus Kapitel 21.3 sowie zusammengefasst auch aus Abbildung 23.1 ersichtlich.

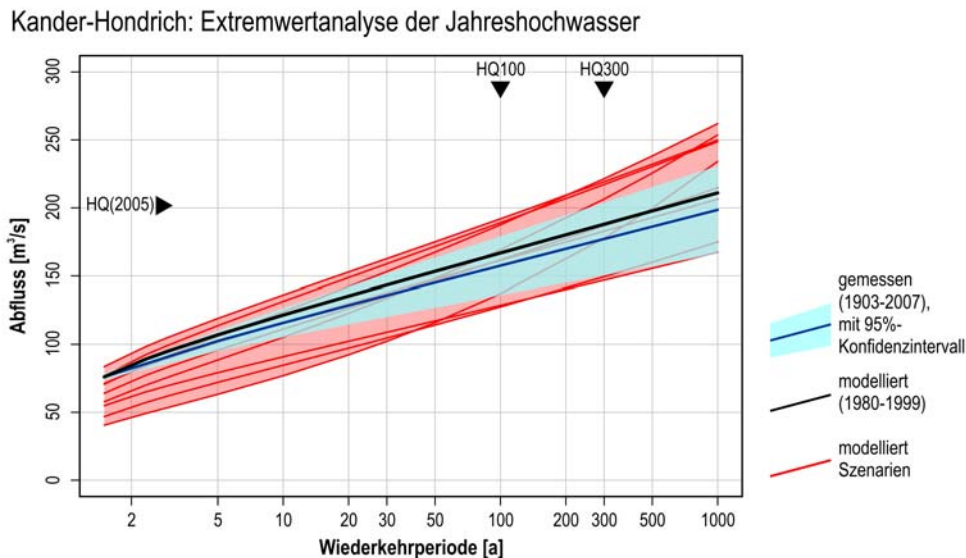


Abbildung 23.1: Hochwasserabschätzung für das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich mit unterschiedlichen Daten: Auswertung der beobachteten Abflussdaten (1903-2007, blau) sowie der unter Anwendung der Klimaszenarien modellierten Abflussdaten (rot; Referenzmodellierung der Periode 1980-1999: schwarz)

In Abbildung 23.1 sind die extremwertstatistischen Auswertungen der verschiedenen Szenarien als rote Linien enthalten. Sie zeigen auf, welches Spektrum die Veränderungen bei den Hochwasserabflüssen unterschiedlicher Jährlichkeit umfassen können (vgl. auch Tabelle 21.8). Es sind sowohl Zunahmen als auch Abnahmen zu beobachten. Die Bandbreite umfasst z.B. beim **HQ100** für alle Szenarien einen Bereich von über  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $125$  bis  $191 \text{ m}^3/\text{s}$ ), was einer **Zunahme um 15%** bzw. einer **Abnahme um -26%** gegenüber dem HQ100 der Referenzperiode (1980-1999) entspricht. Damit ist dieser Bereich leicht grösser als derjenige, welcher das 95%-Konfidenzintervall der extremwertstatistisch ausgewerteten Messreihe von 1903 bis 2007 umfasst ( $159 \text{ m}^3/\text{s} \pm 25 \text{ m}^3/\text{s}$ , blauer Bereich).

Aus Kapitel 21.3.2 (Tabelle 21.9 und Tabelle 21.10) wird zudem ersichtlich, dass bei einer geringfügigen Mehrheit der Szenarien bei den extremen Hochwasserabflüssen (HQ300, HQ500) eine Zunahme gegenüber den modellierten Abflüssen von 1980-1999 festzustellen ist. Daraus kann geschlossen werden, dass für die zukünftigen Hochwasserverhältnisse von einer leichten Zunahme der extremen Hochwasserabflüsse ausgegangen werden muss.

### 23.2.2 Festlegung der Bemessungsgrössen in der Praxis

Wie aus Abbildung 23.1 ersichtlich wird, kann anhand der dargestellten Szenarien für die um das Jahr 2050 gültigen Bemessungsgrössen kein eindeutiger Wert angegeben werden. Die Bandbreite, welche aus den Auswertungen der Szenarien hervorgeht, umfasst einen relativ grossen Bereich. Zusätzlich muss beachtet werden, dass jedes modellierte hydrologische Szenario die gleiche Eintretenswahrscheinlichkeit aufweist. Aus diesem Grund kann keine Aussage dazu gemacht werden, ob ein Szenario wahrscheinlicher ist als ein anderes.

Für die Verwendung der angegebenen Hochwasserabschätzungen bei zukünftigen wasserbaulichen Projekten stellt sich deshalb die Frage, welches Szenario angewendet bzw. wie die hochwasserhydrologische Bemessungsgrösse festgelegt werden soll. Damit eine Empfehlung zur Festlegung der langfristig ausgerichteten Bemessungshochwasser gegeben werden kann, müssen die folgenden ergänzenden Aspekte beachtet werden:

- > **Trend bei den jährlichen Hochwasserspitzen bzw. natürliche Zyklizität der Hochwasseraktivität:** Wie in Kapitel 23.2.1 a) beschrieben, ist an der Kander seit den letzten zehn Jahren eine Entwicklung zu deutlich grösseren Jahreshochwasserspitzen zu beobachten. Auf Grund der heute herrschenden und vermutlich noch einige Jahre andauernden Klimaphase, könnten auf der Alpennordseite in den nächsten Jahren noch weitere grosse Hochwasserspitzen – so wie sie in den letzten Jahren vermehrt beobachtet wurden – auftreten.
- > **Entwicklung der Extremwerte unter dem Einfluss der Klimaänderung:** Aus den statistischen Auswertung der hydrologisch modellierten Klimaszenarien wird ersichtlich, dass die Anzahl der extremen Abflussereignisse (HQ300, HQ500) leicht grösser ist (vgl. Tabelle 21.9, Tabelle 21.10). Dies deutet darauf hin, dass sehr grosse Hochwasserereignisse unter dem Einfluss der Klimaänderung häufiger auftreten könnten. Es ist aber zu beachten, dass Aussagen zur Entwicklung der Extremwerte unter dem Einfluss der Klimaänderung heute noch mit grosser Unsicherheit behaftet sind (z.B. FREI ET AL. 2006).

Diese beiden Punkte zeigen, dass auf der Alpennordseite bzw. im Einzugsgebiet der Kander in den nächsten Jahren und Jahrzehnten vermehrte und grössere Jahreshochwasserspitzen nicht ausgeschlossen werden können. Daher lassen sich die folgenden **Empfehlungen** zur Festlegung der hochwasserhydrologischen Bemessungsgrössen ableiten:

- > Als **Bemessungsgrößen** für langfristig ausgerichtete wasserbauliche Projekte sollen die Resultate derjenigen Szenarien verwendet werden, welche am oberen Rand der Bandbreite aller extremwertstatistischen Auswertungen liegen (vgl. Abbildung 23.1). Dies entspricht für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich einer Veränderung der Bemessungsgrößen um die prozentualen Beträge welche in Tabelle 21.8 aufgeführt sind. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass sich die angegebenen Veränderungen auf die hochwasserhydrologischen Verhältnisse der Jahre 1980-1999 beziehen, welche in der gleichen Größenordnung liegen wie die Hochwasserabschätzungen für die langen Messreihen (z.B. 1903-2007).

Es ist davon auszugehen, dass durch Berücksichtigung der Szenarien am oberen Rand der Bandbreite, die auf Grund der Klimaänderung bis 2050 voraussichtlich zu erwartende Veränderung bei den jährlichen Hochwasserabflüssen angemessen berücksichtigt werden kann. Dieser Vorschlag bestätigt auch die von der KOHS (2007) gemachten Empfehlungen zur Berücksichtigung der oberen Grenze des Konfidenzintervalls (vgl. Kapitel 17.1.3) und steht zudem in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von WEHREN & WEINGARTNER (2007) die aus den Hochwasserabschätzungen verlängerter Zeitreihen resultieren.

- > Diese Faktoren bzw. die Berücksichtigung des Konfidenzintervalls ist jedoch nicht auf **Hochwasserabschätzungen** anzuwenden, welche auf den Abflussdaten der letzten 20 bis 30 Jahren beruhen (z.B. Anhang C). Wie die Auswertungen in Abbildung 9.1 zeigen, liegen die Abschätzungen für den Zeitraum von 1984-2005 bereits deutlich über den Resultaten für die Perioden von 1980-1999, auf welche sich auch die Angaben zu den Auswirkungen der Klimaänderungen beziehen. Die Hochwasserabschätzungen, welche im Einzugsgebiet Kander-Hondrich durchgeführt wurden und auf den aktuellen bzw. modellierten Daten der letzten 20 bis 30 Jahre beruhen (vgl. Kapitel 13) müssen deshalb nicht mehr um die in Tabelle 21.8 enthaltenen prozentualen Beträge nach oben korrigiert werden.
- > Zusätzlich empfiehlt es sich, bei der Festlegung der jeweiligen hochwasserhydrologischen Bemessungsgrösse immer auch das entsprechende **Kosten-Nutzen-Verhältnis** der damit verbundenen Massnahmen zu überprüfen. In Abbildung 23.2 sind anhand der blauen und grünen Linie die Kosten aufgeführt, welche für Massnahmen aufwendet werden müssen, um das entsprechende HQ100 schadlos zu bewältigen. Der Verlauf der beiden Kurven zeigt zwei unterschiedliche Situationen und die entsprechende Kostenentwicklung in Abhängigkeit des HQ100 an.

Entsteht bei der Berücksichtigung der oberen Grenze der Bandbreite, welche durch die aus den Szenarien abgeleiteten hochwasserhydrologischen Bemessungsgrößen abgedeckt wird (HQ100, rotes Band bzw. rote Linien), eine starke Zunahme bei den Kosten, welche für die entsprechenden Massnahmen eingesetzt werden müssen (blaue Linie), sollte die Festlegung der Bemessungsgrösse am oberen Rand kritisch überprüft werden. In diesem Fall empfiehlt sich allenfalls die Anwendung eines konservativen, mittleren Wertes der Bemessungsgrösse (blauer Punkt). In diesem Fall muss bei der Massnahmenplanung der Überlastfall besonders beachtet werden.

Falls die Berücksichtigung des Unsicherheitsbereichs der Bemessungsgrösse aber zu keinen wesentlichen Mehrkosten bei den geplanten Massnahmen führt (grüne Linie) sollten die Bemessungsgrößen nach oben korrigiert bzw. der obere Bereich der vorliegenden Szenarien verwendet werden (grüner Punkt).

Es empfiehlt sich, diesen Ansatz auch für die Festlegung der hochwasserhydrologischen Bemessungsgrösse bei den anderen Einzugsgebieten unterschiedlicher räumlicher Skala an-

zuwenden (vgl. Kapitel 13 und Kapitel 14 bzw. Anhang C). Die Bandbreite der Hochwasserabschätzungen wird in diesem Fall durch die aus den unterschiedlichen Methoden abgeleiteten Werte bestimmt.

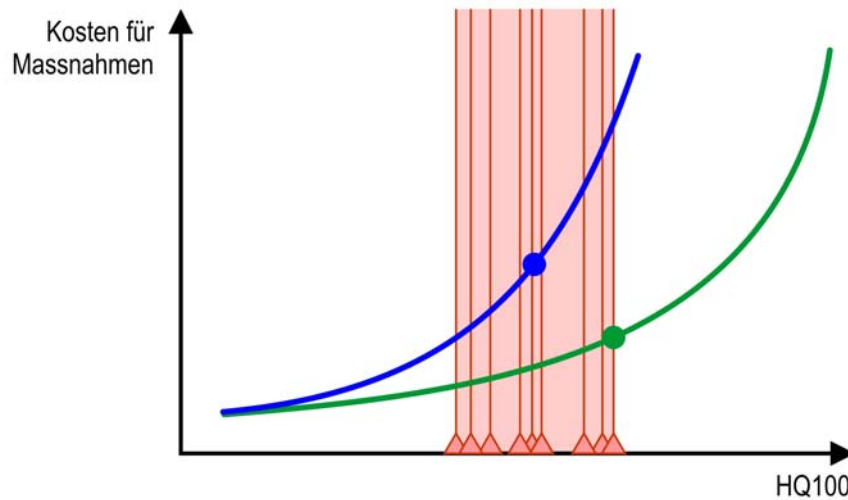


Abbildung 23.2: Schema zur Berücksichtigung des Unsicherheitsbereichs bei den hochwasserhydrologischen Bemessungsgrößen. Rotes Band: Unsicherheitsbereich des HQ100 unter Berücksichtigung der Klimaänderung. Rote Dreiecke bzw. rote Linien: HQ100 abgeschätzt aus den Szenarien (vgl. Abbildung 23.1). Blaue bzw. grüne Linie: Kosten für Massnahmen unter Berücksichtigung der Bemessungsgröße (HQ100). Blauer und grüner Punkt: zu verwendende hochwasserhydrologische Bemessungsgröße. (Grafik verändert nach BAFU & WSL 2008)

- > Es ist zu beachten, dass die in Kapitel 21.3 beschriebenen Veränderungen nur eingeschränkt für die **kleinen Teileinzugsgebiete** der Kander Gültigkeit besitzen. Dies deshalb, weil die Hochwasser in kleineren Teileinzugsgebieten vorwiegend durch Starkniederschläge kürzerer Dauer ausgelöst werden. Heute liegen aber noch keine genauen und räumlich differenzierten, quantitativen Angaben zur Auswirkung der Klimaänderung auf die entsprechenden Prozesse vor. Wenn davon ausgegangen wird, dass sich das Starkniederschlagsgeschehen in Zukunft auf Grund erhöhter Temperaturen intensiviert (vgl. LENDERINK & VAN MEIJGAARD 2008, HAERTER ET AL. 2010), werden die Veränderungen bei den Hochwasserabflüssen kleiner Einzugsgebiete vermutlich grösser sein als diejenigen für das mesoskalige Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich.

### 23.2.3 Fazit

Entsprechend der Grösse des betrachteten Einzugsgebietes bzw. unter Berücksichtigung verschiedener Aspekte (z.B. Auswirkung der Klimaänderung) soll anhand des Entscheidungsbaumes in Abbildung 23.3 aufgezeigt werden, wie die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellten Hochwasserabschätzungen für weitere **Anwendungen in der Praxis** eingesetzt werden sollen. Dabei wird einerseits auf die Resultate in Kapitel 21 (Tabelle 21.6, Tabelle 21.7), welche die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Hochwasserabflüsse des Gesamteinzugsgebietes zeigen, eingegangen. Andererseits werden aber auch Empfehlungen zur Anwendung der Hochwasserabschätzungen gegeben, welche für die Teileinzugsgebiete unterschiedlicher Grössenordnung mit verschiedenen Methoden durchgeführt wurden und die aktuellen hochwasserhydrologischen Verhältnisse aufzeigen (vgl. Tabelle C 3 und Tabelle C 4 in Anhang C).

Die Punkte A) bis D) in Abbildung 23.3 zeigen, welche Werte für die Hochwasserabschätzung für das **Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich** unter Berücksichtigung verschiedener Aspekte (z.B. Auswirkungen der Klimaänderung) verwendet werden sollen.

- A) Falls die Hochwasserabschätzung für das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich durchgeführt wird, die Auswirkungen der Klimaänderung berücksichtigt werden sollen und die Kosten für die vorgesehenen Massnahmen eine günstige Entwicklung aufweisen (vgl. grüne Linie in Abbildung 23.2), soll für die jeweilige Wiederkehrperiode der grösste Wert aus allen Szenarien (vgl. Tabelle 21.6 und Tabelle 21.7) verwendet werden. Ebenso bietet sich ein Einsatz der unkorrigierten Hochwasserabschätzungen an, welche auf der aktuellen Periode 1984-2005 basieren (vgl. Tabelle C 1, Anhang C). Hingegen sind die aus der langen Messreihe (1903-2007) resultierenden Hochwasserabschätzungen mit den in Tabelle 21.8 angegebenen Faktoren nach oben zu korrigieren.
- B) Wenn im Unterschied zu Punkt A) eine ungünstige Entwicklung der Kosten für die geplanten Massnahmen resultiert (vgl. blaue Linie in Abbildung 23.2), soll ein mittlerer Wert aus allen Szenarien in Tabelle 21.6 und Tabelle 21.7 angewendet werden. Der Überlastfall ist besonders zu berücksichtigen.
- C) Bei einer Hochwasserabschätzung für das Gesamteinzugsgebiet ohne Berücksichtigung der Auswirkungen der Klimaänderung mit einer günstigen Kostenentwicklung für die geplanten Massnahmen, soll analog zu Punkt B) ein mittlerer Wert aus den Szenarien oder die Hochwasserabschätzungen aus den langen Messreihen verwendet werden.
- D) Auch wenn im Vergleich zu Punkt C) eine ungünstige Kostenentwicklung auftritt, ist analog zu Punkt C) ein mittlerer Wert aus den Szenarien in Tabelle 21.6 bzw. Tabelle 21.7 bzw. die Hochwasserabschätzung aus den langen Messreihen zu verwenden. Somit kann eine Unterschätzung der hochwasserhydrologischen Verhältnisse vermieden werden.

Die nachfolgenden Punkte E) bis H) zeigen auf, wie die Hochwasserabschätzungen für die **Teileinzugsgebiete unterschiedlicher Grössenordnung** eingesetzt werden sollen. Hierbei ist zu beachten, dass im Gegensatz zu den Hochwasserabschätzungen für das Gesamteinzugsgebiet, keine Angaben zu den Auswirkungen der Klimaänderung vorliegen.

- E) Falls die Hochwasserabschätzung für ein mittelgrosses Teileinzugsgebiet mit einer Fläche über 20 km<sup>2</sup> durchgeführt wird und die Kostenentwicklung der geplanten Massnahmen einen günstigen Verlauf aufweist, soll aus den Hochwasserabschätzungen mit modellierten Abflussdaten und denjenigen mit HQx\_meso\_CH (vgl. Tabelle C1 und Tabelle C 2; Anhang C) ein Wert am oberen Rand der daraus resultierenden Bandbreite gewählt werden.
- F) Wenn im Unterschied zu Punkt E) eine ungünstige Kostenentwicklung zu beobachten ist, ist ein mittlerer Wert aus den entsprechenden Angaben (vgl. Anhang C) zu wählen.
- G) Wird eine Hochwasserabschätzung für ein kleines Teileinzugsgebiet mit einer Einzugsgebietsfläche unter 20 km<sup>2</sup> durchgeführt und ist keine starke Zunahme der Kosten festzustellen, soll in Anhang C der grösste Wert aus allen Abschätzungen verwendet werden.
- H) Tritt gegenüber Punkt G) eine starke Zunahme bei den Kosten für die geplanten Massnahmen auf, ist der mittlere bzw. der kleinere Wert aus den vorliegenden Abschätzungen zu übernehmen.



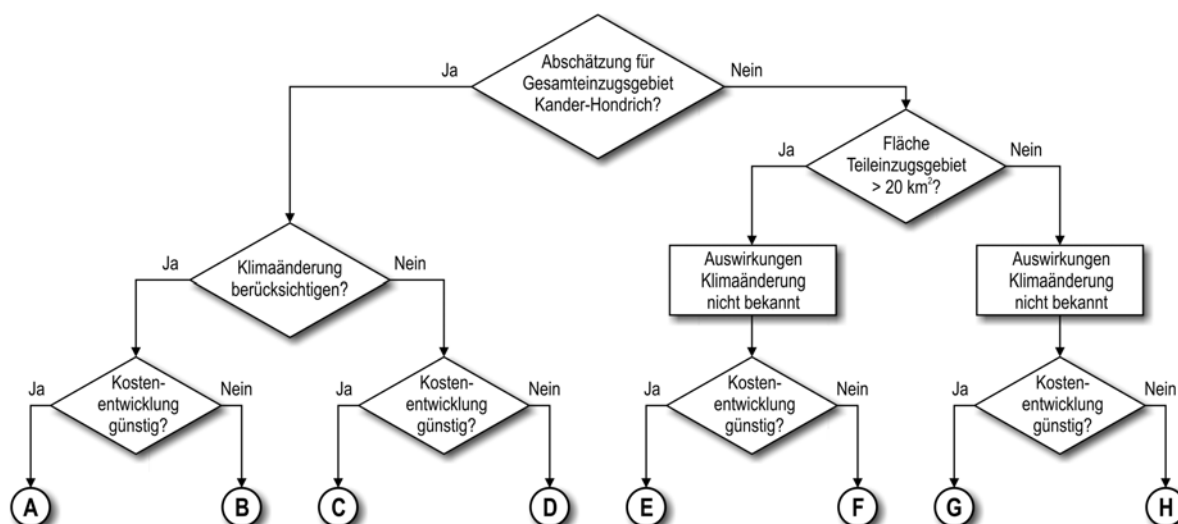


Abbildung 23.3: Anwendung der in der Arbeit erstellten Hochwasserabschätzungen für das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich sowie für die Teileinzugsgebiete unterschiedlicher Grössenordnung. A bis H siehe Text.

## 23.3 Zeitliche und räumliche Übertragung der Ergebnisse

Die Untersuchungen zu den Auswirkungen der Klimaänderung in Kapitel 20 und Kapitel 21 wurden ausschliesslich auf Basis von Tagesmittelwerten durchgeführt. Für die Anwendung in der Praxis werden in der Regel jedoch Bemessungsgrössen benötigt, welche auf Basis von zeitlich höher aufgelösten Daten (z.B. Stundenmittelwerte) berechnet werden. Die Frage stellt sich deshalb, ob die Ergebnisse aus Kapitel 21.3. auch für Auswertungen zeitlich höher aufgelöster Daten gültig sind.

Daneben wird aus den Ergebnissen in Kapitel 7 bis Kapitel 9 ersichtlich, dass sich die bisherige Entwicklung der klimatischen und hydrologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet der Kander gut mit den Veränderungen im Berner Oberland oder in anderen Einzugsgebieten der Schweiz vergleichen lässt. Die Kander stellt in dieser Hinsicht keinen hydrologischen Sonderfall dar. Ebenso geht aus den Empfehlungen von KOHS (2007) hervor, dass die erwarteten hydrologischen Auswirkungen der Klimaänderung je nach Höhenlage für alle Einzugsgebiete der Alpennordseite gültig sind. In diesem Kapitel soll deshalb auch der Frage nachgegangen werden, ob die aus der vorliegenden Arbeit resultierenden Angaben auch auf andere mesoskalige alpine Einzugsgebiete auf der Alpennordseite der Schweiz übertragen werden können.

### 23.3.1 Zeitliche Übertragung der Ergebnisse

Wie die Resultate in Abbildung 23.4 zeigen, kann für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen Tagesmittelwerten und Stundenmittelwerten beobachtet werden. Dies gilt sowohl für den Eintretenszeitpunkt der monatlichen Hochwasserabflüsse (a) als auch für die entsprechende Abflussmenge (b). Die Auswertung wurde für die Periode von 1981-2008 sowie für die monatlichen Höchstwerte des Sommerhalbjahres (Mai bis Oktober) durchgeführt.

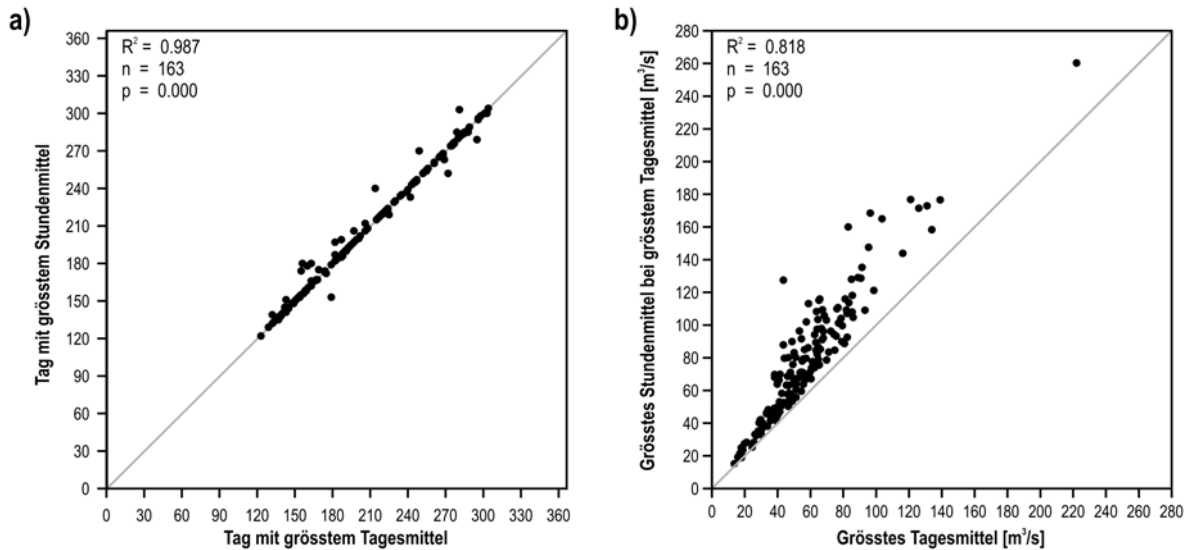


Abbildung 23.4: Zusammenhang der Eintretenszeitpunkte (a) und der Abflussmengen (b) von monatlich maximalen Tages- und Stundenmittelwerten (Kander-Hondrich, Periode: 1981-2008, Monate: Mai-Oktober;  $R^2$ : Bestimmtheitsmass, n: Anzahl Wertepaare, p: Signifikanzwert).

Auf Grund dieser **statistisch signifikanten Zusammenhänge**, welche zwischen Tages- und Stundenmittelwerten bestehen, können die auf Tagesmittelwerten basierenden Angaben zu den Auswirkungen der Klimaänderung (vgl. Kapitel 21.3) mit Einschränkung auch auf Hochwasserabschätzungen aus zeitlich höher aufgelösten Daten übertragen werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die beobachteten Zusammenhänge auch unter den zukünftigen Klimaverhältnissen gültig sind.

Es ist zu beachten, dass die signifikanten statistischen Zusammenhänge zwischen den Daten unterschiedlicher zeitlicher Auflösung nur für das Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich und deutlich weniger ausgeprägt für die verschiedenen Teileinzugsgebiete beobachtet werden konnten. Deshalb können die Ergebnisse aus Kapitel 21.3, welche auf Tagesmittelwerten beruhen, nur für das untersuchte Gesamteinzugsgebiet auf Auswertungen höher aufgelöster Daten (hier: Stundenmittelwerte) übertragen werden. Eine Übertragung der Angaben in Kapitel 21.3 auf Auswertungen der verschiedenen Teileinzugsgebiete (vgl. Anhang B bzw. Kapitel 2.2) führt hingegen zu keinen sinnvollen Resultaten.

### 23.3.2 Räumliche Übertragung der Ergebnisse

Wie erwähnt, stimmen die klimatischen und hydrologischen Veränderungen und Entwicklungen, welche für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich festgestellt werden konnten, gut mit denjenigen anderer Einzugsgebiete der Schweiz überein (vgl. Kapitel 9.4). In Kapitel 23.2.2 wurde zudem darauf hingewiesen, dass eine Übertragung der Ergebnisse aus Kapitel 21.3 auf die hochwasserhydrologischen Verhältnisse der Teileinzugsgebiete nur beschränkt möglich ist. Daneben wurde bei der naturräumlichen Charakterisierung in Kapitel 2.6 ersichtlich, dass es sich bei der Kander um ein Einzugsgebiet handelt, welches im gesamtschweizerischen Vergleich bei verschiedenen hydrologisch relevanten Gebietseigenschaften deutlich über- bzw. unterdurchschnittliche Werte aufweist.

Vor einer allfälligen Übertragung der in Kapitel 21.3 aufgeführten Resultate auf andere mesoskalige Einzugsgebiete auf der Alpennordseite der Schweiz sollte deshalb überprüft werden, welche hydro-

logische Ähnlichkeit ein Einzugsgebiet zum Einzugsgebiet der Kander aufweist. In Abbildung 23.5 wurde deshalb mit Hilfe der sogenannten «**Andrews-Kurven**» (ANDREWS 1972) die Ähnlichkeit bezüglich den hydrologisch relevanten Gebietseigenschaften, welche in Tabelle 2.2 aufgeführt sind (vgl. Kapitel 2.6.1), für alle mesoskaligen Einzugsgebiete vergleichbarer Grösse auf der Alpennordseite der Schweiz zusammenfassend dargestellt. Die Ähnlichkeit zwischen den verschiedenen Einzugsgebieten bezüglich dieser Gebietseigenschaften wird daran ersichtlich, dass die entsprechenden Kurven in ihrer Form und Lage gut übereinstimmen.

In Abbildung 23.5 ist die Andrews-Kurve für das Einzugsgebiet Kander-Hondrich in schwarz hervorgehoben. Die farbigen Linien entsprechen den acht Einzugsgebieten, welche bezüglich Gebietseigenschaften dem Einzugsgebiet Kander-Hondrich am ähnlichsten sind. Die Ähnlichkeit wurde mit Hilfe des Distanzmasses nach ANDREWS (1972), welches mit der euklidischen Distanz (vgl. z.B. SCHÖNWIESE 2006) verglichen werden kann, quantitativ bestimmt. Aus diesem Vergleich wird ersichtlich, dass die Ähnlichkeit der Gebietseigenschaften zwischen den mesoskaligen Einzugsgebieten der Alpennordseite der Schweiz und dem Einzugsgebiet Kander-Hondrich sehr stark variieren kann. Auch bei den acht ähnlichsten Einzugsgebieten treten vereinzelt noch grössere Abweichungen zwischen einzelnen Gebietsparametern auf (z.B. Simme-Latterbach).

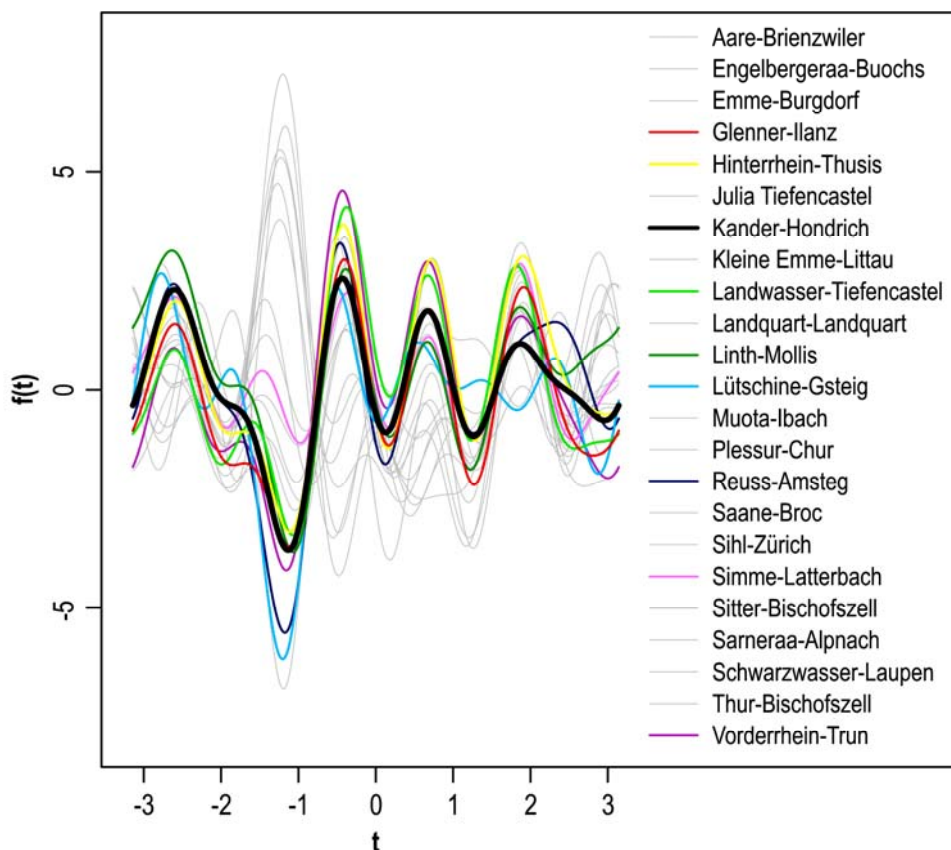


Abbildung 23.5: Andrews-Kurven zur Beurteilung der Ähnlichkeit der mesoskaligen, nordalpinen Einzugsgebiete der Schweiz. (Daten: BREINLINGER ET AL. 1992)

Die zu beobachtende Ähnlichkeit der Gebietseigenschaften kann einen Hinweis darauf geben, ob die Resultate in Kapitel 20 und Kapitel 21 mit Einschränkungen auf die ähnlichsten mesoskaligen

Einzugsgebiete der Alpennordseite übertragen werden können. Dies gilt insbesondere für die Resultate zu den Veränderungen bei den **mittleren Abflussverhältnissen** (z.B. Kapitel 20.2.1 bis Kapitel 20.2.5). Eine direkte Übertragung der Resultate zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf die **Hochwasserverhältnisse** ist jedoch kritisch zu prüfen. Dies deshalb, weil davon ausgegangen werden muss, dass die Regionalisierung der Hochwasserverhältnisse alleine auf Grund von Gebiets-eigenschaften mit grösseren Unsicherheiten verbunden sein kann (vgl. z.B. DÜSTER 1994, ASCHWANDEN & SPREAFICO 1995).

## 24 Ausblick

In diesem Kapitel werden ausgewählte methodische und inhaltliche Aspekte der vorliegenden Untersuchung besprochen und Empfehlungen aus den gemachten Erfahrungen abgeleitet. Während in Kapitel 24.1 auf die Historischen Hochwasser und in Kapitel 24.2 auf die Hochwasserabschätzungen mit unterschiedlichen Ansätzen eingegangen wird, werden in Kapitel 24.3 die verschiedenen Modellierungen mit PREVAH beleuchtet. Kapitel 24.4 enthält eine Beurteilung der Untersuchungen zu den Auswirkungen der Klimaänderung.

### 24.1 Historische Hochwasser

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Auswertungen der langen klimatischen und hydrologischen Messreihen sowie die Angaben zu den historischen Hochwasserabflüssen bieten eine Grundlage für weitere Auswertungen und Analysen:

- > Durch Aufbereitung der historischen Schadensereignisse konnte die zeitliche Information zu den hochwasserhydrologischen Verhältnissen im untersuchten Einzugsgebiet deutlich erweitert werden (vgl. Kapitel 7). Allerdings flossen diese Angaben nicht in die Hochwasserabschätzungen für das Gesamteinzugsgebiet ein. Wie die Arbeiten von GEES (1997), BENITO ET AL. (2004) oder DWA (2008) zeigen, bestehen heute Ansätze um vorliegende Angaben zu historischen Hochwasserabflüssen in die Hochwasserabschätzung und Bestimmung der Bemessungsgrößen eines Einzugsgebietes einfließen zu lassen. Es bietet sich deshalb an, die vorliegenden historischen Angaben zum Einzugsgebiet Kander-Hondrich weiter zu bearbeiten, in die Abschätzung der Bemessungshochwasser aufzunehmen und dadurch robustere Hochwasserabschätzungen herzuleiten.
- > Des Weiteren wurde bei der Auswertung der langen klimatischen und hydrologischen Messreihen der Zusammenhang zwischen Starkniederschlägen unterschiedlicher Dauer und seltenen Hochwasserabflüssen deutlich ersichtlich (Kapitel 10). Die Veränderungen der Starkniederschläge schlagen sich in den meisten Fällen direkt im Hochwassergeschehen nieder. Es wird zudem ersichtlich, dass die **Hochwasseraktivität ein zyklisches Muster** aufweist. Die Ursachen für diese regelmässigen Veränderungen sind bis heute noch nicht abschliessend geklärt (vgl. SCHMOCKER-FACKEL & NAEF 2010B). Wie neuste Untersuchungen zeigen (z.B. GRIFFIES & BRYAN 1997, ALEXANDER ET AL. 2009), könnte eine Erklärung für dieses zyklische Muster auch in den zyklischen Veränderungen der Meeres-Oberflächentemperaturen liegen. Ein Vergleich der langen Abflussmessreihen im Berner Oberland mit weiteren grossräumigen klimatischen Mustern, z.B. der «Atlantic Multidecadal Oscillation» (vgl. ENFIELD ET AL. 2001), könnte Aufschluss über allenfalls vorliegende Zusammenhänge zwischen grossräumigen Veränderungen und lokalen Auswirkungen geben. Anhand dieser Zusammenhänge könnten die Resultate der Klimaszenarien aus regionalen bzw. globalen Klimamodellen neu interpretiert und die Auswirkungen der Klimaänderung mit einem weiteren Ansatz abgeschätzt werden.

## 24.2 Hochwasserabschätzung mit unterschiedlichen Ansätzen

Bei den Hochwasserabschätzungen, welche mit verschiedenen Ansätzen und Methoden durchgeführt wurden, können die folgenden Punkte festgehalten werden:

- > Die Resultate der **extremwertstatistischen Hochwasserabschätzungen** werden durch die massiv veränderten Hochwasserabflüsse der letzten Jahre massgeblich von der gewählten Auswertungsperiode beeinflusst (vgl. Kapitel 9.5). Die **Trends**, welche bei verschiedenen hochwasserhydrologischen Parametern des untersuchten Einzugsgebietes zu beobachten sind, wurden jedoch bei den Auswertungen unter Anwendung der Extremwertstatistik nicht berücksichtigt. Für weiterführende Auswertungen scheint es aber sinnvoll, diese Veränderungen zu berücksichtigen. Allenfalls könnten hierzu Trendbereinigung (z.B. WASY 2005) oder Ansätze mit instationärer Extremwertverteilung (z.B. PETROW ET AL. 2008) verwendet werden.
- > Unter Einsatz von **HAKESCH** und der **Methode Schaffner** (SCHAFFNER 2007) konnten plausible Hochwasserabschätzungen für die **kleinen Teileinzugsgebiete** durchgeführt und die räumliche Information zu den hochwasserhydrologischen Verhältnissen im Gesamteinzugsgebiet Kander-Hondrich wesentlich erweitert werden (vgl. Kapitel 14). Es wurde ersichtlich, dass mit der Methode Schaffner mit geringem zeitlichem Aufwand ein erster Überblick über die Hochwasserverhältnisse im Einzugsgebiet erstellt werden konnte. Es empfiehlt sich jedoch, neben der in der Methode vorgesehenen Validierung der Resultate, bei sehr kleinen sowie bei grösseren Einzugsgebieten eine weitere Methode anzuwenden und die Resultate kritisch miteinander zu vergleichen.
- > Anhand der flächendeckend **modellierten Abflussprozesskarten** von STUCKI (2009) gelang es, die hochwasserhydrologischen Verhältnisse für das Gesamteinzugsgebiet räumlich weiter aufzulösen. Allerdings bedürfen die erstellten Abflussprozesskarten vor einer weiteren Verwendung einer ausführlichen und vertieften, räumlich differenzierten **Validierung** anhand von Felderhebungen. Ansätze zur Durchführung von geeigneten Felduntersuchungen sind z.B. BEYELER (2009), SPIESS (2009) oder CADUFF (2010) zu entnehmen. Eine Optimierung der Qualität der Modellierungen ist zudem mit der Verfügbarkeit von räumlich höher aufgelösten Bodenkarten verbunden (vgl. SCHMOCKER ET AL. 2007). In einem weiteren Schritt sollte aber auch die Eignung weiterer Ansätze zur Modellierung von bodenhydrologisch relevanten Kenngrössen und Prozessen (z.B. Bodentiefe: TESFA ET AL. 2009 oder Abflusskonzentration: TARBOTON 1997) überprüft werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Plausibilisierung der modellierten Abflussprozesskarten von STUCKI (2009) besteht auch in einem vertieften, quantitativen Vergleich mit den Hochwasserabschätzungen für die kleinen Teileinzugsgebiete, welche von ZGRAGGEN (2009) erstellt wurden. Diese Gegenüberstellung der modellierten Abflussprozesse mit den hydrologischen Abschätzungen, welche insbesondere auch unter Einbezug der Starkniederschlagsverhältnisse im Einzugsgebiet durchgeführt werden müsste, wurde in der vorliegenden Arbeit nur qualitativ vorgenommen.

Da der **verwendete Ansatz** zur Modellierung der Abflussprozesse eine interessante Möglichkeit darstellt, die flächendeckende und räumlich hoch aufgelöste Bestimmung der vorherrschenden Abflussverhältnisse zu automatisieren, sollte die Methode weiterverfolgt und optimiert werden. Der Einsatz von zuverlässigen Abflussprozesskarten bietet sich auch für

weitere Anwendungen an, so z.B. für die Bestimmung der Abflusskoeffizienten, welche bei verschiedenen Ansätzen der Hochwasserabschätzung eine zentrale Bedeutung haben (z.B. HAKESCH) oder für die Bestimmung und räumliche Differenzierung der freien Modellparameter hydrologischer Modelle wie z.B. PREVAH.

- > Daneben bietet der Einsatz eines hydrologischen Modells (z.B. PREVAH, VIVROLI ET AL. 2007) die Möglichkeit, mittels extremen Niederschlagsszenarien die für ein Einzugsgebiet möglichen, **extremen Hochwasserabflüsse** zu bestimmen (vgl. z.B. SCHWANBECK ET AL. 2008). Mit den Arbeiten von WEHREN & WEINGARTNER (2008) für die Engstlige-Frutigen (vgl. Anhang E) wurde ein erstes Teileinzugsgebiet der Kander mit dieser Methode untersucht. Die Modellierung weiterer Teileinzugsgebiete mit diesem Ansatz würde wertvolle Erkenntnisse zur räumlichen Differenzierung des Potentials für extreme Hochwasserabflüsse im Untersuchungsgebiet liefern.

### 24.3 Hydrologische Modellierung mit PREVAH

Aus den Resultaten der durchgeführten Untersuchungen geht hervor, dass sich das hydrologische Modellsystem in vielen Aspekten gut bewährt hat. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit gemachten Erfahrungen zeigen, dass das Modell sowohl für Anwendungen auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen als auch für die Bearbeitung verschiedenster Fragestellungen **erfolgreich eingesetzt** werden konnte. Dies wurde auch dadurch ermöglicht, dass zahlreiche Werkzeuge und Methoden für den Einsatz des Modellsystems in alpinen Einzugsgebieten verfügbar sind und eine breite Erfahrung in der Anwendung vorliegt (vgl. Kapitel 6.1).

Die durchgeführten **Validierungen** zeigen, dass auch mit einem stark reduzierten Umfang an Eingabedaten – sowohl bezüglich der Anzahl verwendeter Stationen als auch bezüglich meteorologischer Parameter – sehr gute Modellierungsqualität erzielt werden kann. Wie aus den hydrologischen Modellierungen mit langen meteorologischen Datenreihen ersichtlich wird (vgl. Kapitel 11), gilt dies sowohl auf räumlicher Ebene des Gesamteinzugsgebietes als auch auf derjenigen der mesoskaligen Teileinzugsgebiete. Auch mit diesem Ansatz gelang es, die raum-zeitliche Information zu den hochwasserhydrologischen Verhältnissen im Einzugsgebiet Kander-Hondrich wesentlich zu erweitern.

Mit Hilfe des gewählten **Verfahrens zur Modellkalibrierung**, welches für die Bestimmung der freien Modellparameter eingesetzt wurde und eine Kombination aus drei bestehenden Methoden darstellt, konnte für jedes Einzugsgebiet ein Modell entwickelt werden, welches die hochwasserhydrologischen Verhältnisse in guter Qualität wiedergibt. Es hat sich erwiesen, dass die Kombination verschiedener Kalibrierungsmethoden sinnvoll ist, da bei den kalibrierten Teileinzugsgebieten unterschiedliche Methoden zu den besten Resultaten geführt haben.

Für das hydrologische Modellsystem PREVAH lassen sich verschiedene Ansatzpunkte erkennen, welche die Nachbildung der hydrologischen Prozesse weiter optimieren könnten:

- > Wie Kapitel 6 entnommen werden kann, werden die **freien Modellparameter** bei der Kalibrierung des hydrologischen Modellsystems global für das ganze Einzugsgebiet bzw. für jedes Hydrotop bestimmt. Die von STUCKI (2009) bereitgestellten Abflussprozesskarten könnten dazu verwendet werden, die freien Modellparameter räumlich zu differenzieren. Dadurch könnte die Modellierungsqualität allenfalls verbessert werden – insbesondere bei alpinen Einzugsgebieten, bei welchen die räumliche Variabilität der Abflussprozesse auf

Grund der kleinräumig heterogenen topographischen und pedologischen Verhältnisse sehr hoch sein kann.

- > Allenfalls könnte das Modell auch im Bereich des «**Flood routing**» verbessert werden, welches zurzeit erst stark vereinfacht und anhand einer Transferfunktion berücksichtigt wird. Zu prüfen sind insbesondere Ansätze, welche auch in bestehenden hydrologischen Modellen erfolgreich eingesetzt werden (z.B. SCHULLA 1997, BREMICKER 2000).
- > Besonders in Hinblick auf die hydrologische Modellierung langer Abflussreihen bzw. zur Untersuchung der kontinuierlichen Veränderung hydrologischer Grössen z.B. unter dem Einfluss der Klimaänderung müsste PREVAH auf Grund der herausragenden Bedeutung des Gletschers für die Hydrologie alpiner Einzugsgebiete, mit einem **dynamischen Gletschermodell** erweitert werden.

Obschon also verschiedene Ansatzpunkte bestehen, das hydrologische Modellsystem PREVAH in der Nachbildung der hydrologischen Prozesse sowie in der Modellstruktur zu optimieren, sollten auf Grund der im Rahmen der vorliegenden Arbeit erzielten guten Modellierungsergebnisse weitere Anpassungen sorgfältig geprüft werden. Dies insbesondere deshalb, weil eine erhöhte Modellkomplexität nicht unbedingt zu einer verbesserten Modellierungsqualität führen muss (vgl. BEVEN 1989, GRAYSON & BLÖSCHL 2000).

## 24.4 Untersuchung der Klimaänderung

Unter Anwendung der Modellkaskade Wettergenerator-hydrologisches Modell gelang es, sowohl die aktuellen wie auch die hydrologischen Verhältnisse der letzten Jahrzehnte im Einzugsgebiet Kander-Hondrich in guter Qualität nachzubilden.

Damit wurde es möglich, die für die Alpennordseite der Schweiz vorliegenden saisonalen Klimaszenarien in einem räumlich-zeitlichen Downscaling auf tägliche Abflussmittelwerte des Einzugsgebietes Kander-Hondrich anzuwenden.

Der **Einsatz des Wettergenerators** ist sowohl mit Vor- als auch mit Nachteilen verbunden. Der Vorteil der Anwendung des Wettergenerators liegt darin, dass unterschiedliche Szenarien bzw. Klimadaten relativ einfach erstellt werden können. Dadurch ist die Methode auch gut für die Anwendung bei Sensitivitätsanalysen geeignet, da die angestrebten Veränderungen einfach implementiert und umgesetzt werden können.

Als Nachteil der Methode muss erwähnt werden, dass bei Anwendung des Wettergenerators davon ausgegangen wird, dass die aus den Messdaten abgeleiteten Gesetzmässigkeiten an und zwischen den Stationen auch in Zukunft erhalten bleiben und unter dem Einfluss der Klimaänderung unverändert gültig sein werden. Zudem führt der stochastische Ansatz, welcher dem Wettergenerator zu Grunde liegt, zu einem grossen Rechenaufwand, welcher sich bei der Modellierung der hydrologischen Szenarien besonders deutlich niederschlägt.

Aus den Anwendungen des Wettergenerators im Rahmen der vorliegenden Arbeit lassen sich die folgenden Empfehlungen für nachfolgende Untersuchungen ableiten:

- > Auf Grund der guten Modellierungsergebnisse, welche unter Einsatz der entwickelten Modellkaskade erzielt werden konnten, bietet es sich an, diesen Ansatz auch **für weitere mesoskalige Einzugsgebiete** in anderen Regionen einzusetzen. Daraus könnten die Reaktionsweise von Einzugsgebieten mit unterschiedlichen Gebietseigenschaften auf die Klima-



änderung abgeschätzt sowie die entsprechenden Auswirkungen quantifiziert und miteinander verglichen werden. Weiter könnte auch ein Methodenvergleich zu anderen Ansätzen, welche zur hydrologischen Modellierung der Auswirkungen der Klimaänderung verwendet werden (vgl. z.B. KÖPLIN, IN VORBEREITUNG), wertvolle Erkenntnisse zum Einsatz und zur Weiterentwicklung der Modellkaskade aber auch zu den räumlich differenzierten hydrologischen Auswirkungen der Klimaänderung ergeben.

- > Die für wenige Jahre geeichten Modelle der Modellkaskade (Wettergenerator: 10 Jahre; hydrologisches Modell: 4 Jahre) ergaben auch für die Langzeitsimulation (1933-2004) und unter dem Einsatz von wenigen meteorologischen Messstationen gute Resultate. Für einzelne Jahre lässt sich jedoch beobachten, dass die extremen Abflussverhältnisse (z.B. Hochwasser im Jahr 2005) nicht mit allen Versionen der Modellkaskade in hinreichender Genauigkeit nachgebildet werden (vgl. Kapitel 19). Allenfalls könnte mit dem Einsatz einer anderen Verteilungsfunktion für die Beschreibung der Starkniederschlagsverhältnisse eine Verbesserung dieser Situation erzielt werden (z.B. gemischte Exponentialverteilung) (vgl. WILKS 2009). Eine andere Möglichkeit zur **Optimierung der Modellierungsqualität** besteht darin, dass die Parameter des Wettergenerators bzw. des hydrologischen Modells für einen anderen oder längeren Zeitraum, welcher extreme Starkniederschläge enthält (z.B. 1998 bis 2007) (vgl. MERZ ET AL. 2009), bestimmt werden.
- > Mit dem gewählten methodischen Ansatz des Wettergenerators konnten die Auswirkungen der Klimaänderung auf unterschiedlichste Parameter im Mittel- wie auch im Hochwasserbereich quantitativ bestimmt werden. Allerdings wurde auf eine quantitative Angabe der zu erwartenden Veränderungen bei den hydrologischen Prozessen, welche den untersuchten Kennwerten teilweise zu Grunde liegen, verzichtet (z.B. Veränderungen der Schneespeicherung oder der Bodenfeuchtigkeit). Daneben wären auch Angaben zur **räumlichen Differenzierung** der hydrologischen Veränderungen unter dem Einfluss der Klimaänderung von vorrangigem Interesse. Da diese Angaben durch das verwendete Modell grundsätzlich nachgebildet und ausgegeben werden können, würden weitere Auswertungen der verschiedenen Modellausgaben zu einem wertvollen und vertieften Prozessverständnis der erwarteten hydrologischen Auswirkungen beitragen und die Einflüsse auf andere wasserwirtschaftliche oder touristische Nutzungen aufzeigen (vgl. BLÖSCHL & MONTANARI 2010).
- > Zur vertieften Untersuchung der Auswirkungen auf die hochwasserhydrologischen Verhältnisse bietet es sich zudem an, **weitere Klimaparameter** (Niederschlagsintensität, Anzahl Niederschlagstage) gezielt zu variieren und deren Einfluss auf die Hochwasserabflüsse zu analysieren. Weitere Untersuchungen zu diesen Einflussgrößen sind auch deshalb interessant, weil aus der Analyse der gemessenen Niederschlagsdaten für das Untersuchungsgebiet ein deutlicher Trend zu intensiveren Starkniederschlagsverhältnissen beobachtet werden konnte (vgl. Kapitel 8). Da die Entwicklung der extremen Niederschlagsereignisse bis ins Jahr 2050 heute noch sehr unsicher ist, stellen Sensitivitätsanalysen zu Auswirkungen auf die Hochwasserabflüsse gerade in diesem Bereich eine interessante Möglichkeit dar.
- > Bei weiterführenden Auswertungen empfiehlt es sich zudem, die **Anzahl** der durchgeführten **Modellsimulationen** auf die untersuchte Zielgröße abzustimmen. Wie aus der Validierung in Kapitel 19.4 ersichtlich wird, ist eine grössere Anzahl an Simulationen in erster Linie für die Auswertung von hochwasserhydrologischen Kenngrößen notwendig. Zudem ist darauf zu achten, dass die laufend erweiterten Erkenntnisse bezüglich der zu erwartenden

**Klimaszenarien** sowie zum aktuellen Zustand bzw. zur Entwicklung des **Gletschervolumens** berücksichtigt werden (vgl. z.B. APPENZELLER ET AL. 2010 oder FARINOTTI ET AL. 2009).

Daneben sollte angestrebt werden, dass der **Wettergenerator** so erweitert wird, dass die Modellierungen auch in stündlicher Auflösung durchgeführt werden können, damit die Auswirkungen der Klimaänderung auf die hydrologischen Kenngrößen auf dieser zeitlichen Skala direkt bestimmt werden können.

# Quellenverzeichnis



- AdaptAlp (2009): Report of the expert hearing «Design Events/Impact of Climate Change», 24. April 2009. WP4: Water Regime. Adaptation to climate change in the Alpine space. Verfügbar unter: [www.adaptalp.org](http://www.adaptalp.org) [14.09.2010]
- Adrian H. & Schuler P. (1977): Die Geologie des Amtes Frutigen. In: Das Frutigbuch. Heimatkunde für die Landschaft Frutigen. Verlag Paul Haupt. Bern. 750 S.
- Aebischer H. (1997): Räumlich-zeitliche Analyse der Rhein-Hochwasser im 20. Jahrhundert. Diplomarbeit. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Ajami N.K., Duan Q., Gao X. & Sorooshian S. (2006): Multimodel combination techniques for analysis of hydrological simulations: Application to distributed model intercomparison project results. *Journal of Hydrometeorology*. Vol. 7, Iss. 4: 755-768.
- Al-Abed N.A. & Whiteley H.R. (2002): Calibration of the Hydrological Simulation Program Fortran (HSPF) model using automatic calibration and geographical information systems. *Hydrological Processes*. Vol. 16, Iss. 16: 3169-3188.
- Alexander L.V., Uotila P. & Nicholls N. (2009): Influence of sea surface temperature variability on global temperature and precipitation extremes. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 114: D18116. 13 p.
- Allamano P., Claps P. & Laio F. (2009): Global warming increases flood risk in mountainous areas. *Geophysical Research Letters*. Vol. 36, L24404: 1-5.
- Amacher A. (2006): Dynamische Berner – Faktoren für die frühe Elektrifizierung der Berner Alpenbahngesellschaft Bern-Lötschberg-Simplon (BLS) unter besonderer Berücksichtigung der Bernischen Kraftwerke AG (BKW), 1902-1914. Lizentiatsarbeit. Historisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Andrews D. (1972): Plots of high-dimensional data. *Biometrics*. Vol. 28: 125-136.
- Appenzeller C., Ceppi P., Fischer A., Scherrer S., Frei C., Weigel A., Begert M., Maspoli M. & Liniger M. (2010): Better climate information for a better future. Vortrag am 11th Swiss Global Change Day. 20. April 2010. Bern.
- Arnell N. (1996): Global warming, river flows and water resources. John Wiley & Sons. Chichester.
- Aschwanden H. (1996): Einzugsgebietskenngrößen der hydrologischen Untersuchungsgebiete der Schweiz. *Hydrologische Mitteilungen*. Nr. 23. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Landeshydrologie und -geologie. Bern.
- Aschwanden H. & Spreafico M. (1995): Hochwasserabflüsse – Analyse langer Messreihen. In: BAFU: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 5.6. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Aschwanden H. & Weingartner R. (1985): Die Abflussregimes der Schweiz. Publikation *Gewässerkunde*. Nr. 65. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Bader S. & Bantle H. (2004): Das Schweizer Klima im Trend. Temperatur- und Niederschlagsentwicklung 1864-2001. Veröffentlichung der *MeteoSchweiz*. Nr. 68. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie. Zürich.
- Badoux A. (1999): Untersuchung zur flächendifferenzierten Modellierung von Abfluss und Schmelze in teilvergletscherten Einzugsgebieten. Diplomarbeit. Geographisches Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Zürich.
- Baer H. (1959): L'extrémité occidentale du massive de l'Aar. *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Neuenburg*. Neuenburg.
- BAFU (2009a): Mehrwert naturnaher Wasserläufe. Untersuchung zur Zahlungsbereitschaft mit besonderer Berücksichtigung der Erschliessung für den Langsamverkehr. *Umwelt-Wissen* Nr. 0912. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- BAFU (2009b): [www.hydrodaten.admin.ch](http://www.hydrodaten.admin.ch) [14.09.2010]
- BAFU, swisstopo (1992-2010): *Hydrologischer Atlas der Schweiz*. 1. bis 9. Lieferung. Bundesamt für Umwelt, Bundesamt für Landestopographie. Bern, Wabern.

