
**Ein prozessorientiertes Modellsystem
zur Ermittlung seltener Hochwasserabflüsse
für ungemessene Einzugsgebiete der Schweiz**

Weiterentwicklung und Anwendung des hydrologischen
Modellsystems PREVAH

Daniel Vivenzio

Die vorliegende Publikation umfasst den Text einer gleichnamigen Forschungsarbeit, welche am 20.12.2007 von der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern als Inauguraldissertation angenommen wurde. Das Forschungsprojekt wurde vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziert.

Informationen zum hydrologischen Modellsystem PREVAH finden sich in der ausführlichen englischsprachigen Modelldokumentation: Viviroli D., Gutz J., Zappa M. (2007): The Hydrological Modelling System PREVAH. Geographica Bernensia P40. Berne: Institute of Geography, University of Berne. ISBN 978-3-905835-01-0.

Der Druck dieser Arbeit wurde freundlicherweise unterstützt durch:

- Stiftung Marchese Francesco Medici del Vascello
- Arbeitsgemeinschaft Geographica Bernensia

Druck Stämpfli, Bern

© 2007 GEOGRAPHICA BERNENSIA
Geographisches Institut der Universität Bern

ISBN 978-3-905835-00-7

Vorwort

Die Abschätzung von Hochwasserabflüssen besitzt in der Gruppe für Hydrologie am Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB) eine lange Tradition. Zu Beginn, also in der zweiten Hälfte der 1980er Jahre, standen Untersuchungen zur Anwendung des "Unit Hydrograph" in schweizerischen Einzugsgebieten im Vordergrund. In den 1990er Jahren folgten Analysen von hochwasserrelevanten Gebietskenngrößen, von historischen Abflüssen sowie die (Weiter-)Entwicklung empirischer bzw. regionalhydrologischer Abschätzverfahren für Gebiete ohne Abflussmessungen. Ein Modell, GIUB'96, trägt gar den Namen unseres Instituts. Daneben konnte das Prozessverständnis im Umfeld der Abflussbildung mit Feldprojekten erweitert und vertieft werden. Diese Phase fand ihren Abschluss in der Entwicklung des Programmpekts HQx_meso_CH, welches eine einfache, wenig zeitaufwändige Abschätzung von Hochwasserspitzenabflüssen in beliebigen mesoskaligen Einzugsgebieten der Schweiz ermöglicht. Erfreulicherweise ist dieses Programmpektt heute in der Praxis weit verbreitet.

Um auch Informationen zur Hochwasserganglinie und zum Hochwasservolumen zu erhalten, aber auch um die Genauigkeit der Abschätzung weiter zu verbessern, wurden wir vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) beauftragt, die Möglichkeiten und Grenzen eines deterministischen Niederschlag-Abfluss-Modells, konkret des Modells PREVAH, zur Hochwasserabschätzung in ungemessenen Einzugsgebieten zu untersuchen. Daniel Vivioli ist diese anspruchsvolle und herausfordernde Aufgabe im Rahmen einer Dissertation angegangen. Ziel war es, ein für ungemessene mesoskalige schweizerische Einzugsgebiete geeignetes, modellbasiertes und praxistaugliches Verfahren zu entwickeln, bei dem die freien Parameter des deterministischen Modells a-priori – also ohne Modellkalibrierung – festgelegt werden können. Dazu ist eine Regionalisierung der freien Modellparameter notwendig.

Die Arbeit von Daniel Vivioli stellt einen Meilenstein bei der Anwendung deterministischer Modelle in ungemessenen Einzugsgebieten dar. Ich hoffe, dass das hier vorgestellte prozessorientierte Modellsystem bald auch Eingang in die Praxis finden wird. Die dazu notwendige Software wird in einem Nachfolgeprojekt entwickelt.

Prof. Dr. Rolf Weingartner
Leiter der Gruppe für Hydrologie,
Geographisches Institut der Universität Bern

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Zusammenfassung	iv
Summary	v
Einstimmung und Dank	vi
1 Einleitung	
1.1 Relevanz und Problematik der Hochwasserabschätzung	1
1.2 Zielstellung, Konzept und Aufbau	6
1.3 Stand der Forschung.....	7
2 Das hydrologische Modellsystem PREVAH	
2.1 Grundlagen des Modellsystems.....	10
2.2 Gründe für die Anwendung von PREVAH	22
2.3 Anpassungen in Preprocessing und Modellkern.....	25
2.4 Zusammenfassung.....	30
3 Kalibrierung I: Methodik für Normalbedingungen	
3.1 Grundlagen.....	31
3.2 Methodik	37
3.3 Beispiel einer Kalibrierung	44
4 Kalibrierung II: Methodik für Spitzenabflüsse	
4.1 Grundlagen.....	46
4.2 Methodik	49
4.3 Feinabstimmung der Methode	57
4.4 Zusammenfassung.....	68
5 Kalibrierung III: Resultate	
5.1 Ausschluss von Gebieten mit fehlgeschlagener Kalibrierung	69
5.2 Diskussion der Modellgüte	74
5.3 Aussagen zu den Modellparametern	87
5.4 Zusammenfassung.....	92
6 Unsicherheit und Sensitivität I: freie Modellparameter	
6.1 Übersicht: Unsicherheit und Sensitivität in der vorliegenden Modellierung	93
6.2 Einführung zur Untersuchung der freien Modellparameter	95
6.3 Untersuchung der Parametersensitivität mittels Monte-Carlo-Methode	96
6.4 Untersuchung der Parameterunsicherheit anhand verschiedener Kalibrierungszeiträume	104
6.5 Anwendung auf die Abflusssimulation	111
6.6 Fazit.....	115
7 Unsicherheit und Sensitivität II: Niederschlagsinput	
7.1 Einführung	117
7.2 Methoden	118
7.3 Resultate	126
7.4 Anwendung: Unsicherheit bei den zwei grössten Hochwasserereignissen 1994–2003.....	132
7.5 Fazit.....	133
8 Regionalisierung I: Methoden	
8.1 Grundüberlegungen	135
8.2 Auswahl und Erzeugung von Gebietsattributen.....	139
8.3 Regionalisierung mit Nearest Neighbours (NNBR).....	148
8.4 Regionalisierung durch Interpolation (Kriging) der Modellparameter im Raum (KRIG).....	153
8.5 Regionalisierung über Regressionsbeziehungen zwischen Modellparametern und Gebietsattributen (REGR)	153
8.6 Kombination der Regionalisierungsansätze (COMB)	156
8.7 Bewertung der Regionalisierungsresultate	157
8.8 Anwendung auf Mittelwasserbedingungen	158
8.9 Zusammenfassung.....	159

9	Regionalisierung II: Feinabstimmung der einzelnen Verfahren	
9.1	Nearest Neighbours	160
9.2	Kriging	172
9.3	Regression	175
9.4	Zusammenfassung.....	180
10	Regionalisierung III: Resultate	
10.1	Modellgüte.....	181
10.2	Resultate der Hochwasserabschätzung	189
10.3	Wiedergabe der Parameter.....	204
10.4	Eignung für Mittelwasserbedingungen.....	206
10.5	Zusammenfassung.....	207
11	Fallbeispiel: Ablauf einer Schätzung	
11.1	Einführung	209
11.2	Fallbeispiel Zulg–Steffisburg	210
11.3	Konsequenzen für die Praxis	219
12	Anwendung auf Volumina des Direktabflusses	
12.1	Ziel und Aufbau	220
12.2	Automatische Abtrennung des Direktabflusses	220
12.3	Resultate	224
12.4	Fazit.....	235
13	Ausblick: Weitere Anwendungsmöglichkeiten für das Modellsystem	
13.1	Übersicht	237
13.2	Ausdehnung des Simulationszeitraums	238
13.3	Modellierung von Szenarien.....	239
13.4	Hydrologisch orientierte Schätzung von Konfidenzintervallen.....	241
13.5	Anwendung in anderen Abflussbereichen	241
13.6	Fazit.....	242
Anhang		
A	Untersuchte Einzugsgebiete	243
B	Gebietsattribute	247
C	Kalibrierung auf zwei unabhängige Referenzzeiträume	249
D	Grafiken der Hochwasserextrapolation	252
E	Direktabflussvolumina der jährlich grössten Hochwasser	270
Literaturverzeichnis		278
Datenquellen		298

Zusammenfassung

Für einen modernen, differenzierten Hochwasserschutz sind zuverlässige hydrologische Bemessungsgrundlagen von grosser Wichtigkeit. Gleichermaßen heikel wie auch wichtig sind vor allem Abschätzungen in Gebieten ohne Messungen des Abflusses. In der Praxis spielen dabei empirische Schätzverfahren eine wichtige Rolle, wozu in den letzten Jahren eine Reihe von Ansätzen untersucht und entwickelt wurden. Ihre Anwendbarkeit ist in der Schweiz dank einer sogenannten Praxishilfe (SPREAFICO ET AL., 2003) gewährleistet; die Erfahrungen zeigen jedoch, dass bei ihrem Einsatz immer noch mit grösseren Fehlern zu rechnen ist. Um in der Abschätzung für ungemessene Gebiete weitere Verbesserungen zu erzielen, wurde in der vorliegenden Arbeit der Ansatz der kontinuierlichen Niederschlag-Abfluss-Modellierung für eine Anwendung in der Schweiz weiterentwickelt und praktisch umgesetzt. Unter Verwendung des hydrologischen Modellsystems PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration Hydrotope Model) wird dabei der Abfluss eines Einzugsgebietes für 20 Jahre in stündlicher Auflösung simuliert und anschliessend extremwertstatistisch ausgewertet. Dieser Ansatz zielt vor allem darauf ab, langjährige Abflussganglinien auch für Einzugsgebiete ohne Direktmessungen des Abflusses zu erzeugen, um daraus die relevanten Hochwasserkenngrössen abzuleiten.

PREVAH ist ein deterministisches, prozessorientiertes Konzeptmodell vom Typ HBV, welches speziell für Regionen mit ausgeprägter Topographie entwickelt wurde. Seine räumliche Diskretisierung basiert auf dem Prinzip von Hydrotopen (Hydrological Response Units, HRU), welche für die vorliegende Anwendung aus einem Grundraster mit Auflösung 500 m × 500 m aggregiert wurden. Mit Hilfe des digitalen Höhenmodells sowie digitaler Karten von Landnutzung und Bodentyp werden bei der Gebietsaufbereitung eine Reihe invariantierter Parameter für jedes HRU individuell festgelegt. Das Modell wird anschliessend für den Zeitraum 1984–2003 in stündlicher Auflösung betrieben, wobei aus dem meteorologischen Standardmessnetz interpolierte Werte als Modellantrieb dienen. Um die praktische Anwendbarkeit des Modellsystems zu gewährleisten, wurden Gebietsaufbereitung (Preprocessing), Modellablauf und Nachbearbeitung (Postprocessing) in einer Reihe von Dienstprogrammen mit graphischer Benutzeroberfläche zusammengefasst.

Als Grundlage für die Regionalisierung der 12 freien Modellparameter konnten 140 mesoskalige Einzugsgebiete (ca. 10–1'000 km²) der Alpennordseite erfolgreich kalibriert werden. Dazu wurde ein halbautomatisches, zweistufiges Verfahren entwickelt: Für alle Gebiete wird zuerst ein auf die gesamte Ganglinie kalibrierter Parametersatz erstellt. Dieser Mittelwasserparametersatz wird anschliessend hinsichtlich einer besseren Wiedergabe der Hochwasserspitzen angepasst, wobei die hydrologische Plausibilität der Gesamtsimulation bewahrt wird. Die Regionalisierung der 12 freien Modellparameter geht dann von diesen hochwasserkalibrierten Parametersätzen aus und basiert auf einer Kombination von drei Verfahren: Als erstes werden mit Hilfe der Nearest-Neighbour-Methode Einzugsgebiete gesucht, welche dem zu regionalisierenden Zielgebiet möglichst ähnlich sind. Die Modellparameter werden dann unverändert aus diesen Spendergebieten auf das Zielgebiet übertragen. Als zweites werden die Parameter mittels Kriging im Raum interpoliert, wobei die Gebietsschwerpunkte als Stützstellen dienen; für ein unbekanntes Gebiet können die freien Modellparameter direkt aus den resultierenden Parameterkarten herausgelesen werden. Als drittes werden die Modellparameter aus Regressionsbeziehungen zu universell verfügbaren Gebietsattributen abgeleitet. Mit den Parametersätzen dieser drei unabhängigen Verfahren wird dann jeweils eine kontinuierliche Simulation des Abflusses durchgeführt. Anschliessend werden die Regionalisierungen kombiniert, indem für jeden Zeitschritt der mediane Abflusswert der drei regionalisierten Simulationen verwendet wird.

Die Resultate zeigen, dass der Ansatz der kontinuierlichen Simulation plausible Hochwasserabschätzungen für ungemessene Gebiete in der nordalpinen Schweiz liefert: Für 49 repräsentative Gebiete beträgt der mediane Fehler für ein Hochwasser mit hundertjähriger Wiederkehrperiode lediglich -7%, die Hälfte dieser Gebiete befinden sich in einem Fehlerbereich von -31% bis +8%. Zudem trifft der Schätzwert der Regionalisierung für ein HQ₁₀₀ in 51% der Fälle den extremwertstatistischen Konfidenzbereich des aus der Beobachtung extrapolierten Referenzwertes; in weiteren 12% der Fälle überschreiten sich die Konfidenzbereiche von Regionalisierung und Referenz zumindest. Diese Schätzgüte ist vergleichbar mit derjenigen der gängigen empirischen Schätzverfahren, die Streuung der Resultate ist jedoch merklich geringer. Da sich die bisherigen und das vorgestellte neue Verfahren methodisch stark unterscheiden, resultiert insgesamt ein wesentlicher Informationsgewinn bei der Abschätzung seltener Spitzenabflüsse in ungemessenen Einzugsgebieten. Zudem eignet sich das neue Verfahren auch zur Schätzung von seltenen Volumina des Direktabflusses, einer wichtigen wasserbaulichen Kenngröße, welche mit den meisten der üblichen Ansätze nicht berücksichtigt werden kann.

Summary

Reliable estimations for floods of various return periods are an indispensable prerequisite for successful flood protection. To elaborate such estimations for ungauged catchments is equally difficult as well as important. So far, empirical methods have mainly been used for this purpose. During the past years, a number of such approaches have been developed and tested, ensuring their applicability to Switzerland through a so-called practical aid (SPREAFICO ET AL., 2003). Experience shows, however, that these procedures still carry large errors. In order to make further progress in flood estimation, the approach of continuous precipitation-runoff-modelling is further developed and elaborated for practical application in Switzerland. For this, the hydrological modelling system PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration Hydrotope Model) is used to simulate discharge hydrographs for a 20-year period in hourly resolution; these simulations are then analysed by means of extreme value statistics. The main goal of this approach is to achieve discharge hydrographs for any Swiss mesoscale catchment without measurement of discharge and to subsequently derive the relevant flood estimations.

PREVAH is a deterministic, HBV-type conceptual linear storage model which has been developed especially for use in catchments with complex topography. Its spatial distribution is based upon hydrological response units (HRU) which for the present application have been assembled from 500 m × 500 m raster cells. A number of invariant HRU properties are set during preprocessing, using the digital elevation model and digital maps of land use and soil properties. The model is then operated in hourly resolution for the period 1984–2003 with data interpolated from the Swiss standard meteorological gauging network. In order to ensure the modelling system's practical applicability, preprocessing, model run and postprocessing tasks have been integrated into a number of utility programs with graphical user interface.

Starting point for regionalisation of the 12 free model parameters are 140 mesoscale catchments (approx. 10–1'000 km²) in northern-alpine Switzerland which were calibrated successfully. This was achieved through a freshly developed semi-automatic calibration scheme which consists of two stages: Firstly, the model's free parameters are calibrated for the complete hydrograph including all runoff conditions. Then, this standard parameter set is further adjusted for peak flow conditions; care is taken to preserve the simulation's hydrological overall plausibility. Regionalisation of the 12 free model parameters is then elaborated with the help of these flood-calibrated parameter sets, combining three different approaches: Firstly, a Nearest Neighbour method is employed to search for donor catchments which are most similar to the target catchment to be regionalised; the parameter sets are then transferred from the donor to the target catchment without any change. Secondly, model parameters are interpolated in space with the help of Kriging, using the catchment centroids as points of reference; the parameters of an ungauged catchment are read directly from the resulting parameter maps. Thirdly, the model's free parameters are derived from regression relationships to universally available catchment attributes. The parameter sets resulting from these three independent approaches are then each used for continuous simulation of a discharge hydrograph; subsequently, the regionalisations are combined using the median of the three simulated runoff values for each time-step.

Results show that the approach of long-term simulation is indeed able to produce plausible flood estimations in ungauged Swiss northern-alpine catchments: For a hundred year return period flood, the median error from 49 representative catchments is only -7%, while the error for half of these catchments ranges between -30% and +8%. Additionally, in 51% of cases, the HQ₁₀₀ estimate extrapolated from the regionalisation hits the statistical confidence interval of the reference value estimated from the observed record; in a further 12% of cases, the confidence intervals of regionalisation and reference intersect. The quality of these flood estimations compares with present empirical procedures, while the range of deviations is noticeably smaller. Since previous approaches and the one presented here differ strongly in their methodological set-up, significant gain in information is achieved for estimation of rare peak flows in ungauged catchments. Furthermore, it is demonstrated that the present approach is also suitable for estimation of rare volumes of direct discharge; this value has equal importance for hydraulic engineering but is neglected by most of the common estimation procedures.

Einstimmung und Dank

Die Schweiz ist ein "hydrologisches Paradies": Wasser ist in Hülle und Fülle vorhanden, es wird zur Gewinnung von Wasserkraft genutzt, versorgt Industrie, Landwirtschaft und Haushalte und prägt die Landschaft. Doch diese Fülle hat ihre Schattenseiten, denn gleichzeitig gehen vom Wasser auch Gefahren aus. Die Hochwasserereignisse von 2005 und 2007 haben dies erneut einer breiten Öffentlichkeit in Erinnerung gerufen. Die Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse ist eine unerlässliche Grundlage für die Planung von Massnahmen, welche Risiken und Schäden verringern sollen. Insbesondere für ungemessene Einzugsgebiete bestehen aber bei den etablierten Schätzverfahren grosse Unsicherheiten; in diesem Themenbereich soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten.

Dank stetig ansteigender Rechenkraft und wachsenden Speicherkapazitäten haben sich die Anwendungsmöglichkeiten hydrologischer Modelle in den letzten Jahren enorm vergrössert. Dabei muss einerseits vor zu grosser Euphorie gewarnt werden, denn der Mangel an Messdaten und Prozessverständnis wird auf absehbare Zeit hin ein limitierender Faktor bleiben. Gleichzeitig sind aber umfassende Anwendungen – wie das vorliegende Projekt – problemlos auf einem handelsüblichen Notebook durchführbar. Nebst ausgezeichneten Bedingungen für die Forschung ermöglicht dies auch eine grössere Verbreitung von Modellanwendungen in der Praxis.

Mit dieser am Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB) ausgeführten Arbeit erhielt ich die Gelegenheit, zwei ausgesprochen spannende Themenblöcke miteinander zu verbinden: die Hochwasserabschätzung einerseits, die hydrologische Modellierung andererseits. Ohne vielfältige Unterstützung wäre dies in der vorliegenden Form nicht möglich gewesen. Bei den folgenden Personen und Institutionen möchte ich mich deshalb besonders herzlich bedanken:

- Rolf Weingartner, der diese Arbeit leitete und mir immer wieder Anregungen und Impulse gab. Stets konnte ich auf seine Unterstützung und sein Interesse zählen.
- Joachim Gurtz, der als Koreferent fungierte, mich mit seiner Begeisterung für die hydrologische Modellierung ansteckte und mich an seinem Wissen und Verständnis teilhaben liess.
- Massimiliano Zappa, der wichtige Grundlagen zum Aufbau des Modellsystems und der Kalibrierung beisteuerte. Das gemeinsame Aushecken von Ideen war ein grosses Vergnügen.
- Jan Schwanbeck und Christof Sonderegger, welche mich mit grossem Einsatz bei der Gebietskalibrierung unterstützten; ohne ihren Beitrag wäre diese riesige Aufgabe kaum so effizient zu bewältigen gewesen. Jan danke ich ganz besonders herzlich für den regen gedanklichen Austausch und die Durchsicht von Teilen des Manuskripts.
- Massimo Corti, Gion Decurtins, Philipp Flach, Daniel Gasser und Heidi Mittelbach; mit ihren Beiträgen und ihrem Mitdenken halfen sie, den Weg zum fertigen Modellsystem zu ebnen.
- Christoph Frei und Marc Wüest, welche die radargestützte Interpolation der Niederschläge zur Verfügung gestellt und damit vertiefende Studien von Hochwasserereignissen ermöglicht haben.
- Sabina Steiner, welche mich beim Ausarbeiten der parallel erscheinenden Modelldokumentation unterstützte.
- Dem Institut für Atmosphären- und Klimawissenschaft der ETH Zürich (IACETH), welches – ergänzend zum GIUB – mit Infrastruktur und personellen Ressourcen wichtige Schritte in dieser Arbeit ermöglichte.
- Dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) und den zahlreichen weiteren Institutionen, welche mir Daten zur Verfügung gestellt haben (siehe Quellenverzeichnis). Insbesondere danke ich Daniel Streit, der wohl am meisten unter meinem kaum zu stillenden Hunger nach Messwerten zu leiden hatte.

Diese Arbeit wurde vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziert. Manfred Spreafico sei für die Förderung des Projektes ebenfalls herzlich gedankt.

Daniel Vivioli
Luzern, im Dezember 2007

Auf seiner Oberfläche im Wandel der Stromschollen und Strudelkreise, im Zuge dieser unablässigen Verwandlung des Wassers spielt eine flüchtige und fortwährende Formenphantasie, die dazu angetan scheint, den Zahlenverstand und den geometrischen Blick zu locken und zu foppen, ihm Konturen und Körper vorzuspiegeln, eine Welt der Festigkeit und Verlässlichkeit, um sie im nächsten Augenblick wieder aufzulösen in der immer gleichen und ungleichen Bewegung des Wassers.

John von Düffel

Kapitel 1

Einleitung

The fundamentals of this treatise are introduced, starting with considerations about the importance of reliable flood estimations for Switzerland and an overview of the relevant estimation procedures (extreme value statistics, precipitation-runoff-modelling, regional transfer). The goals of the present study are defined and subsequently transformed into a concept which also defines the study's structure. The chapter concludes with an overview of the relevant research literature.

Die Grundlagen der vorliegenden Arbeit werden dargelegt: Nach einer Einschätzung der Bedeutung der Hochwasserabschätzung in der Schweiz folgt ein Überblick zu den relevanten Schätzverfahren Extremwertanalyse, Niederschlag-Abfluss-Modellierung sowie regionale Übertragung. Die Zielstellung dieser Arbeit wird formuliert und in ein Konzept umgesetzt, welches auch den inhaltlichen Aufbau festlegt. Abschliessend folgt ein Überblick zur für diese Arbeit relevanten Forschungsliteratur.

1.1 Relevanz und Problematik der Hochwasserabschätzung

1.1.1 Relevanz von Hochwasserabschätzungen

Die menschliche Siedlungstätigkeit suchte seit jeher die Nähe zum Wasser, um von ihm beispielsweise als Nahrungsmittel (Trinkwasser), Vorfluter (Abwasserentsorgung), Energiequelle (Wasserkraft für Mühlen, Sägereien u. ä.) oder Transportweg (Schiffahrt) zu profitieren (siehe SCHNITTER, 1992). Besonders im Falle von Fließgewässern ist damit aber gleichzeitig auch eine Gefährdung bei Extremereignissen verbunden. Auch für die Schweiz gilt, dass neben dem ansonsten sehr vorteilhaften Wasserrerichtum (VIVIROLI UND WEINGARTNER, 2004A) eine relevante Hochwasserproblematik existiert (vgl. RÖTHLISBERGER, 1991 und 1998). Verschärft wird diese Problematik durch die Konzentration von Schadenpotenzial in gefährdeten Gebieten (vgl. NIGGLI, 2000), welche insbesondere in den vergangenen 30 Jahren zu einer deutlich höheren Empfindlichkeit gegenüber Hochwasserereignissen geführt hat (WEINGARTNER, 1999; SWISS RE, 2003; siehe auch BURLANDO ET AL., 2001) – dies, obwohl im 20. Jahrhundert enorme Summen in den Hochwasserschutz investiert wurden. Bei den jüngsten grossflächigen Überschwemmungen vom August 2005 betrug die Summe der Gesamtschäden ca. 3 Milliarden Schweizer Franken (HILKER ET AL., 2007); diese ausserordentlich hohe Schadensziffer übertrifft diejenige früherer Ereignisse bei weitem (vgl. Abbildung 1.1).

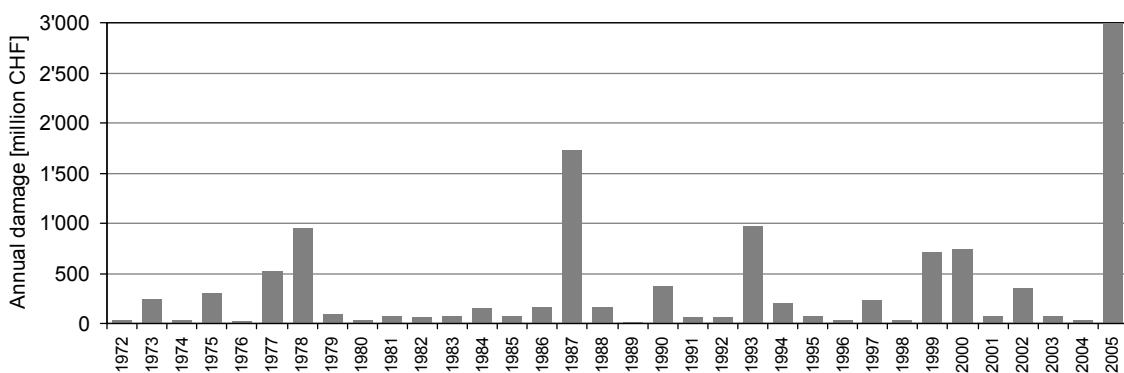


Figure 1.1: Storm damage cost in Switzerland since 1972, inflation adjusted (after RÖTHLISBERGER, 1991 and SCHMID ET AL., 2004, extended).

Abbildung 1.1: Unwetterschäden in der Schweiz seit 1972, teuerungsbereinigt (nach RÖTHLISBERGER, 1991 und SCHMID ET AL., 2004, ergänzt).

Wesentlich ausgelöst durch die ebenfalls sehr grossen Schäden des Jahres 1987 reifte in den späten 1980er-Jahren die Erkenntnis, dass ein absoluter Schutz vor Hochwassergefahren nicht möglich ist. Der damit einhergehende Paradigmawechsel spiegelt sich im Wasserbaugesetz von 21. Juni 1991 (SCHWEIZERISCHE EidGENOSSENSCHAFT, 1991) wider: Anstelle der bisher dominierenden wasserbaulichen "Gefahrenabwehr" (meist mit einem HQ₁₀₀ als Bemessungsgrundlage) tritt ein Hochwasserschutz in den Vordergrund, bei welchem raumplanerische Massnahmen an erster Stelle stehen und die Schutzziele differenziert nach Art der Raumnutzung festgelegt werden (vgl. EGLI UND PETRASCHECK, 1994; BWW ET AL., 1997; BWW, 1998; BWG, 2001; ZAUGG, 2006). Die verfügbaren Geldmittel sollen zudem möglichst wirtschaftlich, umweltgerecht und sozialverträglich eingesetzt werden (SWV, 2004). Die Ansprüche an die Bemessungsgrundlagen des Hochwasserschutzes sind somit wesentlich gestiegen; Abschätzungen für Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Wiederkehrperiode an beliebigen Stellen entlang der Fließgewässer sind dabei eine unerlässliche Grundlage.

1.1.2 Ansätze zur Hochwasserabschätzung

Die zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse eingesetzten Methoden lassen sich in drei Verfahrensgruppen unterteilen (**Abbildung 1.2**): Extremwertstatistik, regionalhydrologische Ansätze und Niederschlag-Abfluss-Modellierung. Bei allen Verfahren bestehen jeweils spezifische Vor- und Nachteile, welche im Folgenden kurz erläutert werden sollen.

Extremwertstatistik

Die Extremwertstatistik ist gut etabliert (z. B. DVWK, 1999; IH, 1999) und ohne grossen Aufwand anwendbar, kann allerdings nur in Gebieten mit langen Abflussmessreihen eingesetzt werden (vgl. MIEGEL UND BÜTTNER, 2003). Zudem berücksichtigt der Ansatz nicht, dass die Entstehungsbedingungen von Hochwassern unterschiedlich sind und sich die hydrologischen Prozesse bei Extremereignissen verändern (WOOD ET AL., 1990; FONTAINE, 1995; UHLENBROOK UND STEINBRICH, 2002; NAEF, 2007). Auch bezüglich Auswahl der geeigneten Extremalverteilung und der Parameterschätzmethode besteht eine gewisse Unsicherheit (VOGEL ET AL., 1993; KLEMEŠ, 2000). Eine Erhöhung der Prozessnähe kann allenfalls durch Analyse der Ereignistypen erreicht werden (z. B. MERZ, 2002; DIEZIG, 2006; HELBLING, ET AL., 2006), die Berücksichtigung von Niederschlagsextrawerten (vgl. ELSASSER, 1996; MERZ ET AL., 1999; siehe auch GAUME, 2006) oder der Einbezug vertrauenswürdiger historischer Hochwasser (z. B. GEES, 1996; MUDELSEE ET AL., 2006) können die Aussagekraft einer Abschätzung ebenfalls steigern.

Regionalhydrologische Ansätze

Für Gebiete ohne Abflussmessungen wurden bisher vor allem regionalhydrologische Ansätze wie Hüllkurven oder empirische Formeln eingesetzt. Ihnen zugrunde liegt die Idee, hydrologische Grössen oder Parameter einfacher Modelle anhand von flächendeckend vorhandenen Gebietskennwerten zu bestimmen oder die vorhandenen Messungen auf ungemesene Räume zu übertragen. Jüngere derartige Arbeiten für den Alpenraum haben WEINGARTNER (1999), PFAUNDLER (2001), BARBEN (2003), NIGGLI (2004) sowie MERZ UND BLÖSCHL (2005) verfasst. Seit einigen Jahren wird zudem der Einsatz Artificieller Neuronaler Netzwerke (ANN) erprobt (z. B. DAWSON ET AL., 2006).

Eine Auswahl von gut untersuchten, für die Schweiz relevanten regionalhydrologischen Verfahren ist im Programm Paket HQx_meso_CH (BARBEN, 2003) zusammengefasst und über eine sogenannte Praxishilfe (SPREAFICO ET AL., 2003) einer praktischen Anwendung zugänglich. Die Problematik besteht vor allem in den grossen Unterschieden, welche zwischen den Resultaten der verschiedenen Verfahren zu beobachten sind. Überlegungen zu hydrologischen Prozessen und Vorbedingungen fliessen in einzelnen Verfahren zwar ein (z. B. KÖLLA, 1986; DÜSTER, 1994), werden aber nicht kausalanalytisch berücksichtigt, ebensowenig wie die Ereignistypen. Anzumerken ist, dass diese Verfahren gemäss SPREAFICO ET AL. (2003) nur für den Skalenbereich von 10 bis 500 km² zu empfehlen sind. Für kleinere Gebiete sind spezifische Ansätze heranzuziehen, welche unter anderem auch stärker auf Feldstudien basieren sollten (vgl. RICKLI UND FORSTER, 1997; DOBMANN, 2002; HUNZIKER, 2002; DOBMANN, in Vorbereitung). Dafür wird in der Praxishilfe das Verfahren HAKESCH vorgeschlagen (VOGT, 2001; VOGT ET AL., 2002).

Niederschlag-Abfluss-Modellierung

Unter Einsatz von Niederschlag-Abfluss-Modellen wird die Hydrologie eines Einzugsgebietes simuliert (siehe z. B. MANIAK, 2005); die relevanten hydrologischen Prozesse werden dabei mit einer Genauigkeit berücksichtigt, welche vom zugrundeliegendem Modelltyp und den zur Verfügung stehenden Ge-

bietsinformationen abhängt. Geschieht die Simulation ereignisbezogen, wird ein Bemessungsniederschlag auf das Gebiet appliziert und die Reaktion beurteilt. Angaben zur Wiederkehrperiode sind wegen grossen Unsicherheiten bei der Festlegung der Randbedingungen (v. a. Vorfeuchte, Verlauf der Niederschlagsintensität) nicht möglich. Vorteilhafter ist daher die kontinuierliche Simulation über eine längere Dauer: Sowohl Vorgeschichte wie auch Ereignisverlauf ergeben sich dabei jeweils aus dem meteorologischen Modellantrieb, welcher wiederum auf konkreten Messwerten basiert. Die simulierten langen Reihen werden anschliessend mit konventioneller Extremwertstatistik ausgewertet. Verwendet man als Grundlage ein geeignetes prozessorientiertes hydrologisches Modell (also ein Grey- oder White-Box-Modell), besteht gegenüber anderen Schätzverfahren eine Reihe von entscheidenden Vorteilen (siehe z. B. BEVEN, 2001b):

- Es resultiert eine komplette Ganglinie des Gebietsabflusses, nicht bloss ein Spitzenabflusswert. Dadurch können weitere relevante Hochwasserkennwerte erhoben werden, wie etwa die Volumina des Direktabflusses oder die Überschreitungsdauer von Schwellenwerten. Die Wahl der Wiederkehrperiode ist lediglich gegen oben durch die dreifache Anzahl simulierter Jahre beschränkt (DVWK, 1999), ansonsten aber frei.
- Die heikle Festlegung von Abflussbeiwerten zur Bestimmung des abflusswirksamen Niederschlags erübrigts sich.
- Die Randbedingungen (Vorfeuchte, Verlauf der Niederschlagsintensität) müssen nicht geschätzt werden; sie leiten sich in der Simulation jeweils vom meteorologischen Modellinput ab.
- Die problematische Verknüpfung von Extremniederschlägen mit Extremabflüssen gleicher Jährlichkeit (vgl. NAEF ET AL., 1986) ist nicht nötig; Intensitäten und Mengen der Niederschläge werden im Modell über die gesamte Simulationsdauer hinweg sowohl hydrologisch und wie auch meteorologisch sinnvoll berücksichtigt.

Zwar besteht auch bei der kontinuierlichen Simulation das Problem, dass sich die hydrologischen Prozesse unter Extrembedingungen verändern; dank der grösseren Prozessnähe sind die daraus erwachsenden Einschränkungen aber wesentlich geringer als bei beiden den weiter oben vorgestellten Verfahrensgruppen. Nachteilig ist vor allem der grosse Aufwand, welcher für die Modellierung nötig ist – namentlich bei der Aufbereitung von Raumdaten und meteorologischen Daten. Zudem müssen im Normalfall Abflussmessungen zur Verfügung stehen, anhand welcher die freien Parameter des Modells kalibriert werden können (siehe **Abbildung 1.2**, Anwendungsweg "parameter calibration"). Sind diese Messreihen lang, ist eine extremwertstatistische Analyse wesentlich einfacher durchzuführen; bei Vorliegen kurzen Reihen können mit Hilfe eines Modells allenfalls längere Reihen simuliert werden, deren Spitzenwerte dann wiederum für eine Extrapolation verwertbar sind. Stehen keine Abflussmessungen für eine Kalibrierung zur Verfügung, kann versucht werden, die freien Modellparameter über eine Regionalisierung herzuleiten (siehe **Abbildung 1.2**, Anwendungsweg "parameter regionalisation"). Dieser Weg ist allerdings sehr aufwendig und birgt einige Unsicherheiten (BEVEN, 2007); zudem benötigt er als Grundlage eine grosse Zahl gemessener Gebiete mit entsprechenden Kalibrierungen. Sowohl für die Kalibrierung wie auch für die Regionalisierung gilt, dass für den Anwendungsraum ausführliche Gebietsinformationen vorhanden sein müssen – namentlich möglichst hochauflösende und zuverlässige Daten zu Topographie (digitales Höhenmodell), Landnutzung und Bodeneigenschaften.

Wegen ihrer einfachen praktischen Durchführbarkeit kamen in der Schweiz bisher vor allem Verfahren der Extremwertanalyse (gemessene Gebiete) und der regionalhydrologischen Analyse (ungemessene Gebiete) zum Einsatz (SPREAFICO ET AL., 2003). Beide haben aber wie oben beschrieben ihre spezifischen Einschränkungen, welche im Endeffekt zu grossen Unsicherheiten und Unterschieden in den Schätzwerten führen. Niederschlag-Abfluss-Modelle wurden nur vereinzelt für Forschungszwecke eingesetzt oder für Sonderfälle verwendet, in welchen zusätzlich zum Spitzenwerte auch noch der Verlauf der Hochwasserganglinie von Interesse war. LAMB ET AL. (2002:559) bezeichnen diesen Ansatz wegen seines grossen Potenzials jedoch als "*next generation flood frequency estimation methodology*".

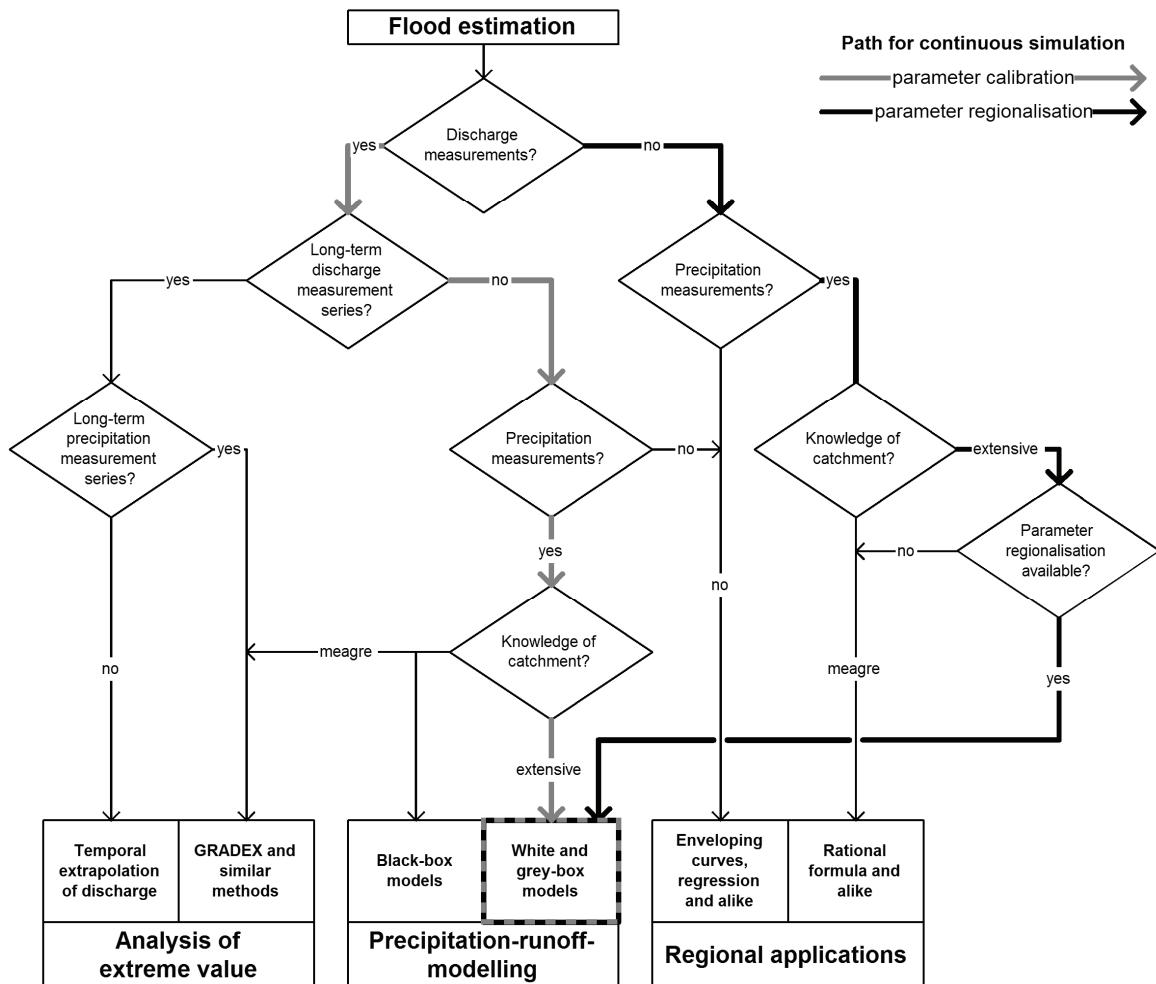


Figure 1.2: Decision tree for flood estimation in mesoscale catchments (extended from BARBEN ET AL., 2001 and WEINGARTNER ET AL., 2003). The heavy lines trace the path of continuous simulation pursued in this treatise – initially with calibration (grey), later with regionalisation (black) of the free model parameters.

Abbildung 1.2: Entscheidungsbaum zur Hochwasserabschätzung in mesoskaligen Einzugsgebieten (nach BARBEN ET AL., 2001 und WEINGARTNER ET AL., 2003, erweitert). Die dick gezogenen Linien bezeichnen der Weg der kontinuierlichen Simulation, der in dieser Arbeit verfolgt wird – vorerst mit Kalibrierung (grau), später mit Regionalisierung (schwarz) der freien Modellparameter.

1.1.3 Verfügbarkeit und Länge hydrologischer und meteorologischer Messreihen

Hinsichtlich der Datenlage muss zwischen zwei Bereichen unterschieden werden: Unmittelbar relevant sind Messreihen des Abflusses, welche vor allem bei der Extremwertstatistik und den regional-hydrologischen Ansätzen als Grundlage dienen. Für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung können aber auch meteorologische Messreihen als Input dienen; sofern die Kalibrierung der freien Modellparameter durch eine Regionalisierung umgangen werden kann, sind dabei keine Abflussdaten notwendig.

Hydrologische Messreihen

Die Schweiz verfügt zwar über ein ausserordentlich dichtes hydrometrisches Messnetz, jedoch können unmöglich alle relevanten Gewässer und Gewässerabschnitte erfasst werden. Wie **Abbildung 1.3** zeigt, sind lange Messreihen vor allem für grosse Einzugsgebiete verfügbar; je kleiner die Gebietsfläche aber ist, desto weniger zahlreich sind lange Messreihen. Im unteren Bereich der Meso-

skala ($10\text{--}100 \text{ km}^2$) beispielsweise beträgt die mediane Messdauer lediglich 20 Jahre, nur 18 von 375 Messreihen besitzen eine Länge von mehr als 50 Jahren (Referenzjahr 2003; Datengrundlage: KAN, 2002). Die spezifisch zur Messung von Spitzenabflüssen ausgelegten Hochwasserpegel in kleinen und mittelgrossen Gebieten können zwar zur Verbesserung der Datengrundlage beitragen, gehen aber nicht vor das Jahr 1984 zurück. Als Ausgangspunkt für eine Hochwasserabschätzung stehen also häufig nur kurze Messreihen zur Verfügung – ebenso wahrscheinlich ist aber, dass für die zu schätzende Gewässerstelle überhaupt keine hydrologischen Messdaten vorliegen.

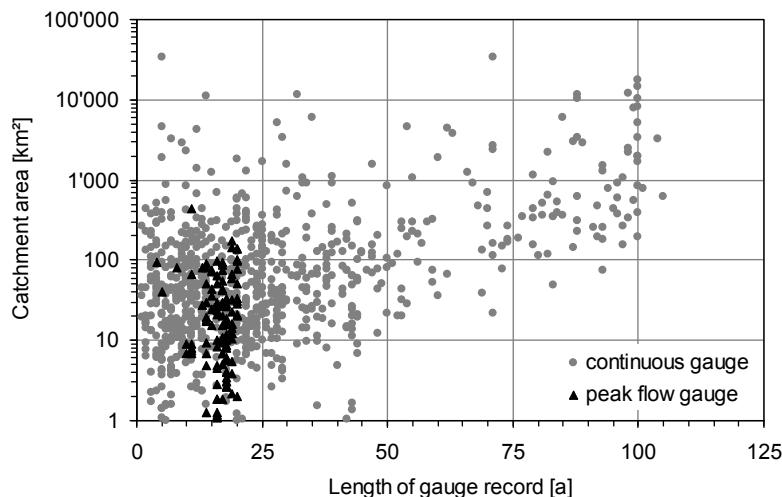


Figure 1.3: Length of hydrological gauge records in Switzerland in comparison with respective catchment areas. Data: KAN (2002), reference year 2003.

Abbildung 1.3: Messdauer von hydrologischen Stationen in der Schweiz im Vergleich mit den entsprechenden Einzugsgebietsflächen. Datengrundlage: KAN (2002), Bezugsjahr 2003.

Meteorologische Messreihen

Etwas anders präsentiert sich die Situation bei den meteorologischen Messwerten: Der entscheidende Vorteil besteht hier darin, dass sich die Daten räumlich interpolieren lassen. Somit können sie bei der Niederschlag-Abfluss-Modellierung im Prinzip für beliebige Gebiete als Modellantrieb bereitgestellt werden. Zu berücksichtigen ist dabei allerdings, dass meteorologische Messwerte insbesondere in Gebirgsräumen verschiedene Fehler aufweisen, welche beispielsweise durch die mangelhafte Dichte des Messnetzes in grossen Höhen (RODDA, 1994; BRIGGS UND COGLEY, 1996) oder die grossen Messfehler (SEVRUK, 1985; SEVRUK UND KIRCHHOFER, 1992) verursacht werden. Auch die Interpolation vom Punkt in die Fläche ist mit Qualitätseinbussen und Problemen verbunden, insbesondere wenn Extremereignisse in Betrachtung stehen (vgl. WILSON ET AL., 1979; BERNDTSSON UND NIEMCZYNOWICZ, 1988; JENSEN ET AL., 1997; GREBNER, 2001; GREBNER UND GRUBINGER, 2004).

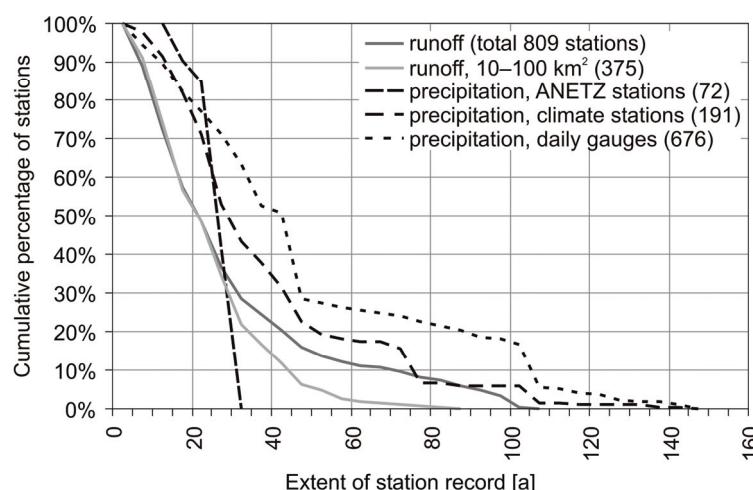


Figure 1.4: Length of meteorological and hydrological gauge records in Switzerland. Data: METEOSCHWEIZ (2003) and KAN (2002), reference year 2003.

Abbildung 1.4: Messdauer von meteorologischen und hydrologischen Stationen in der Schweiz. Datengrundlage: METEOSCHWEIZ (2003) und KAN (2002), Bezugsjahr 2003.

Betrachtet man Klimastationen (täglich zwei bis drei Terminwerte) und Niederschlagssammler (tägliche Summenwerte), existieren im Vergleich zu den Abflussmessungen bei einem deutlich grösseren Prozentsatz der Standorte lange Reihen (**Abbildung 1.4**). Hinderlich ist, dass für anspruchsvolle hydrologische Modelle die Werte des automatischen Messnetzes (ANETZ) erforderlich sind, welches deutlich gröber ist und wesentlich kürzere Datenreihen aufweist.

1.2 Zielstellung, Konzept und Aufbau

Bei der oben beschriebenen Ausgangslage setzt die vorliegende Arbeit nun an: Der Ansatz der Niederschlag-Abfluss-Modellierung soll für die Hochwasserabschätzung in beliebigen Gebieten – insbesondere in solchen ohne Abflussmessungen – systematisch weiterentwickelt und einer stärker praxisorientierten Anwendung zugänglich gemacht werden. Betrachtet werden dabei vor allem Gebiete mit einer Fläche zwischen 10 und 1'000 km². Dieser Skalenbereich deckt die oben aufgezeigten Defizite in der Länge der Messreihen ab, ist für die Anwendung deterministischer Konzeptmodelle geeignet und mit den von SPREAFICO ET AL. (2003) zusammengestellten mesoskaligen Verfahren vergleichbar.

Das Konzept einer solchen Hochwasserabschätzung ist in **Abbildung 1.5** dargestellt: Als Ausgangspunkt steht auf der einen Seite ein geeignetes hydrologisches Modellsystem, welches sich in Gebieten ohne Abflussmessungen anwenden lässt. Auf der anderen Seite ist ein räumlich verteilter Modellantrieb bereitzustellen, welcher die erforderlichen meteorologischen Eingangsgrößen in der gewählten räumlichen und zeitlichen Auflösung umfasst. Mit diesen Grundlagen kann das Modellsystem für ein beliebiges mesoskaliges Gebiet betrieben werden. Aus der kontinuierlichen Simulation über eine grössere Anzahl von Jahren werden dann die jährlichen Spitzenabflüsse bestimmt und anschliessend mit konventioneller Extremwertstatistik auf die gewünschte Wiederkehrperiode extrapoliert.

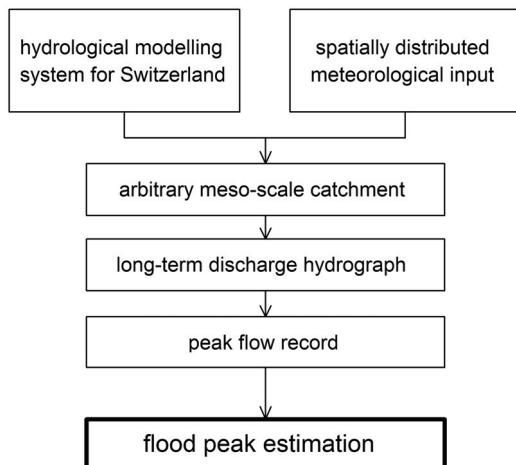


Figure 1.5: Flood estimation concept for the present study.

Abbildung 1.5: Konzept der Hochwasserabschätzung in der vorliegenden Arbeit.

Zur Realisierung dieses Konzepts besteht vor allem bei der Komponente des hydrologischen Modellsystems mit Anwendungsmöglichkeit in ungemessenen Gebieten starker Entwicklungsbedarf. Die dabei notwendigen Schritte geben gleichzeitig die Grobstruktur dieser Arbeit vor (**Abbildung 1.6**):

Als erstes ist ein hydrologisches Modellsystem zu etablieren, welches sich für die Anwendung auf mesoskalige Einzugsgebiete im schweizerischen Rheineinzugsgebiet eignet. Aus Gründen, welche im folgenden Kapitel noch zu erläutern sein werden, fällt die Wahl dabei auf PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration Hydrotop Model; GURTZ ET AL., 1997). Die Spezifikationen dieses Modellsystems sowie die zugehörigen Prozeduren zur Aufbereitung von Einzugsgebieten werden in Kapitel 2 erläutert. Dort wird auch auf die Modellerweiterungen hingewiesen, welche im Hinblick auf Hochwasserabschätzung, Anwendung in ungemessenen Gebieten und Anwenderfreundlichkeit vorgenommen wurden (siehe auch VIVIROLI ET AL., 2007). In den Kapiteln 3 bis 5 folgt dann die Kalibrierung des Modells auf insgesamt 140 mesoskalige Einzugsgebiete, wobei besonderes Augenmerk auf eine gute Wiedergabe der Spitzenabflüsse gelegt wird.

Unsicherheit und Sensitivität des Modellsystems werden in den Kapiteln 6 und 7 genauer betrachtet. Als erstes werden die freien Modellparameter mittels Monte-Carlo-Analysen und verschiedenen Kalibrierungszeiträumen genauer untersucht (Kapitel 6). Die zweite Betrachtung befasst sich mit dem Niederschlagsinput (Kapitel 7) – hier soll ergründet werden, wie stark die Modellergebnisse von der Güte der verwendeten Niederschlagsfelder beeinflusst werden. Als methodisch anspruchsvolle Interpolation wird ein Verfahren eingeführt, welches Daten des schweizerischen Wetterradarmessnetzes verwendet; dabei interessiert insbesondere, ob sich so eine Verbesserung der Modellgüte erreichen lässt.

Der nächste Schritt ist die Anwendung auf ungemessene Einzugsgebiete (Kapitel 8 bis 10). Da das Modell in diesen Fällen nicht kalibriert werden kann, muss eine Regionalisierung der freien Modellparameter erarbeitet werden. Sie umfasst die drei Ansätze Nearest Neighbours, Kriging und Regression,

welche zuerst methodisch hergeleitet (Kapitel 8), dann im Detail entwickelt (Kapitel 9) und schliesslich zu einer kombinierten Regionalisierung zusammengefügt werden. Beim Beurteilen der Regionalisierungsresultate (Kapitel 10) hat – entsprechend dem Ziel dieser Arbeit – die Abschätzung seltener Spitzenabflüsse das grösste Gewicht (vgl. Anhang D).

Mit der Analyse der Regionalisierungsergebnisse in Kapitel 10 erfolgt ein fliessender Übergang zu praktischen Anwendungen. Das konkrete Vorgehen einer Hochwasserabschätzung gemäss dem oben eingeführten Konzept (vgl. **Abbildung 1.5**) wird in Kapitel 11 anhand eines Fallbeispiels zusammengefasst und beurteilt. Als Erweiterung der Hochwasserabschätzung zeigt Kapitel 12 zudem, dass das Modellsystem auch zur Abschätzung seltener Volumina des Direktabflusses eingesetzt werden kann.

Ein Ausblick (Kapitel 13) weist abschliessend darauf hin, in welche Richtung das erarbeitete Modellsystem in Zukunft entwickelt werden könnte und wie sich die Grundlagen zur Hochwasserabschätzung in ungemessenen Gebieten dadurch weiter verbessern liessen.

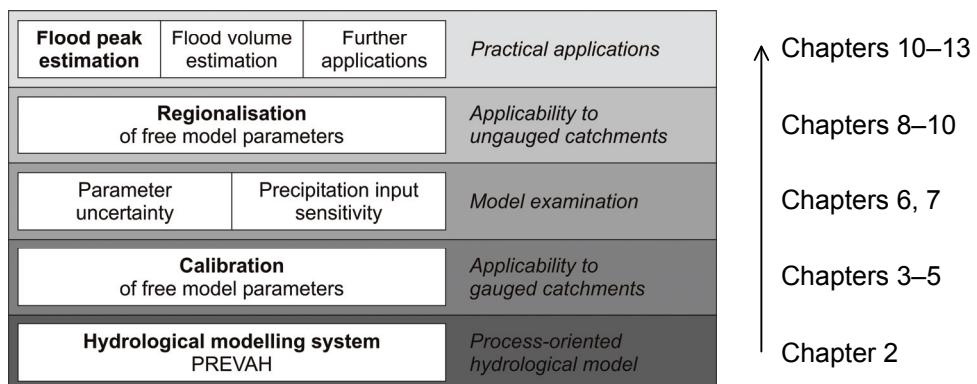


Figure 1.6: Structure of the present study with chapter references.

Abbildung 1.6: Aufbau der vorliegenden Arbeit mit entsprechenden Kapitelverweisen.

1.3 Stand der Forschung

Abgeschlossen wird dieses einleitende Kapitel mit einem Überblick zum Stand der für diese Arbeit relevanten Forschung. Dabei wird an dieser Stelle vor allem die hydrologische Modellierung und deren Anwendung mit dem Ziel der Hochwasserabschätzung besprochen. Die Literatur zu spezifischen Fragestellungen wird in den jeweiligen Kapiteln zu diskutieren sein; dies betrifft insbesondere die Modellkalibrierung (Kapitel 3) sowie die Herleitung von Parametern für ungemessene Einzugsgebiete (Regionalisierung, Kapitel 8).

1.3.1 Modellierung in der Hydrologie

Der Begriff der Niederschlag-Abfluss-Modellierung umfasst ein sehr breites Spektrum an Methoden, welche sich in ihrer Komplexität und Prozessgenauigkeit wesentlich unterscheiden. Als ein erster wichtiger Ansatz ist die "Rational Method" zu nennen, welche auf MULVANEY (1851) zurückgeht. Ebenfalls sehr grosse Verbreitung fanden Modelle vom Typ "Unit Hydrograph" (SHERMAN, 1932). Die Verfügbarkeit von Computern und der damit verbundene Zuwachs an Rechenkraft führte seit den 1960er-Jahren zu einer grossen Zahl neuer Modelle, welche die Wasserhaushaltselemente explizit berücksichtigen und in der Form einzelner Komponenten zusammenfügen (z. B. DAWDY UND O'DONNELL, 1965; CRAWFORD UND LINSLEY, 1966; siehe auch FRANCHINI UND PACCANI, 1991); die relevanten Prozesse sind dabei über mehr oder weniger starke Vereinfachungen repräsentiert. Auch das HBV-Modell (BERGSTRÖM, 1976), welches dem in dieser Arbeit verwendeten Modellsystem zugrunde liegt, geht auf diese Konzeptualisierung zurück. Heute liegen prozessorientierte Modelle in einer kaum zu überblickenden Fülle vor. Eine Zusammenstellung der gebräuchlichsten Vertreter kann SINGH (1995) oder MERZ UND BLÖSCHL (2002) entnommen werden, Übersichten zur Entwicklung der Niederschlag-Abfluss-Modellierung sind bei BEVEN (2001b), SINGH UND WOOLHISER (2002) oder TODINI (2007) zu finden. Wieso für diese Arbeit das hydrologische Modellsystem PREVAH verwendet wurde, wird im folgenden Kapitel 2 noch zu erläutern sein.

Trotz stetig zunehmenden Rechengeschwindigkeiten und Speicherkapazitäten stösst die hydrologische Modellierung insgesamt aber an Limiten – diese betreffen weniger die Modelle selbst, sondern vielmehr die benötigten Eingangsdaten wie Gebietskennwerte oder meteorologische und hydrologische Messreihen. Datenverfügbarkeit und Datenqualität sind also ausgesprochen wichtig, nicht zuletzt auch für die weitere Erforschung der hydrologischen Prozesse (vgl. UHLENBROOK, 2005; DOOGE, 2005). BEVEN (2001B:45) merkt dazu an: "*In essence, the application of all types of models is limited by the available data on how hydrological systems work*", dies weist auch auf die Bedeutung von Geländeuntersuchungen hin.

Damit wird die Festlegung der freien Modellparameter – sie geschieht üblicherweise durch Kalibrierung am gemessenen Abfluss – zu einem entscheidenden Problem, da sie in der Praxis auf ungenügenden und ungenauen Daten basiert (UHLENBROOK ET AL., 2005). Nicht minder problematisch ist die Parameterwahl für Gebiete ohne Messreihen und somit ohne Kalibrierungsmöglichkeit – sie wird in der vorliegenden Arbeit eine zentrale Rolle spielen (Kapitel 8 bis 10, siehe auch dort für relevante Literatur).

1.3.2 Anwendungen in verschiedenen Hochwasserfragen

Für das Rheineinzugsgebiet existiert bereits eine grosse Zahl von Arbeiten, welche sich auf Basis prozessorientierter Modelle und kontinuierlicher Simulation in der einen oder anderen Form mit Hochwasser beschäftigen. Eine Ausrichtung dieser Modellierungen betrifft Szenarien: So setzte beispielsweise KLEINN (2002) WaSiM ein, um den Einfluss von Klimaänderungen auf den Abfluss des Rheins bis Köln zu untersuchen (siehe auch KLEINN ET AL., 2005), BRONSTERT ET AL. (2003) befassten sich – ebenfalls unter Verwendung von WaSiM – mit Landnutzungsänderungen im Rheingebiet. Stärker auf die Modellierung von Abflussverläufen bei Extremereignissen konzentrierten sich beispielsweise OOSENBURG (2003) (PRMS mit Seeretentionsmodell, Aare–Thun), SÄGESSER (2004) (WaSiM, Aare–Hagneck) und RICHTER ET AL. (2001) (LARSIM in Teileinzugsgebieten des Rheins bis Lobith). VERBUNT (2005) verwendete PREVAH, um mittels Ensembles eines Wettervorhersagemodells probabilistische Hochwasserprognosen für das Rheineinzugsgebiet bis Basel zu erstellen (siehe auch JAUN, in Vorbereitung). Auf die zahlreichen weiteren Anwendungen von PREVAH wird im nachfolgenden Kapitel 2 näher eingegangen.

Als operationelle Anwendung zu erwähnen ist insbesondere das Hochwasserprognosesystem FEWS, (Flood Early-Warning System) welches das Bundesamt für Umwelt (BAFU) auf Schweizer Gebiet für wichtige Pegelstellen unterhalb der Alpenrandseen betreibt (BÜRGI, 2002). Es basiert auf einer spezifisch angepassten Version des HBV-Modells (LINDSTRÖM ET AL., 1996) und wird mit dem Wettervorhersagemodell der MeteoSchweiz angetrieben. Weitere Ansätze zur Hochwasserprognose im Rheingebiet wurden z. B. von RESZLER ET AL. (2006) beschrieben.

Für die Schweizer Alpen ausserhalb des Rheineinzugsgebietes sind unter anderem die Arbeiten von JASPER ET AL. (2002) und SCHAEFLI (2005) und zu erwähnen. Sehr umfassend sind die Untersuchungen von MERZ UND BLÖSCHL (z. B. MERZ, 2002; BLÖSCHL UND MERZ, 2002; MERZ UND BLÖSCHL, 2004) für Österreich; insbesondere in Fragen der Regionalisierung wurden dort wichtige Erkenntnisse gewonnen, welche in Kapitel 8 dieser Arbeit noch zu diskutieren sein werden.

1.3.3 Anwendungen zur Hochwasserabschätzung

Weniger zahlreich sind Arbeiten, welche sich mit der Abschätzung seltener Hochwasser aus langen Simulationsreihen befassen – also mit demjenigen Themenbereich, welcher im Zentrum der vorliegenden Arbeit steht. Die ersten Vorschläge in diese Richtung gehen auf FLEMING UND FRANZ (1971) sowie EAGLESON (1972) zurück, aktuellere Arbeiten verfassten beispielsweise CALVER UND LAMB (1996), FRANCHINI ET AL. (1996), ONOF ET AL. (1996), BLAZKOVA UND BEVEN (1997, 2004), KILSBY ET AL. (1998), CAMERON ET AL. (1999, 2000A), LAMB (1999), STEEL ET AL. (1999), EBERLE ET AL. (2002), LAMB UND KAY (2004) sowie KAY ET AL. (2006A, 2006B) (für eine Übersicht siehe BEVEN, 2001B; Beispiele aus weiteren geographischen Regionen geben BOUGHTON UND DROOP, 2003).

Die einzigen Studien, welche von Umfang und Zielen her mit der vorliegenden Arbeit vergleichbar sind, wurden von LAMB ET AL. (LAMB, 1999; LAMB ET AL., 2002; LAMB UND KAY, 2004) für Grossbritannien durchgeführt. Sie befassen sich mit der Hochwasserabschätzung auf Basis von kontinuierlichen Simulationen – im Durchschnitt zehn Jahre in stündlicher Auflösung –, wobei das verwendete Modell (Probability Distributed Model, PDM) deutlich schwächer prozessorientiert ist als PREVAH. Die freien Modellparameter wurden von LAMB (1999) vorerst an Messdaten des Abflusses kalibriert (in Kapitel 4.2.2 noch kritisch zu diskutieren); LAMB UND KAY (2004) erstellten dann eine Regionalisierung

und wendeten das Modell auf 40 Einzugsgebiete im Skalenbereich zwischen 1 und 532 km² an (vgl. Kapitel 8.1.2).

Der Beitrag der vorliegenden Arbeit besteht vor allem darin, die Methodik der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit einem deterministischen und prozessorientierten Modellsystem dergestalt weiter zu entwickeln, dass sie zur Hochwasserabschätzung in ungemessenen mesoskaligen Einzugsgebieten der Schweiz eingesetzt werden kann. Damit soll auf ein praxistaugliches nationales System hingearbeitet werden, welches die bisherigen Ansätze zur Abschätzung seltener Spitzenabflüsse wesentlich erweitert.

Kapitel 2

Das hydrologische Modellsystem PREVAH

The hydrological modelling system PREVAH is introduced. Issues discussed concern model input (meteorology), spatial discretisation into hydrological response units, the actual model core as well as the output variables which are available. The suitability of PREVAH for goal and application domain of the present study is evaluated. Finally, changes and extensions are presented which have been implemented with view to the study's overall goals.

Das hydrologische Modellsystem PREVAH wird vorgestellt. Die Einführung umfasst den Modellantrieb (Meteorologie), die räumliche Diskretisierung in Hydrotope, die zeitliche Diskretisierung, den eigentlichen Modellkern sowie die zur Verfügung stehenden Ausgabegrößen. Die Eignung von PREVAH für Anwendungsbereich und Anwendungsziel wird beurteilt. Schliesslich werden Änderungen und Erweiterungen vorgestellt, welche im Hinblick auf die Ziele dieser Arbeit vorgenommen wurden.

2.1 Grundlagen des Modellsystems

Die hydrologische Modellierung von Einzugsgebieten gestaltet sich in von Gebirgen geprägte Regionen ausgesprochen anspruchsvoll. Die starke Heterogenität von Topographie, Bodenbedeckung und Landnutzung (GURTZ ET AL., 2003) sowie die ausgeprägte räumliche und zeitliche Variabilität der Klimaelemente (FREI UND SCHÄR, 1998) prägen die hydrologischen Systeme. PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration Hydrotope Model; GURTZ ET AL., 1997) wurde als konzeptionelles Modell entwickelt, welches die in Gebirgsregionen relevanten Prozesse so weit wie möglich über physikalisch begründbare Ansätze deterministisch berücksichtigt. Im Zentrum stand bei der Entwicklung einerseits die kontinuierliche Wiedergabe von Abflussganglinien und Wasserflüssen in allen Bereichen von Niedrigwasser bis Hochwasser, andererseits sollten Wasserhaushaltselemente, Abflussbildung und Speicherinhalte flächendifferenziert wiedergegeben werden. Grosses Gewicht haben dabei insbesondere Abfluss und Verdunstung.

Abbildung 2.1 zeigt das Ablaufschema von PREVAH, an welchem sich die folgende Einführung in das Modellsystem orientiert. Begonnen wird mit den aufbereiteten Eingangsgrößen, welche sowohl die Meteorologie wie auch die Gebietskennwerte der betrachteten Flächeneinheiten betreffen. Die Grundlagen dazu werden in den folgenden Abschnitten 2.1.1 und 2.1.2 erläutert, das konkrete Vorgehen einer Gebietsaufbereitung (Preprocessing) ist VIVIROLI ET AL. (2007) zu entnehmen. Es folgt das Durchlaufen des eigentlichen Modellkerns, in welchen die Teilmodule für Bilanzkorrektur, Strahlungs- und Temperaturkorrektur, Verdunstung, Schnee- und Eisschmelze, Interzeption, Bodenfeuchte und Abflussbildung integriert sind. Die zeitliche Diskretisierung des Modellkerns wird in Abschnitt 2.1.3 besprochen, die darin enthaltenen Module in Abschnitt 2.1.4. Angaben zu Umfang und Auflösung der Ausgabegrößen sowie zu den entsprechenden Darstellungswerkzeugen (Postprocessing) finden sich schliesslich in Abschnitt 2.1.5. Dabei wird im Folgenden nur soweit auf die Grundlagen von PREVAH eingegangen, wie es für das Verständnis im Rahmen des vorliegenden Projektes erforderlich ist. Eine ausführliche Dokumentation des Modellsystems mit den exakten physikalischen Grundlagen steht in VIVIROLI ET AL. (2007) zur Verfügung.

Als wesentliche Erweiterung des Modellsystems wurde im Rahmen dieser Arbeit eine graphische Benutzeroberfläche für Windows erstellt, welche die Anwendung der bisherigen und der neu hinzugefügten Funktionen von Preprocessing, Modellablauf und Postprocessing um vieles benutzerfreundlicher macht. Dies war nötig, um das als Forschungsmodell entstandene PREVAH einer Anwendung durch den hydrologisch geschulten Anwender zugänglich zu machen und somit dem Ziel eines praxistauglichen Modellsystems näherzukommen. **Abbildung 2.2** gibt eine Übersicht zu den wichtigsten Dienstprogrammen; Details zur Benutzeroberfläche und zu allen Bestandteilen des Modellsystems sind in VIVIROLI ET AL. (2007) ebenfalls ausführlich dokumentiert und werden hier nur bei Bedarf angeprochen.

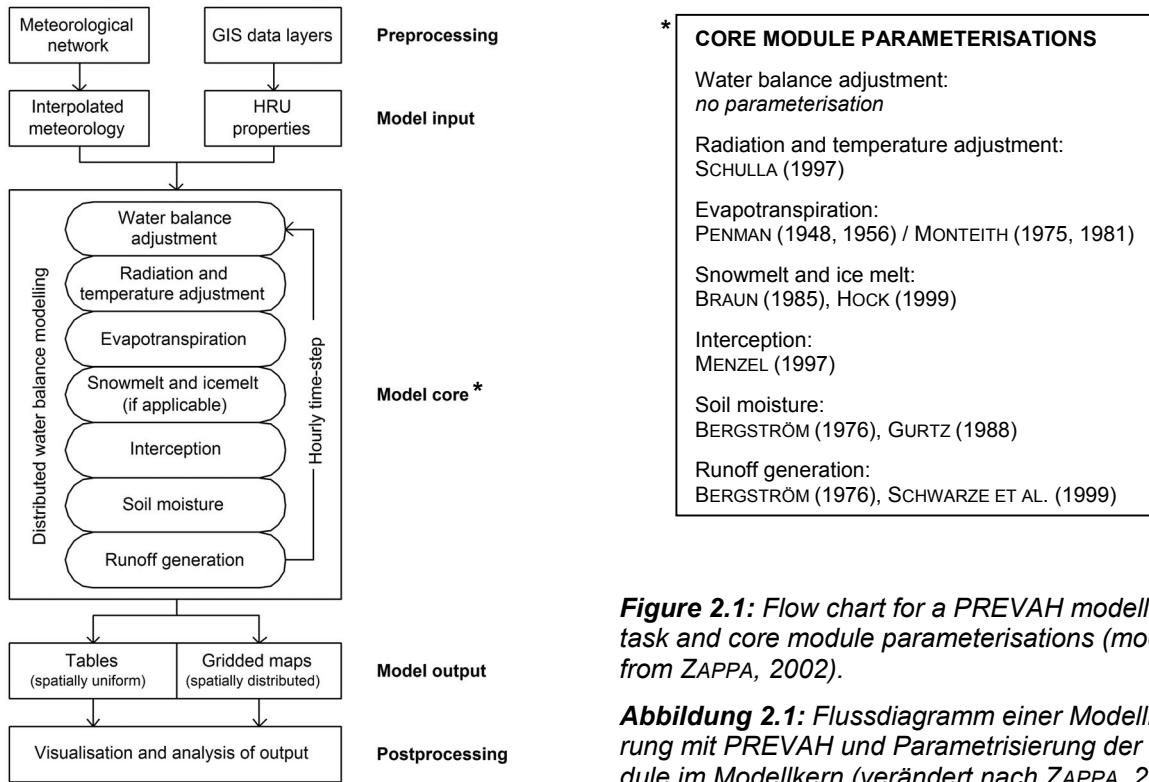


Figure 2.1: Flow chart for a PREVAH modelling task and core module parameterisations (modified from ZAPPA, 2002).

Abbildung 2.1: Flussdiagramm einer Modellierung mit PREVAH und Parametrisierung der Module im Modellkern (verändert nach ZAPPA, 2002).