- BAFU, WSL (2007): Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1: Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Umwelt-Wissen Nr. 0707. Bundesamt für Umwelt, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Bern, Birmensdorf.
- BAFU, WSL (2008): Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2: Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Umwelt-Wissen Nr. 0825. Bundesamt für Umwelt, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Bern, Birmensdorf.
- Bahrenberg G., Giese E. & Nipper J. (1999): Statistische Methoden in der Geographie. Band 1: Univariate und bivariate Statistik. B.G. Teubner. Stuttgart, Leipzig.
- Baker D., Escher-Vetter H., Moser H., Oerter H. & Reinwarth O. (1982): A glacier discharge model based on results from field studies of energy balance, water storage and flow. In: Glen J.W. (ed.): Hydrological aspects of alpine and high-mountain areas. Proceedings of the Exeter Symposium. July 1982. IAHS Publications. Vol. 138: 103-112. International Association of Hydrological Sciences. Birmingham.
- Baker V.R., Kochel R.C. & Patton P.C. (1988): Flood geomorphology. John Wiley & Sons. Chichester. 503 S.
- Bárdossy A. & Das T. (2008): Influence of rainfall observation network on model calibration and application. Hydrology and Earth System Sciences. Vol 12: 77-89.
- Barben M. (2003): Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in mesoskaligen Einzugsgebieten. Dissertation. Geographica Bernensia. G71. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Barry R.G. (2008): Mountain weather and climate. Cambridge University Press. Cambridge. 506 S.
- Bauder A., Marty C. & Nötzli J. (2008): Kryosphäre in den Schweizer Alpen. Schnee, Gletscher und Permafrost 2005/06 und 2006/07. Die Alpen. Vol. 84, Iss. 9: 47-56.
- Baumann P., Forster F., Gerber W., Kienholz H., Lehmann C., Rickenmann D. & Rickli C. (1992): Naturgefahren: Gefahrenbeurteilung, Landschaftsveränderung. Kursunterlagen des Weiterbildungs-Kurses 1992 im Berner Oberland. Forstliche Arbeitsgruppe Naturgefahren (FAN). Birmensdorf.
- Baumgartner A. & Liebscher H.-J. (1996): Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie. Lehrbuch der Hydrologie. Band 1. Gebrüder Bornträger. Berlin, Stuttgart. 694 S.
- Baumgartner M., Dévanthéry D. & Kummer M. (2007): Wasserentnahmen und -rückgaben. In: BAFU: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 5.10. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Bavay M., Lehning M., Jonas T. & Löwe H. (2009): Simulations of future snow cover and discharge in Alpine headwater catchments. Hydrological Processes. Vol. 23: 95-108.
- Beck P. (1929): Vorläufige Mitteilung über die Bergstürze und den Murgang im Kandertal. *Eclogae Geologicae Helvetiae*. Vol. 22: 155-158.
- Beck P. (1952): Neue Erkenntnisse über die Bergstürze im Kandertal. *Eclogae Geologicae Helvetiae*. Vol. 45: 277-280.
- Becker A. (1992): Methodische Aspekte der Regionalisierung. In: DFC: Regionalisierung hydrologischer Parameter. VCH, Weinheim, 16-33.
- Becker A. & Nemeč J. (1987): Macroscale hydrologic models in support to climate research. In: Solomon S. I., Beran M. & Hoog W. (eds.): The influence of climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources. IAHS Publication. Vol. 168. Wallingford. p. 431-445.
- Begert M., Schlegel T. & Kirchofer W. (2005): Homogenous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. *International Journal of Climatology*. Vol. 25: 65-80.
- Begert M., Seiz G., Schlegel T., Musa M. & Baudraz G. (2003): Homogenisierung von Klimamessreihen der Schweiz und Bestimmung der Normwerte 1961-1990. Schlussbericht des Projekts NORM90. Veröffentlichungen der MeteoSchweiz. Nr. 67. Zürich.
- Benito G., Lang M., Barriendos M., Llasat C.M., Francés F., Ouarda T., Thorndycraft V.R, Enzel Y., Bardossy A., Coeur D. & Bobées B. (2004): Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation. Review of scientific methods. *Natural Hazards*. Vol. 31: 623-643.

- Bergström S. (1976): Development and Application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI reports in hydrology and oceanography. Vol. 7. Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI). Norrköping.
- Bergström S. (1992): The HBV model – its structure and applications. SMHI reports RH. No. 4. Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI). Norrköping.
- Bergström S. (1995): The HBV model. In: Singh V.P. (ed.): Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications. Highlands Ranch. 443-476.
- Beven K. (1989): Changing ideas in hydrology: The case of physically based models. *Journal of Hydrology*. Vol. 105: 157-172.
- Beven K.J. (1993): Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in Water Resources*. Vol. 16: 41-51.
- Beven K.J. & Binley A.M. (1992): The future of distributed models: model calibration and uncertainty in prediction. *Hydrological Processes*. Vol. 6: 279-298.
- Beyeler M. (2009): Untersuchung der hydrologischen Prozesse des Waldbodens mittels Beregnungsversuchen in Kandergrund. Diplomarbeit. Publikation Gewässerkunde. Nr. 435. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- BFS (2004a): Bodeneignungskarte der Schweiz. Massstab 1:200'000. GEOSTAT. Bundesamt für Statistik. Neuchâtel.
- BFS (2004b): Bodennutzung der Schweiz. Arealstatistik 1992/97. Rasterdaten, Auflösung: 100 m x 100 m. GEOSTAT. Bundesamt für Statistik. Neuchâtel.
- BFS (2004c): Vereinfachte Geotechnische Karte der Schweiz. Massstab 1:200'000. GEOSTAT. Bundesamt für Statistik. Neuchâtel.
- Binley A.M., Beven K.J., Calver A. & Watts L.G. (1991): Changing responses in hydrology: Assessing the uncertainty in physically based model predictions. *Water Resources Research*. Vol. 27, Iss. 6: 1253-1261.
- Birsan M.-V., Molnar P., Burlando P. & Pfaundler M. (2005): Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology*. Vol. 314: 312-329.
- Bitterli T., Aviolat P., Brändli R., Christe R., Fracheboud S., Frey D., George M., Matousek F., Tripet J.-P. (2004): Grundwasservorkommen. In: BAFU: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel. 8.6. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Blöschl G. (2001): Scaling in hydrology. *Hydrological Processes*. Vol. 15: 709-711.
- Blöschl G. (2005): Rainfall-runoff modeling of ungauged catchments. In: Anderson M.G. (ed.): *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Chapter 133. John Wiley & Sons. Chichester.
- Blöschl G. & Montanari A. (2010): Climate change impacts – throwing the dice? *Hydrological Processes*. Vol. 24: 374-381.
- BLT (1991): Digitales Höhenmodell RIMINI. Rasterdaten, Auflösung: 100 m x 100 m. Bundesamt für Landestopographie. Wabern.
- Böhm R., Godina R., Nachtnebel H.P., Pirker O. (Hrsg.) (2008): Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV). Wien.
- Bolliger H.J. (2009): Persönliche Mitteilung von Hansjürg Bolliger (AWA, Kanton Bern) vom 3. August 2009.
- Bosshard T., Ewen T., Kotlarski S. & Schär C. (2009): The annual cycle of the climate change signal – An improved method for use in impact studies. *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 11. EGU2009-7095.
- Braun L. (1985): Simulation of snowmelt-runoff in lowland and lower Alpine regions of Switzerland. *Zürcher Geographische Schriften*. Vol. 21. Geographisches Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Zürich.
- Breinlinger R. (1996): Hydrogeographische Raumgliederung der Schweiz und ihre Bedeutung für die Hydrologie. Dissertation. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.

- Breinlinger R., Gamma P., Weingartner R. (1992): Kenngrößen kleiner Einzugsgebiete. In: BAFU: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 1.2. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Bremicker M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie. Band 11. Institut für Hydrologie. Universität Freiburg i.Br.
- Bridges T.C. & Haan C.T. (1972): Reliability of precipitation probabilities estimated from the gamma distribution. *Monthly Weather Review*. Vol. 100: 607-611.
- Brunetti M., Maugeri M. & Nanni T. (2001a): Changes in total precipitation, rainy days and extreme events in northeastern Italy. *International Journal of Climatology*. Vol 21: 861-871.
- Brunetti M., Colacino M., Maugeri M. & Nanni T. (2001b): Trends in the daily intensity of precipitation in Italy from 1951 to 1996. *International Journal of Climatology*. Vol 21: 299-316.
- Buishand T.A. (1982): Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*. Vol. 58: 11-27.
- Burn D.H. (1997): Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *Journal of Hydrology*. Vol 202: 212-230.
- Burton A., Kilsby C.G., Fowler H.J., Cowpertwait P.S.P. & O'Connell P.E. (2008): RainSim: A spatial-temporal stochastic rainfall modelling system. *Environmental Modelling & Software*. Vol. 23: 1356-1369.
- Bütschi D. (2008): Gefürchtet, gebändigt und neu gedacht – die Kander. Die Geschichte eines Flusses und «seiner» Menschen (1800-1950). Lizentiatsarbeit. Historisches Institut der Universität Bern. Bern.
- BUWAL (2002): StorMe. Version 2.0. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- BWG (2001): Hochwasserschutz an Fließgewässern. Wegleitungen des BWG. Bundesamt für Wasser und Geologie. Bern.
- BWG (2002): Hochwasser 2000. Ereignisanalyse, Fallbeispiele. Berichte des BWG. Serie Wasser. Nr. 2. Bundesamt für Wasser und Geologie. Bern.
- BWW, LHG (1991): Ursachenanalyse der Hochwasser 1987. Ergebnisse der Untersuchungen. Bundesamt für Wasserwirtschaft, Landeshydrologie und -geologie. Bern.
- Caduff U. (2010): Charakterisierung der Fließwege im Weide- und Waldboden durch Infiltrationsmessungen und Färbversuche in Innerrüteni, Kandergrund. Masterarbeit. Publikation Gewässerkunde. Nr. 447. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Chambers J.M., Cleveland W.S., Kleiner B. & Tukey P.A. (1983): Graphical methods for data analysis. The Wadsworth statistics/probability series. Wadsworth international group & Duxbury press. Belmont (California), Boston.
- Chow V.T. (1964): Handbook of Applied Hydrology. McGraw-Hill Book Company.
- Christensen J.H. & Christensen O.B. (2007): A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change*. Vol. 81: 7-30.
- Christensen J.H., Carter T.R., Rummukainen M. & Amanatidis G. (2007): Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Climatic Change*. Vol. 81: 1-6.
- Coles S. (2001): An introduction to the statistical modelling of extreme values. Springer. London.
- Corti M. (2003): Untersuchungen zur flächendifferenzierten hydrologischen Modellierung des Einzugsgebietes der Aare unter Verwendung des PREVAH und zu seiner effizienten Kalibrierung. Diplomarbeit. Institut für Atmosphäre und Klima der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Zürich.
- Courvoisier H.W. (1998): Statistik der 24-stündigen Starkniederschläge der Schweiz 1901-1996. Arbeitsbericht. Nr. 194. Schweizerische Meteorologische Anstalt. Zürich.
- Criss R.E. & Winston W.E. (2008): Do Nash values have value? Discussion and alternate proposals. *Hydrological Processes*. Vol. 22: 2723-2725.
- Dähler M., Perreten D. & Wenger H. (2004): Erosion an der Kander. Zustand, Defizite, Massnahmen. Diplomarbeit. Berner Fachhochschule für Architektur, Bau und Holz. Burgdorf, Biel.



- de Montmollin A. (1993): Comparaison de différentes méthodes de calcul de la température journalière dans leurs influences sur les longues séries d'observations. Dissertation. Philosophische Fakultät II der Universität Zürich. Zürich.
- DEZA, ARE (2004): Die Nachhaltige Entwicklung in der Schweiz: Methodische Grundlagen. Direktion für Entwicklung und Zusammenarbeit, Bundesamt für Raumentwicklung. Bern. Verfügbar unter: [www.aren.admin.ch](http://www.aren.admin.ch) [14.09.2010]
- Diezig R. & Kan C. (2010): Hochwasserabflüsse – statistische Kennwerte (1971-2007). In: BAFU: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel. 5.12. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Dobmann J. (2009): Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten der Schweiz. Interpretations- und Praxishilfe. Dissertation. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Doherty J. (2004): PEST – Model-Independent Parameter Estimation. User manual, fifth edition. Watermark Numerical Computing. Brisbane. Verfügbar unter: [www.sspa.com](http://www.sspa.com) [14.09.2010]
- Doherty J. & Johnston J.M. (2003): Methodologies for calibration and predictive analysis of a watershed model. *Journal of the American Water Resources Association*. Vol. 39, Iss. 2: 251-265.
- Draper N.R. & Smith M. (1998): Applied regression analysis. John Wiley & Sons. Chichester.
- Duan Q., Gupta H.V., Sorooshian S., Rousseau A.N. & Turcotte R. (2003): Calibration of Watershed Models. Water Science and Application Series. Vol. 6. American Geophysical Union. Washington.
- Düster H. (1994): Modellierung der räumlichen Variabilität seltener Hochwasser in der Schweiz. Dissertation. *Geographica Bernensia*. G44. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- DVWK (1983): Niedrigwasseranalyse. Teil 1: Statistische Untersuchung des Niedrigwasser-Abflusses. DVWK-Regeln 120. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. Verlag Paul Parey. Hamburg und Berlin.
- DVWK (1992): Niedrigwasseranalyse. Teil 2: Statistische Untersuchung der Unterschreitungsdauer und des Abflussdefizits. DVWK-Regeln 121. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. Verlag Paul Parey. Hamburg und Berlin.
- DVWK (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. DVWK-Merkblatt 251. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. Verlag Paul Parey. Hamburg und Berlin.
- DWA (2008): Erschliessung und Einbeziehung historischer Informationen für die Ermittlung extremer Hochwasserabflüsse. Fallbeispiele und Empfehlungen. DWA-Themen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Hennef. Deutschland. 90 S.
- Dyck S. (1980a): Angewandte Hydrologie. Teil 1: Berechnung und Regelung des Durchflusses der Flüsse. VEB Verlag für Bauwesen. Berlin.
- Dyck S. (1980b): Angewandte Hydrologie. Teil 2: Der Wasserhaushalt der Flussgebiete. VEB Verlag für Bauwesen. Berlin.
- Eawag (2006): Hochwasserschutz und Revitalisierung – Neue Wege für unsere Flüsse. *Eawag News*. Vol. 61. Verfügbar unter: [www.eawag.ch](http://www.eawag.ch) [14.09.2010]
- Eckhardt K. (2002): Vergleich zweier Verfahren zur automatischen Modellkalibrierung. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*. Vol. 46, Iss. 2: 69-73.
- Egli M., Häfliger S. & Achermann M. (2004): Modellierung von Bodenkarten: Ansätze zur Verbesserung der bestehenden Grundlagen. *BGS Bulletin*, Vol. 27: 45-48.
- Ekström M., Fowler H.J., Kilsby C.G. & Jones P.D. (2005): New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. Part 2: Future estimates and use in impact studies. *Journal of Hydrology*. Vol. 300: 234-251.
- Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M. & Trimble P.J. (2001): The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophysical Research Letters*. Vol. 28: 2077-2080. Daten verfügbar unter: [www.esrl.noaa.gov](http://www.esrl.noaa.gov) [14.09.2010]

- Engel B.A. (1996): Methodologies for development of hydrological response units based on terrain, land cover and soil data. In: Goodchild M.F. (ed.): GIS and environmental modeling: progress and research issues. p 123-128. GIS World Books. Fort Collins.
- ESRI (2008): ArcGIS 9.2: Model Builder. Environmental Systems Research Institute. New York.
- Faeh A.O. (1997): Understanding the processes of discharge formation under extreme precipitation – A study based on the numerical simulation of hillslope experiments. Mitteilung Nr. 150. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich. Zürich.
- Farinotti D., Huss M., Bauder A. & Funk M. (2009): An estimate of the glacier ice volume in the Swiss Alps. *Global and Planetary Change*. Vol. 68, Iss. 3: 225-231.
- Federer C.A., Vörösmarty C. & Fekete B. (1996): Intercomparison of methods for calculating potential evaporation in regional and global water balance models. *Water Resources Research*. Vol. 32, Iss. 7: 2315-2321.
- Federer G. (2008): Persönliche Mitteilung von Guido Federer (Emch+Berger AG, Bern) vom 18. September 2008.
- Federer G. & Weingartner R. (2006): Hochwasserfrachten in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten. *Wasser, Energie, Luft*. 98. Jahrgang, Heft 3: 255-260.
- Flügel W.-A. (1997): Combining GIS with regional hydrological modelling using hydrologic response units (HRUs): An application from Germany. *Mathematics and Computers in Simulation*. Vol. 43: 297-304.
- Fowler H.J., Ekström M., Blenkinsop S. & Smith A.P. (2007): Estimating change in extreme European precipitation using a multimodel ensemble. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 112, D18104: 20 p.
- Frei C. (2005): Die Klimazukunft der Schweiz – Eine probabilistische Projektion. Verfügbar unter: [www.occc.ch](http://www.occc.ch) [14.09.2010]
- Frei C. (2009): Statistische Auswertung in der Hydrologie. Extremwertanalyse. Unveröffentlichtes Skript zur gleichnamigen Vorlesung. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Frei C., Schöll R., Fukutome S., Schmidli J. & Vidale P.L. (2006): Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 111: D06105.
- Frei E., Vökt U., Flückiger R., Brunner H. & Schai F. (1980). Bodeneignungskarte der Schweiz, Massstab 1:200'000. Grundlagen für die Raumplanung. Bundesämter für Raumplanung, Landwirtschaft und Forstwesen. Bern.
- Fuchs M. (2005): Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hydrologie verschiedener Regionen in Österreich. Dissertation. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau. Universität für Bodenkultur Wien. Wien.
- Furrer H. (1938): Geologische Untersuchungen in der Wildstrubelgruppe. *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Bern*. Bern.
- Furrer E.M. & Katz R.W. (2008): Improving the simulation of extreme precipitation events by stochastic weather generators. *Water Resources Research*. Vol. 44, W12439: 1-13.
- Gallagher M. & Doherty J. (2007): Parameter estimation and uncertainty analysis for a watershed model. *Environmental Modelling & Software*. Vol. 22: 1000-1020.
- Gammeter T. (2008): Niederschlagsverhältnisse im Kandertal. Deskriptive und extremwertstatistische Auswertungen zum Niederschlag im Berner Oberland und zum Abflussgeschehen der Kander. Diplomarbeit. *Publikation Gewässerkunde*. Nr. 436. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Gardiner V. & Gregory K. J. (1982): Drainage density in rainfall-runoff modelling. In: Singh V.P. (ed.): *Rainfall-runoff relationships*. p. 449-476. Water Resources Publications. Littleton, Colorado.
- Garen D.C. & Marks D. (2001): Spatial fields of meteorological input data including forest canopy corrections for an energy budget snow simulation model. In: Dolman A.J., Hall A.J., Kawas M.L., Oki T. & Pomeroy J.W. (eds.): *Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Schemes and Large Scale Hydrological Models*. IAHS Publication. Vol. 270: 349-353. International Association of Hydrological Sciences. Wallingford.

- Gees A. (1997): Analyse historischer und seltener Hochwasser in der Schweiz. Bedeutung für das Bemessungshochwasser. Dissertation. Geographica Bernensia. G53. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Geiger H., Zeller J. & Röthlisberger G. (1991): Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes: Intensitäten und Häufigkeiten. Grundlagen – Einführung, Methoden, Spezialstudien. Band 7. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Birmensdorf.
- Geiger H., Röthlisberger G., Stehli A. & Zeller J. (1992): Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901–1970. In: BAFU: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 2.4. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Giamboni M. (2008): SilvaProtect-CH. Projektdokumentation. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Glaser R. (2008): Klimageschichte Mitteleuropas. 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt. 264 S.
- Gobiet A. & Truhetz H. (2008): Klimamodelle, Klimaszenarien und ihre Bedeutung für Österreich. In: Böhm R., Godina R., Nachtnebel H.P., Pirker O. (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV).
- Goegebeur M. & Pauwels V.R.N. (2007): Improvement of the PEST parameter estimation algorithm through Extended Kalman Filtering. *Journal of Hydrology*. Vol. 337: 436-451.
- Goodess C.M. (2003): Statistical and regional dynamical downscaling of extremes for European regions: STARDEX. EGG5. Iss. 6. Verfügbar unter: [www.the-eggs.org/articles.php](http://www.the-eggs.org/articles.php) [14.09.2010]
- Goovaerts P. (1997): Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford University Press. New York.
- Govender M. & Everson C.S. (2005): Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model. *Hydrological Processes*. Vol. 19, Iss. 3: 683-692.
- Grayson R. & Blöschl G. (2000): Summary of pattern comparison and concluding remarks. In: Grayson R. & Blöschl G. (eds.): Spatial patterns in catchment hydrology: Observations and modelling. Chapter 14. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Green J.I. & Nelson E.J. (2002): Calculation of time of concentration for hydrologic design and analysis using geographic information system vector objects. *Journal of Hydroinformatics*. Vol. 4: 75-81.
- Gregory K.J. & Walling D.E. (1968): The variation of erainage density within a catchment. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 13, Iss. 2: 61-68.
- Griffies S.M. & Bryan K. (1997): Predictability of North Atlantic multidecadal climate variability. *Science*. Vol. 275: 181-184.
- Groisman P.Y., Karl T.R., Easterling D.R., Knight R.W., Jamason P.F., Hennessy K.J., Suppiah R., Page C.M., Wibig J., Fortuniak K., Razuvaev V.N., Douglas A., Førland E. & Zhai P.-M. (1999): Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change. *Climatic change*. Vol. 42, Iss. 1: 243-283.
- Gupta H.V., Beven K.J. & Wagener T. (2005): Model calibration and uncertainty estimation. In: Anderson M.G. (ed.): *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Chapter 131. John Wiley & Sons. Chichester.
- Gurtz J. (1988): Beitrag zu den hydrologischen Grundlagen für die Gewährleistung der gesellschaftlichen notwendigen Mehrfachnutzung der Wasserressourcen. Technische Universität Dresden. Dresden.
- Gurtz J., Baltensweiler A. & Lang H. (1999): Spatially distributed hydrotope-based modelling of evapotranspiration and runoff in mountainous basins. *Hydrological Processes*. Vol. 13: 2751-2768.
- Gurtz J., Baltensweiler A., Lang H., Menzel L. & Schulla J. (1997): Auswirkungen von klimatischen Variationen auf Wasserhaushalt und Abfluss im Flussgebiet des Rheins. Schlussbericht NFP 31. vdf-Hochschulverlag. Zürich.
- Gutknecht D. (2007): Extreme Abflussereignisse: Dokumentation – Bedeutung – Bestimmungsmethoden. Wiener Mitteilungen. Wasser, Abwasser, Gewässer. Band 206. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie. Technische Universität Wien. Wien.

- Gutknecht D., Blöschl G., Reszler C. & Heindl H. (2006): Ein «Mehr-Standbeine»-Ansatz zur Ermittlung von Bemessungshochwässern kleiner Auftretenswahrscheinlichkeit. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. 58. Jahrgang, Heft 3-4: 44-50.
- Gyalistras D. (2008): Stochastic weather generation for hydrological studies in the Kander catchment, Switzerland. Verfügbar unter: [www.climate-impacts.ch/Kander2050/](http://www.climate-impacts.ch/Kander2050/) [14.09.2010]
- Gyalistras D. & Fischlin A. (1999): Towards a general method to construct regional climatic scenarios for model-based impacts assessments. Petermanns Geographische Mitteilungen. Vol. 143, Iss. 4: 251-264.
- Gyalistras D., Fischlin A. & Riedo M. (1997): Herleitung stündlicher Wetterszenarien unter zukünftigen Klimabedingungen. In: Fuhrer J. (Hrsg.): Klimaänderung und Grünland – eine Modellstudie über die Auswirkungen einer Klimaänderung auf das Dauergrünland in der Schweiz. Projektschlussbericht im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes «Klimaänderung und Naturkatastrophen», NFP 31. vdf Hochschulverlag AG. Zürich.
- Hächler S. (1991): Hochwasserereignisse im schweizerischen Alpenraum seit dem Spätmittelalter. Raumzeitliche Rekonstruktion und gesellschaftliche Reaktion. Lizentiatsarbeit. Historisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Hächler S. & Pfister C. (1991): Überschwemmungskatastrophen im Schweizer Alpenraum seit dem Spätmittelalter. Raumzeitliche Rekonstruktion von Schadensmustern auf der Basis historischer Quellen. In: Glaser R. & Walsh R. (Hrsg.): Historische Klimatologie in verschiedenen Klimazonen. Würzburger Geographische Arbeiten. Heft 80: 127-146. Würzburg.
- Haerberli W., Noetzi J., Zemp M., Baumann S., Frauenfelder R. & Hoelzle M. (Hrsg.) (2005a): Glacier mass balance bulletin. Bull. 8 (2002– 2003). World Glacier Monitoring Service. Zürich.
- Haerberli W., Zemp M., Frauenfelder R., Hoelzle M. & Käab A. (Hrsg.) (2005b): Fluctuations of glaciers 1995–2000. Vol. VIII. World Glacier Monitoring Service (WGMS). Zürich.
- Haerter J.O., Berg P. & Hagemann S. (2010): Heavy rain intensity distributions on varying time scales and at different temperatures. Journal of Geophysical Research. Vol. 115: D17102. 7 p. doi: 10.1029/2009JD013384.
- Hamon W.R. (1961): Estimating potential evapotranspiration. Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Vol. 87: 107-120.
- Hänggi P. & Plattner C. (2007): Projekt Klimaänderung und Wasserkraftnutzung. Schlussbericht der Vorstudie. Geographisches Institut der Universität Bern, Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung. Bern, Davos. Verfügbar unter: [www.netzwerkwasser.ch](http://www.netzwerkwasser.ch) [14.09.2010]
- Hasler M. & Egli H.R. (2004): Geografie – Wissen und verstehen. hep-Verlag. Bern.
- Hasselmann K. (1990): How well can we predict the climate crisis? In: Siebert H. (ed.): Conference on environmental scarcity – the international dimension. 5th to 6th July 1990. Symposien- und Konferenzbände des Instituts für Weltwirtschaft. Universität Kiel. Tübingen.
- Hebenstreit K. (2000): Auswirkungen der Klimaänderungen auf die Hydrologie alpiner Einzugsgebiete. Wiener Mitteilungen. Wasser, Abwasser, Gewässer. Band 160. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau. Technische Universität Wien. Wien.
- Hegg C. & Forster F. (2002): A suggestion for the estimation of peak flood discharges in small torrential catchments. In: Spreafico M. & Weingartner R. (eds.): Proceedings of the International Conference on Flood Estimation (March 6-8, 2002 in Berne, Switzerland). CHR-Report II-17. International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin (CHR/KHR): 489-498.
- Hegg C. & Vogt S. (2005): Häufigkeiten und Trends von Starkniederschlägen in der Schweiz im Zeitraum 1864-2002. Wasser, Energie, Luft. 97. Jahrgang, Heft 7/8: 209-212.
- Helbling A., Kan C. & Marti P. (2007): Niedrigwasser – kleinste Mehrtagesmittel des Abflusses. In: BAFU: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 5.11. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Hock R. (1999): A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation. Journal of Glaciology. Vol. 45, Iss. 149: 101-111.

- Hock R. (2003): Evaluation and recent developments in temperature index melt modelling in mountain regions. *Journal of Hydrology*. Vol. 282: 104-115.
- Hock R. & Nötzli C. (1997): Areal melt and discharge modelling of Storglaciären, Sweden. *Annals of Glaciology*. Vol. 24: 211-217.
- Holzmann H., Lehmann Th., Formayer H. & Haas P. (2010): Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf Hochwasser und Wasserhaushaltskomponenten ausgewählter Einzugsgebiete in Österreich. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*. Vol. 62, Iss. 1-2: 7-14.
- Hörsch B. (2001): Zusammenhang zwischen Vegetation und Relief in alpinen Einzugsgebieten des Wallis (Schweiz). Ein multiskaliger GIS- und Fernerkundungsansatz. Dissertation. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. Bonn.
- Horritt M.S. & Bates P.D. (2001): Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. *Journal of Hydrology*. Vol 253: 239-249.
- Horton P., Schaefli B., Mezghani A., Hingray B. & Musy A. (2005): Prediction of climate change impacts on alpine discharge regimes under A2 and B2 SRES emission scenarios for two future time periods. Bundesamt für Energie (BFE). Bern. Verfügbar unter: [www.ewg-bfe.ch](http://www.ewg-bfe.ch) [14.09.2010]
- Horton P., Schaefli B., Mezghani A., Hingray B. & Musy A. (2006): Assessment of climate-change impacts on alpine discharge regimes with climate model uncertainty. *Hydrological Processes*. Vol. 20: 2091-2109.
- Horton R.E. (1945): Erosional development of streams and their drainage basins – Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*. Vol. 56: 275-370.
- Hubacher R. & Schädler B. (2010): Wasserhaushalt grosser Einzugsgebiete. In: BAFU: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel. 6.6. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Hügli A. (2002): «Die Schlange im eigenen Busen nähren»: die Korrektur der Aare zwischen Thun und Bern im 19. Jahrhundert. Diplomarbeit. Historisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Hügli A. (2007): Aarewasser. 500 Jahre Hochwasserschutz zwischen Thun und Bern. hep-Verlag. Bern. 175 S.
- Huss M., Farinotti D., Bauder A. & Funk M. (2008): Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. *Hydrological Processes*. Vol. 22, Iss. 19: 3888-3902.
- HZP (2004): Geschiebehaushalt Kander. Projektübergreifende Gesamtbetrachtung zum Geschiebehaushalt und der morphologischen Entwicklung der Kander zwischen Kandersteg und der Mündung in den Thunersee. Hunziker, Zarn und Partner AG. Technischer Bericht im Auftrag des Tiefbauamtes sowie des Amtes für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern. Verfügbar unter: [www.kanderwasser.ch](http://www.kanderwasser.ch) [14.09.2010]
- IPCC (2007): Summary for policymakers. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M. & Miller H.L. (Hrsg.): *Climate Change 2007 – The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge & New York.
- IRKA, IRR (2005): Entwicklungskonzept Alpenrhein. Kurzbericht. Internationale Regierungskommission Alpenrhein, Internationale Rheinregulierung. Verfügbar unter: [www.alpenrhein.net](http://www.alpenrhein.net) [14.09.2010]
- Jacobeit J., Glaser R., Luterbacher J. & Wanner H. (2003): Links between flood events in central Europe since AD 1500 and large-scale atmospheric circulation modes. *Geophysical Research Letters*. Vol. 30, Iss. 4, 1172: 1-4.
- Jäggi M. (1996): Engstlige-Frutigen. Gutachten zu flussbaulichen Fragen betreffend die Erosionstendenz in der Engstlige in Frutigen und den Zusammenhang mit Kiesentnahmen. Unveröffentlichter Bericht. Ebmattingen.
- Jain S.K. & Sudheer K.P. (2008): Fitting of hydrologic models: A close look at the Nash–Sutcliffe Index. *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 13, Iss. 10: 981-986.
- Jasper K., Calanca P., Gyalistras D. & Fuhrer J. (2004): Differential impacts of climate change on the hydrology of two alpine river basins. *Climate Research*. Vol. 26: 113-129.

- Jaun S., Ahrens B., Walser A., Ewen T. & Schär C. (2008): A probabilistic view on the August 2005 floods in the upper Rhine catchment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Vol. 8: 281-291.
- Jensen H., Lang H. & Rinderknecht J. (1997): Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901–1970. In: BAFU: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 2.4<sup>2</sup>. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Joos F. & Stocker T. (2008): Physikalische Grundlagen zur Klimaänderung. In: OcCC (Hrsg.): Das Klima ändert – was nun? Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz. *Organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC)*. Bern.
- Jud D. (2009): Eigendynamische Flussaufweitungen der Kander im Gebiet Heustrich Süd. Unveröffentlichte Masterarbeit. Laboratoire de constructions hydrauliques. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Lausanne.
- Junker B. & Buchecker M. (2008): Sozialverträgliche Flussrevitalisierungen. Ein Leitfaden. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Birmensdorf.
- Kämtz L.W. (1831): Lehrbuch der Meteorologie. Gebauersche Buchhandlung. Halle.
- Kan C. (2002): Hydrometrische Netze. In: BAFU: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 5.1<sup>2</sup>. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Kendall M.G. (1970): Rank correlation methods – Theory and application of rank order statistics. 4<sup>th</sup> edition. Griffin. London.
- Kern (2009): HydroPro. Hydrologische Datenmanagement-Software. Kern AG. Bern.
- Kheir R.B., Bøcher P.K., Greve M.B. & Greve M.H. (2010): The application of GIS based decision-tree models for generating the spatial distribution of hydromorphic organic landscapes in relation to digital terrain data. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 14: 847-857.
- Kienholz H., Keller H.-M., Ammann W., Weingartner R., Germann P.F., Hegg C., Mani P., Rickenbach D. (1998): Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. Nationales Forschungsprogramm «Klimaänderungen und Naturkatastrophen» (NFP 31). Schlussbericht. vdf-Hochschulverlag an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Zürich.
- Kilsby C.G., Jones P.D., Burton A., Ford A.C., Fowler H.J., Harpham C., James P., Smith A. & Wilby R.L. (2007): A daily weather generator for use in climate change studies. *Environmental Modelling & Software*. Vol. 22: 1705-1719.
- Kirchhofer W. & Sevruk B. (1992): Mittlere jährliche korrigierte Niederschlagshöhen 1951-1980. In: BAFU: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 2.2. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Kirkby M.J. (1978): Hillslope Hydrology. John Wiley & Sons. Chichester, New York. 389 S.
- Kirnbauer R. (1981): Zur Ermittlung von Bemessungshochwässern im Wasserbau. Wiener Mitteilungen. Wasser, Abwasser, Gewässer. Band 42. Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft. Technische Universität Wien. Wien.
- Kirnbauer R., Haas P., Chiffard P., Tilch N., Zillgens B., Johst M., Steidl R. & Gutknecht D. (2008): Hochwasserentstehung in der nördlichen Grauwackenzone: Beobachtung, Messung, Modellierung. Wiener Mitteilungen. Wasser, Abwasser, Gewässer. Band 213. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie. Technische Universität Wien. Wien.
- Kirshner S. (2005): Modeling of multivariate time series using Hidden Markov Models. Dissertation. University of California. Irvine. USA.
- Klauser H. (2004): Hochwasserrelevante Darstellung von mesoskaligen Einzugsgebieten in der Schweiz. Entwicklung der Software HQx\_meso\_CH-visual. Diplomarbeit. Publikation Gewässerkunde. Nr. 307. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Kleeberg H.-B. & Schumann A.H. (2001): Ableitung von Bemessungsabflüssen kleiner Überschreitungswahrscheinlichkeiten. *Wasserwirtschaft*. Jahrgang 91, Heft 2: 90-95.
- Kleinn J. (2002): Climate change and runoff statistics in the Rhine basin: a process study with a coupled climate-runoff model. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Nr. 14663. Zürich.

- Kleinn J., Frei C., Gurtz J., Lüthi D., Vidale P.L. & Schär C. (2005): Hydrologic simulations in the Rhine basin driven by a regional climate model. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 110, D04102. 18 p.
- Klemeš V. (2000a): Tall tales about tails of hydrological distributions. Part I. *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 5, Iss. 3: 227:231.
- Klemeš V. (2000b): Tall tales about tails of hydrological distributions. Part II. *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 5, Iss. 3: 232:237.
- Klingl T. (1996): GIS-gestützte Generierung synthetischer Bodenkarten und landschaftsökologische Bewertung der Risiken von Bodenwasser- und Bodenverlusten. Dissertation. *Geographica Bernensia*. G50. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland – Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Deutscher Wetterdienst. KLIWA-Berichte. Heft 9. Mannheim.
- Klok E.J., Jasper K., Roelofsma K. P., Gurtz J. & Badoux A. (2001): Distributed hydrological modelling of a heavily glaciated Alpine river basin. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 46, Iss. 4: 553-570.
- Koblet R. (1995): Entwicklung der Korrekturen an Fliessgewässern und Seen. In: BAFU: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 5.5. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Koboltschnig G.R. & Schoener W. (2010): The relevance of glacier melt in the water cycle of the Alps: an example from Austria. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. Vol. 7: 2897-2913.
- Koboltschnig G.R., Schoener W., Zappa M. & Holzmann H. (2007): Contribution of glacier melt to stream runoff: if the climatically extreme summer of 2003 had happened in 1979. *Annals of Glaciology* 46: 303-308.
- Koehler G. (1976): Niederschlag-Abfluss-Modelle für kleine Einzugsgebiete. Schriftenreihe des Kuratoriums für Wasser- und Kulturbauwesen. Heft 25. Verlag Paul Parey. Hamburg, Berlin.
- KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. Ein Standortpapier der Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband (KOHS). *Wasser, Energie, Luft*. 99. Jahrgang, Heft 1: 55-57.
- Kölla E. (1986): Zur Abschätzung von Hochwassern in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessung. Eine Untersuchung über Zusammenhänge zwischen Gebietsparametern und Spitzenabflüssen kleiner Einzugsgebiete. Mitteilung Nr. 87. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich. Zürich.
- König S. (2005): Die Hochwasser der Aare im 19. Jahrhundert zwischen Thunersee und Bielersee. Seminararbeit. Historisches Institut der Universität Bern.
- Konzelmann T., Wehren B. & Weingartner R. (2007): Niederschlagsmessnetze. In: BAFU: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 2.1<sup>2</sup>. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Köplin N. (in Vorbereitung): Climate Change in der Schweiz – Hydrologie (CCHydro). Wasserhaushalt und Hochwasserverhalten sensibler Bilanzierungsgebiete. Dissertation in Vorbereitung. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Köppen W. (1888): Über die Ableitung wahrer Tagesmittel aus den Beobachtungsstunden 8h a.m., 2h p.m. und 8h p.m. *Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie*. 341-354.
- Krause P., Boyle D.P. & Bäse F. (2005): Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*. Vol. 5: 89-97.
- Künzi R., Hunzinger L. & Jahne D. (2005): Gesamtprojekt Augand – Umsetzung der flussbaulichen Massnahmen. *Wasser, Energie, Luft*. 97. Jahrgang, Heft 9/10: 279-284.
- Lamb R. (1999): Calibration of a conceptual rainfall-runoff model for flood frequency estimation by continuous simulation. *Water Resources Research*. Vol. 35, Iss. 10: 3103-3114.
- LANAT, TBA (2009): Neues schaffen auf altem Grund. Das Gewässerentwicklungskonzept für die Kander dokumentiert Fachwissen und Bürgersicht. Publikumsbroschüre. Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern, Tiefbauamt des Kantons Bern. Verfügbar unter: [www.kanderwasser.ch](http://www.kanderwasser.ch) [14.09.2010]

- Lang H. (1985): Höhenabhängigkeit der Niederschläge. In: Der Niederschlag in der Schweiz. Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie. Nr. 25. S. 63-68. Bern.
- Leander R. & Buishand T.A. (2009): A daily weather generator based on a two-stage resampling algorithm. *Journal of Hydrology*. Vol. 374: 185-195.
- Legates D.R. & McCabe G.J. Jr. (1999): Evaluating the use of «goodness-of-fit» measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*. Vol. 35, Iss. 1: 233-241.
- Leisi C. (2009): Revitalisierung von Fließgewässern im Spannungsfeld gesellschaftlicher Interessen. *Wasser, Energie, Luft*. 101. Jahrgang, Heft 2: 121-125.
- Lenderink G. & van Meijgaard E. (2008): Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience*. Vol 1: 511-514.
- Löhmannsröben R. (2000): Die Bedeutung des Bodens im Zusammenhang mit der hydrologischen Regionalisierung. *Wiener Mitteilungen. Wasser, Abwasser, Gewässer*. Band 164: Niederschlag-Abfluss Modellierung – Simulation und Prognose. Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft. Technische Universität Wien. Wien.
- Lu J., Sun G., McNulty S.G. & Amatya D.M. (2005): A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States. *Journal of the American Water Resources Association*. Vol. 41, Iss. 3: 621-633.
- Luhmann N. (1990): Risiko und Gefahr. Aulavorträge Nr. 48. Hochschule St. Gallen für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. St. Gallen.
- Madsen H., Wilson G. & Ammentorp H.C. (2002): Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*. Vol. 261: 48-59.
- Magnin O. (1990): Délimitation de bassins versants dans la chaîne du Jura et définition d'indices hydrogéologiques. Rapport intern du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel. Neuchâtel.
- Maniak U. (2005): *Hydrologie und Wasserwirtschaft – Eine Einführung für Ingenieure*. Springer. Berlin, Heidelberg.
- Mann H.B. (1945): Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. Vol. 13: 245-259.
- Margot A., Sigg R., Schädler B. & Weingartner R. (1992): Beeinflussung der Fließgewässer durch Kraftwerke (>= 300 kW) und Seeregulierungen. In: BAFU: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 5.3. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Margoum M., Oberlin G., Lang M., Weingartner R. (1994): Estimation des crues rares et extrêmes: principes du modèle AGREGEE. *Hydrologie Continentale*. Vol. 9, Iss. 1: 85-100.
- Margreth M., Naef F. & Kienzler P. (2008): Why do steep alpine catchments often react delayed to heavy rainfall? *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 10. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-09907.
- McCabe G.J. & Wolock D.M. (2002): Trends and temperature sensitivity of moisture conditions in the conterminous United States. *Climate Research*. Vol. 20: 19-29.
- McCuen R.H. (2005): *Hydrologic analysis and design*. Pearson, Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey.
- Mendel H.G. (1993): Verteilungsfunktionen in der Hydrologie. Bericht II-8. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (CHR/KHR). Lelystad.
- Menzel L. (1997): Modellierung der Evapotranspiration im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. *Zürcher geographische Schriften*. Vol. 67. Geographisches Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Zürich.
- Menzel L., Lang H. & Rohmann M. (1999): Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhen 1973-1992. In: BAFU: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 4.1. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Merz R. (2002): Understanding and estimating flood probabilities at the regional scale. Dissertation. *Wiener Mitteilungen. Wasser, Abwasser, Gewässer*. Band 181. Technische Universität Wien. Wien.
- Merz R. & Blöschl G. (2004): Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*. Vol. 287: 95-123.



- Merz R. & Blöschl G. (2008): Flood frequency hydrology. Temporal, spatial, and causal expansion of information. *Water Resources Research*. Vol. 44: W08432. doi:10.1029/2007WR006744.
- Merz R. & Blöschl G. (2009): Process controls on the statistical flood moments – a data based analysis. *Hydrological Processes*. Vol. 23: 675-696.
- Merz R., Blöschl G. & Parajka J. (2006): Raum-zeitliche Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*. 50. Jahrgang, Heft 1: 2-11.
- Merz R., Parajka J. & Blöschl G. (2009): Scale effects in conceptual hydrological modelling. *Water Resources Research*. Vol. 45, W09405. doi: 10.1029/2009WR007872.
- MeteoSchweiz (2005): SwissMetNet. Das neue meteorologische Messnetz der MeteoSchweiz. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz). Zürich. Verfügbar unter: [www.meteoschweiz.ch](http://www.meteoschweiz.ch) [14.09.2010]
- Mezghani A. & Hingray B. (2009): A combined downscaling-disaggregation weather generator for stochastic generation of multisite hourly weather variables over complex terrain: Development and multi-scale validation for the Upper Rhone River basin. *Journal of Hydrology*. Vol. 377: 245-260.
- Miegel K. & Büttner U. (2003): Zum Einfluss der Datenverfügbarkeit und von extremen Ereignissen auf das Ergebnis hochwasserstatistischer Analysen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*. Jahrgang 47, Heft 3: 94-102.
- Mitchell J.F.B., Manabe S., Meleshko V. & Tolioka T. (1990): Equilibrium climate change and its implications for the future. In: Houghton J.T., Jenkins G.J., Ephraums J.J. (eds): *Climate change: The IPCC scientific assessment*. Cambridge University Press. New York.
- Monteith J.L. (1965): Evaporation and the environment. The state and movement of water in living organisms. *Symposium of the Society of Experimental Biologists*. Vol. 19: 205-234.
- Monteith J.L. (1975): *Vegetation and the atmosphere*. Vol. 1: Principles. Academic Press. London.
- Monteith J.L. (1981): Evaporation and surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Vol. 107: 1-27.
- Müller C., Hellebrand H., Seeger M. & Schobel S. (2009): Identification and regionalization of dominant runoff processes – a GIS-based and a statistical approach. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 13: 779-792.
- Müller R. (1943): Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauung. Mitteilung Nr. 4 der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH Zürich. Zürich.
- Müller W. & Wagner T. (2005): Raum für die Kander. *Wasser, Energie, Luft*. 97. Jahrgang, Heft 9/10: 285-288.
- Murphy J.M. (2000): Predictions of climate change over Europe using statistical and dynamical downscaling techniques. *International Journal of Climatology*. Vol. 20: 489-501.
- Murphy J.M., Booth B.B.B., Collins M., Harris G.R., Sexton D.M.H. & Webb M.J. (2007): A methodology for probabilistic predictions of regional climate change from perturbed physics ensembles. *Philosophical Transactions of the Royal Society. Series A*. Vol. 365: 1993-2028.
- Naef F., Scherrer S. & Zurbrügg C. (1999): Grosse Hochwasser – unterschiedliche Reaktionen von Einzugsgebieten auf Starkregen. In: BAFU: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*. Tafel 5.7. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Naef F., Margreth M., Schmocker-Fackel P. & Scherrer S. (2007): Automatisch hergeleitete Abflussprozesskarten – ein neues Werkzeug zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. *Wasser, Energie, Luft*. 99. Jahrgang, Heft 3: 267-272.
- Naef F., Schmocker-Fackel P., Margreth M., Kienzler P. & Scherrer S. (2008): Die Häufung der Hochwasser der letzten Jahre. In: BAFU (ed.): *Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen*.
- Nash J.E. & Sutcliffe J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. Vol. 10: 282-290.

- Nemec, J. (1993): Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation of the dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales. Bericht II-7. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (CHR/KHR). Lelystad.
- Nichols N. & Murray W. (1999): Workshop in indices and indicators for climate extremes: Asheville, NC, USA, 3-6 June 1997. Breakout Group B: Precipitation. Climatic Change. Vol. 42: 23-29.
- NSI (2005a): Feuchtgebiete des Kantons Bern. FEUGEB. Massstab 1:5'000. Naturschutzinspektorat des Kantons Bern. Bern.
- NSI (2005b): Trockenstandorte des Kantons Bern. TROSTA. Massstab 1:10'000. Naturschutzinspektorat des Kantons Bern. Bern.
- OcCC (2008): Das Klima ändert – was nun? Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz. Organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC). Bern.
- OcCC, ProClim (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC), Forum für Klima und Global Change (ProClim). Bern.
- Oudin L., Michel C. & Anctil F. (2005a): Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 1 – Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? Journal of Hydrology. Vol. 303: 275-289.
- Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andréassian V., Anctil F. & Loumagne C. (2005b): Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 – Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. Journal of Hydrology. Vol. 303: 290-306.
- Pallard B., Castellarin A. & Montanari A. (2009): A look at the links between drainage density and flood statistics. Hydrology and Earth System Sciences. Vol. 13: 1019-1029.
- Penman H.L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Meteorological Society. Serie A. Vol. 193: 120-145.
- Penman H.L. (1956): Estimating evaporation. Transactions of the American Geophysical Union. Vol. 37: 43-46.
- Perl M., Häberli C., Grüter E., Musa M., Küng U. & Abbt M. (2009): Werkzeuge für die Qualitätskontrolle und die Bearbeitung von meteorologischen Daten. MeteoSchweiz. Zürich. Verfügbar unter: [www.meteoschweiz.ch](http://www.meteoschweiz.ch) [14.09.2010]
- Peschke G., Kleeberg H. & Mauser W. (1998): Hydrologie und Regionalisierung. Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992-1998). DFG-Schwerpunktprogramm. Institut für Geoinformatik. Universität Münster. Münster.
- Petrascheck A. (2003): Hochwasser. In: OcCC (Hrsg.): Extremereignisse und Klimaänderung. Organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC). Bern.
- Petrow T. & Merz B. (2009): Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951-2002. Journal of Hydrology. Vol. 371: 129-141.
- Petrow T., Delgado J.M.M. & Merz B. (2008): Trends der Hochwassergefährdung in Deutschland (1951-2002) und Konsequenzen für die Bemessung. Wasserwirtschaft. Vol. 98, Iss.11: 24-28.
- Pfister C. (1999): Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen 1496-1995. Haupt Verlag. Bern.
- Pfister C. (2009): Die «Katastrophenlücke» des 20. Jahrhunderts und der Verlust des traditionellen Risikobewusstseins. GAIA. Vol. 18, Iss. 3: 239-246.
- Pilon P.J. & Yue S. (2002): Detecting climate-related trends in streamflow data. Water Science and Technology. Vol. 45, Iss. 8: 89-104.
- Potter K.W. & Walker J.F. (1985): An empirical study of flood measurement error. Water Resources Research. Vol. 21, No. 3: 403-406.

- Rebetez M. & Reinhard M. (2007): Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004. *Theoretical and Applied Climatology*. Vol. 91, Iss. 1-4: 27-34.
- Reichen V., Nagel-Hari E., Minnig H., von Kanel W., Schertenleib A., Junger U., Adams W., Adams P., Fetzer Weis C., Grossen U., Holzer-Steiner W., Holzer-Steiner M., Loretan S., Ogi-Wüthrich O., Ogi-Wüthrich R., Stoller H. (2001): *The Kandersteg story*. Altels Verlag. Frutigen.
- Requena P. & Minor H.-E. (2008): Wirksamkeit von Flussaufweitungen – Neue Erkenntnisse. *Wasser, Energie, Luft*. 100. Jahrgang, Heft 4: 311-316.
- Rey P. (2004): *Ökologische Aspekte der Gewässerentwicklung Alpenrheinzuflüsse und Bäche im Rheintal*. Internationale Regierungskommission Alpenrhein (IRKA). Thuis. Verfügbar unter: [www.hydra-institute.com](http://www.hydra-institute.com) [14.09.2010]
- Rey P. & Ortlepp J. (2000): *Gesunde Fliessgewässer durch Revitalisierung. Anleitung zu Revitalisierungsmassnahmen an Alpenrheinzufüssen und Bächen im Rheintal*. Internationale Regierungskommission Alpenrhein (IRKA). Thuis. Verfügbar unter: [www.alpenrhein.net](http://www.alpenrhein.net) [14.09.2010]
- Rickli C. & Forster F. (1997): Einfluss verschiedener Standorteigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*. Vol. 148, Iss. 5: 367-385.
- Rind D., Goldberg R., Hansen H., Rosenzweig C. & Ruedy R. (1990): Potential evapotranspiration and the likelihood of future drought. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 95: 9983-10004.
- Rohde S. (2005): *Integrales Gewässermanagement - Erkenntnisse aus dem Rhône-Thur Projekt*. Synthesebericht Gerinneaufweitungen. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Birmensdorf. Verfügbar unter: [www.rivermanagement.ch](http://www.rivermanagement.ch) [14.09.2010]
- R-Project (2009): *The R Project for Statistical Computing*. Frei verfügbare statistische Software. Verfügbar unter: [www.r-project.org](http://www.r-project.org) [14.09.2010]
- Sägesser M. & Weingartner R. (2005): *Veränderung der Hydrologie der Aare, Pegel Brienzwiler, von 1921 bis 2004*. Detaillierter Schlussbericht zum Teilprojekt «Abfluss» im Rahmen des Projektes «Veränderungen im Ökosystem Brienzensee». Publikation Gewässerkunde. Nr. 340. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Schädler B. (2003): *Trockenheit*. In: OcCC (Hrsg.): *Extremereignisse und Klimaänderung*. Organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC). Bern.
- Schädler B. (2007): *Klimaänderung und Wasser in der Schweiz*. Erwartete Auswirkungen für die Wasserwirtschaft bis 2050. *Gas, Wasser, Abwasser*. 87. Jahrgang, Heft 9: 663-669.
- Schädler B. (2008): *Klimawandel*. Geht uns das Wasser aus? *Gas, Wasser, Abwasser*. 88. Jahrgang, Heft 10: 763-769.
- Schädler B. (2010): *Hydrologische Veränderungen und Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft in der Schweiz*. In: ÖWAV (Hrsg.): *Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich*. Präsentation der aktuellen Studien. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband. Wien.
- Schädler B. & Weingartner R. (2002): *Komponenten des natürlichen Wasserhaushaltes 1961-1990*. In: BAFU: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*. Tafel 6.3. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Schädler B., Frei C., Grebner D. & Willi H.P. (2007): *Grundlagen zum Klima*. *Wasser, Energie, Luft*. 99. Jahrgang, Heft 1: 58-60.
- Schaefli B. & Gupta H.V. (2007): Do Nash values have value? *Hydrological Processes*. Vol. 21: 2075-2080.
- Schaefli B., Hingray B. & Musy A. (2007): *Climate change and hydropower production in the Swiss Alps: Quantification of potential impacts and related modelling uncertainties*. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol 11, Iss. 3: 1191-1205.
- Schaffner F. (2007): *Hochwasserabschätzung in Wildbacheinzugsgebieten auf der Grundlage von Einzugsgebietskenngrößen*. Diplomarbeit. Publikation Gewässerkunde Nr. 393. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.

- Schär C., Wernli H. & Frei C. (2003): Methodik regionaler Klimaszenarien. In: OcCC (Hrsg.): Extremereignisse und Klimaänderung. Organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC). Bern.
- Scheidegger D. (2008): Erarbeitung einer hydrologischen Informationsplattform zur Charakterisierung der Abflussverhältnisse des Einzugsgebiets der Kander. Diplomarbeit. Publikation Gewässerkunde Nr. 405. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Scherrer S. (1997): Abflussbildung bei Starkniederschlägen. Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. Mitteilung Nr. 147. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich. Zürich.
- Scherrer S. (2006): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG). Oppenheim.
- Scherrer S. & Naef F. (2003): A decision scheme to identify dominant flow processes at the plot-scale for the evaluation of contributing areas at the catchments-scale. *Hydrological Processes*. Vol. 17, Iss. 2: 391-401.
- Scherrer S., Naef F., Faeh A.O. & Cordery I. (2007): Formation of runoff at the hillslope scale during intense precipitation. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 11: 907-922.
- Schmidli J. & Frei C. (2005): Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. *International Journal of Climatology*. Vol. 25: 753-771.
- Schmidli J., Schmutz C., Frei C., Wanner H. & Schär C. (2002): Mesoscale precipitation variability in the region of the European Alps during the 20th century. *International Journal of Climatology*. Vol. 22: 1049-1074.
- Schmidli J., Goodess C.M., Frei C., Haylock M.R., Hundscha Y., Ribalaygua J. & Schmith T. (2007): Statistical and dynamical downscaling of precipitation: An evaluation and comparison of scenarios for the European Alps. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 112: D04105.
- Schmidt J. & Hewitt A. (2004): Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. *Geoderma*. Vol. 121: 243-256.
- Schmocker-Fackel P. (2004): A method to delineate runoff processes in a catchment and its implications for runoff simulations. Dissertation. Nr. 15638. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich.
- Schmocker-Fackel P. & Naef F. (2010a): More frequent flooding? Changes in flood frequency in Switzerland since 1850. *Journal of Hydrology*. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.09.022.
- Schmocker-Fackel P. & Naef F. (2010b): Changes in flood frequencies in Switzerland since 1500. *Hydrology and Earth System Sciences* Vol. 14: 1581-1594. doi:10.5194/hess-14-1581-2010.
- Schmocker-Fackel P., Naef F. & Scherrer S. (2007): Identifying runoff processes on the plot and catchment scale. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 11: 891-906.
- Schnydrig S. (2007): Vergleich des Abflusses der Kander bei Kandersteg und Hondrich. Auswertung der Abflussdaten von 1917 bis 2005. Seminararbeit. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Schönwiese C.-D. (2006): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. Gebrüder Borntraeger. Berlin, Stuttgart. 302 S.
- Schüepp M. & Gensler G. (1980): Klimaregionen der Schweiz. In: Müller G. (Hrsg.): Die Beobachtungsnetze der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt. Konzept 1980. Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt. Nr. 93. Anhang Ib. Zürich.
- Schuler R. (2007): Erfassung und Analyse der hydrologischen Daten der Kander. Seminararbeit. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Schulla J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Zürcher Geographische Schriften. Vol. 69. Geographisches Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Zürich.
- Schulla J. & Jasper K. (2000): Model description WaSiM-ETH. Institute for Atmospheric and Climate Science, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich.