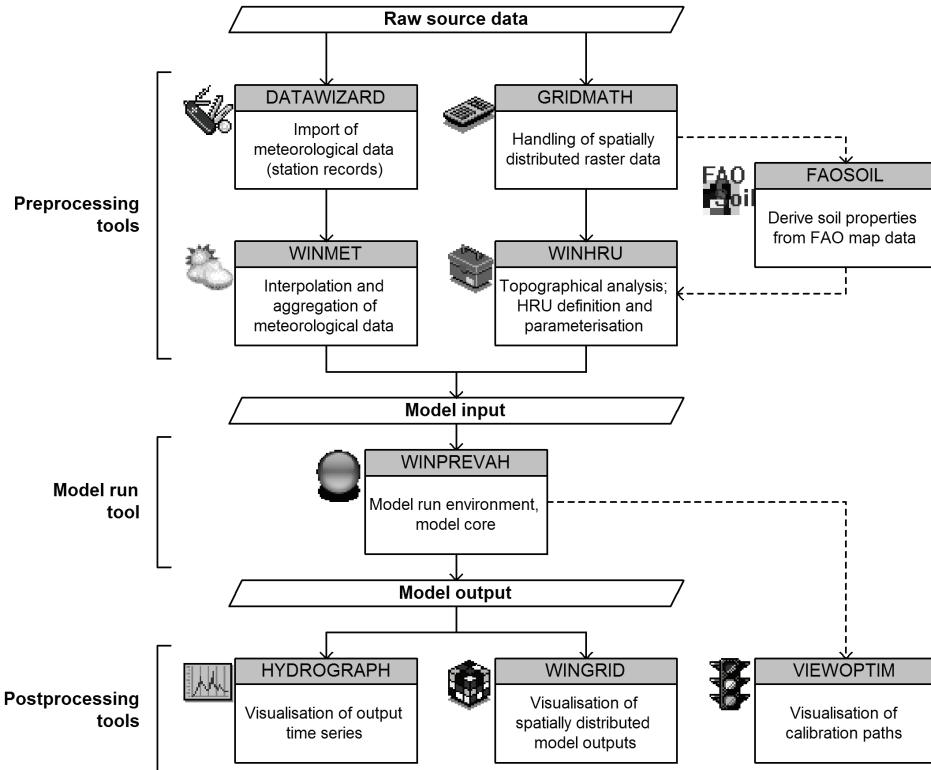


Figure 2.2: Most important tools with graphical user interface which are contained in the hydrological modelling system PREVAH (for details see VIVIROLI ET AL., 2007).

Abbildung 2.2: Die wichtigsten mit graphischer Benutzeroberfläche ausgestatteten Dienstprogramme, welche im hydrologischen Modellsystem PREVAH enthalten sind (für Details siehe VIVIROLI ET AL., 2007).

2.1.1 Modellantrieb

Grundlagen

Bezüglich der notwendigen meteorologischen Eingabedaten ist PREVAH mit der hier verwendeten Prozessparametrisierung relativ anspruchsvoll. Dies liegt nicht zuletzt an der detaillierten Berechnung der aktuellen Verdunstung nach dem Ansatz von PENMAN und MONTEITH (siehe Abschnitt 2.1.4). Insgesamt werden Daten für Niederschlag [mm dt^{-1}], Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$], Windgeschwindigkeit [m s^{-1}], Dampfdruck [hPa] (oder relative Feuchte [%]), Globalstrahlung [W m^{-2}] sowie relative Sonnenschein-dauer [-] benötigt. Entscheidend für die vorliegende Anwendung sind vor allem Niederschlag und Temperatur, da diese im Ablauf eines Hochwasserereignisses Schlüsselgrößen sind: Sie bestimmen die Menge an Wasser, welche dem Modell für die Bildung von Abflüssen unmittelbar zur Verfügung steht (Niederschlagsintensität, Schneerücklage resp. Schneeschmelze). Ebenfalls wichtig ist die Bodenfeuchte zu Beginn eines Hochwasserereignisses; ihre Ausschöpfung wird durch die schon ange-sprochene Evapotranspiration gesteuert.

Zur Aufbereitung der meteorologischen Informationen für PREVAH wurde ein Werkzeug mit Benutzeroberfläche erstellt (WINMET), welches alle notwendigen Arbeitsschritte zusammenfasst und weitestgehend automatisiert; auch die Auswahl der in der Interpolation zu verwendenden Stationen wird durch automatische Vorschläge unterstützt. WINMET wurde auf Grundlage der Arbeiten von SCHULLA UND JASPER (2000) sowie ZAPPA (2002) aufgebaut und spezifisch für die Anwendung in der Schweiz erweitert. Die ausführliche Dokumentation findet sich bei VIVIROLI ET AL. (2007).

Erwähnt werden muss noch, dass die Einspeisung des Modellantriebs in PREVAH über sogenannte Meteozenonen geschieht. Die räumlich auf ein Gitternetz interpolierten meteorologischen Variablen werden dazu pro Meteozone gemittelt und dem Modellsystem in Tabellenform übergeben; auch diese Umwandlung wird von WINMET übernommen. Als Meteozenonen wurden in der vorliegenden Arbeit stets Höhenzonen von 100 m vertikaler Ausdehnung verwendet, wie dies normalerweise in PREVAH der Fall ist. Durch diese Gliederung nach Meereshöhe wird berücksichtigt, dass vor allem die beiden ausschlaggebenden Inputgrößen Niederschlag und Temperatur eine starke Höhenabhängigkeit aufweisen.

Anwendungszeitraum

Da PREVAH bisher noch nicht für die Hochwasserabschätzung erprobt wurde, mussten die Unsicherheiten in der Modellanwendung möglichst gering gehalten werden; nur so war es möglich, diese Erweiterung des Anwendungsbereiches sinnvoll zu beurteilen. Dies gilt insbesondere auch für den meteorologischen Input und ganz speziell für den Niederschlag. Um eine möglichst homogenen Modell-input zu erhalten, wurden für die Simulation nur Jahre nach 1983 eingesetzt. Das hochauflösende, seit den späten 1970er Jahren im Aufbau befindliche automatische Messnetz ANETZ (METEOSCHWEIZ, 2003) liefert ab diesem Zeitpunkt für alle betrachteten Gebiete genügend Daten, um plausible Interpolationen der PREVAH-Eingangsgrößen zu erstellen. Auch wenn für einzelne Gebiete bereits einige Jahre früher ausreichende Datengrundlagen zur Verfügung stehen, musste der Vergleichbarkeit wegen ein einheitliches Startjahr gewählt werden. Aus denselben Gründen wurde in dieser Arbeit von einer Verwendung älterer Reihen abgesehen (vgl. Ausblick, 13). Das Jahr 1983 wird für die Modellinitialisierung (v. a. Füllen der Schnee- und Grundwasserspeicher) verwendet und nicht ausgewertet, wodurch sich ein 20-jähriger Anwendungszeitraum von 1984–2003 ergibt (vgl. Kapitel 3.1.2).

Stationsauswahl

Eine Übersicht der zur Verfügung stehenden meteorologischen Messstationen zeigt Abbildung 2.3. Dabei muss nach Stationstyp unterschieden werden: Ausschlaggebend sind die Werte des Automatischen Messnetzes (ANETZ), welche in hoher zeitlicher Auflösung alle für PREVAH notwendigen meteorologischen Eingabedaten enthalten. Von vergleichsweise geringer Bedeutung sind hingegen die Klimastationen, welche zwei bis drei mal täglich Werte von wichtigen meteorologischen Variablen liefern. Das Niederschlagsmessnetz verfügt schliesslich über die geringste zeitliche Auflösung (Tageswerte), ist aber wegen seiner vergleichsweise hohen Dichte für die räumliche Interpolation sehr hilfreich. Die Daten der letzteren beiden Stationstypen werden im Laufe der Interpolation auf Stundewerte disaggregiert, indem Regressionsbeziehungen zu den hochauflösenden Stationen erstellt werden (GURTZ ET AL., 1997; siehe auch GOODRICH ET AL., 1995).

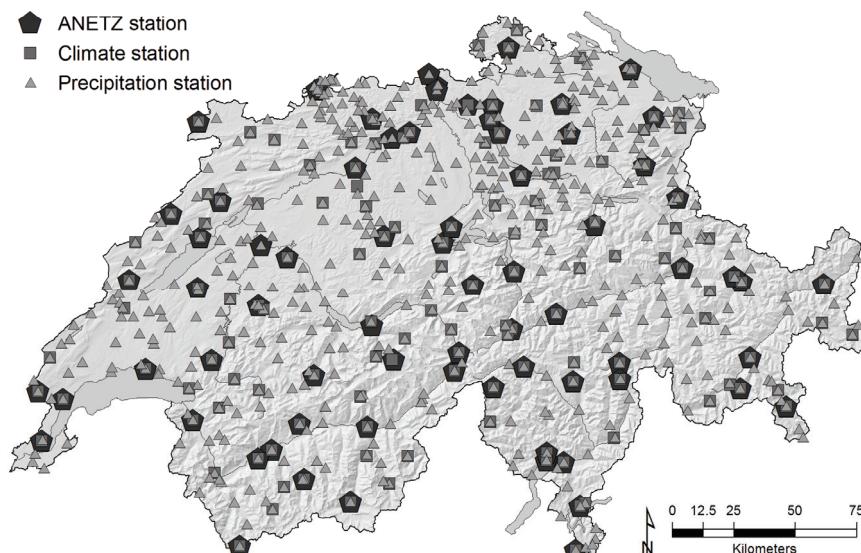


Figure 2.3: Meteorological stations available for this study (data: METEOSCHWEIZ, 2003).

Abbildung 2.3: Stationen des meteorologischen Messnetzes, welche für diese Arbeit zur Verfügung standen (Datenquelle: METEOSCHWEIZ, 2003).

Um die Auswahl der Stationen für die jeweiligen Einzugsgebiete einheitlich zu halten, wurden die folgenden Richtlinien angewendet:

- ANETZ: Alle Stationen in einem Umkreis von 35 km ab Gebietsschwerpunkt, mindestens aber fünf.
- Klimastationen: Alle in einem Umkreis von 25 km ab Gebietsschwerpunkt, mindestens aber drei.
- Niederschlagssammler: Alle innerhalb des Einzugsgebietes, mindestens aber fünf.

Der Suchradius wurde gegebenenfalls erweitert, um die jeweils minimale geforderte Anzahl an Stationen zu erreichen. Nach dieser ersten Auswahl wurden gemäss untenstehenden Kriterien weitere Stationen hinzugefügt oder gegebenenfalls entfernt:

- Um die Höhenabhängigkeit der Messvariablen möglichst adäquat zu erfassen, sollte stets mindestens eine ANETZ-Station mit einer Meereshöhe von mehr als 1'500 m verwendet werden. Dazu mussten vor allem im Mittelland Stationen ausserhalb des Suchradius von 35 km hinzugefügt werden. Je nach Landesregion waren dies typischerweise La Dôle (äussere Westschweiz, 1'670 m ü. M.), Moléson (Westschweizer Voralpen und Mittelland, 1'972 m ü. M.), Chasseral (Jura und Westschweizer Mittelland, 1'599 m ü. M.), Jungfraujoch (Berner Voralpen, 3'580 m ü. M.), Pilatus (Zentralschweizer Voralpen, 2'106 m ü. M.) oder Säntis (östliche Voralpen, 2'490 m ü. M.). Die Station Napf (1'440 m ü. M.) wurde zusätzlich für das zentrale und nördliche Mittelland verwendet. Ähnliche Probleme galt es dort zu vermeiden, wo tiefe Höhenbereiche durch das umliegende Messnetz nicht genügend berücksichtigt werden. Diese Fälle sind zwar selten, traten aber beispielsweise beim Einzugsgebiet Chandon–Avenches (westliches Mittelland, Pegelhöhe 432 m ü. M.) auf. Zusätzlich zur tiefsten Station im vorgegebenen Suchradius (Mühleberg, 475 m. ü. M.) wurde deshalb noch die wesentlich weiter entfernte, aber tiefergelegene Station Wynau (422 m ü. M.) mit einbezogen.
- Es wurde stets darauf geachtet, dass nur klimatologisch repräsentative Stationen ausgewählt werden. Beispielsweise wurden für Modellierungen im Berner Oberland keine der nahegelegenen Stationen im Wallis verwendet, da sie völlig andere klimatische Bedingungen widerspiegeln.
- Bei Standorten, an welchen verschiedene Stationstypen zur Verfügung stehen (z. B. ANETZ und Sammler), wurde jeweils nur derjenige Typ mit der höchsten zeitlichen Auflösung verwendet, um das Interpolationsergebnis nicht durch eine faktisch stärkere Gewichtung einzelner Punkte zu verfälschen. Diese Überprüfung kann im Preprocessing-Tool WINMET automatisch vorgenommen werden (siehe VIVIROLI ET AL., 2007).
- Die ANETZ-Stationen Lägern, Hörnli und Jungfraujoch verfügen über keine Niederschlagsmessungen. Weil der Niederschlag eine entscheidende Grösse ist, zählen diese Stationen nicht für die Minimalanzahl der fünf zu verwendenden ANETZ-Standorte. Die Stationen bleiben zwar in der Auswahl, es müssen aber weitere hinzugefügt werden, falls noch nicht fünf ANETZ-Stationen mit Niederschlagsmessungen zur Verfügung stehen.

Die Suche nach Stationen im definierten Umfeld nimmt das Tool WINMET vor, der Benutzer kann anschliessend durch Auswahl aus der Stationsliste weitere Stationen hinzufügen oder einzelne Stationen deaktivieren.

Interpolation

Die Interpolation der meteorologischen Variablen geschieht normalerweise über die Kombination von zwei Verfahren:

An erster Stelle steht eine höhenabhängige Regression (Elevation Dependent Regression, EDR). Dabei wird – basierend auf den Routinen von SCHULLA UND JASPER (2000) – automatisch eine Beziehung zwischen Meereshöhe und den Messwerten der jeweiligen meteorologischen Variable erstellt, wobei nach maximal zwei Inversionsgrenzen gesucht wird. Diese Berechnung geschieht für jede Stunde neu und kann im Detail durch Benutzereinstellungen gesteuert werden. Als Resultat stehen bis zu drei Höhenregressionen vom Typ

$$\hat{Z}_{EDR}(h) = a_i + b_i \cdot h \quad \text{Gleichung 2.1}$$

zur Verfügung, welche den Wert Z eines Gitterpunktes in Abhängigkeit von dessen Meereshöhe h schätzen. Die Regressionsparameter a und b sind für die maximal drei getrennten Höhenbereiche i unterschiedlich, bei Vorliegen von mehr als drei Stützstellen wird für a eine Trendfläche benutzt. Für eine ausführliche Dokumentation siehe GURTZ ET AL. (1997) sowie VIVIROLI ET AL. (2007).

Da im Laufe dieser Arbeit zahlreiche Gebiete in sehr unterschiedlichen Regionen aufbereitet wurden, konnte bei der höhenabhängigen Regression ein spezifisches Problem entdeckt und behoben werden: Wenn mehrere Stationen gleichzeitig Messlücken aufweisen, können trotz sorgfältiger Stationsauswahl sehr schlecht abgestützte Höhenregressionen entstehen. Dadurch resultieren im oberen oder unteren Höhenbereich eines Einzugsgebietes unter Umständen unplausible Werte, was sich insbesondere bei der Temperatur gut beobachten lässt. Um in solchen Situationen trotzdem sinnvolle Werte zu erhalten, kann ein Grenzwert für den Korrelationskoeffizienten gesetzt werden. Wenn dieser unterschritten wird, erfolgt keine höhenabhängige Regression, es wird also eine Gleichverteilung der Werte bezüglich Meereshöhe angenommen. Als Standard wird ein aus der Anwendungserfahrung gewonnener Grenzwert von 0.3 eingesetzt.

In einem zweiten Schritt werden die Residuen der Messwerte zur nun erstellten Höhenregression berechnet und räumlich interpoliert. Dazu wird ein inverses Distanzgewichtungsverfahren verwendet (Inverse Distance Weighting, IDW): Für einen zu interpolierenden Punkt Z werden in einem bestimmten Umkreis (im vorliegenden Fall 50 km) alle n gemessenen Stützpunkte z_i gesucht und jeweils mit einem Gewicht w_i versehen. Dieses Gewicht ist umgekehrt proportional zur Distanz d zwischen Interpolationspunkt Z und Stützpunkt z_i , wobei die Distanz üblicherweise zu einem Exponenten p (meist $p = 2.0$) gerechnet wird (siehe z. B. GOOVAERTS, 1997):

$$\hat{Z}_{IDW} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \text{mit } w_i = \frac{1}{d(Z, z_i)^p} \quad \text{Gleichung 2.2}$$

WINMET stellt als Alternative zur Interpolation der Residuen mit IDW auch ein Kriging-Verfahren zur Verfügung (implementiert aus DEUTSCH UND JOURNEL, 1997). Die Auswirkungen unterschiedlicher Interpolationsmethoden werden für den Niederschlag in Kapitel 7 noch zu diskutieren sein; es wird sich aber zeigen, dass IDW für die vorliegende Anwendung ausreichend genau ist. Bezüglich der anderen meteorologischen Variablen kann a priori davon ausgegangen werden, dass die Wahl von Kriging oder IDW nur eine sehr geringe Rolle spielt und deshalb das weniger rechenintensive IDW verwendet werden kann.

Die Kombination von Höhenregression (EDR) und inverser Distanzgewichtung (IDW) geschieht anschliessend über die Addition der beiden flächendeckend berechneten Komponenten, nämlich der höhenabhängigen Regression (EDR) und der mit inversem Distanzgewichtungsverfahren interpolierten Residuen der Messwerte gegenüber EDR ($IDW_{RES(EDR)}$). Daraus entsteht eine bezüglich Höhen-trend bereinigte Interpolation, welche in ihrer räumlichen Verteilung auf dem IDW-Verfahren beruht (Detrended IDW, DTIDW); die Variabilität der Messwerte wird damit in eine vertikale (EDR) und horizontale (IDW) Komponente aufgetrennt (GAREN UND MARKS, 2001; SUSONG ET AL., 1999). Der endgültige Interpolationswert für einen Rasterpunkt (x,y) berechnet sich dann als

$$DTIDW(x, y) = EDR(x, y) + IDW_{RES(EDR)}(x, y). \quad \text{Gleichung 2.3}$$

Dieses Verfahren kann auf alle meteorologischen Eingangsvariablen angewendet werden; die Sonnenscheindauer kann gegebenenfalls auch nur mit IDW interpoliert werden. Auswahl und Konfiguration der jeweiligen Interpolationsmethoden erfolgt in WINMET (siehe VIVIROLI ET AL., 2007).

Es muss angemerkt werden, dass das Erstellen von stündlichen Höhenregressionen – insbesondere wegen der grossen Heterogenität der Höhen-Niederschlags-Beziehung – meteorologisch gesehen etwas heikel ist, auf der hier betrachteten Skala aber einen pragmatischen und durchaus gangbaren Weg darstellt. Die Problematik entschärft sich gemäss PHILLIPS ET AL. (1992) etwas, da jeweils direkt gebietsweise Regressionen erstellt werden und kein universeller Datensatz für ein grosses Gebiet gefordert ist; die auf übergeordneten Skalen zu erwartenden Inkonsistenzen wirken sich dadurch etwas weniger stark aus.

2.1.2 Räumliche Diskretisierung

Grundlagen

Im Vergleich zum ursprünglichen HBV-Modell (BERGSTRÖM, 1976), welchem die Basisstruktur entliehen ist (siehe Abschnitt 2.1.4), arbeitet PREVAH mit einer grösseren räumlichen Diskretisierung, welche als Zwischenstufe zwischen den Kategorien "semi-distributed" und "grid-based" (vgl. NEMEC, 1993) einzuordnen ist: Wie das "H" im Akronym PREVAH verrät, werden Rasterzellen mit ähnlichen hydrologischen Reaktionseigenschaften zu sogenannten Hydrotopen oder Hydrological Response Units (HRU) zusammengefasst (siehe z. B. ROSS ET AL., 1979; MOORE ET AL., 1993; ENGEL, 1996; FLÜGEL, 1997). Dabei ist nicht gefordert, dass die Zellen eines HRU räumlich zusammenhängen, und die Grösse der verschiedenen HRU kann sehr unterschiedlich sein (vgl. Abbildung 2.4). Diese dynamische räumliche Diskretisierung hat gegenüber der rasterbasierten Auflösung (z. B. ABBOTT ET AL., 1986A und 1986B; BATHURST UND O'CONNELL, 1993) den Vorteil, dass sie einerseits Rechenzeit spart, andererseits aber gleichwohl eine hohe räumliche Auflösung erlaubt. Neben den Modellausgaben betrifft diese Flächendifferenzierung insbesondere auch die modellinternen Parametrisierungen, welche PREVAH vornimmt; dadurch werden beispielsweise jedem HRU maximale Speicherinhalte (z. B. Interzeption und Bodenfeuchte) sowie Rahmenbedingungen für die Prozessberechnung (z. B. Blattflächenindex, Oberflächenrauigkeit) zugewiesen (GURTZ ET AL., 1997). Grundlage dafür sind Informationen zur Landnutzung (Arealstatistik; BFS, 2003, kombiniert mit dem Landesforstinventar, WSL, 1988) und zu den Bodeneigenschaften (Bodeneignungskarte; FAP, 1980 und BFS, 2003), wobei zusätzlich der Monat des Jahres und zum Teil die mittlere Meereshöhe des HRU berücksichtigt werden (z. B. bei der Bewuchshöhe). Die freien Modellparameter (siehe Abschnitt 2.1.4) werden hingegen für das ganze Gebiet als einheitlich angenommen.

Jedes HRU besitzt eine eigene Speicherkaskade (siehe Abschnitt 2.1.4), für welche Wasserflüsse und Füllstände separat berechnet werden. Die Abflusskomponenten der einzelnen HRU werden anschliessend zu Gebietswerten zusammengeführt. Dank die Speicherkaskade linear ist, kann dies über eine einfache Addition geschehen, wobei der Flächenanteil der HRU an der Gesamtfläche des Gebietes zu berücksichtigen ist. Eine Translation (Verzögerung) der einzelnen HRU-Abflusswerte findet nicht statt, was bei der für diese Arbeit ins Auge gefasste mesoskaligen Anwendung (ca. 10–1'000 km², vgl. NEMEC, 1993) vertretbar ist. Bei der Anwendung auf grosse Gebiete ist allerdings eine Unterteilung in Teilgebiete zu empfehlen; diese sollten separat modelliert und anschliessend über das in PREVAH verfügbare Routing zusammengeführt werden.

Bildung der Hydrological Response Units (HRU)

Da die Hydrotope hydrologisch homogene Gebiete zusammenfassen sollen, müssen bei ihrer Definition diejenigen Grössen beachtet werden, welche massgeblichen Einfluss auf Abflussbildung und Verdunstung haben. Ausschlaggebend sind dabei vor allem Topographie sowie Landnutzungs- und Bodenmerkmale (KIRKBY, 1988). Als wichtigste Stellvertreter für diese Eigenschaften werden die nachstehenden Gebietskennwerte zur Definition der Hydrotope verwendet; sie erfassen die für die Flächendifferenzierung wichtigsten Eigenschaften mit Hilfe allgemein verfügbarer Grundlagendaten.

- Höhenlage.....100 m-Höhenzonen; diese werden gleichzeitig als Meteoazonen verwendet (siehe Abschnitt 2.1.1)
- Exposition.....5 Klassen: nord-, ost-, süd- und westexponiert sowie flach
- Landnutzung23 Klassen: Nadelwald, Laubwald, Mischwald, Gebüsche, Wiesen, subalpine Wiesen, alpine Rasen, Hochgrasgesellschaften, Magerwiesen, Landschaft, Weizen, Obstbäume, Wurzelfrüchte, Reben, Brache, Schutt- und Rohbodenvegetation, Fels, Feucht- und Nassstandorte, Sumpfgebiete, Siedlung, Wasserflächen, Allg. Gletscher oder Zehrgebiet, Gletscherfirn
- Vergletscherung.....2 Klassen: vergletschert und unvergletschert (nur wenn Gletscher vorhanden)

In ersten Experimenten wurde mit Hydrotopen auf Basis eines $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ -Rasters gerechnet (CORTI, 2003). Es erwies sich aber für dieses Projekt als ausreichend, eine Grundauflösung von $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ zu verwenden. Bezuglich Modellgüte waren bei dieser etwas gröberen Rasterweite kaum nennenswerte Verschlechterungen festzustellen, wohingegen bei Rasterweiten von $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ eine deutliche Verminderung der Modellgüte auftrat. Diese Annahmen werden durch die Zusammstellung von ZAPPA (2002) gestützt; für den Skalenbereich zwischen 10 und 500 km^2 wird dort eine Grundauflösung von $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ als am besten geeignet empfohlen (siehe auch SCHULLA, 1997).

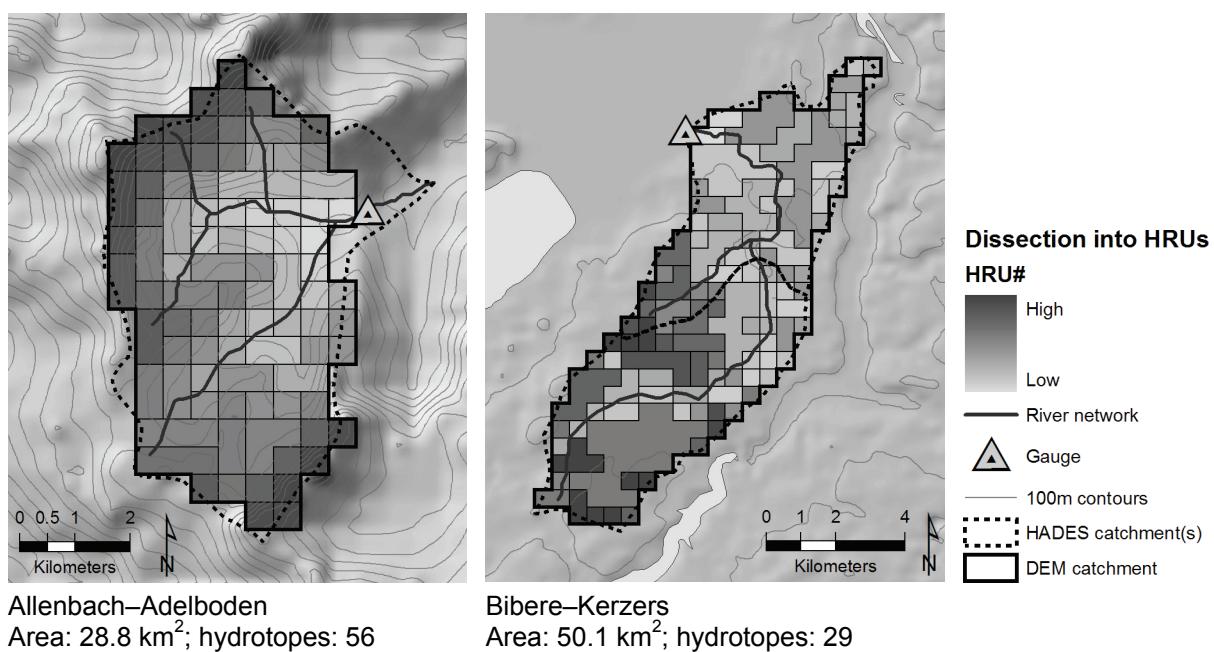


Figure 2.4: Examples for aggregation of hydrotopes: Allenbach–Adelboden (left) and Bibere–Kerzers (right).

Abbildung 2.4: Beispiele für die Bildung von Hydrotopen: Allenbach–Adelboden (links) und Bibere–Kerzers (rechts).

Zwei Beispiele einer Aggregation zu Hydrotopen zeigt **Abbildung 2.4**, und zwar für ein alpines (Allenbach–Adelboden) und ein mittelländisches (Bibere–Kerzers) Gebiet. Es ist erkennbar, dass die Hydrotepe für das alpine Gebiet im Mittel eine geringere Gesamtfläche umfassen, da die Heterogenität der Gebietseigenschaften grösser ist.

Abbildung 2.5 bestätigt, dass insbesondere bei hochgelegenen wie auch bei kleinen Gebieten vergleichsweise kleinere Hydrotepe nötig sind, um die Variabilität der hydrologischen Bedingungen zu erfassen. Für die im Rahmen dieser Arbeit aufbereiteten 159 mesoskaligen Einzugsgebiete (siehe folgendes Kapitel 3) umfasste ein Hydrotop im Mittel 5.1 Rasterzellen à $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ oder eine Fläche von 1.28 km². Bei einer mittleren Gebietshöhe von weniger als 1'000 m ü. M. waren es im Mittel 5.7 Rasterzellen, zwischen 1'000 und 1'550 m ü. M. im Mittel 4.7 Rasterzellen und oberhalb von 1'550 m ü. M. im Mittel 3.0 Rasterzellen. In Gebieten von 10 bis 50 km² Fläche wurden im Mittel 3.5 Rasterzellen zu einem Hydrotop zusammengefasst, von 50 bis 100 km² im Mittel 5.3 Rasterzellen und bei mehr als 100 km² im Mittel 9.9 Rasterzellen.

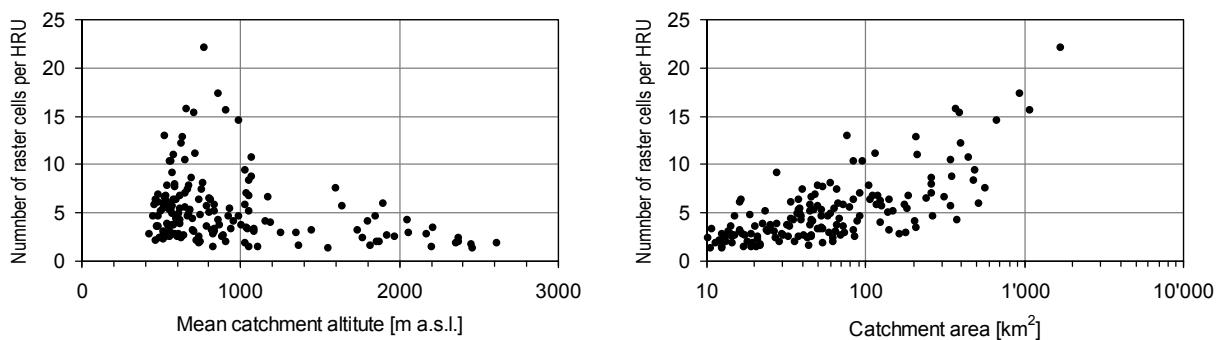


Figure 2.5: Relationship between mean catchment altitude and number of raster cells per HRU (left) as well as between catchment area and number of raster cells per HRU (right), based upon 159 catchments processed for this study.

Abbildung 2.5: Beziehung zwischen mittlerer Gebietshöhe und Anzahl Rasterzellen pro Hydrotop (links) sowie zwischen Gebietsfläche und Anzahl Rasterzellen pro Hydrotop (rechts) auf Basis von 159 für diese Arbeit aufbereiteten Einzugsgebieten.

Zur Verfügung stehende Hilfsmittel

Für die komplette Aufbereitung der Raumdaten inklusive Definition der HRU steht wiederum ein windows-basiertes Werkzeug zur Verfügung (WINHRU), welches alle erforderlichen Abläufe automatisiert; es wurde auf Grundlage der Arbeiten von SCHULLA UND JASPER (2000) sowie ZAPPA (1999) erstellt und wo nötig für die reibungslose Anwendung in der Schweiz erweitert. Die im gleichen Zuge eingebaute automatische Festlegung der Gleichgewichtslinie von Gletschern wird in Abschnitt 2.3.1 noch zu erläutern sein. Als Eingangsdaten sind Höhenmodell, Landnutzungsstatistik und aus der Bodenkarte abgeleitete Kennwerte erforderlich; auf Basis der vorliegenden Quelldaten beträgt der Arbeitsaufwand lediglich einige Minuten.

Das zu modellierende Einzugsgebiet kann durch Setzen eines Pegels (pour point) definiert werden, für welchen dann mit Hilfe der Fließrichtungen im digitalen Höhenmodell (DHM) die hydrologisch zugehörige Fläche ermittelt wird (**Abbildung 2.6**); methodische Grundlagen dazu sind z. B. bei FÜRST (2004) zu finden. Wahlweise kann der Pegel interaktiv an eine beliebige Stelle gesetzt oder aus einer Liste des hydrometrischen Messnetzes ausgewählt werden. In letzterem Fall schlägt WINHRU automatisch einen Pegelpunkt im DHM vor, welcher in einem wählbaren Umkreis der tatsächlichen Pegelkoordinaten liegt und die geringste Abweichung zur Referenzfläche aufweist; allfällige Fehler werden ausgewiesen. Diese Art der Gebietsbestimmung funktioniert im Alpen- und Voralpenraum dank der grossen Höhenunterschiede sehr gut, kann aber im Mittelland wegen Fehlern und Ungenauigkeiten im DHM fehlschlagen (vgl. TARBOTON ET AL., 1993). In solchen Fällen kann eine Kontrastverstärkung des DHM mit Hilfe des Flussnetzwerkes (z. B. HELLWEGER UND MAIDMENT, 1997) weiterhelfen (für weitere Möglichkeiten zu DHM-Korrektur siehe CALLOW ET AL., 2007). Sehr viel einfacher ist aber die in WINHRU bereitgestellte Möglichkeit, das Einzugsgebiet auf Grundlage der Basiseinzugsgebiete des Hydrologischen Atlas der Schweiz (BREINLINGER ET AL., 1992) zu bestimmen oder über den Import einer GIS-Rasterdatei zu definieren.

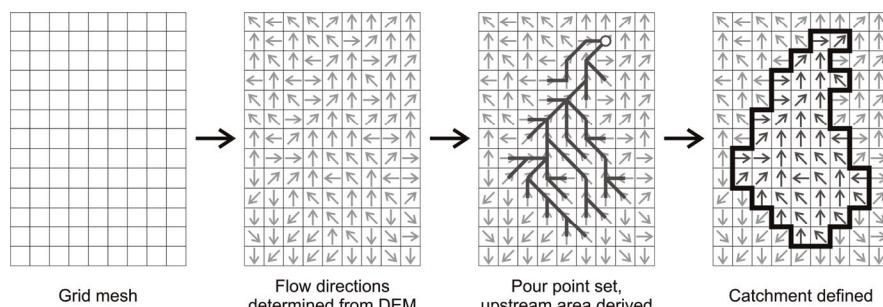


Figure 2.6: Definition of a catchment with help of the digital elevation model (DEM).

Abbildung 2.6: Definition eines Einzugsgebietes mit Hilfe des digitalen Höhenmodells (DHM).

Die zahlreichen Optionen von WINHRU sind zusammen mit dem kompletten Ablauf der räumlichen Aufbereitung in VIVIROLI ET AL. (2007) dokumentiert. Neben seinem ursprünglichen Anwendungsgebiet in der Schweiz kann WINHRU auch problemlos in anderen Regionen der Welt angewendet werden.

2.1.3 Zeitliche Diskretisierung

PREVAH rechnet intern stets im Stundenschritt, was beispielsweise die Modellierung der Schneekumulation, der Schneeschmelze, der Interception, der Bodenwasserspeicheränderung und der Abflussbildung betrifft. Die Evapotranspiration wird als Sonderfall zuerst als Tagessumme berechnet und anschliessend in Abhängigkeit von Tageslänge und Sonnenscheindauer auf die einzelnen Stunden des Tages aufgeteilt.

Basierend auf diesen Stundenintervallen kann PREVAH den Modelloutput auch auf Tage, Monate oder Jahre aggregiert ausgeben. Für den Modellinput sind verschiedene Auflösungen zwischen fünf Minuten und einem Tag zulässig, sofern das Zeitintervall kontinuierlich ist.

Im vorliegenden Projekt wurden sowohl Modelleingabe wie auch Modellausgabe durchgehend im Ein-Stunden-Intervall aufgelöst. Dies erwies sich als unbedingt notwendig, weil insbesondere kleine und steile Gebiete im schweizerischen Alpenraum eine sehr dynamische Reaktion zeigen und somit kurze Anstiegszeiten haben (vgl. NAEF ET AL., 1999, siehe auch JASPER ET AL., 2002). Entsprechende Versuche mit Tagesschritten (CORTI, 2003) zeigten zwar ansprechende Gesamtresultate, waren aber im Spitzenbereich zu ungenau für eine Extrapolation. Im Prinzip wäre eine noch höhere zeitliche Auflösung wünschbar, sie würde aber grössere Umstellungen im Modulkern von PREVAH erfordern. Geprüft werden müsste dabei weiter, ob die Messnetzdichte der zeitlich hochauflösenden meteorologischen Daten (ANETZ) überhaupt ausreichend ist, um eine Modellierung in Auflösungen von unter einer Stunde zu rechtfertigen. Zudem drängt sich in diesem zeitlichen Skalenbereich allmählich der Einsatz von noch stärker prozessorientierten Modellen auf, was wiederum Probleme mit der flächendeckenden Verfügbarkeit von exakten Bodendaten und bei der Parameterfestlegung nach sich ziehen würde (siehe dazu auch Abschnitt 2.2.2).