- Schulte L., Veit H., Burjachs F & Julià R. (2009): Lutschine fan delta response to climate variability and land use in the Bernese Alps during the last 2400 years. *Geomorphology*. Vol. 108, Iss. 1-2: 107-121.
- Schumann A. (2005): Hochwasserstatistische Bewertung des Augusthochwassers 2002 im Einzugsgebiet der Mulde unter Anwendung der saisonalen Statistik. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*. Jahrgang 49, Heft 4: 200-206.
- Schwanbeck J., Viviroli D. & Weingartner R. (2008): Modellbasierte Sensitivitätsanalysen für das Berner Oberland. In: Hegg C. & Bezzola G.-R. (eds.): Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. Bundesamt für Umwelt, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. S. 48-58. Bern, Birmensdorf.
- Schwarze R., Droege W. & Opherden K. (1999): Regional analysis and modelling of groundwater runoff components from catchments in hard rock areas. In: Diekkrüger B., Kirkby M.J., Schröder U. (eds): *Regionalisation in hydrology*. Proceedings of a conference held at Braunschweig. IAHS publication. Vol. 254: 221-232. International Association of Hydrological Sciences. Wallingford.
- Seibert J. (1999): Regionalisation of parameters for a conceptual rainfall-runoff model. *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol. 98-99: 279-293.
- Semenov M.A. & Porter J.R. (1995): Climatic variability and the modeling of crop yields. *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol. 73, Iss. 3/4: 265-283.
- Semenov M.A. & Stratonovitch P. (2010): Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*. Vol. 41: 1-14.
- Sen P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*. Vol. 63: 1379-1389.
- Sevruk B. (1996): Adjustment of tipping-bucket precipitation gauge measurements. *Atmospheric Research*. Vol. 42: 237-246.
- Sevruk B. (1997): Regional dependency of precipitation-altitude relationship in the Swiss Alps. *Climatic Change*. Vol. 36: 355-369.
- Seyhan E. (1976): Calculation of runoff from basin physiography. *Utrechtse geografische studies*. Vol. 2. Geografisch Instituut Rijksuniversiteit. Utrecht. 176 S.
- Shepard D. (1968): A two-dimensional interpolation for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 Association for Computing Machinery (ACM) National Conference*. Vol. 23: 517-524.
- Sibson R. (1981): A brief description of natural neighbor interpolation. In: Barnett V. (ed.): *Interpreting multivariate data*. Proceedings of the conference «Looking at multivariate data» (24-27 March 1980 in Sheffield). John Wiley & Sons. Chichester.
- SigmaPlan (2003): Ökomorphologie der Fliessgewässer im Kanton Bern 1997-2002. SigmaPlan AG. Technischer Bericht im Auftrag des Amtes für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern, Gewässer- und Bodenschutzlabor. Bern.
- Skahill B.E., Baggett J.S., Frankenstein S. & Downer C.W. (2009): More efficient PEST compatible model independent model calibration. *Environmental Modelling & Software*. Vol. 24: 517-529.
- SMA (1901-1997): Ergebnisse der täglichen Niederschlagsmessungen auf den meteorologischen- und Regenmess-Stationen der Schweiz. Schweizerische Meteorologische Anstalt (SMA). Zürich.
- SMA (1998-2008): Niederschlagsbulletin. Schweizerische Meteorologische Anstalt (SMA). Zürich.
- Solomon S., Qin D., Manning M., Alley R.B., Berntsen T., Bindoff N.L., Chen Z., Chidthaisong A., Gregory J.M., Hegerl G.C., Heimann M., Hewitson B., Hoskins B.J., Joos F., Jouzel J., Kattsov V., Lohmann U., Matsuno T., Molina M., Nicholls N., Overpeck J., Raga G., Ramaswamy V., Ren J., Rusticucci M., Somerville R., Stocker T.F., Whetton P., Wood R.A. & Wratt D. (2007): Technical summary. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M. & Miller H.L. (Hrsg.): *Climate change 2007 – The physical science basis*. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge & New York.

- Soom M. (2004): Tektonische und geologische Übersicht. In: HZP: Geschiebehaushalt Kander. Projektübergreifende Gesamtbetrachtung zum Geschiebehaushalt und der morphologischen Entwicklung der Kander zwischen Kandersteg und der Mündung in den Thunersee. Hunziker, Zarn und Partner AG. Technischer Bericht im Auftrag des Tiefbauamtes sowie des Amtes für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern. Verfügbar unter: [www.kanderwasser.ch](http://www.kanderwasser.ch) [14.09.2010]
- Spiess P. (2009): Untersuchung und Regionalisierung der bodenhydrologischen Prozesse in Hälfis, Kandergrund. Masterarbeit. Publikation Gewässerkunde. Nr. 440. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Spreafico M. & Aschwanden H. (1986-1991): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Hydrologische Mitteilungen. Band 1 bis 4. Landeshydrologie und -geologie. Bern.
- Spreafico M. & Weingartner R. (2005): Hydrologie der Schweiz – Ausgewählte Aspekte und Resultate. Berichte des BWG. Serie Wasser. Nr. 7. Bundesamt für Wasser und Geologie. Bern.
- Spreafico M., Weingartner R., Barben M. & Ryser A. (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten – Praxishilfe. Berichte des BWG. Serie Wasser. Nr. 4. Bundesamt für Wasser und Geologie. Bern.
- StAB (1911): Kanderkorrektion 1899-1911. Staatsarchiv des Kantons Bern. Bern.
- StAB (1914a): Gungbachverbauung in Wengi bei Frutigen. Photographien aus den Baujahren 1913/14. Staatsarchiv des Kantons Bern. Bern.
- StAB (1914b): Kanderkorrektion: Marchstein-Engstligen. Photographien aus den Baujahren 1913/14. Staatsarchiv des Kantons Bern. Bern.
- Stephenson D. (1981): Stormwater hydrology and drainage. Developments in Water Science. Vol. 14. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam.
- Stucki P. & Luterbacher J. (2010): Niederschlags-, Temperatur- und Abflussverhältnisse der letzten Jahrhunderte. In: BAFU: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 1.4. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Stucki T. (2009): Beurteilung der Abflussreaktion im Einzugsgebiet der Kander. Ein GIS-basierter Ansatz mit hypothetischen Bodenabflussprozesskarten. Diplomarbeit. Publikation Gewässerkunde. Nr. 436. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Sturm K., Glaser R., Jacobeit J., Deutsch M., Brázdil R., Pfister C., Luterbacher J. & Wanner H. (2001): Hochwasser in Mitteleuropa seit 1500 und ihre Beziehung zur atmosphärischen Zirkulation. Pettermans Geographische Mitteilungen. Vol. 145, Iss. 6: 14-23.
- Sury B. (2006): Anwendung der Software HAKESCH in Wildbacheinzugsgebieten – Evaluation und Empfehlung. Diplomarbeit. Publikation Gewässerkunde. Nr. 362. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Susong D., Marks D. & Garen D.C. (1999): Methods for developing time-series climate surfaces to drive topographically distributed energy- and water-balance models. Hydrological Processes. Vol. 13: 2003-2021.
- swisstopo (1996): Digitales Höhenmodell DHM25\_10. 10-Meter-Matrixmodell. Bundesamt für Landestopographie. Wabern.
- swisstopo (1998a): VECTOR25 Level2. Gewässernetz, Massstab 1:25'000. Bundesamt für Landestopographie. Wabern. DV012391.
- swisstopo (1998b): VECTOR25 Level2. Primärflächen, Massstab 1:25'000. Bundesamt für Landestopographie. Wabern. DV012391.
- swisstopo (2003): DTM-AV2. Hochpräzises digitales Terrainmodell. Bundesamt für Landestopographie. Wabern. DV002380.
- swisstopo (2003b): SIEGFR. Digitalisierte Erstausgabe der Siegfriedkarte der Schweiz (1870-1926). Massstäbe 1:25'000 bzw. 1:50'000. Bundesamt für Landestopographie. Wabern. K614-01-032019.
- swisstopo (2004): SWISSIMAGE. Digitales Farborthophotomosaik der Schweiz. Bundesamt für Landestopographie. Wabern. DV002378/DV002379

- swisstopo (2007): Übersichtskarte der Schweiz. Farbige Reliefkarte. Massstab 1:2 Mio. Bundesamt für Landestopographie. Wabern. Verfügbar unter: [www.swisstopo.admin.ch](http://www.swisstopo.admin.ch) [14.09.2010]
- swisstopo (2008): Geologische und tektonische Karte der Schweiz (GEOK500). Massstab 1:500'000. Bundesamt für Landestopographie. Wabern. GK500-V-003.
- Tallaksen L. & Van Lanen H. (2004): Hydrological drought. Processes and estimation methods for streamflow and groundwater. *Developments in Water Science*. Vol 48. Elsevier. Amsterdam.
- Tarboton D.G. (1997): A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*. Vol. 33, Iss. 2: 309-319.
- Taubmann K.-C. (1986): Ingenieurhydrologische Hochwasserabschätzung. *Wasser, Energie, Luft*. 78. Jahrgang, Heft 10: 277-281.
- TBA (2003): Gewässernetz des Kantons Bern GN5. Massstab 1:5'000. Tiefbauamt des Kantons Bern. Bern.
- TBA (2003-2005): Technische Berichte zu den Naturgefahrenkarten der Gemeinden Adelboden, Frutigen, Kandergrund, Kandersteg, Reichenbach und Wimmis. Tiefbauamt des Kantons Bern, Oberingenieurkreis I. Thun.
- TBA (2006): Lokale lösungsorientierte Ereignisanalyse August 2005 für die Ortschaft Reichenbach. Technischer Bericht. Tiefbauamt des Kantons Bern, Oberingenieurkreis I. Thun.
- TBA (2007): Hydrologie Kander-Kandersteg. Lokale lösungsorientierte Ereignisanalyse August 2005. Technischer Bericht. Tiefbauamt des Kantons Bern, Oberingenieurkreis I. Thun.
- TBA, LANAT (2007): Kander.2050. Ein Fluss braucht neue Ideen. Tiefbauamt des Kantons Bern, Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern. Publikumsbroschüre. Verfügbar unter: [www.kanderwasser.ch](http://www.kanderwasser.ch) [14.09.2010]
- TBA, LANAT (2009): Gesamtprojekt Kander.2050. Gewässerentwicklungskonzept. Technischer Bericht. Tiefbauamt des Kantons Bern, Amt für Landwirtschaft und Natur des Kantons Bern. Verfügbar unter: [www.kanderwasser.ch](http://www.kanderwasser.ch) [14.09.2010]
- Tesfa T.K., Tarboton D.G., Chandler D.G. & McNamara J.P. (2009): Modeling soil depth from topographic and land cover attributes. *Water Resources Research*. Vol. 45: W10438. 16 p.
- Theil H. (1950): A rank invariant method of linear and polynomial regression analysis (Part I, II & III). *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie Wetenschappen*. Series A - Mathematical sciences. Vol. 53: 386-392 (Part I), 521-525 (Part II), 1397-1412 (Part III).
- Tilch N., Uhlenbrook S. & Leibundgut C. (2002): Regionalisierungsverfahren zur Ausweisung von Hydrotopen in von periglazialen Hangschutt geprägten Gebieten. *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie*. Band 7, Heft 4: 206-216.
- Tilch N., Uhlenbrook S., Leibundgut C., Kirnbauer R. & Merz B. (2006): GIS-gestützte Ausweisung von hydrologischen Umsatzräumen und Prozessen im Löhnersbach-Einzugsgebiet (Nördliche Grauwackenzone, Salzburger Land). *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*. Band 10, Heft 9-10: 141-151.
- Twain M. (1880): *A tramp abroad*. American Publishing Company. Hartford. Connecticut.
- Uhlenbrook S. (1999): Untersuchung und Modellierung der Abflussbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet. *Freiburger Schriften zur Hydrologie*. Nr. 10. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i. Br.. Freiburg i. B.
- VAW (1881-2008): Gletscherberichte (1881-2008) – Die Gletscher der Schweizer Alpen. *Jahrbücher der Expertenkommission für Kryosphärenmessnetze der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT)*. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich. Zürich. Verfügbar unter: <http://glaciology.ethz.ch> [14.09.2010]
- Veit H. (2002): *Die Alpen – Geoökologie und Landschaftsentwicklung*. Verlag Eugen Ulmer. Stuttgart.
- Verbunt M., Gurtz J., Jasper K., Lang H., Warmerdam P. & Zappa M. (2003): The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modeling. *Journal of Hydrology*. Vol. 282, Iss. 1: 36-55.

- Verbunt M., Walser A., Gurtz J., Montani A. & Schär C. (2007): Probabilistic flood forecasting with a limited-area ensemble prediction system: Selected case studies. *Journal of Hydrometeorology*. Vol. 8: 897-909.
- Vischer D.L. (2003): Die Geschichte des Hochwasserschutzes in der Schweiz. Von den Anfängen bis ins 19. Jahrhundert. *Berichte des BWG. Serie Wasser*. Nr. 5. Bundesamt für Wasser und Geologie. Bern.
- Viviroli D. (2007): Ein prozessorientiertes Modellsystem zur Ermittlung seltener Hochwasserabflüsse für ungemessene Einzugsgebiete der Schweiz. Weiterentwicklung und Anwendung des hydrologischen Modellsystems PREVAH. Dissertation. *Geographica Bernensia*. G77. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Viviroli D., Gurtz J. & Zappa M. (2007): The hydrological modelling system PREVAH. Part I – Overview and selected applications. *Geographica Bernensia*. P40. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Viviroli D., Weingartner R. & Gurtz J. (2008): Prozessbasierte Hochwasserabschätzung in ungemessenen mesoskaligen Einzugsgebieten der Schweiz. *Langzeitsimulation unter Einsatz des hydrologischen Modellsystems PREVAH*. *Wasser, Energie, Luft*. 100. Jahrgang, Heft 2: 125-130.
- Viviroli D., Mittelbach H., Gurtz J. & Weingartner R. (2009a): Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results. *Journal of Hydrology*. Vol. 377, Iss. 1-2: 208-225.
- Viviroli D., Zappa M., Gurtz J. & Weingartner R. (2009b): An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environmental Modelling & Software*. Vol. 24: 1209-1222.
- Viviroli D., Zappa M., Schwanbeck J., Gurtz J. & Weingartner R. (2009c): Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part I: Modelling framework and calibration results. *Journal of Hydrology*. Vol. 377, Iss. 1-2: 191-207.
- Vogt S. (2001): Zur Abschätzung von Hochwasser in kleinen Wildbacheinzugsgebieten. Diplomarbeit. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Birmensdorf.
- Vogt S. & Forster F. (1999): Hochwasserabschätzung in kleinen Einzugsgebieten. Ein Abschätzverfahren nach Clark zur Bestimmung einer Hochwasser-Bemessungsganglinie. Unveröffentlichter Praktikumsbericht. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Birmensdorf.
- Vogt S., Forster F. & Hegg C. (2002): Clark-WSL – a method for the estimation of flood hydrographs in small torrential catchments. In: Spreafico M. & Weingartner R. (eds.): *Proceedings of the International Conference on Flood Estimation (March 6-8, 2002 in Berne, Switzerland)*. CHR-Report II-17. International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin (CHR/KHR): 739-747.
- von Storch H. (1995): Misuses of statistical analysis in climate research. In: von Storch H., Navarra A. (eds.): *Analysis of climate variability. Applications of statistical techniques*. p 11-26. Springer. Berlin.
- von Storch H. & Zwiers F.W. (2003): *Statistical analysis in climate research*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Vrugt J.A., Diks C.G.H., Gupta H.V., Bouten W. & Verstraten J.M. (2005): Improved treatment of uncertainty in hydrologic modeling: Combining the strengths of global optimization and data assimilation. *Water Resources Research*. Vol. 41: W01017.
- Walther A. (2007): persönliche Mitteilung von Andreas Walther (BKW FMB Energie AG) vom 27. Juni 2007.
- Walther C. (2003): Wasserhaushaltsmodellierung mit BATS und PREVAH im Rietholzbachgebiet und Parameteroptimierung mit der Software PEST. Diplomarbeit. Institut für Klima und Atmosphäre der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Zürich.
- WASY (2005): HQ-EX (Version 3.0). Programm zur Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. Gesellschaft für Wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung. Berlin.
- Watson D. (1992): *Contouring: A guide to the analysis and display of spatial data*. Pergamon Press. London.



- WBG (1989): Gesetz über Gewässerunterhalt und Wasserbau (Wasserbaugesetz, WBG, 14. Februar 1989). Bernische systematische Gesetzessammlung (BSG), 751.11. Verfügbar unter: [www.be.ch/gesetze](http://www.be.ch/gesetze) [14.09.2010]
- Wehren B. (2005): Entwicklung und Anwendung eines hydrologischen Modells des Spissibaches (Leissigen, Berner Oberland) unter Verwendung des Modellsystems PREVAH. Diplomarbeit. Publikation Gewässerkunde. Nr. 331. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Wehren B. & Weingartner R. (2007): Hochwasserabschätzungen für ausgewählte Teileinzugsgebiete der Kander. Technischer Bericht im Rahmen des Projekts Kander.2050 – Teilmodul M1.1 Hydrologie. Verfügbar unter: [www.kanderwasser.ch](http://www.kanderwasser.ch) [14.09.2010]
- Wehren B. & Weingartner R. (2008): Hydrologische Untersuchungen für das Einzugsgebiet der Engstlige bis Frutigen. Hochwasserabschätzung und hydrologische Modellierung ausgewählter Niederschlagszenarien. Technischer Bericht im Rahmen der Überarbeitung der Gefahrenkarte der Gemeinde Frutigen. Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern. Tiefbauamt, Oberingenieurkreis I. Thun.
- Wehren B., Schädler B. & Weingartner R. (2010a): Human interventions. In: Bundi U., Peter A., Robinson C., Schädler B., Truffer B., Vollenweider S., Wehrli B. & Weingartner R. (eds.): *Alpine waters. The handbook of environmental chemistry*. Vol. 6: 71-91. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg.
- Wehren B., Schädler B., Weingartner R. & Viviroli D. (2010b): General characteristics of Alpine waters. In: Bundi U., Peter A., Robinson C., Schädler B., Truffer B., Vollenweider S., Wehrli B. & Weingartner R. (eds.): *Alpine waters. The handbook of environmental chemistry*. Vol. 6: 17-58. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg.
- Weingartner R. (1998): Analyse der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Hochwasser in der Schweiz. Ein Beitrag zur Hochwasserabschätzung. Projektschlussbericht im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes «Klimaänderung und Naturkatastrophen», NFP 31. vdf, Hochschulverlag an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Zürich.
- Weingartner R. (1999): Regionalhydrologische Analysen – Grundlagen und Anwendungen. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz. Nr. 37. Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie. Bern.
- Weingartner R. (2008): Die Schweizer Alpen – unser Wasserschloss für immer und ewig? In: Meili M. (Hrsg.): *EnergieZukunft. Jubiläumspublikation der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich. Beiträge und Essays zur Ressourcenfrage im 21. Jahrhundert*. Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ). Orell Füssli Verlag AG. Zürich.
- Weingartner R. & Aschwanden H. (1992): Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. In: BAFU: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*. Tafel 5.2. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Weingartner R. & Kienholz H. (1994): Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. Konzepte und erste Ergebnisse aus Untersuchungen in den Testgebieten Rotenbach (Schwarzsee) und Spissibach (Leissigen). In: *Beiträge zur Hydrologie der Schweiz*. Nr. 35: S. 120-133. Zürich.
- Weingartner R., Barben M. & Spreafico M. (2003): Floods in mountain areas – an overview based on examples from Switzerland. *Journal of Hydrology*. Vol. 282: 10-24.
- Weiss L.L. (1964): Ratio of true to fixed interval maximum rainfall. *American Society of Civil Engineers. Journal of the Hydraulics Division*. Vol. 90, Iss. 1: 77-82.
- Widmann M. & Schär C. (1997): A principal component and long-term trend analysis of daily precipitation in Switzerland. *International Journal of Climatology*. Vol. 17: 1333-1356.
- Wilby R.L. & Wigley T.M.L. (1997): Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*. Vol. 21, Iss. 4: 530-548.
- Wilcox B.P., Rawls W.J., Brakensiek D.L. & Wight J.R. (1990): Predicting runoff from rangeland catchments: a comparison of two models. *Water Resources Research*. Vol. 26, Iss. 10: 2401-2410.
- Wilks D.S. (2009): A gridded multisite weather generator and synchronization to observed weather data. *Water Resources Research*. Vol. 45, W10419: 1-11.
- Wilks D.S & Wilby R.L. (1999): The weather generation game: A review of stochastic weather models. *Progress in Physical Geography*. Vol. 23, Iss. 3: 329-357.

- Willmot C.J. (1982): Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 63, Iss. 11: 1309-1313.
- Woolhiser D.A. (1992): Modeling daily precipitation-progress and problems. In: Walden A.T. & Guttorp P. (eds.): *Statistics in environmental and earth sciences*. Edward Arnold. London.
- Wüest M., Frei C., Altenhoff A., Hagen M., Litschi M. & Schär C. (2009): A gridded hourly precipitation dataset for Switzerland using rain-gauge analysis and radar-based disaggregation. *International Journal of Climatology*. doi: 10.1002/joc.2025.
- Yevjevich V. (1972): *Probability and Statistics in Hydrology*. Water Resources Publications. Fort Collins, Colorado, USA. 302 p.
- Yu P.-S. & Wang Y.-C. (2009): Impact of climate change on hydrological processes over a basin scale in northern Taiwan. *Hydrological Processes*. Vol. 23: 3556-3568.
- Yue S., Pilon P., Phinney B. & Cavadias G. (2002): The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*. Vol. 16: 1807-1829.
- Zappa M. (1999): *Untersuchungen zur Aufbereitung unterschiedlicher Rauminformationen für die flächendifferenzierte hydrologische Einzugsgebietsmodellierung*. Diplomarbeit. Geographisches Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Zürich.
- Zappa M. (2002): *Multiple-response verification of a distributed hydrological model at different spatial scales*. Dissertation. Nr. 14895. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich.
- Zappa M. & Gurtz J. (2003): Simulation of soil moisture and evapotranspiration in a soil profile during the 1999 MAP-Riviera Campaign. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 7: 903-919.
- Zappa M. & Kan C. (2007): Extreme heat and runoff extremes in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Vol. 7: 375-389.
- Zappa M., Pos F., Strasser U., Warmerdam P. & Gurtz J. (2003): Seasonal water balance of an alpine catchment as evaluated by different methods for spatially distributed snowmelt modelling. *Nordic Hydrology*. Vol. 34: 179-202.
- Zeller J., Geiger H. & Röthlisberger G. (1976-1991): *Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes. Intensitäten und Häufigkeiten der ausgewerteten Periode 1901-1970*. Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen. Birmensdorf.
- Zemp M., Haeberli W., Hoelzle M. & Paul F. (2006): Alpine glaciers to disappear within decades? *Geophysical Research Letters*. Vol. 33. L13504.
- Zemp M., Haeberli W., Hoelzle M., Maisch M. & Paul F. (2007): Europäische Alpen bald ohne Gletscher? *Jahrbuch der Ökologie*, 2008. S. 68-83.
- Zraggen S. (2009): *Hochwasserverhältnisse in kleinen Teileinzugsgebieten der Kander*. Masterarbeit. Publikation *Gewässerkunde*. Nr. 441. Geographisches Institut der Universität Bern. Bern.
- Zierl B. & Bugmann H. (2005): Global change impacts on hydrological processes in Alpine catchments. *Water Resources Research*. Vol. 41: W02028. doi: 10.1029/2004WR003447.
- Zolina O., Kapala A., Simmer C. & Gulev S.K. (2004): Analysis of extreme precipitation over Europe from different reanalyses: A comparative assessment. *Global and Planetary Change*. Vol. 44: 129-161.
- Zorita E. & von Storch H. (1997): *A survey of statistical downscaling techniques*. GKSS report. Vol. 97/E/20. Geesthacht. Germany.
- Zuidema P.K. (1985): *Hydraulik der Abflussbildung während Starkniederschlägen*. Mitteilung Nr. 79. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich. Zürich.
- Zwahlen P. (1993): Das Bundstock-Element, eine diskontinuierliche helvetische Teildecke an der Kandertal-Störung. *Eclogae Geologicae Helveticae*. Vol. 86, Iss. 1: 65-86.
- Zwiers F.W. & Kharin V.V. (1998): Changes in the extremes of the climate simulated by CCC GCM2 under CO<sub>2</sub> doubling. *Journal of Climate*. Vol.11: 2200-2222.

# Anhang

Anhang A: Übersichtskarte, Topographie und Impressionen aus dem Einzugsgebiet .....	A-1
Anhang B: Gebietskennwerte aller Teileinzugsgebiete .....	B-1
Anhang C: Hochwasserabschätzungen für alle Teileinzugsgebiete .....	C-1
Anhang D: Ergänzende Gütemasse zur Validierung; Sensitivitätsflächen weiterer Parameter .....	D-1
Anhang E: Untersuchungen zur Hochwasserhydrologie der Engstlige-Frutigen.....	E-1

# Anhang A

## **Übersichtskarte, Topographie und Impressionen aus dem Einzugsgebiet**



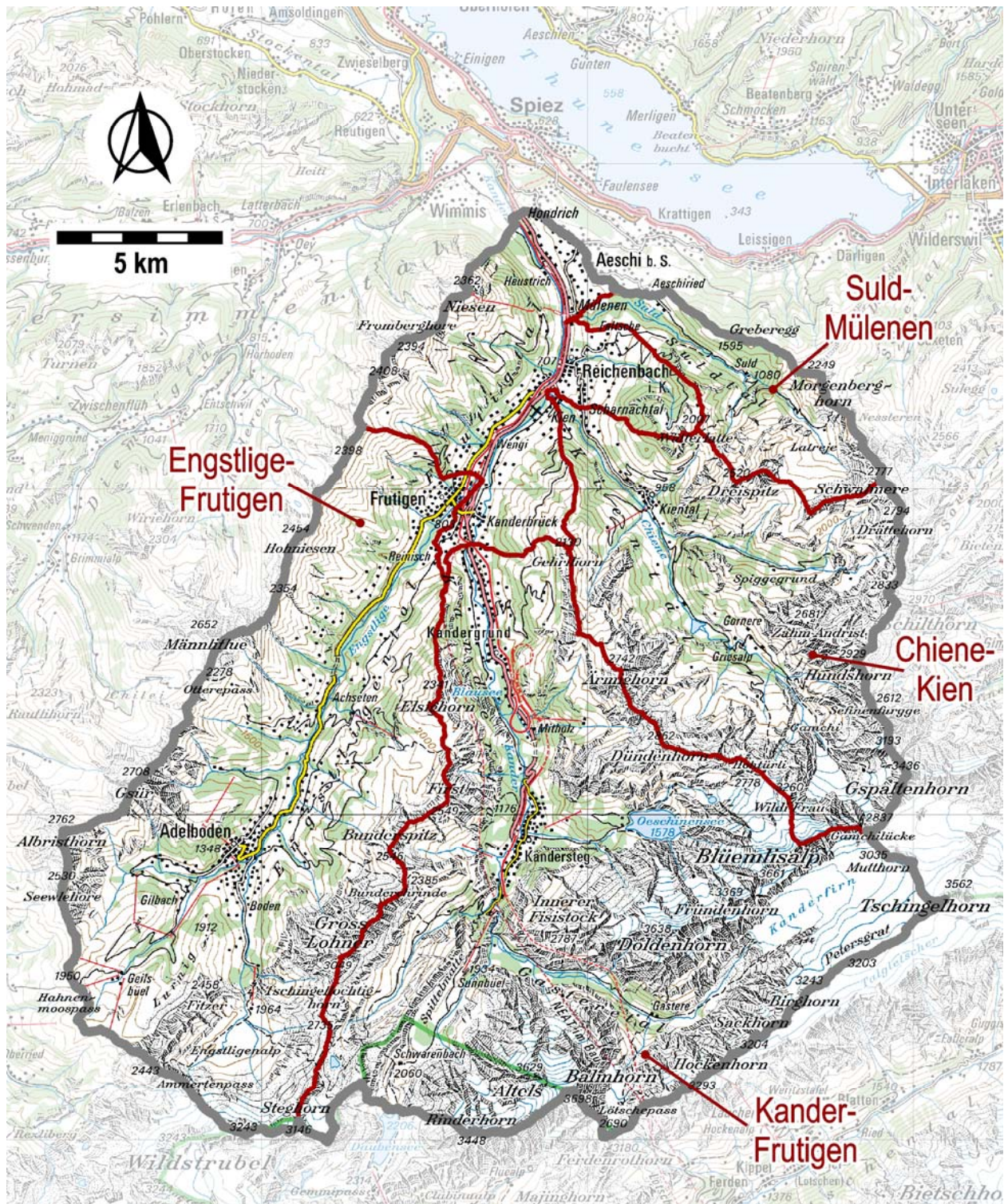
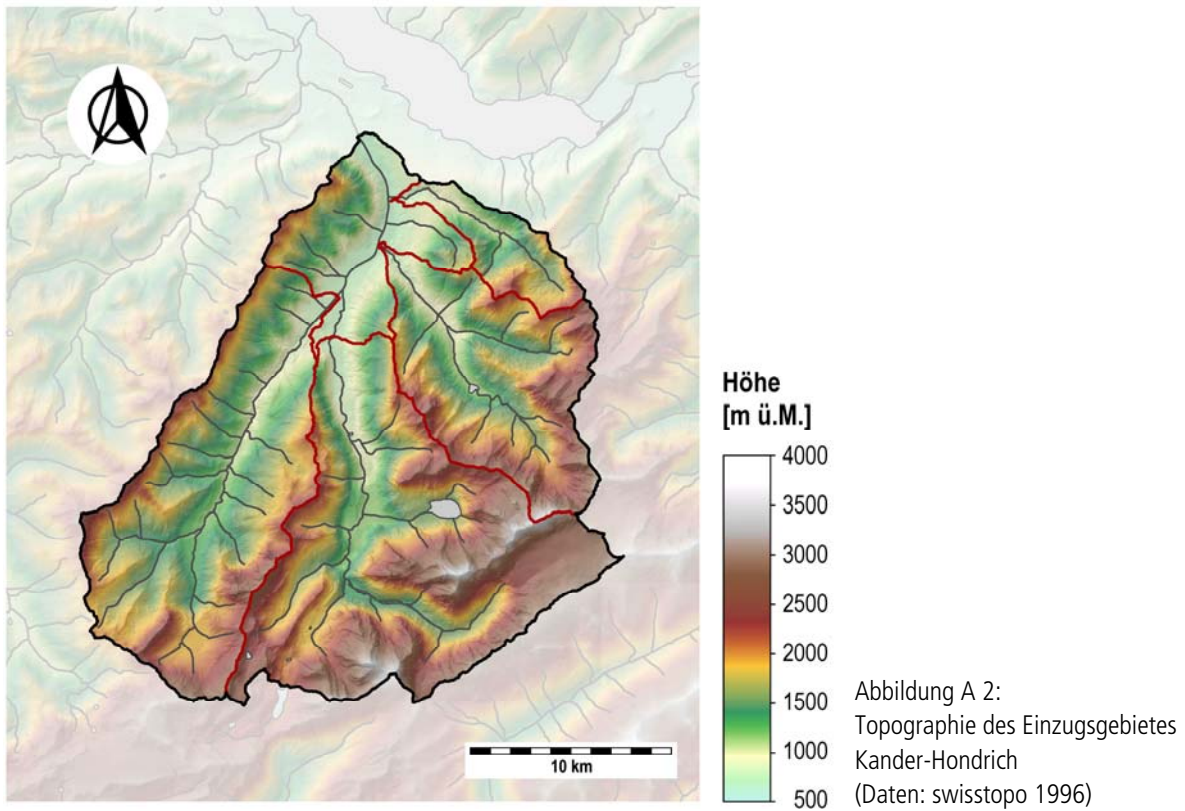


Abbildung A 1: Übersichtskarte über das Einzugsgebiet Kander-Hondrich (Karte: swisstopo)

## Topographie



## Impressionen aus dem Einzugsgebiet



Abbildung A 3:  
Hinteres Gasterntal mit Kanderfirn,  
Blick Fluss aufwärts  
(www.flickr.com)





Abbildung A 4:  
Vorderes Gasterntal, Blick Fluss abwärts  
([www.flickr.com](http://www.flickr.com))



Abbildung A 5:  
Kander bei der Messstation in  
Kandersteg, Blick Fluss abwärts



Abbildung A 6:  
Kander bei der Messstation in Frutigen,  
Blick Fluss abwärts



Abbildung A 7:  
Kander unterhalb Frutigen,  
Blick Fluss aufwärts



Abbildung A 8:  
Kander bei Heustrich,  
Blick Fluss aufwärts



Abbildung A 9:  
Kander bei der Messstation in Hondrich



Abbildung A 10:  
Engstlige zwischen Frutigen und  
Adelboden, Blick Fluss aufwärts



Abbildung A 11:  
Engstlige bei Frutigen,  
Blick Fluss aufwärts



Abbildung A 12:  
Engstlige bei der Messstation in Frutigen



Abbildung A 13:  
Kiental, Blick talaufwärts



Abbildung A 14:  
Chiene bei Kiental, kurz nach der Mündung mit dem Spiggebach,  
Blick Fluss aufwärts  
([www.flickr.com](http://www.flickr.com))



Abbildung A 15:  
Suldtal, Blick talabwärts

# Anhang B

## **Gebietskennwerte aller Teileinzugsgebiete**



# Kander-Frutigen

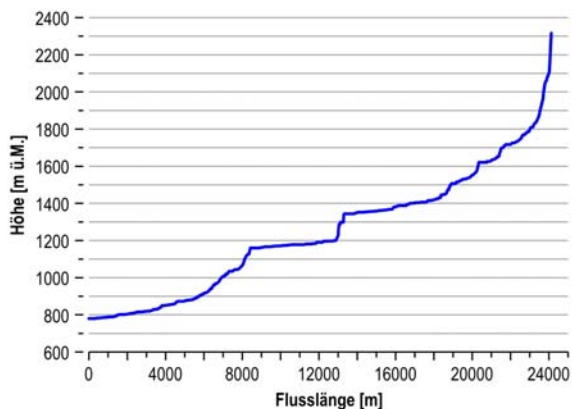


Abbildung B 1: Profil Hauptfluss

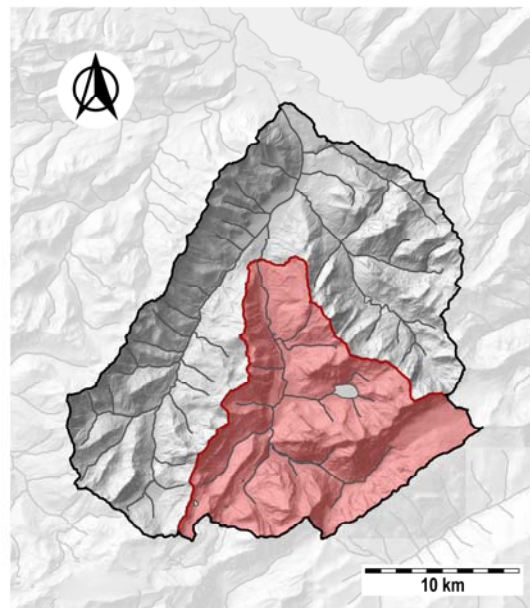


Abbildung B 2: Lage des Teileinzugsgebietes

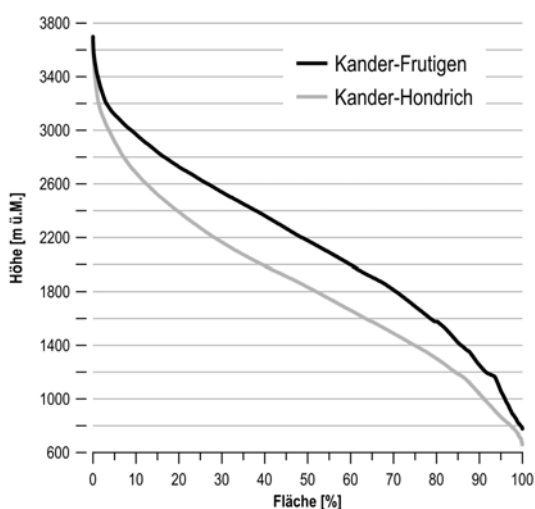


Abbildung B 3: Hypsographische Kurve

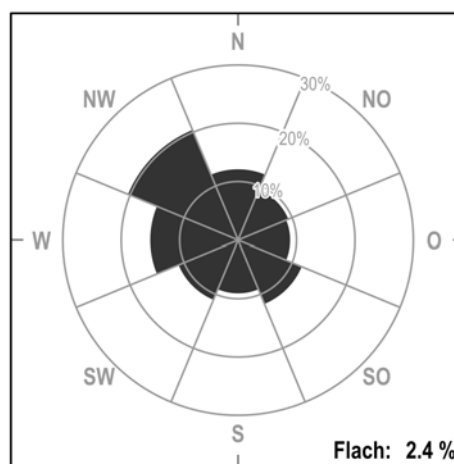


Abbildung B 4: Exposition nach Klassen

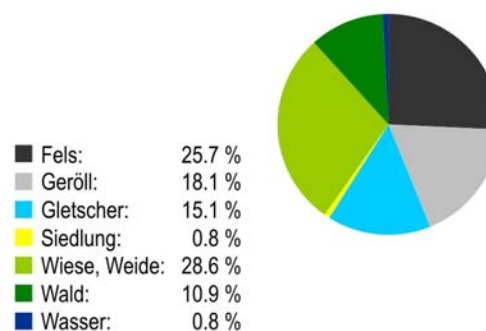
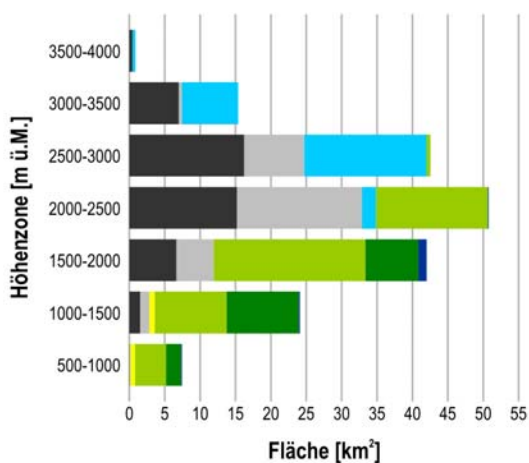


Abbildung B 5: Landnutzung nach Höhenzonen (links) und prozentuale Anteile am Gesamteinzugsgebiet (rechts)

# Kander- Kandersteg

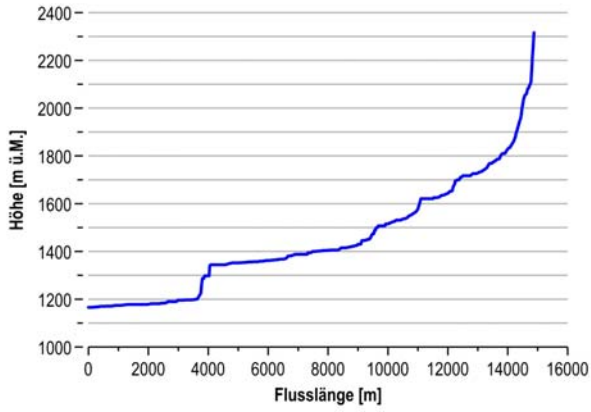


Abbildung B 6: Profil Hauptfluss

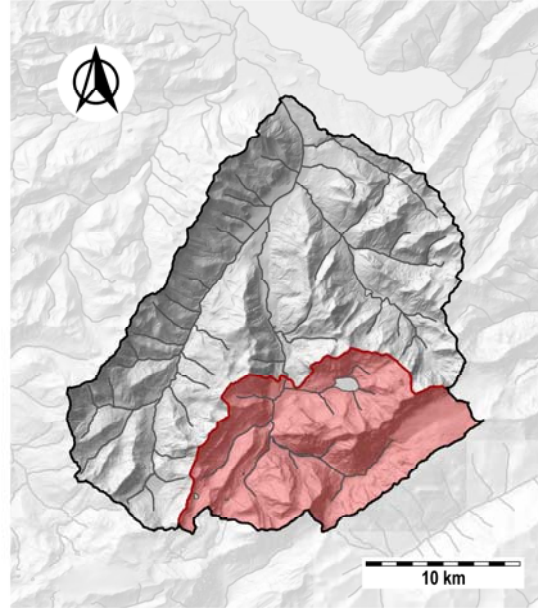


Abbildung B 7: Lage des Teileinzugsgebietes

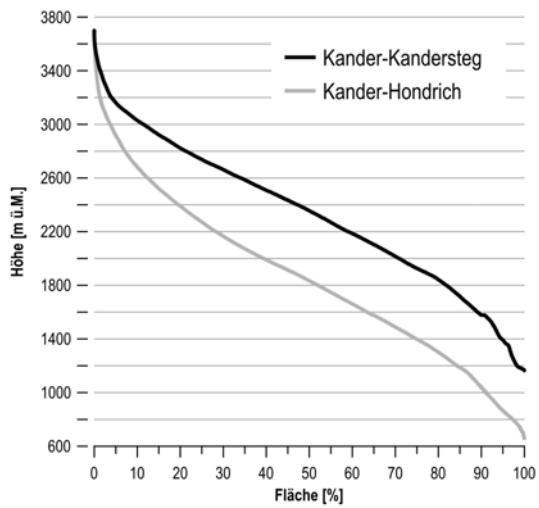


Abbildung B 8: Hypsographische Kurve

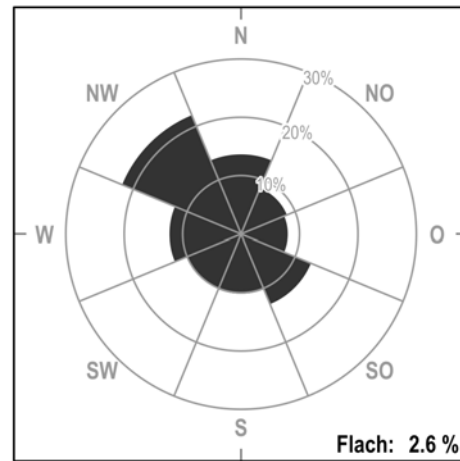


Abbildung B 9: Exposition nach Klassen

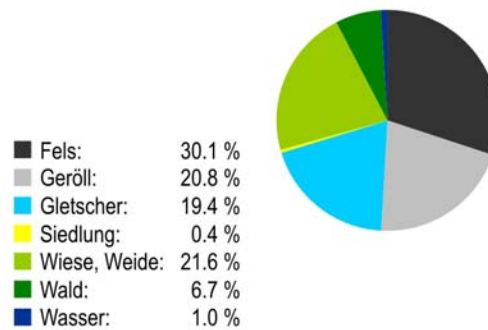
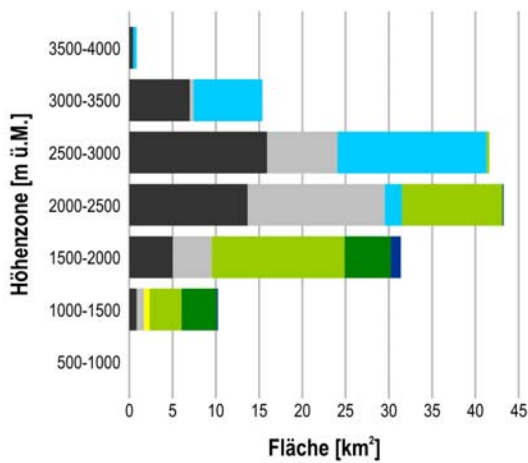


Abbildung B 10: Landnutzung nach Höhenzonen (links) und prozentuale Anteile am Gesamteinzugsgebiet (rechts)



# Kander-Chluse

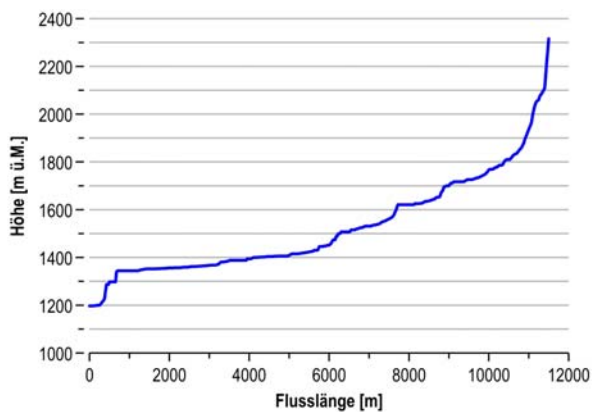


Abbildung B 11: Profil Hauptfluss

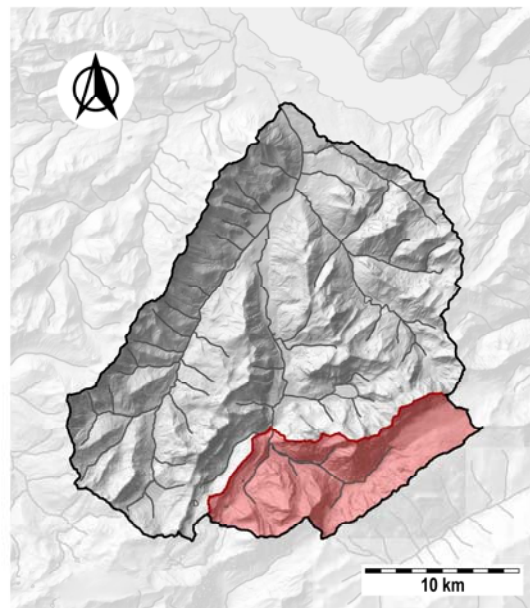


Abbildung B 12: Lage des Teileinzugsgebietes

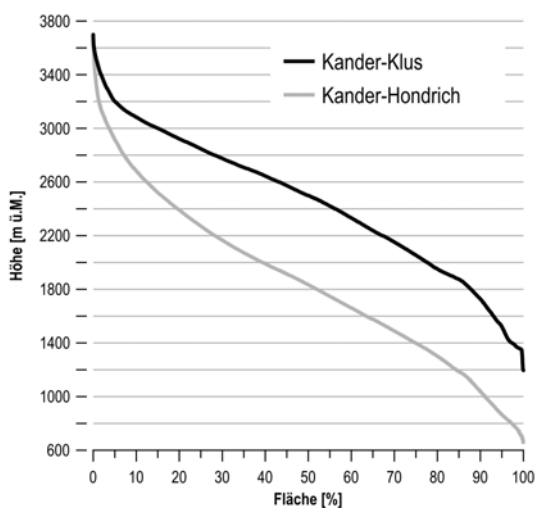


Abbildung B 13: Hypsographische Kurve

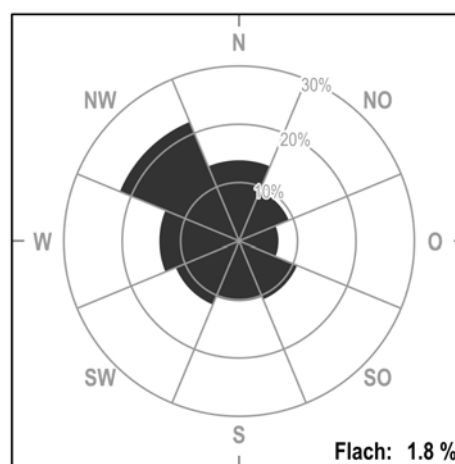


Abbildung B 14: Exposition nach Klassen

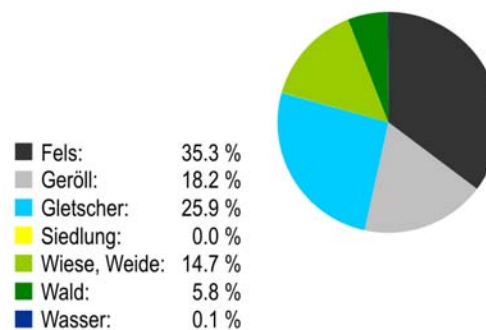
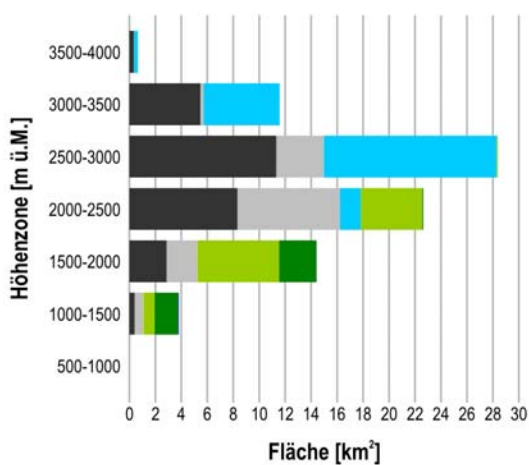


Abbildung B 15: Landnutzung nach Höhenzonen (links) und prozentuale Anteile am Gesamteinzugsgebiet (rechts)

# Kander-Gasteretal

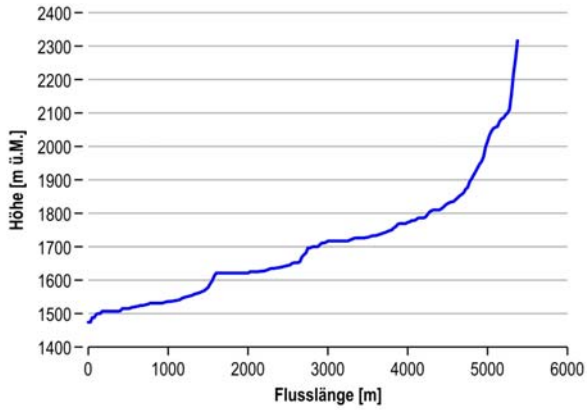


Abbildung B 16: Profil Hauptfluss

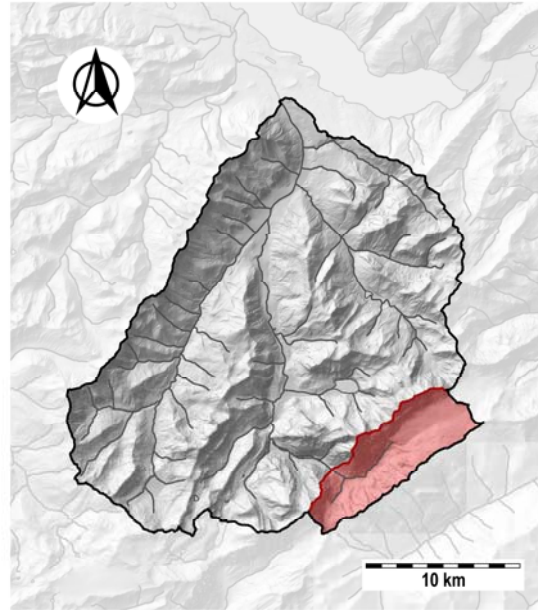


Abbildung B 17: Lage des Teileinzugsgebietes

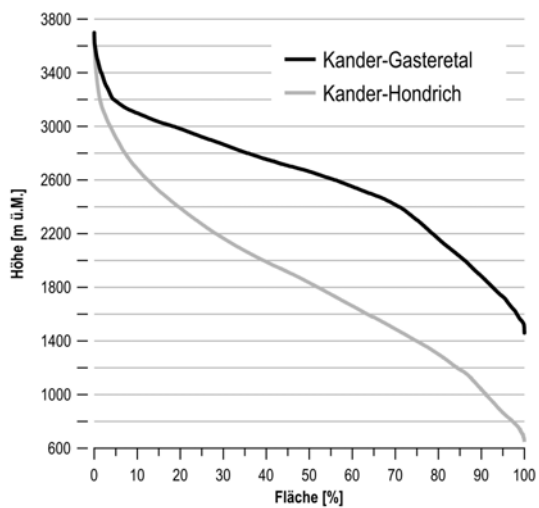


Abbildung B 18: Hypsographische Kurve

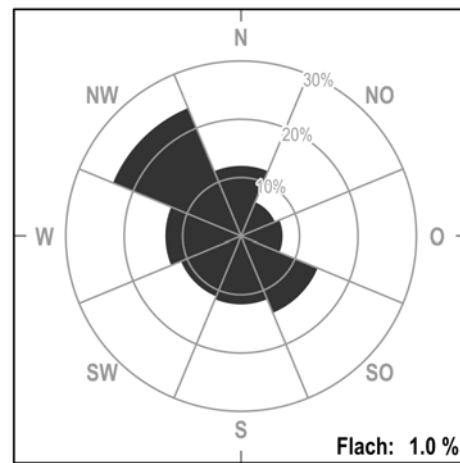


Abbildung B 19: Exposition nach Klassen

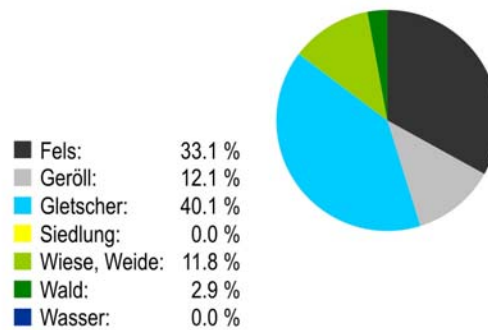
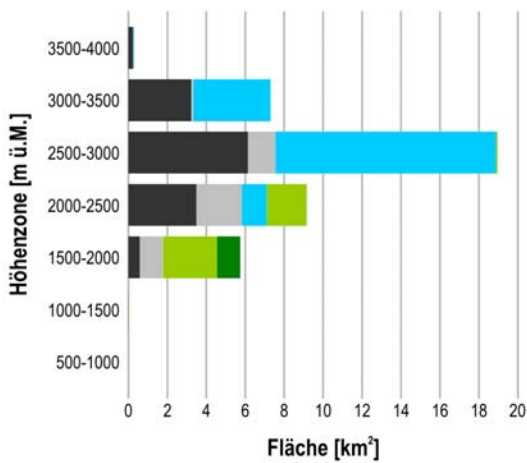


Abbildung B 20: Landnutzung nach Höhenzonen (links) und prozentuale Anteile am Gesamteinzugsgebiet (rechts)

# Engstlige-Frutigen

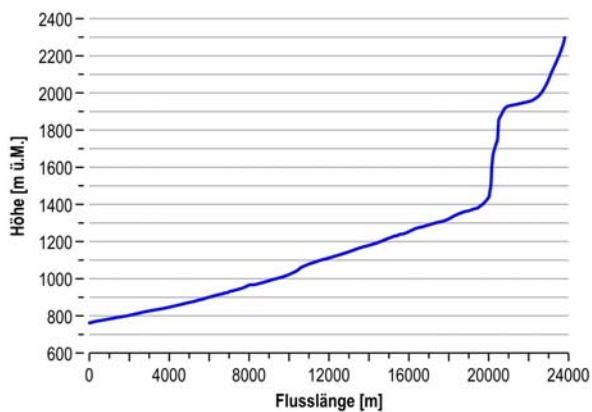


Abbildung B 21: Profil Hauptfluss

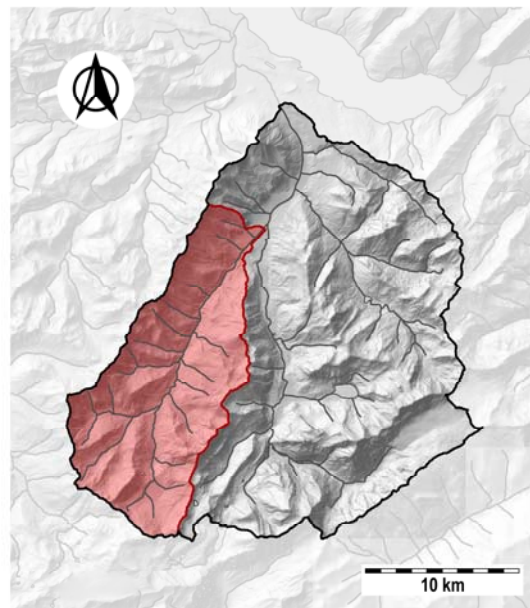


Abbildung B 22: Lage des Teileinzugsgebietes

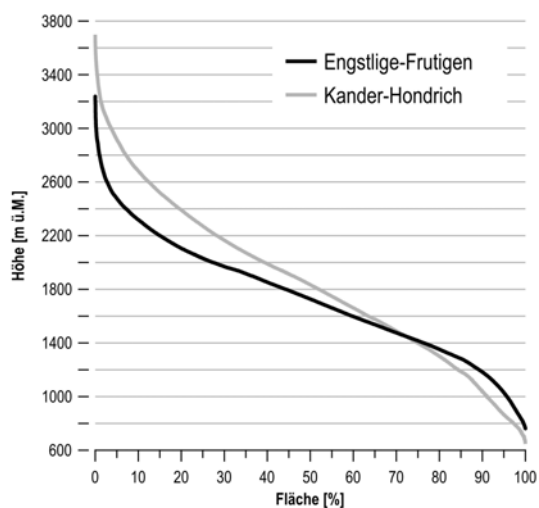


Abbildung B 23: Hypsographische Kurve

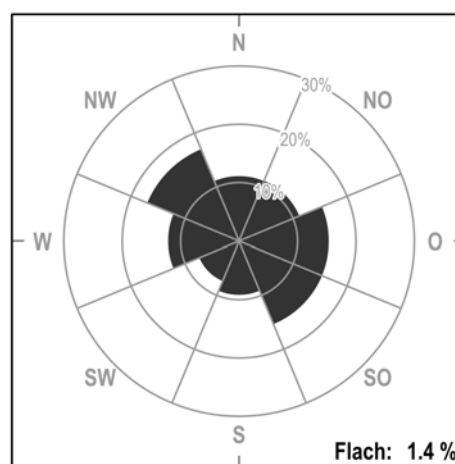


Abbildung B 24: Exposition nach Klassen

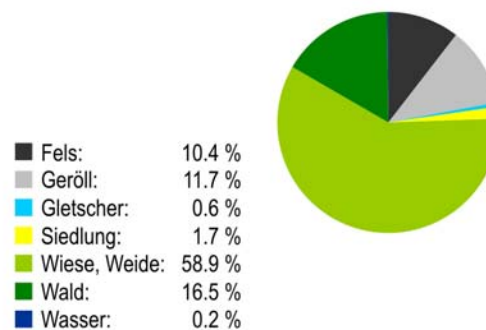
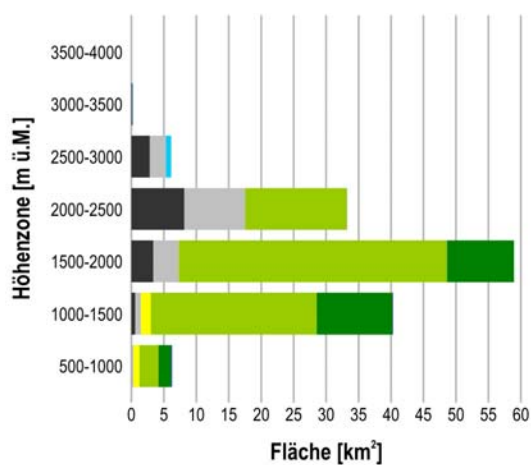