Die Vergleichbarkeit zwischen den simulierten Stundenwerten und den für die Hochwasserabschätzung üblicherweise verwendeten Instantanspitzen der Ganglinie wird in Abschnitt 4.1.2 noch zu diskutieren sein. Als Referenzwerte dienen in dieser Arbeit stets die Stundenmittel des beobachteten Abflusses sowie die daraus extrapolierten Hochwasser mit seltener Wiederkehrperiode.

2.1.4 Modellstruktur und Teilmodule

PREVAH folgt in seinem prinzipiellen Aufbau dem weitverbreiteten HBV-Modell (von "Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning"; BERGSTRÖM, 1976, siehe auch LINDSTRÖM ET AL., 1997). Im Sinne einer konzeptuellen Erfassung werden die hydrologischen Prozesse über eine Reihe von Teilmitteln getrennt behandelt, wobei Einzellinearspeicher als elementare Bausteine dienen (vgl. Stanford Water-shed Model IV; CRAWFORD UND LINSLEY, 1966). Die Algorithmen zur Beschreibung der hydrologischen Prozesse sind bis zu einem gewissen Grad vereinfacht, orientieren sich aber an physikalischen Gesetzmässigkeiten.

Abbildung 2.7 gibt einen Überblick über die Modellstruktur und führt die freien Modellparameter sowie die wichtigsten hydrologischen Flüsse auf. Die einzelnen Teilmittel werden im Folgenden nun beschrieben, und zwar in der Form, wie sie für die Anwendung in mesoskaligen Einzugsgebieten der Schweiz empfohlen werden (vgl. GURTZ ET AL., 1997; ZAPPA, 2002). Grundsätzlich sind dies auch die Einstellungen, welche im vorliegenden Projekt verwendet wurden; Abweichungen und Erweiterungen sind in Kapitel 2.3 beschrieben. Auf die detaillierte Dokumentation der verschiedenen Module in VIVIROLI ET AL. (2007), GURTZ ET AL. (1997) und weiteren Arbeiten wird jeweils hingewiesen. Nicht eingegangen wird auf die Strahlungs- und Temperaturkorrektur, welche von SCHULLA UND JASPER (2000) ausführlich beschrieben wurde und auch in der Modelldokumentation (VIVIROLI ET AL., 2007) besprochen wird.

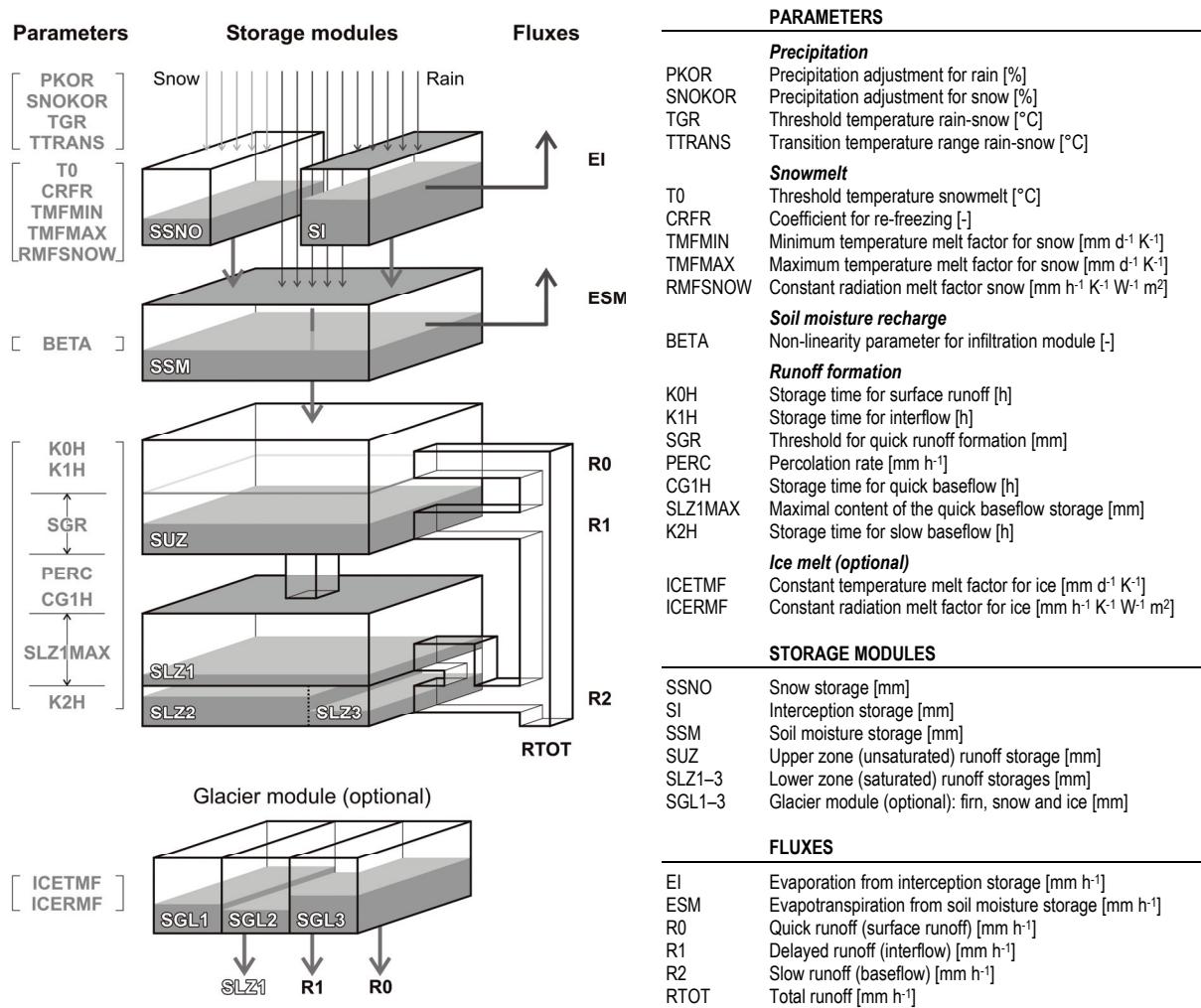


Figure 2.7: Schematic diagram of PREVAH's model structure with free parameters, storage modules and hydrological fluxes.

Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der Modellstruktur von PREVAH mit freien Parametern, Speichermodulen und hydrologischen Flüssen.

Bilanzkorrektur

Der interpolierte Niederschlagsinput kann in PREVAH über die freien Parameter *PKOR* [%] für Regen und *SNOKOR* [%] für Schnee jeweils prozentual erhöht oder vermindert werden. Die so durchgeführte Korrektur des Niederschlages sollte als Bilanzkorrektur und nicht als Messfehlerkorrektur verstanden werden. Die eigentliche Messfehlerkorrektur erfolgt normalerweise bereits im Preprocessing und somit vor der Interpolation (vgl. SCHULLA UND JASPER, 2000); im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine zusätzliche Messfehlerkorrektur in PREVAH eingebaut (siehe Abschnitt 2.3.2).

Dass überhaupt eine Bilanzkorrektur nötig ist, liegt an durch die Abflussmessung nicht erfassten unterirdischen Zu- und Wegflüssen sowie an Ungenauigkeiten in der Niederschlags- und der Abflussmengenbestimmung. Von Seiten des Modells her spielen gegebenenfalls längerfristige Speicher- oder Schmelzvorgänge (v. a. Eis und Schnee) eine Rolle, welche die Realität nicht korrekt wiedergeben.

Für Details siehe GURTZ ET AL. (1997:33) und VIVIROLI ET AL. (2007).

Schneeschmelze und -akkumulation

Anhand der interpolierten Lufttemperatur in 2 m Höhe wird entschieden, ob Niederschlag in Form von Schnee oder Regen fällt. Als Grenzwert dient dabei die Grenztemperatur *TGR* [°C], welche einen Übergangsbereich von jeweils *TTRANS* [°C] in positiver und negativer Richtung besitzt; in diesem Bereich findet ein kontinuierlicher Übergang von Schnee zu Regen statt. Als Schnee gefallener Niederschlag gelangt in den Schneespeicher *SSNO* [mm].

Die Schneeschmelze kann über verschiedene Methoden berechnet werden. Empfohlen wird der kombinierte Ansatz von Hock (1999), welcher einen Grad-Tag-Faktor ($TMFSNOW$ [$\text{mm d}^{-1} \text{K}^{-1}$]) mit einem Strahlungsschmelzfaktor ($RMFSNOW$ [$\text{mm h}^{-1} \text{K}^{-1} \text{W}^{-1} \text{m}^2$]) verbindet; die Schmelze setzt oberhalb des Grenzwertes $T0$ [$^\circ\text{C}$] ein. Für den Grad-Tag-Faktor können zudem Minimal- und Maximalwerte der täglichen Zyklistät angegeben werden ($TMFMIN$ [$\text{mm d}^{-1} \text{K}^{-1}$] resp. $TMFMAX$ [$\text{mm d}^{-1} \text{K}^{-1}$]), beim Strahlungsschmelzfaktor wird die potentielle direkte Solarstrahlung (kurzwellige Strahlung) zur Parametrisierung der zeitlichen und räumlichen Unterschiede der Schmelzraten verwendet. Advektions schmelze wird berechnet, falls die Niederschlagsintensität den Grenzwert von 0.5 mm h^{-1} überschreitet; die entsprechende Schmelzsumme wird dann gemäss BRAUN (1985) empirisch über die Gesamtenergiebilanz bestimmt.

Prozesse der Wasserspeicherung in der Schneedecke – wie sie bei Regen auf Schnee oder bei Schmelzvorgängen innerhalb der Schneedecke auftreten – werden über eine maximale Speicherfähigkeit berücksichtigt. Sie wird proportional zum Schneewasseräquivalent bemessen und ist normalerweise fest mit einem Faktor von 10% parametrisiert. Das Wiedergefrieren von in der Schneedecke zurückgehaltenem flüssigen Wasser bei negativer Strahlungsbilanz wird durch den freien Modellparameter $CRFR$ [-] gesteuert.

Für Details siehe GURTZ ET AL. (1997:68–70), VIVIROLI ET AL. (2007), sowie ZAPPA (2002) und ZAPPA ET AL. (2003).

Eisschmelze (Gletscher)

Zur Berechnung der Gletscherschmelze wird die Gletscherfläche mit Hilfe von Gleichgewichtslinie und aktueller Schneedecke in Firn-, Schnee- und Eisflächen unterteilt. Schnee auf Firnflächen – also oberhalb der Gleichgewichtslinie – wird dabei gleich wie Firn behandelt. Diesen drei Einheiten wird jeweils ein eigener linearer Speicher zugeordnet (Firn und Schnee auf Firn: $SGL1$ [mm]; Schnee: $SGL2$ [mm]; Eis: $SGL3$ [mm]), welcher die zugehörigen Schmelzwassermengen aufnimmt. Auf die verschiedenen Gletscherflächen fallender Niederschlag wird wie Schmelzwasser behandelt und gelangt direkt in die entsprechenden Speicher.

Die Schmelze von schneefreien Eisflächen wird mit Hilfe von Temperatur und potenzieller direkter Solarstrahlung nach dem kombinierten Ansatz von Hock (1999) modelliert. Zugehörige Parameter sind der konstante Grad-Tag-Faktor $ICETMF$ [$\text{mm d}^{-1} \text{K}^{-1}$] sowie der konstante Strahlungsschmelzfaktor $ICERMF$ [$\text{mm h}^{-1} \text{K}^{-1} \text{W}^{-1} \text{m}^2$]. Die Schmelze von Firn- und Schneeflächen wird mit einem Grad-Tag-Verfahren berechnet, wobei der bereits im Schneemodul verwendete Grad-Tag-Faktor $TMFSNOW$ [$\text{mm d}^{-1} \text{K}^{-1}$] verwendet wird.

Die ermittelten Schmelzmengen erfahren dann eine nach Gletschereinheit differenzierte Verzögerung über entsprechende Speicher- (k) und Translationszeiten (tl) und werden an Komponenten des Abflussbildungsmoduls weitergegeben:

- Firn und Schnee auf Firn ($SGL1$, Akkumulationsgebiet): Schmelzwasser wird dem Zufluss zum Grundwasserspeicher (d. h. SLZ) zugerechnet.
- Schnee auf Eis ($SGL2$, Ablationsgebiet): Längere Speicher- und Translationszeiten ($k_{snow} = 30 \text{ h}$, $tl_{snow} = 2 \text{ h}$); Schmelzwasser wird dem Zwischenabfluss $Q1$ zugerechnet.
- Eis ($SGL3$, Ablationsgebiet): Sehr kurze Speicher- und Translationszeiten ($k_{ice} = 15 \text{ h}$, $tl_{ice} = 1 \text{ h}$); Schmelzwasser wird dem Oberflächenabfluss $Q0$ zugerechnet.

Für Details siehe VIVIROLI ET AL. (2007) sowie BADOUX (1999), KLOK ET AL. (2001) und VERBUNT ET AL. (2003).

Interzeption

Das Interzeptionsmodell besitzt pro Flächeneinheit (HRU) einen Speicher mit unterschiedlicher maximaler Grösse SI_{max} [mm], diese wird jeweils in Abhängigkeit von Vegetationstyp, Monat und Meereshöhe parametrisiert (GURTZ ET AL., 1997). Dem Ansatz von MENZEL (1997) folgend werden die Interzeptionsspeicher SI [mm] dann bei Niederschlag in Abhängigkeit von Niederschlagsintensität und Speicherinhalt aufgefüllt. Die Leerung der Speicher erfolgt bei vegetationsbedeckten Flächen mit potenzieller Evaporationsrate (berechnet nach Ansätzen Penman oder Penman-Monteith, siehe unten), solange genügend Feuchte vorhanden ist. Kann die vorhandene Strahlungsenergie nicht vollständig durch die Interzeptionsverdunstung ausgeschöpft werden, wird der Überschuss für die Bodenverdunstung verwendet. Muldenspeicherung und Oberflächenbenetzung von vegetationslosen Fels- und

Siedlungsflächen werden gleichermassen berücksichtigt. Niederschlag, welcher auf Feuchtflächen fällt, wird direkt dem unteren Abflussspeicher $SLZ1$ zugeführt (siehe weiter unten).

Für Details siehe GURTZ ET AL. (1997:70–72) und VIVIROLI ET AL. (2007).

Bodenspeicher und Verdunstung

Der Bodenfeuchtespeicher SSM [mm] stellt über die pflanzenverfügbare Feuchte die Verbindung zwischen Evapotranspiration und Abflussbildung her (BERGSTRÖM, 1976). Der maximale Speicherinhalt von SSM entspricht der nutzbaren Feldkapazität und hängt jeweils von bodenspezifischer Feldkapazität, Bodentiefe und Wurzeltiefe ab. Die ersten beiden Werte werden wiederum aufgrund von Boden- und Landnutzungseigenschaften für jede Flächeneinheit des Modells separat parametrisiert (GURTZ ET AL., 1997); die Wurzeltiefe ist zudem in Abhängigkeit des Monats variabel festgelegt. Der Zufluss zum Bodenspeicher stammt aus Bestandesniederschlag und durchfallendem Niederschlag sowie, falls vorhanden, von der Schneeschmelze. Der dimensionslose Koeffizient $BETA$ [-] kontrolliert dabei, wie die Aufteilung dieses Zuflusses in Bodenfeuchtespeicher SSM [mm] und oberen Abflussspeicher SUZ [mm] erfolgt: Je grösser $BETA$ ist, desto mehr Wasser wird dem Bodenfeuchtespeicher SSM zugeleitet, was zu einer stärker nicht-linearen Antwort des Modells führt (UHLENBROOK, 1999). Die beschriebene Aufteilung erfolgt für jede Flächeneinheit anhand der jeweils vorhandenen Bodenfeuchte gesondert, $BETA$ hingegen ist im Normalfall für das ganze Gebiet konstant. In dieser Arbeit wird allerdings eine flächendifferenzierte Parametrisierung von $BETA$ vorgeschlagen (siehe dazu Abschnitt 2.3.3).

Die Entleerung des Bodenfeuchtespeichers SSM geschieht einzig durch Evapotranspiration. Zur Berechnung derselben wird als Ausgangspunkt der semi-empirische Ansatz nach PENMAN (1948) verwendet. Grundlage ist dabei die potenzielle Verdunstung einer Grasfläche, welche über einen Strahlungsterm und einen aerodynamischen Term nachgebildet wird. Die aktuelle Verdunstung wird dann durch den weiterentwickelten Ansatz nach PENMAN und MONTEITH (PENMAN, 1948; PENMAN, 1956; MONTEITH, 1975; MONTEITH, 1981) direkt berechnet, wobei PREVAH durch die Veränderung der Albedo und gegebenenfalls der Stomatawiderstände eine Anpassung an die unterschiedlichen Oberflächen- respektive Landnutzungseigenschaften (inklusive Wasser-, Schnee- und Siedlungsflächen) sowie an die einzelnen Monate des Jahres vornimmt (GURTZ ET AL., 1997 und 1999). Obwohl die Berechnung nach Penman-Monteith relativ viele meteorologische Messgrössen erfordert, reichen die aus dem Automatischen Messnetz ANETZ der METEOSCHWEIZ (2003) zur Verfügung stehenden Werte aus.

Die detaillierte und weitgehend physikalische begründete Betrachtung der Bodenfeuchteausschöpfung (GURTZ, 1988) sowie der pro Flächeneinheit differenzierte Zufluss zur Abflussspeicherkaskade stellen wesentliche Erweiterungen des ursprünglichen HBV-Ansatzes dar (GURTZ ET AL., 1997).

Für Details siehe GURTZ ET AL. (1997:61–68, 72–76), VIVIROLI ET AL. (2007) sowie GURTZ ET AL. (1999).

Abflussbildung und Abflusskonzentration

Die Abflussbildung aus dem oberen Abflussspeicher SUZ [mm] erfolgt getrennt über eine schnelle Komponente $R0$ [mm h^{-1}] (Oberflächenabfluss) und eine verzögerte Komponente $R1$ [mm h^{-1}] (Zwischenabfluss). Die beiden Komponenten werden durch entsprechende Speicherzeiten $K0H$ [h] und $K1H$ [h] kontrolliert, $R0$ wird nur bei Überschreitung des der Speichergrenzwertes SGR [mm] gebildet. Obwohl dieser obere Abflussspeicher SUZ nicht limitiert ist, werden kaum über eine längere Dauer Füllstände zu beobachten sein, welche SGR übersteigen – SUZ wird dann nämlich sehr schnell über $R0$ entleert. SUZ gibt zudem durch Perkolation mit der Rate $PERC$ [mm h^{-1}] Wasser an die unteren Abflussspeicher ($SLZ1$ – $SLZ3$ [mm], Grundwassermodul) weiter. Insgesamt ist das Auftreten von $R0$ also zeitlich stark limitiert. Da auf Feuchtflächen fallender Niederschlag direkt dem unteren Abflussspeicher (genauer $SLZ1$, siehe unten) zugeführt wird, werden dort nur langsame Abflusskomponenten gebildet (vgl. Interzeption).

Der untere Abflussspeicher (Grundwassermodul) gliedert sich gemäss SCHWARZE ET AL. (1999) in zwei Hauptbestandteile, nämlich einen limitierten Speicher für den schnellen Basisabfluss ($SLZ1$ [mm] mit Grenzwert $SLZ1MAX$ [mm]) und zwei unlimitierte, gekoppelte Speicher für den langsamen Basisabfluss ($SLZ2$ [mm] und $SLZ3$ [mm]). Der Anteil der Perkolation, welcher $SLZ2$ und $SLZ3$ zugeführt wird, hängt vom Füllstand von $SLZ1$ ab und wird zu ${}^8/{}_9$ $SLZ2$ und zu ${}^1/{}_9$ $SLZ3$ zugewiesen. Das Auslaufen der Speicher wird durch die beiden Speicherzeiten $CG1H$ [h] ($SLZ1$) und $K2H$ [h] ($SLZ2$) gesteuert; die Speicherzeit für $SLZ3$ beträgt stets das 9-fache von $K2H$, was ein noch langsameres Auslaufen bedeutet. Als Gesamtantwort des Grundwassermoduls resultiert der Basisabfluss $R2$ [mm h^{-1}].

Wie schon in Abschnitt 2.1.2 erläutert erfolgt die Berechnung aller oben beschriebenen Wasserflüsse für jede Flächeneinheit des Modells gesondert; dies ist zulässig, da die Simulation nur vertikale und nicht horizontale Prozesse betrifft (vgl. BECKER UND BRAUN, 1999). Das Zusammenführen der Wasserflüsse aus den einzelnen Flächeneinheiten (Abflusskonzentration) geschieht dann unter Annahme einer verzögerungsfreien Weiterleitung. Eine gewisse Berücksichtigung der tatsächlichen Abflusskonzentration kann durch eine leichte Reduktion der k-Werte geschehen. Insgesamt stellt dies für die hier betrachteten kleinen und mittelgrossen Einzugsgebiete keine Einschränkung dar, wäre aber für grössere Gebiete nicht mehr gerechtfertigt.

Für Details siehe GURTZ ET AL. (1997:72–79) sowie VIVIROLI ET AL. (2007).

2.1.5 Ausgabegrössen

Als Ausgabegrössen stellt PREVAH eine umfangreiche Palette an hydrologischen Kennwerten zur Verfügung, welche Input, Modellzustand und die simulierten Wasserhaushaltsgrossen umfasst. Diese Werte können sowohl als Texttabellen wie auch als Rasterkarten ausgegeben werden; beide Ausgabetypen verfügen über eine maximale zeitliche Auflösung von einer Stunde, können aber auch auf Tage, Monate und Jahre aggregiert werden. **Tabelle 2.1** gibt einen Überblick über die wichtigsten protokollierten Grössen. Im Modellsystem PREVAH stehen Hilfsprogramme zur Verfügung, welche das Darstellen und Auswerten der Resultate (Postprocessing) wesentlich erleichtern (siehe VIVIROLI ET AL., 2007).

Symbol	Description	Unit
<i>Model input</i>		
P-UK	Interpolated precipitation (without adjustment)	[mm h ⁻¹]
P-KOR	Interpolated precipitation (with adjustment)	[mm h ⁻¹]
P-SNO	Snowmelt	[mm h ⁻¹]
P-ICE	Ice melt	[mm h ⁻¹]
<i>Model state</i>		
SSNO	Snow water equivalent	[mm]
SI	Interception storage	[mm]
SSM	Plant available soil moisture storage	[mm]
SUZ	Upper runoff generation storage (unsaturated zone)	[mm]
SLZ	Lower runoff generation storage (saturated zone)	[mm]
<i>Water balance components</i>		
EPOT	Potential evapotranspiration	[mm h ⁻¹]
EREA	Actual evapotranspiration	[mm h ⁻¹]
EI	Interception evaporation	[mm h ⁻¹]
ESM	Soil evapotranspiration	[mm h ⁻¹]
R0	Surface runoff	[mm h ⁻¹]
R1	Interflow	[mm h ⁻¹]
R2	Total baseflow	[mm h ⁻¹]
RTOT	Total runoff	[mm h ⁻¹]

Table 2.1: Most important input, model state and water balance (output) values available from PREVAH for every time step and spatially distributed.

Tabelle 2.1: Wichtigste von PREVAH protokolierte Eingabe- (Input), Modellzustands- (State) und Wasserhaushaltsgrossen (Output). Die Werte sind für jeden Zeitschritt und räumlich differenziert verfügbar.

2.2 Gründe für die Anwendung von PREVAH

Ausgehend von der nun erfolgten Modellbeschreibung kann begründet werden, wieso das hydrologische Modellsystem PREVAH als Grundlage für diese Arbeit verwendet wurde. Grundsätzlich ist anzumerken, dass es kein "bestes" oder "perfektes" Modell gibt und für die gestellte Aufgabe auch die Anwendung anderer Modelle denkbar ist (siehe z. B. BEVEN, 2000 und 2001A). Neben Modellarchitektur und Genauigkeit der Prozessbeschreibungen sind bei einer Modellauswahl auch die Unsicherheiten in den Eingangsdaten und in der Festlegung der freien Parameter zu berücksichtigen (WAGENER UND WHEATER, 2006) – Faktoren, welche vom spezifischen Anwendungsgebiet abhängen und in der Modellierung von zentraler Wichtigkeit sind (BEVEN, 2002). Entscheidend ist insgesamt, dass ein Modell mit Hilfe von Messdaten auf den Anwendungsbereich kalibriert werden kann und dabei gute Ergebnisse zeigt, welche auch bezüglich der modellinternen Zustände plausibel sind (BLÖSCHL, 2001; ZAPPA, 2002; UHLENBROOK ET AL., 2004). Letzteres ist besonders wichtig, weil mit den hier be-

trachteten Hochwasserfragen in einem hydrologischen Extrembereich operiert wird; somit ist eine gute Abbildung der Prozesse von grosser Bedeutung (SEIBERT, 2002).

2.2.1 Erfahrungen im Anwendungsraum

Wie angedeutet spielt also die Anwendungserfahrung mit einem Modell im anvisierten Untersuchungsraum eine wesentliche Rolle – und diesbezüglich weist PREVAH grosse Stärken auf: Im Verlaufe seiner Entwicklung wurde PREVAH bereits erfolgreich auf verschiedene Einzugsgebiete der Schweiz angewandt. Für das Vorläufermodell HBV3-ETH bestehen Erfahrungen mit Dischmabach, Langeten, Mentue, Murg und Thur (BRAUN, 1985; RENNER UND BRAUN, 1990), das wesentlich erweiterte PREVAH wurde zuerst vertieft im Thurgebiet angewendet (GURTZ ET AL., 1997 und 1999), später in Dischma- und Rietholzbachgebiet (GURTZ ET AL., 2003; ZAPPA ET AL., 2003), im Rhone- und Rosegbachgebiet (BADOUX, 1999; KLOK ET AL., 2001) und schliesslich – mit einigen Vereinfachungen – flächendeckend für die ganze Schweiz (PERL, 2002; ZAPPA, 2002; PFAUNDLER UND ZAPPA, 2006). Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung im Alpenraum sind vor allem die Module für Schneeakkumulation und Schneeschmelze (siehe v. a. ZAPPA, 2002) sowie für die Gletscherschmelze (BADOUX, 1999; KLOK ET AL., 2001; GURTZ ET AL., 2003). Jüngere Anwendungen umfassen probabilistischen Vorhersagen in grossen Teilgebieten des Rheineinzugsgebiets (VERBUNT, 2005; VERBUNT ET AL., 2006; JAUN, in Vorbereitung) sowie kleinräumige Modellierungen im Emmental (BADOUX, 2005) und im Berner Oberland (WEHREN, 2005); im Rahmen der Analyse zum Hochwassereignis von 2005 konnten zudem Sensitivitätsanalysen für das Aare- und das Sihlgebiet durchgeführt werden (WEINGARTNER ET AL., 2007; SCHWANBECK ET AL., in Vorbereitung).

Insgesamt kann also auf ein gut erprobtes Modell aufgebaut werden, welches sich im Anwendungsraum in einem beherrschbaren und mit Erfahrungen belegten Bereich bewegt. Wie ZAPPA (2002) auf unterschiedlichen Skalen gezeigt hat, können die in der Schweiz auftretenden Abflussregimes gut erfasst werden, ebenso wie die räumliche Verteilung der Verdunstung (PERL, 2002). Für die breite Anwendung des Modells war auch wichtig, dass PREVAH gemäss der HBV-Philosophie (BERGSTROM, 1976) mit den Daten eines Standardmessnetzes betrieben werden kann und ohne Spezialistenkenntnisse der Modellierung anwendbar ist – beides ist für die angestrebte Praxisnähe von grossem Vorteil.

2.2.2 Modellkomplexität versus Datengrundlage

Betrachtet man die Zielgrösse dieser Arbeit – die Hochwasserspitzen –, fällt die Beurteilung von PREVAH vorerst etwas kritischer aus. Das Modell wurde ursprünglich entwickelt, um in Einzugsgebieten mit komplexer Topographie die zeitliche und räumliche Variabilität hydrologischer Prozesse besser zu verstehen; es ist also nicht spezifisch auf Spitzenabflüsse ausgerichtet. Dies betrifft in erster Linie die schnelle Abflussbildung bei Starkniederschlägen, wo mit Einschränkungen gerechnet werden muss. Es kann aber aufgezeigt werden, dass diese Probleme vor allem kleine Gebiete betreffen (vgl. BADOUX, 2005 und WEHREN, 2004) und im mesoskaligen Bereich ($10\text{--}1'000 \text{ km}^2$) weniger wichtig sind, da hier eine stärkere Ausmittelung der Gebietsantwort stattfindet. Dasselbe gilt für die Lücken bei der Prozesswiedergabe bezüglich Gefrier- und Auftauvorgängen im Boden sowie für das fehlende gebietsinterne Routing der Abflüsse. Letzterer Punkt kann in der Praxis durch geringfügig längere Speicherzeiten kompensiert werden, was wegen der dominanten Stellung des Zwischenabflusses (vgl. GURTZ ET AL., 1997) vor allem *KIH* betrifft.

Der scheinbare Nachteil einer fehlenden Spezialisierung auf Hochwasser ist gleichzeitig auch ein Vorteil, denn durch die Modellierung des gesamten Wasserhaushaltes wird die plausible Nachbildung aller hydrologisch relevanten Grössen angestrebt. Die Hochwasserabschätzung erfolgt also im Endeffekt auf Basis eines Modells, welches alle an einem Hochwasser beteiligten Prozesse in ihrer Gesamtheit nachbildet und somit besser abgestützt ist als ein stärker auf Spitzen fixiertes Modell. Dies betrifft beispielsweise die sehr wichtigen Randbedingungen von Vorfeuchte und Speicherzuständen im Boden (FRANCHINI ET AL., 1996). Als Zusatznutzen können zudem Untersuchungen zu anderen hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Fragestellungen erfolgen.

Neben Anwendungsziel und Anwendungsskala muss die Modellkomplexität immer auch in Relation zu Verfügbarkeit und Qualität der Messdaten betrachtet werden (NEMEC, 1993; REFSGAARD, 1997): Einerseits gilt es, möglichst alle verfügbaren Messdaten zu nutzen, andererseits müssen Probleme bei der Identifikation der Modellparameter vermieden werden, welche aus einem ungenügendem Informationsgehalt eben dieser Messdaten resultieren (**Abbildung 2.8**, siehe GRAYSON UND BLÖSCHL, 2000). Grundsätzlich ist wegen der beschränkten Datenverfügbarkeit bei jedem Modell ein gewisser Grad an Konzeptualisierung notwendig (BEVEN, 2001). Übermäßig komplexe Modelle sind zu vermeiden, da

ihre physikalische Basis in der Praxis kaum überprüfbar ist (BLÖSCHL, 2001) und bei ungenügender Abstützung der Parameter an Messdaten sogar Ergebnisse resultieren können, welche schlechter als diejenigen einfacher Modellen sind (PERRIN ET AL., 2001).

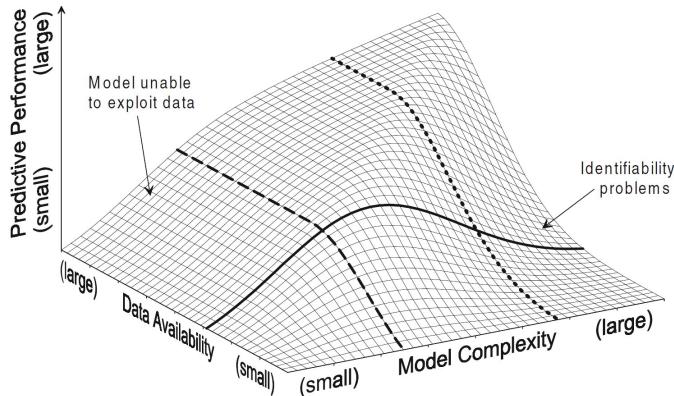


Figure 2.8: Relationship between model complexity, data availability and predictive performance (from GRAYSON AND BLÖSCHL, 2000).

Abbildung 2.8: Beziehung zwischen Modellkomplexität, Datenverfügbarkeit und Vorhersagegüte (aus GRAYSON UND BLÖSCHL, 2000).

Gerade bezüglich der oben angesprochenen Abflussprozesse muss angemerkt werden, dass die Parametrisierung komplexerer Modellformulierungen kaum möglich ist, wenn nicht detaillierte Kenntnisse der Bodeneigenschaften (SCHERRER UND NAEF, 2003) oder der Systemzustände (BEVEN UND FEYEN, 2001) vorliegen; dasselbe trifft auch auf die stärkere Berücksichtigung dominanter Abflussprozesse zu, selbst wenn dazu konzeptuelle Ansätze verwendet werden (vgl. UHLENBROOK UND LEIBUNDGUT, 2002 sowie UHLENBROOK, 2005). Die in der Schweiz verfügbare Bodeneignungskarte 1:200'000 (FAP, 1980; BFS, 2003) wirkt in dieser Hinsicht deutlich limitierend, da sie die Heterogenität der Bodeneigenschaften kaum adäquat wiedergibt. Etwas besser präsentiert sich die Datenlage bei der Arealstatistik (BFS, 2003), welche der verfügbaren Rastergrösse von $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ eher gerecht wird (BFS, 2001).

Zu den Messdaten für den Modellantrieb sind zwei wichtige Punkte festzuhalten: Einerseits sind Messnetzdichte und Datenqualität der meteorologischen Beobachtungen in der Schweiz überdurchschnittlich hoch, was eine Anwendung im Stundenschritt sicherlich rechtfertigt (vgl. LINDSTRÖM ET AL., 1997). Gleichzeitig besteht aber bei der Meteorologie stets die Notwendigkeit der Interpolation, was in der Praxis einer Ausmittelung der Extremwerte gleichkommt und die räumliche Heterogenität der Niederschlagsfelder vernachlässigt (GRAYSON UND BLÖSCHL, 2000; GOODRICH ET AL., 1995). Zudem werden sowohl kleine wie auch hochgelegene Einzugsgebiete trotz der hohen Messnetzdichte ungenügend repräsentiert. Einige Fragen bezüglich Interpolation werden in Kapitel 7 noch konkret zu diskutieren sein. Ein weiteres Problem ist der Messfehler, welcher insbesondere bei Schneefall und hohen Windgeschwindigkeiten sehr gross werden kann (YANG ET AL., 1999; WILLEMS, 2001): Im Alpenraum ist im Jahresmittel mit bis zu 30% Unterschätzung der Niederschlagsmengen zu rechnen, im Fall einzelner Ereignisse sogar mit noch mehr (SEVRUK, 1985; SEVRUK UND KIRCHHOFER, 1992). Trotz der in PREVAH implementierten Messfehlerkorrektur (siehe Abschnitt 2.3.2) bleibt auch hier eine Unsicherheit.

Was die Gebietskalibrierung anhand von Abflussmessungen anbelangt, kann auf ein sehr dichtes Messnetz hydrologischer Beobachtungen zurückgegriffen werden (KAN, 2002; BAFU, 2006), welches eine hohe Qualität aufweist. Im grössten Teil der Fälle muss lediglich ein zufälliger mittlerer Fehler von ca. 5% angenommen werden (LH, 1982; LHG, 1998), welcher im Detail von Gewässertyp, Messstation, Messmethode und Messgerät abhängt. Im Bereich seltener Hochwasserabflüsse ist jedoch wegen erschwerten Messbedingungen, Unsicherheiten in der Pegel-Abfluss-Beziehung und veränderten Strömungsverhältnissen mit Fehlern in der Grössenordnung von 10 bis 20% zu rechnen (BWG, 2002A; siehe auch NAEF, 2007).

Wägt man nun die Qualität und Verfügbarkeit der Messdaten ab, scheint ein Modell von mittlerer Komplexität am geeignetsten zu sein, um die gegebenen Daten optimal auszunutzen – und PREVAH stammt aus dieser Modellkategorie. Zusammen mit der bereits aufgezeigten Eignung für den Anwendungsbereich kann erwartet werden, dass PREVAH für die gestellten Aufgaben eine gute Leistung zeigt. Den spezifischen Fragen bezüglich Wiedergabe von Hochwasserspitzen wird in Kapitel 4 noch ausgiebig Beachtung geschenkt werden, indem eine speziell auf dieses Anwendungsziel hin ausgerichtete Kalibrierung entwickelt wird.

2.3 Anpassungen in Preprocessing und Modellkern

Abschliessend ist noch auf drei Bereiche von Modell und Preprocessing einzugehen, in welchen Änderungen und Erweiterungen vorgenommen wurden. Anzumerken ist, dass mit Absicht keine tiefergreifenden Umstellungen in der Modellstruktur vorgenommen wurden, um weiterhin auf die bisherigen Erfahrungen zurückgreifen zu können (siehe vorhergehenden Abschnitt), auch was die Erkennung und Lokalisierung von Fehlern und Problemen betrifft.