Abbildung B 25: Landnutzung nach Höhenzonen (links) und prozentuale Anteile am Gesamteinzugsgebiet (rechts)

# Engstlige- Adelboden

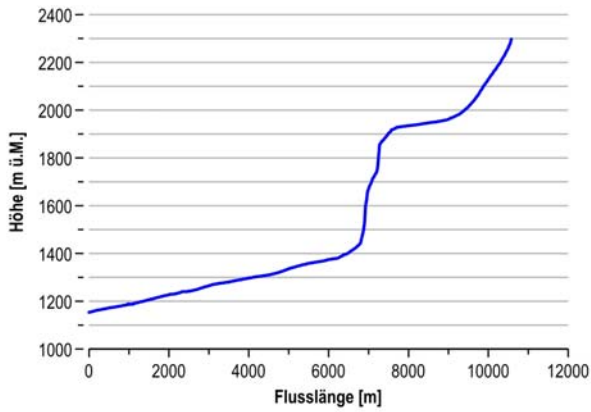


Abbildung B 26: Profil Hauptfluss

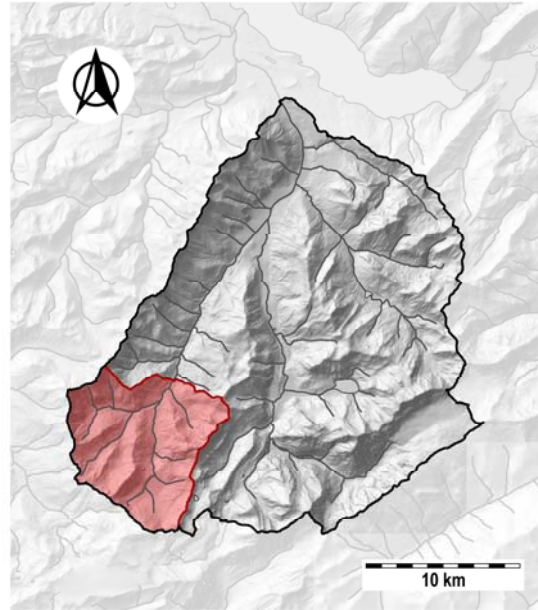


Abbildung B 27: Lage des Teileinzugsgebietes

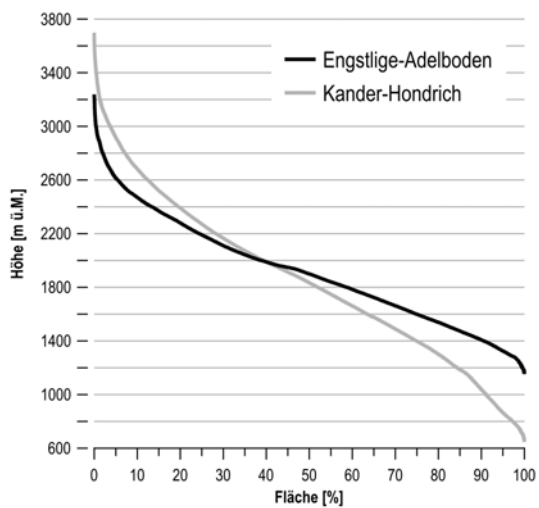


Abbildung B 28: Hypsographische Kurve

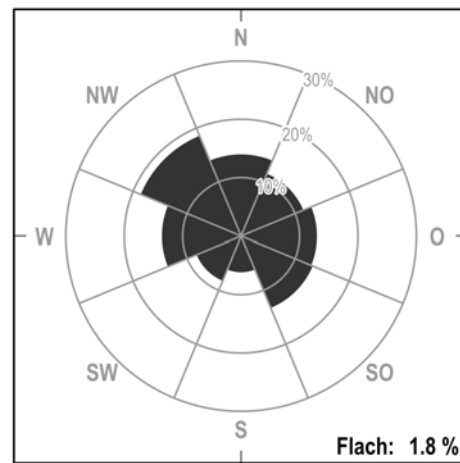


Abbildung B 29: Exposition nach Klassen

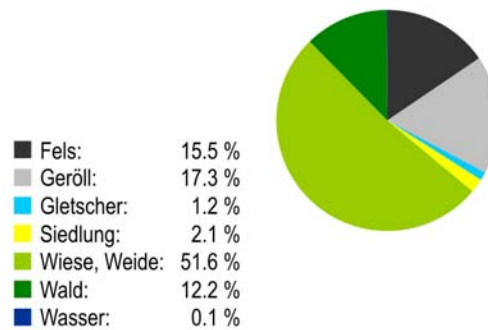
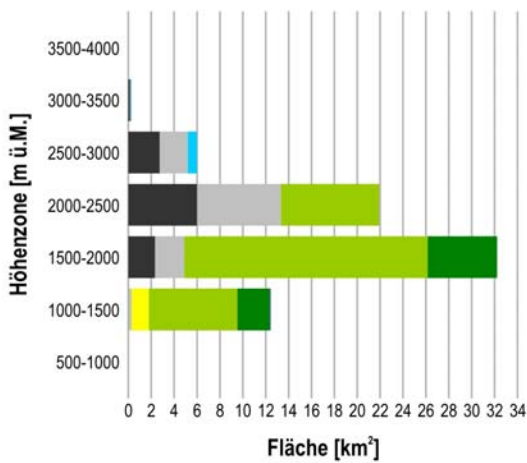


Abbildung B 30: Landnutzung nach Höhenzonen (links) und prozentuale Anteile am Gesamteinzugsgebiet (rechts)

# Allenbach- Adelboden

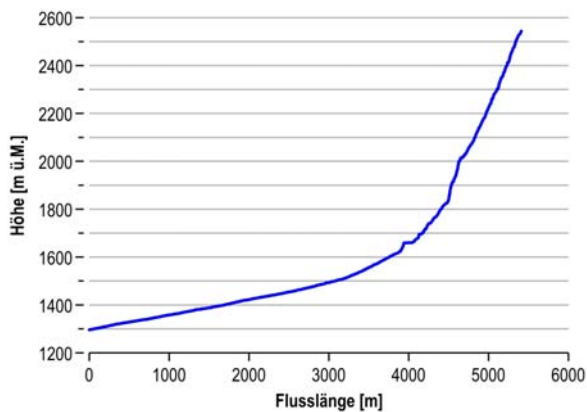


Abbildung B 31: Profil Hauptfluss

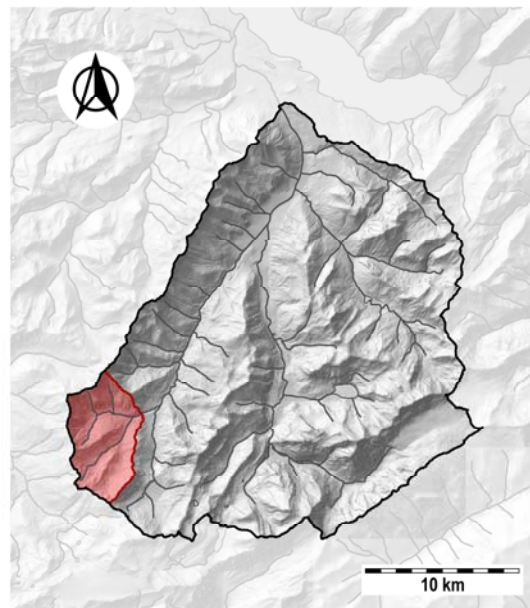


Abbildung B 32: Lage des Teileinzugsgebietes

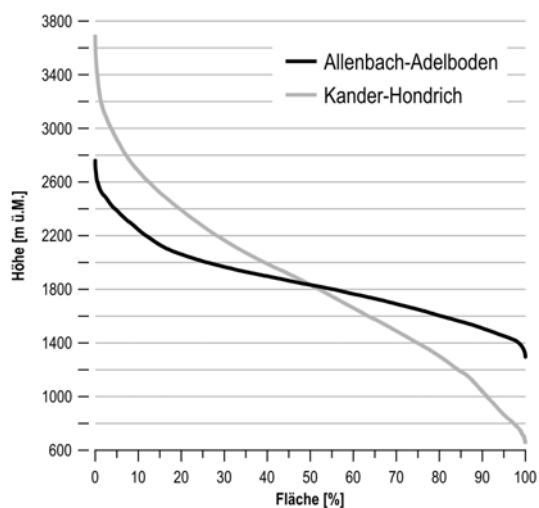


Abbildung B 33: Hypsographische Kurve

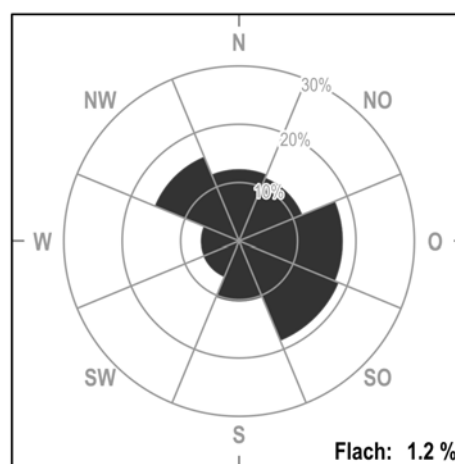


Abbildung B 34: Exposition nach Klassen

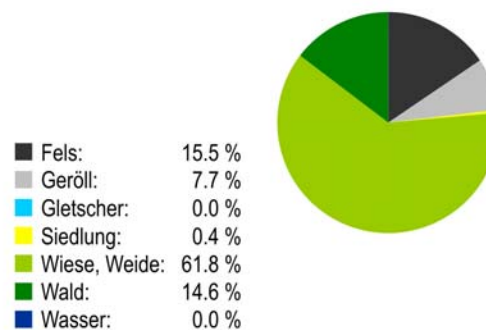
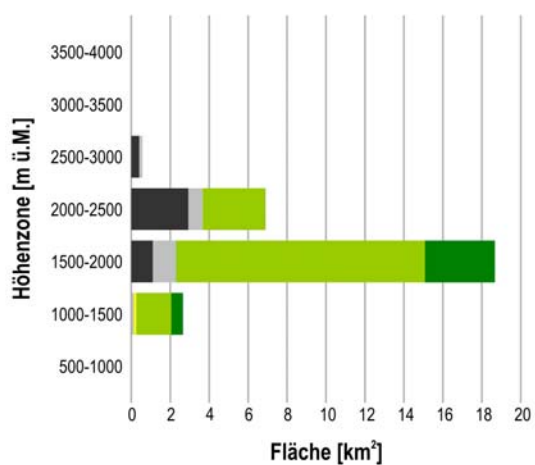


Abbildung B 35: Landnutzung nach Höhenzonen (links) und prozentuale Anteile am Gesamteinzugsgebiet (rechts)

# Chiene- Kien

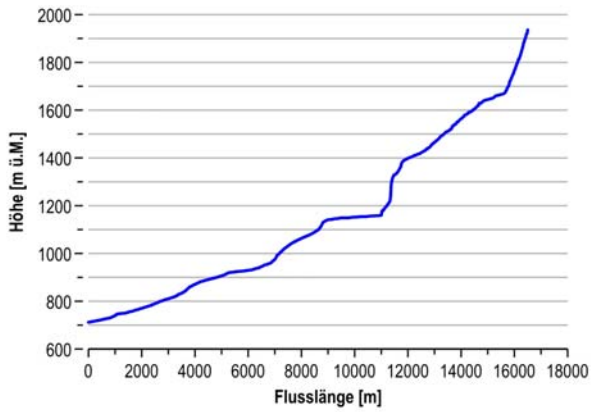


Abbildung B 36: Profil Hauptfluss

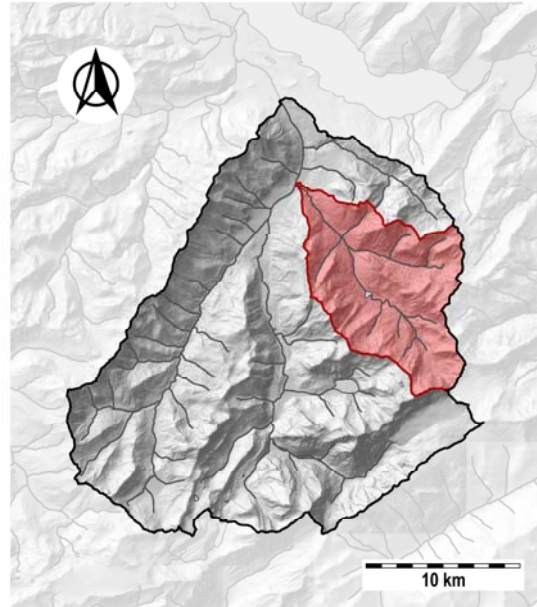


Abbildung B 37: Lage des Teileinzugsgebietes

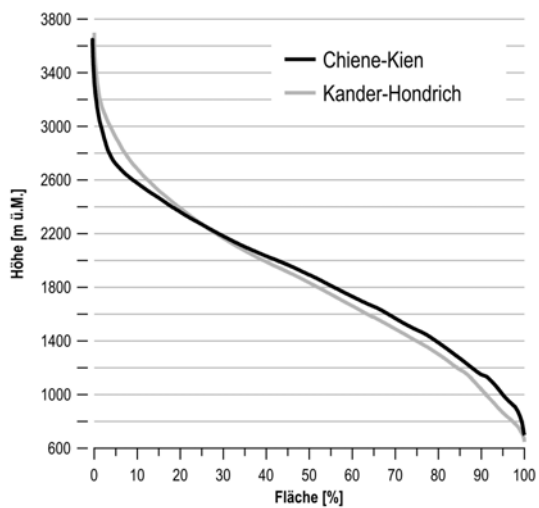


Abbildung B 38: Hypsographische Kurve

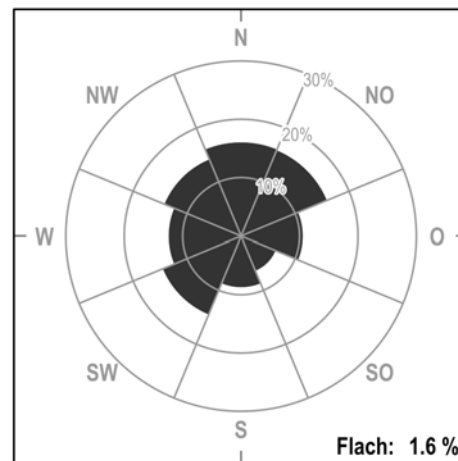


Abbildung B 39: Exposition nach Klassen

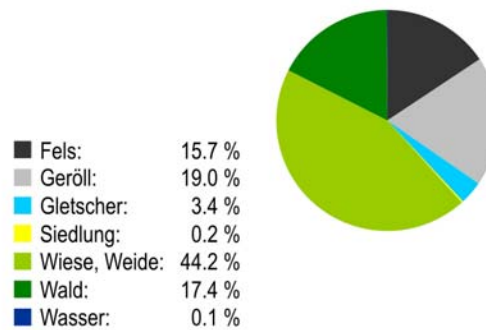
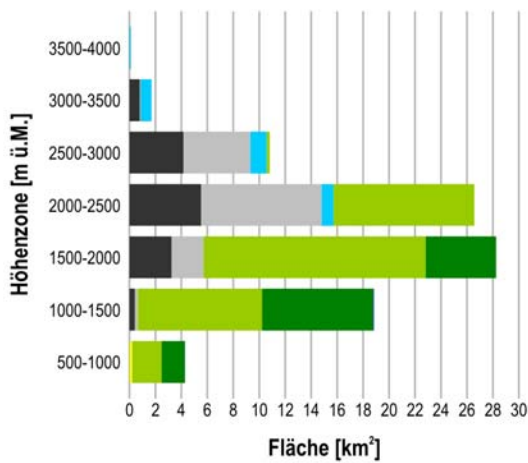


Abbildung B 40: Landnutzung nach Höhenzonen (links) und prozentuale Anteile am Gesamteinzugsgebiet (rechts)

# Spiggebach-Kiental

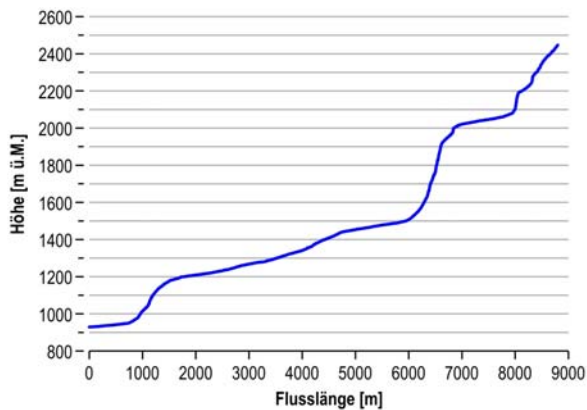


Abbildung B 41: Profil Hauptfluss

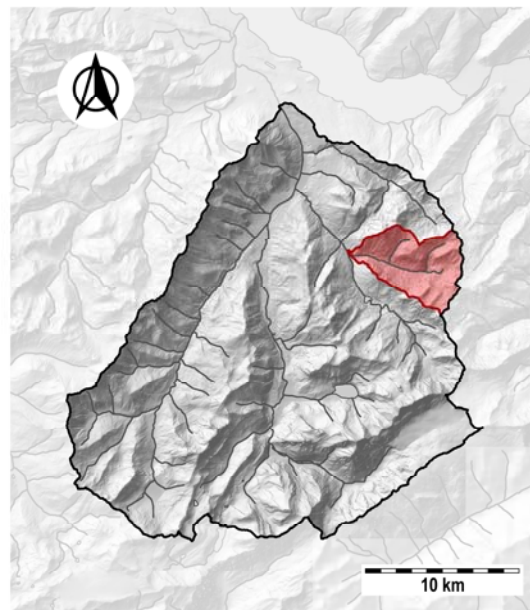


Abbildung B 42: Lage des Teileinzugsgebietes

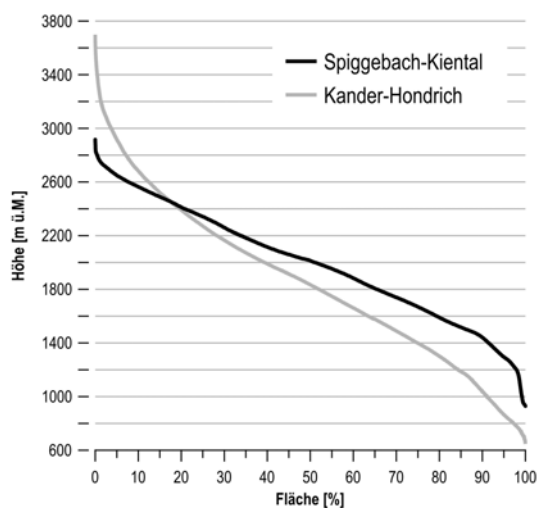


Abbildung B 43: Hypsographische Kurve

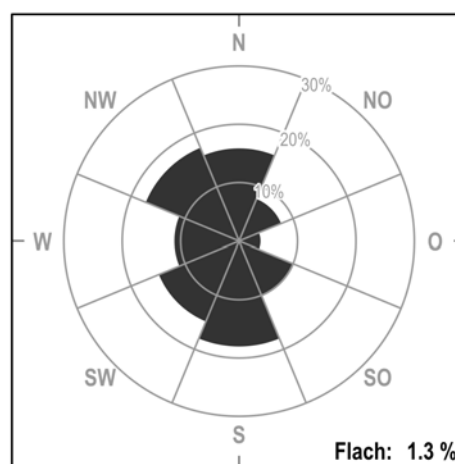


Abbildung B 44: Exposition nach Klassen

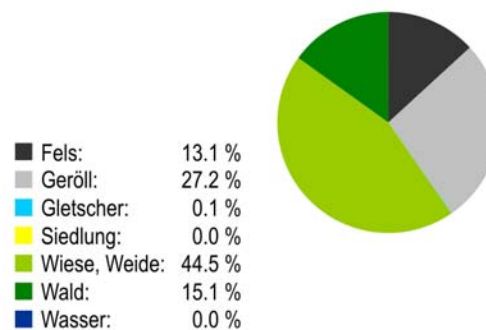
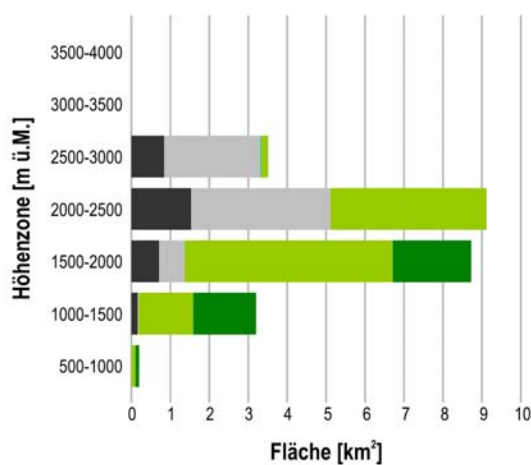


Abbildung B 45: Landnutzung nach Höhenzonen (links) und prozentuale Anteile am Gesamteinzugsgebiet (rechts)

# Gornerewasser-Kiental

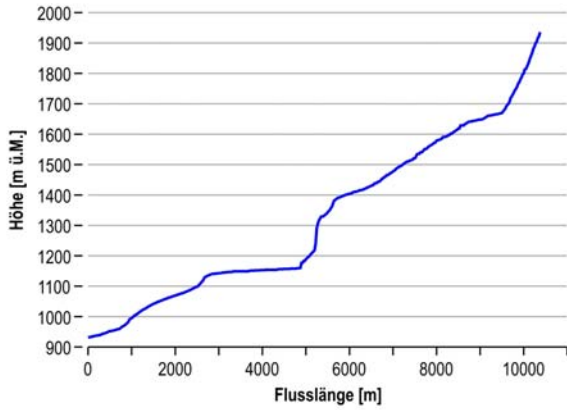


Abbildung B 46: Profil Hauptfluss

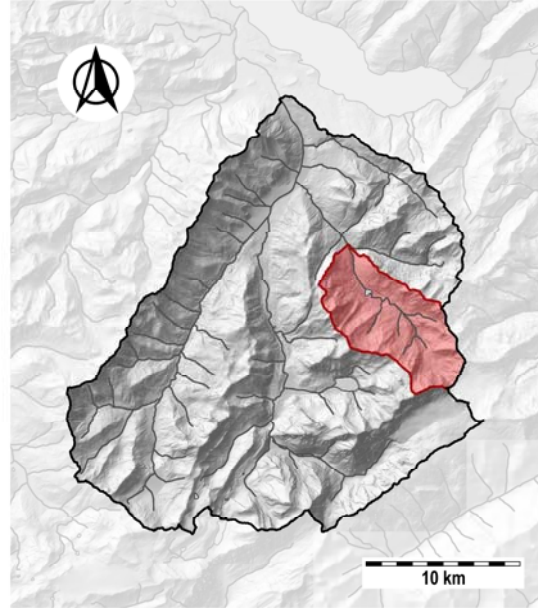


Abbildung B 47: Lage des Teileinzugsgebietes

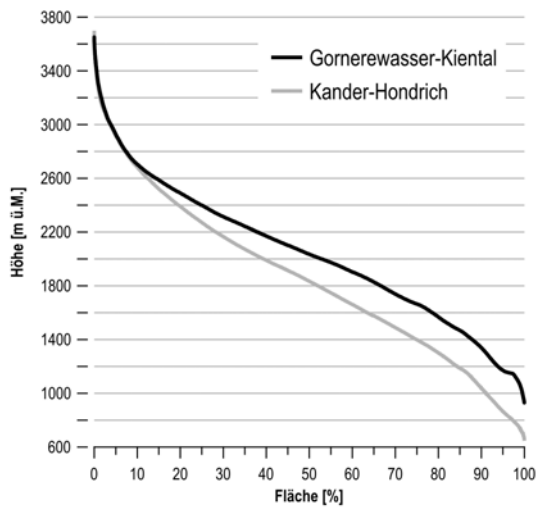


Abbildung B 48: Hypsographische Kurve

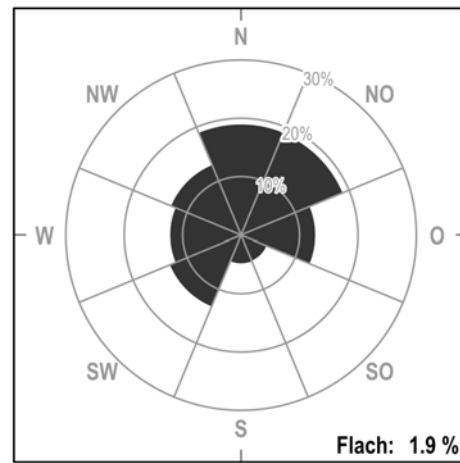


Abbildung B 49: Exposition nach Klassen

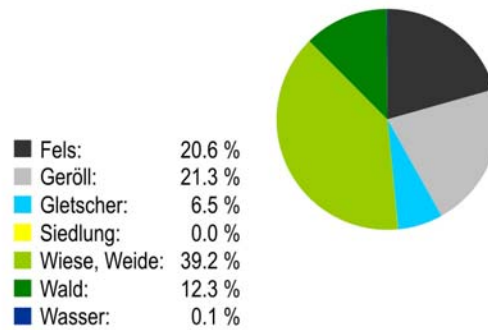
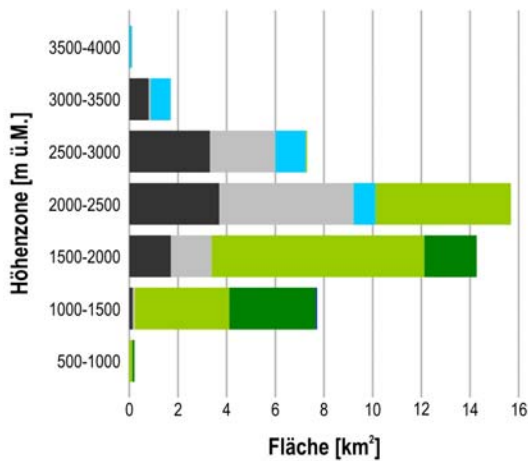


Abbildung B 50: Landnutzung nach Höhenzonen (links) und prozentuale Anteile am Gesamteinzugsgebiet (rechts)



# Suld- Mülenen

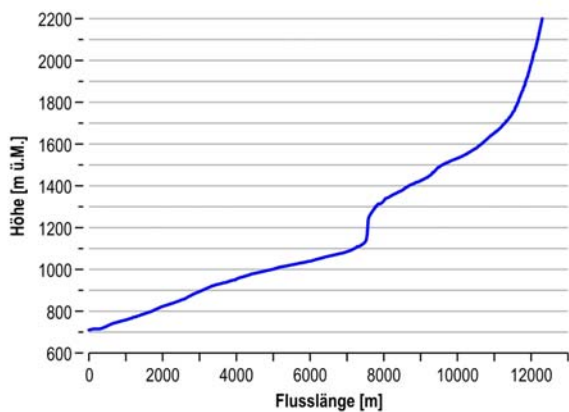


Abbildung B 51: Profil Hauptfluss

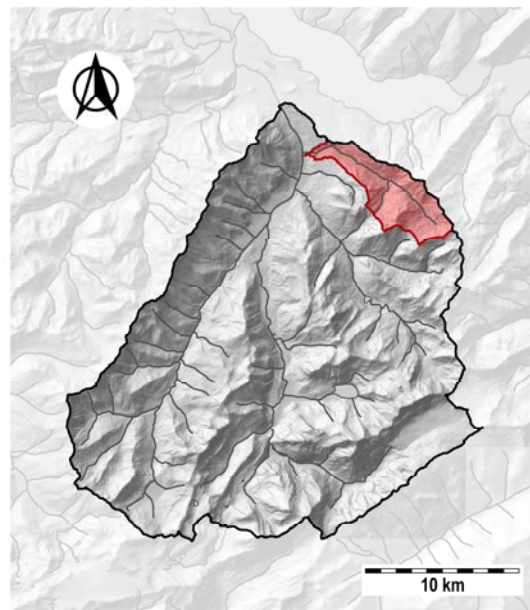


Abbildung B 52: Lage des Teileinzugsgebietes

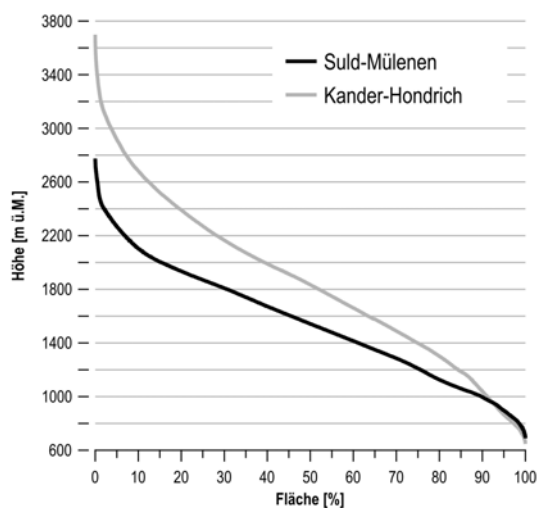


Abbildung B 53: Hypsographische Kurve

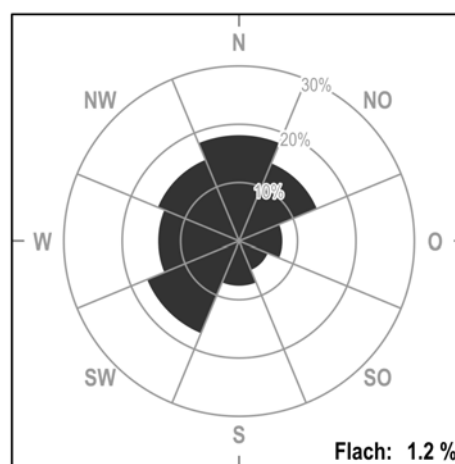


Abbildung B 54: Exposition nach Klassen

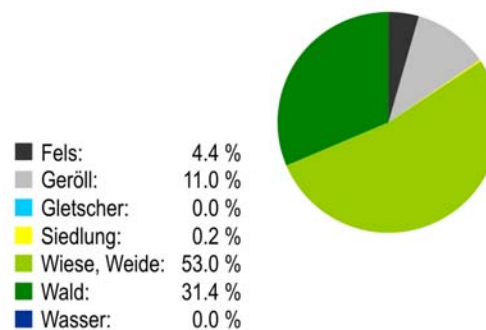
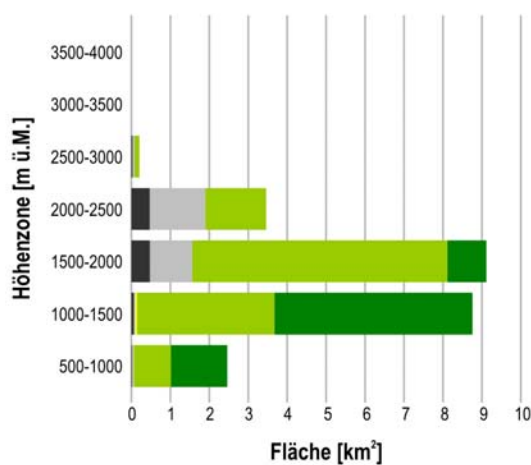


Abbildung B 55: Landnutzung nach Höhenzonen (links) und prozentuale Anteile am Gesamteinzugsgebiet (rechts)

Tabelle B 1: Gebietseigenschaften der mesoskaligen Teileinzugsgebiete

		<b>Allenbach- Adelboden</b>	<b>Engstlige- Adelboden</b>	<b>Engstlige- Frutigen</b>	<b>Spigge- Kiental</b>	<b>Gornerewas- ser-Kiental</b>	<b>Chiene- Kien</b>
<b>Minimale Höhe</b>	[m ü.M.]	1296	1153	762	929	930	712
<b>Maximale Höhe</b>	[m ü.M.]	2760	3238	3238	2916	3650	3650
<b>Mittlere Höhe</b>	[m ü.M.]	1854	1918	1738	1995	2041	1894
<b>Einzugsgebiets-Fläche</b>	[km <sup>2</sup> ]	28.80	72.89	145.15	24.75	47.00	90.54
<b>Maximale Neigung</b>	[°]	80.9	84.3	84.3	82.3	84.3	84.3
<b>Mittlere Neigung</b>	[°]	27.3	27.5	28.0	31.7	32.5	31.8
<b>Flächenanteil mit Neigung &lt; 3°</b>	[%]	0.4	1.6	1.3	0.6	1.1	1.0
<b>Flächenanteil mit Neigung &gt; 15°</b>	[%]	81.9	81.1	84.3	89.4	87.9	88.6
<b>Fels</b>	[%]	15.5	15.5	10.4	13.1	20.6	15.7
<b>Geröll</b>	[%]	7.7	17.3	11.6	27.2	21.3	19.0
<b>Gletscher</b>	[%]	0.0	1.2	0.6	0.1	6.5	3.4
<b>Siedlung</b>	[%]	0.4	2.1	1.7	0.0	0.0	0.2
<b>Wiese, Weide</b>	[%]	61.8	51.6	58.9	44.6	39.1	44.2
<b>Wald</b>	[%]	14.6	12.3	16.4	15.1	12.3	17.4
<b>Wasser</b>	[%]	0.0	0.1	0.2	0.0	0.1	0.1
<b>Mittlerer Jahresniederschlag</b>	[mm]	1846	1861	1811	2178	2164	2077
<b>Starkniederschlag 1h100a-max</b>	[mm]	61	65	65	73	70	73
<b>Starkniederschlag 1h100a-mean</b>	[mm]	50	54	48	65	63	62
<b>Jährliche Verdunstung</b>	[mm]	413	376	402	320	306	325
<b>Formfaktor nach Horton</b>	[-]	0.69	0.70	0.32	0.42	0.36	0.32
<b>Formfaktor nach Schumm</b>	[-]	2.94	2.97	1.99	2.28	2.12	2.01
<b>Kreisförmigkeit nach Miller</b>	[-]	0.63	0.61	0.47	0.54	0.58	0.49
<b>Gerinnelänge (GN5mod)</b>	[km]	101.8	218.3	461.1	83.9	99.0	230.7
<b>Flussdichte</b>	[km/km <sup>2</sup> ]	3.53	3.00	3.18	3.39	2.11	2.55

Tabelle B 2: Gebietseigenschaften der mesoskaligen Teileinzugsgebiete (Fortsetzung)

		Kander-Gasteretal	Kander-Chluse	Kander-Kandersteg	Kander-Frutigen	Kander-Hondrich	Suld-Mülenen
<b>Minimale Höhe</b>	[m ü.M.]	1460	1195	1165	777	647	689
<b>Maximale Höhe</b>	[m ü.M.]	3698	3698	3698	3698	3698	2775
<b>Mittlere Höhe</b>	[m ü.M.]	2586	2447	2329	2152	1852	1551
<b>Einzugsgebiets-Fläche</b>	[km <sup>2</sup> ]	41.45	81.47	142.74	183.09	495.56	24.00
<b>Maximale Neigung</b>	[°]	86.6	86.6	86.7	86.7	86.7	83.8
<b>Mittlere Neigung</b>	[°]	30.6	32.6	31.9	31.6	29.7	30.4
<b>Flächenanteil mit Neigung &lt; 3°</b>	[%]	1.3	2.2	3.0	3.1	2.3	0.4
<b>Flächenanteil mit Neigung &gt; 15°</b>	[%]	74.4	80.1	81.5	81.3	82.4	86.5
<b>Fels</b>	[%]	33.1	35.3	30.1	25.7	16.1	4.4
<b>Geröll</b>	[%]	12.1	18.2	20.8	18.1	14.4	11.0
<b>Gletscher</b>	[%]	40.1	25.9	19.3	15.1	6.4	0.0
<b>Siedlung</b>	[%]	0.0	0.0	0.5	0.8	1.3	0.2
<b>Wiese, Weide</b>	[%]	11.8	14.7	21.7	28.5	45.1	52.9
<b>Wald</b>	[%]	2.9	5.8	6.7	10.9	16.3	31.4
<b>Wasser</b>	[%]	0.0	0.1	1.0	0.8	0.4	0.0
<b>Mittlerer Jahresniederschlag</b>	[mm]	2469	2307	2223	2112	1959	1907
<b>Starkniederschlag 1h100a-max</b>	[mm]	65	65	65	65	73	65
<b>Starkniederschlag 1h100a-mean</b>	[mm]	55	54	55	54	53	57
<b>Jährliche Verdunstung</b>	[mm]	273	314	335	347	371	397
<b>Formfaktor nach Horton</b>	[-]	0.38	0.42	0.83	0.53	0.57	0.20
<b>Formfaktor nach Schumm</b>	[-]	2.19	2.30	3.23	2.57	2.68	1.60
<b>Kreisförmigkeit nach Miller</b>	[-]	0.45	0.40	0.47	0.43	0.58	0.39
<b>Gerinnelänge (GN5mod)</b>	[km]	45.6	97.7	219.7	334.9	1290.9	111.3
<b>Flussdichte</b>	[km/km <sup>2</sup> ]	1.10	1.20	1.54	1.83	2.60	4.64

Tabelle B 3: Gebietseigenschaften der Basiseinzugsgebiete im Einzugsgebiet Kander-Hondrich (Daten: BREINLINGER ET AL. 1992)

<b>Basis-ID</b>	<b>FN</b> [km <sup>2</sup> ]	<b>P</b> [km]	<b>mH</b> [m]	<b>Hmax</b> [m]	<b>Hmin</b> [m]	<b>Im</b> [°]	<b>I3</b> [%]	<b>I15</b> [%]	<b>Fvgl</b> [%]	<b>Fvsg</b> [%]	<b>FBo</b> [%]	<b>FW</b> [%]	<b>WSV</b> [mm]
20091	39.9	31.0	2611	3750	1550	25.8	0.7	73.6	42.1	0.1	13.1	1.3	9.0
20092	37.9	29.4	2334	3850	1350	29.8	0.7	88.8	13.6	0.0	30.3	8.3	20.3
20093	32.0	24.4	2359	3850	1150	27.5	1.2	86.8	23.4	0.1	29.4	9.3	16.7
20094	34.3	35.4	2018	3150	1150	25.8	2.2	81.4	2.7	1.3	50.1	9.3	18.3
20095	44.3	30.1	1456	2850	750	25.2	3.6	81.3	0.1	1.6	78.7	31.8	25.0
20101	30.3	25.3	1837	2750	1250	19.5	1.5	66.0	0.0	1.0	76.4	19.0	35.0
20102	29.4	23.3	2091	3250	1250	22.0	2.7	77.1	5.7	0.5	56.2	6.5	28.2
20103	49.3	32.2	1743	3050	950	20.9	0.9	74.2	0.3	0.6	81.1	19.1	32.1
20104	37.2	26.4	1385	2450	750	21.6	2.6	81.9	0.0	1.1	95.4	24.0	32.8
20111	46.6	30.0	2054	3550	950	26.2	0.6	87.2	7.6	0.1	53.2	11.9	17.4
20112	45.1	37.6	1707	2850	750	23.5	0.7	83.3	0.0	0.4	77.9	23.1	22.0
20113	25.0	27.4	1564	2750	650	21.6	1.8	72.3	0.0	0.4	80.7	30.1	27.5
20114	51.0	43.3	1126	2450	550	17.6	8.1	57.1	0.0	1.5	97.5	28.9	37.6

Basis-ID: Identifikationsnummer des Basisgebietes; FN: Gebietsfläche; P: Umfang; mH: Mittlere Gebietshöhe; Hmax: Höchster Punkt; Hmin: Niedrigster Punkt; Im: Mittlere Geländeneigung; I3: Anteil der Flächen bis 3° Neigung; I15: Anteil der Flächen über 15° Neigung; Fvgl: Areale Vergletscherung; Fvsg: Anteil versiegelter Flächen; FBo: Anteil bodenbedeckter Flächen; FW: Anteil der Waldfächen; WSV: Mittleres Wasserspeichervermögen des Bodens

Tabelle B 4: Legende zu Tabelle B 5 bzw. Tabelle B 6

<b>Basis-ID</b>	<b>Einheit</b>	<b>Erklärung</b>
A	[km <sup>2</sup> ]	Einzugsgebietsfläche
GL	[km]	Gewässerlänge
Fwald	[%]	Waldanteil an der Einzugsgebietsfläche
Hmin	[m ü.M.]	Minimale Höhe
Nint	[mm/h]	Niederschlagsintensität (1h, 100a)
Lr	[km]	Radiale Länge
Re		Elongation Ratio
Lh	[km]	Hydrologische Länge
LGS	[km]	Länge des Hauptflusses bis zum Gebietsschwerpunkt
LI		Shape Factor

Tabelle B 5: Gebietskennwerte für die kleinen Teileinzugsgebiete (Daten: ZGRAGGEN 2009)

Nr	Einzugsgebiet	A (km <sup>2</sup> )	GL (km)	Fwald (%)	Hmin (m ü.M.)	Nint (mm/h)	Lr (km)	Re	Lh (km)	LGS (km)	LI
1	Louwibach	3.6	16.0	19.5	786	42.1	3.4	0.6	4.3	2.1	1.9
2	Schlundbach	4.0	27.8	20.8	763	40.6	4.1	0.5	4.6	2.1	2.0
3	Heitibach	4.0	17.6	10.8	770	39.1	4.1	0.5	4.0	2.3	2.0
4	Gunggbach	3.1	15.6	20.0	768	38.5	4.0	0.5	3.8	1.8	1.8
5	Leimbach	2.5	17.0	37.7	990	37.4	2.6	0.7	2.9	1.4	1.5
6	Bräschgegrabe	3.0	28.4	16.0	889	37.0	3.2	0.6	3.6	2.0	1.8
7	Gantebach	5.1	40.7	13.8	891	37.2	3.2	0.8	3.8	1.8	1.8
8	Zwüschbächgrabe	1.7	13.9	9.7	891	37.8	3.2	0.5	3.8	2.3	1.9
9	Gempelegrabe	1.7	15.4	21.4	916	38.5	2.9	0.5	3.3	2.0	1.8
10	Chratzeregrabe	1.5	10.9	16.4	936	39.2	2.7	0.5	3.2	1.8	1.7
11	Ladholzgrabe	2.8	27.6	21.1	960	40.7	3.3	0.6	3.9	2.2	1.9
12	Bettbach	2.7	24.0	18.2	1001	41.4	3.8	0.5	4.4	2.2	2.0
13	Otterebach	6.3	54.0	15.6	1051	41.9	4.0	0.7	5.6	3.1	2.4
14	Tschentbach	8.0	77.6	20.6	1092	43.8	4.8	0.7	6.2	3.6	2.5
15	Chlyne Grabe	0.5	1.7	29.4	1190	46.5	1.5	0.5	1.9	1.2	1.3
16	Stigelbach	2.1	30.8	4.4	1419	44.1	3.0	0.6	3.5	2.2	1.8
17	Bütschibach	6.0	9.2	9.1	1479	56.4	4.1	0.7	5.5	2.8	2.3
18	Ärtelenbach	3.1	25.7	0.6	1375	60.2	3.0	0.7	3.8	2.4	1.9
19	Engstlige	17.0	56.1	2.3	1374	60.3	5.2	0.9	6.7	3.9	2.7
20	Bunderlebächli	9.3	36.7	10.9	1180	53.5	4.4	0.8	5.8	3.4	2.5
21	Marchbach	3.3	12.9	14.3	1083	49.2	3.9	0.5	4.8	2.5	2.1
22	Elsigbach	5.5	6.0	12.9	1147	48.5	4.3	0.6	6.4	3.3	2.5
23	Lochbach	1.4	4.8	33.3	1141	46.9	2.4	0.5	2.8	1.6	1.6
24	Bunderbach	1.4	12.4	30.0	880	52.0	2.4	0.6	2.8	1.7	1.6
25	Rotbach	2.3	8.5	12.3	999	55.0	3.1	0.6	3.7	2.3	1.9
26	Stegenbach	5.7	32.4	10.6	1013	56.2	3.9	0.7	5.1	2.7	2.2
27	Alpbach	13.9	53.8	1.5	1271	55.7	6.1	0.7	8.3	3.8	2.8
28	Schwarzbach	19.2	23.9	4.1	1346	51.5	6.2	0.8	10.3	4.7	3.2
29	Erlibach	3.3	17.2	22.9	959	57.3	2.7	0.7	3.6	2.0	1.8
30	Bachligraben	4.4	11.9	11.9	950	53.9	4.3	0.6	5.4	2.7	2.2
31	Eggbach	3.3	27.7	6.3	1277	62.2	2.6	0.8	3.6	2.0	1.8
32	Glütschbach	3.5	29.7	1.0	1552	65.7	3.0	0.7	3.8	2.0	1.8
33	Färrichbach	2.4	6.3	0.0	1509	69.8	2.9	0.6	4.1	2.2	1.9
34	Sagibach	2.3	15.8	9.4	1148	57.6	3.3	0.5	3.8	2.5	2.0
35	Dündebach	3.9	9.3	4.1	1211	60.7	3.7	0.6	4.9	3.0	2.2
36	Richebach	3.8	14.1	41.6	728	51.7	4.2	0.5	5.9	3.5	2.5
37	Suld	4.8	23.1	21.1	1073	57.5	3.3	0.8	4.6	2.0	2.0
38	Latrejebach	10.8	85.8	13.9	1073	60.6	5.2	0.7	7.2	3.6	2.6
39	Allmebach	3.0	17.0	1.2	1208	52.6	2.9	0.7	3.6	2.4	1.9
40	Hubelgrabe	1.7	5.9	19.5	1171	50.2	3.3	0.4	4.1	2.2	1.9
41	Louenigrabe	0.8	6.6	6.6	980	49.7	1.9	0.5	2.2	1.5	1.4
42	Golitschbach	1.3	7.8	9.2	1069	51.1	2.4	0.5	2.9	1.7	1.6
43	Luxligrabe	0.8	1.7	29.2	925	48.6	1.9	0.5	2.3	1.2	1.4
44	Hundsgrabe	0.7	5.7	5.8	1338	57.9	2.2	0.4	2.5	1.6	1.5
45	Engeregrabe	1.0	3.0	28.6	1157	50.5	2.7	0.4	3.3	1.9	1.7
46	Fröschemoosbach	1.3	3.3	3.3	742	47.9	2.2	0.6	2.9	1.5	1.6
47	Stierewanggrabe	1.2	5.7	16.6	1186	52.9	2.2	0.6	2.8	1.5	1.5
48	Steinchenelgrabe	0.9	10.8	24.8	729	42.1	2.0	0.5	2.3	1.3	1.4
49	Gilsbach	6.4	27.8	10.2	1479	51.6	4.1	0.7	5.5	2.4	2.2
50	Allebach	9.1	101.0	7.2	1420	46.6	3.5	1.0	4.8	1.9	2.0

Tabelle B 6: Gebietskennwerte für die kleinen Teileinzugsgebiete (Daten: ZGRAGGEN 2009) (Fortsetzung)

Nr	Einzugsgebiet	A (km <sup>2</sup> )	GL (km)	Fwald (%)	Hmin (m ü.M.)	Nint (mm/h)	Lr (km)	Re	Lh (km)	LGS (km)	LI
51	Lintergrabe	0.7	6.3	18.7	933	40.0	2.5	0.4	2.9	1.4	1.5
52	Teufitalbach	1.0	1.9	32.2	869	41.9	2.0	0.5	2.2	1.4	1.4
53	Stampfibach	0.9	1.7	21.3	861	48.3	2.5	0.4	2.9	1.5	1.5
54	Haslibach	0.9	1.2	41.0	868	47.6	2.3	0.5	2.9	1.3	1.5
55	Chäligrabe	1.3	0.6	24.8	915	49.0	2.4	0.5	2.9	1.7	1.6
56	Herbisgräbli	0.6	0.7	20.6	765	47.4	2.3	0.4	2.6	1.4	1.5
57	Talgräbli	0.8	1.5	30.1	852	48.0	2.3	0.4	2.7	1.5	1.5
58	Staldegräbli	0.8	0.5	7.3	878	41.3	1.7	0.6	2.3	1.2	1.4
59	Büelbächli/Thönisbächli	2.2	2.8	18.1	879	43.2	2.9	0.6	3.2	1.7	1.7
60	Schafwiidgräbli	3.0	1.5	16.5	981	45.3	2.9	0.7	3.7	2.5	1.9
61	Bodmägeräbli/Trutegräbli	0.7	2.0	15.2	820	40.6	1.9	0.5	2.4	1.0	1.3
62	Stägefadgrabe	1.7	10.0	8.0	907	48.3	2.2	0.7	3.1	1.6	1.6
63	Ronegrabe	0.8	2.2	29.5	1000	53.2	1.9	0.5	2.4	1.2	1.4
64	Richtigrabe	0.7	3.8	54.9	930	55.1	2.1	0.4	2.5	1.4	1.5
65	Balmegrabe	0.5	4.6	12.1	875	45.8	1.4	0.6	1.6	1.1	1.2
66	Lugibächli	1.0	3.8	29.8	731	48.1	2.9	0.4	3.3	2.1	1.8
67	Gwindlibach	2.0	16.9	9.5	1169	59.2	3.0	0.5	4.0	1.9	1.8
68	Zällergraben	1.8	8.5	19.1	1125	57.1	2.8	0.5	3.6	2.0	1.8
69	Tannersgrabe	0.7	3.5	28.2	1178	63.3	1.4	0.7	1.7	1.1	1.2
70	Boumeregach	0.9	6.2	1.0	1472	67.4	1.7	0.6	2.1	1.2	1.3
71	Gamchibach	13.6	28.1	0.0	1598	65.3	4.7	0.9	5.9	3.1	2.4
72	Dürrebergbach	3.4	15.7	0.1	1507	68.2	3.6	0.6	4.4	2.2	2.0
73	Bundbach	2.8	15.8	0.9	1500	62.8	3.2	0.6	3.9	2.3	1.9
74	Innere Grünenemattgrabe	0.6	6.2	4.1	1489	62.9	1.9	0.5	2.3	1.3	1.4
75	Glauenegrabe	0.5	5.1	11.4	1198	59.6	1.8	0.4	2.1	1.2	1.3
76	Klöpfligrabe	0.5	3.5	68.5	682	43.2	1.9	0.4	2.2	1.3	1.4
77	Burggrabe	1.1	4.6	52.7	864	51.5	2.3	0.5	3.0	1.4	1.5
78	Ärmigrabe	0.7	5.5	8.2	1146	57.7	2.3	0.4	2.6	1.7	1.6
79	Schnattwenggrabe	0.7	3.5	0.0	1599	64.7	2.1	0.4	2.6	1.3	1.4
80	Allmigrabe	1.3	8.3	7.5	1018	54.9	2.2	0.6	2.6	1.4	1.5
81	Saregrabe	0.6	3.8	35.5	1053	55.0	1.5	0.6	1.8	0.9	1.2
82	Sidersgrabe	0.6	4.0	42.6	716	42.0	2.0	0.4	2.5	1.2	1.4
83	Hengst	2.6	18.1	0.2	1565	68.4	2.5	0.7	3.6	2.2	1.9
84	Wyssbach	1.5	6.5	0.0	1510	69.0	2.2	0.6	2.9	1.7	1.6
85	Schwarzbächli	2.1	6.3	22.8	706	48.3	2.8	0.6	3.6	2.1	1.8
86	Chendligrabe	1.9	0.8	22.0	1024	50.7	2.2	0.7	3.2	1.7	1.7
87	Innerwangsgrabe	0.6	6.8	6.9	856	47.1	1.7	0.5	2.0	1.3	1.3
88	Tannegrabe	0.9	4.3	14.2	1169	49.1	3.0	0.4	3.7	1.8	1.8
89	Wildelsiggrabe	3.7	4.6	0.0	1457	50.0	3.2	0.7	3.8	2.0	1.8
90	Silleregrabe	1.9	3.4	0.0	1432	54.4	2.7	0.6	3.1	1.8	1.7
91	Leitibach	6.0	12.4	0.4	1571	48.3	3.7	0.7	4.4	2.2	2.0
92	Märbegggrabe	1.1	3.1	0.0	1781	51.1	1.6	0.7	1.8	1.1	1.2
93	Sackgrabe	0.8	4.5	0.0	1789	52.5	1.5	0.7	2.1	1.1	1.3
94	Gasterntal	25.4					7.7	0.7	9.9	4.3	3.1
95	Witefadgrabe	0.9	5.1	0.0	1829	53.1	1.7	0.6	2.0	1.1	1.2
96	Fulbach	1.3	4.3	0.0	1985	54.5	2.3	0.6	2.8	1.5	1.5
97	Innere Staldigrabe	0.6	3.0	2.2	1626	53.0	1.5	0.6	1.8	0.9	1.1
98	Schneegrabe	0.5	4.7	0.0	1739	53.7	1.8	0.4	2.0	1.0	1.2
99	Arbewanggrabe	0.5	5.8	0.0	1835	54.3	1.6	0.5	1.8	1.0	1.2

# Anhang C

## **Hochwasserabschätzungen für alle Teileinzugsgebiete**





Tabelle C 1: Hochwasserabschätzungen für die mesoskaligen Einzugsgebiete. Extremwertstatistische Auswertung von modellierten Abflussdaten (Periode: 1984-2005).

Einzugsgebiet	Fläche [km <sup>2</sup> ]	HQ30 [m <sup>3</sup> /s]	HQ100 [m <sup>3</sup> /s]	HQ300 [m <sup>3</sup> /s]	Hq30 [m <sup>3</sup> /s·km <sup>2</sup> ]	Hq100 [m <sup>3</sup> /s·km <sup>2</sup> ]	Hq300 [m <sup>3</sup> /s·km <sup>2</sup> ]	Methode*
Kander-Hondrich	495.6	274.9	342.7	412.8	0.55	0.70	0.83	mod
Kander-Mülenen	461.8	222.2	272.1	322.3	0.48	0.59	0.70	reg
Kander-Kien	355.9	168.8	209.0	250.4	0.47	0.59	0.70	reg
Kander-Frutigen	183.1	79.7	96.2	112.7	0.44	0.53	0.62	mod
Kander-Kandersteg	142.7	66.5	76.7	85.9	0.47	0.54	0.60	mod
Kander-Chluse	81.5	53.6	69.7	89.1	0.67	0.88	1.12	reg
Kander-Gasteretal	41.5	29.6	37.9	45.6	0.71	0.91	1.10	reg
Engstlige-Frutigen	145.2	87.1	104.4	119.6	0.60	0.72	0.82	mod
Enstlige-Adelboden	72.9	74.5	84.9	93.5	1.02	1.16	1.28	mod
Allenbach-Adelboden	28.8	33.4	39.8	45.6	1.16	1.38	1.58	mod
Chiene-Kien	90.5	65.9	85.8	108	0.73	0.95	1.19	reg
Spigge-Kiental	24.8	20.6	24.4	27.7	0.83	0.99	1.12	reg
Gornerewasser-Kiental	47.0	32.5	37.6	42.1	0.69	0.80	0.90	reg
Suld-Mülenen	24.0	17.2	21.7	26.4	0.72	0.91	1.10	reg

\* Methode: mod = modelliert, reg = regionalisiert

Tabelle C 2: Hochwasserabschätzungen für die mesoskaligen Einzugsgebiete. Resultate aus HQx\_meso\_CH für den 100-jährlichen Hochwasserspitzenabfluss HQ100.