2.3.1 Gleichgewichtslinie von Gletschern

Im Preprocessing (Abschnitt 2.1.2) musste unter anderem eine automatische Festlegung der Gleichgewichtslinie (GWL) von Gletschern hinzugefügt werden; PREVAH benötigt die GWL zur Identifikation der Firnflächen. Bisher erfolgte die Festlegung manuell durch Eingabe einer bestimmten Höhe, welche als Trennlinie zwischen Akkumulations- und Ablationsgebiet diente. Dieses Vorgehen mag bei Vorliegen lokaler Informationen genauer sein, scheint aber bei einer grossen Zahl aufzubereitender Einzugsgebiete zu aufwendig.

Grundlage der automatischen Festlegung sind die von MAISCH ET AL. (1999) erarbeiteten Informationen zur Höhe der GWL im schweizerischen Alpenraum. Die entsprechenden Angaben liegen in Form von 33 jeweils auf eine Gletscherregion bezogenen Stützstellen vor und wurden mit einem Linear-Drift-Kriging (siehe z. B. GOOVAERTS, 1997) flächendeckend interpoliert. Die damit vorliegende Karte der GWL-Höhen wird anschliessend mit dem digitalen Höhenmodell (DHM) verschchnitten. An der Schnittlinie zwischen interpolierter GWL-Karte und DHM wird die aktuelle Gleichgewichtslinie festgelegt (vgl. Abbildung 2.9); gletscherbedeckte Rasterzellen, welche höher als die interpolierte GWL-Fläche liegen, werden also dem Akkumulationsgebiet zugerechnet. Um den Veränderungen seit dem Bezugsjahr 1973 Rechnung zu tragen – flächendeckend existieren noch keine aktuelleren Karten –, werden die GWL-Werte pauschal um 25 m angehoben (MAX MAISCH, persönliche Mitteilung vom 27.10.2003).

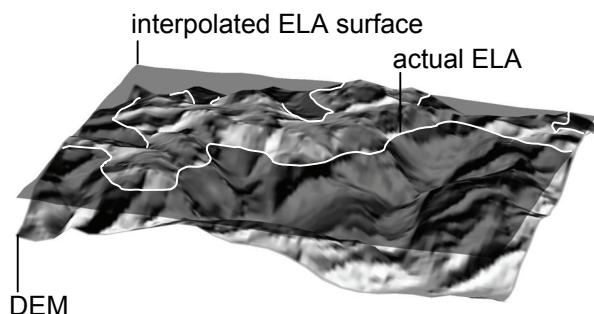


Figure 2.9: Determination of the actual equilibrium line altitude (ELA) by intersection of the digital elevation model (DEM) with the interpolated average ELA surface.

Abbildung 2.9: Bestimmung der aktuellen Gleichgewichtslinie (actual ELA) durch Verschneiden des digitalen Höhenmodells (DEM) mit der interpolierten Karte der mittleren Gleichgewichtslinien.

Die so erstellte aktuelle Gleichgewichtslinie muss noch an einen wesentlichen lokalen Faktor angepasst werden, nämlich die Exposition. Während sich die generalisierte Höhe der Gleichgewichtslinie im nordalpinen Raum gut durch die Höhe der GWL im Nordsektor wiedergeben lässt, wurde hier eine stärker lokal angepasste Variante erarbeitet. Grundlage dazu ist die gewichtete mittlere GWL aller Expositionen, für welche dann ausgehend von den Werten von MAISCH ET AL. (1999) eine expositionsabhängige Korrektur vorgenommen wird (Abbildung 2.10). Deutlich ersichtlich ist, dass für nordexponierte Lagen eine gegenüber dem Mittelwert klar tiefere GWL angenommen wird (Korrektur für N: -153 m), während die GWL im Südwestsektor am stärksten nach oben verschoben wird (Korrektur für SW: +157 m).

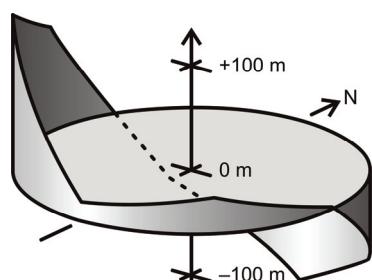


Figure 2.10: Exposition-dependent adjustment of the equilibrium line altitude.

Abbildung 2.10: Expositionsabhängige Korrektur der Gleichgewichtslinie.

Die Plausibilität der so bestimmten Gleichgewichtslinien illustriert **Abbildung 2.11** anhand der Berner Alpen. Gut erkennbar sind vor allem die generell höhergelegenen GWL südexponierter Gebiete und die etwas tieferen GWL nordexponierter Gebiete. Die zahlreichen nordwestexponierten Flächen im Einzugsgebiet der Lütschine erfahren gemäss obigem Korrekturschema nur geringe Veränderungen.

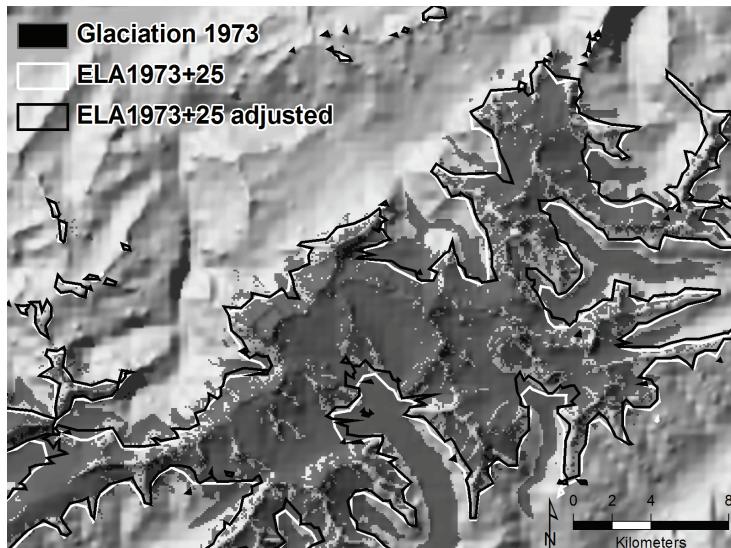


Figure 2.11: Automatically determined equilibrium line altitudes for the Bernese Alps with additional 25 m upward shift; comparison of exposition-adjusted version (ELA1973+25 adjusted) with standard version (ELA 1973+25).

Abbildung 2.11: Automatisch bestimmte Gleichgewichtslinien in den Berner Alpen für 1973 mit genereller Erhöhung um 25 m; Verglichen werden die Version mit expositionsabhängiger Korrektur (ELA1973+25 adjusted) und die Standardversion (ELA 1973+25).

Im Preprocessing-Tool WINHRU (vgl. Abschnitt 2.1.2 und VIVIROLI ET AL., 2007) kann sowohl bezüglich Expositionskorrektur wie auch genereller Anhebung der Gleichgewichtslinien zwischen verschiedenen Varianten gewählt werden. Die manuelle Eingabe einer uniformen GWL-Höhe ist weiterhin möglich.

2.3.2 Automatische Messfehlerkorrektur für Niederschlag

Die zweite hier erläuterte Änderung betrifft die Messfehlerkorrektur für den Niederschlag. Diese wurde bis anhin mittels WaSiM-Routinen (SCHULLA UND JASPER, 2000) im Preprocessing abgehandelt, sollte aber neu direkt während des Modellaufes erfolgen, um einerseits eine bessere Kontrolle über die Ergebnisse zu haben, andererseits aber auch bezüglich Parametrisierung und Ausgestaltung der Korrektur flexibler zu sein. Dabei muss in Kauf genommen werden, dass die Korrektur interpolierter Werte aus methodischer Sicht etwas weniger plausibel ist als die Interpolation korrigierter Werte.

Die hier eingeführte Korrektur orientiert sich grob an den Werten von SCHULLA UND JASPER (2000) und wurde anhand von Resultaten in ausgewählten Testgebieten und Erfahrungswerten aus früheren Anwendungen erstellt. Korrigiert wird aber im Gegensatz zum ursprünglichen Ansatz nicht linear, sondern logarithmisch zur Windgeschwindigkeit. Dies hat den Vorteil, dass bei grossen Windgeschwindigkeiten keine unrealistisch hohen Korrekturfaktoren resultieren.

Anhand der Grenztemperatur *TGR* und dem beidseitigen Übergangsbereich *TTRANS* (siehe Abschnitt 2.1.4) erfolgt die Messfehlerkorrektur getrennt für Schnee und Regen in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v_w [m s^{-1}] nach

$$\begin{aligned} PR_{korr} &= PR_{akt} \cdot [1 + 0.07 \cdot \ln(v_w + 1)] \\ PS_{korr} &= PS_{akt} \cdot [1 + 0.20 \cdot \ln(v_w + 1)] \end{aligned} \quad \text{Gleichung 2.4}$$

wo PR_{akt}, PS_{akt} gemessene Regen- resp. Schneemenge [mm h^{-1}]
 PR_{korr}, PS_{korr} korrigierte Regen- resp. Schneemenge [mm h^{-1}]

Dabei werden die regionalen Unterschiede in den Messbedingungen bereits durch die Wind- und Temperaturverhältnisse (Regen oder Schnee) repräsentiert, womit auf eine weitergehende räumliche Differenzierung verzichtet werden kann. **Abbildung 2.12** zeigt die mit Gleichung 2.4 geschätzten Messfehlerkorrekturen im Vergleich zur ursprünglichen Korrektur von SCHULLA UND JASPER (2000). Die Obergrenze der zu berücksichtigenden Windgeschwindigkeiten wurde anhand der maximalen mittleren stündlichen Werte 1983–2003 von Jungfraujoch (28.0 m s^{-1}) und Säntis (29.5 m s^{-1}) grob auf 30 m s^{-1} geschätzt. Eine fundierte Beurteilung der vorgeschlagenen Korrektur wird anhand der Kalibrierungsresultate von 140 Einzugsgebieten in Kapitel 5 möglich sein.

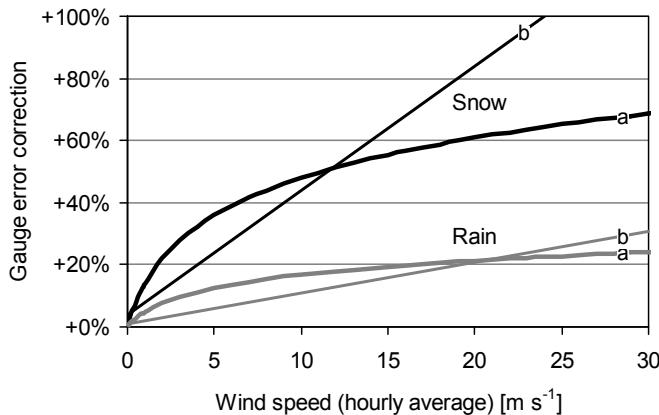


Figure 2.12: Wind-dependent gauge error correction for rain and snow as introduced in PREVAH (a) compared to correction by SCHULLA AND JASPER (2000) (b).

Abbildung 2.12: In PREVAH einge-fügte windabhängige Messfehlerkor-rektur für Regen und Schnee (a) im Vergleich zur Korrektur von SCHULLA UND JASPER (2000) (b).

Inhaltlich muss die Messfehlerkorrektur wie schon erwähnt deutlich von der Bilanzkorrektur unter-schieden werden, welche in PREVAH über zwei freie Parameter für Regen und Schnee (*PKOR* bzw. *SNOKOR*, vgl. Abschnitt 2.1.4) vorgenommen wird. Es ist aber zu erwarten, dass ein Restfehler der Messfehlerkorrektur durch die Bilanzkorrektur auszugleichen bleibt, da dieser Messfehler aufgrund der extrem variablen lokalen Bedingungen an den einzelnen Messstandorten nur bis zu einer gewissen Genauigkeit abgeschätzt werden kann (siehe z. B. MICHELSON, 2004). Im Hinblick auf die in dieser Arbeit angestrebte Regionalisierung war die Trennung von Messfehlerkorrektur und Bilanzkorrektur unbedingt beizubehalten, da so der Umfang der zu regionalisierenden Informationen etwas verringert werden konnte.

Ergänzend zu erwähnen ist das Vorgehen, welches ZAPPA (2002) für eine gesamtschweizerische Studie von Abfluss- und Verdunstungsregimes verwendete: Die Niederschlagsmessungen wurden dort auf die unkorrigierten Niederschlagsklimatologien von SCHWARB ET AL. (2001A, 2001B) (Bezugsperiode 1971–1990) angepasst und dann mit Hilfe der Werte von SEVRUK UND KIRCHHOFER (1992) (Bezugsperiode 1951–1980) korrigiert. Da dies aber den stark wechselnden lokalen Bedingungen nicht gerecht werden kann, erschien eine Anwendung bei der hier angestrebten räumlichen und zeitlichen Auflö-sung als zu stark generalisierend.

2.3.3 Reduktion der Anzahl freier Parameter

Der dritte Änderungsbereich betrifft schliesslich die Anzahl freier Modellparameter – mit 17 solchen (und zwei weiteren für vergletscherte Gebiete) ist PREVAH in der oben vorgestellten Standardversion vergleichsweise grosszügig parametrisiert. Das von MERZ UND BLÖSCHL (2004) in Österreich einge-setzte Modell vom Typ HBV besitzt beispielsweise 11 Parameter, ist mit einer "lumped"-Diskretisierung allerdings nicht gleich stark räumlich aufgelöst wie PREVAH. Auf das Problem der Überparametrisierung wird in Kapitel 5.3.2 noch näher einzugehen sein. Im Hinblick auf die anvisierte Regionalisierung sollte die Anzahl freier Modellparameter wenn möglich reduziert werden, um einerseits den Regionalisierungsaufwand zu vermindern, andererseits aber auch die Identifizierbarkeit der Parameter zu verbessern (siehe dazu auch LAMB, 1999). Im Folgenden werden die dies-bezüglichen Veränderungen an PREVAH beschrieben.

Auswahl der im Modell verwendeten Routinen

In einem ersten Schritt wurde versucht, Parameter durch die Verwendung anderer Module oder durch die Festsetzung auf physikalisch begründete Festwerte einzusparen. Da aber gleichzeitig der gut do-kumentierte Erfahrungsbereich nicht verlassen werden sollte, waren die diesbezüglichen Möglichkei-ten etwas eingeschränkt. Die folgenden Änderungen wurden vorgenommen:

- Für die Schneeschmelze wurde wie im Normalfall der kombinierte Ansatz von HOCK (1998) ge-wählt, allerdings mit fixem anstatt mit variablem Schmelzfaktor. Dabei werden die Grenzwerte *TMFMIN* und *TMFMAX* nicht mehr benötigt und durch den konstanten Schmelzfaktor *TMFSNOW* ersetzt. Weiter wird der Koeffizient für das Wiedergefrieren (*CRFR*) auf dem Standardwert 0.5 be-lassen, welcher über die unterschiedlichen spezifischen Wärmen von Wasser ($2100 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) sowie von Schnee und Eis ($4182 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) physikalisch begründet ist (DMK UND DPK, 1988). Insgesamt können so zwei Parameter eingespart werden, ohne die Güte der Schneeschmelzmo-dellierung einzuschränken (siehe dazu ZAPPA, 2002 sowie ZAPPA ET AL., 2003).

- Die Grenztemperatur für den Übergang von Regen zu Schnee (TGR) wurde auf 0 °C festgesetzt, der zugehörige Übergangsbereich $TTRANS$ auf 0.75 °C. Dies sind physikalisch plausible und durch die Modellanwendung gut abgestützte Erfahrungswerte.

Nicht erfolgreich war ein Versuch zur Festlegung der Speicherzeiten des Basisabflusses ($CG1H, K2H$). Dazu wurden von der Lithofazieseinheit abhängige Erwartungswerte dieser Parameter getestet, welche SCHWARZE ET AL. (1999) anhand von über 100 Einzugsgebieten in Deutschland bestimmt haben. Der resultierende Verlauf des Basisabflusses war aber selbst bei einer Neukalibrierung der restlichen Modellparameter deutlich weniger plausibel als der mit einer konventionellen Kalibrierung ermittelte. Somit scheinen die Grundlagen von SCHWARZE ET AL. (1999) nicht ohne weiteres auf die Modellierung schweizerischer Einzugsgebiete mit PREVAH übertragbar zu sein (für Details siehe GASSER, 2004).

Exponent für Zufluss zur Abflussspeicherkaskade (BETA)

$BETA$ ist ein dimensionsloser Parameter, welcher die Erneuerung der Bodenfeuchte steuert. Dies geschieht über eine nicht-lineare Aufteilung des Bestandesniederschlags Pb [mm] in Bodenfeuchtespeicher SSM [mm] und den oberen Abflussspeicher SUZ [mm]. Die Zuflussmenge zum oberen Abflussspeicher $DSUZ$ [mm h^{-1}] zum Zeitpunkt t wird dabei beschrieben als

$$DSUZ(t) = Pb(t) \cdot \left(\frac{SSM(t-1)}{SNFC} \right)^{BETA} \quad \text{Gleichung 2.5}$$

wo $SNFC$ maximal nutzbare Feldkapazität [mm]

Bei zunehmendem $BETA$ vergrößert sich der Anteil von Pb , welcher SSM zugeführt wird, was eine stärker nicht-lineare Gebietsantwort auf Niederschlag bedeutet – der generalisierte Zusammenhang ist in **Abbildung 2.13** dargestellt. Wie alle anderen freien Modellparameter wird auch $BETA$ in der Standardversion von PREVAH über das gesamte Gebiet hinweg als uniformer Wert angenommen, ist also für alle Hydropte identisch.

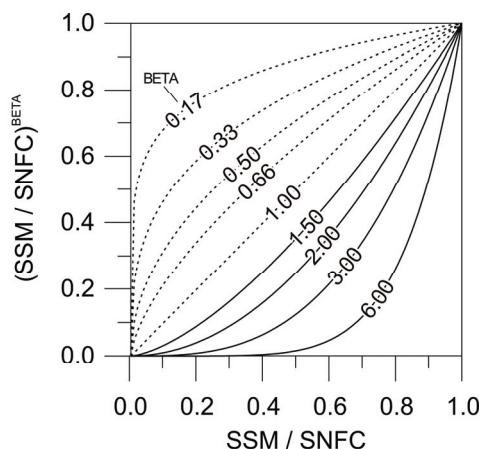


Figure 2.13: Relationship between standardised level of soil moisture storage ($SSM / SNFC$) (abscissa) and standardised transmission to the runoff generation module ($SSM / SNFC$) BETA (ordinate) (modified from UHLENBROOK, 1999). In PREVAH, $BETA$ is usually assigned values between 1.5 and 6.0.

Abbildung 2.13: Zusammenhang zwischen normiertem Füllungsgrad des Bodenfeuchtespeichers ($SSM / SNFC$) (Abszisse) und normierter Weitergabe an das Abflussbildungsmodul ($SSM / SNFC$) BETA (Ordinate) (verändert nach UHLENBROOK, 1999). In PREVAH werden für $BETA$ normalerweise Werte zwischen 1.5 und 6.0 angenommen.

Aus modelltheoretischen Überlegungen heraus erscheint es nun erfolgversprechend, $BETA$ als Funktion der Bodentiefe zu parametrisieren. Entsprechende Zusammenhänge lassen sich aus den von MERZ (2002) in Österreich durchgeföhrten Untersuchungen ableiten. In derselben Untersuchung ist auch eine generelle Abnahme von $BETA$ mit der Gebietshöhe zu erkennen; dies erscheint einerseits aufgrund geringeren Bodentiefen plausibel, wir aber des weiteren auch durch die abnehmenden Einzugsgebietsgrößen und die zunehmenden Niederschläge verursacht.

Diese grundlegenden Annahmen wurden mit Anwendungserfahrungen aus der Schweiz kombiniert (insbesondere ZAPPA, 2002; CORTI, 2003; GASSER, 2004) und führten zu einem Schema, mit welchem $BETA$ für jedes Hydrotop separat als Funktion der mittleren Höhe mH [m ü. M.] und der Bodentiefe BT [m] festgelegt wird. Für ein Hydrotop i gilt dann

$$BETA_i = 1 + \frac{1500}{mH_i} + BT_i, \quad \text{Gleichung 2.6}$$

was zum in **Abbildung 2.14** dargestellten Muster führt. Für urbane Gebiete ist wegen Versiegelung eine stark lineare Gebietsantwort zu erwarten; ebenfalls stark lineare Verhältnisse treten bei Felsoberflächen auf. Deshalb wird $BETA$ für Hydrootope der Landnutzungsklassen "Siedlung" und "Fels" auf die physikalisch plausible Untergrenze von 1.5 festgesetzt.

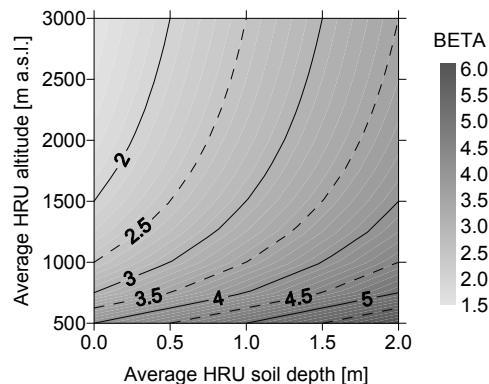


Figure 2.14: Model-internal parameterisation of $BETA$ per HRU as a function of soil depth and average altitude.

Abbildung 2.14: Modellinterne Parametrisierung von $BETA$ pro Hydrotop in Abhängigkeit von Bodentiefe und mittlerer Höhe.

Die so erhaltenen grossräumigen Muster von $BETA$ illustriert **Abbildung 2.15** anhand des Raumes Bern–Luzern; zwecks grösserer Genauigkeit wurden die Werte hier pro Gitterzelle und nicht pro Hydrotop und in einer Rastergrösse von 100×100 m 2 statt 500×500 m 2 gerechnet. Sehr schön zeigen sich die hohen $BETA$ -Werte für das Mittelland und die abnehmenden Werte gegen Voralpen und Alpen hin. Im Sinne der oben dargelegten Zusammenhänge scheint dieses Gesamtbild sehr plausibel.

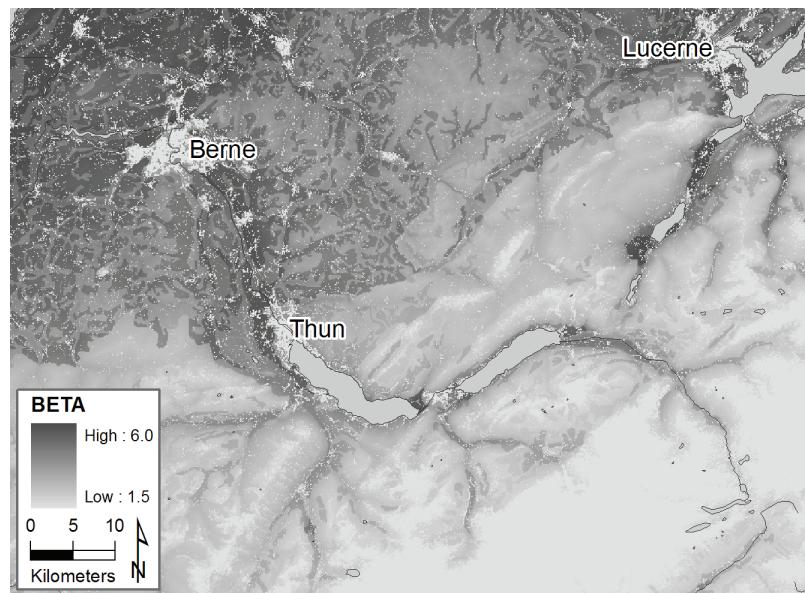


Figure 2.15: Sample for parameterisation of $BETA$ for the region Berne–Lucerne. Here, $BETA$ is computed cell-wise for a 100×100 m 2 raster.

Abbildung 2.15: Beispiel für die Parametrisierung von $BETA$ für den Raum Bern–Luzern. $BETA$ wurde hier zellenweise für ein Raster von 100×100 m 2 berechnet.

2.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend gibt **Tabelle 2.2** einen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften von PREVAH und führt die in dieser Arbeit verwendeten spezifischen Konfigurationen auf.

Table 2.2: *Most important properties and specific configurations of the hydrological modelling system PREVAH as used in the present study.*

Tabelle 2.2: *Wichtigste Eigenschaften und Spezifikationen des hydrologischen Modellsystems PREVAH, wie es in dieser Arbeit verwendet wird.*

Model type	Conceptual with linear storage cascade and physically justified process descriptions (grey-box-, HBV-Type)
Most important modules	Water balance adjustment, site-specific radiation and temperature adjustment, evapotranspiration, snowmelt and ice melt, interception, advanced soil moisture routine, three-component runoff generation (quick runoff, delayed runoff, baseflow)
Meteorological input	precipitation, temperature, wind speed, vapour pressure, global radiation, sunshine duration
Free model parameters	12 (+ 2 for glaciated catchments)
Application scale	Mesoscale catchments, roughly 10 to 1'000 km ²
Spatial resolution.....	500 m × 500 m (0.25 km ²) raster cells, aggregated to hydrological response units (HRUs) (type semi-distributed to distributed)
Temporal resolution.....	hourly
Time-frame	1984–2003 (model initialisation: 1983)

Kapitel 3

Kalibrierung I: Methodik für Normalbedingungen

Data and methods for model calibration on standard conditions are discussed, with emphasis on the combination of different efficiency scores and the search algorithm. The calibration procedure is illustrated with help of an exemplary catchment.

Datenbasis und methodische Grundlagen der Modellkalibrierung auf Normalbedingungen werden diskutiert, wobei insbesondere die Kombination verschiedener Gütemasse und der Suchmodus zur Sprache kommen. Der Kalibrierungsablauf wird an einem Beispiel erläutert.

3.1 Grundlagen

3.1.1 Problemstellung und Ziel

Wie in Kapitel 2 gesehen, besitzt PREVAH eine relativ grosse Anzahl freier Parameter. Da diese Parameter nicht a priori festgelegt werden können, müssen sie anhand einer oder mehrerer beobachteter Zielgrössen kalibriert werden. Grundsätzlich hat eine Kalibrierung zum Ziel, durch Anpassung der freien Modellparameter eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Simulation herzustellen. Eine völlige Übereinstimmung ist dabei schon deshalb kaum zu erreichen, weil sich in der Modellierung verschiedene Fehler und Ungenauigkeiten überlagern; dies betrifft beispielsweise den Modellantrieb (insbesondere den Niederschlags- und den Temperaturinput), die Modellstruktur oder Fehler in der Abflussmessung (siehe z. B. BEVEN, 1993; VRUGT ET AL., 2005).

Noch wichtiger erscheinen aber die Unsicherheiten, welche bei der Suche nach einem optimalen Parametersatz auftreten – genauer gesagt die Tatsache, dass in der Praxis kein einzelner "optimaler" Parametersatz existiert (DUAN ET AL., 1992). Dieses Problem wurde in den vergangenen Jahren intensiv diskutiert und von BEVEN (z. B. BEVEN UND BINLEY, 1992; BEVEN, 2002 und 2006A) unter dem Begriff "equifinality" subsumiert. Kern des Problems ist, dass durch das Zusammenwirken der verschiedenen Parameter zahlreiche Optima existieren, dass also verschiedene Parameterkombinationen zu ähnlich guten Resultaten führen (vgl. MADSEN ET AL., 2002). Dies braucht allerdings nicht zu bedeuten, dass die Parameter nicht sensitiv sind – vielmehr können Veränderungen in einem Parameter durch Anpassung anderer Parameter ausgeglichen werden (SEIBERT, 1997). Insgesamt sollten kalibrierte Parameter deshalb nicht einzeln betrachtet, sondern stets als aufeinander abgestimmte Teile eines Parametersatzes angesehen werden, welcher als Ganzes gute Resultate liefert. Zudem existiert nicht eine einzige ideale Parameterkombination, vielmehr bestehen zahlreiche funktionelle Parametersätze, aus welchen sich kein eindeutig bester identifizieren lässt (BEVEN, 2000). Zusätzlich erschwerend wirkt, dass die für die Kalibrierung zur Verfügung stehenden Informationen meist sehr knapp bemessen sind, da im Normalfall nur der Abfluss als Zielgröße dient (JAKEMAN UND HORNBERGER, 1993; KUCZERA UND MROCKOWSK, 1998). Detailliertere Betrachtungen zur Parameterunsicherheit im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden in Kapitel 6 noch folgen.

Im Folgenden wird nun ein Weg der Kalibrierung eingeschlagen, welcher bei bewältigbarem Aufwand gute Ergebnisse liefert und gleichzeitig dem anvisierten Ziel einer Regionalisierung Rechnung trägt. Dazu musste ein Verfahren gefunden werden, welches den gegebenen Rahmenbedingungen (Aufwand, Datenverfügbarkeit, hydrologische Prozesse) möglichst gut Rechnung trägt. Da die kalibrierten Parametersätze in dieser Arbeit als Grundlage für eine Regionalisierung dienen, ist es besonders wichtig, dass sie auf einem objektiven, nachvollziehbaren und einheitlichen Kalibrierungsverfahren beruhen. Nur so besteht beispielsweise die Aussicht auf eine erfolgreiche Identifikation von Zusammenhängen zwischen Modellparametern und Eigenschaften der Einzugsgebiete (siehe dazu z. B. BRONSTERT ET AL., 2003). Zudem muss das Verfahren fähig sein, eine grosse Anzahl von Gebieten effizient abzuarbeiten, da möglichst viele kalibrierte Parametersätze für die Regionalisierung zur Verfügung stehen sollen (vgl. Abschnitt 3.1.2). Somit ist auch klar, dass eine manuelle Kalibrierung nach dem Trial-and-Error-Prinzip, entfällt, da sie bei einer grösseren Anzahl von Gebieten nicht mehr zu bewältigen ist. Zudem beinhaltet dieses Verfahren stets eine subjektive Komponente (BOTTERWEG, 1995; MADSEN ET AL., 2002), was im Hinblick auf die Regionalisierung vermieden werden sollte – auch wenn die Kalibrierungsergebnisse zum Teil sogar ansprechender sein können (BOYLE ET AL., 2000). Ein automatisches Verfahren hingegen kann den Aufwand in vernünftigen Grenzen halten und gleich-

zeitig dafür sorgen, dass die erhaltenen Werte so weit als möglich vergleichbar sind. Zwar besteht weiterhin die Gefahr, dass Parameterunsicherheiten die zu erwartenden Zusammenhänge zwischen Modellparametern und Gebietsattributen überdecken, aber auch dieses Problem wird durch eine automatische Kalibrierung etwas entschärft. MERZ UND BLÖSCHL (2004) stellten fest, dass vorhandene Beziehungen trotz einer gewissen Parameterunsicherheit erkennbar bleiben.

3.1.2 Bezugszeitraum

Als erster Schritt muss ein Bezugszeitraum gewählt werden, anhand dessen das Modell kalibriert wird. Die Empfehlungen zu erforderlichen Eigenschaften und Länge dieses Zeitraums variieren von Autor zu Autor. Sicher aber sollten möglichst alle in einem Gebiet vorkommenden hydrologischen Bedingungen enthalten sein, damit die einzelnen Module und deren freie Parameter in der Kalibrierung auch tatsächlich angesprochen werden. Statistisch gesehen reichen dazu gemäss SOROOSHIAN UND GUPTA (1995) 2 bis 3 Jahre aus, MERZ (2002) empfiehlt 5 Jahre, um die in der Abflussmessung enthaltenen Informationen optimal auszunutzen. Ausgehend von früheren Erfahrungen werden in dieser Arbeit insgesamt 4 Jahre zur Kalibrierung verwendet. Dabei wird jeweils ein Initialisierungsjahr vorgesetzt, in welchem sich die langsamsten Speicherkomponenten (Schnee und Grundwasser) auf plausible Werte einstellen sollen; die Simulation des Initialisierungsjahrs wird jeweils verworfen und nicht für die Bewertung der Kalibrierung verwendet. Alle in dieser Arbeit gemachten Angaben zu Simulationszeitsräumen beziehen sich jeweils auf den eigentlichen Auswertungszeitraum ohne das Initialisierungsjahr.

Der Kalibrierungszeitraum 1994–1997 wurde aufgrund der idealen Datenlage im meteorologischen und hydrologischen Messnetz gewählt und erwies sich im Verlaufe der Modellentwicklung als gut geeignet. Wenn für diese Periode Messdaten des Abflusses vorliegen, wird entsprechend kalibriert. Wo dies nicht der Fall ist, werden vorzugsweise die Jahre 1984–1987, 1989–1993 oder 1999–2003 verwendet, jeweils mit einem vorgeschalteten Initialisierungsjahr. Fundiertere Betrachtungen zur Eignung des gewählten Kalibrierungszeitraums werden anhand der ausführlichen Kalibrierungsresultate (Kapitel 5) sowie durch Untersuchung eines zweiten Kalibrierungszeitraums (Kapitel 6.4.4) möglich sein. Es wird sich zeigen, dass der Zeitraum 1994–1997 eine gute Wahl darstellt.

Zur unabhängigen Überprüfung der Kalibrierungsresultate (Validierungszeitraum) dienen die Jahre ausserhalb des Kalibrierungszeitraums, welche mit Messdaten belegt sind und durch das Modell simuliert wurden. Maximal sind dies die 15 Jahre 1984–1992 und 1998–2003, wobei 1983 als Initialisierungsjahr dient.

3.1.3 Auswahl der Einzugsgebiete

Aus dem umfassenden Satz von in der Schweiz zur Verfügung stehenden Abflussmessungen (vgl. KAN, 2002; BAFU, 2006) wurden diejenigen Reihen ausgewählt, welche sich als Grundlage für Kalibrierung, Modellierung und Regionalisierung von Einzugsgebieten im Rahmen der vorliegenden Arbeit eignen. Dazu mussten die folgenden Minimalkriterien erfüllt sein:

- Mindestens vier zusammenhängende Messjahre in der Zeitperiode 1984–2003, um das Modell zu kalibrieren; das vorgeschaltete Initialisierungsjahr muss nicht mit Messdaten belegt sein.
- Eine Einzugsgebietsfläche von mindestens 10 und höchstens 2'000 km²; in diesem Skalenbereich sind von PREVAH gemäss früheren Erfahrungen (z. B. GURTZ ET AL., 1997, 1999 und 2003; ZAPPA, 2002; VERBUNT ET AL., 2005) gute Simulationsergebnisse zu erwarten.
- Keine Beeinflussung durch Kraftwerke oder Staustufen, keine grösseren Seen (Retention) im Einzugsgebiet. Zwar lassen sich diese Einflüsse mit entsprechendem Aufwand rechnerisch eliminieren, die damit verbundenen Unsicherheiten sollten im Hinblick auf die Regionalisierung aber vermieden werden. Als Grundlagen zur Beurteilung dienten MARGOT ET AL. (1992), BWG (2002B), BWG (2005) sowie ergänzend ASCHWANDEN UND KAN (1999) sowie SCHÄDLER UND WEINGARTNER (1992).
- Eine Vergletscherung von höchstens 60%; dieser Wert ist wiederum durch bisherige Erfahrungen vorgegeben (z. B. BADOUX, 1999; KLOK ET AL., 2001) und entspricht auch dem Bereich, in welchem die Anwendung eines hydrologischen Modellsystems überhaupt noch sinnvoll ist.

Im Anwendungsbereich (schweizerischer Anteil des Flussgebietes Rhein–Basel) konnten 159 Einzugsgebiete gefunden werden, welche diesen Kriterien entsprechen; der in der Einleitung als besonders relevant definierte Skalenbereich von 10 bis 1'000 km² wird nur von 6 Gebieten verlassen, welche

eine Fläche von über 500 km² aufweisen. Im Laufe der folgenden Kalibrierung müssen 19 Gebiete aus diesem Datensatz ausgeschlossen werden, weil sie aus verschiedenen Gründen nur ungenügende Simulationsresultate erzielten. Auf die Prozedur zur Bewertung des Kalibrierungserfolges wird in Kapitel 5.1 noch im Detail einzugehen sein.

Da nun im Folgenden wiederholt sehr rechenintensive Studien durchgeführt werden müssen, wurden die ausgewählten Einzugsgebiete in Kalibrierungsgruppen und anschliessend in Prioritätsklassen unterteilt; **Tabelle 3.1** erläutert die entsprechenden Kriterien. Die Gruppeneinteilung diente dazu, die Vorgänge von Aufbereitung, Kalibrierung und Auswertung zu gliedern, so dass der Arbeitsablauf von den verlässlich dokumentierten und repräsentativen Gebieten hin zu denjenigen mit grösseren Unsicherheiten erfolgt.