Einzugsgebiet	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Kölla HQ100 [m <sup>3</sup> /s]	GIUB Fn HQ100 [m <sup>3</sup> /s]	GIUB MQ HQ100 [m <sup>3</sup> /s]	Momente HQ100 [m <sup>3</sup> /s·km <sup>2</sup> ]	BaD7 HQ100 [m <sup>3</sup> /s·km <sup>2</sup> ]	Median HQ100 [m <sup>3</sup> /s·km <sup>2</sup> ]	Mod HQ100 [m <sup>3</sup> /s·km <sup>2</sup> ]
Kander-Hondrich	495.6	171.9	233.6	223.0	271.6	335.3	<b>233.6</b>	342.7
Kander-Mülenen	461.8	287.0	216.4	213.9	244.8	270.4	<b>244.8</b>	272.1
Kander-Kien	355.9	250.5	180.4	178.0	192.5	218.8	<b>192.5</b>	209.0
Kander-Frutigen	183.1	87.1	84.4	73.0	114.9	95.6	<b>87.1</b>	96.2
Kander-Kandersteg	142.7	110.5	51.6	59.7	101.0	55.9	<b>59.7</b>	76.7
Kander-Chluse	81.5	62.5	42.3	49.8	66.1	63.5	<b>62.5</b>	69.7
Kander-Gasteretal	41.5	38.3	20.9	23.1	35.8	25.0	<b>25.0</b>	37.9
Engstlige-Frutigen	145.2	124.6	107.2	95.9	116.9	122.5	<b>116.9</b>	104.4
Enstlige-Adelboden	72.9	106.2	69.2	58.5	70.3	72.4	<b>70.3</b>	84.9
Allenbach-Adelboden	28.8	56.8	54.7	46.1	40.3	70.2	<b>54.7</b>	39.8
Chiene-Kien	90.5	129.0	36.7	45.3	70.3	81.9	<b>70.3</b>	85.8
Spigge-Kiental	24.8	39.8	34.1	32.6	30.6	37.5	<b>34.1</b>	24.4
Gornerewasser-Kiental	47.0	63.3	51.0	52.5	42.6	62.9	<b>52.5</b>	37.6
Suld-Mülenen	24.0	47.9	17.6	16.4	31.0	24.5	<b>24.5</b>	21.7

Median: Median aus allen Abschätzungen. Mod: Extremwertstatistische Auswertung modellierter Abflussdaten (vgl. Tabelle C 1).

# Methoden der Technischen Berichte

## a) Modifiziertes Fließzeitverfahren nach Forster (RICKLI & FORSTER 1997)

$$Q(x) = 0.278 \cdot \Psi \cdot i(T_c, x) \cdot E$$

Gleichung C 1

mit:	$Q(x)$	=	$x$ -jährlicher Hochwasserspitzenabfluss [ $m^3/s$ ]
	$\Psi$	=	Abflusskoeffizient [-]
	$E$	=	Einzugsgebietsfläche [ $km^2$ ]
	$x$	=	Wiederkehrdauer [a]
	$i(T_c, x)$	=	Niederschlagsintensität in Abhängigkeit der Konzentrationszeit ( $T_c$ ) und der Wiederkehrdauer ( $x$ ) [ $mm/h$ ]

## b) Hochwasserabschätzmethode nach Kölla (SPREAFICO 2003)

$$HQ(x) = [i(T_c, x) - f(T_c, x)] \cdot FL_{eff} \cdot k_G + Q_{GL}$$

Gleichung C 2

mit:	$HQ(x)$	=	$x$ -jährlicher Hochwasserspitzenabfluss [ $m^3/s$ ]
	$i(T_c, x)$	=	Niederschlagsintensität in Abhängigkeit der Konzentrationszeit ( $T_c$ ) und der Wiederkehrdauer ( $x$ ) [ $mm/h$ ]
	$f(T_c, x)$	=	Verluste an den Untergrund [ $mm/h$ ]
	$T_c$	=	Konzentrationszeit [h] = $T_B + T_{FL}$
	$T_B$	=	Benetzungszeit [h]
	$T_{FL}$	=	Fliesszeit [h]
	$FL_{eff}$	=	effektiv zum Hochwasser beitragende Fläche [ $km^2$ ]
	$k_G$	=	Faktor für abflusserhöhenden Effekt bei feuchten Vorbedingungen [-]
	$Q_{GL}$	=	Gletscherabfluss [ $m^3/s$ ]

Tabelle C 3: 100-jährliche Hochwasserabflussspende (in  $\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{km}^2$ ) für die kleinen Teileinzugsgebiete im Einzugsgebiet Kander-Hondrich, abgeschätzt mit verschiedenen Methoden und Synthese. (Daten: ZGRAGGEN 2009)

Nr.	Name	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Technische Berichte	Schaffner	HAKESCH	HQx_ meso_CH	Synthese
1	Louwibach	3.6	2.8	4.1			3.5
2	Schlundbach	4.0	2.9	4.6			3.8
3	Heitibach	4.0	3.0	3.7			3.4
4	Gunggbach	3.1	4.9	4.4			4.7
5	Leimbach	2.5	7.5	4.1	4.9		4.9
6	Bräschgegrabe	3.0	4.6	5.4			5.0
7	Gantebach	5.1	5.2	3.8			4.5
8	Zwüschbächgrabe	1.7	5.5	7.2			6.4
9	Gempelegrabe	1.7	6.3	7.3			6.8
10	Chratzeregrabe	1.5	6.1	7.0			6.6
11	Ladholzgrabe	2.8	5.9	6.1			6.0
12	Bettbach	2.7	5.2	6.0			5.6
13	Otterebach	6.3	3.4	3.7			3.6
14	Tschentbach	8.0	3.7	3.5			3.6
15	Chlyne Grabe	0.5	9.0	8.4			8.7
16	Stigelbach	2.1	8.3	7.3			7.8
17	Bütschibach	6.0	1.7	1.8			1.8
18	Ärtelenbach	3.1	6.2	6.8			6.5
19	Engstlige	17.0	2.0	2.4		1.7	2.1
20	Bunderlebächli	9.3	2.0	2.6			2.3
21	Marchbach	3.3	5.0	4.3			4.7
22	Elsigbach	5.5	3.9	1.7			2.8
23	Lochbach	1.4	3.7	5.2			4.5
24	Bunderbach	1.4	8.8	10.6			9.7
25	Rotbach	2.3	3.5	6.0			4.8
26	Stegenbach	5.7	2.2	4.8			3.5
27	Alpbach	13.9	1.8	2.7		1.7	2.1
28	Schwarzbach	19.2		1.0		1.5	1.3
29	Erlibach	3.3	5.2	6.1	7.5		7.5
30	Bachligraben	4.4		3.7	4.9		4.9
31	Eggbach	3.3		7.3	8.0		8.0
32	Glütschbach	3.5		6.3	8.6		8.6
33	Färrichbach	2.4		5.0	8.5**		6.8
34	Sagibach	2.3		8.2	8.4		8.4
35	Dündebach	3.9		3.8	5.6		5.6
36	Richebach	3.8	2.5	3.9			3.2
37	Suld	4.8		4.6	7.4		7.4
38	Latrejebach	10.8		4.1		2.2	3.2
39	Allmebach	3.0	4.8	5.6	7.0		7.0
40	Hubelgrabe	1.7	5.8	5.5			5.7
41	Louenigrabe	0.8	11.4	15.0			11.4
42	Golitschbach	1.3	10.6	9.1			9.9
43	Luxligrabe	0.8	2.4	6.8			2.4
44	Hundsgrabe	0.7	11.1	15.0			11.1
45	Engeregrabe	1.0	5.8	6.3			6.1
46	Fröschemoosbach	1.3	2.7	7.1			2.7
47	Stierewanggrabe	1.2	10.3	8.5			9.4
48	Steinchenelgrabe	0.9	9.4	14.4			9.4
49	Gilsbach	6.4	2.9	2.7			2.8
50	Allebach	9.1	4.2	3.2			3.7

\* = Abschätzung überprüft und belassen; \*\* = Abschätzung nicht plausibel (zu überprüfen)

Tabelle C 4: 100-jährliche Hochwasserabflusssspende (in  $\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{km}^2$ ) für die kleinen Teileinzugsgebiete im Einzugsgebiet Kander-Hondrich, abgeschätzt mit verschiedenen Methoden sowie Synthese (Daten: ZGRAGGEN 2009).

Nr.	Name	Fläche [ $\text{km}^2$ ]	Tech. Berichte	Schaffner	HAKESCH	HQx_ meso_CH	Synthese
51	Lintergrabe	0.7	6.1	11.6			6.1
52	Teufitalbach	1.0	4.4	5.0			4.7
53	Stampfibach	0.9	3.8	6.9			3.8
54	Haslibach	0.9	4.4	4.4			4.4
55	Chälligrabe	1.3	3.8	2.7*			3.3
56	Herbisgräbli	0.6	3.9	6.4			3.9
57	Talgräbli	0.8	3.8	6.6			3.8
58	Staldegräbli	0.8	4.1	3.5*			3.8
59	Büelbächli/Thönisbächli	2.2	4.1	2.9*			3.5
60	Schafwijdgräbli	3.0	4.3	1.7			3.0
61	Bodmäggräbli/Trutegräbli	0.7	5.0	7.7			5.0
62	Stägefadgrabe	1.7	10.7	8.1			9.4
63	Ronegrabe	0.8	9.5	8.3			8.9
64	Richtigrabe	0.7	9.4	9.5			9.5
65	Balmegrabe	0.5	8.8	17.7			8.8
66	Lugibächli	1.0	2.6	8.1			2.6
67	Gwindlibach	2.0		9.6	8.5		8.5
68	Zällergaben	1.8		7.2	7.1		7.1
69	Tannersgrabe	0.7		12.9			12.9
70	Boumeregach	0.9		12.8			12.8
71	Gamchibach	13.6		2.0		1.6	1.8
72	Dürrebergbach	3.4		5.2	9.5**		7.4
73	Bundbach	2.8		5.7	7.5		7.5
74	Innere Grünenemattgrabe	0.6		18.7			18.7
75	Glauenegrabe	0.5		21.3			21.3
76	Klöpflgrabe	0.5		7.6			7.6
77	Burggrabe	1.1		6.1			6.1
78	Ärmigrabe	0.7		17.4			17.4
79	Schnattwenggrabe	0.7		11.6			11.6
80	Allmigrabe	1.3	8.7	10.6			9.7
81	Saregrabe	0.6	10.9	14.0			10.9
82	Sidersgrabe	0.6	6.2	11.6			6.2
83	Hengst	2.6		6.9	9.2**		8.1
84	Wyssbach	1.5		7.9	9.0**		8.5
85	Schwarzbächli	2.1	2.3	5.4			2.3
86	Chendligrabe	1.9	0.9	2.1*			1.5
87	Innerwangsgrabe	0.6	10.0	18.9			10.0
88	Tannegrabe	0.9	5.8	8.6			5.8
89	Wildelsiggrabe	3.7		2.0			2.0
90	Silleregrabe	1.9		3.7			3.7
91	Leitibach	6.0		1.7			1.7
92	Märbegggrabe	1.1		4.1			4.1
93	Sackgrabe	0.8		6.9			6.9
94	Gasteretal	25.4				1.3	1.3
95	Witefadgrabe	0.9		6.6			6.6
96	Fulbach	1.3		3.7			3.7
97	Innere Staldigrabe	0.6		9.8			9.8
98	Schneeegrabe	0.5		13.7			13.7
99	Arbewanggrabe	0.5		12.3			12.3

\* = Abschätzung überprüft und belassen; \*\* = Abschätzung nicht plausibel (zu überprüfen)

# Anhang D

## **Ergänzende Gütemasse zur Validierung der Modellkaskade und Sensitivitätsflächen weiterer Parameter**



Tabelle D 1: Validierung der Versionen des hydrologischen Modells. (1981-1999, HQa, Gütemasse vgl. Kapitel 19.1.2)

<b>Modellversion</b>	<b>NSE</b>	<b>VE</b>	<b>IOA</b>	<b>IOA<sub>w</sub></b>	<b>MSE</b>	<b>MWAE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Rang</b>
DTIDW_8387	-0.334	0.835	0.701	0.529	342	10988	0.362	2
DTIDW_9802	-3.787	0.639	0.480	0.275	1225	21135	0.209	4
IDW_8387	0.637	0.904	0.933	0.694	93	6058	0.841	1
IDW_9802	-0.345	0.795	0.803	0.463	344	12991	0.744	3

Tabelle D 2: Validierung der Versionen der Modellkaskade. (1981-1999, HQa, Gütemasse vgl. Kapitel 19.1.2)

<b>Modellversion</b>	<b>NSE</b>	<b>VE</b>	<b>IOA</b>	<b>IOA<sub>w</sub></b>	<b>MSE</b>	<b>MWAE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Rang</b>
be3c3_DTIDW_8387	-0.225	0.831	0.668	0.495	313	12108	0.256	5
be3c3_DTIDW_9802	-2.840	0.678	0.490	0.280	983	19256	0.276	7
be3c3_IDW_8387	0.196	0.867	0.812	0.592	206	8701	0.482	1
be3c3_IDW_9802	0.136	0.861	0.807	0.577	221	8661	0.512	2
cb3c2_DTIDW_8387	-0.239	0.841	0.636	0.503	317	11743	0.215	6
cb3c2_DTIDW_9802	-3.320	0.657	0.425	0.241	1106	20719	0.159	8
cb3c2_IDW_8387	0.018	0.841	0.758	0.511	251	10695	0.396	4
cb3c2_IDW_9802	0.149	0.856	0.787	0.548	218	9402	0.415	3

Tabelle D 3: Validierung der Versionen des hydrologischen Modells. (1981-1999, MQa, Gütemasse vgl. Kapitel 19.1.2)

<b>Modellversion</b>	<b>NSE</b>	<b>VE</b>	<b>IOA</b>	<b>IOA<sub>w</sub></b>	<b>MSE</b>	<b>MWAE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Rang</b>
DTIDW_8387	-0.619	0.871	0.746	0.519	39845	8163505	0.719	4
DTIDW_9802	0.474	0.936	0.890	0.712	12949	4430407	0.691	2
IDW_8387	0.447	0.926	0.874	0.657	13614	4823194	0.844	3
IDW_9802	0.583	0.941	0.897	0.711	10260	3915221	0.832	1

Tabelle D 4: Validierung der Versionen der Modellkaskade. (1981-1999, MQa, Gütemasse vgl. Kapitel 19.1.2)

<b>Modellversion</b>	<b>NSE</b>	<b>VE</b>	<b>IOA</b>	<b>IOA<sub>w</sub></b>	<b>MSE</b>	<b>MWAE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Rang</b>
be3c3_DTIDW_8387	-0.025	0.902	0.816	0.602	25217	6227694	0.753	8
be3c3_DTIDW_9802	0.258	0.911	0.858	0.622	18267	5923393	0.733	5
be3c3_IDW_8387	0.404	0.923	0.868	0.653	14657	4995811	0.813	4
be3c3_IDW_9802	0.565	0.940	0.896	0.715	10706	3957197	0.817	2
cb3c2_DTIDW_8387	0.104	0.911	0.833	0.631	22047	5668701	0.745	6
cb3c2_DTIDW_9802	0.115	0.902	0.835	0.589	21772	6509990	0.724	7
cb3c2_IDW_8387	0.404	0.924	0.869	0.656	14658	4953570	0.814	3
cb3c2_IDW_9802	0.568	0.941	0.897	0.718	10637	3922550	0.815	1

Tabelle D 5: Validierung der Versionen des hydrologischen Modells. (1933-2005, HQa, Gütemasse vgl. Kapitel 19.1.2)

Modellversion	NSE	VE	IOA	IOA <sub>w</sub>	MSE	MWAE	R <sup>2</sup>	Rang
DTIDW_8387	0.065	0.787	0.647	0.487	645	19639	0.251	3
DTIDW_9802	-1.239	0.637	0.639	0.406	1544	21916	0.365	4
IDW_8387	0.549	0.846	0.899	0.643	311	13306	0.666	1
IDW_9802	0.126	0.781	0.850	0.563	603	17732	0.685	2

Tabelle D 6: Validierung der Versionen der Modellkaskade. (1933-2005, HQa, Gütemasse vgl. Kapitel 19.1.2)

Modellversion	NSE	VE	IOA	IOA <sub>w</sub>	MSE	MWAE	R <sup>2</sup>	Rang
be3c3_DTIDW_8387	-0.051	0.785	0.521	0.449	725	21460	0.118	2
be3c3_DTIDW_9802	-0.460	0.674	0.598	0.334	1007	22167	0.250	6
be3c3_IDW_8387	-0.110	0.778	0.562	0.464	765	21741	0.131	3
be3c3_IDW_9802	0.116	0.794	0.634	0.471	610	19113	0.196	1
cb3c2_DTIDW_8387	-0.154	0.786	0.489	0.447	796	22058	0.061	5
cb3c2_DTIDW_9802	-0.666	0.664	0.497	0.307	1149	24324	0.114	8
cb3c2_IDW_8387	-0.346	0.760	0.496	0.435	929	24227	0.055	7
cb3c2_IDW_9802	-0.107	0.781	0.521	0.444	763	21617	0.089	4

Tabelle D 7: Validierung der Versionen des hydrologischen Modells. (1933-2005, MQa, Gütemasse vgl. Kapitel 19.1.2)

Modellversion	NSE	VE	IOA	IOA <sub>w</sub>	MSE	MWAE	R <sup>2</sup>	Rang
DTIDW_8387	-0.570	0.857	0.729	0.478	44541	8703600	0.669	4
DTIDW_9802	0.623	0.938	0.913	0.732	10710	3857871	0.718	1
IDW_8387	0.008	0.886	0.802	0.539	28150	6954143	0.742	3
IDW_9802	0.220	0.901	0.827	0.573	22126	6133519	0.755	2

Tabelle D 8: Validierung der Versionen der Modellkaskade. (1933-2005, MQa, Gütemasse vgl. Kapitel 19.1.2)

Modellversion	NSE	VE	IOA	IOA <sub>w</sub>	MSE	MWAE	R <sup>2</sup>	Rang
be3c3_DTIDW_8387	-0.113	0.883	0.788	0.540	31566	7108358	0.695	6
be3c3_DTIDW_9802	0.517	0.927	0.894	0.694	13713	4513973	0.732	1
be3c3_IDW_8387	-0.162	0.875	0.782	0.513	32961	7572041	0.725	7
be3c3_IDW_9802	0.071	0.891	0.808	0.552	26341	6668263	0.734	4
cb3c2_DTIDW_8387	0.023	0.892	0.806	0.566	27702	6552765	0.692	5
cb3c2_DTIDW_9802	0.429	0.920	0.878	0.670	16209	4898933	0.729	2
cb3c2_IDW_8387	-0.162	0.875	0.782	0.513	32965	7554112	0.723	8
cb3c2_IDW_9802	0.073	0.891	0.808	0.552	26300	6651897	0.731	3



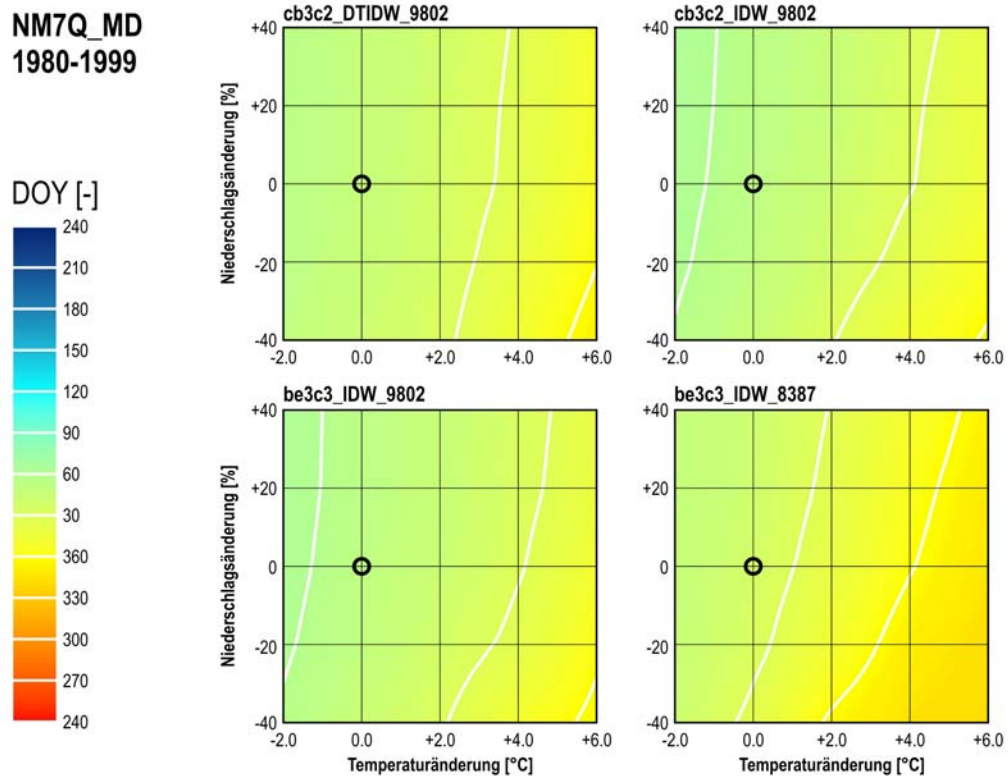


Abbildung D 1: Sensitivitätsanalyse des NM7Q\_MD mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999). Referenzzustand: schwarzer Kreis.

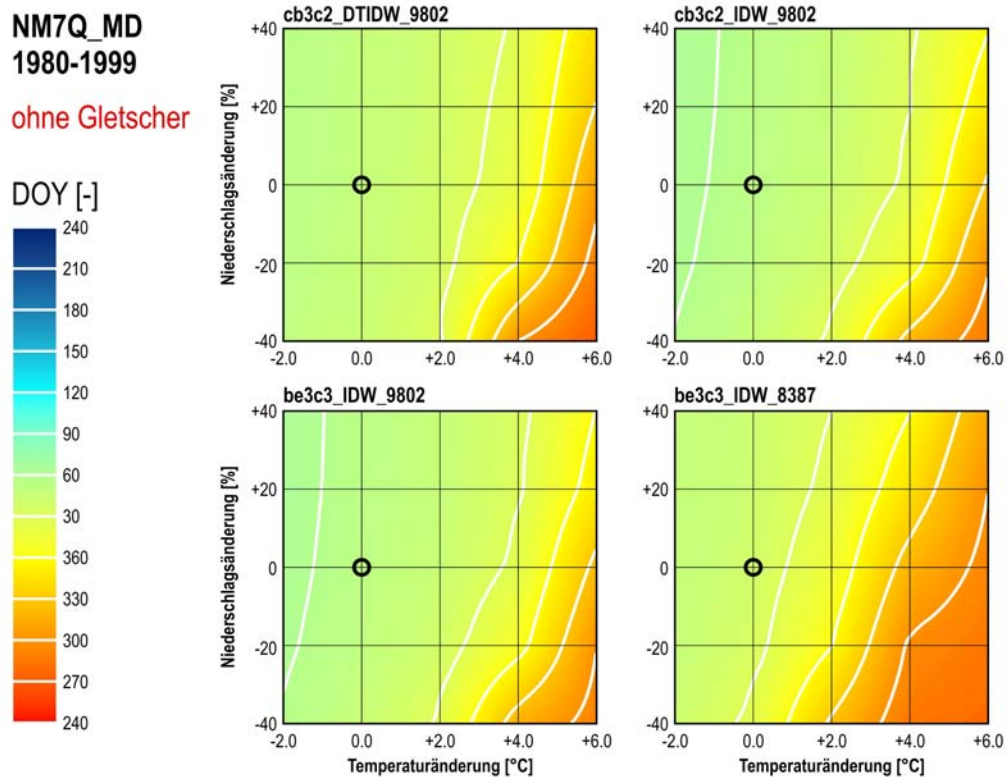


Abbildung D 2: Sensitivitätsanalyse des NM7Q\_MD ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999). Referenzzustand: schwarzer Kreis.

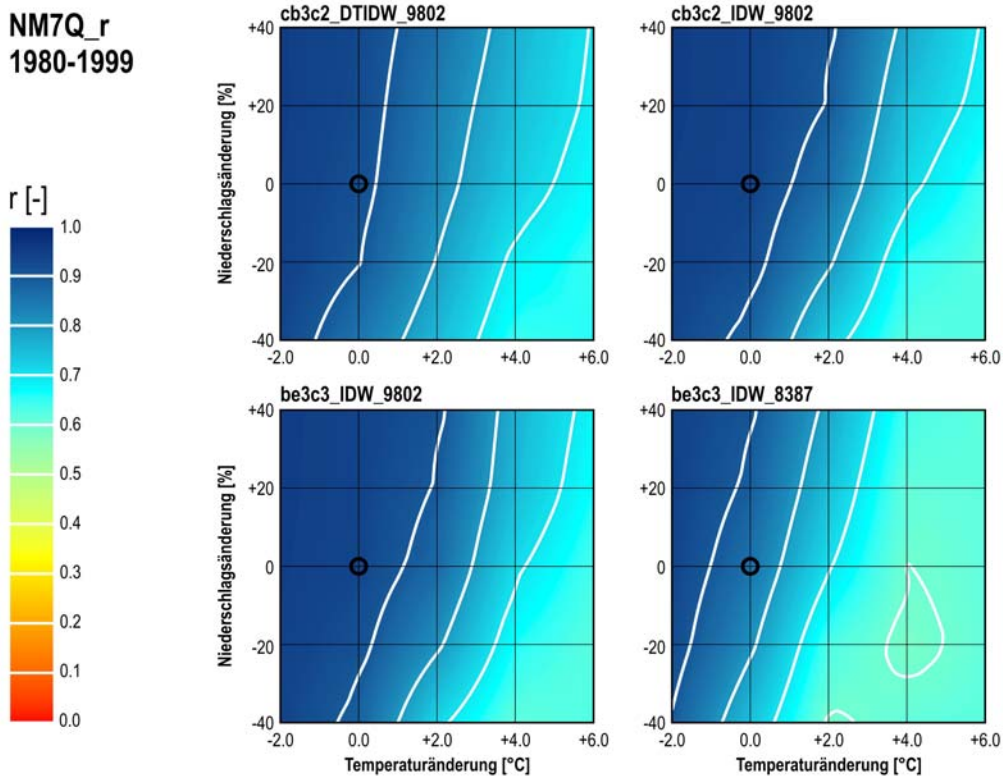


Abbildung D 3: Sensitivitätsanalyse des NM7Q\_r mit aktueller Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999). Referenzzustand: schwarzer Kreis.

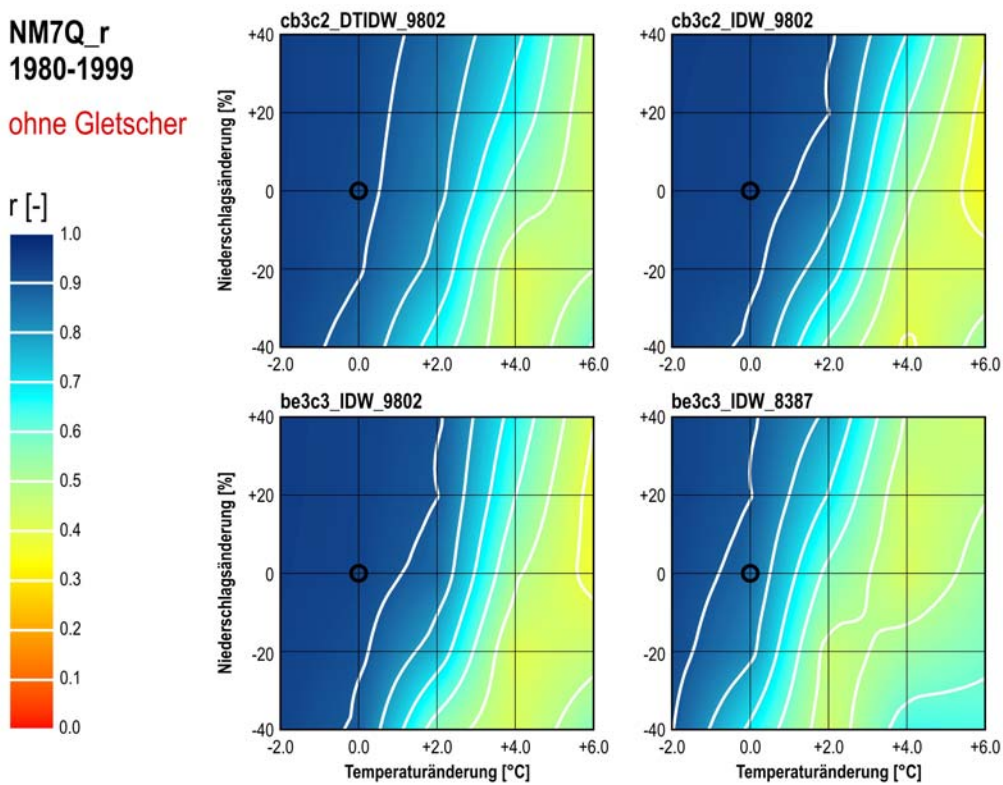


Abbildung D 4: Sensitivitätsanalyse des NM7Q\_r ohne Vergletscherung (Kander-Hondrich, Tagesmittelwerte, 1980-1999). Referenzzustand: schwarzer Kreis.

# Anhang E

## **Untersuchungen zur Hochwasserhydrologie der Engstlige-Frutigen**



Bern, 14. November 2008



---

b UNIVERSITÄT  
BERN

Geographisches Institut

Gruppe für Hydrologie

Hydrologische Untersuchungen für das Einzugsgebiet  
der Engstlige bis Frutigen

**Hochwasserabschätzung und hydrologische  
Modellierung ausgewählter Niederschlagszenarien**

Bernhard Wehren, Rolf Weingartner

Hallerstrasse 12  
CH - 3012 Bern

Tel: +41 (0)31 631 80 21  
Fax: +41 (0)31 631 85 11

wehren@giub.unibe.ch  
www.hydrologie.unibe.ch

## Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht entstand im Zusammenhang mit der Überarbeitung der Gefahrenkarte der Gemeinde Frutigen. Neben einer hydrologischen Charakterisierung der Mittel- und Hochwasserverhältnisse im Einzugsgebiet der Engstlige bis Frutigen sollten die durchgeführten Arbeiten vor allem auch das mögliche Abflussgeschehen bei seltenen bis extremen Hochwasserereignissen untersuchen.

Da die Engstlige bis Frutigen nur über eine kurze Abflussmessreihe von 13 Jahren verfügt, sind extremwertstatistische Auswertungen der vorhandenen Daten mit grosser Unsicherheit behaftet. Ausserdem muss davon ausgegangen werden, dass trotzdem in den letzten Jahren grosse überregionale Hochwasserereignisse auftraten, lokale extreme Ereignisse nicht in den Abflussmessungen enthalten sind. Deshalb wurde unter Einsatz des hydrologischen Modellsystems PREVAH (Viviroli et al. 2007) der Abfluss für den Pegel Engstlige-Frutigen für den Zeitraum 1984 bis 2007 kontinuierlich und in Stundenauflösung simuliert. Mit Hilfe des hydrologischen Modells war es zudem möglich, die Auswirkungen von extremen Niederschlagsereignissen auf den Abfluss zu untersuchen. Die modellierten und gemessenen Abflussdaten wurden anschliessend mit verschiedenen Methoden ausgewertet und analysiert.

Bei der Engstlige bis Frutigen handelt es sich um ein alpines, unvergletschertes Einzugsgebiet mittlerer Höhenlage; dementsprechend weisen auch die verschiedenen hydrologischen Kennwerte die für diese Einzugsgebiete typischen Werte auf: Das Abflussregime ist stark durch die Schneeschmelze in den Monaten Mai und Juni geprägt, die Hochwasser treten vor allem im Sommerhalbjahr auf. Der in einzelnen Monaten überproportionale Einfluss des grössten Teileinzugsgebietes (Allenbach-Adelboden) ist für die Engstlige in Frutigen nachzuweisen. Allerdings ist der Zusammenhang vor allem auch bei den Hochwasserabflüssen mit zu grossen Unsicherheiten verbunden, als dass von einer Messreihe direkt auf die andere geschlossen werden könnte. Die mit verschiedenen Methoden durchgeführten Hochwasserabschätzungen weisen darauf hin, dass für die Engstlige in Frutigen mit einem  $HQ_{100}$  von 115 bis 120  $m^3/s$  gerechnet werden muss. Dieser Wert liegt deutlich tiefer als die Angaben in den bisher vorhandenen Untersuchungen.

Zur Modellierung und Abschätzung der Auswirkungen seltener und extremer Niederschlagsereignisse auf den Abfluss der Engstlige wurden Niederschlagszenarien mit zwei unterschiedlichen Ansätzen entwickelt: Zum einen wurden die im Zeitraum 1984-2007 aufgetretenen grössten Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Dauer auf einen entsprechenden 100-jährlichen Wert skaliert. Andererseits wurden die intensivsten Niederschlagszentren, welche während dem Hochwasserereignis vom August 2005 aufgetreten sind, in das Einzugsgebiet der Engstlige verschoben. Die Modellierung dieser Szenarien zeigt, dass bei zunehmender Niederschlagsdauer sowohl bei den Abflussspitzen als auch bei den -volumen der Engstlige eine zum Teil sehr grosse Zunahme zu beobachten ist. Bei den mit Hilfe der 100-jährlichen mengenskalierten Niederschlagszenarien modellierten Ereignissen resultierte für die Abflussspitze je nach Ereignisdauer ein Wert zwischen 76 und 134  $m^3/s$ . Die beiden mit den räumlich verschobenen Niederschlagszenarien modellierten Ereignisse ergeben dagegen eine Abflussspitze von 145 bzw. 160  $m^3/s$ . Allerdings handelt es sich dabei um sehr seltene bzw. extreme Szenarien, deren meteorologische Plausibilität noch weiter untersucht werden muss.

Trotz bestehender Unsicherheiten, welche einerseits durch die verwendeten Daten andererseits durch die hydrologische Modellierung hervorgerufen werden, konnten für die Engstlige-Frutigen plausible Ganglinien seltener bis extremer Abflussereignisse erstellt werden sowie die zu erwartenden Hochwasserabflussspitzen und -mengen quantifiziert werden.

Bern, 14. November 2008

Bericht im Auftrag von:

Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern  
Tiefbauamt, Oberingenieurkreis I  
Schlossberg 20  
3601 Thun

Kontaktperson: Ernst Spycher

Tel.: +41 (0) 33 225 10 67

Fax: +41 (0) 33 225 10 70

eMail: ernst.spycher@bve.be.ch

Hunziker, Zarn & Partner AG

Ingenieurbüro für Fluss- und Wasserbau  
Schachenallee 29  
5000 Aarau

Kontaktperson: Michael Schilling

Tel.: +41 (0) 62 823 94 61

Fax: +41 (0) 62 823 94 66

eMail: mschilling@hzp.ch

Autoren:

Bernhard Wehren, dipl. Geograph  
Prof. Dr. Rolf Weingartner

Geographisches Institut der Universität Bern  
Gruppe für Hydrologie  
Hallerstrasse 12  
3012 Bern

Tel.: +41 (0) 31 631 80 21

Fax: +41 (0) 31 631 85 11

eMail: wehren@giub.unibe.ch

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problem- und Fragestellung	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehen	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen	5
2.1	Untersuchungsgebiet	5
2.2	Hydrologische Daten	9
2.3	Meteorologische Daten	10
2.4	Bisherige Untersuchungen	10
3	Methoden und Vorgehen	13
3.1	Datenanalyse	13
3.2	Hydrologische Modellierungen	15
3.3	Erstellung der Niederschlagszenarien	16
4	Resultate	23
4.1	Auswertung hydrologischer Daten	23
4.2	Auswertung der meteorologischen Daten	33
4.3	Ergebnisse der mengenskalierten Niederschlagszenarien	35
4.4	Ergebnisse der räumlich verschobenen Niederschlagszenarien	38
5	Diskussion und Schlussfolgerungen	41
6	Quellen	45
6.1	Literatur	45
6.2	Software	47
	Anhang	49

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Niederschlagssumme [mm] für die Dauer vom 21. bis 22. August 2008.....	1
Abbildung 2:	Einzugsgebiet der Engstlige.....	6
Abbildung 3:	Flussprofil der Engstlige.....	7
Abbildung 4:	Auswertung der Primärflächen für das Einzugsgebiet der Engstlige-Frutigen.....	7
Abbildung 5:	Mittlerer monatlicher Abfluss der Engstlige-Frutigen.....	8
Abbildung 6:	Verfügbare hydrologische Daten im Einzugsgebiet der Engstlige.....	9
Abbildung 7:	Vergleich der extremwertstatistischen Auswertung der Gebietsniederschläge verschiedener Zeiträume (ganzes Jahr, saisonal) unter Anwendung zweier Methoden.....	14
Abbildung 8:	Auswirkungen der mit verschiedenen Methoden extrapolierten 100-jährlichen Niederschlagsintensitäten auf die Resultate der Modellierung.....	15
Abbildung 9:	Auswirkungen der mit verschiedenen Methoden extrapolierten 100-jährlichen Niederschlagsintensitäten auf die Resultate der Modellierung am Beispiel des Hochwasserereignisses vom 21. bis 23. August 2005.....	18
Abbildung 10:	Niederschlagssumme vom 20. bis 23. August 2005 (jeweils 7:00 Uhr MEZ).....	19
Abbildung 11:	Schematische Darstellung zur Verschiebung der Niederschlagsfelder bzw. zur Entwicklung der beiden räumlich verschobenen Niederschlagszenarien A und B.....	20
Abbildung 12:	Niederschlagssummen im Einzugsgebiet der Engstlige bzw. der Kander für den Zeitraum vom 20. bis 23. August 2005 (jeweils 7:00 Uhr MEZ). Gemessene Niederschlagssumme und räumlich verschobene Niederschlagszenarien.....	21
Abbildung 13:	Engstlige-Frutigen: Jährliche Hochwasser der Periode 1984-2007.....	24
Abbildung 14:	Engstlige-Frutigen: Frequenzanalyse der jährlichen Hochwasserspitzen.....	25
Abbildung 15:	Saisonale Verteilung der jährlichen Hochwasserspitzen und -volumen für die Engstlige in Frutigen.....	27
Abbildung 16:	Saisonale Verteilung der jährlichen Hochwasserspitzen für die Engstlige in Frutigen.....	28
Abbildung 17:	Zusammenhang zwischen den gemessenen Stundenmittelwerten der monatlichen Hochwasserspitzen der Engstlige-Frutigen und den entsprechenden Hochwasserspitzen von Allenbach-Adelboden.....	29
Abbildung 18:	Zusammenhang zwischen den gemessenen Tagesmittelwerten der monatlichen Hochwasserabflüssen der Engstlige-Frutigen und den entsprechenden Abflussmengen von Allenbach-Adelboden.....	30
Abbildung 19:	Prozentualer Anteil des mittleren täglichen Abflusses von Allenbach-Adelboden am mittleren täglichen Abfluss von Engstlige-Frutigen.....	31
Abbildung 20:	Prozentualer Anteil der Abflussspitze von Allenbach-Adelboden an der monatlichen Hochwasserspitze von Engstlige-Frutigen.....	32
Abbildung 21:	Zusammenhang zwischen monatlicher Abflussspitze und vorherrschender Wetterlage im Alpenraum.....	32
Abbildung 22:	Niederschlagsdauer-Intensitäts-Diagramm für die Gebietsniederschläge der Engstlige-Frutigen.....	34
Abbildung 23:	Zusammenfassung der aus skalierten Niederschlagsereignissen modellierten Abflussereignissen.....	36
Abbildung 24:	Zusammenfassung der modellierten Szenarien mit räumlich verschobenen Niederschlagsfeldern.....	39



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Hydrologische Kennwerte der Engstlige-Frutigen.....	8
Tabelle 2:	Verfügbare hydrologische Daten im Einzugsgebiet der Engstlige .....	9
Tabelle 3:	Multiplikativer Ansatz – Beurteilung der maximalen x-stündlichen Gebietsniederschläge für das skalierte Niederschlagszenario 48h-Scal vom August 2005.....	17
Tabelle 4:	Additiver Ansatz – Beurteilung der maximalen x-stündlichen Gebietsniederschläge für das skalierte Niederschlagszenario 48h-Scal vom August 2005.....	17
Tabelle 5:	Verschiebungsvektoren der beiden räumlich verschobenen Szenarien.....	20
Tabelle 6:	Dreitägige Punktniederschlagssummen an den Messstationen Adelsboden, Frutigen und Kandersteg.....	22
Tabelle 7:	Maximale Mehrstundensummen für den Gebietsniederschlag im Einzugsgebiet der Engstlige-Frutigen für das beobachtete Ereignis vom August 2005 sowie für die räumlich verschobenen Szenarien .....	22
Tabelle 8:	Engstlige-Frutigen: Abschätzung mit HQX_meso_CH .....	23
Tabelle 9:	Engstlige-Frutigen: Extremwertstatistische Hochwasserabschätzung mit modellierten Werten .....	25
Tabelle 10:	Engstlige-Frutigen: Extremwertstatistische Hochwasserabschätzung mit kombinierten Werten.....	26
Tabelle 11:	Korrelationskoeffizienten zur Auswertung in Abbildung 17 .....	30
Tabelle 12:	Korrelationskoeffizienten zur Auswertung in Abbildung 18 .....	30
Tabelle 13:	Niederschlagssummen unterschiedlicher Wiederkehrperioden (Periode: 1901-2006; Daten: Gammeter 2008) .....	33
Tabelle 14:	Extremwertstatistische Auswertung der Gebietsniederschlagssummen unterschiedlicher Dauer .....	35
Tabelle 15:	Ausgewählte Niederschlagszenarien.....	35
Tabelle 16:	Beurteilung und Ergebnisse der ausgewählten Niederschlagszenarien .....	37
Tabelle 17:	Maximale Mehrstundensummen für den gemessenen und modellierten Abfluss der Engstlige-Frutigen sowie für die verschiedenen modellierten räumlich verschobenen Niederschlagszenarien für das Hochwasserereignis vom 20. bis 23. August 2005 .....	40
Tabelle 18:	Übersicht über die durchgeführten Hochwasserabschätzungen.....	41

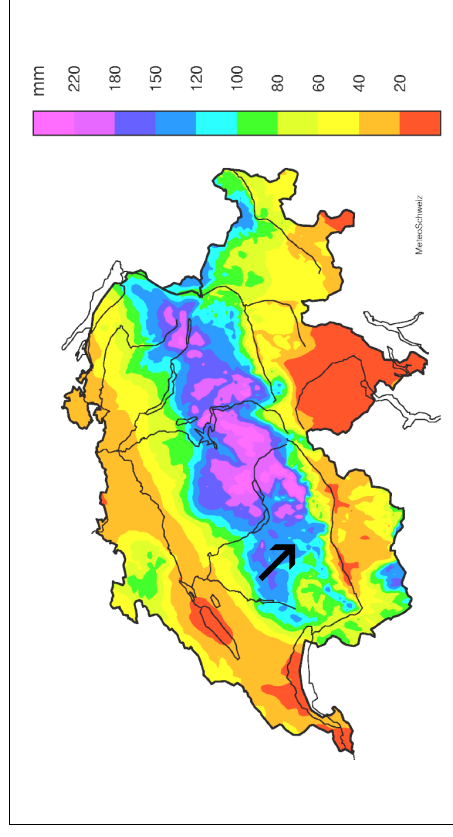
## 1 Einleitung

Der vorliegende Bericht entstand im Zusammenhang mit der Überarbeitung der Gefahrenkarte der Gemeinde Frutigen aus dem Jahr 2005 (KAWA 2005). Die durchgeführten Untersuchungen und Analysen hatten zum Ziel, die Hydrologie der Engstlige bis Frutigen zu charakterisieren, wobei ein spezieller Fokus auf die Hochwasserverhältnisse bei seltenen bis sehr seltenen Ereignissen gerichtet werden sollte. Zu diesem Zweck wurden einerseits die meteorologischen und hydrologischen Daten analysiert, andererseits wurden zeitlich hoch aufgelöste hydrologische Modellierungen ausgewählter Niederschlagszenarien durchgeführt.

Die Resultate der vorliegenden Untersuchung sollen aber auch hydraulischen Modellierungen als Grundlage dienen und somit zur Überprüfung der bestehenden Gefahrenabschätzung im Bereich Hochwasser bzw. für die Bestimmung von Überflutungsflächen eingesetzt werden können.

### 1.1 Problem- und Fragestellung

Obschon das Hochwasserereignis vom August 2005 auch an der Engstlige in Frutigen zu einem der grössten der vorliegenden Messreihe von 1995 bis 2007 zählt, wurden im Einzugsgebiet nur vereinzelt aussergewöhnlich grosse, mehrtägige Niederschlagsmengen registriert (Abbildung 1). Dieser Sachverhalt warf in der Gemeinde Frutigen die Frage auf, von welchem Ausmass die Hochwasserabflüsse sein würden, wenn ein intensives Niederschlagsereignis (z.B. wie dasjenige vom August 2005) direkt im Einzugsgebiet der Engstlige ausregnen würde. Gleichzeitig stellt sich auch die Frage, ob ein solches Szenario durch die bisherige Gefahrenbeurteilung abgedeckt ist bzw. welche Anpassungen nötig sind.



**Abbildung 1:** Niederschlagssumme [mm] für die Dauer vom 21. bis 22. August 2008 (jeweils 7:00 Uhr, Quelle: Frei 2007, verändert). Der Pfeil zeigt die ANETZ-Station Adelboden.

Erfahrungen aus anderen Einzugsgebieten, die im August 2005 stärker vom extremen Niederschlagsereignis betroffen waren, haben zudem gezeigt, dass die Abflussspitzen massiv grösser ausfallen können, als dies bisher erwartet wurde (Schwanbeck et al. 2008). Somit war es nötig, dass bestehende Hochwasserabschätzungen zum Teil stark angepasst werden mussten (z.B. Lütshine, vgl. Naef et al. 2008). Die Frage stellt sich, ob das bei der Engstlige auch der Fall ist. Hierbei muss auch berücksichtigt werden, dass an der Engstlige in Frutigen erst seit wenigen Jahren Abflussmessungen durchgeführt werden. Es muss also davon ausgegangen werden, dass extrem grosse lokale Hochwasserereignisse, noch nicht in den Messungen enthalten sind. Die bisher bestehenden Hochwasserabschätzungen wurden deshalb nicht mittels extremwertstatistischer Auswertungen sondern unter Anwendung von Hochwasserabschätzmodellen berechnet, die auf regionalen Übertragungsfunktionen basieren und in der Praxis oft für ungemessene Einzugsgebiete eingesetzt werden (BWG 2003).

Folgende Fragen stellen sich deshalb:

- > Von welcher Grösse und von welchem zeitlichen Verlauf ist ein seltenes bzw. extremes Hochwasserereignis der Engstlige?
- > Sind die aktuell verwendeten Hochwasserabschätzungen noch gültig?
- > Sind für die Engstlige unter extremen Niederschlagsverhältnissen unenwartet hohe Abflussspitzen zu erwarten, wie dies bei anderen Fließgewässern (der Region) im August 2005 zu beobachten war?

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehen

Da für die Engstlige in Frutigen nur Messreihen vorhanden sind, die mit 13 Jahren einen relativ kurzen Zeitraum abdecken, ist eine Beantwortung dieser Fragen mit Hilfe extremwertstatistischer Methoden allein nicht möglich. Aus diesem Grund soll die Engstlige mit Hilfe eines hydrologischen Modellsystems kontinuierlich und für einen längeren Zeitraum nachgebildet werden. Unter Einsatz des hydrologischen Modells ist es möglich, die zeitlich hoch aufgelösten hydrologischen Messreihen um gut 10 Jahre bis 1984 zurück zu ergänzen. Da für das Einzugsgebiet eine Reaktionszeit von wenigen Stunden zu erwarten ist, muss die hydrologische Modellierung in Stundenauflösung erfolgen. Die dazu benötigten Datenreihen sind erst seit 1983 verfügbar, wobei das erste Jahr noch einige Datenlücken aufweist. Der Einsatz des hydrologischen Modells bietet neben der kontinuierlichen Reihenverlängerung zudem auch die Möglichkeit, die Auswirkungen von extremen Niederschlagszenarien auf den Abfluss zu simulieren.

Neben den Modellierungsarbeiten sollen aber auch Auswertungen der vorhandenen hydrologischen und meteorologischen Daten durchgeführt werden, womit eine Charakterisierung der Hydrologie der Engstlige ermöglicht werden soll. In diesem Zusammenhang wurden in der vorliegenden Untersuchung umfangreiche Analysen der hydrologischen und meteorologischen Daten ausgeführt. Diese beinhalten sowohl deskriptive als auch extremwertstatistische Auswertungen.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung sollen insbesondere...

- ... die für das Einzugsgebiet vorhandenen Messreihen bezüglich den aktuellen bzw. den bisher herrschenden Abfluss- und Hochwasserverhältnissen ausgewertet und damit die Hydrologie des Einzugsgebietes charakterisiert werden.

- ... der Abfluss der Engstlige in Frutigen mit Hilfe der hydrologischen Modellierung nachgebildet und somit Erkenntnisse über weiter zurückliegende Zeiträume und Hochwasserereignisse ermöglicht werden.

- ... mit Hilfe von ausgewählten Niederschlagszenarien und unter Anwendung des hydrologischen Modellsystems seltene und sehr seltene Abflussereignisse modelliert werden.

Das Vorgehen umfasst im Wesentlichen die drei folgenden Schritte:

- > Bereitstellung eines hydrologischen Modells für den Pegel Engstlige-Frutigen sowie Modellierung der Abflussverhältnisse für die Periode 1984-2007
- > Statistische Auswertung und Analyse der hydrologischen und meteorologischen Datenreihen (gemessene und modellierte Werte)
- > Bereitstellung, Modellierung und Auswertung verschiedener Niederschlagszenarien

## 1.3 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden die Grundlagen dieser Arbeit – insbesondere das Einzugsgebiet sowie die verfügbaren Daten – vorgestellt. Neben dem hydrologischen Modell werden in Kapitel 3 auch die Methoden, welche zur Auswertung der hydrologischen und meteorologischen Daten eingesetzt wurden, beschrieben sowie das Vorgehen zur Erstellung der Niederschlagszenarien erläutert. Kapitel 4 enthält die Resultate der Auswertungen und der durchgeführten Modellierungen. Die Diskussion der Resultate und die Schlussfolgerungen bilden den Inhalt von Kapitel 5.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Untersuchungsgebiet

Die **Engstlige** bildet ein Teileinzugsgebiet der Kander und liegt in den Nordalpen, im westlichen Berner Oberland. Der Flusslauf des Hauptgewässers führt vom Wildstrubel bzw. von der Engstligenalp über Adelboden bis Frutigen (Abbildung 2). Der markanteste Gefälleunterschied befindet sich zwischen der Engstligenalp und Adelboden. Danach herrscht ein relativ gleichmässiges Gefälle bis Frutigen vor (Abbildung 3). Kurz nach Frutigen erfolgt der Zusammenfluss mit der Kander. Das Gerinne ist ausserhalb des Siedlungsbereiches – insbesondere im Quellgebiet und zwischen Adelboden und Frutigen, wo der Fluss durch weit reichende Auengebiete von nationaler Bedeutung fliesst – weitgehend unverbaut und natürlich.

Das Einzugsgebiet umfasst eine Fläche von 145.2 km<sup>2</sup>, die mittlere Gebietshöhe beträgt 1738 m ü.M. und der Gletscheranteil beläuft sich auf rund 0.5%. Der Grossstrubel (3238 m ü.M.) im Wildstrubelgebiet stellt den höchsten Punkt des Einzugsgebietes dar; der tiefste Punkt liegt bei der Abflussmessstation in Frutigen (762 m ü.M.).

Die räumliche Auswertung der Primärflächen (swisstopo 2006) zeigt, dass das Einzugsgebiet durch die drei Kategorien «WeiderWiese», «Fels/Geröll» und «Wald» dominiert wird (Abbildung 4). Diese Auswertungen zeigen auch, über welchen Höhenbereich sich das Einzugsgebiet erstreckt und welche Landnutzungen in der jeweiligen Höhenzone vorherrschen. So wird zum Beispiel ersichtlich, dass oberhalb 2500 m ü.M. die flächenmässige Ausdehnung der entsprechenden Höhenzonen sehr gering sind und ausschliesslich die Landnutzungen «Fels/Geröll» und in deutlich kleinerem Ausmass «Gletscher» auftreten.

Abbildung 5 zeigt das Abflussregime der Engstlige-Frutigen, welches entsprechend der geographischen Lage und den Gebietseigenschaften vom Typ «nival-alpin» (Weingartner und Aschwanden 1992) ist. Dieses zeichnet sich durch die kleinen Abflussmengen in den Wintermonaten bzw. den grössten mittleren Monatsabflüssen im Mai und Juni aus; letzteres ist ein Resultat der zu diesem Zeitpunkt am intensivsten auftretenden Schneeschmelze. Die wichtigsten hydrologischen Kenngrössen, welche aus den Messdaten abgeleitet werden können sind in Tabelle 1 enthalten.

Wichtigster Zufluss der Engstlige ist der Allenbach, welcher ein Teileinzugsgebiet von 28.8 km<sup>2</sup> umfasst und bei Adelboden in den Hauptfluss mündet. Daneben besteht eine Vielzahl von Wildbächen mit kleineren Einzugsgebieten, welche zwischen Adelboden und Frutigen ins Hauptgerinne der Engstlige entwässern.