Table 3.1: Grouping and priority of catchments used for the present study. n denotes the number of catchments per group, Σ is the respective summed up number.

Tabelle 3.1: Gruppierung und Prioritätsklassen der in dieser Arbeit verwendeten Einzugsgebiete. n gibt die Anzahl der Gebiete pro Gruppe an, Σ ist die entsprechende aufsummierte Anzahl.

Group	Priority	Description	n	Σ
1	A	Stations from the Swiss federal hydrometrical network (BAFU, 2006), complete data series for 1984–2003, representative choice for discharge regime types	17	17
2	A	Stations from the Swiss federal hydrometrical network, complete data series for 1984–2003, further stations	32	49
3	B	Stations from the Swiss federal hydrometrical network, at least 4 years of continuos data in period 1984–2003	14	63
4	B	Representative stations from various cantonal hydrometrical networks, at least 4 years of continuos data in period 1984–2003	26	89
5.1	B	Further stations from cantonal hydrometrical networks, at least 4 years of continuos data in period 1984–2003, catchment area >20 km ²	45	134
5.2	B	Further stations from cantonal hydrometrical networks, at least 4 years of continuos data in period 1984–2003, catchment area 15–20 km ²	10	144
5.3	B	Further stations from cantonal hydrometrical networks, at least 4 years of continuos data in period 1984–2003, catchment area 10–15 km ²	15	159

Die Gebiete der höheren Priorität A (Gruppen 1 und 2) kommen bei ausgedehnten Sensitivitätsstudien zum Einsatz und sind repräsentativ für die verschiedenen im Anwendungsbereich anzutreffenden Bedingungen, insbesondere was Regimetypen (WEINGARTNER UND ASCHWANDEN, 1992), Einzugsgebietskenngrössen (ASCHWANDEN, 1996) und Aquifertypen (DEMATTÉIS ET AL., 1997) betrifft. Andererseits sollen diese Gebiete aber auch lange und zuverlässige Messreihen besitzen, anhand welcher die Modellresultate fundiert beurteilt und Extrapolationen vorgenommen werden können. Die Daten stammen ausschliesslich aus dem Messnetz des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), wobei 21 dieser Gebiete gleichzeitig auch hydrologische Untersuchungsgebiete sind, für welche unter anderem ausführliche Informationen zum Wasserhaushalt zur Verfügung stehen (SCHÄDLER, 1995). **Tabelle 3.2** führt die insgesamt 49 Gebiete der Priorität A zusammen mit wichtigen Kennwerten auf.

Gebiete der tieferen Priorität B (Gruppen 3 bis 5) dienen vor allem als zusätzliche Informationsquellen für die Regionalisierung und werden bei Sensitivitätsstudien nicht berücksichtigt. Hier war eine besonders sorgfältige Auswahl notwendig, da die zum Teil weniger aufwendig betreuten Stationen der verschiedenen kantonalen Messnetze grössere Unsicherheiten aufweisen können – beispielsweise durch Festfrieren der Pegel in Winter oder Hängenbleiben der Pegel bei Hochwasser, aber auch durch nicht in allen Abflussbereichen gut abgestützte Pegel-Abfluss-Beziehungen (PHILIPP ARNOLD, persönliche Mitteilung vom 09.05.2005; WILLI DANZ, persönliche Mitteilung vom 13.06.2005).

Eine ausführliche Tabelle über alle 159 Gebiete ist in Anhang A zu finden, wo neben den individuellen Gebietsflächen, Pegelhöhen und mittleren Gebietshöhen auch die jeweils verfügbaren Messjahre inklusive Datenherrschaft, die Kalibrierungsperioden sowie Informationen zur Gebietsaufbereitung verzeichnet sind. Die Tabelle wird durch Karten über die räumliche Verteilung der Gebiete ergänzt.

Table 3.2: Characteristics of 49 priority A catchments. H: altitude, mH: average altitude, Glac: glaciation. HADES ID refers to Swiss Hydrological Atlas small catchments.

Tabelle 3.2: Kennwerte der 49 Einzugsgebiete mit Priorität A. H: Höhe, mH: mittlere Höhe, Glac: Vergletscherung, HADES ID: Basisgebiete des Hydrologischen Atlas der Schweiz.

Symbol	River and station name	Area [km ²]	H [m a.s.l.]	mH [m a.s.l.]	Glac [%]	Discharge regime	HADES ID (*deviations)
AacSal	Aach–Salmsach, Hungerbühl	48.5	406	480		pluvial inférieur	10372
AllAde	Allenbach–Adelboden	28.8	1'297	1'856		nival alpin	20101
AlpErs	Alpbach–Erstfeld, Bodenberg	20.6	1'019	2'200	27.7	b-glaciaire	30071
BibKer	Bibere–Kerzers	50.1	443	540		pluvial inférieur	20511–20512
BirMou	Birse–Moutier, La Charrue	183	519	930		nivo-pluvial jurassien	10641–10644
BroPaC	Broye–Payerne, Caserne d’aviation	392	441	710		pluvial inférieur	20471–20484
CScAlp	Chli Schliere–Alpnach, Chilch–Erli	21.8	453	1'370		nival de transition	30162
DisDaK	Dischmabach–Davos, Kriegsmatte	43.3	1'668	2'372	2.1	b-glacio-nival	10172
EmmEgg	Emme–Eggiwil, Heidbüel	124	745	1'189		nivo-pluvial préalpin	20571–20573
EmmEmm	Emme–Emmenmatt	443	638	1'070		nivo-pluvial préalpin	20571–20595
EmmWil	Emme–Wiler, Limpachmündung	939	458	860		pluvial supérieur	20571–20632
ErgLie	Ergolz–Liestal	261	305	590		pluvial jurassien	10621–10633
GlaHer	Glatt–Herisau, Zellersmühle	16.2	679	840		pluvial supérieur	10451*
GolGol	Goldach–Goldach, Bleiche	49.8	399	833		pluvial supérieur	10362
Grolse	Grosstalbach–Isenthal	43.9	767	1'820	9.3	nival alpin	30081
GueBel	Gürbe–Belp	117	511	837		pluvial supérieur	20201–20211*
GueBur	Gürbe–Burgistein, Pfandersmatt	53.7	568	1'044		nival de transition	20201
HinHin	Hinterrhein–Hinterrhein	53.7	1'584	2'360	17.2	a-glacio-nival	10121–10122
KanHon	Kander–Honrich	520	650	1'900	7.9	b-glacio-nival	20091–20114
KEmLit	Kleine Emme–Littau, Reussbühl	477	431	1'050		nivo-pluvial préalpin	30181–30204
LanHut	Langen–Huttwil, Häberenbad	59.9	597	766		pluvial inférieur	20661
LueGst	Lütschine–Gsteig	379	585	2'050	17.4	a-glacio-nival	20051–20072
MenYvo	Mentue–Yvonand, La Mauguettaz	105	449	679		pluvial jurassien	20391–20392
MinEut	Minster–Euthal, Rüti	59.2	894	1'351		nival de transition	40131, 40133
MurFra	Murg(TG)–Frauenfeld	212	390	580		pluvial inférieur	10501–10513
MurMur	Murg(AG)–Murgenthal	207	419	637		pluvial inférieur	20661–20673
MurWae	Murg(TG)–Wängi	78.9	466	650		pluvial inférieur	10501–10502
NecMog	Necker–Mogelsberg, Aachsäge	88.2	606	959		nivo-pluvial préalpin	10441–10443
PleChu	Plessur–Chur	263	573	1'850		nival alpin	10261–10274
RotRog	Rot–Roggwil, Buechägerten	53.6	436	586		pluvial inférieur	20672
SenTho	Sense–Thörishaus, Sensematt	352	555	1'068		nivo-pluvial préalpin	20301–20321
SimObr	Simme–Oberried/Lenk	35.7	1'096	2'370	34.6	b-glaciaire	20121*
SimObw	Simme–Oberwil	344	777	1'640	3.7	nival de transition	20121–20136
SioVui	Sionge–Vuippens	45.3	681	862		nivo-pluvial préalpin	20271
SitApp	Sitter–Appenzell	74.2	769	1'252	0.1	nival de transition	10461–10462
SitStG	Sitter–St.Gallen, Bruggen/Au	261	576	1'040		nivo-pluvial préalpin	10461–10483*
SomSom	Somvixer Rhein–Somvix	21.8	1'490	2'450	6.7	b-glacio-nival	10041
SorDel	Sorne–Delémont	241	406	808		nivo-pluvial jurassien	10661–10664
SteKal	Steinenbach–Kaltbrunn	19.1	451	1'112		nivo-pluvial préalpin	40085
SteSte	Steinach–Steinach	24.2	406	710		pluvial supérieur	10363
SuzSon	Suze–Sonceboz	150	642	1'050		nivo-pluvial jurassien	20531–20532
TasGru	Taschinasbach–Grüschi	63.0	666	1'768		nival alpin	10305
ThuAnd	Thur–Andelfingen	1'696	356	770		pluvial supérieur	10421–10524*
ThuHal	Thur–Halden	1'085	456	910		nivo-pluvial préalpin	10421–10492
ThuJon	Thur–Jonschwil	493	534	1'030		nivo-pluvial préalpin	10421–10455*
ThuSte	Thur–Stein, Iltishag	84.0	850	1'448		nival de transition	10421–10423*
ToeNef	Töss–Neftenbach	342	389	650		pluvial inférieur	10531–10552
UrnHun	Urnäsch–Hundwil	64.5	746	1'085		nivo-pluvial préalpin	10471–10472
WLuzwe	Weisse Lütschine–Zweilütschinen	164	650	2'170	17.6	a-glacio-nival	20061–20065

Abbildung 3.1 gibt schliesslich eine Übersicht zur Messdauer der ausgewählten Einzugsgebiete und zeigt gleichzeitig, welche Zeitabschnitte für Kalibrierung und Validierung verwendet wurden. Einige Abweichung vom beschriebenen Kalibrierungsschema bildet der Grosstalbach bei Isenthal (siebtes Gebiet in Gruppe 1), welcher wegen schlechter Kalibrierungsresultate in der Periode 1994–1997 auf die Jahre 1984–1987 kalibriert werden musste.

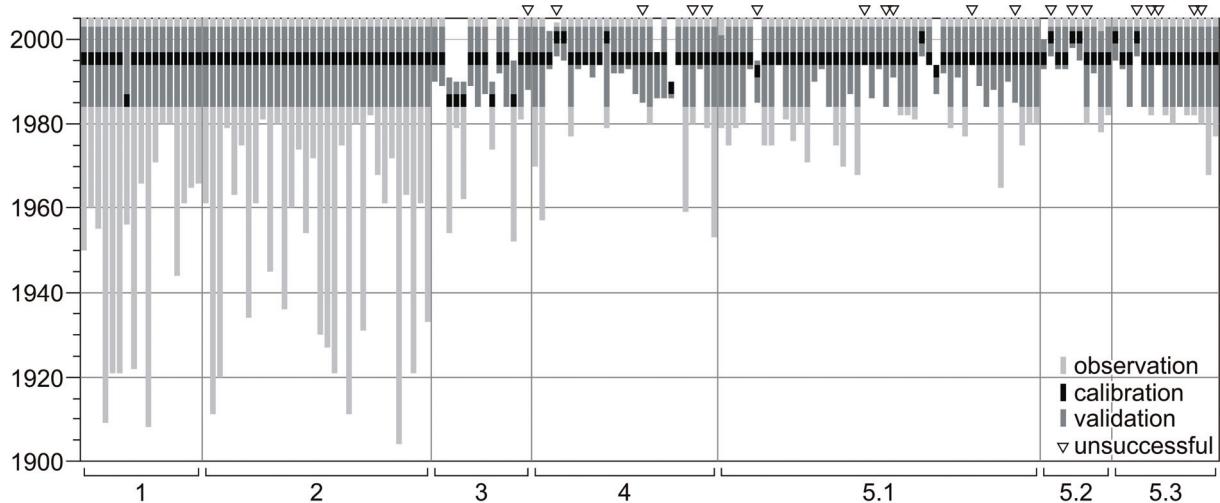


Figure 3.1: Observation, calibration and validation period for 159 catchments examined, per group (according to **Table 3.1**) in alphabetical order. Catchments which were excluded later because of unsuccessful calibration are marked specifically.

Abbildung 3.1: Beobachtungs-, Kalibrierungs- und Validierungszeitraum für 159 untersuchte Einzugsgebiete, pro Gruppe (gemäß **Tabelle 3.1**) in alphabetischer Reihenfolge. Später aufgrund mangelhafter Kalibrierungsresultate ausgeschlossene Gebiete sind speziell gekennzeichnet.

3.1.4 Standardgütemasse

Gütemasse sind das wichtigste Hilfsmittel einer Kalibrierung: Sie erlauben es, die Übereinstimmung zwischen einer beobachteten Grösse und deren Simulation objektiv zu beurteilen. Somit kann ermittelt werden, ob Veränderungen in den Modellparametern zu einer Verbesserung oder Verschlechterung der Simulation geführt haben. Anzumerken ist für sämtliche Gütemasse, dass sie zwar objektiv sind, die Anpassungsgüte des Modells an die Beobachtung aber immer nur mit Einschränkungen wiedergeben können. So weist beispielsweise die weitverbreitete Modelleffizienz nach NASH UND SUTCLIFFE (1970) bei hohen Abflüssen eine grössere Sensitivität auf, wird aber gleichzeitig auch durch lange Niedrigwasserperioden in Richtung zu hoher Güten verfälscht. Im Prinzip sollten also die Resultate einer Simulation immer auch visuell überprüft werden, um die Aussage eines Gütemasses einschätzen zu können. In Zweifelsfällen wurde dies auch für die vorliegende Arbeit praktiziert, eine systematische visuelle Überprüfung aller Simulationsresultate hingegen hätte einen nicht zu bewältigenden Aufwand dargestellt.

Die Gütemasse werden hier einzig auf die Abfusse bezogen, wie dies üblicherweise der Fall ist. Der Einbezug von detaillierten Messungen anderer Grössen – beispielsweise der Bodenfeuchte (siehe BLÖSCHL UND GRAYSON, 2002) oder der Schneeverteilung (siehe ZAPPA, 2002) – kann zwar wichtige zusätzliche Informationen einbringen und die Plausibilität der gefundenen Modellparameter erhöhen (KIRCHNER, 2006); bei der hier angestrebten grossflächigen Anwendung ist dies aufgrund der mangelhaften Datengrundlage jedoch nicht realisierbar.

Eines der weitverbreitetsten Gütemasse ist wie schon erwähnt die Modelleffizienz nach NASH UND SUTCLIFFE (1970):

$$NSE = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t - \bar{Q})^2 - \sum_{t=1}^n (Q_t - q_t)^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t - \bar{Q})^2}, \quad NSE \in [-\infty, 1] \quad \text{Gleichung 3.1}$$

wo	Q_t	beobachteter Abfluss zum Zeitpunkt t
	q_t	simulierter Abfluss zum Zeitpunkt t
	\bar{Q}	mittlerer beobachteter Abfluss
	n	Anzahl beobachteter Zeitpunkte

Bei $NSE = 1$ ist die Simulation der beobachteten Ganglinie perfekt gelungen, bei einem Wert von $NSE = 0$ erreicht die Simulation nur noch diejenige Güte, welche man unter Verwendung des gemessenen Abflussmittelwertes als Modell erhält; ist die Simulation noch schlechter gelungen, nimmt NSE negative Werte an.

Aufgrund ihrer Formulierung ist die Nash-Sutcliffe-Effizienz abhängig von der Varianz der verwendeten Beobachtungsdaten, und folglich lässt sich nicht objektiv festlegen, ab welchem Wert NSE als "gut" bezeichnet werden kann; im Prinzip müssten für Gebiete mit einer grossen Varianz der beobachteten Abflüsse sogar höhere Effizienzen gefordert werden (ECKHARDT, 2002). Vorschläge zur Behebung dieser Probleme haben beispielsweise SCHAEFLI UND GUPTA (2007) im Rahmen einer kritische Be trachtung der Nash-Sutcliffe-Effizienz erarbeitet. Um aber die Vergleichbarkeit mit anderen Studien sicherzustellen, werden hier keine Modifikationen an NSE vorgenommen. Aus demselben Grund ist auch die von LEGATES UND McCABE (1999) vorgebrachte Verwendung geringerer Potenzen wenig praktikabel; sie soll die Inflation der Summandendifferenzen verhindern und somit der übermässigen Bewertung hoher Abflüsse entgegenwirken. Die gezwungenermassen etwas subjektiven Anforderungen an NSE im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden in Kapitel 8.7 noch zu erläutern sein; dabei wird eine spezifisch auf die Regionalisierung angepasste Einschätzung der NSE -Werte vorgestellt.

Um die bereits angesprochene Sensitivität von NSE auf hohe Abflüsse etwas zu entschärfen, wird das Mass auch auf Basis der logarithmisierten Abflüsse berechnet:

$$NSE_{ln} = \frac{\sum_{t=1}^n (\ln(Q_t) - \ln(\bar{Q}))^2 - \sum_{t=1}^n (\ln(Q_t) - \ln(q_t))^2}{\sum_{t=1}^n (\ln(Q_t) - \ln(\bar{Q}))^2}, \quad NSE_{ln} \in [-\infty, 1] \quad \text{Gleichung 3.2}$$

Durch die Logarithmisierung werden Unterschiede in mittleren und tiefen Abflüssen stärker gewichtet, während hohe Abflüsse einen geringeren Einfluss auf das Mass nehmen. Mit NSE_{ln} steht somit eine Kennzahl zur Verfügung, mit welcher beispielsweise Rezessionsäste und Niedrigwasserperioden besser bewertet werden können – für die hier angestrebte Kalibrierung kann NSE_{ln} dazu dienen, die hydrologische "Richtigkeit" der Ganglinie ausserhalb der Perioden mit hohen Abflüssen sicherzustellen.

Noch weiter in diese Richtung geht das volumetrische Gütemass $DVOL$. Es bewertet die Abweichung zwischen Beobachtung und Simulation bezüglich der Wasserbilanz und ist somit ebenfalls ein wichtiger Indikator für die hydrologische Plausibilität der Gebietssimulation. Bei der Kalibrierung am einfachsten zu handhaben ist die mittlere relative (prozentuale) Abweichung:

$$DVOL = \left| \frac{\sum_{t=1}^n \frac{q_t}{Q_t} - 1}{n} \right|, \quad DVOL \in [0, \infty] \quad \text{Gleichung 3.3}$$

Anschaulicher ist aber die mittlere absolute Abweichung pro Jahr; sie wird in dieser Arbeit bei der vergleichenden Beurteilung verschiedener Gebiete zum Einsatz kommen:

$$DVOL'_a = \frac{\sum_{t=1}^n (q_t - Q_t)}{n} \cdot m, \quad DVOL'_a = [mm \ a^{-1}] \quad \text{Gleichung 3.4}$$

wo m Anzahl Abflusswerte pro Jahr (für stündliche Abflüsse: 8'760 in einem normalen Jahr, 8'784 in einem Schaltjahr)

3.2 Methodik

3.2.1 Kombination der Standardgütemasse für PREVAH

Wie aus den obigen Ausführungen bereits klar wurde, besteht bei der Kalibrierung einerseits ein Defizit an Informationen, andererseits haben Gütemasse – in diesem Fall NSE – einige Schwächen. Die Verwendung von nur einem einzigen Gütekriterium führt deshalb oft zu unbefriedigenden Kalibrierungsresultaten (ECKHARDT, 2002), zumal die darin enthaltenen Informationen gemäss WAGENER ET AL. (2003) meist nicht zur Identifikation aller freien Modellparameter ausreichen. Eine Möglichkeit zur Verminderung dieser Probleme ist die Kombination verschiedener Gütemasse; Vorschläge dazu haben beispielsweise GUPTA ET AL. (1998), SEIBERT UND McDONNELL (2002), MADSEN (2000, 2003) sowie MERZ (2002) gemacht.

Da die kalibrierten Parameter als Grundlage für eine Regionalisierung dienen, sollten sie möglichst repräsentativ für das Gebiet und zwischen den verschiedenen Gebieten möglichst gut vergleichbar sein. Somit sind plausible Parameterwerte von grosser Wichtigkeit und haben Vorrang vor der perfekten Simulation einzelner Gebiete. Die Kombination verschiedener Gütekriterien bildet dabei die Voraussetzung für Parameterschätzungen, welche zwar in der Kalibrierung etwas tiefere Effizienzen aufweisen, in der Validierung dafür aber umso robustere Resultate erzielen (MERZ UND BLÖSCHL, 2004).

Im Folgenden wird auf Basis von NSE , NSE_{ln} und $DVOL$ ein kombiniertes Gütemass entwickelt. Zusätzlich zum Gesamtzeitraum werden als Weiterentwicklung auch die einzelnen in der Simulation enthaltenen Monate und Jahre berücksichtigt; damit soll eine ausgeglichene Kalibrierung erreicht werden. Gleichzeitig werden benutzerdefinierte Wertebereiche für die einzelnen Gütemasse eingesetzt, welche nur den interessanten Übergangsbereich zwischen guten und schlechten Modellresultaten beurteilen; sehr gute und sehr schlechte Resultate werden dabei nicht weiter differenziert (vgl. SEIBERT, 1997).

Drei Bezugszeiträume für die Gütemasse

Als erstes wird die Betrachtung unterschiedlicher Bezugszeiträume für die Gütemasse eingeführt. Vorerst werden die Standardgütemasse NSE (Gleichung 3.1), NSE_{ln} (Gleichung 3.2) und $DVOL$ (Gleichung 3.3) wie in ihrer normalen Anwendung für den gesamten Zeitraum berechnet. Dies ergibt die Gütemasse NSE_{full} , $NSE_{ln,full}$ und $DVOL_{full}$.

Weiter werden NSE , NSE_{ln} und $DVOL$ für alle Jahre separat berechnet und dann miteinander verglichen. Bewertet wird dabei, wie stark sich die Gütemasse von Jahr zu Jahr unterscheiden, wofür als Mass die Standardabweichung verwendet wird. Bevorzugt werden ausgeglichenere Modellläufe, also solche mit geringerer Standardabweichung für die Ergebnisse der einzelnen Jahre. Im Gegenzug werden Parametersätze tiefer bewertet, wenn sie zwar für einzelne Jahre sehr gute Resultate liefern, in anderen aber deutlich schlechtere (oder umgekehrt für einzelne Jahre schlechte, in anderen Jahren aber deutlich bessere). Damit stehen die Gütemasse $SNSE_{ann}$, $SNSE_{ln,ann}$ und $SDVOL_{ann}$ zur Verfügung.

Analog werden schliesslich auch die Unterschiede zwischen den monatlichen Gütemassen bewertet. Dazu werden NSE , NSE_{ln} und $DVOL$ für alle in der Betrachtungsperiode enthaltenen Abflusswerte von Januar, Februar, usw. erhoben. Anschliessend wird wiederum die Standardabweichung berechnet, wodurch die Gütemasse $SNSE_{mon}$, $SNSE_{ln,mon}$ und $SDVOL_{mon}$ entstehen.

Benutzerdefinierter Bewertungsbereich

Als zweiter Punkt folgt der Einbezug benutzerdefinierter Wertebereiche. Die im vorherigen Abschnitt vorgestellten neun Gütemasse werden mit benutzerdefinierten Minimal- und Maximalwerten auf den

Zielbereich 0 (am schlechtesten) bis 1 (am besten) transformiert. Dazu werden die Masse $ALIN$, $ALOG$ und $AVOL$ eingeführt, welche sich auf NSE , NSE_{ln} respektive $DVOL$ beziehen.

Die für den gesamten Zeitraum berechneten Gütemasse lauten:

$$ALIN_{full} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } NSE_{full} \leq NSE_{full,min} \\ \frac{NSE_{full} - NSE_{full,min}}{NSE_{full,max} - NSE_{full,min}} & \text{wenn } NSE_{full,max} > NSE_{full} > NSE_{full,min} \\ 1 & \text{wenn } NSE_{full} \geq NSE_{full,max} \end{cases} \quad \text{Gleichung 3.5}$$

$$ALOG_{full} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } NSE_{ln,full} \leq NSE_{ln,full,min} \\ \frac{NSE_{ln,full} - NSE_{ln,full,min}}{NSE_{ln,full,max} - NSE_{ln,full,min}} & \text{wenn } NSE_{ln,full,max} > NSE_{ln,full} > NSE_{ln,full,min} \\ 1 & \text{wenn } NSE_{ln,full} \geq NSE_{ln,full,max} \end{cases} \quad \text{Gleichung 3.6}$$

$$AVOL_{full} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } DVOL_{full} \leq DVOL_{full,min} \\ \frac{DVOL_{full} - DVOL_{full,min}}{DVOL_{full,max} - DVOL_{full,min}} & \text{wenn } DVOL_{full,max} > DVOL_{full} > DVOL_{full,min} \\ 1 & \text{wenn } DVOL_{full} \geq DVOL_{full,max} \end{cases} \quad \text{Gleichung 3.7}$$

Analog definieren sich die auf jährliche und monatliche Standardabweichungen bezogenen Masse:

$$ALIN_{ann} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } SNSE_{ann} \leq SNSE_{ann,min} \\ 1 - \frac{SNSE_{ann} - SNSE_{ann,min}}{SNSE_{ann,max} - SNSE_{ann,min}} & \text{wenn } SNSE_{ann,max} > SNSE_{ann} > SNSE_{ann,min} \\ 1 & \text{wenn } SNSE_{ann} \geq SNSE_{ann,max} \end{cases} \quad \text{Gleichung 3.8}$$

$$ALOG_{ann} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } SNSE_{ln,ann} \leq SNSE_{ln,ann,min} \\ 1 - \frac{SNSE_{ln,ann} - SNSE_{ln,ann,min}}{SNSE_{ln,ann,max} - SNSE_{ln,ann,min}} & \text{wenn } SNSE_{ln,ann,max} > SNSE_{ln,ann} > SNSE_{ln,ann,min} \\ 1 & \text{wenn } SNSE_{ln,ann} \geq SNSE_{ln,ann,max} \end{cases} \quad \text{Gleichung 3.9}$$

$$AVOL_{ann} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } SDVOL_{ann} \leq SDVOL_{ann,min} \\ 1 - \frac{SDVOL_{ann} - SDVOL_{ann,min}}{SDVOL_{ann,max} - SDVOL_{ann,min}} & \text{wenn } SDVOL_{ann,max} > SDVOL_{ann} > SDVOL_{ann,min} \\ 1 & \text{wenn } SDVOL_{ann} \geq SDVOL_{ann,max} \end{cases} \quad \text{Gleichung 3.10}$$

sowie

$$ALIN_{mon} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } SNSE_{mon} \leq SNSE_{mon,min} \\ 1 - \frac{SNSE_{mon} - SNSE_{mon,min}}{SNSE_{mon,max} - SNSE_{mon,min}} & \text{wenn } SNSE_{mon,max} > SNSE_{mon} > SNSE_{mon,min} \\ 1 & \text{wenn } SNSE_{mon} \geq SNSE_{mon,max} \end{cases} \quad \text{Gleichung 3.11}$$

$$ALOG_{mon} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } SNSE_{ln,mon} \leq SNSE_{ln,mon,min} \\ 1 - \frac{SNSE_{ln,mon} - SNSE_{ln,mon,min}}{SNSE_{ln,mon,max} - SNSE_{ln,mon,min}} & \text{wenn } SNSE_{ln,mon,max} > SNSE_{ln,mon} > SNSE_{ln,mon,min} \\ 1 & \text{wenn } SNSE_{ln,mon} \geq SNSE_{ln,mon,max} \end{cases} \quad \text{Gleichung 3.12}$$

$$AVOL_{mon} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } SDVOL_{mon} \leq SDVOL_{mon,min} \\ 1 - \frac{SDVOL_{mon} - SDVOL_{mon,min}}{SDVOL_{mon,max} - SDVOL_{mon,min}} & \text{wenn } SDVOL_{mon,max} > SDVOL_{mon} > SDVOL_{mon,min} \\ 1 & \text{wenn } SDVOL_{mon} \geq SDVOL_{mon,max} \end{cases} \quad \text{Gleichung 3.13}$$

Die für diese Arbeit verwendeten Minimal- und Maximalwerte sind in **Tabelle 3.3** aufgeführt; sie basieren auf Erfahrungswerten und haben sich in der Anwendung bewährt.

Table 3.3: User-defined minimum and maximum values for assessing efficiency scores.**Tabelle 3.3:** Benutzerdefinierte Minima und Maxima zur Bewertung der Gütemasse.

Score	min	max	Score	min	max	Score	min	max
NSE_{full}	0.25	0.95	$SNSE_{ann}$	0.01	0.10	$SNSE_{mon}$	0.02	0.50
$NSE_{ln,full}$	0.25	0.95	$SNSE_{ln, ann}$	0.01	0.10	$SNSE_{ln, mon}$	0.02	0.50
$DVOL_{full}$	0.01	0.10	$SDVOL_{ann}$	0.02	0.15	$SDVOL_{mon}$	0.02	0.10

Kombination der Gütemasse

Schliesslich werden die insgesamt neun oben aufgeführten elementaren Gütekriterien – drei Gütemasse (NSE , NSE_{ln} , $DVOL$) mit jeweils drei Betrachtungsvarianten (gesamt, jährlich, monatlich) – über frei definierbare Gewichte $w_{i,j}$ zu einem Gesamtgütemass $ATOT$ zusammengefügt. Dabei werden als Zwischenschritt die Teilgütemasse $ALIN$, $ALOG$ und $AVOL$ berechnet, welche die drei Betrachtungsvarianten zusammenfassen:

$$ALIN = \left(w_{1,1} \cdot ALIN_{full} + w_{1,2} \cdot ALIN_{ann} + w_{1,3} \cdot ALIN_{mon} \right) / \sum_{i=1}^3 w_{1,i} \quad \text{Gleichung 3.14}$$

$$ALOG = \left(w_{2,1} \cdot ALOG_{full} + w_{2,2} \cdot ALOG_{ann} + w_{2,3} \cdot ALOG_{mon} \right) / \sum_{i=1}^3 w_{2,i} \quad \text{Gleichung 3.15}$$

$$AVOL = \left(w_{3,1} \cdot AVOL_{full} + w_{3,2} \cdot AVOL_{ann} + w_{3,3} \cdot AVOL_{mon} \right) / \sum_{i=1}^3 w_{3,i} \quad \text{Gleichung 3.16}$$

Daraus berechnet sich schliesslich das Gesamtgütemass $ATOT$:

$$ATOT = (W_1 \cdot ALIN + W_2 \cdot ALOG + W_3 \cdot AVOL) / \sum_{i=1}^3 W_i \quad \text{wo } W_i = \sum_{j=1}^3 w_{i,j} \quad \text{Gleichung 3.17}$$

Die Werte für die Gewichte $w_{i,j}$ sind in **Tabelle 3.4** aufgeführt. Den auf die gesamte Periode bezogenen Gütemassen wurde jeweils das höchste Gewicht zugewiesen, wobei der Volumenfehler $AVOL_{full}$ insgesamt am höchsten gewichtet ist, gefolgt von der Nash-Sutcliffe-Effizienz $ALIN_{full}$. Die jährlichen und monatlichen Standardabweichungen der Gütemasse werden jeweils tiefer gewichtet. Auch in diesem Fall haben sich die aus der Anwendungserfahrung abgeleiteten Werte bewährt.

Table 3.4: User defined weights used for calculation of summary score ATOT.**Tabelle 3.4:** Benutzerdefinierte Gewichte zur Berechnung des Gesamtgütemasses ATOT.

Weight	Reference	Value	Weight	Reference	Value	Weight	Reference	Value
$w_{1,1}$	$ALIN_{full}$	6	$w_{2,1}$	$ALOG_{full}$	3	$w_{3,1}$	$AVOL_{full}$	10
$w_{1,2}$	$ALIN_{ann}$	4	$w_{2,2}$	$ALOG_{ann}$	2	$w_{3,2}$	$AVOL_{ann}$	4
$w_{1,3}$	$ALIN_{mon}$	2	$w_{2,3}$	$ALOG_{mon}$	1	$w_{3,3}$	$AVOL_{mon}$	3

Für die Kalibrierung der Bilanzkorrekturfaktoren ($PKOR$ und $SNOKOR$) hat es sich als günstig erwiesen, Gewichte zu verwenden, welche die Wasserbilanz stark betonen und somit vor allem auf eine Verringerung des Volumenfehlers ($DVOL$) zielen. Dazu werden die Gewichte für $ALIN$ ($w_{1,1} - w_{1,3}$) und $ALOG$ ($w_{2,1} - w_{2,3}$) auf 1 gesetzt, für $AVOL$ hingegen auf $w_{3,1} = 10$ ($AVOL_{full}$), $w_{3,2} = 8$ ($AVOL_{ann}$) und $w_{3,3} = 4$ ($AVOL_{mon}$). Die Bewertungsbereiche (vgl. **Tabelle 3.3**) bleiben dabei unverändert.

Als zusammenfassendes Beispiel zeigt **Abbildung 3.2** die Gütemasse des Parameterpaars $CG1H$ (jeweils Abszisse) und $SLZIMAX$ (jeweils Ordinate) für die Bibere bei Kerzers. Es wird veranschaulicht, wie die neun elementaren Gütemasse NSE_{full} , $NSE_{ln,full}$, $DVOL_{full}$, $SNSE_{ann}$, $SNSE_{ln,ann}$, $SDVOL_{ann}$, $SNSE_{mon}$, $SNSE_{ln,mon}$ und $SDVOL_{mon}$ zu den Teilgütemassen $ALIN$, $ALOG$ und $AVOL$ und schliesslich zum Gesamtgütemass $ATOT$ zusammengefügt werden. Die Vorzüge der gewichteten Kombination können deutlich anhand des volumetrischen Gütemasses $DVOL$ aufgezeigt werden: Während $DVOL$ über die

gesamte Kalibrierungsperiode ($DVOL_{full}$) sowie in den Standardabweichungen der Jahresresultate ($SDVOL_{ann}$) nur schwache Sensitivität zeigt, findet sich in den Standardabweichungen der Monatsresultate ($SDVOL_{mon}$) ein deutlicher Bereich mit guten Resultaten, welcher sich auch im Teilgütemass $AVOL$ und schliesslich im Gesamtgütemass $ATOT$ zeigt. Auch bei NSE bringen die jahres- und monatsbezogenen Gütemasse einen Informationsgewinn, indem der bei NSE_{full} relativ flache Bereich hoher Modellgüten zusätzlich differenziert wird.

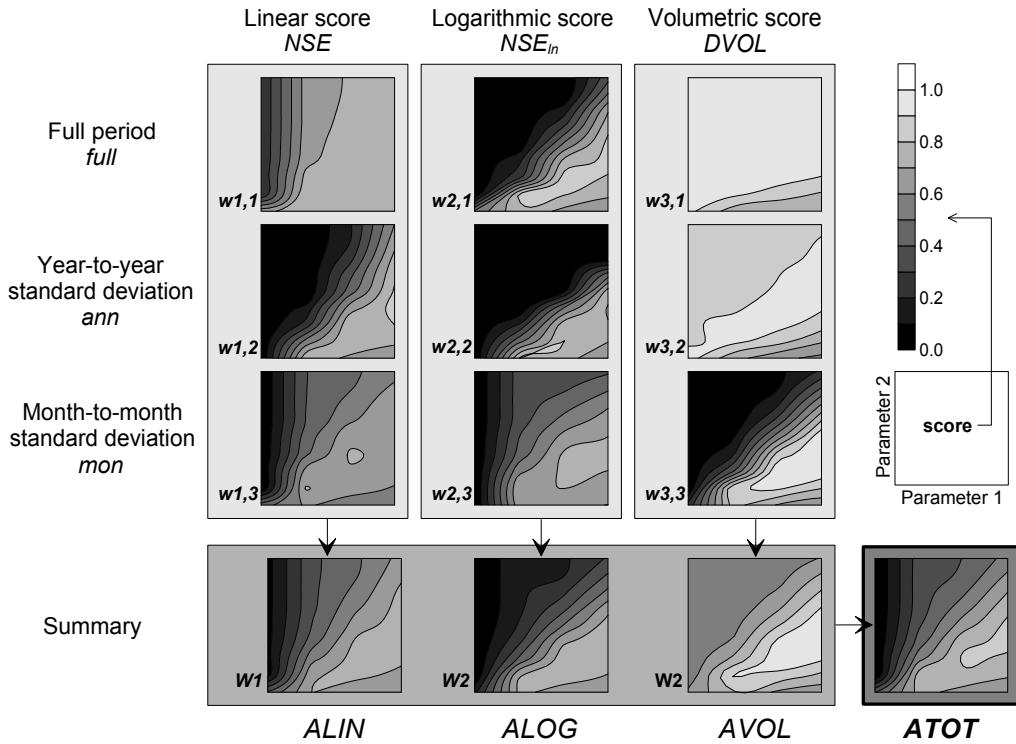


Figure 3.2: Set-up of partial scores ALIN, ALOG and AVOL as well as total score ATOT from totally nine elementary scores.

Abbildung 3.2: Herleitung der Teilgütemasse ALIN, ALOG und AVOL sowie des Gesamtgütemasses ATOT aus insgesamt neun elementaren Gütemassen.

3.2.2 Suchmodus und Abbruchkriterien

Wie schon im einleitenden Abschnitt dieses Kapitels beschrieben, kommen für die Kalibrierung aus Gründen der effizienten Datenverarbeitung und der Objektivität nur automatische Verfahren in Frage. Zur Suche nach Parameteroptima sind nun verschiedenste Algorithmen denkbar (siehe z. B. SEN UND STOFFA, 1995; DAHM, 2001). Das Verfahren sollte einerseits möglichst sparsam mit Rechenzeit umgehen, da eine grosse Zahl an Kalibrierungen notwendig ist (159 Einzugsgebiete, dazu zahlreiche Detailuntersuchungen und Sensitivitätsanalysen an ausgewählten Testgebieten). Andererseits sollte das Verfahren aber auch gut nachvollziehbar sein und nicht zuletzt gute Resultate in der Anwendung liefern.

Grundsätzlich wurde für die Kalibrierung ein paarweises Vorgehen gewählt: Mit jeweils zwei Modellparametern, welche einen inhaltlichen Zusammenhang haben, wird ein Parameterraum gebildet, in welchem nach einem Optimum gesucht wird. Der zu untersuchende Parameterraum wird dabei jeweils durch Erfahrungswerte oder physikalische Limiten begrenzt. Bei der paarweisen Kalibrierung stellt sich das Problem, dass Änderungen in den zwei jeweils betrachteten Parametern auch Auswirkungen auf die Optima derjenigen Parameter haben, welche gerade nicht kalibriert werden; dadurch findet ständig eine leichte Veränderung der Kalibrierungsgrundlagen statt. Zwar wäre wünschbar, dass die Parameter eines Modells völlig unabhängig sind und sich nicht gegenseitig beeinflussen, bei komplexen hydrologischen Modellen wie z. B. PREVAH ist dieser Anspruch in der Praxis aber kaum jemals erfüllt (PERRIN ET AL., 2001) – konkret wird dies in Kapitel 5.3.2 noch genauer untersucht werden. Der angesprochenen Schwierigkeit wird hier auf verschiedene Weise begegnet:

- Das paarweise Verfahren wird mehrmals durchlaufen, so dass sich die Parameter aufeinander einstellen können.
- Die Parameterpaare werden so gewählt, dass Parameter mit gegenseitiger Beeinflussung möglichst gemeinsam in einem Paar kalibriert werden.
- Die Abfolge der Parameterpaare wird so gewählt, dass zuerst die Paare mit besonders sensitiven Parametern kalibriert werden. Sie wirken am stärksten auf das Gesamtresultat, und durch ihre frühe Kalibrierung werden sie nicht durch bereits erfolgte Einstellungen der weniger sensiblen Parameter beeinflusst.
- Durch die Kombination verschiedener Standardgütemasse zum Gesamtgütemass $ATOT$ werden zusätzliche Informationen in die Kalibrierung eingebracht, welche die gefundenen Optima etwas robuster machen.

Das paarweise Vorgehen ist in der Anwendung deutlich weniger rechenintensiv als Verfahren, welche alle Parameter gleichzeitig betrachten und damit sehr viele Parameterkombinationen evaluieren müssen – wie z. B. die Monte-Carlo-Methode (z. B. GLUE; BEVEN UND BINLEY, 1992), welche in Kapitel 6 noch zum Einsatz kommen wird. Allerdings lässt sich der Aufwand auch bei gleichzeitiger Betrachtung aller Parameter durch geschickte mathematische Verfahren reduzieren (z. B. PEST; DOHERTY, 2002).

Für die Suche nach geeigneten Parameterkombinationen wurden zwei Verfahren erprobt (**Abbildung 3.3**):

- Beim *Grid-Search-Verfahren* (**Abbildung 3.3**, links) wird jeweils ein regelmässiges Gitter über den betrachteten Parameterraum gelegt und das Modell für alle Gitterschnittpunkte durchgerechnet. Bei einem 6×6 -Gitter ergibt dies beispielsweise 36 Modellläufe. Der Gitterpunkt mit der besten Gesamteffizienz $ATOT$ wird als Parametereinstellung festgelegt. Wird das Verfahren mehrmals durchlaufen, kann der betrachtete Parameterraum allenfalls um das provisorisch gefundene Optimum herum eingeschränkt werden. Vorteilhaft bei diesem Vorgehen ist vor allem, dass der Überblick über die Modellgüten den gesamten Parameterraum abdeckt, wie dies beispielsweise in **Abbildung 3.2** der Fall ist. Nachteilig ist aber die Tatsache, dass die Sondierung auch Bereiche weit ab vom Optimum mit genau derselben Präzision abdeckt wie Bereiche nahe des Optimums. Somit ist ein Teil des Rechenaufwandes überflüssig.
- Beim *iterativen Verfahren* (**Abbildung 3.3**, rechts) wird der Parameterraum in neun gleichmässige Teilbereiche unterteilt. Für die vier Bereichsschnittpunkte im Inneren des Parameterraumes wird das Modell durchgerechnet. Anschliessend werden diejenigen fünf Teilbereiche ($\frac{5}{9}$ des Parameterraumes) ausgeschlossen, welche nicht an den Punkt mit dem besten Gütemass $ATOT$ angrenzen. Mit dem verbleibenden Parameterraum (vier Teilbereiche oder $\frac{4}{9}$ des ursprünglichen Raumes) wird anschliessend wieder genau gleich verfahren, es werden also erneut neun Teilbereiche unterschieden und die fünf am wenigsten erfolgversprechenden eliminiert, und so weiter. Auch diese Methode kann für alle Parameterpaare mehrmals hintereinander durchgeführt werden, wobei eine fortschreitende Einschränkung des Parameterbereiches durch den Benutzer nicht nötig ist.

Die Anwendungserfahrung (vgl. CORTI, 2003) zeigte keine klare Präferenz für eine der beiden Varianten. Die Wahl fiel schliesslich auf das iterative Verfahren, weil es um einiges effektiver erscheint: Während sich bei der Gittersuche mit 36 Modelldurchläufen eine Zielgenauigkeit von $2.8 \cdot 10^{-2}$ ($1 \cdot 6^{-2} = \frac{1}{36}$, bezogen auf den zu untersuchenden Parameterraum) erreichen lässt, erlaubt dieselbe Anzahl Modellrechnungen neun Iterationen und damit eine Genauigkeit von $6.8 \cdot 10^{-4}$ ($4^9 \cdot 9^{-9}$).

Es ist nun allerdings nicht sinnvoll, beim iterativen Verfahren gleich von Beginn weg eine maximale Genauigkeit anzustreben. Deshalb werden in einem ersten Durchgang alle Parameter (resp. Parameterpaare) mit zwei Iterationen grob kalibriert, also mit einer Rastergenauigkeit von 0.20 ($4^2 \cdot 9^{-2} = \frac{16}{81}$). Diese Parameterwerte dienen dann als Grundlage für eine genauere Suche mit maximal acht Iterationen (Genauigkeit $4^8 \cdot 9^{-8} = 1.5 \cdot 10^{-3}$). Weitere Suchdurchgänge auf Basis der so eingestellten Parameter können allenfalls folgen. Während des Iterationsvorganges wird dabei stets geprüft, ob überhaupt noch eine Verbesserung der Gütemasse stattfindet; als Minimalwert wird eine Steigerung von $ATOT$ um $2.5 \cdot 10^{-3}$ gefordert. Falls der Unterschied zwischen dem $ATOT$ der aktuellen Iteration und demjenigen der vorigen Iteration unter diesem Schwellenwert liegt, wird das Iterationsverfahren des aktuellen Parameterpaars abgebrochen, und das nächste Parameterpaar wird bearbeitet.

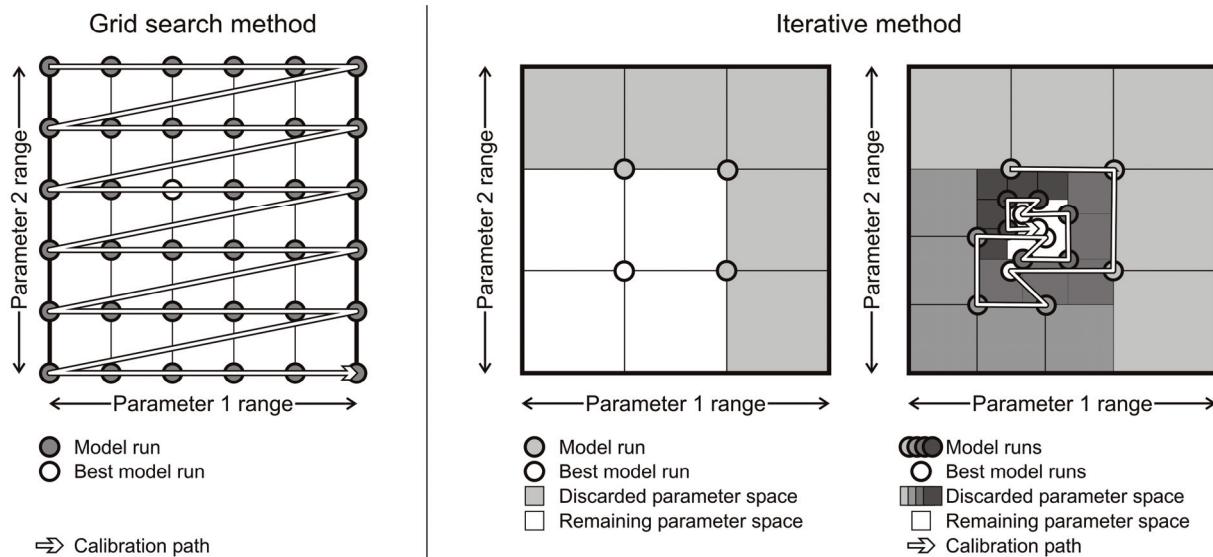


Figure 3.3: Two search methods for well-performing parameter combinations in a two-dimensional parameter space. For the present study, the iterative method (right) was used.

Abbildung 3.3: Zwei Methoden zur Suche nach geeigneten Parameterkombinationen in einem zweidimensionalen Parameterraum. In dieser Arbeit wurde das iterative Verfahren (rechts) verwendet.

3.2.3 Parameterpaare

Die Gruppierung der Paare für die Kalibrierung (**Tabelle 3.5**) hat zum Ziel, inhaltlich zusammenhängende Parameter gegeneinander zu kalibrieren. Damit soll sichergestellt werden, dass für Parameter mit gemeinsamem Prozessbezug auch tatsächlich ein optimales Resultat erreicht wird. Für diese Gruppierung müssen die Parameter *T0* und *PERC* jeweils zweimal eingesetzt werden: *T0*, weil ein enger Bezug sowohl zu *TMFSNOW* wie auch zu *RMFSNOW* besteht, *PERC*, weil dadurch sowohl *KIH* wie auch *K2H* wesentlich beeinflusst werden.

Wie schon in Kapitel 2 beschrieben, werden *TGR*, *TTRANS* und *CRFR* auf vordefinierte Werte festgelegt, *BETA* wird durch PREVAH in Abhängigkeit von Höhe und Bodentiefe automatisch parametrisiert, und *TMFMIN* sowie *TMFMAX* sind durch *TMFSNOW* ersetzt worden.

Die Abfolge der Parameterpaare in der Kalibrierung orientiert sich gleichsinnig zum Ablauf des Modellschemas (**Abbildung 2.7**): Zuerst werden mit der Bilanzkorrektur des Niederschlags und mit der Schneeschmelze die wesentlichen Eingangsgrößen behandelt, danach folgen die Parameter der Abflussbildungsmodule von den schnellen hin zu den langsamen Komponenten. Zuletzt findet falls nötig eine Kalibrierung der Parameter für die Eisschmelze statt. Andere Abfolgen wurden ebenfalls untersucht: Beispielsweise kann die Abflussbildung auch in umgekehrter Reihenfolge – von den langsamen hin zu den schnellen Komponenten – behandelt werden. Das hier verwendete Schema wurde im Laufe der ersten Kalibrierungsarbeiten entwickelt (CORTI, 2003) und hat sich seitdem bewährt.

Table 3.5: Grouping of parameters for pair-wise calibration, indicating initial values and calibration range; pair 8 applies to glaciated catchments only. Parameters which are set to constant values or parameterised internally complete the scheme.

Tabelle 3.5: Gruppierung der Parameter für die paarweise Kalibrierung sowie Startwerte und Kalibrierungsbereiche; Paar 8 kommt nur in vergletscherten Gebieten zur Anwendung. Parameter mit festgesetzten Werten oder interner Parametrisierung sind der Vollständigkeit halber ebenfalls angegeben.

Pair	Parameters	Parameter description and unit	Initial val.	Calibration range
1 ^a	<i>PKOR</i> <i>SNOKOR</i>	Precipitation adjustment [%] Snow adjustment [%]	0 0	-30 – 30 -50 – 50
2	<i>T0</i> <i>TMFSNOW</i>	Threshold temperature snowmelt [°C] Temperature melt factor for snow [mm d ⁻¹ K ⁻¹]	0 1.5	-1.00 – 1.00 0.10 – 3.00
3	<i>T0</i> <i>RMFSNOW</i>	Threshold temperature snowmelt [°C] Radiation melt factor for snow [mm h ⁻¹ K ⁻¹ W ⁻¹ m ²]	0 1·10 ⁻⁴	-1.00 – 1.00 5·10 ⁻⁵ – 3·10 ⁻⁴
4	<i>SGR</i> <i>K0H</i>	Threshold storage for surface runoff [mm] Storage time for surface runoff [h]	30 10	10 – 50 10 – 30
5	<i>K1H</i> <i>PERC</i>	Storage time for interflow [h] Percolation rate [mm h ⁻¹]	75 0.1	50 – 150 0.04 – 0.20
6	<i>CG1H</i> <i>SLZIMAX</i>	Storage time for quick baseflow [h] Maximum content of the quick baseflow storage [mm]	750 150	200 – 1'000 25 – 250
7	<i>K2H</i> <i>PERC</i>	Storage time for slow baseflow [h] Percolation rate [mm h ⁻¹]	2'500 0.1	1'000 – 4'000 0.04 – 0.20
8 ^b	<i>ICETMF</i> <i>ICERMF</i> <i>TGR</i> <i>TTRANS</i> <i>TMFMAX</i> <i>TMFMIN</i> <i>CRFR</i> <i>BETA</i>	Temperature melt factor for ice [mm d ⁻¹ K ⁻¹] Radiation melt factor for ice [mm h ⁻¹ K ⁻¹ W ⁻¹ m ²] Threshold temperature snowfall [°C] Transition temperature snow–rain [°C] Maximum temperature melt factor for snow [mm d ⁻¹ K ⁻¹] Minimum temperature melt factor for snow [mm d ⁻¹ K ⁻¹] Coefficient for re-freezing [-] Non-linearity parameter for infiltration module [-]	2 2·10 ⁻⁵ 0 0.75 2.00 1.00 0.5 internal parameterisation	0.50 – 3.00 1·10 ⁻⁵ – 3·10 ⁻⁴ no calibration " " " " " internal parameterisation

^a for this first pair, the weights used for calculation of the summary score *ATOT* emphasise volume error (cf. page 39)

^b for glaciated catchments only

3.2.4 Überprüfung der Resultate

Wie schon bei der Einführung von *NSE* erwähnt, kann ein Gütemass zwar eine objektive Bewertung abgeben, kann aber die subjektive Beurteilung der Ganglinie im Hinblick auf ein Kalibrierungsziel nicht völlig ersetzen – dies gilt auch für *ATOT* und somit für den gesamten automatischen Kalibrierungsprozess. Die visuelle Überprüfung der erhaltenen Ganglinien diente deshalb während der Detailausarbeitung des Kalibrierungsschemas als wichtige Zusatzinformation. Geachtet wurde vor allem auf die hydrologische Plausibilität der Simulation. Beispielsweise sollen die Grundwasserspeicher die ihren jeweils zugesetzte Funktion der Basisabflussbildung auch tatsächlich erfüllen, also einen plausiblen Jahresgang aufweisen und weder Funktionen des Zwischenabflusses übernehmen noch vom Zwischenabfluss substituiert werden. Mit dem hier vorgestellten Verfahren konnte dies durch geeignete Wahl der Gütemasse, des Suchalgorithmus und der Parameterpaare erreicht werden.

Im Vergleich zeigte das bekannte Kalibrierungsverfahren PEST (DOHERTY, 2002) zwar ähnlich gute Modelleffizienzen, die Parameterwerte waren aber deutlich weniger plausibel. Beispielsweise wurde der Bilanzkorrekturfaktor für Schnee (*SNOKOR*) auf sehr hohe Werte kalibriert, während das Basisabflussmodul fallweise über eine tiefe Perkolationsrate (*PERC*) und kurze Speicherzeiten (*K2H*, *CG1H*) praktisch ausgeschaltet wurde. Der Rechenaufwand ist indes vergleichbar. Genauere Untersuchungen zur Interaktion von PEST mit den freien Parametern von PREVAH (siehe z. B. WALTER, 2003)

könnten eventuell Verbesserungen bringen; weil die vorgeschlagene Kalibrierungsmethode aber gute Resultate und plausible Parameterwerte zeigt, wurde der Einsatz von PEST nicht weiter verfolgt.

3.3 Beispiel einer Kalibrierung

Abbildung 3.4 fasst nun anhand der Simme bei Oberwil (344 km^2) einen Kalibrierungsvorgang zusammen und zeigt, wie sich die Gütemasse im Laufe der Kalibrierung verändern. Das Verfahren besitzt die folgende Hierarchie:

- Anzahl Kalibrierungsdurchgänge (runs) 2
- Anzahl Parameterpaare (pairs) pro Kalibrierungsdurchgang 7 (+1 bei Vergletscherung)
- Maximale Anzahl Iterationen pro Parameterpaar 2 / 8 (run 1 / run 2)
- Anzahl Modelldurchläufe (steps) pro Iteration 4

Im ersten, kürzeren Kalibrierungsdurchgang (run 1) wird wie in Abschnitt 3.2.1 erläutert das Volumengütemass *AVOL* stark gewichtet, folglich lässt sich bei diesem Mass eine markante Verbesserung feststellen. Ähnlich, aber weniger stark reagiert das auf Niedrig- und Mittelwasser sensitive *ALOG*. *ALIN* und *ATOT* reagieren etwas später, zeigen aber am Ende von Kalibrierungsdurchgang 1 auch schon recht hohe Werte.

Im anschliessenden zweiten Kalibrierungsdurchgang (run 2) wird mit bis zu acht Iterationen genauer nach den jeweiligen Parameteroptima gesucht, und gleichzeitig kommt eine ausgewogenere Gewichtung der Gütemasse (**Tabelle 3.4**) zur Anwendung; alle Gütekriterien verbessern sich dabei noch etwas, *ALIN* und *ATOT* leicht stärker als die bereits gut abschneidenden *ALOG* und *AVOL*.

Beim Erweitern der Kalibrierung auf Hochwasserbedingungen wird sich im folgenden Kapitel 4 zeigen, dass das Durchführen eines dritten Kalibrierungsdurchgangs (run 3) auf Mittelwasser mit ebenfalls maximal 8 Iterationen noch zu leicht besseren Grundlagen für die Hochwasserkalibrierung führt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden hier aber nur die ersten zwei Durchgänge besprochen, da die Veränderungen im dritten Durchgang nur noch minim sind.

In **Abbildung 3.4** fällt nun auf, dass bei der Kalibrierung des ersten Paars (Bilanzkorrekturfaktoren *PKOR* und *SNOKOR*) jeweils alle Gütemasse stark reagieren, und zwar sowohl in run 1 wie auch in run 2. Zurückzuführen ist dies darauf, dass die dem Modell zur Verfügung stehende Menge an Niederschlag starke Auswirkungen auf viele Modellkomponenten hat. Ebenfalls ersichtlich ist, dass die Gütemasse jeweils zu Beginn der Kalibrierung eines Parameterpaares stark abfallen, dann aber auf einen höheren Wert steigen; gleichzeitig verringert sich auch die Varianz zwischen den Ergebnissen der einzelnen Schritte (steps), was auf ein stabile Parameterkombination hinweist. Insgesamt kann so eine Verbesserung der Modellergebnisse von Paar zu Paar erreicht werden. Die Kalibrierung der beiden Parameter für die Eisschmelze (Paar 8) zeigt nur geringen Einfluss, da deren Werte bei der vorliegenden Vergletscherung von 3.7% vergleichsweise wenig ausschlaggebend sind.

Insgesamt wurde beim hier beschriebenen Verfahren grosser Wert auf Plausibilität und Stabilität der kalibrierten Parameter gelegt. Dies kann dazu führen, dass die Modelleffizienzen etwas tiefer sind als bei einer konventionellen Kalibrierung auf ein einziges Gütemass, erscheint aber als lohnenswerter Kompromiss. SEIBERT UND McDONNELL (2002:11) bringen diese Überlegung auf den Punkt: "*Lower efficiency values are 'the price we have to pay' to obtain better overall model performance and better adherence to the perceptual model of runoff generation*".

Die nun erarbeitete Kalibrierungsmethodik dient als Grundlage für die Kalibrierung von PREVAH auf Normalbedingungen (Mittelwasserkalibrierung). Sie berücksichtigt die spezifischen Gegebenheiten des Anwendungsräumes und trägt dem angestrebten Ziel der Regionalisierung Rechnung. Im folgenden Kapitel 4 wird diese Kalibrierung erweitert, indem Spaltenabflüsse speziell berücksichtigt werden; dies stellt dann den abschliessenden Schritt zu einer den Zielen dieser Arbeit angepassten Kalibrierung dar. Eine vollständige Übersicht zur definitiven Kalibrierungsmethodik ist in Kapitel 4.4 zu finden, die ausführliche Diskussion der Kalibrierungsresultate erfolgt schliesslich in Kapitel 5.

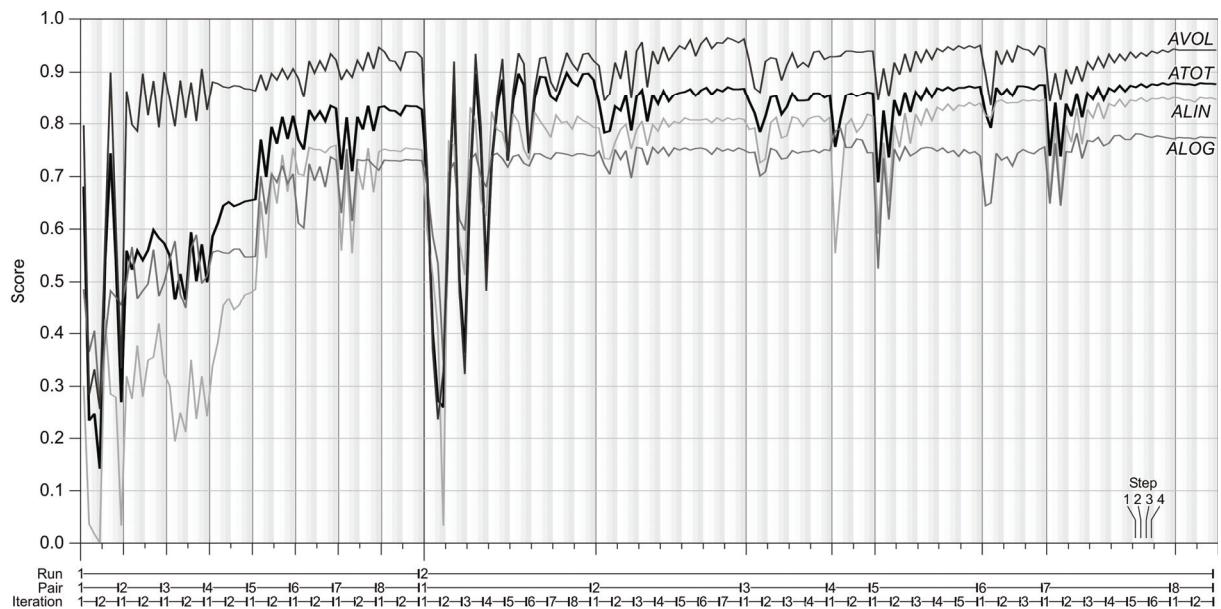


Figure 3.4: Improvement of partial scores ALIN (linear), ALOG (logarithmic) and AVOL (volumetric) as well as of total score ATOT during a calibration. Here, 2 calibration runs were used, each for 8 parameter pairs. For a parameter pair, a maximum of 2 (run 1) and 8 (run 2) iterations were used, respectively, each consisting of 4 steps. The application of a third run may be useful as basis for flood calibration but is not shown here for reasons of clarity.

Abbildung 3.4: Verbesserung der Teilgütemasse ALIN (linear), ALOG (logarithmisch) und AVOL (volumetrisch) sowie des Gesamtgütemasses ATOT im Verlaufe einer Kalibrierung. Die Kalibrierung erfolgte hier anhand von 2 Durchläufen (runs) jeweils für 8 Parameterpaare (pairs). Dabei wurden maximal 2 Iterationen (erster Durchlauf) respektive maximal 8 Iterationen (zweiter Durchlauf) mit jeweils 4 Schritten (steps) durchgeführt. Ein dritter Durchlauf kann als Grundlage für die Hochwasserkalibrierung sinnvoll sein, wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit hier aber nicht durchgeführt.

Kapitel 4

Kalibrierung II: Methodik für Spitzenabflüsse

The standard calibration presented in the preceding chapter is further developed for better reproduction of peak discharge values. The corresponding methods and an extended framework for assessment of the results are established. Finally, the procedure needs to be fine-tuned on basis of actual data.

Die im vorigen Kapitel präsentierte Mittelwasserkalibrierung wird im Hinblick auf eine bessere Wiedergabe der Spitzenabflüsse weiterentwickelt. Nach methodischen Grundlagen ist auch eine erweiterte Bewertung der Resultate zu etablieren. Abschliessend gilt es, das Verfahren anhand der vorliegenden Daten im Detail abzustimmen.

4.1 Grundlagen

4.1.1 Ziel

Mit der im vorhergehenden Kapitel vorgestellten Kalibrierungsmethodik kann eine gute Anpassung des Modells an die Gesamtheit der beobachteten Abflüsse erreicht werden – die Resultate werden im nachfolgenden Kapitel 5 noch ausführlich zu diskutieren sein. Diese Mittelwasserkalibrierung soll alle vorkommenden Abflussbedingungen möglichst gut wiedergeben und einen ausgewogenen Kompromiss zwischen verschiedenen Abflussniveaus erreichen; wegen den Eigenschaften der verwendeten Gütemasse ist zu erwarten, dass Mittel- und Niedrigwasserbedingungen tendenziell etwas grösseres Gewicht haben. Da das Ziel dieser Arbeit aber eine Abschätzung von Spitzenabflüssen aus den simulierten Abflussreihen ist, muss zusätzlich zum nun vorliegenden Parametersatz für Mittelwasserbedingungen ein zweiter erarbeitet werden, welcher spezifischer auf Spitzenabflüsse ausgerichtet ist. Dabei ist die gute Wiedergabe der Gesamtganglinie so weit wie möglich zu erhalten: Das hinter der Abschätzung stehende hydrologische Modell soll weiterhin mit plausiblen Parametereinstellungen arbeiten und die gesamte Hydrologie eines Gebietes gut erfassen. Es gilt also, nicht einen ausschliesslich auf Hochwasser angepassten Parametersatz zu erstellen, sondern einen, welcher gute Hochwasserwiedergabe mit einer plausiblen Simulation normaler und tiefer Abflüsse kombiniert. Dazu werden Kompromisse bezüglich der Gesamtmodellgüte einzugehen sein, da es insbesondere bei hoher zeitlicher Auflösung und langen Simulationsperioden kaum möglich ist, gleichzeitig Gesamtganglinie und Hochwasserspitzen ideal wiederzugeben (siehe LAMB, 1999). Diese Kompromisse sollen aber möglichst gering gehalten werden.

Im Folgenden wird also eine Erweiterung der Kalibrierungsmethodik vorgestellt, welche der bestehenden Mittelwasservariante der Parametersätze eine Hochwasservariante hinzufügt, welche dann für die Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse aus der Simulation verwendet werden kann. Der Mittelwasserparametersatz bildet dabei die Grundlage; er soll mit Hilfe hochwasserspezifischer Gütemasse eine Nachkalibrierung bezüglich Spitzenabflussereignissen erfahren. Wie schon bei der Mittelwasserkalibrierung ist auch hier unbedingt eine einheitliche Methodik anzustreben, welche keine Eingriffe oder Korrekturen durch den Anwender erfordert. Dies ist hier umso wichtiger, weil nur für die 49 Einzugsgebiete der Priorität A lange und zuverlässige Messreihen des Abflusses zur Verfügung stehen, anhand welcher die Resultate der Kalibrierung im Bereich extrapolierte Hochwasser beurteilt werden können.

4.1.2 Datengrundlage

Extraktion von Spitzenwerten

Für die Kalibrierung auf Hochwasserbedingungen standen grundsätzlich die gemessenen und simulierten 4-jährigen Reihen der jeweiligen Kalibrierungsperiode in stündlicher Auflösung zur Verfügung; es wurde wiederum ein Initialisierungsjahr vorgeschaltet und anschliessend verworfen. Für Gütemasse, welche die gesamte Ganglinie bewerten, wurde diese vierjährige Reihe verwendet.

Für einige der im Folgenden eingeführten spitzenwertspezifischen Gütemasse kommt die Schwellenwertmethode (peak-over-threshold, siehe NADEN, 1992) zum Einsatz; dabei werden die $3 \cdot n$ grössten Abflüsse aus der n -jährigen Betrachtungsperiode extrahiert. Bei der zur Kalibrierung verwendeten Reihe von 4 Jahren sind dies also die 12 grössten Abflussspitzen.

Die Unabhängigkeit der Ereignisse muss bei der Peak-Over-Threshold-Methode gewährleistet sein, die Spitzenabflüsse müssen also zeitlich voneinander getrennt werden. Zu diesem Zweck wird zwischen zwei unabhängigen Spitzen ein minimaler Abstand von 72 Stunden gefordert; dies hat sich als Erfahrungswert bewährt. Liegen zwei oder mehr Spitzen näher zusammen, wird nur die jeweils grösste extrahiert. Ebenfalls erprobt wurde die Bedingung, dass der Abfluss zwischen zwei Spitzen mindestens unter die halbe Höhe des kleineren Scheitelwertes, bezogen auf den mittleren Jahresabfluss, zurückgehen muss (vgl. MANIAK, 2005). Da sich im untersuchten Datenkollektiv jedoch kaum Unterschiede ergaben, wurde die pragmatischere erste Variante verwendet, die etwas differenziertere zweite wurde aber in PREVAH ebenfalls implementiert und steht für Detailstudien zur Verfügung. Komplizierter herzuleitende Trennzeitberechnungen, z. B. unter Verwendung der mittleren Anstiegszeit zur Spitzte (vgl. LAMB, 1999), wurden nicht berücksichtigt, weil sie pro Gebiet jeweils manuelle Vorberechnungen erfordern und deshalb für die automatische Anwendung auf ein grosses Kollektiv von Einzugsgebieten nicht praktikabel sind.

Stündliche Mittelwerte versus Instantanwerte

Zu den im Folgenden ermittelten Hochwasserabflüssen muss angemerkt werden, dass sich diese auf stündliche Maxima beziehen, in Übereinstimmung mit dem Zeitschritt des verwendeten Modellsystems PREVAH. Schätzwerte für Hochwasser beziehen sich in aller Regel aber auf die tatsächlich beobachteten instantanen Spitzenwerte der Ganglinie. Es ist zu erwarten, dass Unterschiede zwischen den beiden Spitzenwerten in erster Linie in kleinen Einzugsgebieten mit schneller Abflussreaktion auftreten. Für grössere Gebiete kann von einer gewissen Verzögerung und Abflachung der Spitzenabflüsse ausgegangen werden, welche die instantanen und die stündlichen Spitzenabflusswerte besser vergleichbar macht. **Abbildung 4.1** zeigt anhand von 17 Testgebieten der Kalibrierungsgruppe 1 (vgl. **Tabelle 3.1**), dass bei Flächen von über 50 km^2 kaum mehr mit Unterschieden zu rechnen ist. Die prägnantesten Abweichungen treten bei Allenbach–Adelboden (28.8 km^2) auf, wo gemäss NAEF ET AL. (1999) eine ausgeprägt schnelle Gebietsreaktion auf Niederschläge erfolgt.

FLACH (2007) führte Untersuchungen zu einem Korrekturfaktor durch, um in stündlicher Auflösung gemessene oder simulierte extreme Abflüsse in kleinen Gebieten besser den instantanen Spitzen anzugeleichen; er konnte für die vorliegenden Daten aber keine stabile Lösung finden. Somit müssen vorderhand einige Vorbehalte gemacht werden, was die Auswertung extremer Spitzenabflüsse in kleinen Gebieten mit ausgeprägt schneller Abflussreaktion auf Starkniederschläge betrifft. In diesem Anwendungsbereich muss aber so oder so stets abgewägt werden, ob ein Konzeptmodell wie PREVAH noch geeignet für eine Anwendung ist, insbesondere was die gesamtschweizerisch zur Verfügung stehenden Rauminformationen und meteorologischen Werte betrifft (vgl. Kapitel 2.2). Weitere diesbezügliche Überlegungen werden insbesondere bei der Diskussion der Kalibrierungsresultate in Kapitel 5 angestellt.

In dieser Arbeit werden sowohl für Simulation wie auch für Beobachtung konsequent stündlich aufgelöste Daten verwendet, womit die Vergleichbarkeit der Spitzenwerte und der jeweiligen Extrapolationen ohne Einschränkungen gegeben ist.

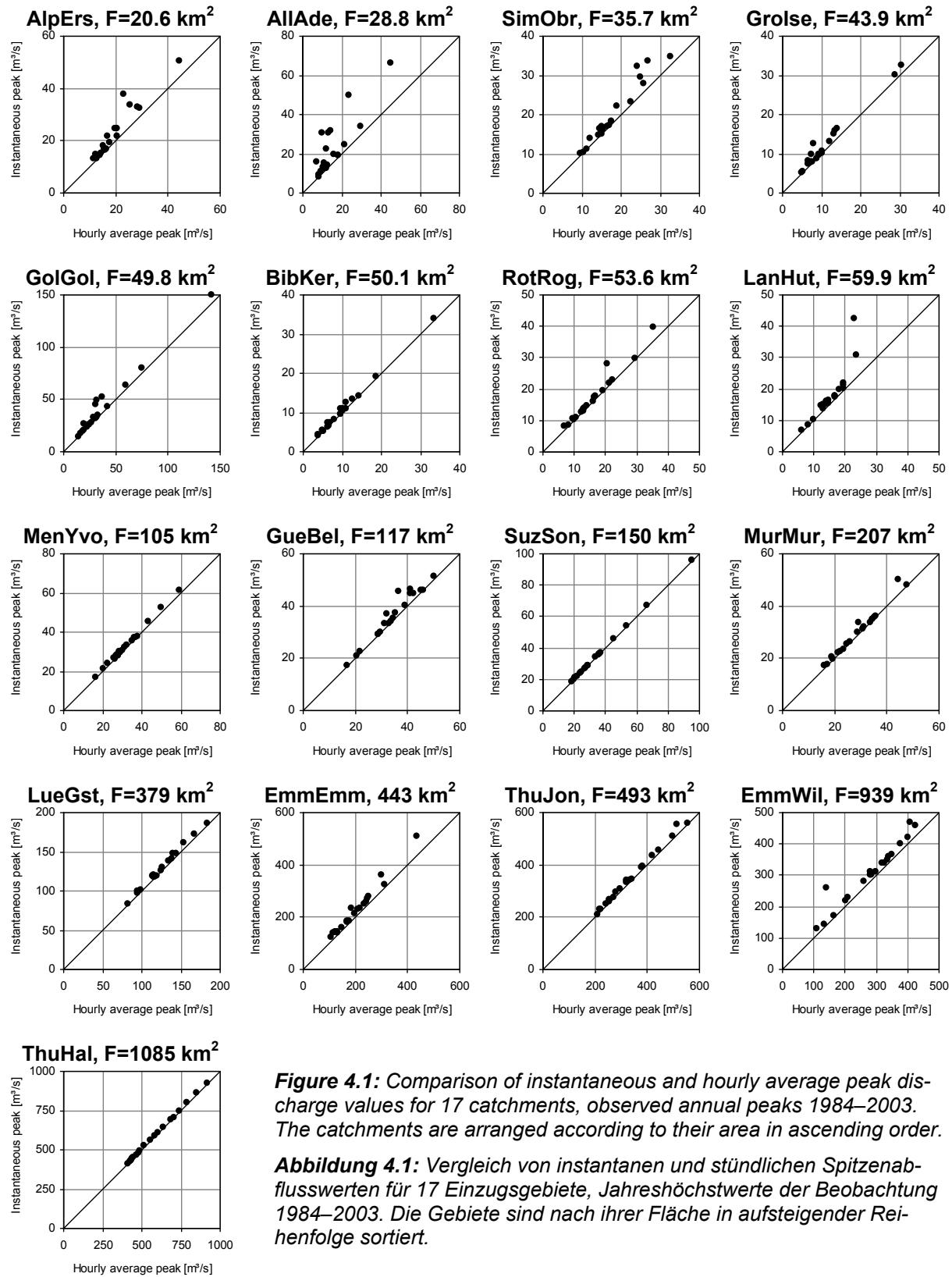


Figure 4.1: Comparison of instantaneous and hourly average peak discharge values for 17 catchments, observed annual peaks 1984–2003. The catchments are arranged according to their area in ascending order.