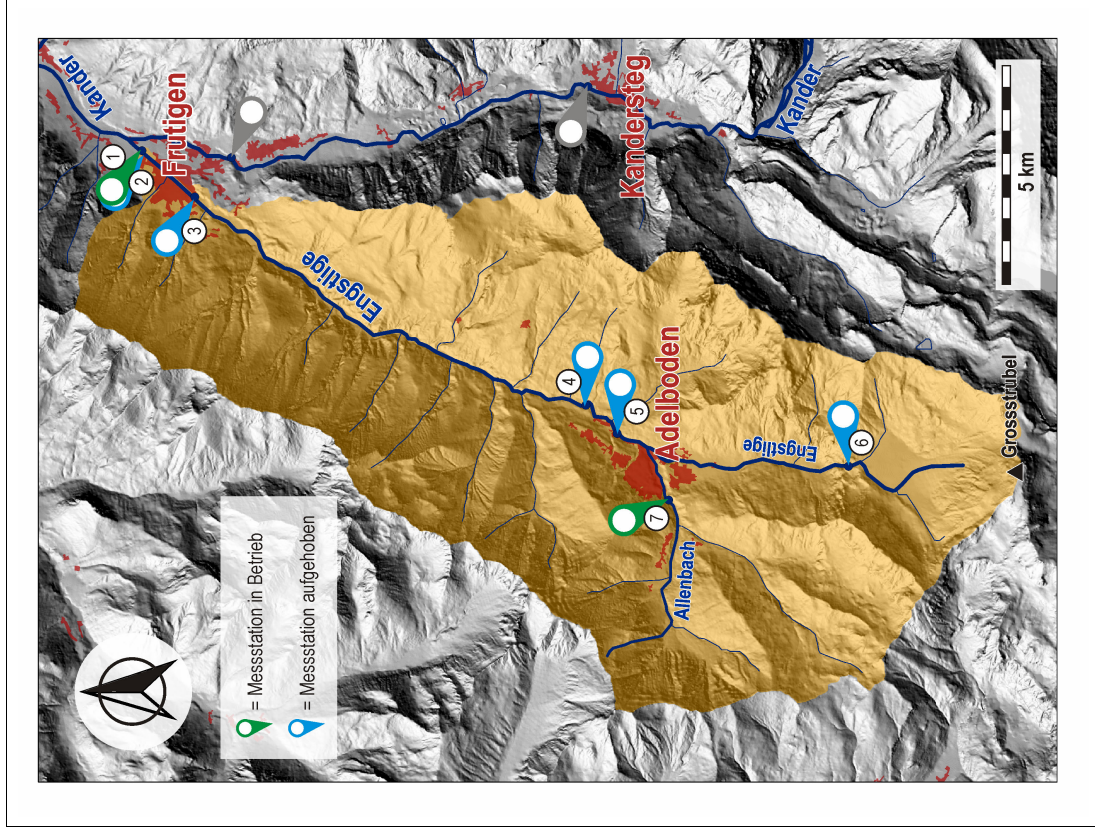


Abbildung 2: Einzugsgebiet der Engstlige (Nummern siehe Tabelle 2)

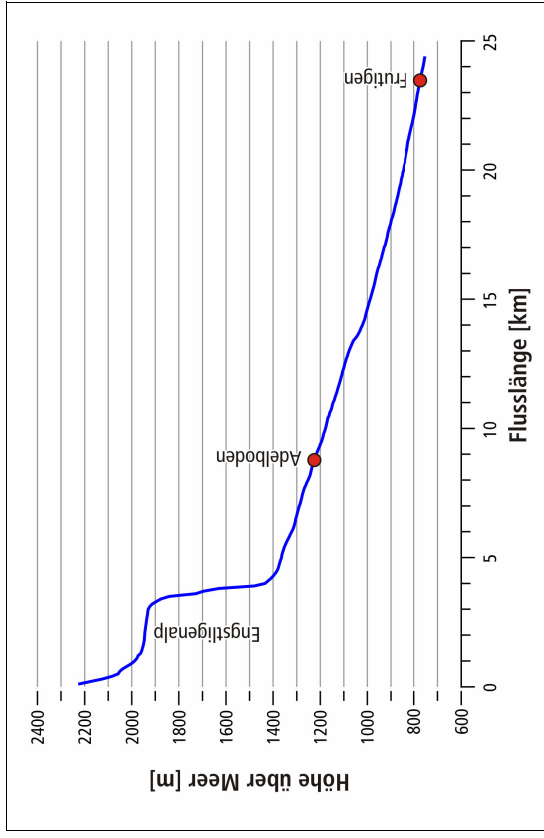


Abbildung 3: Flussprofil der Engstlige

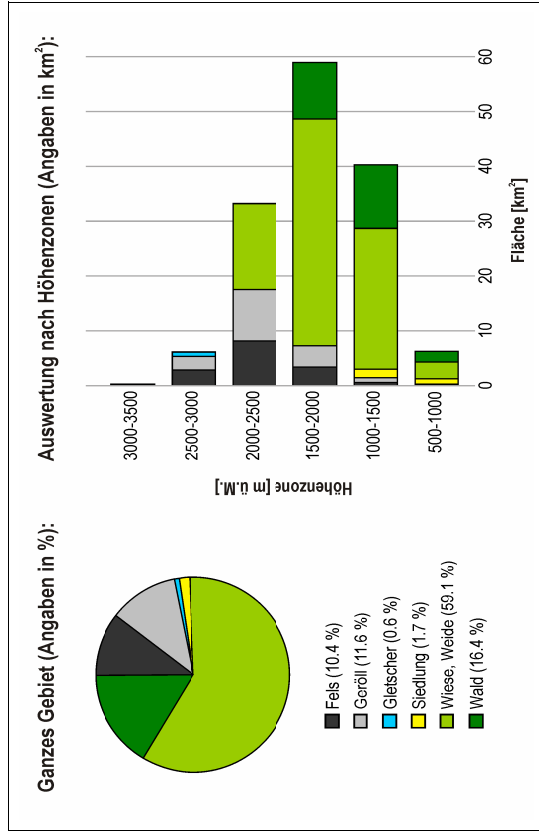
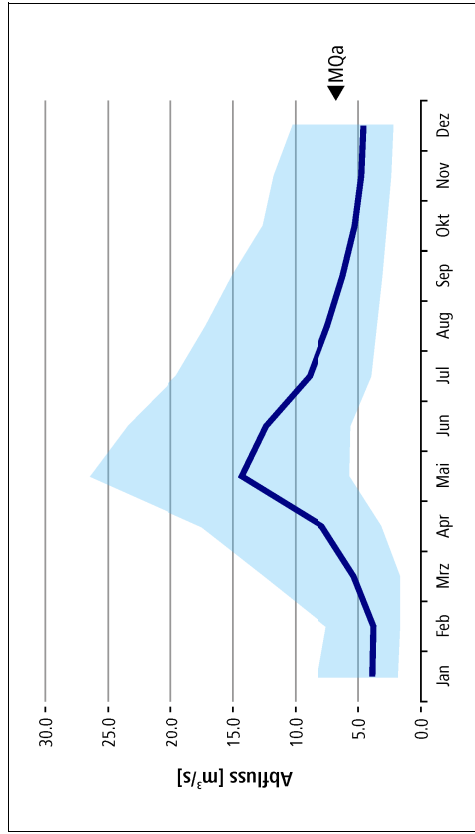


Abbildung 4: Auswertung der Primärflächen für das Einzugsgebiet der Engstlige-Frutigen



**Abbildung 5:** Mittlerer monatlicher Abfluss der Engstlige-Frutigen (Periode: 1983-2007; modellierte Werte; hellblaue Fläche: 5%- bzw. 95%-Quantilsbereich). MQa = Mittlerer jährlicher Abfluss.

**Tabelle 1:** Hydrologische Kennwerte der Engstlige-Frutigen (1995-2007; gemessene Werte; weitere Kennwerte der modellierten Werte siehe Anhang 8)

Kenngröße	Grundlegendaten	Periode	Datum	[m³/s]	[l/s·km²]
MQ	Tagesmittelwerte, gemessen	1995-2007		6.4	44.1
Q <sub>av</sub>	Tagesmittelwerte, gemessen	1995-2007		1.4	9.6
MHQ (d)	Tagesmittelwerte, gemessen	1995-2007		32.3	222.5
MHQ (h)	Stundenmittelwerte, gemessen	1995-2007		55.1	379.5
HHQ (d)	Tagesmittelwert, gemessen	1995-2007	August 2005	73.0	502.8
HHQ (h)	Stundenmittelwert, gemessen	1995-2007	August 2007	102.0	702.5

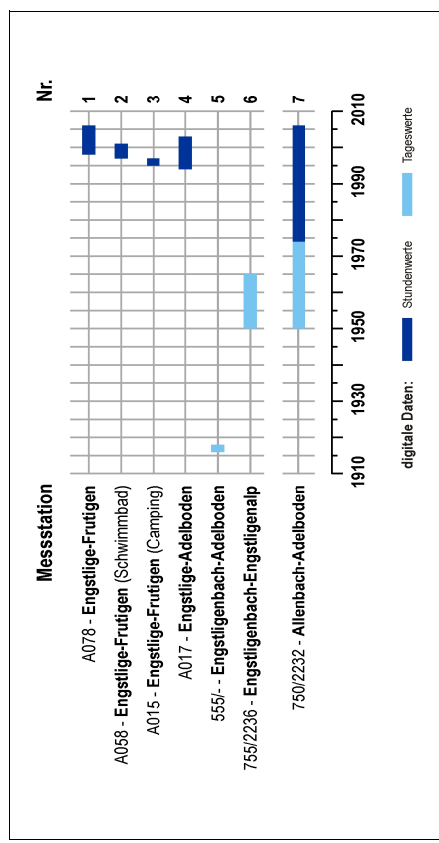
## 2.2 Hydrologische Daten

Im Untersuchungsgebiet sind bisher an insgesamt sieben Standorten Abflussmessungen durchgeführt worden; davon sind heute noch deren zwei im Einsatz (Abbildung 2, Abbildung 6). Wie Abbildung 6 bzw. Tabelle 2 zeigen, umfassen die verfügbaren Datenreihen unterschiedlich lange Zeiträume. Zudem überlagern sich die Messperioden der Stationen nur vereinzelt. Besonders die letzten Jahre sind gut dokumentiert, wobei zu beachten ist, dass die Station in Frutigen zwei Mal verlegt wurde. Somit liegt für das gesamte Einzugsgebiet eine Messreihe vor, die rund 13 komplette Jahre in hoher zeitlicher Auflösung (mindestens 1-Stundenmittelwerte) abdeckt.

**Tabelle 2:** Verfügbare hydrologische Daten im Einzugsgebiet der Engstlige

Gewässer	Ort, Station	Bez.	Nr.	Vorhandene Messreihe	Betreiber
Engstlige	Frutigen, Schwimmbad	A078	1	1998-2008	WWA
Engstlige	Frutigen	A058	2	1997-2001	WWA
Engstlige	Frutigen, Camping	A015	3	1995-1997	WWA
Engstlige	Adelboden	A016	4	1994-2002	WWA
Engstligenbach	Adelboden	555/-	5	1916-1918	BAFU
Engstligenbach	Engstligenalp	755/2236	6	1950-1965	BAFU
Allenbach	Adelboden	750/2232	7	1950-2008	BAFU

Nr.: siehe Abbildung 2 und Abbildung 6



**Abbildung 6:** Verfügbare hydrologische Daten im Einzugsgebiet der Engstlige

### 2.3 Meteorologische Daten

In der Region des Untersuchungsgebietes befinden sich mehrere meteorologische Stationen, welche dem Messnetz der MeteoSchweiz angehören. Neben der ANETZ-Station in Adelboden, welche eine Vielzahl meteorologischer Grössen in hoher zeitlicher Auflösung erfasst, sind für die nähere Umgebung die Daten von mehreren Niederschlags-Tagessammlern verfügbar (Frutigen, Kandersteg, Kiental). Die Messreihen für die Niederschlags-Tagessammler reichen zum Teil bis an den Anfang des 20. Jahrhunderts zurück (vgl. Gammeter 2008); die Messdaten in stündlicher Auflösung sind für den Niederschlag und weitere meteorologische Grössen ausschliesslich seit 1983 vorhanden.

### 2.4 Bisherige Untersuchungen

Angaben zur Hydrologie der Engstlige finden sich in wenigen Studien, welche in erster Linie im Zusammenhang mit Wasserbauprojekten oder den bestehenden Gefahrenkarten erstellt wurden:

- a) **Technischer Bericht zum Verbauprojekt XII (1961) bzw. XIV (1997)**  
Dieser Bericht (TBA 1997) enthält eine ausführliche Beschreibung zur Berechnung der hydrologischen Bemessungsgrössen, auf denen alle bisherigen Abschätzungen beruhen. Insbesondere wird erläutert, mit welcher Methode die Hochwasserabflüsse bestimmt wurden und von welcher Abflussspitze bei einem 100-jährlichen Hochwasserereignis bzw. bei der Extremhochwassermenge ausgegangen werden sollte. Aus der Abschätzung mit der «Rational Formula» nach Kölla (1986) resultierte damals für die Engstlige-Frutigen ein Wert für das  $HQ_{100}$  von  $160 \text{ m}^3/\text{s}$  bzw.  $240 \text{ m}^3/\text{s}$  für die Extremhochwasserspitze.
- b) **Bericht Jäggi (1996)**  
Diese Untersuchung, welche von Jäggi (1996) zu flussbaulichen Fragen betreffend der Erosionstendenz der Engstlige in Frutigen durchgeführt wurde, greift auf die oben erwähnten hydrologischen Grundlagen zurück. Es wurde als Gutachten für den Bericht zum Verbauprojekt von 1997 erstellt.  
Für Transportberechnungen des Geschiebes wurde im Rahmen dieser Untersuchung die Ganglinie eines extremen Hochwasserereignisses benötigt. Die verwendete Ganglinie wurde mit Hilfe von Messdaten der Station Kander-Hondrich vom Ereignis am 22. September 1968 abgeleitet – dieses Hochwasser umfasste zum Zeitpunkt des Verfassens des Berichts die bis dahin grösste beobachtete Abflussspitze. Der zeitliche Verlauf der gemessenen Ganglinie bei Kander-Hondrich wurde für den oben erwähnten Zweck auf den geschätzten 100-jährlichen Abflusswert (damals:  $160 \text{ m}^3/\text{s}$ ) der Engstlige-Frutigen skaliert (Pieren 2008).
- c) **Bericht zum Ereigniskataster der Gemeinde Frutigen (2001)**

Im Zusammenhang mit der Gefahrenkarte wurde für die Gemeinde Frutigen im Jahr 2001 ein Ereigniskataster erarbeitet (KAWA 2001). Dieser enthält eine möglichst vollständige Erfassung und räumliche Lokalisierung von Ereignissen aus allen Bereichen der Naturprozesse (Sturz, Rutschung, Erosion sowie Überflutungsprozesse), wobei Lawinen allerdings nicht berücksichtigt wurden. Die erfassten Ereignisse gehen zurück bis ins Jahr 1859, wobei für den Zeitraum vor 1900 – vermutlich

auf Grund der Datenlage – nur wenige bekannt sind. Neben schriftlichen Quellen dienten auch mehrere Befragungen von einheimischen Personen als Grundlage dieser Datenbank.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei den Prozessen Murgang, Rutschung und Hochwasser eine grosse Anzahl an Ereignissen aufgetreten sind. Eine genaue Quantifizierung (z.B. der bei einem Ereignis aufgetretenen Abflussmengen) geht jedoch aus diesen Daten nicht hervor.

- d) **Bericht zur Gefahrenkarte der Gemeinde Frutigen (2005)**

Im Technischen Bericht zur Gefahrenkarte für die Gemeinde Frutigen wurde eine umfangreiche Gefahrenbeurteilung für den Siedlungsraum erstellt. In diesem Zusammenhang wurden für eine Vielzahl der Wildbäche mit gebräuchlichen Methoden Hochwasserabflüsse berechnet. Für die Engstlige wurden die Abschätzungen aus dem Wasserbauprojekt XIV/1997 übernommen (vgl. Kapitel 2.4a).

- e) **Weitere Untersuchungen**

Neben diesen Grundlagen besteht eine Reihe wissenschaftlicher Untersuchungen zur Hydrologie des Allenbachs (Naef 2006, Naef et al. 1999). Diese beschreiben insbesondere die Abflussreaktion dieses Teileinzugsgebietes der Engstlige. Daraus geht hervor, dass der Allenbach auf Grund seiner Gebieteigenschaften das Potential zu äusserst rascher Abflussreaktion hat und überdurchschnittlich hohe Abflusskoeffizienten aufweisen kann.

### 3 Methoden und Vorgehen

Zur Auswertung der vorhandenen Daten wurden verschiedene Methoden angewandt, die an dieser Stelle kurz beschrieben werden. Daneben werden besonders auch die Entwicklung und Bereitstellung der Niederschlagszenarien erläutert.

#### 3.1 Datenanalyse

##### a) Analyse hochwasser-hydrologischer Daten

Die hydrologischen Daten wurden mit verschiedenen standardmässigen, statistischen Methoden bzw. bestehenden Softwarepaketen ausgewertet. Dazu gehören Auswertungen mit HYDMOD-soft (BAFU 2006) zur Bestimmung von allgemeinen Kennwerten und extremwertstatistische Berechnungen der Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit mit HQex (WASY 2005).

Daneben wurden für das Einzugsgebiet der Engstlige zu Vergleichszwecken auch Hochwasserabschätzungen mit HQx\_meso\_CH (Barben 2001) unter zusätzlicher Anwendung von HQx\_meso\_CH-visual (Klauser 2004) durchgeführt.

##### b) Analyse der Starkniederschläge

Von den verfügbaren meteorologischen Daten wurde ausschliesslich der Niederschlag analysiert, wobei sich die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung durchgeführten Auswertungen auf die mit dem Modellsystem PREVAH (siehe Kapitel 3.2) interpolierten **Gebietsniederschläge** und die Starkniederschläge beschränken.

Die extremwertstatistischen Auswertungen der maximalen jährlichen bzw. saisonalen Gebietsniederschläge unterschiedlicher Dauer erfolgten unter Anwendung der beiden folgenden Verteilungsfunktionen (siehe z.B. Coles 2004):

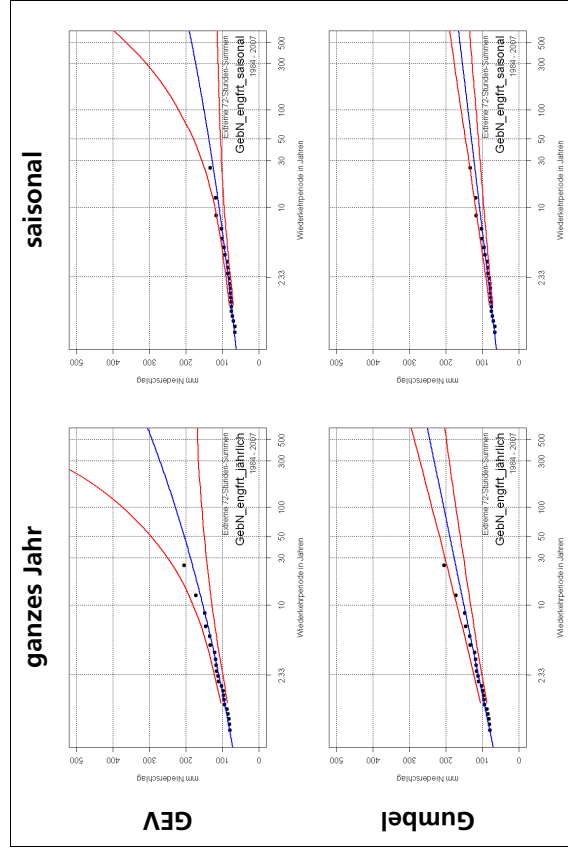
- > **GEV:** Allgemeine Extremwert-Verteilung (**Generalized Extreme Value Distribution**)
- > **Gumbel:** Gumbel-Verteilung (auch: 1. Extremalverteilung)

Da für die weiteren Schritte (insbesondere bei der Erstellung der mengenskalierten Szenarien, vgl. Kapitel 3.3) auch Abschätzungen im Stundenbereich benötigt wurden, musste sich die extremwertstatistische Auswertung der Niederschläge auf Grund der Datenverfügbarkeit auf die Periode von 1984 bis 2007 beschränken. Die Abschätzungen für grössere Wiederkehrperioden sind deshalb mit einer zum Teil beträchtlichen Unsicherheit behaftet – dies geht auch deutlich aus den in den Grafiken in Abbildung 7 dargestellten Konfidenzintervallen hervor.

Insgesamt wurden für dreizehn verschiedene Niederschlagsdauern zwischen 1 und 120 Stunden und für unterschiedliche Beobachtungszeiträume (jährlich, saisonal) die extremen Gebietsniederschlagssummen unterschiedlicher Jährlichkeit berechnet. Die saisonale Auswertung erfolgte für die Monate Mai bis Oktober, wobei davon ausgegangen wurde, dass die grössten Hochwasserereignisse in diesem Niederschlagsmengen im Untersuchungsgebiet in diesem Zeitraum auftreten (vgl. auch Gammeter 2008). Aus diesen Berechnungen resultiert ein Niederschlags-intensitäts-Diagramm, welches eine zentrale Grundlage für die Bereitstellung und Beurteilung der skalierten Niederschlagszenarien bildet (vgl. Kapitel 3.3).

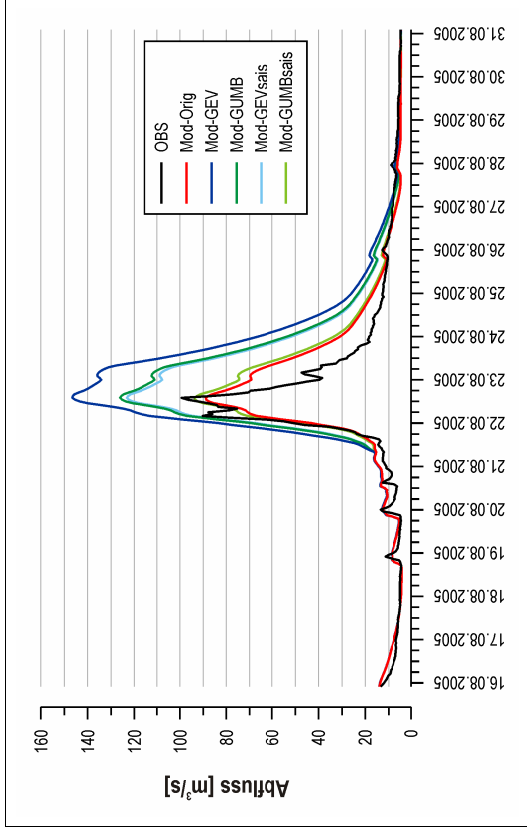


Welche Auswirkungen sich bei Anwendung der verschiedenen Verteilungsfunktionen (GEV, Gumbel) sowie aus der Berechnung mit jährlichen bzw. saisonalen Höchstwerten ergeben, wird aus Abbildung 7 ersichtlich, in welcher alle Abschätzungen für die extremen 72-Stunden-Summen dargestellt sind. Die Anwendung der GEV-Verteilung ergibt sowohl bei den jährlichen als auch bei den saisonalen Abschätzungen die grössten Werte, wobei das Konfidenzintervall bei dieser Methode auffallend grösser ist, als bei der Gumbel-Verteilung. Die grosse Unsicherheit der Schätzung ist durch die kurze Reihenlänge bedingt und konnte auf Grund der Datenverfügbarkeit nicht umgangen werden. Die Anpassung an die Ausgangsdaten scheint bei dieser Niederschlagsdauer für die GEV-Verteilung etwas besser, was aber bei anderen untersuchten Ereignisdauern teilweise nicht der Fall ist (vgl. auch Anhang 13 bis 16).



**Abbildung 7:** Vergleich der extremwertstatistischen Auswertung der Gebietsniederschläge verschiedener Zeiträume (ganzes Jahr, saisonal) unter Anwendung zweier Methoden

Für die vorliegenden Untersuchungen und insbesondere für die Skalierung der Niederschlagsreihen wurden jeweils die Resultate aus den Abschätzungen mit der GEV-Verteilung verwendet. Dies ist damit zu begründen, weil einerseits keine Verteilungsfunktion für alle Niederschlagsdauern die beste Anpassung ergab und andererseits die abgeschätzten Werte mit Hilfe der GEV-Verteilung durchwegs grösser waren als diejenigen mit der Gumbel-Verteilung. Somit konnten die Unsicherheiten, welche sich aus der relativ kurzen Datenreihe der Gebietsniederschläge ergeben, etwas berücksichtigt werden; die Unsicherheit welche auch durch die Konfidenzintervalle beschrieben wird, wurde damit aber teilweise noch nicht abgedeckt. Abbildung 8 zeigt zudem am Beispiel des menskalisierten Ereignisses vom August 2005 die Auswirkungen der verschiedenen Extrapolationsmethoden auf den modellierten Abfluss. Es wird ersichtlich, dass mit dem gewählten Ansatz (GEV-Verteilung, jährliche Maximalwerte) die Ganglinie mit den höchsten Abflusspitzen bzw. -volumen modelliert wurde, was für die Anwendung bei der Gefahrenabschätzung sicher sinnvoll ist.



**Abbildung 8:** Auswirkungen der mit verschiedenen Methoden extrapolierten 100-jährlichen Niederschlagsintensitäten auf die Resultate der Modellierung (OBS: beobachtete Werte; Mod: modellierte Werte mit unterschiedlichem Input).

Anhand der Resultate von Gammeter (2008), der im Rahmen seiner Diplomarbeit die über 100-Jahre umfassenden Niederschlagsreihen im Berner Oberland und insbesondere auch diejenigen im Einzugsgebiet der Kander detailliert analysiert hat, konnten die Ergebnisse aus den extremwertstatistischen Abschätzungen der Gebietsniederschläge im langjährigen Kontext beurteilt werden (vgl. auch Anhang 19). Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass es sich bei den von Gammeter ausgewerteten Daten ausschliesslich um Stationsniederschläge in Tagesauflösung handelt.

### 3.2 Hydrologische Modellierungen

Zur kontinuierlichen Modellierung der Abflussverhältnisse sowie der Niederschlagszenarien wurde das hydrologische Modellsystem **PREVAH** (Gurtz et al. 1997, Zappa 2002, Viviroli 2007, Viviroli et al. 2007) verwendet. Das konzeptionelle Modell orientiert sich an den für die alpinen Einzugsgebiete relevanten Prozessen, welche so weit als möglich über physikalisch begründbare Ansätze deterministisch berücksichtigt wurden. PREVAH ist für den Einsatz in mesokaligen, alpinen Einzugsgebieten generell geeignet und kam auch in zahlreichen Untersuchungen erfolgreich zur Nachbildung und Abschätzung hydrologischer Grundlagen und Hochwasserabflüsse zum Einsatz (z.B. Schwabbe et al. 2008, Viviroli 2007, Gurtz et al. 2003, Germann et al. (accepted)).

PREVAH («Precipitation-Runoff-Evapotranspiration-Hydrotopo-Model») berechnet die hydrologischen Prozesse auf Basis von Hydrotopen (Flächen, für welche aus hydrologischer Sicht die gleiche Abflussreaktion zu erwarten ist) in einer räumlichen Auflösung von 500 Meter x 500 Meter. Der Modellinput, welcher maximal aus sechs meteorologischen Grössen in Stunden- oder Tagesauflösung besteht, wird normalerweise aus Stationswerten räumlich interpoliert. Standardmässig wird dazu eine distanzabhängige sowie höhenkorrigierte Interpolation verwendet.

Als Modellinput der vorliegenden Untersuchung wurden zwei unterschiedliche Niederschlagsdatensätze verwendet:

**Standard:** Aus Stationswerten räumlich, distanzabhängig sowie höhenkorrigiert interpolierter Niederschlag; die benötigten Daten in Stundenaufösung sind für den Zeitraum von 1983-2007 verfügbar; die zur Interpolation verwendeten Stationen sind in Anhang 20 aufgeführt; das interpolierte Niederschlagsfeld ist nur für das Einzugsgebiet verfügbar.

**Radar:** Die an den Niederschlagssammlern gemessenen Tageswerte werden mit Hilfe der Informationen aus dem Niederschlagsradar von Tages- auf Stundenwerte disaggregiert (vgl. Wüest et. al (eingereicht)); verfügbar für den Zeitraum von 1992-2005; das so berechnete Niederschlagsfeld für die ganze Schweiz verfügbar.

Das Modell wurde für diese beiden unterschiedlichen Datensätze mit jeweils drei verschiedenen Methoden kalibriert. Als Kalibrierungszeitraum wurde die Periode 1999-2002 (mit Initialisierungs-jahr 1998) gewählt; in diesem Zeitraum wurden die Modellparameter auf die vorliegenden Abflussmessungen an der Station Engstlige-Frutigen angepasst. Anschliessend wurde das Modell mit den verbleibenden Jahren für welche auch Abflussmessungen für die Station A078 (Engstlige-Frutigen, vgl. Abbildung 6) vorhanden sind validiert (2003-2007). Aus allen Parametersätzen wurde für jede Modellversion derjenige ausgewählt, der sowohl für die Kalibrierungs- als auch für die Validierungsphase die besten Gütemasse ergab (vgl. Anhang 21).

Weitere ausführliche Informationen zum verwendeten Modellsystem sind in Viviroli et al. (2007) nachzulesen.

### 3.3 Erstellung der Niederschlagszenarien

#### a) Mengenskalierte Niederschlagszenarien

Wie bereits beschrieben, sind die Abflussmessungen, welche für das gesamte Einzugsgebiet bis Frutigen vorliegen, nur für die letzten 13 Jahre (Periode 1995-2007) verfügbar. Dieser Zeitraum ist für extremwertstatistische Auswertungen und daraus abgeleitete Hochwasserabschätzungen grösser Wiederkehrdauer (z.B. HQ<sub>100</sub>) sehr kurz – die Resultate sind mit sehr grosser Unsicherheit behaftet. Obschon in diesem Zeitraum in der Region eine Reihe grösserer Ereignisse aufgetreten ist (z.B. 1999 oder 2005), muss davon ausgegangen werden, dass an der Engstlige bisher noch kein seltenes oder extremes lokales Abflussereignis aufgetreten ist. So waren z.B. beim Ereignis vom August 2005 die Jährlichkeiten der Niederschlagssummen zum Teil nicht von ausserordentlich hoher Wiederkehrdauer (vgl. Kapitel 1.1, Tabelle 6). Somit muss angenommen werden, dass auch für die hydraulischen Berechnungen keine entsprechende Ganglinie vorliegt.

Um mit Hilfe des hydrologischen Modells ein seltenes Abflussereignis nachzubilden, wurde deshalb folgendes Vorgehen gewählt: Aus den vorliegenden stündlich aufgelösten Gebietsniederschlägen – welche auch den Modellinput für das hydrologische Modell bilden – wurden für die Periode 1984 bis 2007 die fünf grössten Niederschlagsereignisse von 12, 24, 48 und 72 Stunden Dauer bestimmt. Die gewählten Niederschlagsdauern ergaben sich aus der Überlegung, dass sowohl kurze Niederschlagsereignisse von wenigen Stunden wie auch länger andauernde Niederschläge die Hochwasser der Engstlige auslösen können.

Für diese Ereignisse wurde die jeweilige Niederschlagssumme auf einen der Dauer entsprechenden 100-jährlichen Wert skaliert. Dieser Zielwert wurde mit Hilfe der in Kapitel 3.1 beschriebenen extremwertstatistischen Methoden bestimmt. Bei der Skalierung der Ereignissumme wurden zwei verschiedene Ansätze angewandt:

**Multiplikativer Ansatz:** Die Differenz zwischen der gemessenen und der 100-jährlichen Niederschlagssumme wird im Verhältnis der pro Stunde gemessenen Niederschlagsmenge auf alle Stunden des Niederschlagsereignisses aufgeteilt. Das bedeutet, dass die Stunden, in denen viel Niederschlag gefallen ist weit mehr Niederschlag erhalten als Stunden, in denen wenig Niederschlag gemessen wurde. Das Verhältnis zwischen den einzelnen Summen der Niederschlagsstunden bleibt bei diesem Ansatz erhalten.

**Additiver Ansatz:** Die Differenz zum 100-jährlichen Ereignis wird gleichmässig auf alle Niederschlagsstunden des betrachteten Ereignisses verteilt. Jede Niederschlagsstunde erhält somit die gleiche zusätzliche Niederschlagsmenge; das Verhältnis zwischen den einzelnen Niederschlagsstunden verändert sich.

Es hat sich gezeigt, dass bei der Skalierung mit Hilfe des multiplikativen Ansatzes bei den meisten Ereignissen Niederschlagsintensitäten kürzerer Dauer auftreten, die deutlich über der Jährlichkeit des Zielszenarios liegen. Als Beispiel sind in Tabelle 3 und Tabelle 4 sowie in Abbildung 9 die Auswirkungen der beiden Ansätze auf die Skalierung des 48-stündlichen Niederschlagsereignisses vom August 2005 dargestellt.

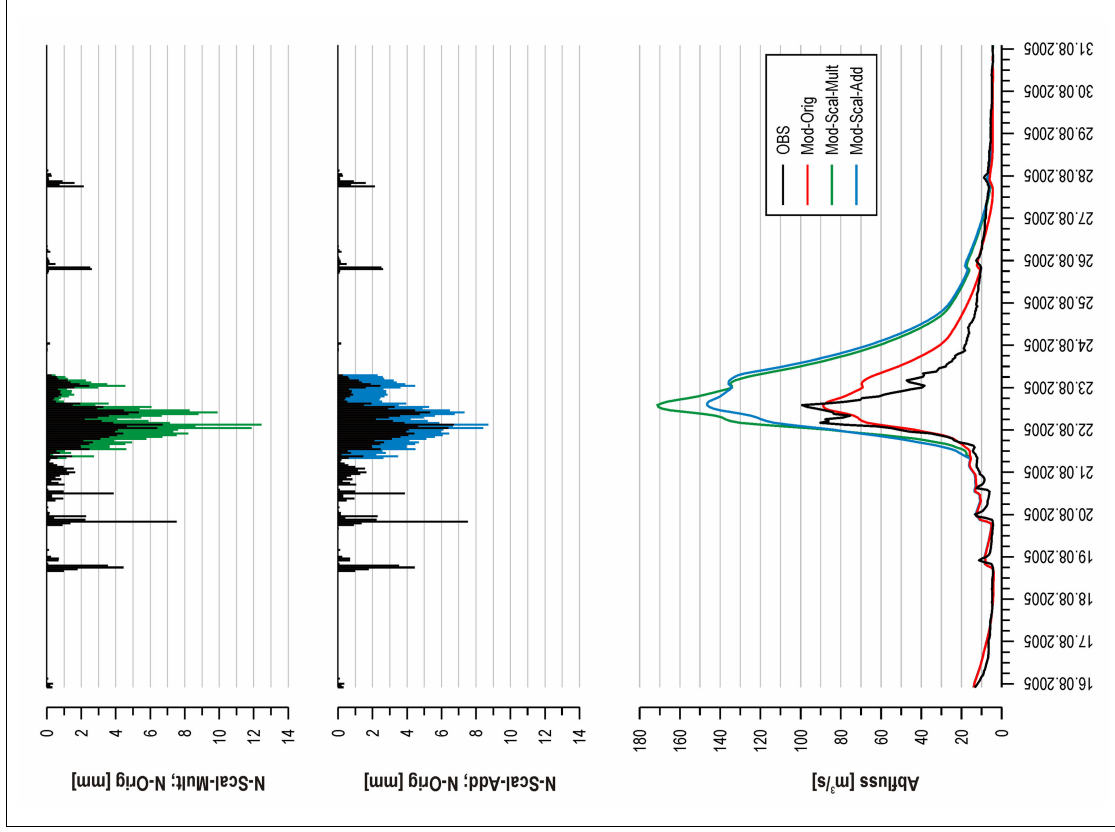
**Tabelle 3:** Multiplikativer Ansatz – Beurteilung der maximalen x-stündlichen Gebietsniederschläge für das skalierte Niederschlagszenario 48h-Scal vom August 2005

Dauer [h]	1	2	3	4	5	6	10	12	24	48	72	96	120
Summe [mm]	12.4	21.1	32.9	40.5	47.9	56.1	83.3	96.8	164.4	210.0	229.0	244.2	256.8
Jährlichkeit [a]	<30	<30	<30	100	100	300	>300	>300	>300	100	100	100	100

**Tabelle 4:** Additiver Ansatz – Beurteilung der maximalen x-stündlichen Gebietsniederschläge für das skalierte Niederschlagszenario 48h-Scal vom August 2005

Dauer [h]	1	2	3	4	5	6	10	12	24	48	72	96	120
Summe [mm]	8.7	15.4	23.8	29.9	35.9	42.3	65.1	76.3	137.0	210.0	228.8	244.0	256.6
Jährlichkeit [a]	<30	<30	<30	<30	<30	<30	100	100	100	100	100	100	100

Währendem die 48-Stunden-Summe bei beiden Ansätzen einem 100-jährlichen Ereignis entspricht (Zielszenario), liegen die Wiederkehrperioden der Intensitäten kürzerer Dauer beim multiplikativen Ansatz (Tabelle 3) deutlich über 100 Jahren. Dagegen treten beim additiven Ansatz (Tabelle 4) durchwegs kleinere Jährlichkeiten als diejenige des Zielszenarios auf. Es muss also davon ausgegangen werden, dass sich bei Verwendung des multiplikativen Ansatzes die modellierten Abflusspitzen ebenfalls über der angestrebten Wiederkehrperiode liegen. Welche Unterschiede sich bei der Flussmodellierung der beiden verschieden skalierten Niederschlagsverläufe ergeben, wird am Beispiel der Modellierung des Hochwasserereignisses vom August 2005 (Abbildung 9) ersichtlich.



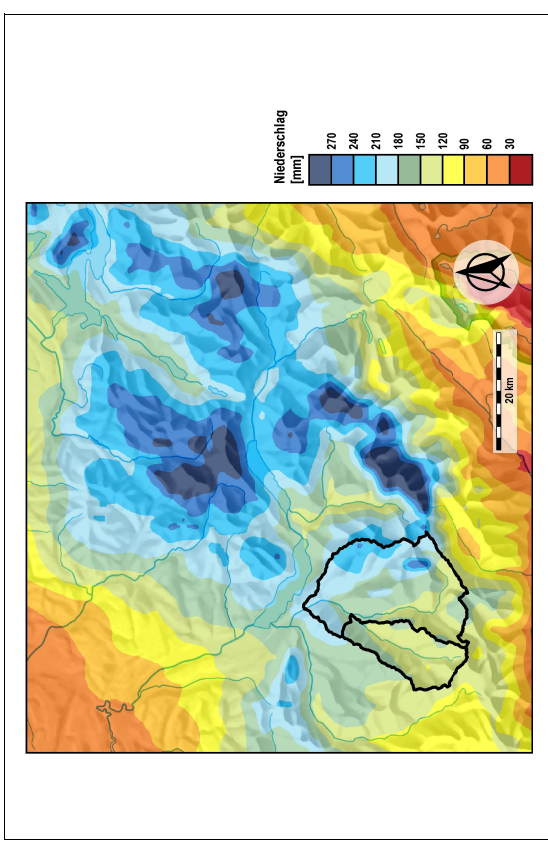
**Abbildung 9:** Auswirkungen der mit verschiedenen Methoden extrapolierten 100-jährlichen Niederschlagsintensitäten auf die Resultate der Modellierung am Beispiel des Hochwasserereignisses vom 21. bis 23. August 2005.

Aus den oben beschriebenen Gründen wurde für die Modellierung der verschiedenen mengenskalierten Niederschlagszenarien ausschliesslich der additive Ansatz verwendet (vgl. Tabelle 15). Es kann bei Verwendung dieses Ansatzes davon ausgegangen werden, dass die angestrebte Wiederkehrperiode (jeweils 100 Jahre) auch nicht von Intensitäten kürzerer Dauer übertroffen wird und somit die modellierten Abflussspitzen und -volumen bezüglich der angestrebten Jährlichkeit nicht «verfälscht» werden.

Daneben ist zu beachten, dass die Skalierung der Niederschlagsmengen direkt an den Gebietsniederschlägen bzw. am Modellinput auf Stundenbasis vorgenommen wurde. Damit konnte die ursprüngliche räumliche Niederschlagsverteilung beibehalten werden. Somit ist auch sichergestellt, dass nach der Skalierung keine räumliche Interpolation zur Bereitstellung des Modellinputs mehr durchgeführt werden musste; die angestrebten Werte konnten direkt ins Modell eingegeben werden.

**b) Räumlich verschobene Niederschlagsfelder**

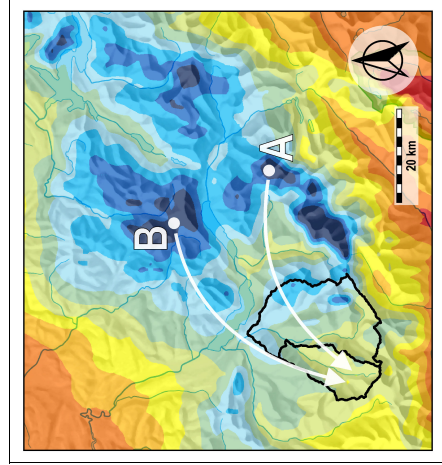
Wie Abbildung 10 zeigt, waren im August 2005 das Einzugsgebiet der Engstlige bzw. dasjenige der Kander nur teilweise von den ausserordentlich grossen Niederschlagsmengen betroffen; die grössten Niederschlagsmengen wurden im östlichen Berner Oberland sowie im Raum Entlebuch gemessen. Währendem in Frutigen zwar noch aussergewöhnlich hohe Ein- und Mehrtagessummen gemessen wurden, befindet sich dieses Ereignis bei der Auswertung der Niederschlagsdaten der Station Adelboden nicht einmal unter den zehn grössten Niederschlagsereignissen der letzten 100 Jahre und weist eine Wiederkehrperiode auf, die kleiner als 30 Jahre ist (Tabelle 6).



**Abbildung 10:** Niederschlagssumme vom 20. bis 23. August 2005 (jeweils 7:00 Uhr MEZ). Schwarz umrandet sind das Einzugsgebiet der Kander bzw. dasjenige der Engstlige. (Daten: Wüest et al. (eingereicht); Übersichtskarte: swisstopo (2007)).

Um abzuschätzen, mit welchen Auswirkungen gerechnet werden müsste, wenn die Niederschlagszentren, welche extreme Hochwasserabflüsse ausgelöst haben, direkt über dem Einzugsgebiet der Engstlige gelegen wären, wurden zwei ausgesuchte räumliche Verschiebungsszenarien des Niederschlagsfeldes vom 20. bis 23. August 2005 (jeweils 7:00 Uhr MEZ) erstellt. Datengrundlage dieser Szenarien stellen die mit Hilfe der räumlich-zeitlichen Verteilungsmuster des Niederschlagsradars disaggregierten Niederschlagsmessungen dar (Wüest et al. (eingereicht); vgl. auch Kapitel 3.2). Diese Daten geben für das Ereignis vom August 2005 das räumliche Muster der Niederschlagsverteilung wesentlich genauer wieder, als die aus Stationswerten räumlich interpolierten Niederschlagsfelder. Umfangreiche Analysen zu den bestehenden Unsicherheiten bei den verschiedenen Niederschlagsdatensätzen wurden von Frei et al. (2008) durchgeführt.

Beim Erstellen der Szenarien wurde – im Sinne einer Worst-Case-Annahme – darauf geachtet, dass das Niederschlagsfeld vom östlichen Berner Oberland (Szenario A) bzw. dasjenige vom Entlebuch (Szenario B) direkt in das Einzugsgebiet der Engstlige verschoben wurde (Abbildung 11). Die dazu verwendeten Verschiebungsvektoren sind in Tabelle 5 aufgeführt. Dieses Vorgehen wurde von Schwanbeck et al. (2008) für hydrologische Modellierungen, welche der Untersuchung des August Hochwassers von 2005 im Berner Oberland dienen, entwickelt. Die Niederschlagsdaten von «Szenario A» konnten von Schwanbeck et al. (2008) unverändert übernommen werden, diejenigen von Szenario B wurden neu bereitgestellt. Beim Erstellen dieser Szenarien wurden keine weitergehenden Untersuchungen zur meteorologischen Plausibilität durchgeführt.



**Abbildung 11:**

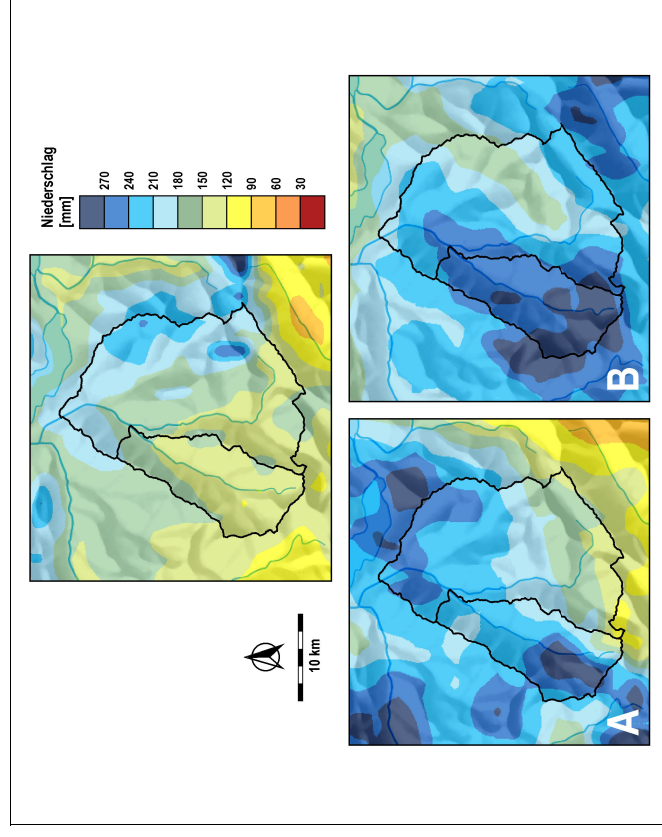
Schematische Darstellung zur Verschiebung der Niederschlagsfelder bzw. zur Entwicklung der beiden räumlich verschobenen Szenarien

(Daten: Wüest et al. (eingereicht), Übersichtskarte: swisstopo (2007)).

**Tabelle 5:** Verschiebungsvektoren der beiden räumlich verschobenen Niederschlagszenarien

Szenario	X [m]	Y [m]
Szenario A	-45'000	-16'000
Szenario B	-35'500	-39'000

Das räumliche Muster der dreitägigen Niederschlagssummen der Beobachtung sowie der beiden Szenarien sind zum direkten Vergleich in Abbildung 12 zusammengestellt. Zudem kann Tabelle 6 entnommen werden, von welcher Jährlichkeit die dreitägigen Niederschlagssummen an den Stellen der in der Region vorhandenen Niederschlagsstationen jeweils sind. Währenddem die tatsächlich gemessenen Werte in Frutigen und Kandersteg einem 100-jährlichen und in Adelboden einem 30-jährlichen Ereignis entsprechen, liefern die Werte beider Szenarien an allen Stationen Jährlichkeiten von über 300 Jahren. Somit müssen die beiden Szenarien mit den räumlich verschobenen Niederschlagsfeldern auch aus dieser Betrachtungsweise als Worst-Case-Szenario bezeichnet werden.



**Abbildung 12:** Niederschlagssummen im Einzugsgebiet der Engstlige bzw. der Kander für den Zeitraum vom 20. bis 23. August 2005 (jeweils 7:00 Uhr MEZ). **Oben:** Gemessene Niederschlagssumme. **A und B:** räumlich verschobene Niederschlagszenarien (Details siehe Text; Grundlegendaten: Wüest et al. (eingereicht); Übersichtskarte: swisstopo (2007)).

**Tabelle 6:** Dreitägige Punktniederschlagssummen an den Messstationen Adelboden, Frutigen und Kandersteg. Abgeleitet aus den Radar-Niederschlagsfeldern (Wüest et al. (eingeben) für das Ereignis vom 20. bis 23. August 2005 bzw. für die beiden räumlich verschobenen Szenarien. Einordnung der Jährlichkeit anhand der Auswertungen von Gammeter (2008).

	Radar / Beobachtet		Szenario A		Szenario B	
	NS	T	NS	T	NS	T
Adelboden	128 mm	30 a	291 mm	>300 a	267 mm	>300 a
Frutigen	160 mm	100 a	232 mm	>300 a	253 mm	>300 a
Kandersteg	141 mm	100 a	191 mm	>300 a	202 mm	>300 a

NS = 72h-Stunden-Summe; T = Wiederkehrperiode der Niederschlagssumme; Einordnung der Jährlichkeit anhand der Angaben aus Gammeter (2008)

Die Veränderungen, die bei den Gebietsniederschlägen unterschiedlicher Dauer entstehen, sind in Tabelle 7 dargestellt. Bei diesen Werten ist zu beachten, dass die Datengrundlage nicht den aus Stationswerten interpolierten Gebietsniederschlägen entspricht. Deshalb können die Resultate dieser Auswertungen nicht mit den extremwertstatistisch berechneten Werten, welche bei den menschlich skalierten Niederschlagsszenarien verwendet wurden (Kapitel 3.3a), verglichen werden. Es zeigt sich aber, dass die Gebietsniederschläge je nach Szenario gegenüber den gemessenen Werten zum Teil fast um Faktor 2 erhöht wurden.

**Tabelle 7:** Maximale Mehrstundensummen für den Gebietsniederschlag im Einzugsgebiet der Engstlige-Frutigen für das beobachtete Ereignis vom August 2005 sowie für die räumlich verschobenen Szenarien (Grundlagendaten: Wüest et al., eingereiht). Zeitraum: 20. bis 23. August 2005 jeweils 7:00 Uhr MEZ.

Maximale ...	Radar / Beobachtet		Szenario A		Szenario B	
6-h-Sum [mm]	31.5		44.6		61.2	
12-h-Sum [mm]	61.7		81.4		94.1	
24-h-Sum [mm]	105.2		156.6		166.5	
48-h-Sum [mm]	135.1		211.6		221.2	
72-h-Sum [mm]	151.6		230.8		267.7	

## 4 Resultate

### 4.1 Auswertung hydrologischer Daten

Die vorhandenen Abflussdaten wurden insbesondere bezüglich der Hochwasserhältnisse bzw. folgenden Fragestellungen ausgewertet:

- > Von welcher Grössenordnung sind die seltenen Hochwasserabflüsse?
- > In welcher Jahreszeit treten die jährlichen Hochwasser auf?
- > Beeinflussen einzelne Teileinzugsgebiete das Abflussgeschehen der Engstlige besonders stark?

Daneben wurden zum Vergleich zu den Ergebnissen der hydrologischen Datenanalyse auch Abschätzungen mit dem Modell «HQx\_meso\_CH» (Barben 2001) also mit regionalhydrologischen Ansätzen durchgeführt. Die Kennwerte zu den Mittelwasserhältnissen sind in Tabelle 1 bzw. Anhang 8 enthalten.

#### a) Hochwasserabschätzungen mit «HQx\_meso\_CH»

Die Resultate der verschiedenen Hochwasserabschätzung mit HQx\_meso\_CH sind in Tabelle 8 enthalten. Diese Werte weichen gegenüber den bisher vorliegenden Abschätzungen (vgl. TBA (1997) bzw. KAWA (2005)) ab, weil bei Verwendung der gleichen Methoden neu berechnete Eingabegrössen verwendet wurden (siehe Anhang 7). Diese wurden mit Hilfe der Software HQx\_meso\_CH-visual (Klausner 2004) bestimmt. Die Abschätzung mit dem Modell «Kölla meso» liefert dadurch nur noch rund 125 m<sup>3</sup>/s, wogegen bisher von 160 m<sup>3</sup>/s ausgegangen wurde (z.B. TBA (1997)). Der Median aus den Abschätzungen für das HQ<sub>100</sub> liegt somit auf rund 117 m<sup>3</sup>/s. Die Abschätzung für das Extremhochwasser (Qmax) ist für die beiden Modelle «Kürsteiner» und «Müller-Zeller» sehr hoch ausgefallen, die beiden Modelle GIUB (Fn und MQ) liefern erfahrungsgemäss zuverlässigere Werte.

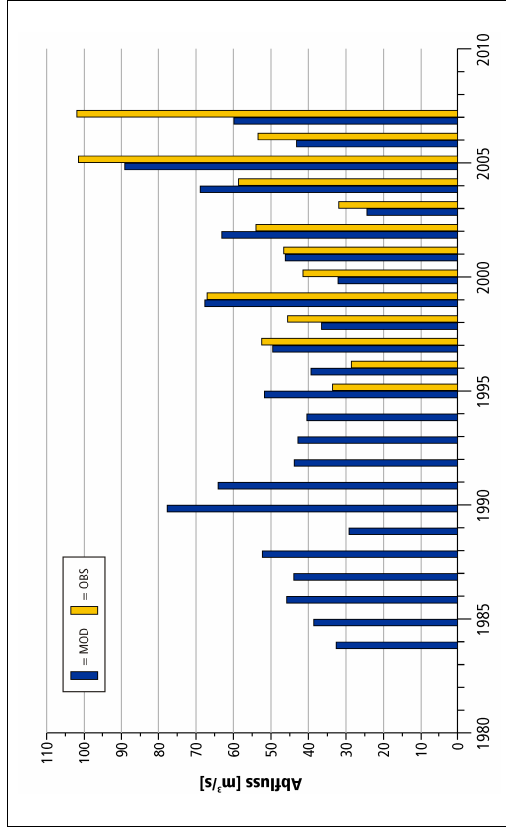
**Tabelle 8:** Engstlige-Frutigen: Abschätzung mit HQx\_meso\_CH

Methode	Zielgrösse	Wert [m <sup>3</sup> /s]
Kürsteiner	Qmax	235.3
Müller-Zeller	Qmax	241.1
GIUB'96 (Fn)	Qmax	148.3
GIUB'96 (MQ)	Qmax	134.8
Kölla meso	HQ <sub>100</sub>	124.6
GIUB'96 (Fn)	HQ <sub>100</sub>	107.2
GIUB'96 (MQ)	HQ <sub>100</sub>	95.9
Momente	HQ <sub>100</sub>	<b>116.9*</b>
BaD7	HQ <sub>100</sub>	122.5

\* = Median aus Abschätzungen für HQ<sub>100</sub>

b) Hochwasserstatistik

Wie bereits erwähnt, umfasst die Messreihe der Station Engstlige-Frutigen bloss 13 Jahre (Kapitel 2.2, Abbildung 13). Vor allem eine extremwertstatistische Berechnung von Hochwasserabflüssen grösserer Wiederkehrperiode ist deshalb mit beträchtlicher Unsicherheit verbunden. Aus diesem Grund wurde mit Hilfe des hydrologischen Modells (siehe Kapitel 3.2) die zu untersuchende Abflussmessreihe für die Periode von 1984 bis 2007 modelliert und somit um über 10 Jahre verlängert. In Abbildung 13 sind die beiden Reihen der daraus extrahierten Jahresmaxima zum direkten Vergleich dargestellt. Es fällt auf, dass die Übereinstimmung von Modellierung und Beobachtung von Ereignis zu Ereignis sehr stark schwanken kann, die entsprechenden Gütemasse sind in Anhang 21 enthalten. Die Abweichungen können damit erklärt werden, dass das jeweilige Ereignis durch die verfügbaren meteorologischen Daten nicht exakt wiedergegeben wird. Zudem werden die äusserst kurzfristigen Abflussspitzen, wie sie an der Engstlige zum Teil auftreten, mit dem verwendeten hydrologischen Modell teilweise nur schlecht nachgebildet (vgl. Kapitel 5). Diese bestehenden Unsicherheiten wirken sich entsprechend auch auf die extremwertstatistischen Auswertungen aus.

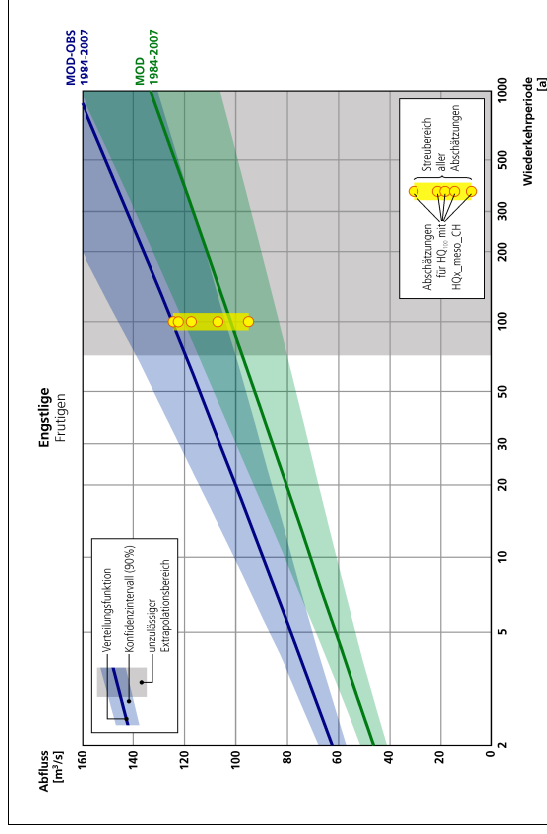


**Abbildung 13:** Engstlige-Frutigen: Jährliche Hochwasser der Periode 1984-2007. MOD: modellierte Werte; MOD-OBS: 1984-1994: modellierte Werte; 1995-2007: beobachtete Werte

Die beobachtete Reihe (= OBS, 1995 bis 2007) weist zudem einen positiven Trend auf, der auch bei Kombination mit den modellierten Werten von 1984 bis 1994 erhalten bleibt. Dieser Trend wurde für die extremwertstatistische Auswertung auf das letzte Jahr bezogen bereinigt.

Mit dem Softwarepaket HQex (Wasy 2005) wurden sowohl die ausschliesslich modellierten Daten (1984-2005; Abkürzung = MOD) als auch die kombinierte Reihe (1984-1994; modelliert; 1995-2007; beobachtet; Abkürzung = MOD-OBS) extremwertstatistisch ausgewertet. Diese Reihe wurde auch ausgewertet, um den Einfluss der zum Teil deutlich tiefer modellierten Abflussspitzen (z.B. 2007) auf die extremwertstatistische Auswertung der Hochwasserabflüsse abzuschätzen. Die Resultate dieser Analysen sind in Abbildung 14, Tabelle 9 bzw. Tabelle 10 dargestellt. In Abbildung 14 sind zusätzlich auch die Abschätzungen für das HQ<sub>100</sub> mit HQx\_meso\_CH eingetragen.

tate dieser Analysen sind in Abbildung 14, Tabelle 9 bzw. Tabelle 10 dargestellt. In Abbildung 14 sind zusätzlich auch die Abschätzungen für das HQ<sub>100</sub> mit HQx\_meso\_CH eingetragen.



**Abbildung 14:** Engstlige-Frutigen: Frequenzanalyse der jährlichen Hochwasserspitzen (1984-2007, modellierte Werte = MOD); Frequenzanalyse der jährlichen Hochwasserspitzen (1984-2007, Werte: modelliert (1984-1997) und beobachtet (1998-2007 = MOD-OBS); Hochwasserabschätzungen mit HQx\_meso\_CH (Barben 2001).

**Tabelle 9:** Engstlige-Frutigen: Extremwertstatistische Hochwasserabschätzung (1984-2007, modellierte Werte = MOD)

Wiederkehrperiode [a]	unterer Grenzwert	HQx [m³/s]	oberer Grenzwert
2	41.4	46.4	51.4
5	53.6	61.3	68.9
10	61.0	71.1	81.1
20	68.0	80.5	93.0
30	72.0	85.9	99.9
50	76.9	92.7	108.6
100	83.6	102.0	120.4
200	90.4	111.3	132.3
300	94.3	116.8	139.3

Verteilungsfunktion: LN3  
 Methode: WGM  
 Signifikanzniveau: 0.1  
 kursiv: unzulässiger Extrapolationsbereich

**Tabelle 10:** Engstlige-Frutigen: Extremwertstatistische Hochwasserabschätzung (1984-2007, mod./beob. Werte, trendbereinigt bzgl. letztem Jahr; = MOD OBS)

Wiederkehrperiode [a]	unterer Grenzwert	HQx [m <sup>3</sup> /s]	oberer Grenzwert
2	56.8	62.2	67.7
5	70.0	78.5	87.0
10	78.2	89.4	100.6
20	86.0	100.0	114.1
30	90.5	106.2	122.0
50	96.1	114.1	132.0
100	103.8	124.8	145.7
200	111.6	135.7	159.7
300	116.3	142.2	168.0

Verteilungsfunktion: LN3

Methode: WGM

Signifikanzniveau: 0.1  
trendbereinigt

kursiv: unzulässiger Extrapolationsbereich

Diese Zusammenstellung zeigt, dass einige Abweichungen zwischen den beiden Auswertungen auftreten. Die Ergebnisse aus der kombinierten, trendbereinigten Reihe weisen durchwegs höhere Werte auf, als diejenigen die bei der Auswertung der modellierten Werte entstehen. Dies lässt sich damit erklären, dass wie schon erwähnt einige rasch ansteigende Abflussspitzen kurzer Dauer in den Messungen enthalten sind (z.B. Ereignis vom August 2007), welche mit dem verwendeten hydrologischen Modell und den meteorologischen Inputdaten teilweise nur ungenügend nachgebildet werden können (vgl. Abbildung 13).

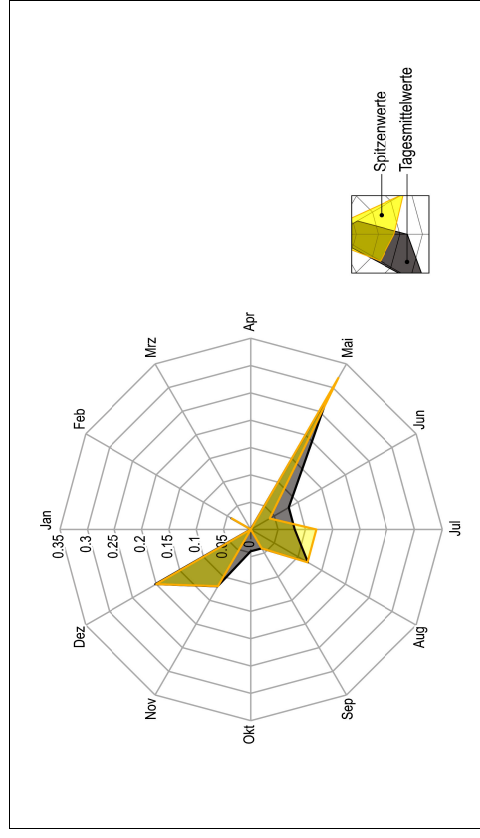
Insgesamt ergibt sich aus dieser Zusammenstellung ein  $HQ_{100}$  zwischen 102 m<sup>3</sup>/s und 125 m<sup>3</sup>/s. Diesen Unsicherheitsbereich umfassen auch die Abschätzungen mit HQx\_meso\_CH. Zu beachten ist, dass die Werte ausserhalb des zulässigen Extrapolationsbereiches liegen, welcher entsprechend den Empfehlungen der DVWK (1999) der dreifachen Länge der Datenreihe entspricht. Die Ergebnisse sind somit mit Vorsicht zu verwenden.

Fazit: Die Ergebnisse der Hochwasserabschätzung mit HQx\_meso\_CH und der extremwertstatistischen Auswertungen weisen darauf hin, dass mit einer 100-jährlichen Hochwasserspitze einer Grössenordnung von 115 bis 120 m<sup>3</sup>/s ausgegangen werden muss – die verschiedenen Abschätzungen umfassen einen Bereich von 102 bis 125 m<sup>3</sup>/s. Dieser Wert liegt deutlich tiefer als die bisher vorliegende Abschätzung von 160 m<sup>3</sup>/s (TBA 1997).

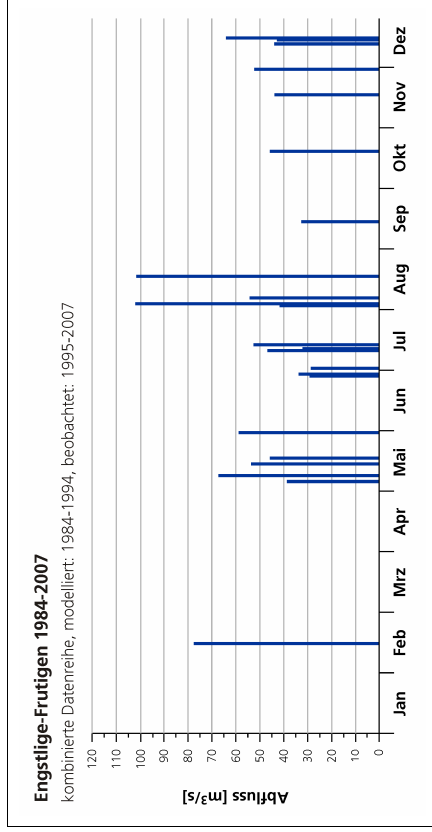
### c) Jahreszeitliche Verteilung der Hochwasserabflüsse

Abbildung 15 zeigt die Auswertung der jahreszeitlichen Verteilung der grössten Hochwasserspitzen und -volumen jeden Jahres für die Periode 1984 bis 2007. Die maximalen jährlichen Hochwasservolumen wurden auf Grund der mittleren Tagesabflüsse bestimmt (Federer & Weingartner 2006). Aus dieser Abbildung wird auch ersichtlich, dass sich die Zeitpunkte des Eintretens der beiden Kenngrössen nur unwesentlich voneinander unterscheiden. Sowohl die meisten Abflussspitzenwerte als auch die meisten Tagesmittelmaxima fallen in die Phase der grössten mittleren Abflüsse (Mai), wobei aber das ganze Jahr über – sogar noch im Dezember und im Februar – mit Jahreshochwassern gerechnet werden muss. Der Zeitraum von Januar bis April ist von den grössten Abflussmengen und -spitzen weniger häufig betroffen; wie erwähnt treten hier aber auch Ausnahmen auf, die von beträchtlichem Ausmass sein können (Februar 1990).

Dieser Sachverhalt wird auch aus Abbildung 16 ersichtlich, welche zusätzlich zur jahreszeitlichen Verteilung der Hochwasserspitzen auch deren Grösse aufzeigt. Die grössten Hochwasserspitzen traten in der Periode von 1984 bis 2007 in den Sommermonaten (August 2005 bzw. August 2007) auf, wobei aber auch die Ereignisse im Winter (Februar, Dezember) grosse Abflussspitzen aufweisen.



**Abbildung 15:** Saisonale Verteilung der jährlichen Hochwasserspitzen und -volumen für die Engstlige in Frutigen (Periode: 1984-2007, modellierte Werte)



**Abbildung 16:** Saisonale Verteilung der jährlichen Hochwasserspitzen für die Engstlige in Frutigen (Periode: 1984-2007, modellierte und beobachtete Werte)

#### d) Einfluss der Teileinzugsgebiete auf die Hochwasserabflüsse der Engstlige

Wie in Kapitel 2.1 erwähnt, ist der Allenbach das grösste Teileinzugsgebiet der Engstlige. Er umfasst mit 28.8 km<sup>2</sup> rund 20 % der Einzugsgebietsfläche. Für den Allenbach liegt zudem eine lange und qualitativ gute Abflussmessreihe vor (seit 1950); das Einzugsgebiet wurde auch in verschiedenen Arbeiten bezüglich der räumlich dominierenden Abflussprozesse untersucht (z.B. Naef et al. 1999, Naef 2006). Aus diesen Arbeiten geht hervor, dass der Allenbach eine äusserst rasche Abflussreaktion aufweisen kann; die entsprechenden Ereignisse sind teilweise mit sehr hohen Abflusskoeffizienten verbunden. In Bezug auf die Abflussverhältnisse der Engstlige in Frutigen stellen sich deshalb zwei Fragen:

- > Wie stark beeinflusst der Allenbach das Abflussgeschehen der Engstlige in Frutigen?
- > Besteht die Möglichkeit, die Hochwasserabflüsse der Engstlige in Frutigen mit Hilfe der Hochwasserabflüsse des Allenbachs-Adelboden zu bestimmen?

Falls ein Zusammenhang zwischen den beiden Stationen vorliegen würde, könnte die lange Abflussmessreihe des Allenbachs dazu verwendet werden, die Datenreihe der Engstlige-Frutigen um mehrere Jahrzehnte zu verlängern.

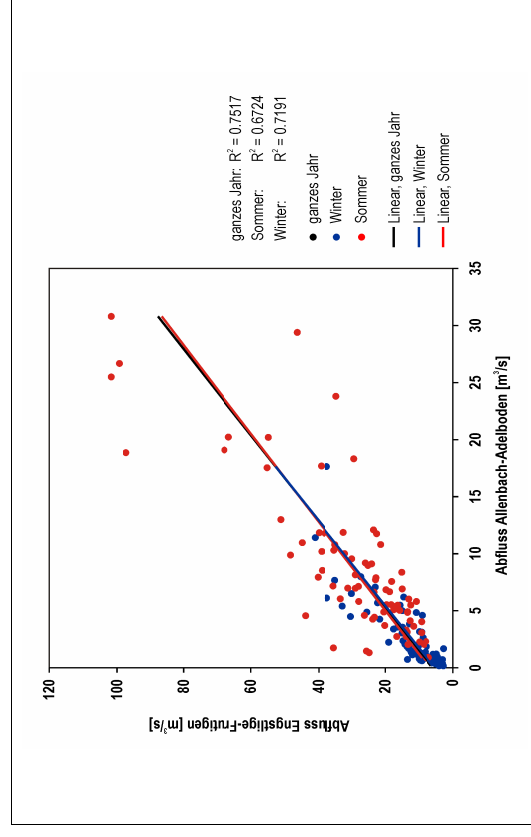
Zur Untersuchung dieser Fragestellungen wurden den verschiedenen Zielgrössen entsprechend drei Datenreihen zusammengestellt und ausgewertet:

- 1) **Beeinflussung der Hochwasserspitze:** Zu jeder monatlichen Hochwasserspitze, welche am Pegel Engstlige-Frutigen gemessen wurde, wurde die diesem Ereignis entsprechende Abflussspitze am Pegel Allenbach-Adelboden gesucht und anschliessend der prozentuale Anteil bestimmt. Datengrundlage dieser Reihe sind die Stundenmittelwerte die an den beiden Pegeln gemessen wurden.

- 2) **Beeinflussung des Hochwasservolumens:** Als Annäherung wurde für jeden Hochwassertag (Tag des grössten Tagesmittelwerts bei Engstlige-Frutigen) der entsprechende mittlere Tagesabfluss von Engstlige-Frutigen sowie derjenige von Allenbach-Adelboden bestimmt und anschliessend der prozentuale Anteil berechnet.
- 3) **Beeinflussung des mittleren Abflusses:** Für jeden Tagesmittelwert der Engstlige-Frutigen wurde der Anteil des Tagesmittelwertes von Allenbach-Adelboden bestimmt. Da die Fliesszeit bis zum Gebietsauslass nicht bekannt ist, wurde auf eine gleiche Auswertung auf Basis der Stundenmittelwerte verzichtet.

Die entsprechenden Auswertungen zeigen, dass – obschon ein Zusammenhang bei den einzelnen Datenreihen festzustellen ist – die Unsicherheiten vor allem im Hochwasserbereich doch sehr gross sind (Abbildung 17). So steigt das Bestimmtheitsmass bei der Beeinflussung der stündlichen Hochwasserspitzen selbst bei saisonaler Auswertung nicht über 0.752, wobei alle Korrelationskoeffizienten hoch signifikant sind (Tabelle 11).

Auch bei den mittleren Tagesabflüssen zeigt sich sowohl bei der mittleren Beeinflussung, als auch bei der Auswertung der Hochwasservolumen ein ähnliches Bild; wobei das grösste Bestimmtheitsmass für die Werte des ganzen Jahres auftritt und rund 0.762 beträgt (Abbildung 18, Tabelle 12).

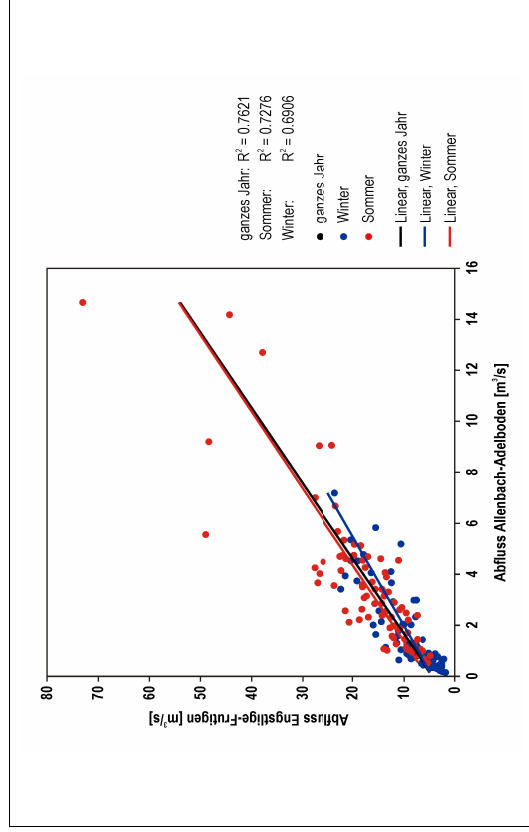


**Abbildung 17:** Zusammenhang zwischen den gemessenen Stundenmittelwerten der monatlichen Hochwasserspitzen der Engstlige-Frutigen und den entsprechenden Hochwasserspitzen von Allenbach-Adelboden (Periode: 1995-2007; Daten: WWA; siehe auch Tabelle 11)



**Tabelle 11:** Korrelationskoeffizienten zur Auswertung in Abbildung 17

	R	R <sup>2</sup>	p
ganzes Jahr (N = 161)	0.8670	0.7517	< 0.001
Sommer (N = 81)	0.8200	0.6724	< 0.001
Winter (N = 80)	0.8480	0.7191	< 0.001

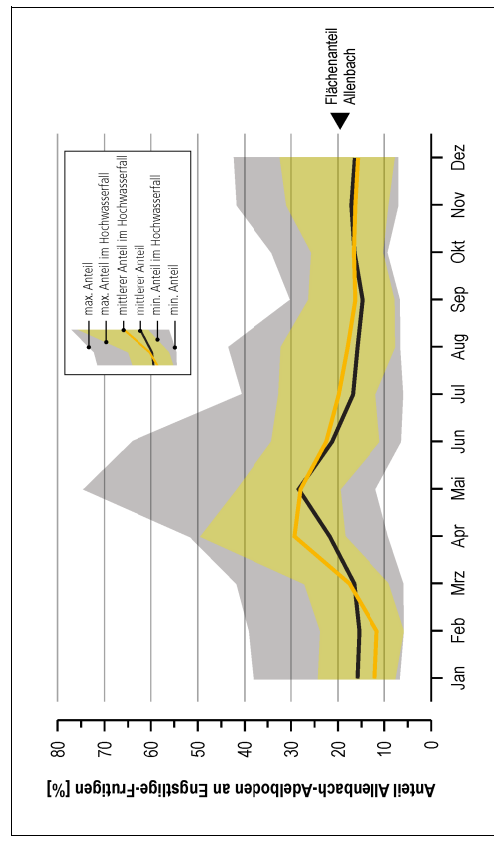


**Abbildung 18:** Zusammenhang zwischen den gemessenen Tagesmittelwerten der monatlichen Hochwasserabflüssen der Engstlige-Frutigen und den entsprechenden Abflussmengen von Allenbach-Adelboden (Periode: 1995-2007; Daten: WWA; siehe auch Tabelle 12)

**Tabelle 12:** Korrelationskoeffizienten zur Auswertung in Abbildung 18

	im Hochwasserfall			ganze Periode		
	R	R <sup>2</sup>	p	R	R <sup>2</sup>	p
ganzes Jahr (N = 156 bzw. 4748)	0.8730	0.7621	< 0.001	0.8680	0.7534	< 0.001
Sommer (N = 78 bzw. 2392)	0.8530	0.7276	< 0.001	0.8600	0.7396	< 0.001
Winter (N = 78 bzw. 2356)	0.8310	0.6906	< 0.001	0.8090	0.6545	< 0.001

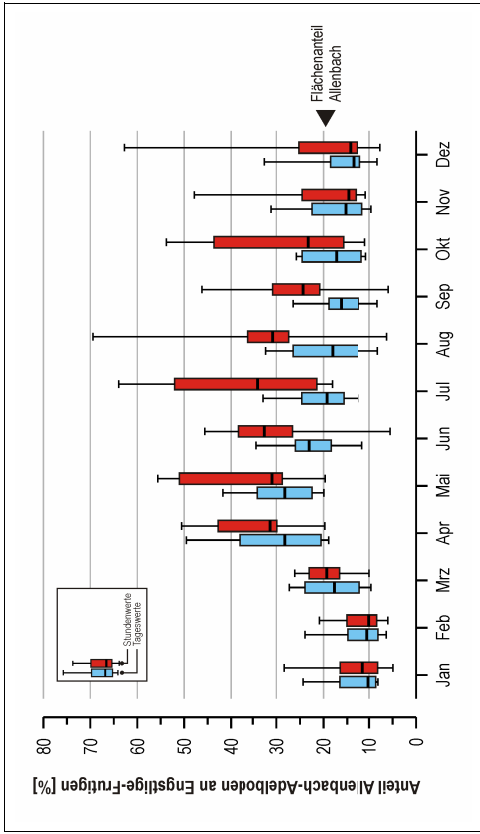
Der gleiche Sachverhalt zeigt sich auch bei der Auswertung der Tagesmittelwerte in monatlicher Auflösung. In Abbildung 19 sind die maximalen, mittleren und minimalen Anteile der Tagesmittelwerte von Allenbach-Adelboden am entsprechenden Tagesmittelwert von Engstlige-Frutigen dargestellt. Zusätzlich ist in dieser Grafik auch der Vergleich zwischen dem Anteil bei Hochwassertagen und dem Anteil bei sämtlichen Werten enthalten: In grauer Farbe sind die prozentualen Anteile über alle Werte und in gelber Farbe diejenigen im Hochwasserfall dargestellt. Es wird deutlich, dass die mittlere Anteil im Hochwasserfall einzig im Mai etwas grösser ist, als der mittlere Anteil bei sämtlichen Werten. Im Januar und Februar ist der Anteil von Allenbach-Adelboden im Hochwasserfall sogar etwas tiefer als der mittlere Anteil über alle Werte, was im Hochwasserfall vermutlich auf den grösseren Beitrag der übrigen, tiefer gelegenen Teileinzugsgebiete zurückzuführen ist.



**Abbildung 19:** Prozentualer Anteil des mittleren täglichen Abflusses von Allenbach-Adelboden am mittleren täglichen Abfluss von Engstlige-Frutigen (alle Werte: schwarze Kurve; monatliche Hochwasser: gelbe Kurve; Periode: 1995-2007)

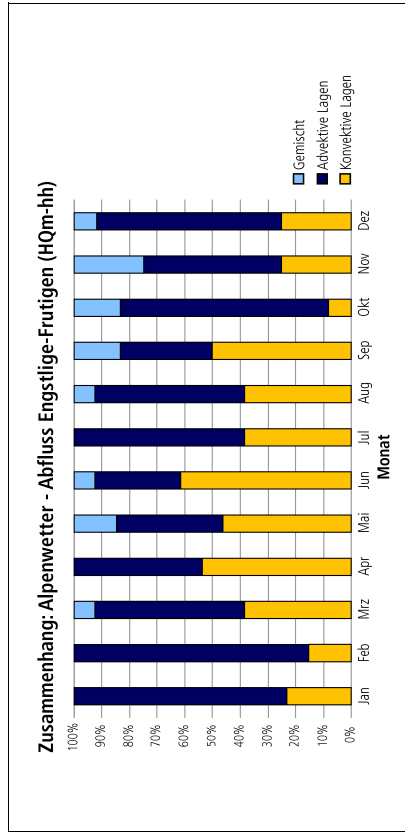
Ein etwas anderes Bild zeigt Abbildung 20, welche den Vergleich zwischen den Anteilen im Hochwasserfall bei verschiedener zeitlicher Auflösung darstellt. Hier wird ersichtlich, dass sich die mittleren Anteile der Stunden- und Tageswerte an den entsprechenden Hochwasserabflüssen vor allem in den Sommermonaten deutlich unterscheiden. Im Sommer kann der Anteil von Allenbach-Adelboden an den Stundenmaxima von Engstlige-Frutigen bis zu 70 % betragen, was bei einem Flächenanteil von rund 20 % sehr beträchtlich ist.

Allerdings fällt auch auf, dass der Streubereich der Beeinflussung bei den Stundenwerten (z.B. im August) relativ gross ist – ein direkter Zusammenhang zwischen den beiden Stationen ist somit nur schwierig abzuleiten. Weiter ist bei den einzelnen grossen prozentualen Anteilen im Winter (z.B. Dezember) zu beachten, dass die ausgewerteten Abflüsse zum Teil auf sehr kleinem Niveau sind aber trotzdem einen hohen prozentualen Anteil ergeben können. Es handelt sich dabei aber um einzelne Ausreisser; im Allgemeinen sind die Anteile im Winter sowohl bei den Tages- als auch bei den Stundenwerten eher klein.



**Abbildung 20:** Prozentualer Anteil der Abflussspitze von Allenbach-Adelboden an der monatlichen Hochwasserspitze von Engstlige-Frutigen (Stundenwerte; Periode 1995-2007)

Dieser Zusammenhang (grosse Anteile auf Stundenbasis bzw. kleinere Anteile auf Tagesbasis im Sommer) kann nur beschränkt mit dem das Ereignis auslösenden Wettertypen (konvektives bzw. advektives Niederschlagsereignis) erklärt werden. In Abbildung 21 ist für jeden monatlichen Hochwassertag bei Engstlige-Frutigen die entsprechende Wetterlage dargestellt. Der Unterschied zwischen Tages- und Stundenanteilen im August (Abbildung 20) kann z.B. nicht direkt mit überwindenden konvektiven Ereignissen erklärt werden. Allerdings kann der fehlende Zusammenhang auch durch die Qualität der Grundlagendaten (Alpenwetterstatistik) begründet sein.



**Abbildung 21:** Zusammenhang zwischen monatlicher Abflussspitze und vorherrschender Wetterlage im Alpenraum (Daten: Alpenwetterstatistik, MeteoSCHWEIZ)

Aus diesem Vergleich zeigt sich also, dass die Hochwasserabflüsse der beiden Stationen einen gewissen Zusammenhang aufweisen. Die verbleibende Unsicherheit ist aber sehr gross, weshalb im Rahmen dieser Untersuchung auf eine Ableitung der Hochwasser der Engstlige aus den Abflussdaten des Allenbachs verzichtet wurde.

#### 4.2 Auswertung der meteorologischen Daten

Die Analyse der meteorologischen Daten beschränkt sich auf das Starkniederschlagsgeschehen im Einzugsgebiet. Die entsprechenden Auswertungen für die täglichen Stationsniederschläge konnten von Gammeter (2008) übernommen werden, welcher eine Vielzahl von Stationen im Berner Oberland untersucht hat. In der vorliegenden Arbeit wurden deshalb ausschliesslich die Gebietsniederschläge, welche als Input für das hydrologische Modell bereitgestellt wurden und für die Periode 1984 bis 2007 in stündlicher Auflösung vorliegen, extremwertstatistisch ausgewertet.

##### a) Extremwertstatistische Auswertung der Punktniederschläge

Die Auswertungen von Gammeter (2008) für die Stationen Adelboden, Frutigen und Kandersteg sind im Anhang 4 bis 6 enthalten. Diese Analysen umfassen die Periode 1901 bis 2006 und wurden für tägliche Messwerte durchgeführt.

In Tabelle 14 sind die Auswertungen für die Stationen Frutigen und Adelboden für Ein- und Mehrtagessummen unterschiedlicher Jährlichkeit zusammengestellt. Für die Station Adelboden treten durchwegs höhere Werte auf als für die Station Frutigen. Ein 100-jährlicher, 24-stündlicher Punktniederschlag in Adelboden beträgt somit rund 103 mm, in Frutigen jedoch 89 mm. Die Ergebnisse sind von der gleichen Grössenordnung wie diejenigen von Zeller et. al (1979) für die Periode 1901-1970.

**Tabelle 13:** Niederschlagssummen unterschiedlicher Wiederkehrperioden (Periode: 1901-2006; Daten: Gammeter 2008)

	Frutigen (815 m ü.M.)				Adelboden (1320 m ü.M.)			
	2.33a	30a	100a	300a	2.33a	30a	100a	300a
24h-Niederschlagssumme [mm]	47	75	89	102	50	84	103	122
48h-Niederschlagssumme [mm]	64	107	128	150	69	122	151	180
72h-Niederschlagssumme [mm]	75	123	148	172	79	138	168	198
120h-Niederschlagssumme [mm]	91	151	184	218	97	162	195	228

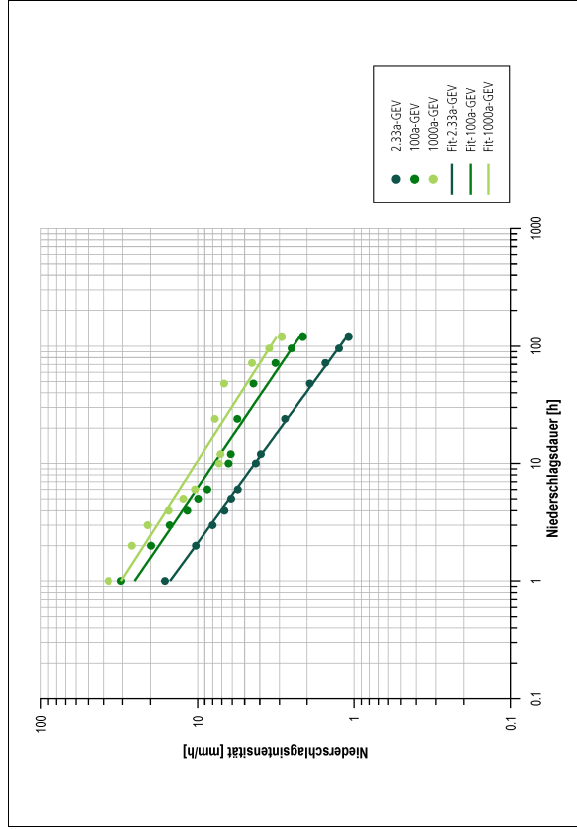
##### b) Extremwertstatistische Auswertung der Gebietsniederschläge

Für die Periode von 1984 bis 2007 wurden aus den für das Modell räumlich interpolierten Stationenwerten die jährlichen und saisonalen Maxima unterschiedlicher Dauer bestimmt und extremwertstatistisch ausgewertet. Die saisonalen Maxima wurden aus dem Zeitraum Mai bis Oktober bestimmt – dabei wurde davon ausgegangen, dass in dieser Periode die meisten Hochwasser bzw. hochwasser auslösenden Niederschlagsereignisse auftreten.

Als Zusammenfassung der Auswertungen wurde ein Niederschlags-Intensitäts-Diagramm erstellt, wobei in Abbildung 22 die Auswertung der jährlichen Maxima unter Anwendung der GEV-Verteilung dargestellt sind (vgl. Kapitel 3.1). Alle anderen Analysen (Anwendung der Gumbel-Verteilung und/oder saisonale Auswertungen) ergaben zum Teil deutlich tiefere Werte (siehe Anhang 9 bis 18).

Abbildung 22 zeigt die einer bestimmten Ereignisdauer entsprechenden Niederschlagsintensität für drei unterschiedliche Wiederkehrperioden (2.33a, 100a, 1000a). Die für verschiedene Dauern berechneten Werte wurden dazu verwendet, den Zusammenhang zwischen Niederschlagsdauer und Niederschlagsintensität für die entsprechende Jährlichkeit zu bestimmen. Es fällt auf, dass die Anpassung für die Werte kürzerer Wiederkehrperiode deutlich besser gelungen ist, als für diejenigen mit längerer Wiederkehrperiode.

Tabelle 14 enthält die numerischen Resultate dieser Auswertung. Zusätzlich wurden in dieser Tabelle die Werte aus Geiger et al. (1992) bzw. Jensen et al. (1997) eingetragen. Obschon sich sowohl die verwendete Methodik der räumlichen Interpolation der Stationswerte als auch der Untersuchungszeitraum stark von den Auswertungen von Geiger et al. (1992) bzw. Jensen et al. (1997) unterscheiden, ergeben sich meistens Resultate, die in der gleichen Grössenordnung liegen. Die Werte von Geiger et al. (1992) bzw. Jensen et al. (1997) sind für die 1-Stunden-Summe jeweils etwas grösser bzw. für die 24-Stunden-Summe etwas kleiner als die entsprechenden Resultate der extremwertstatistisch ausgewerteten Gebietsniederschläge.



**Abbildung 22:** Niederschlagsdauer-Intensitäts-Diagramm für die Gebietsniederschläge der Engstlige-Frutigen (Grundlagendaten: Modellinput für PREVAH; höhenkorrigiert und distanzgewichtet interpoliert aus Stationswerten; Stundenwerte; Periode 1984-2007)

**Tabelle 14:** Extremwertstatistische Auswertung der Gebietsniederschlagssummen unterschiedlicher Dauer (Methode: GEV)

T [a]	Summe der Gebietsniederschläge x-stündlicher-Dauer [mm]											Werte aus HADES* [mm]	
	1h	6h	10h	12h	24h	48h	72h	96h	120h	1h	24h		
2.33	16	33	43	47	66	92	110	120	130	19	(18)	55	(54)
30	27	46	58	66	111	166	188	199	213				
100	31	52	63	74	134	211	229	241	255	48	(37)	125	(111)
300	34	57	68	80	157	260	271	283	297				
500	35	59	70	82	169	286	293	304	318				

\*= Werte aus Geiger et al. (1992); HADES-Tafel 2.4. In Klammern: Werte aus Jensen et al. (1997); HADES-Tafel 2.4

### 4.3 Ergebnisse der mengenskalierten Niederschlagszenarien

#### a) Modellinput

Zur Auswahl der zu skalierenden Niederschlagsereignisse wurden jeweils – wie in Kapitel 3.3 beschrieben – für die vier Niederschlagsdauern (12h, 24h, 48h, 72h) die fünf grössten Ereignisse bestimmt (Tabelle 15). Dabei sind einzelne Ereignisse sowohl bei den kürzeren als auch bei den längeren Ereignisdauern vertreten (z.B. August 2005). Jedes Ereignis wurde anschliessend auf den der Niederschlagsdauer entsprechenden Wert, welcher Tabelle 14 entnommen werden kann, mit der additiven Methode skaliert. Der entsprechende Zielwert wurde für jede Ereignisdauer anhand der Auswertungen, welche in Kapitel 3.3 und Kapitel 4.2b) beschrieben sind, bestimmt und auf fünf Millimeter gerundet.

**Tabelle 15:** Ausgewählte Niederschlagszenarien

Ereignis	x-stündliche Summe, original [mm]				x-stündliche-100-jährliche Summe, skaliert [mm]			
	12h	24h	48h	72h	12h	24h	48h	72h
Mai 1985			96.0				210.0	
Juli 1986	50.4				75.0			
Juli 1996		62.6				135.0		
September 1997	53.7	72.4			75.0	135.0		
Mai 1999				101.3				230.0
Juni 2002	49.7				75.0			
August 2002			86.5	102.6			210.0	230.0
Juni 2004		66.2	106.4	117.7		135.0	210.0	230.0
August 2005	52.2	88.7	113.3	133.3	75.0	135.0	210.0	230.0
August 2007	56.6	75.3	101.5	118.8	75.0	135.0	210.0	230.0

b) Modellgüte

Für jedes der ausgewählten Ereignisse wurde jeweils beurteilt, wie gut die für das Ereignis gemessenen, originalen Abflusswerte durch die modellierten Abflusswerte wiedergegeben werden. Diese qualitative Beurteilung orientiert sich ausschliesslich an den beobachteten und modellierten Abflussspitzenwerten, und soll es ermöglichen, auch die Ganglinie des modellierten Niederschlagszenarios grob einzuschätzen. Somit soll verhindert werden, dass für ein Ereignis, bei welchem die Abweichung zwischen originalen und modellierten Abflusswerten sehr gross ist, die aus den skalierten Niederschlägen modellierten Abflusswerte falsch interpretiert werden. Wie schon mehrfach erwähnt, umfasst die gemessene Abflussreihe (1995 bis 2007) nicht die gesamte modellierte Periode (1984-2007), wodurch die qualitative Beurteilung nicht für alle Ereignisse möglich war (Tabelle 16). Bei dieser Zusammenstellung fällt auf, dass die Modellierung einzelner Ereignisse nur schlecht bzw. mit einer grossen Abweichung gelungen ist. Die Ergebnisse derjenigen Ereignisse, welche eine sehr grosse Abweichung aufweisen (+/- 30%), sind in der Spalte «MODscal» in Klammern gestellt und wurden für die abschliessende Bestimmung des Mittelwerts aller Szenarien nicht verwendet (Spalte «Mittel») in Tabelle 16).

c) Modellerte Abflussganglinien

Tabelle 16 zeigt die Resultate der aus den skalierten Niederschlagszenarien modellierten Abflussspitzen. Es zeigt sich, dass aus den Ereignissen längerer Dauer auch grössere Hochwasserspitzen (bzw. -volumen) resultieren. Die Zunahme ist aber bei längeren Ereignisdauern (24h, 48h bzw. 72h) nicht mehr so gross wie bei den beiden kürzeren. Bei allen modellierten 100-jährlichen Niederschlagszenarien wird ein Wert von rund 135 m³/s für die Abflussspitze bei den beiden kürzeren Ereignisdauern (12h, 24h) gar nicht und bei den beiden längeren Ereignisdauern nur selten überschritten wird. Das Mittel aller einbezogenen Ereignisse beträgt 115 m³/s. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Streuung bei den Werten der gleichen Ereignisdauer sehr gross ist (Abbildung 23).

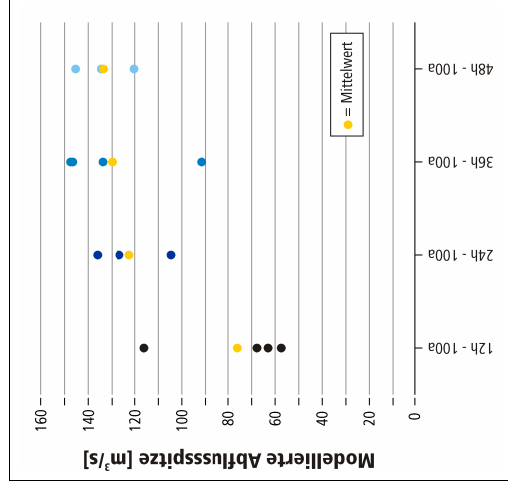


Abbildung 23:

Zusammenfassung der aus skalierten Niederschlagsereignissen modellierten Abflussergebnisse (Spitzenwert der zugehörigen Hochwasserereignisse)

Tabelle 16: Beurteilung und Ergebnisse der ausgewählten Niederschlagszenarien

Ereignis / Dauer	Norig [mm]	Nscal [mm]	OBS [m³/s]	MOD [m³/s]	ABW [%]	Qualität	MODscal [m³/s]	Mittel [m³/s]
<b>12-h-Summen</b>								
Juli 1986	50.4	75.0		32.6		?	57.4	
September 1997	53.7	75.0	44.9	43.5	-3.1	ok	67.7	
Juni 2002	49.7	75.0	39.2	36.1	-7.9	-	63.0	
August 2005	52.2	75.0	99.3	88.8	-10.6	-	116.1	
August 2007	56.6	75.0	101.7	59.6	-41.4	---	(79.4)	<b>76.1</b>
<b>24-h-Summen</b>								
Juli 1996	62.6	135.0	21.4	39.2	83.2	+++	(95.8)	
September 1997	72.4	135.0	44.9	43.5	-3.1	ok	104.6	
Juni 2004	66.2	135.0	54.0	68.6	27.0	++	126.7	
August 2005	88.7	135.0	99.3	88.8	-10.6	-	136.0	
August 2007	75.3	135.0	101.7	59.6	-41.4	---	(111.2)	<b>122.4</b>
<b>48-h-Summen</b>								
Mai 1985	96.0	210.0		38.5		?	91.6	
August 2002	86.5	210.0	51.2	62.8	22.7	++	147.4	
Juni 2004	106.4	210.0	54.0	68.6	27.0	++	133.8	
August 2005	113.3	210.0	99.3	88.8	-10.6	-	146.5	
August 2007	101.5	210.0	101.7	59.6	-41.4	---	(131.9)	<b>129.8</b>
<b>72-h-Summen</b>								
Mai 1999	101.3	230.0	55.2	67.3	21.9	++	134.3	
August 2002	102.6	230.0	51.2	62.8	22.7	++	134.5	
Juni 2004	117.7	230.0	54.0	68.6	27.0	++	120.3	
August 2005	133.3	230.0	99.3	88.8	-10.6	-	145.3	
August 2007	118.8	230.0	101.7	59.6	-41.4	---	(122.3)	<b>133.6</b>

**Norig:** Summe aus interpoliertem Gebietsniederschlag, unverändert  
**Nscal:** Summe aus interpoliertem Gebietsniederschlag, skaliert  
**OBS:** Beobachtete Abflussspitze des zugehörigen Abflussereignisses  
**MOD:** Modellerte Abflussspitze  
**ABW:** Abweichung von modellierter und beobachteter Abflussspitze  
**Qualität:** Qualität der Modellierung: +++/- (sehr grosse Abweichungen zwischen Messung und Modellierung, mehr als ± 30 %; diese Werte werden nicht zur Mittelwertbildung verwendet), +/- (stake Über- bzw. Unterschätzung des Modells; mehr als ± 25 %), +/- (Modell über- bzw. unterschätzt die Beobachtung ± 15%), ok (gute Übereinstimmung von Modell und Beobachtung), ? (keine Beobachtung vorhanden)  
**MODscal:** Modellerte Abflussspitze mit skaliertem Niederschlag  
**Mittel:** Mittelwert aus den modellierten, skalierten Abflussspitzen

Bei den modellierten Abflussereignissen sind einige Punkte zu beachten. Die aus den Niederschlags-szenarien unterschiedlicher Dauer modellierten Abflussspitzen sind für die meisten Szenarien als eher zu hoch. Dies aus zwei Gründen: einerseits liegen die entsprechenden saisonalen Nieder-

schlagswerte liegen deutlich tiefer (vgl. Anhang 9 bis 18) andererseits überschätzen die modellierten Abflusswerte die beobachteten zum Teil deutlich. Aus den gleichen Gründen werden auch die realen Abflussvolumen durch das Modell eher überschätzt.

#### 4.4 Ergebnisse der räumlich verschobenen Niederschlagszenarien

##### a) Modellinput

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, diente für diese Szenarien der Datensatz von Wüest et al. (eingereicht) als Input für die räumlich verschobenen Niederschlagszenarien. Alle übrigen meteorologischen Grössen, die für das hydrologische Modell benötigt werden, wurden aus der standardmässigen Version übernommen; dabei es handelt sich also um räumlich interpolierte Stationswerte in Stundenaufösung. Die bei den verschiedenen meteorologischen Grössen verwendeten Interpolationsverfahren unterscheiden sich zwar, da aber beiden Methoden die an den Stationen gemessenen Werte zu Grunde liegen, kann davon ausgegangen werden, dass die meteorologische Plausibilität weitgehend erhalten bleibt. Das hydrologische Modell wurde für die Anwendung dieser Daten separat kalibriert.

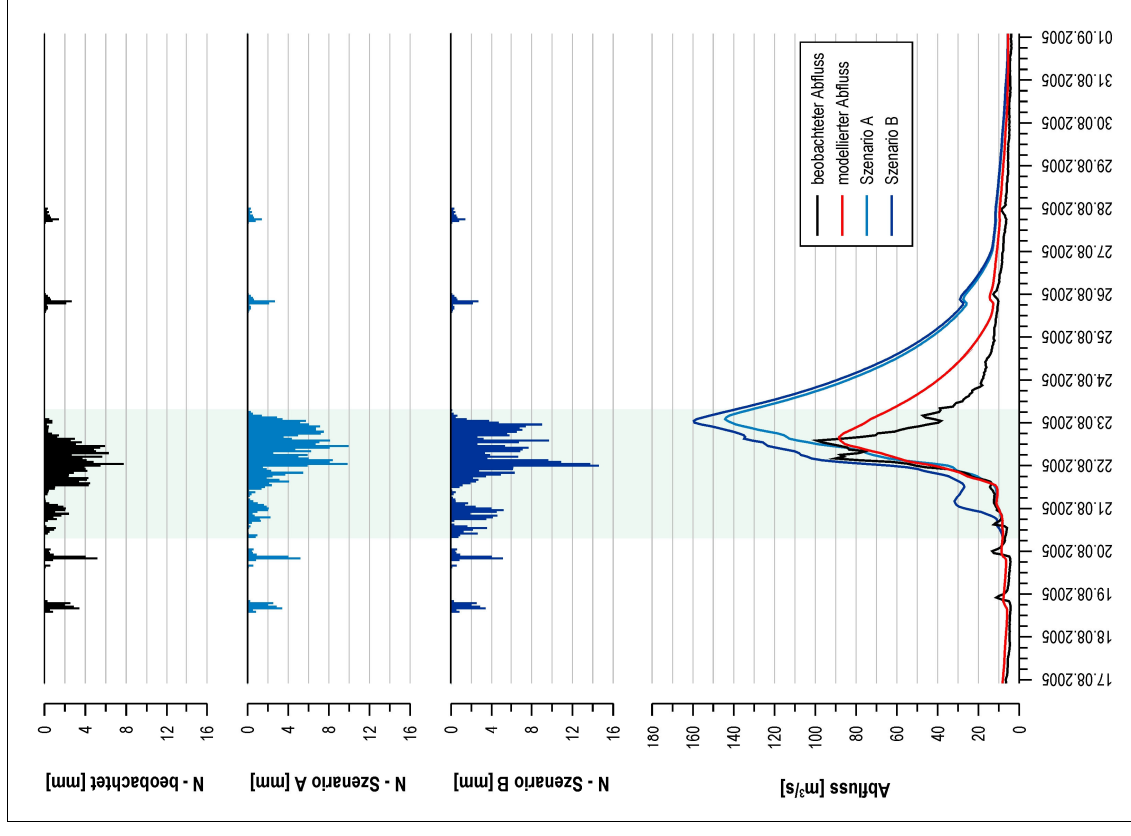
Die beiden modellierten Niederschlagszenarien wurden wie in Kapitel 3.3 beschrieben erstellt; der entsprechende Zeitraum (20.08.2005 7:00 Uhr – 23.08.2005 7:00 Uhr) wurde in den oben beschriebenen Niederschlagsdaten jeweils ersetzt. Bei dieser Veränderung des Niederschlags wurde der zeitliche und meteorologische Kontext bei den anderen meteorologischen Grössen nicht weiter angepasst, was sicher nicht ganz unproblematisch ist. Da aber der Zeitraum auch vor der Veränderung von starken Niederschlägen betroffen war, wird sich der Fehler vermutlich in Grenzen halten.

##### b) Modellgüte

Die Gütemasse für das auf die Niederschlagsdaten von Wüest et al. (eingereicht) kalibrierte Modell sind in Anhang 22 aufgeführt. Für das Hochwasserereignis vom August 2005 zeigt die Modellierung mit dem unveränderten meteorologischen Modellinput eine gute Übereinstimmung zum beobachteten Abfluss; der Verlauf wurde vom Modell im Wesentlichen gut nachgebildet, die beobachteten kurzfristigen Spitzen sind teilweise jedoch noch etwas unterschätzt worden. Beim Rückgang der Abflussganglinie ist zudem eine leichte Verzögerung festzustellen – das beobachtete Abflussvolumen wird deshalb durch das Modell überschätzt.

##### c) Modellerte Abflussganglinien

In Abbildung 24 sind sowohl der Niederschlagsinput als auch die modellierten und beobachteten Abflussganglinien für das Hochwasserereignis vom August 2005 dargestellt, die bei den Niederschlagsdaten veränderte Phase (20. bis 23. August 2005 jeweils 7:00 Uhr) ist mit einem grünen Balken hinterlegt. Es zeigt sich, dass die beiden Niederschlagszenarien einen starken Einfluss auf die Abflussspitzen und -volumen der Engstlige haben. Sowohl die Spitzen (Abbildung 24) als auch die Volumen (repräsentiert durch die mehrstündigen Abflussmittelwerte in Tabelle 17) sind massiv grösser als die im August 2005 gemessenen Werte. Der Zuwachs von Szenario A (Niederschlagszentrum «Entlebuch») zu Szenario B (Niederschlagszentrum «östliches Berner Oberland») ist vor allem beim Abflussvolumen nicht mehr sehr gross.



**Abbildung 24:** Zusammenfassung der modellierten Szenarien mit räumlich verschobenen Niederschlagsfeldern

**Tabelle 17:** Maximale Mehrstundennittelwerte für den gemessenen und modellierten Abfluss der Engstlige-Frutigen sowie für die verschiedenen modellierten räumliche verschobenen Niederschlagszenarien für das Hochwasserereignis vom 20. bis 23. August 2005

Maximale(r) ...	Modelliert mit Radar / Beobachtet	Modelliert mit Szenario A	Modelliert mit Szenario B	Abfluss Beobachtet
1-h-Mittelwert [m <sup>3</sup> /s]	88	144	160	99
6-h-Mittelwert [m <sup>3</sup> /s]	87	142	157	91
12-h-Mittelwert [m <sup>3</sup> /s]	85	138	151	87
18-h-Mittelwert [m <sup>3</sup> /s]	82	133	146	82
24-h-Mittelwert [m <sup>3</sup> /s]	79	128	142	74
48-h-Mittelwert [m <sup>3</sup> /s]	66	108	124	54
72-h-Mittelwert [m <sup>3</sup> /s]	54	91	104	42

Fazit: Die mit den räumlich verschobenen Niederschlagszenarien modellierten Ereignisse zeigen, dass für die Engstlige bei extremen Niederschlagsbedingungen mit einer Abflussspitze von bis zu 160 m<sup>3</sup>/s gerechnet werden muss. Die Abflussvolumen weisen gegenüber dem Ereignis vom August 2005 ebenfalls stark erhöhte Werte auf. Dieses Ereignis konnte mit Hilfe des hydrologischen Modells gut nachgebildet werden, womit auch die Aussagekraft der Szenarien gestärkt wird. Demgegenüber müsste aber die meteorologische Plausibilität der räumlichen Verschiebung sicher noch weiter untersucht werden.

## 5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden die **hydrologischen Verhältnisse** für das Einzugsgebiet der Engstlige bis Frutigen für den Mittel- und Hochwasserbereich charakterisiert. Die Kennwerte für die mittleren Abflussverhältnisse (z.B. Abflussregime, MQ) als auch der Zeitpunkt der Hochwasserereignisse sind für ein unvergleichtes Einzugsgebiet dieser Grössenordnung und Höhenlage typisch; besonders der mittlere monatliche Abfluss wird durch den Zeitpunkt der Schneeschmelze geprägt. Der Einfluss des Allensbachs als grösstes Teileinzugsgebiet zeigt sich sowohl im Mittel- als auch im Hochwasserfall und liegt in einzelnen Monaten deutlich über dem entsprechenden Flächenanteil. Der Zusammenhang zwischen den Abflussspitzen der Hochwasserereignisse an den beiden Pegeln ist allerdings mit zu grossen Unsicherheiten verbunden, als dass direkt vom Abflussgeschehen des Allensbachs auf dasjenige der Engstlige in Frutigen geschlossen werden könnte.

Die in dieser Untersuchung mit verschiedenen Datenreihen und Methoden durchgeführten **Hochwasserabschätzungen** weisen darauf hin, dass für die Engstlige in Frutigen von einem 100-jährlichen Hochwasserabfluss im Bereich zwischen 115 bis 120 m<sup>3</sup>/s ausgegangen werden muss (Tabelle 18). Dieser Wert weicht deutlich von der bisher vorhandenen und verwendeten Abschätzung von 160 m<sup>3</sup>/s (TBA 1997) ab. Obschon in der vorliegenden Untersuchung auch eine Abschätzung mit der gleichen Methode – nämlich mit dem Laufzeitverfahren nach Kölla (1986) – durchgeführt wurde, ergab sich ein deutlich unterschiedlicher Wert (124,6 m<sup>3</sup>/s), was darauf zurückzuführen ist, dass die Eingabeparameter für diese Methode neu berechnet wurden. Selbst in den Konfidenzintervallen der extremwertstatistischen Auswertungen ist der bisher verwendete Wert nicht enthalten (vgl. Tabelle 9 und Tabelle 10). Bei den modellierten mengenskalierten Niederschlagszenarien wird der bisher verwendete Wert für ein HQ<sub>100</sub> von 160 m<sup>3</sup>/s ebenfalls nicht erreicht; die modellierten Abflussspitzen liegen in einem Streubereich von 55 bis 150 m<sup>3</sup>/s. Die modellierten Abflussspitzen der räumlich verschobenen Niederschlagszenarien, welche einem HQ<sub>300</sub> bzw. einem extremen Hochwasserereignis entsprechen, weisen auf einen Wert von 145 bis 160 m<sup>3</sup>/s hin.

**Tabelle 18:** Übersicht über die durchgeführten Hochwasserabschätzungen

Methode	HQ <sub>100</sub> [m <sup>3</sup> /s]	HQ <sub>300</sub> , EHQ [m <sup>3</sup> /s]	siehe Abb. / Tab.	Bemerkung
Extremwertstatistik (MOD)	102	117	Tabelle 9	Auswertung der modellierten Abflussdaten (1984-2007)
Extremwertstatistik (MOD-OBS)	125	142	Tabelle 10	Auswertung der kombinierten Abflussdaten (modelliert-beobachtet; 1984-2007)
HQ <sub>x</sub> _meso_CH	117	148	Tabelle 8	Median für HQ <sub>300</sub> aus fünf Abschätzungen; Q <sub>max</sub> aus GIÜB'96 (Fr)
Mengenskalierte Szenarien (12h)	76		Tabelle 16	Mittelwert aus fünf modellierten 12-stündigen Niederschlagszenarien
Mengenskalierte Szenarien (24h)	122		Tabelle 16	Mittelwert aus fünf modellierten 24-stündigen Niederschlagszenarien
Mengenskalierte Szenarien (48h)	130		Tabelle 16	Mittelwert aus fünf modellierten 48-stündigen Niederschlagszenarien
Mengenskalierte Szenarien (72h)	134		Tabelle 16	Mittelwert aus fünf modellierten 72-stündigen Niederschlagszenarien
Räumlich verschobene Szenarien	145 ; 160		Abbildung 24	zwei modellierte räumlich verschobene Niederschlagszenarien vom August 2005

Zu den durchgeführten Auswertungen und zu den Ergebnissen sind folgende Bemerkungen zu machen:

Die Resultate aus der **Hochwasserstatistik** sind für die Hochwasserabflüsse grösserer Wiederkehrperiode mit Vorsicht zu verwenden. Die ausgewerteten Reihen, welche die letzten 25 Jahre umfassen, sind für Extrapolationen in diesen Bereich der Wiederkehrperioden immer noch relativ kurz. Für die Resultate aller Hochwasserabschätzungen gilt es auch zu beachten, dass bei diesen Angaben kein Geschiebe sowie keine Gerinneprozesse berücksichtigt wurden. Allfällige Aufstauungen im Gerinne, welche im Hochwasserfall durch den Geschiebeeintrag der Seitenbäche entstehen können, und damit verbundene spontane Ausflüsse wurden nicht berücksichtigt und könnten möglicherweise zu weit grösseren Abflussspitzen führen.

Bei den unter Anwendung der **mengenskalierten Niederschlagszenarien** modellierten Abflussspitzen und -volumen treten grosse Streuungen auf, selbst wenn als Modellinput dieselbe Niederschlagsmenge, aber nicht die gleiche zeitliche Verteilung verwendet wurde. Insgesamt umfassen die Werte einen Bereich zwischen 55 bis 150 m<sup>3</sup>/s. Der meteorologische Kontext, in den das skalierte Niederschlagsereignis eingebunden ist, wirkt sich offensichtlich entscheidend auf das jeweils modellierte Abflussgeschehen aus. Aus diesem Grund ist es auch problematisch, von einem 100-jährlichen Niederschlag direkt auf den Hochwasserabfluss gleicher Wiederkehrdauer zu schliessen. Die nichtlineare Transformation von Niederschlag zu Abfluss zeigt sich auch bei der Modellierung der Niederschlagsmengen mit grösserer Ereignisdauer: Die erhöhte Niederschlagsmenge wirkt sich nicht bei allen Ereignissen gleichermaßen auf die Abflussspitzen und -volumen aus. Daneben kann die Streuung, die bei den modellierten mengenskalierten Niederschlagszenarien auftritt, aber auch auf Grund der von Ereignis zu Ereignis variierenden Qualität der hydrologischen Modellierung beeinflusst sein. Hingegen zeigt sich deutlich, dass bei Zunahme der Niederschlagsdauer im Mittel auch grössere modellierte Abflussspitzen und -volumen auftreten. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Modellierungen kurzer Niederschlagsdauern von weniger als 12 Stunden – die in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt wurden – weniger grosse Abflussspitzen für die Engstlige in Frutigen ergeben. Dies kann vor allem darauf zurückgeführt werden, dass für das Einzugsgebiet der Engstlige das verwendete hydrologische Modell die kurzfristigen Abflussschwankungen teilweise noch nicht ganz zufriedenstellend wiedergeben kann.

Obschon also einige Unsicherheiten bei der Modellierung der mengenskalierten Niederschlagszenarien bestehen, können die modellierten Abflussganglinien einen Hinweis auf das Abflussverhalten der Engstlige im seltenen Hochwasserfall geben. Insbesondere wird ersichtlich, in welcher Grössenordnung sich die Abflussspitzen und -volumen seltener Ereignisse bewegen können. Bei der Auswahl und Modellierung dieser Niederschlagszenarien wurde darauf geachtet, dass die simulierten Abflussspitzen und -mengen einen oberen Bereich der möglichen Resultate abdecken. Dies wurde vor allem durch die verwendeten Zielwerte der 100-jährlichen Starkniederschläge, die unter Anwendung der GEV-Verteilung hergeleitet wurden, sichergestellt (vgl. auch Abbildung 8). Sowohl die Verwendung der Gumbel-Verteilung als auch die Auswertung der saisonalen Maxima würden zum Teil deutlich tiefere Werte für die Skalierung ergeben. Mit der Auswertung der Jahresmaxima wurden zudem auch grosse Niederschlagsmengen aus dem Winterhalbjahr berücksichtigt, die unter heutigen Bedingungen nicht hochwasserauslösend sind. Trotzdem ist die Auswertung der ganzjährigen Niederschlagsdaten besonders im Hinblick auf die vorausschauende Gefahrenabschätzung sinnvoll: Obschon nicht davon ausgegangen werden muss, dass sich die Hochwasserseason grundsätzlich vom Sommer- in das Winterhalbjahr verlagert bzw. ausdehnt (KOHs 2007), kann nicht ausgeschlossen werden, dass einzelne Niederschlagsereignisse der Periode November bis April unter veränderten Klimabedingungen möglicherweise auch hochwasserwirksam werden können.

Bei den **räumlich vershobenen Niederschlagszenarien** sollte insbesondere berücksichtigt werden, dass die meteorologische Plausibilität noch weiter untersucht werden müsste. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde nicht weiter abgeklärt, ob die im östlichen Berner Oberland (bzw. im Entlebuch) aufgetretenen Niederschlagsprozesse grundsätzlich auch für das Einzugsgebiet der

Engstlige möglich sind. Trotz diesem Vorbehalt geben die beiden Szenarien einen Hinweis darauf, wie stark sich der Abfluss der Engstlige unter extremen Niederschlagsbedingungen verändern kann bzw. wie der Verlauf eines extremen Abflussereignisses für die Engstlige in Frutigen aussehen könnte. Bei den Abflussspitzen ist für die modellierten Szenarien ein Wert von 145 bzw. 160 m<sup>3</sup>/s aufgetreten, was bei Einordnung in die Hochwasserstatistik einem Abflussereignis mit sehr grosser Wiederkehrperiode entspricht. Grundsätzlich ist die Bestimmung der Jährlichkeit dieses Niederschlagszenarios anhand der Wiederkehrdauer der Gebietsniederschläge bei den räumlich verschobenen Niederschlagszenarien mit Schwierigkeiten verbunden. Da die verwendete Datengrundlage von Wüest et al. (eingereicht) nur 14 Jahre umfasst und somit für eine extremwertstatistische Auswertung sehr kurz ist, wurde diese Einordnung anhand von Punktniederschlägen vorgenommen. Darauf geht hervor, dass es sich auch beim Niederschlag um extreme Szenarien handelt, die eine Wiederkehrdauer von mehr als 300 Jahren aufweisen.

Bei Anwendung des **hydrologischen Modellsystems PREVAH** hat sich gezeigt, dass noch Probleme bei der Modellierung der kurzzeitigen Abflussspitzen auftreten. Dies kann entweder auf das Modell selbst oder aber auf die meteorologischen Eingangsdaten, welche aus Stationsmesswerten abgeleitet wurden, zurückgeführt werden. Allenfalls könnten kurzfristige, rasche Abflussspitzen – wie sie an der Engstlige in Frutigen auch auftreten können – noch grössere Werte liefern, als dies in den durchgeführten Modellierungen der Fall war (Beispiel August 2007). Hochwasserabflüsse, die durch länger andauernde Niederschlagsereignisse ausgelöst wurden, konnten jedoch in guter Qualität modelliert werden (z.B. Ereignis vom August 2005).

Grundsätzlich besteht unter Anwendung des hydrologischen Modells auch die Möglichkeit, mit Hilfe der langen meteorologischen Datenreihen in Tagesauflösung, welche zum Teil bis 1901 zurück reichen, das Abflussgeschehen ebenfalls in Tagesauflösung weit über 1984 zurück zu modellieren. Da aber für den Abfluss der Engstlige in Frutigen kein enger Zusammenhang zwischen den Tagesmittelwerten und den Abflussspitzen pro Hochwassertag besteht (vgl. Anhang 1 bis 3), wurde auf eine solche Modellierung im Rahmen der vorliegenden Untersuchung verzichtet.

## 6 Quellen

### 6.1 Literatur

- Barben, M. (2001): Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in mesoskaligen Einzugsgebieten. Dissertation am Geographischen Institut der Universität Bern. Geographica Bernensia G71. Bern.
- BWG (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten – Praxishilfe. Berichte des BWG, Serie Wasser, Nr. 4. Bundesamt für Wasser und Geologie BWG. Bern.
- Coles, S. (2004): An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer Verlag. London.
- DVWK (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. DVWK-Merkblatt 251. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- Federer, G. & Weingartner, R. (2006): Hochwasserfrachten in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten. Wasser, Energie, Luft. Vol. 98, Iss. 3: 255-260.
- Frei, C. (2006): Extremniederschläge August 2005: Verteilung und klimatologische Einordnung. Christoph Frei, Urs Germann, Stephan Bader, Peter Zbinden, Christof Appenzeller. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, Zürich. Vortrag am FAN-Forum vom 24. 02. 2006 in Zürich.
- Frei, C., Germann, U., Fukutome, S. & Liniger, M. (2008): Möglichkeiten und Grenzen der Niederschlagsanalysen zum Hochwasser 2005. In: Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. 429 S. Bern, Zürich.
- Gammeter, T. (2008): Niederschlagsverhältnisse im Kandertal. Deskriptive und extremwertstatistische Auswertungen zum Niederschlag im Berner Oberland und Abflussgeschehen der Kandert. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern. Publikation Gewässerkunde Nr. 411. Bern.
- Geiger H., Röthlisberger G., Stehli A., Zeller J. (1992): Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901-1970. In: Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.): Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 2.4.
- Germann, U., Berenguer, M., Sempere-Torres, D., & Zappa, M. (accepted): Ensemble radar precipitation for hydrology in a mountainous region. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.
- Gurtz, J., Baltensweiler, A., Lang, H., Menzel, L. & Schulla, J. (1997): Auswirkungen von klimatischen Variationen auf Wasserhaushalt und Abfluss im Flussgebiet des Rheins. Schlussbericht NFP 31. vdf-Hochschulverlag. Zürich.
- Gurtz, J., Zappa, M., Jasper, K., Lang, H., Verbunt, M., Badoux, A. & Vitvar, T. (2003): A Comparative Study in Modelling Runoff and its Components in Two Mountainous Catchments. Hydrological Processes. Vol. 17, Iss. 3: 297-311.
- Jäggi, M. (1996): Engstligen-Frutigen. Gutachten zur flussbaulichen Fragen betreffend die Erosionstendenz in der Engstligen in Frutigen und den Zusammenhang mit Kiesentnahmen. Unveröffentlichter Bericht. Ebmattigen.



- Jensen, H., Lang, H., Rinderknecht, J. (1997): Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901-1970. In: Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.). Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 2.4<sup>2</sup>.
- KAWA (2001): Frutigen, Ereigniskataster. Bericht zum Ereigniskataster. Kantonales Amt für Wald (KAWA), Abteilung Naturgefahren, Einwohnergemeinde Frutigen.
- KAWA (2005): Frutigen, Gefahrenkarte. Bericht zur Gefahrenkarte. Kantonales Amt für Wald (KAWA), Abteilung Naturgefahren, Einwohnergemeinde Frutigen.
- Kölla, E. (1986): Zur Abschätzung von Hochwasser in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessungen – Eine Untersuchung über Zusammenhänge zwischen Gebietsparametern und Spitzenabflüssen kleiner Einzugsgebiete. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. Nr. 87. Zürich.
- KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband (KOHS). Wasser – Energie – Luft. Vol. 99, Iss. 1, 55 – 57.
- Naef, F. et al. (1999): Grosse Hochwasser – unterschiedliche Reaktionen von Einzugsgebieten auf Starkregen. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.7. Bern.
- Naef, F. (2006): Extreme Hochwasser verstehen – Beispiele aus der Schweiz. In: Extreme Abflussereignisse: Dokumentation-Bedeutung-Bestimmungsmethoden. Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer. Band 206: S. 59-68. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien. Wien.
- Naef, F., Schmocker-Fackel, P., Margreth, M., Kienzler, P. & Scherrer, S. (2008): Die Häufung der Hochwasser der letzten Jahre. In: Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. 429 S. Bern, Zürich.
- Pieren, J. (2008): mündliche Mitteilung von Jürg Pieren (Kissling+Zbinden AG, Bern) vom August 2008.
- Schwanbeck, J., Viviroli, D. & Weingartner, R. (2008): Modellgestützte Sensitivitätsanalysen. In: Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. 429 S. Bern, Zürich.
- swisstopo (2006): VECTOR25. Digitales Landschaftsmodell der Schweiz. Bundesamt für Landestopographie (swisstopo). Wabern.
- swisstopo (2007): Übersichtskarte der Schweiz, Pixelkarte 1:2 Mio. Reliefkarte farbig. Bundesamt für Landestopographie (swisstopo). Wabern. Frei verfügbar unter: [www.swisstopo.admin.ch](http://www.swisstopo.admin.ch) (Stand: 6. November 2008).
- TBA (1997): Verbauungsprojekt XIV/1997 der Engstlige in Frutigen. Technischer Bericht. Ramu Ingenieure AG. Unveröffentlichter Bericht. Frutigen.
- Viviroli, D. (2007): Ein prozessorientiertes Modellsystem zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse für ungemeine Einzugsgebiete der Schweiz. Dissertation am Geographischen Institut der Universität Bern. Geographica Bernensia G77. Bern.
- Viviroli, D., Gurtz, J. & Zappa, M. (2007): The Hydrological Modelling System PREVAH. Part I – IV. Geographica Bernensia P40. Bern.
- Weingartner, R. & Aschwanden, H. (1992): Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.2. Bern.

- Wüest, M., Frei, C., Altenhoff, A., Hagen, M., Litschi, M. & Schär, C. (eingereicht): A gridded hourly precipitation dataset for Switzerland using rain-gauge analysis and radar-based disaggregation. International Journal of Climatology.
- Zappa, M. (2002): Multiple-Response Verification of a Distributed Hydrological Model at Different Spatial Scales. Dissertation der Eidgenössischen Technischen Hochschule. Nr. 14895. Zürich.
- Zeller, J., Geiger, H. & Rötthlisberger, G. (1979): Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes. Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen. Birmensdorf.

## 6.2 Software

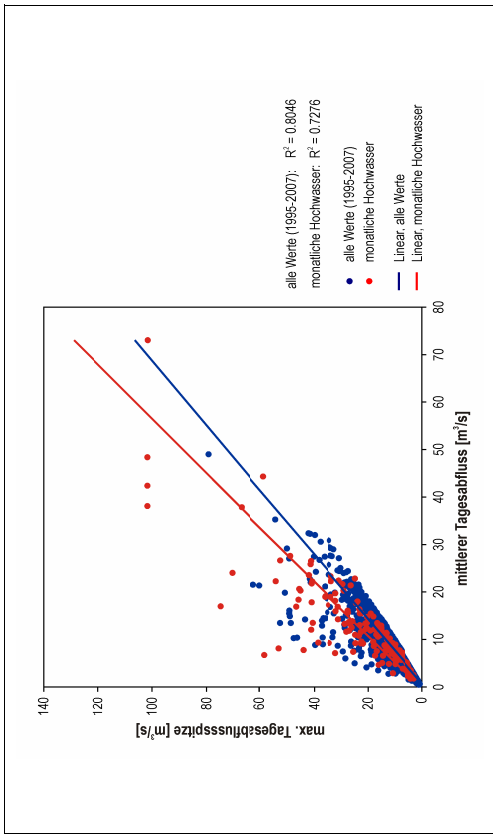
- BAFU (2006): HYDROMOD-soft. Bundesamt für Umwelt BAFU. Weitere Informationen verfügbar unter: <http://www.bafu.admin.ch/hydrologie> (Stand: 19. Juli 2007).
- Barben, M. (2001): HQx\_meso\_CH.
- Klauser, H. (2004): HQx\_meso\_CH-visual.
- Wasy (2005): HQ-EX. Version 3.0.

# Anhang

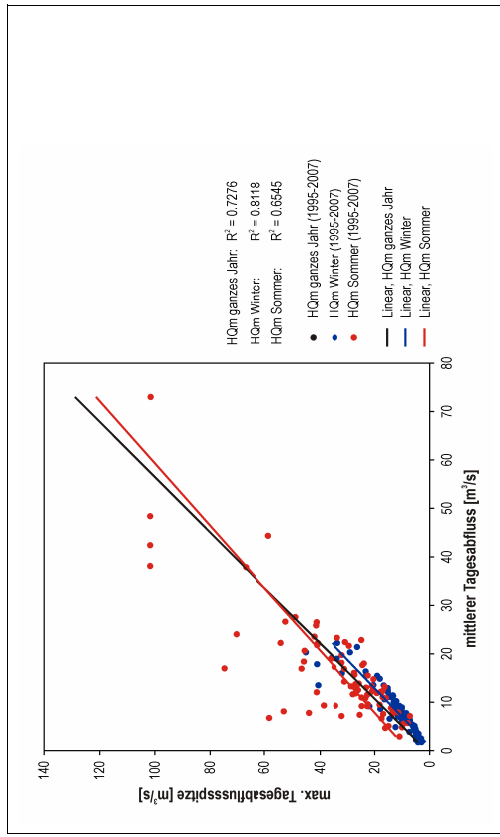
Anhang 1:	Engstlige-Frutigen: Zusammenhang zwischen mittlerem Tagesabfluss und Abflussspitze .....	A3
Anhang 2:	Engstlige-Frutigen: Zusammenhang zwischen mittlerem Tagesabfluss und maximaler Abflussspitze im Hochwasserfall .....	A3
Anhang 3:	Zusammenhang zwischen Abflussspitze und Tagesmittelwert für die Station Engstlige-Frutigen; Korrelationskoeffizienten .....	A4
Anhang 5:	Extremwertstatistische Auswertung der Punktniederschläge der Station Adelboden .....	A7
Anhang 6:	Extremwertstatistische Auswertung der Punktniederschläge der Station Frutigen .....	A8
Anhang 7:	Extremwertstatistische Auswertung der Punktniederschläge der Station Kandersteg .....	A9
Anhang 8:	Protokoll von HQx_meso_CH: Resultate und verwendete Eingabeparameter .....	A14
Anhang 9:	Ergebnisse der Auswertungen mit HYDMOD-soft .....	A17
Anhang 10:	Extremwertstatistische Auswertung der Gebietsniederschlagssummen unterschiedlicher Dauer (Methode: GEV-Verteilung, jährliche Maxima) .....	A21
Anhang 11:	Extremwertstatistische Auswertung der Gebietsniederschlagssummen unterschiedlicher Dauer (Methode: GEV-Verteilung, saisonale Maxima) .....	A21
Anhang 12:	Extremwertstatistische Auswertung der Gebietsniederschlagssummen unterschiedlicher Dauer (Methode: Gumbel-Verteilung, jährliche Maxima) .....	A22
Anhang 13:	Extremwertstatistische Auswertung der Gebietsniederschlagssummen unterschiedlicher Dauer (Methode: Gumbel-Verteilung, saisonale Maxima) .....	A22
Anhang 14:	Auswertung der jährlichen Maxima der Gebietsniederschläge mit Hilfe der GEV-Verteilung .....	A23
Anhang 15:	Auswertung der saisonalen Maxima der Gebietsniederschläge mit Hilfe der GEV-Verteilung .....	A24
Anhang 16:	Auswertung der jährlichen Maxima der Gebietsniederschläge mit Hilfe der Gumbel-Verteilung .....	A25
Anhang 17:	Auswertung der saisonalen Maxima der Gebietsniederschläge mit Hilfe der Gumbel-Verteilung .....	A26
Anhang 18:	Niederschlags-Intensitäts-Diagramm: Vergleich zwischen den Werten, die mit der GEV-Verteilung und der Gumbel-Verteilung aus jährlichen Maxima abgeleitet wurden .....	A27
Anhang 19:	Niederschlags-Intensitäts-Diagramm: Vergleich zwischen den Werten, die aus saisonalen und jährlichen Maxima mit der GEV-Verteilung abgeleitet wurden .....	A27
Anhang 20:	Niederschlags-Intensitäts-Diagramm: Vergleich zwischen den Werten die aus Stunden- und Tagesdaten mit der GEV-Verteilung abgeleitet wurden .....	A28
Anhang 21:	Übersicht über die Messstationen, deren Daten zum Erstellen des meteorologischen Inputs verwendet wurden .....	A31
Anhang 22:	Gütemasse der hydrologischen Modellierung. Variante mit standardmässig interpolierten meteorologischem Input .....	A32
Anhang 23:	Gütemasse der hydrologischen Modellierung. Variante mit Radardaten als meteorologischem Input .....	A32

# Anhang Teil A

## Zusammenhang zwischen Tagesmittelwert und Abflussspitze Engstlige-Frutigen



**Anhang 1:** Engstlige-Frütigen: Zusammenhang zwischen mittlerem Tagesabfluss und Abflussspitze (Periode: 1995-2007).



**Anhang 2:** Engstlige-Frütigen: Zusammenhang zwischen mittlerem Tagesabfluss und maximaler Abflussspitze im Hochwasserfall (Periode: 1995-2007).

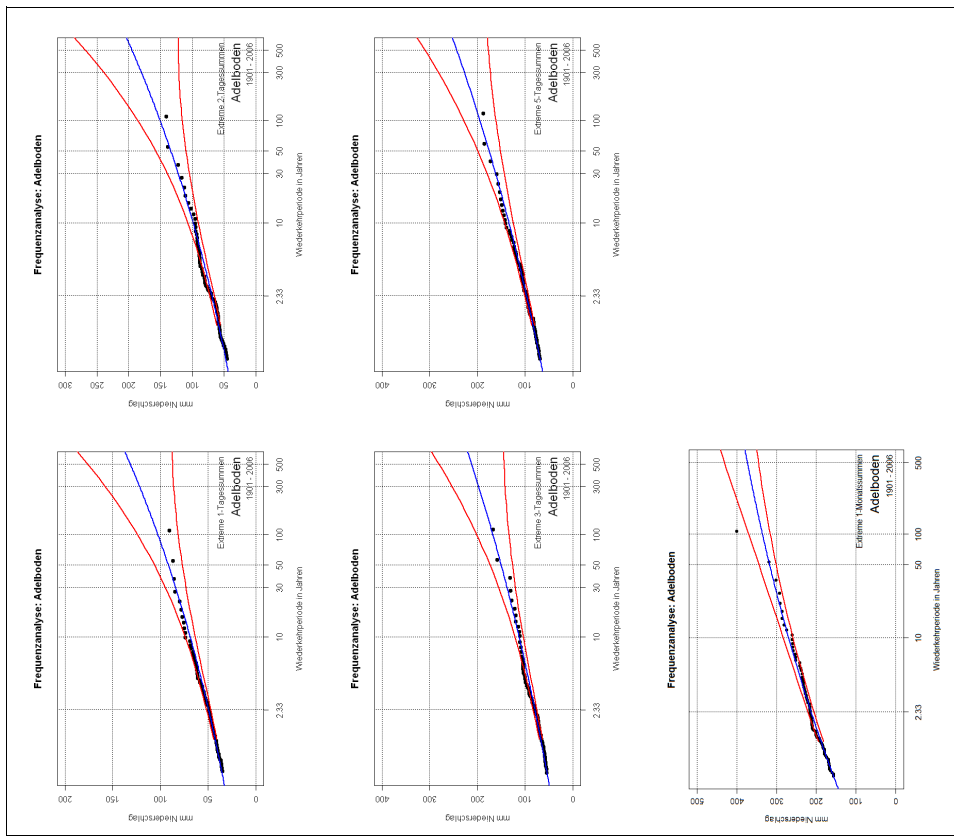
**Anhang 3:** Zusammenhang zwischen Abflussspitze und Tagesmittelwert für die Station Engstlige-Frutigen (Periode: 1995-2007); Korrelationskoeffizienten.

	im Hochwasserfall			ganze Periode		
	R	R <sup>2</sup>	p	R	R <sup>2</sup>	p
ganzes Jahr (N = 161 bzw. 4748)	0.8530	0.7276	< 0.001	0.8970	0.8046	< 0.001
Winter (N = 80 bzw. 2356)	0.9010	0.8118	< 0.001	0.9520	0.9063	< 0.001
Sommer (N = 81 bzw. 2392)	0.8090	0.6545	< 0.001	0.8650	0.7482	< 0.001

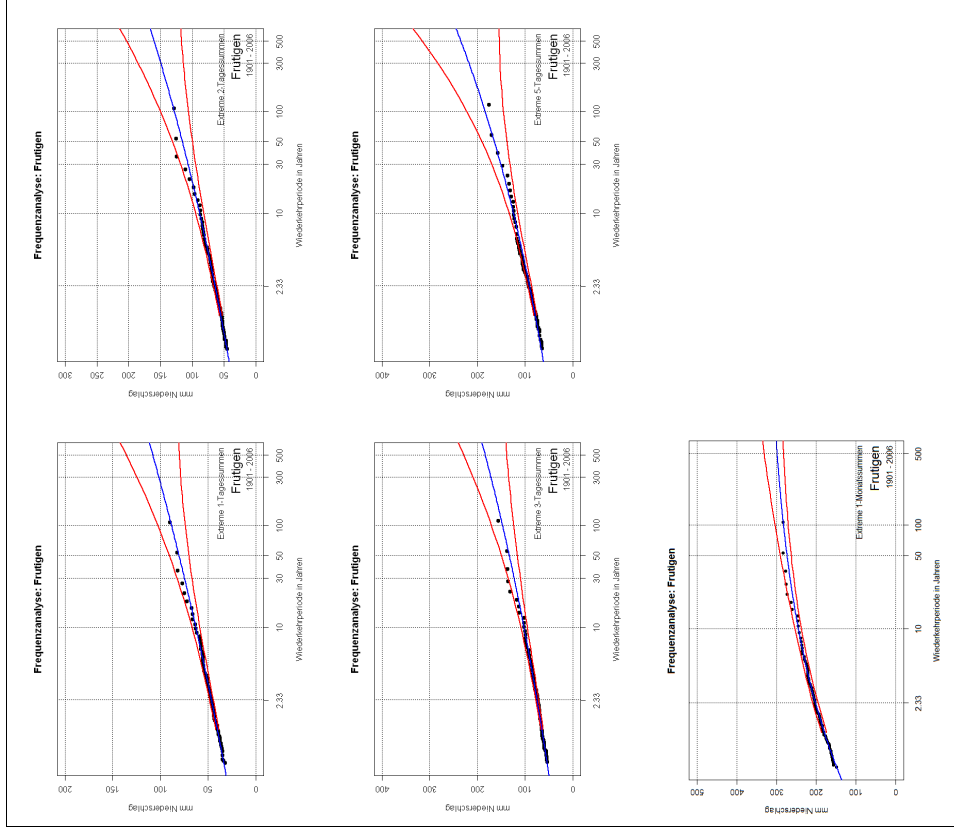
## Anhang Teil B

Auswertungen der Stationsniederschläge von Adelboden, Frutigen und Kandersteg

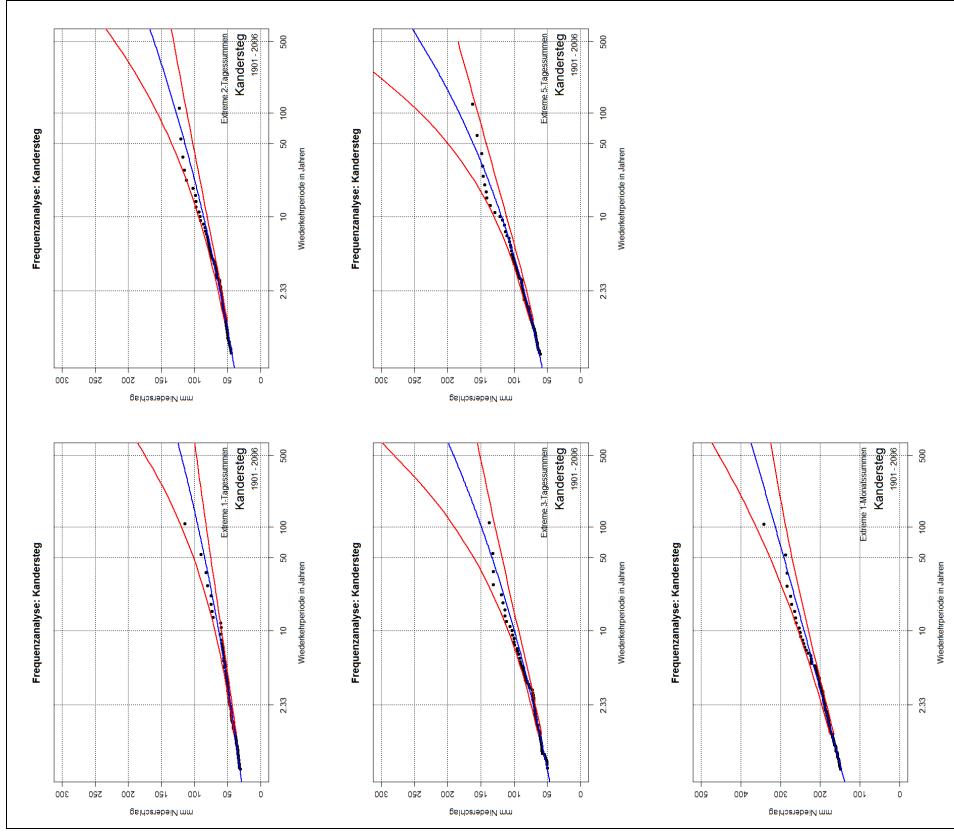
Periode 1901-2006  
(Quelle: Gammeter 2008)



**Anhang 4:** Extremwertstatistische Auswertung der Punktniederschläge der Station Adelboden (Periode: 1901-2006; Niederschlagsdauer: 1-Tag, 2-Tage, 3-Tage, 5-Tage, 1-Monat; Datengrundlage: Tagessummen; Quelle: Gammeter (2008))



**Anhang 5:** Extremwertstatistische Auswertung der Punktniederschläge der Station Frühtagen (Periode: 1901-2006; Niederschlagsdauer: 1-Tag, 2-Tage, 3-Tage, 5-Tage, 1-Monat; Datengrundlage: Tagessummen; Quelle: Gammeter (2008))



**Anhang 6:** Extremwertstatistische Auswertung der Punktniederschläge der Station Kandersteg (Periode: 1901-2006; Niederschlagsdauer: 1-Tag, 2-Tage, 3-Tage, 5-Tage, 1-Monat; Datengrundlage: Tagessummen; Quelle: Gammeter (2008))

## **Anhang Teil C**

Protokoll und Resultate aus HQX\_meso\_CH



**Hochwasser-Abschätzungen für das EG aus der Datei: enbfrt.img**

vom 29.05.2008 12:42:28

EG-Fläche [km2] ..... 149.00

**Zusammenfassung der Ergebnisse [m³/s]:**

=====  
 Kürsteiner (Qmax) ..... 235.3  
 Müller-Zeller (Qmax) ..... 241.1  
 GIUB96(Fn) (Qmax) ..... 148.3  
 GIUB96(MQ) (Qmax) ..... 134.8  
 Kölla meso (HQ100) ..... 124.6  
 GIUB96(Fn) (HQ100) ..... 107.2  
 GIUB96(MQ) (HQ100) ..... 95.9  
 Momente (HQ100) ..... 116.9  
 BaD7 (HQ100) ..... 122.5  
 =====

**Kürsteiner**

Qmax ..... 235.3  
 c ..... 8.37

**Müller-Zeller**

Qmax ..... 241.1  
 psi ..... 0.43  
 alpha ..... 20.00

**GIUB96(Fn); Qmax**

Qmax ..... 148.3  
 HQ-Region ..... A1\*

**GIUB96(MQ); Qmax**

Qmax ..... 134.8  
 HQ-Region ..... A1\*  
 MQ ..... 6.200\*

**Kölla meso**

HQ100 ..... 124.6  
 Gerinnelänge ..... 260.60  
 Vo ..... 36.85  
 Niederschlag / mit Abminderung / max. Intensität  
 A ..... 48\*  
 B' ..... 124\*  
 C ..... 19\*  
 D' ..... 55\*

<b>GIUB96(Fn); HQ100</b> .....	
HQ100.....	107.2
HQ-Region.....A1*	
<b>GIUB96(MQ); HQ100</b> .....	
HQ100.....	95.9
HQ-Region.....A1*	
MQ.....	6.200*
<b>Momente</b> .....	
HQ100.....	116.9
mHQ.....	53.220
s(HQ).....	20.296
<b>BaD7</b> .....	
HQ100.....	122.5
ähnliche EG:.....	598 916 1017 862 378 750

**Anhang 7: Protokoll von HQx\_meso\_CH: Resultate und verwendete Eingabeparameter**

## Anhang Teil D

Resultate aus HYDMOD-soft



## **Anhang Teil E**

Auswertung der Gebietsniederschläge  
(Modell-Input PREVAH, 1984-2007)

**Anhang 9:** Extremwertstatistische Auswertung der Gebietsniederschlagssummen unterschiedlicher Dauer (Methode: GEV-Verteilung, jährliche Maxima; Periode: 1984-2007)

T [a]	Summe der Gebietsniederschläge x-stündlicher-Dauer [mm]												
	1h	2h	3h	4h	5h	6h	10h	12h	24h	48h	72h	120h	
1.5	13.3	17.7	21.3	24.3	27.6	30.0	38.3	42.3	57.4	78.7	94.1	103.6	112.9
2.33	16.2	20.5	24.1	27.0	30.5	33.2	42.5	47.4	66.3	92.0	109.7	119.7	130.0
3	17.5	21.9	25.4	28.3	32.0	34.7	44.4	49.7	70.8	98.9	117.6	127.9	138.6
5	19.9	24.6	28.1	30.8	34.7	37.5	47.8	54.0	79.5	112.6	132.8	143.5	155.0
10	22.8	28.0	31.7	34.3	38.2	41.1	51.9	59.1	91.2	132.0	153.4	164.5	176.9
20	25.4	31.4	35.5	37.7	41.6	44.4	55.6	63.8	103.2	153.0	174.7	186.1	199.2
30	26.8	33.4	37.8	39.9	43.6	46.3	57.7	66.3	110.5	166.2	187.6	199.2	212.6
50	28.5	36.0	40.9	42.6	46.2	48.7	60.2	69.5	120.1	184.2	204.6	216.4	230.1
100	30.7	39.6	45.3	46.5	49.7	51.9	63.4	73.5	133.7	210.9	229.1	240.9	254.9
300	34.0	45.6	52.9	53.2	55.3	57.0	68.2	79.6	157.3	259.9	271.4	283.2	297.1
500	35.4	48.5	56.8	56.5	58.1	59.3	70.2	82.2	169.1	285.9	292.8	304.3	318.0
1000	37.2	52.5	62.5	61.3	61.8	62.4	72.9	85.7	186.2	324.9	323.6	334.7	347.9

**Anhang 10:** Extremwertstatistische Auswertung der Gebietsniederschlagssummen unterschiedlicher Dauer (Methode: GEV-Verteilung, saisonale Maxima; Periode: 1984-2007)

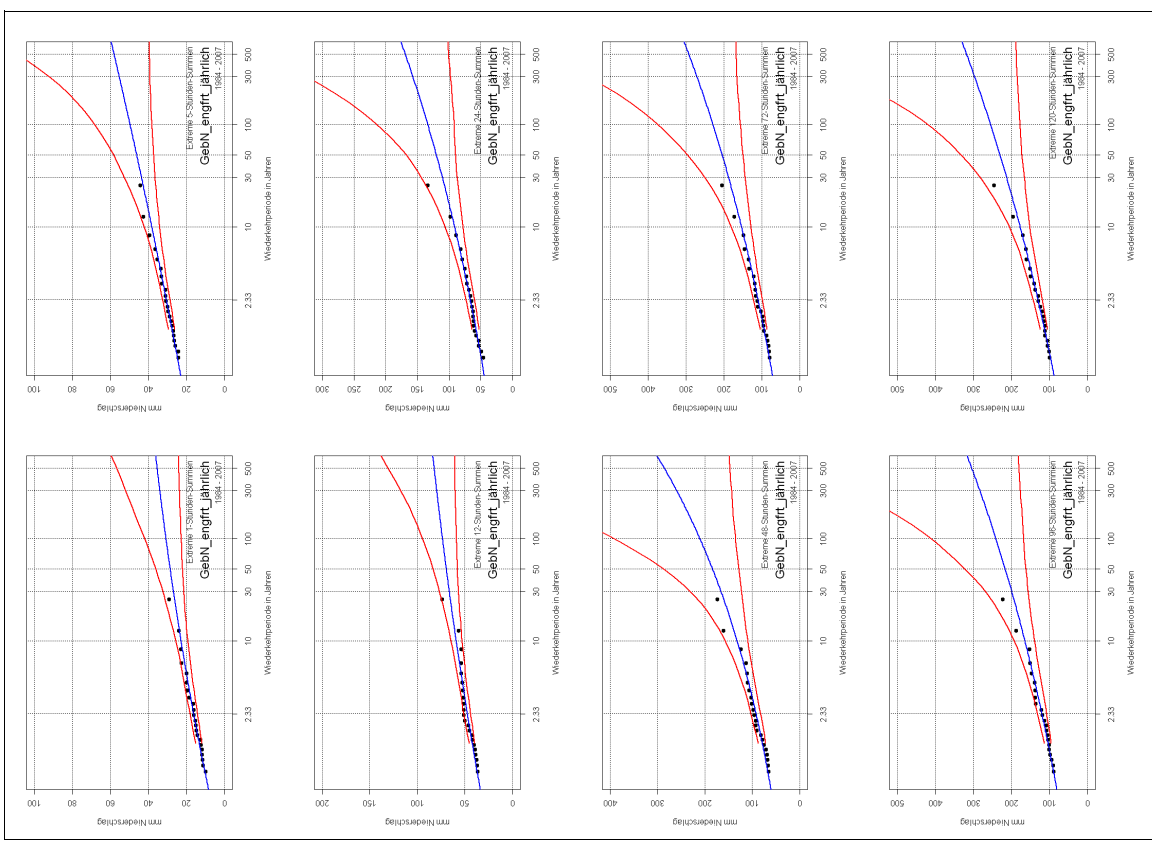
T [a]	Summe der Gebietsniederschläge x-stündlicher-Dauer [mm]												
	1h	2h	3h	4h	5h	6h	10h	12h	24h	48h	72h	96h	120h
1.5	12.9	17.2	20.6	23.4	26.2	28.1	33.5	36.9	48.1	61.2	74.9	82.4	91.2
2.33	15.7	19.7	23.0	25.8	29.2	31.3	37.0	41.0	53.9	68.6	83.9	92.8	101.4
3	16.9	20.8	24.3	27.0	30.6	32.9	38.7	43.0	57.0	72.7	88.5	97.9	106.3
5	19.3	22.9	26.6	29.3	33.1	35.6	42.0	46.6	62.9	81.6	97.2	107.1	115.2
10	22.0	25.6	29.6	32.3	36.3	38.9	46.1	51.0	71.2	95.4	108.7	118.8	126.1
20	24.6	28.0	32.6	35.4	39.3	41.9	50.2	55.1	80.1	112.3	120.6	130.1	136.4
30	26.0	29.4	34.5	37.2	41.0	43.6	52.6	57.5	85.6	124.0	127.7	136.5	142.3
50	27.7	31.1	36.8	39.6	43.2	45.7	55.7	60.3	92.9	140.9	137.1	144.7	149.5
100	29.9	33.3	40.2	43.0	46.0	48.5	59.9	64.2	103.8	168.8	150.3	155.6	159.2
300	33.2	36.7	45.7	48.6	50.4	52.6	66.8	70.1	123.3	228.0	172.9	173.0	174.0
500	34.7	38.3	48.5	51.4	52.4	54.4	70.1	72.8	133.5	263.5	184.2	181.1	180.8
1000	36.6	40.3	52.3	55.4	55.1	56.9	74.7	76.4	148.6	322.2	200.2	192.1	189.8

**Anhang 11:** Extremwertstatistische Auswertung der Gebietsniederschlagssummen unterschiedlicher Dauer (Methode: Gumbel-Verteilung, jährliche Maxima; Periode: 1984-2007)

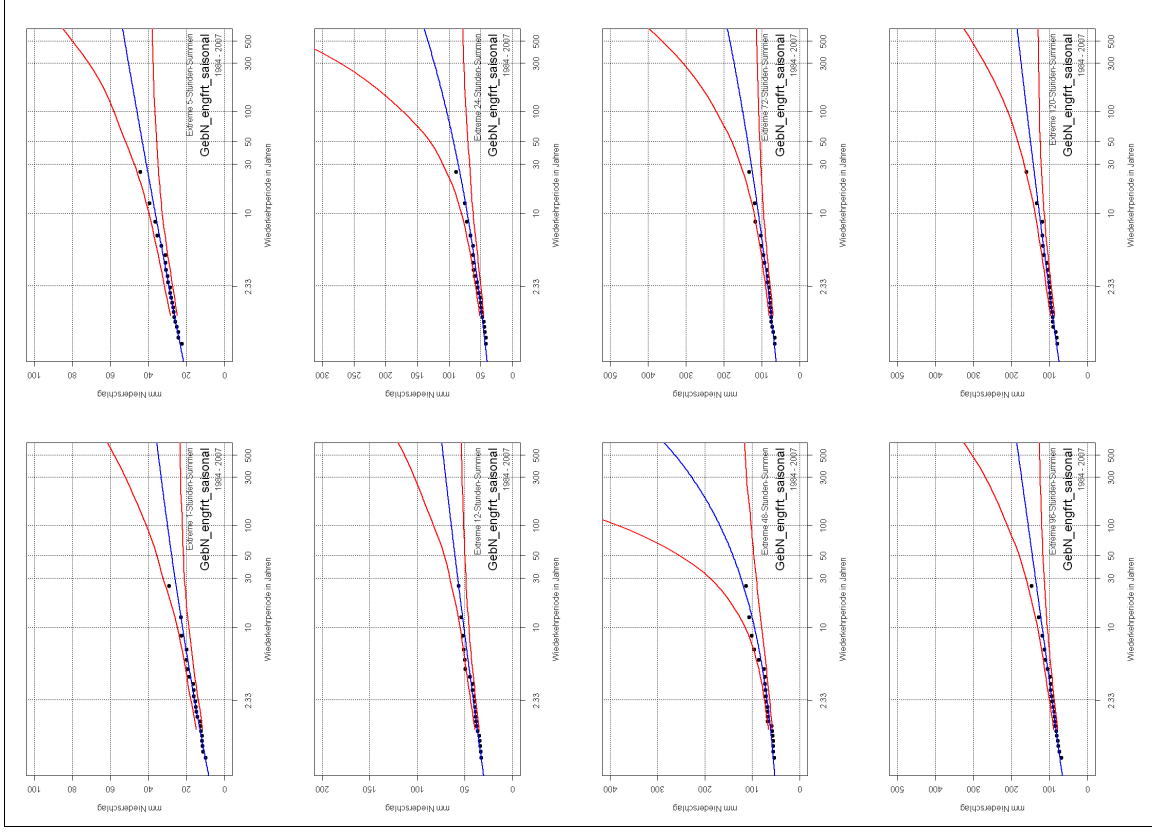
T [a]	Summe der Gebietsniederschläge x-stündlicher-Dauer [mm]												
	1h	2h	3h	4h	5h	6h	10h	12h	24h	48h	72h	96h	120h
1.5	13.1	17.8	21.6	24.5	27.6	30.0	38.1	42.0	58.1	80.4	95.3	104.8	114.0
2.33	16.0	20.6	24.3	27.2	30.6	33.2	42.2	47.1	67.1	94.1	111.2	121.1	131.3
3	17.4	22.0	25.7	28.5	32.0	34.7	44.2	49.5	71.5	100.7	118.8	129.0	139.6
5	20.0	24.5	28.1	30.9	34.7	37.6	47.8	54.0	79.5	112.9	132.9	143.5	154.9
10	23.2	27.7	31.2	33.9	38.0	41.1	52.4	59.7	89.6	128.3	150.6	161.7	174.2
20	26.3	30.7	34.1	36.7	41.2	44.5	56.8	65.1	99.3	143.0	167.6	179.2	192.7
30	28.1	32.5	35.8	38.4	43.0	46.5	59.4	68.2	104.9	151.5	177.3	189.3	203.3
50	30.3	34.7	38.0	40.5	45.3	49.0	62.5	72.1	111.8	162.0	189.5	201.8	216.6
100	33.4	37.6	40.8	43.2	48.4	52.3	66.8	77.4	121.2	176.3	206.0	218.8	234.5
300	38.1	42.3	45.4	47.7	53.3	57.5	73.6	85.7	136.0	198.8	232.0	245.5	262.8
500	40.3	44.4	47.5	49.7	55.6	59.9	76.7	89.5	142.9	209.3	244.0	258.0	276.0
1000	43.3	47.3	50.3	52.5	58.6	63.2	80.9	94.7	152.3	223.5	260.4	274.8	293.8

**Anhang 12:** Extremwertstatistische Auswertung der Gebietsniederschlagssummen unterschiedlicher Dauer (Methode: Gumbel-Verteilung, saisonale Maxima; Periode: 1984-2007)

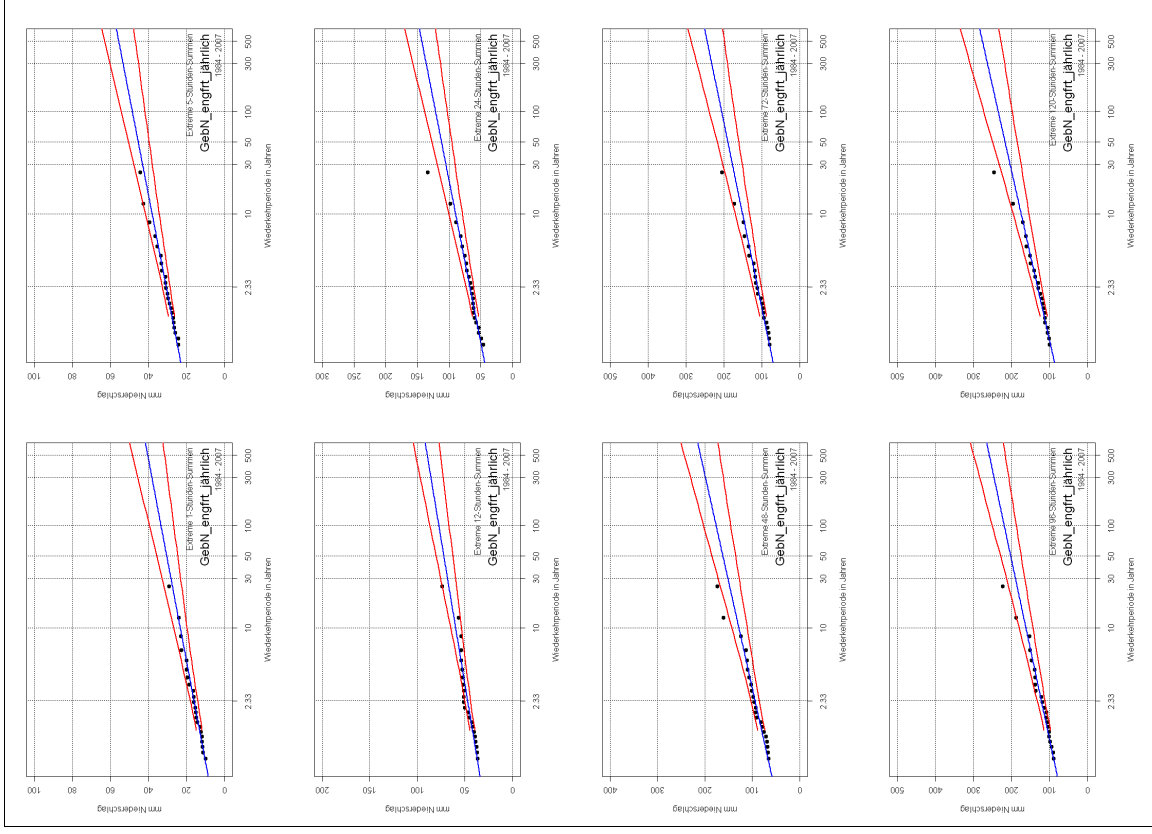
T [a]	Summe der Gebietsniederschläge x-stündlicher-Dauer [mm]												
	1h	2h	3h	4h	5h	6h	10h	12h	24h	48h	72h	96h	120h
1.5	12.8	17.1	20.7	23.5	26.2	28.0	33.6	36.8	48.7	63.0	75.5	82.5	91.0
2.33	15.5	19.6	23.2	26.0	29.1	31.2	37.1	40.9	54.7	71.0	84.6	92.9	101.2
3	16.8	20.8	24.4	27.1	30.5	32.8	38.8	42.9	57.7	74.9	89.0	97.9	106.2
5	19.3	23.0	26.6	29.3	33.1	35.6	42.0	46.6	63.0	82.0	97.1	107.1	115.2
10	22.4	25.7	29.3	32.0	36.4	39.2	45.9	51.1	69.8	90.9	107.3	118.7	126.6
20	25.3	28.4	32.0	34.6	39.6	42.7	49.7	55.5	76.3	99.5	117.1	129.9	137.6
30	27.0	29.9	33.5	36.1	41.4	44.6	51.9	58.1	80.0	104.5	122.7	136.3	143.8
50	29.2	31.8	35.4	38.0	43.6	47.1	54.6	61.2	84.7	110.6	129.8	144.3	151.7
100	32.0	34.3	37.9	40.6	46.7	50.4	58.3	65.5	91.0	119.0	139.2	155.1	162.3
300	36.6	38.4	42.0	44.6	51.5	55.7	64.1	72.2	100.9	132.1	154.2	172.1	179.0
500	38.7	40.2	43.8	46.4	53.7	58.2	66.8	75.4	105.5	138.2	161.2	180.0	186.8
1000	41.5	42.8	46.4	48.9	56.7	61.5	70.4	79.6	111.8	146.5	170.6	190.8	197.3



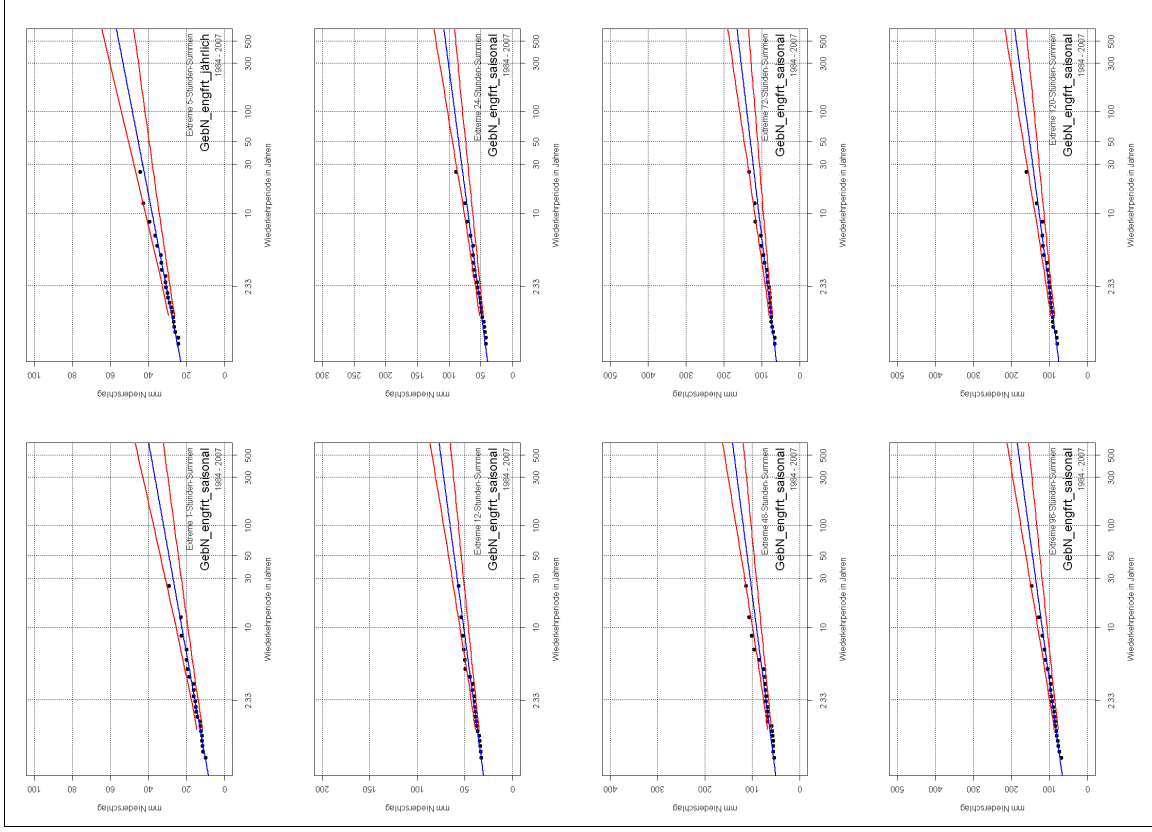
**Anhang 13:** Auswertung der jährlichen Maxima der Gebietsniederschläge mit Hilfe der GEV-Verteilung (Periode: 1984-2007; Niederschlagsdauer: 1-, 5-, 12-, 24-, 48-, 72-, 96- und 120-Stunden)



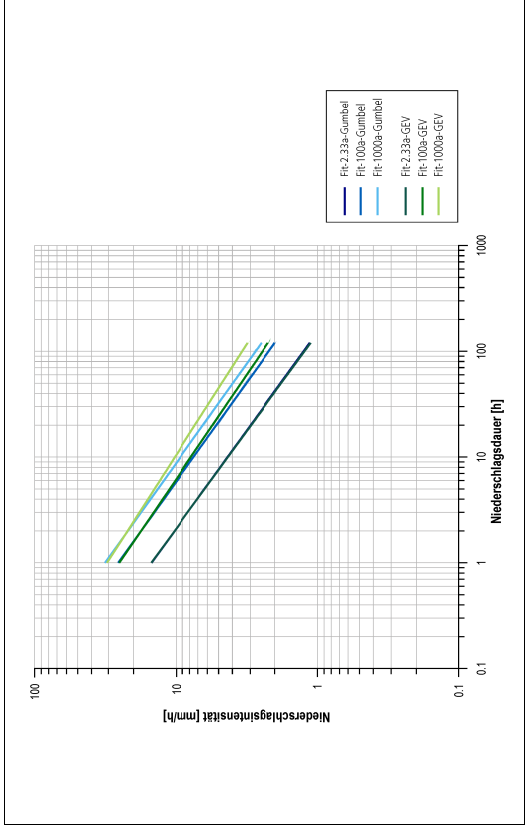
Anhang 14: Auswertung der saisonalen Maxima der Gebietsniederschläge mit Hilfe der GEV-Verteilung (Periode: 1984-2007; Niederschlagsdauer: 1-, 5-, 12-, 24-, 48-, 72-, 96- und 120-Stunden)



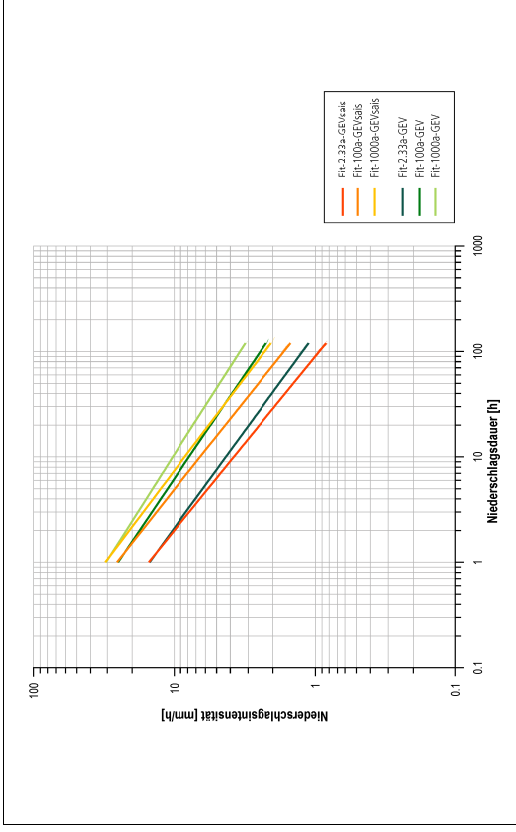
Anhang 15: Auswertung der jährlichen Maxima der Gebietsniederschläge mit Hilfe der Gumbel-Verteilung (Periode: 1984-2007; Niederschlagsdauer: 1-, 5-, 12-, 24-, 48-, 72-, 96- und 120-Stunden)



**Anhang 16:** Auswertung der saisonalen Maxima der Gebietsniederschläge mit Hilfe der Gumbel-Verteilung (Periode: 1984-2007; Niederschlagsdauer: 1-, 5-, 12-, 24-, 48-, 72-, 96- und 120-Stunden)

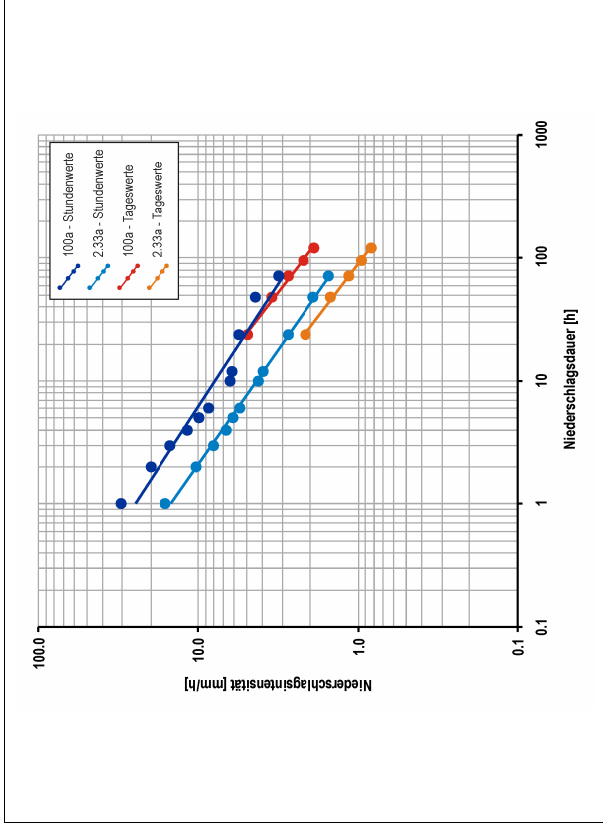


**Anhang 17:** Niederschlags-Intensitäts-Diagramm: Vergleich zwischen den Werten, die mit der GEV-Verteilung und der Gumbel-Verteilung aus jährlichen Maxima abgeleitet wurden.



**Anhang 18:** Niederschlags-Intensitäts-Diagramm: Vergleich zwischen den Werten, die aus saisonalen und jährlichen Maxima mit der GEV-Verteilung abgeleitet wurden.





**Anhang 19:** Niederschlags-Intensitäts-Diagramm: Vergleich zwischen den Werten die aus Stunden- und Tagesdaten abgeleitet wurden.

## Anhang Teil F

Input und Gütemasse der hydrologischen Modellierungen mit PREVAH

ID	Station	Höhe ü. M.	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
	ANETZ-Stationen																										
36	Aelboden	1320	609395	149025																							
53	Bern-Liebeld	565	598610	197470																							
78	Bern-Zollikofen	553	601930	204410																							
42	Engelberg	1035	674150	186060																							
66	Grimmel-Hospitz	1980	668460	158160																							
25	Inerlaken	580	633070	169120																							
3	Jungfrau-Joch	3580	641930	155275																							
70	Plattfen	1042	586850	177400																							
	Klima-Stationen																										
5610	Château d'Oex	980	576970	147280																							
5588	Gstaad-Grund	1085	587010	142930																							
	Niederschlagsmesser																										
5370	Bolligen	855	596150	164200																							
5370	Erlenbach i.S.	683	608360	167300																							
5290	Fritzen	815	615805	159815																							
5110	Grindelwald	1040	646460	163830																							
5570	Gsteig/Gstaad	1195	587600	136150																							
5330	Honrich	760	618500	168650																							
5630	Jann	1030	587520	162280																							
5230	Kandersteg	1176	617830	149350																							
5310	Kiental	955	621260	160160																							
5130	Kleine Scheidegg	2061	639950	159450																							
5170	Lautbrunnen	818	635890	160740																							
5150	Mürren	1638	634670	156380																							
5260	Stegeshand	1465	607270	150550																							
5450	Thun	558	613760	178800																							
5430	Wimmis	622	615260	170680																							
5350	Zweimimmen	960	594800	155730																							
1234	Gstaad	1085	587070	142970																							
207	Château d'Oex	985	577200	147310																							

Anhang 20: Übersicht über die Messstationen, deren Daten zum Erstellen des meteorologischen Inputs verwendet wurden.

**Anhang 21:** Gütemasse der hydrologischen Modellierung. Variante mit standardmässig interpolierten meteorologischem Input (pest03; kalibriert für 1999-2002; Initialisierung: 1998)

	DST	NSElin <sup>2</sup>	NSElog <sup>2</sup>	WAE	P-QT	P-SAE	SPMR
Kalibrierte Jahre	7.4	0.74	0.79	281	5.50	1.35	0.52
Alle Jahre	1572	0.69	0.75	610	13.12	3.99	-0.13
1998	-27	0.68	0.72	-	-	-	-
1999	-179	0.79	0.81	-	-	-	-
2000	33	0.73	0.70	-	-	-	-
2001	-25	0.74	0.83	-	-	-	-
2002	162	0.56	0.77	-	-	-	-
2003	198	0.67	0.71	-	-	-	-
2004	435	0.34	0.55	-	-	-	-
2005	364	0.73	0.67	-	-	-	-
2006	361	0.50	0.70	-	-	-	-
2007	250	0.66	0.65	-	-	-	-

**Anhang 22:** Gütemasse der hydrologischen Modellierung. Variante mit Radardaten als meteorologischem Input (pest31; kalibriert für 1999-2002; Initialisierung: 1998)

	DST	NSElin <sup>2</sup>	NSElog <sup>2</sup>	WAE	P-QT	P-SAE	SPMR
Kalibrierte Jahre	2.13	0.79	0.84	252	3.76	1.37	-0.20
Alle Jahre	811	0.76	0.75	402	7.35	4.11	0.02
1998	-124	0.71	0.76	-	-	-	-
1999	-97	0.80	0.88	-	-	-	-
2000	-68	0.82	0.79	-	-	-	-
2001	34	0.79	0.88	-	-	-	-
2002	114	0.72	0.78	-	-	-	-
2003	186	0.71	0.61	-	-	-	-
2004	387	0.52	0.50	-	-	-	-
2005	380	0.72	0.59	-	-	-	-