Abbildung 4.1: Vergleich von instantanen und stündlichen Spitzenabflusswerten für 17 Einzugsgebiete, Jahreshöchstwerte der Beobachtung 1984–2003. Die Gebiete sind nach ihrer Fläche in aufsteigender Reihenfolge sortiert.

4.2 Methodik

4.2.1 Hochwasserspezifische Gütemasse

Für die angestrebte Zusatzkalibrierung des Modells sind Gütemasse erforderlich, mit deren Hilfe sich die Modellgüte bezüglich Hochwasserspitzen bewerten lässt. LAMB (1999) schlägt dazu Masse vor, welche auch im Rahmen dieser Arbeit Verwendung finden, jedoch noch spezifisch zu ergänzen sind. Die eingesetzten Gütemasse sollen im Folgenden vorgestellt werden, wobei sich die Reihenfolge nach Aussagekraft und Eignung für die vorliegende Arbeit richtet.

Gütemass PQT

Einen grossen Informationsgehalt besitzt die zeit- und grösstengewichtete Funktion PQT , welche sich auf die m grössten beobachteten und simulierten Hochwasserspitzen der zu untersuchenden Reihe bezieht (siehe LAMB, 1999). Sowohl die beobachteten wie auch die simulierten Spitzenabflüsse werden dabei voneinander unabhängig in absteigender Reihenfolge sortiert.

$$PQT = \sum_{i=1}^m \sqrt{\left[\frac{(P_i - p_i)}{P^*} \right]^2 + \left[\frac{(T_i - t_i)}{T^*} \right]^2}, \quad PQT \in [0, \infty] \quad \text{Gleichung 4.1}$$

wo	P_i	Abflussmenge der beobachteten Spalte mit Rang i
	p_i	Abflussmenge der simulierten Spalte mit Rang i
	P^*	Differenz zwischen grösster und kleinster beobachteter Spalte
	T_i	Auftretenszeitpunkt der beobachteten Spalte mit Rang i
	t_i	Auftretenszeitpunkt der simulierten Spalte mit Rang i
	T^*	Differenz im Auftretenszeitpunkt der ersten und der letzten beobachteten Spalte
	m	Anzahl der extrahierten Hochwasserspitzen (wie oben erläutert die $3 \cdot n$ grössten Abflüsse aus der n -jährigen Betrachtungsperiode)

Ist $PQT = 0$, bedeutet dies absolute Übereinstimmung zwischen den beobachteten und den simulierten m grössten Abflussspitzen, mit steigendem Funktionswert nehmen die Abweichungen in Abflussmenge und Auftretenszeitpunkt zu; der Funktionswert ist gegen oben unbegrenzt.

Da es sich bei PQT um ein aufsummiertes Abweichungsmass handelt, ist seine Grösse relativ zu den jeweils betrachteten Abflussspitzen. Deshalb kann PQT weder zwischen verschiedenen Einzugsgebieten noch zwischen unterschiedlichen Bezugsperioden verglichen werden. Ein Vergleich zwischen verschiedenen Einzugsgebieten wird aber im Rahmen der Regionalisierung nötig sein. Um dies zu ermöglichen, muss die Verbesserung oder Verschlechterung von PQT bezüglich einer Referenz bewertet werden; als solche dienen die PQT der unkalibrierten, der auf Mittelwasser und der auf Hochwasser kalibrierten Simulationen. Als Erweiterung des ursprünglichen Masses berechnen sich die relativen Veränderungen des Gütemasses PQT als

$$PQT_{rel,cal0} = \left(\frac{PQT_{cal0}}{PQT} \right) - 1 \quad \text{Gleichung 4.2}$$

respektive

$$PQT_{rel,calMQ} = \left(\frac{PQT_{calMQ}}{PQT} \right) - 1, \quad \text{Gleichung 4.3}$$

respektive

$$PQT_{rel,calHQ} = \left(\frac{PQT_{calHQ}}{PQT} \right) - 1, \quad \text{Gleichung 4.4}$$

wo PQT_{cal0} , PQT_{calMQ} und PQT_{calHQ} die Werte von PQT für den unkalibrierten, den auf Mittelwasser und den auf Hochwasser kalibrierten Parametersatz sind. Wenn vom aktuellen PQT relativ zur Referenz (PQT_{cal0} , PQT_{calMQ} resp. PQT_{calHQ}) keine Veränderung festzustellen ist, nimmt PQT_{rel} den Wert 0 an, bei einer Verbesserung (das aktuelle PQT ist kleiner ist als die Referenz) Werte grösser 0, bei einer Verschlechterung (das aktuelle PQT ist grösser als die Referenz) Werte kleiner 0.

Gütemass PSAE

Ebenfalls auf die m grössten Hochwasserspitzen bezieht sich das Mass *PSAE*, wobei die Spitzenwerte für Beobachtung und Simulation wiederum unabhängig in absteigender Reihenfolge sortiert werden. *PSAE* berechnet sich gemäss LAMB (1999) als Summe der absoluten Fehler (sum of absolute errors):

$$PSAE = \sum_{i=1}^m |P_i - p_i|, \quad PSAE \in [0, \infty] \quad \text{Gleichung 4.5}$$

wo P_i Abflussmenge der beobachteten Spitze mit Rang i
 p_i Abflussmenge der simulierten Spitze mit Rang i
 m Anzahl der extrahierten Hochwasserspitzen (siehe oben)

Gleich wie bei *PQT* bedeutet *PSAE* = 0 vollständige Übereinstimmung zwischen den aus Beobachtung und Simulation extrahierten m Spitzen, bei grösser werdendem Funktionswert nehmen die Abweichungen zu. Weiter handelt es sich auch hier um ein aufsummiertes Abweichungsmass, welches jeweils nur innerhalb eines Einzugsgebietes und einer Bezugsperiode vergleichbar ist; für Quervergleiche muss folglich wiederum ein relatives Mass abgeleitet werden:

$$PSAE_{rel,calMQ} = \left(\frac{PSAE_{calMQ}}{PSAE} \right) - 1 \quad \text{Gleichung 4.6}$$

PSAE_{calMQ} ist dabei der Wert von *PSAE* für den auf Mittelwasser kalibrierten Parametersatz. Interpretation und Berechnung relativ zum unkalibrierten und zum hochwasserkalibrierten Parametersatz (*PSAE_{rel,cal0}* und *PSAE_{rel,calHQ}*) sind analog zu Gleichung 4.2 respektive Gleichung 4.4.

Gütemass WAE

Die gewichtete Summe der absoluten Fehler *WAE* (weighted absolute errors) wird auf Basis der gesamten Ganglinie erhoben und ist deshalb weniger spezifisch auf Spitzenabflussereignisse zugeschnitten. Durch eine Potenzierung wird erreicht, dass Differenzen bei grossem Abfluss stärker gewichtet werden als solche bei geringem Abfluss:

$$WAE = \sum_{t=1}^N \left(Q_t^a |Q_t - q_t| \right), \quad WAE \in [0, \infty] \quad \text{Gleichung 4.7}$$

wo Q_t beobachteter Abfluss zum Zeitpunkt t
 q_t simulierter Abfluss zum Zeitpunkt t
 a Exponent
 N Anzahl Abflusswerte in der betrachteten Zeitperiode

Bei einem Wert von *WAE* = 0 herrscht vollständige Übereinstimmung zwischen beobachteten und simulierten Abflüssen. Für eine gute Sensitivität im Bereich der Spitzenabflüsse empfiehlt LAMB (1999) einen Wert von $a = 1.5$, welcher sich auch in der vorliegenden Arbeit bewährt hat. Insbesondere bei der kleinräumigen Anwendung (z. B. WEHREN, 2005, für das 2.56 km² grosse Gebiet des Spissibachs) erwies sich *WAE* als geeignetes Gütemass, um die Eignung eines Parametersatzes für die Hochwasserabschätzung zu beurteilen.

Für Vergleiche zwischen verschiedenen Gebieten muss unter Zuhilfenahme des Wertes von *WAE* für den auf Mittelwasser kalibrierten Parametersatz (*WAE_{calMQ}*) wiederum ein relatives Mass erstellt werden (vgl. Gleichung 4.6), welches sich ebenfalls auf den unkalibrierten und den hochwasserkalibrierten Parametersatz beziehen lässt (*WAE_{cal0}*, *WAE_{calHQ}*):

$$WAE_{rel,calMQ} = \left(\frac{WAE_{calMQ}}{WAE} \right) - 1 \quad \text{Gleichung 4.8}$$

Gütemass PSR

Erste Experimente mit den zu untersuchenden Einzugsgebieten zeigten, dass die oben vorgestellten Masse für eine Anwendung in der Schweiz unter Umständen nicht ausreichen könnten. Namentlich in vergletscherten Gebieten wurde beobachtet, dass sich die Jahreshochwasser jeweils in einer ähnlichen Grössenordnung bewegen. Dies führte auffällig oft dazu, dass die aus Beobachtung und Simula-

tion extrahierten Spitzenwerte an sich gut übereinstimmten, sich jedoch nicht auf dasselbe Jahr bezogen. Über vergleichbare Probleme bezüglich Hierarchie der Spitzenwerte berichten auch CAMERON ET AL. (1999) für ihre Langzeitsimulationen.

Deshalb wird mit Hilfe des Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten (siehe z. B. HARTUNG ET AL., 2002) bewertet, wie gut die zeitliche Hierarchie der beobachteten und simulierten Jahresspitzenabflüsse übereinstimmt:

$$PSR = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^n (R_i - r_i)^2}{n(n^2 - 1)}, \quad PSR \in [-1,1] \quad \text{Gleichung 4.9}$$

wo R_i i -te beobachtete Spalte
 r_i i -te simulierte Spalte
 n Anzahl der betrachteten Jahre (resp. Jahreshochwasser)

Es wird von einer bindungsfreien Rangierung ausgegangen, d. h. davon, dass keine der Spitzen exakt gleich gross ist. Da PSR wie ein gewöhnlicher Rangkorrelationskoeffizient interpretiert wird, herrscht bei einem Wert von 0 keinerlei Übereinstimmung, bei $PSR = 1$ vollständig gleichsinnige und bei $PSR = -1$ vollständig gegensinnige Übereinstimmung zwischen den Hierarchien der n beobachteten und simulierten Jahresspitzenabflüssen.

Gütemass NSE

Die weitverbreitete Modelleffizienz nach NASH UND SUTCLIFFE (1970) (NSE) wurde bereits bei der Kalibrierung auf Mittelwasserbedingungen vorgestellt (siehe Abschnitt 3.1.4) und kam dort in verschiedenen Formen als Teil des kombinierten Gütemasses $ATOT$ zum Einsatz; hier wird NSE nun ohne Modifikationen eingesetzt (vgl. Gleichung 3.1). Das Mass ist stärker auf Mittel- und vor allem auf Hochwasserabflüsse sensitiv als auf Niedrigwasserbedingungen, was bei der Mittelwasserkalibrierung eher ein Nachteil ist. Hier kann NSE nun dazu verwendet werden, um die Gesamtganglinie der Hochwasserkalibrierung in einem hydrologisch akzeptablen Bereich zu halten. Somit ist eine die erneute Verwendung insgesamt gerechtfertigt.

Informationsgehalt der Hochwassergütemasse

Welcher Informationsgehalt ist nun aus den zusätzlich eingeführten Hochwassergütemassen PQT , $PSAE$, WAE und PSR gegenüber dem Standardgütemass NSE zu erwarten? Zur Beantwortung dieser Frage wurde ein Monte-Carlo-Experiment durchgeführt; dabei werden wiederholt alle freien Modellparameter zufällig gewählt und die resultierenden Modellgüten registriert. Weitere Erläuterungen und eine kritische Diskussion dieser Methode folgen in Kapitel 6, wo sie zur Beurteilung der Parameterunsicherheit ausführlicher eingesetzt werden wird. Zur Herleitung von **Abbildung 4.2** wurden für Allenbach–Adelboden 50'000 Simulationen mit zufälligen Parametersätzen durchgeführt und bezüglich Gütemassen ausgewertet. Die entstehenden Muster sind recht unterschiedlich und können wie folgt interpretiert werden:

- Für PQT und NSE lässt sich kein gemeinsames Optimum finden: Für sehr gute Ergebnisse bei PQT (oberes Ende der Punktewolke) müssen kleinere Kompromisse bezüglich NSE gemacht werden (rechtes Ende der Punktewolke) und umgekehrt. Damit ist von PQT zusätzliche Information zu erwarten, welche in NSE nicht enthalten ist. Eine hydrologisch sinnvolle Kalibrierung mit guten Resultaten sowohl für PQT wie auch NSE (oberer rechter Bereich der Punktewolke) scheint aber erreichbar zu sein.
- Die Aussage für $PSAE$ ist ähnlich wie für PQT , der für ein optimales $PSAE$ einzugehende Kompromiss bezüglich NSE fällt allerdings etwas geringer aus. Somit scheint der komplementäre Informationsgehalt von $PSAE$ ebenfalls etwas geringer zu sein. Weiter lassen sich über einen relativ grossen Bereich der NSE -Werte gute $PSAE$ erreichen, was auf eine gesamthydrologisch etwas weniger plausible Aussage von $PSAE$ hinweist.
- WAE und NSE teilen sich relativ deutlich einen Bereich mit sehr guten Ergebnissen (obere rechte Spalte der Punktewolke). Somit ist bei einem optimalen NSE nur wenig zusätzliche Information von WAE zu erwarten. Fallen die NSE allerdings etwas geringer aus, kann WAE nach wie vor dazu verwendet werden, um bezüglich Hochwasserwiedergabe geeignetere Parametersätze zu identifizieren – dies folgt aus der gut erkennbaren Öffnung der Punktewolke gegen unten links hin.

- Bei PSR ist kaum ein Zusammenhang mit NSE auszumachen, was auf nur sehr wenig geteilte Information spricht; Kompromisse bezüglich NSE müssen für gute PSR nicht eingegangen werden. Dass PSR kaum von NSE abhängt, lässt aber auch vermuten, dass die enthaltene Information nur wenig über hydrologisch plausible Parametersätze aussagt. Somit sollte PSR keinesfalls alleine, sondern immer nur in Kombination mit anderen Gütemassen (eben z. B. NSE) verwendet werden.

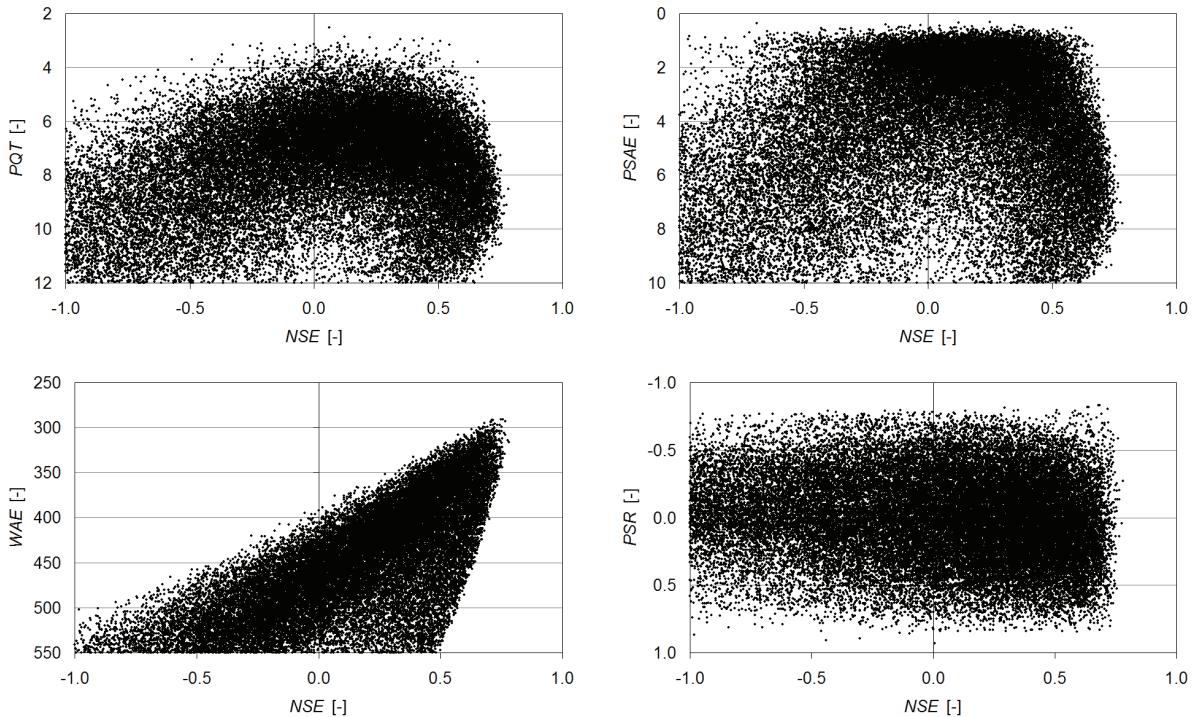


Figure 4.2: Comparison of flood-sensitive scores PQT , $PSAE$, WAE and PSR against standard score NSE . Data from 50'000 randomly created (Monte Carlo) parameter sets for catchment Allenbach–Adelboden (28.8 km^2), simulation period 1994–1997.

Abbildung 4.2: Vergleich der hochwassersensitiven Gütemasse PQT , $PSAE$, WAE und PSR mit dem Standardgütemass NSE . Datengrundlage: 50'000 zufällig erzeugte Parametersätze (Monte-Carlo-Methode) für das Einzugsgebiet Allenbach–Adelboden (28.8 km^2), Simulationszeitraum 1994–1997.

Aufgrund der in diesem Unterkapitel gewonnenen Erkenntnisse ist es nun möglich, die Hochwassergütemasse PQT , $PSAE$, WAE und PSR sowie das Standardgütemass NSE in angemessener Form zu kombinieren.

4.2.2 Kombination der Gütemasse für die Hochwasserkalibrierung

LAMB (1999) verwendete die Gütemasse PQT , $PSAE$, WAE und NSE jeweils einzeln zur Kalibrierung eines Modells und wählte anschliessend nach Augenmaß diejenige Kalibrierungsvariante aus, welche die Kurvensteigung in der Extremwertverteilung am besten wiedergab. Anschliessend wurde die Lage der extrapolierten Kurve bei Bedarf noch nach oben oder unten korrigiert. Für die vorliegende Arbeit schien dieses Vorgehen nicht optimal zu sein, da es für die grosse Anzahl zu kalibrierender Gebiete zu aufwendig ist. Zudem enthält es eine offensichtlich subjektive Komponente, was vermieden werden sollte (siehe z. B. BOTTERWEG, 1995; SEIBERT, 1997) – insbesondere im Hinblick auf eine Regionalisierung der Modellparameter, für welche eine einheitliche Methodik von Vorteil ist.

Für diese Arbeit soll auch bezüglich Hochwasserbereich ein Kalibrierungsalgorithmus angestrebt werden, welchen PREVAH ohne Eingreifen des Benutzers durchführen kann. Dazu sind zwei Schritte nötig: In einem ersten Schritt werden die hier verwendeten Gütemasse PQT , $PSAE$, WAE , NSE und PSR zu einem einzigen Gütemass zusammengeführt. Anschliessend wird dieses zusammenfassende Hochwassergütemass in einem zweiten Schritt mit den PREVAH-Standardgütemassen kombiniert.

Zusammenführen der hochwasserspezifischen Gütemasse

Da die hochwassersensitiven Gütemasse PQT , $PSAE$, WAE , NSE und PSR unterschiedliche Wertebereiche und Zielgrößen haben, muss vor einer Zusammenführung die Vergleichbarkeit sichergestellt werden. Dies geschieht über den Zwischenschritt einer Rangierung der entsprechenden Werte: Den Gütemassen PQT , $PSAE$, WAE , NSE und PSR wird jeweils eine entsprechende Punktzahl S_{PQT} , S_{PSAE} , S_{WAE} , S_{NSE} und S_{PSR} zugewiesen. Für das jeweils beste Ergebnis innerhalb eines Gütemasses werden 3 Punkte, für das schlechteste 0 Punkte vergeben:

$$S_{PQT}(i) = \begin{cases} 3, & \text{wenn 1.Rang für } PQT \\ 2, & \text{wenn 2.Rang für } PQT \\ 1, & \text{wenn 3.Rang für } PQT \\ 0, & \text{wenn 4.Rang für } PQT \end{cases} \quad (\text{analog für } PSAE, WAE, NSE \text{ und } PSR) \quad \text{Gleichung 4.10}$$

wo i i -ter der 4 Modelläufe im betrachteten Kalibrierungsschritt

Diese Rangpunktzahlen werden anschliessend mit einem für jedes Gütemass einzeln bestimmmbaren Gewichtungsfaktor (w_{PQT} , w_{PSAE} , w_{WAE} , w_{NSE} und w_{PSR}) zu gewichteten Rangpunktsummen WS aufsummiert.

$$WS(i) = S_{PQT}(i) \cdot w_{PQT} + S_{PSAE}(i) \cdot w_{PSAE} + S_{WAE}(i) \cdot w_{WAE} + S_{NSE}(i) \cdot w_{NSE} + S_{PSR}(i) \cdot w_{PSR} \quad \text{Gleichung 4.11}$$

Je grösser WS ist, desto besser wird die i -te Modellauf (respektive die entsprechende Parameterkombination) bewertet. Die Gewichtungsfaktoren sind frei wählbar und wurden für die Kalibrierung im Rahmen dieser Arbeit folgendermassen festgesetzt: $w_{PQT} = 6.0$ $w_{PSAE} = 4.0$ $w_{WAE} = 2.0$ $w_{NSE} = 1.0$ und $w_{PSR} = 1.0$. Diese Wahl richtet sich nach der Aussagekraft der einzelnen Gütemasse für diese Arbeit, nach groben Sensitivitätsanalysen anhand einiger Testgebiete sowie nach den Ergebnissen, welche LAMB (1999) festhielt. Die positiven Erfahrungen bei der Anwendung gaben keinen Anlass, diese Gewichtung zu ändern. Damit erhält PQT klar das grösste Gewicht, gefolgt von $PSAE$ und WAE , während NSE und PSR nur schwach gewichtet werden.

Kombination mit den PREVAH-Standardgütemassen

Um nun eine ausgewogene Kombination von Hochwasser- und Standardgütemassen zu erreichen, sollen die entsprechenden Gütemasse ebenfalls mit einem Gewichtungsfaktor zusammengeführt werden. Da das Gesamtgütemass von PREVAH, $ATOT$, einen Wertebereich von 0 bis 1 hat, muss das zusammengeführte Hochwassergütemass WS ebenfalls auf diesen Bereich skaliert werden. Dazu wird der maximal erreichbare Wert von WS verwendet, welcher sich aufgrund der jeweils maximalen Rangpunktzahl von 3 für S_{PQT} , S_{PSAE} , S_{WAE} , S_{NSE} und S_{PSR} (vgl. Gleichung 4.10) berechnet als

$$WSMAX = 3 \cdot (w_{PQT} + w_{PSAE} + w_{WAE} + w_{NSE} + w_{PSR}). \quad \text{Gleichung 4.12}$$

Bei der oben vorgeschlagenen Gewichtung ist $WSMAX = 42$. Die Umrechnung von WS auf den mit $ATOT$ kompatiblen Wertebereich von 0 bis 1 ergibt dann das PREVAH-Gütemass für Hochwasser

$$AHQ(i) = \frac{WS(i)}{WSMAX}. \quad \text{Gleichung 4.13}$$

Nun können die beiden Gesamtgütemasse für Mittelwasser ($ATOT$) und Hochwasser (AHQ) mit einem einfachen Gewichtungsfaktor w_{HQ} kombiniert werden:

$$ATHQ(i) = w_{HQ} \cdot AHQ(i) + (1 - w_{HQ}) \cdot ATOT(i), \text{ wo } w_{HQ} \in [0,1] \quad \text{Gleichung 4.14}$$

$ATHQ$ hat wiederum den Wertebereich von 0 bis 1, mit besten Resultaten bei 1.

Tabelle 4.1 zeigt ein Rechenbeispiel zum gesamten Kombinierungsverfahren. w_{HQ} wurde dabei auf 0.80 gesetzt, für die restlichen Gewichte wurden die im Text erläuterten Werte verwendet. Als beste Variante wurde aufgrund des kombinierten Hochwassergütemasses AHQ die dritte Parameterkombination ($i = 3$) gewählt ($AHQ = 0.58$); diese ist auch bezüglich des reinen Hochwassergütemasses ($AHQ(3) = 0.64$) die beste. Das Mittelwassergütemass von PREVAH ($ATOT$) weist dagegen für die zweite Parameterkombination ($i = 2$) mit 0.36 das beste Resultat auf und bei der gewählten dritten ($i = 3$) mit 0.30 das schlechteste.

	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4	
PQT	5.87	6.61	5.37	5.98	
S_{PQT} ($w_{PQT} = 6.0$)	0	2	1	3	
PSAE	1.35	1.13	1.21	1.12	
S_{PSAE} ($w_{PSAE} = 3.0$)	3	1	1	0	
WAE	332	344	346	362	
S_{WAE} ($w_{WAE} = 2.0$)	3	2	1	0	
NSE	0.52	0.48	0.46	0.41	
S_{NSE} ($w_{NSE} = 1.0$)	2	0	3	1	
PSR	0.06	0.01	0.07	0.14	
S_{PSR} ($w_{PSR} = 1.0$)	1	0	2	3	
WS	($WSMAX = 42$)	22	12	27	21
AHQ	0.52	0.29	0.64	0.5	
ATOT	0.34	0.36	0.30	0.32	
ATHQ	($w_{HQ} = 0.80$)	0.49	0.30	0.58	0.46

Table 4.1: Example for calculation of ATHQ following explanations and equations in the text section. Best results for AHQ, ATOT and ATHQ are marked in bold-face.

Tabelle 4.1: Berechnungsbeispiel für ATHQ gemäss Erläuterungen und Gleichungen im Text. Die besten Resultate für AHQ, ATOT und ATHQ sind fett gesetzt.

Der Gewichtungsfaktor w_{HQ} hat nun entscheidenden Einfluss auf das Kalibrierungsverfahren. Wird er auf 0 gesetzt, wird PREVAH weiterhin auf Mittelwasser kalibriert (gemäss ATOT), bei 1 erfolgt die Kalibrierung ausschliesslich auf das summarische Hochwassergütemass AHQ. Dazwischen sind verschiedene Abstufungen denkbar: Bei tiefem w_{HQ} erfolgt die Kalibrierung vorwiegend auf Mittelwasser, wobei die Kalibrierungsroutine bei ähnlichen Resultaten diejenige Parameterkombination auswählen wird, welche bezüglich Hochwasser besser geeignet ist. Umgekehrt wird die Kalibrierung bei hohem w_{HQ} hauptsächlich die Hochwassergütemasse berücksichtigen und bei ähnlichen Resultaten die Variante mit dem besseren Mittelwasserverhalten auswählen. Bei Werten um 0.5 ist zu erwarten, dass die Kalibrierung Mittelwasser- und Hochwasserverhalten gleichermassen berücksichtigt. Da die Auswirkungen von w_{HQ} auf die Hochwasserabschätzung aber nicht im Detail vorhergesagt werden können, müssen ausgedehntere Untersuchungen mit verschiedenen Einzugsgebieten herangezogen werden; dies wird in Abschnitt 4.3 noch im Detail zu erläutern sein.

4.2.3 Hochwasserextrapolation

Bevor eine Feinabstimmung der eingeführten Methoden erfolgt, sollen an dieser Stelle noch die Grundlagen der extremwertstatistischen Auswertungen erläutert werden. Die Resultate der Hochwasserextrapolation sind neben den verschiedenen Gütemassen ebenfalls ein wichtiges Bewertungskriterium für die Simulation im Bereich seltener Spitzenabflüsse. Während der im Folgenden beschriebenen Feinausarbeitung der Hochwasserkalibrierung wurden die extrapolierten Hochwasser ebenfalls ergänzend betrachtet, um die gefundenen Einstellungen zu plausibilisieren (SONDEREGGER, 2005); auf die explizite Besprechung wird in dieser Arbeit aber verzichtet. Ausführlich diskutiert werden die Extrapolationsergebnisse jedoch bei der Auswertung der Kalibrierungs- und der Regionalisierungsresultate in den Kapiteln 5 respektive 10, da Abschätzungen im Bereich seltener Hochwasser ja das Anwendungsziel der vorliegenden Arbeit darstellen. An dieser Stelle soll nun das methodische Fundament der Extrapolationen im Detail beschrieben werden.

Extraktion der Maxima

Als Grundlage der Extrapolation werden jeweils Jahreshöchstwerte der stündlichen gemessenen oder simulierten Abflüsse aus der Periode 1984–2003 verwendet. Da damit eine 20-jährige Reihe vorliegt, scheint die bei den hochwasserspezifischen Gütemassen eingesetzte Vergrösserung des Stichprobenumfangs durch partielle Serien (peak-over-threshold) nicht mehr nötig; gemäss MANIAK (2005) ist dieses Vorgehen nur bei Reihen von weniger als 15 Jahren Länge angebracht. Zudem liefern partielle Serien im besonders heiklen Bereich seltener Hochwasser keine zusätzlichen Informationen (DVWK, 1999; MIEGEL UND BÜTTNER, 2003). Auch bei den hier verwendeten Daten zeigte die Verwendung partieller Serien in den 49 Einzugsgebieten der Priorität A keine eindeutige Veränderung der Extrapolationsresultate – deshalb wird für alle weiteren Auswertungen nur mit Jahreshöchstwerten gearbeitet.

Verteilungsfunktion und Parameterschätzmethoden

Alle Extrapolationen erfolgten mit Hilfe des Programmes HQ-EX (WASY, 1997), welches sich auf die Richtlinien des DVWK (1999) stützt. Um die Extrapolationsresultate von verschiedenen Gebieten und von aus verschiedenen Quellen gewonnenen Daten (Messung, Simulation) vergleichbar zu halten, wurde aber stets die Extremwertverteilung Typ 1 (E1) mit Parameterschätzung nach Wahrscheinlichkeitsgewichteten Momenten (WGM) verwendet. Die Wahl der einheitlichen Extremalverteilung fiel auf E1, weil diese zu den bevorzugten im Hochwasserbereich gehört (MANIAK, 2005); eine kritische Be- trachtung dazu ist KOUTSOYANNIS (2004A, 2004B) zu entnehmen. Von den drei in HQ-EX implementierten Schätzmethoden wurden die wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente (GREENWOOD ET AL., 1979) gewählt, weil sie bei der Parameterschätzung für E1 gemäss GREIS UND WOOD (1981, 1983) zu den besten Ergebnissen führen (siehe auch AYROS CHUMPITAZI 2000).

Dieses einheitliche Vorgehen weicht wohlgernekt von den Empfehlungen des DVWK (1999) ab, ge- mäss welchen die drei am besten angepassten Kurven aus einer Palette von maximal 18 möglichen Kombinationen (sieben Verteilungsfunktionen, jeweils maximal drei Schätzmethoden) vorgeschlagen werden. Bezüglich Vergleichen ist dieses flexible Vorgehen aber problematisch: Einerseits steht nicht ein einzelner vergleichbarer Wert zur Verfügung (der Anwender hat aus den drei Vorschlägen subjektiv die am besten geeignete Variante auszuwählen), und andererseits kann die Wahl von Verteilung und Schätzfunktion für die zu vergleichenden Reihen jeweils unterschiedlich ausfallen; dadurch wer- den die Schätzresultate für seltene Hochwasser unter Umständen deutlich beeinflusst. Insbesondere letzteres erscheint sehr unvorteilhaft und für die vergleichende Analyse einer grossen Anzahl von Gebieten und Modellparametersätzen ungeeignet. Da es in der vorliegenden Untersuchung nicht um eine für ein einzelnes Gebiet optimale Extrapolation geht, sondern um einen grossangelegten Ver- gleich, scheint es vertretbar, durchgehend eine einheitliche Schätzmethode zu verwenden.

Ein detaillierter Vergleich zwischen dem gewählten einheitlichen Vorgehen und dem DVWK-Verfahren wird in Kapitel 10.2 anhand der konkreten Simulationsresultate vorgenommen, und die Auswirkungen auf die Hochwasserabschätzung werden dabei kritisch diskutiert. An dieser Stelle sei vorweggenom- men, dass das einheitliche Verfahren im Rahmen der vorliegenden Anwendung tatsächlich zu besser vergleichbaren Ergebnissen führt und somit gerechtfertigt ist.

Extrapolation

Für eine Schätzung werden die n Jahreshochwasser zuerst in aufsteigender Reihenfolge sortiert, wor- aufhin ihnen jeweils eine empirische Unterschreitungswahrscheinlichkeit p_i (Plotting Position) zuge- wiesen wird. Aus diesen verteilungsspezifischen p_i lässt sich wiederum eine entsprechende Jährlich- keit T_i (Wiederkehrperiode) ermitteln (DVWK, 1999):

$$T_i = \frac{1}{(1 - p_i)}, \text{ wo } p_i = \frac{i - 0.44}{n + 0.12} \quad \text{Gleichung 4.15}$$

wo i i -tes Jahreshochwasser in aufsteigend sortierter Reihe
 n Anzahl Jahreshochwasser in der betrachteten Reihe

Die Verteilungsfunktion wird anschliessend auf die so eingeordneten Jahreshochwasser angepasst. Die hier verwendete erste Extremalverteilung (E1) ist gemäss DVWK (1999) definiert als

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-c}{d}\right)\right], \quad \text{Gleichung 4.16}$$

womit für ein Hochwasser der Jährlichkeit T gilt:

$$HQ_T = c + d \cdot y(T) \text{ mit } y(T) = \ln(T). \quad \text{Gleichung 4.17}$$

Dabei lassen sich c als Lageparameter (häufigster Wert) und d als Massstabsparameter (Kurvenstei- gung) interpretieren (KLUGE, 1996); ihre Werte ergeben sich aus der Kurvenanpassung an die Daten.

Konfidenzintervalle

Um die Übereinstimmung von Extrapolationen aus Beobachtung und Simulation besser einschätzen zu können, sollen auch die jeweiligen statistischen Konfidenzintervalle betrachtet werden. Diese liegen symmetrisch zur Verteilung und beziehen sich auf den Schätzfehler, mit welchem die Verteilungsfunktion F (vgl. Gleichung 4.16) behaftet ist. Die Grenzen des Konfidenzbereichs berechnen sich

für eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit p in Abhängigkeit der Irrtumswahrscheinlichkeit α als (leicht verändert nach DVWK, 1999)

$$x_{p,1-\alpha,\min} = x(p) - \Delta(p) \quad \text{und} \quad x_{p,1-\alpha,\max} = x(p) + \Delta(p) \quad \text{Gleichung 4.18}$$

mit

$$\Delta(p) = z_{1-\alpha/2} \cdot s_x(p), \quad \text{Gleichung 4.19}$$

wobei sich die Varianz $s_x^2(p)$ näherungsweise berechnen lässt als

$$s_x^2(p) = \frac{s^2}{n} \left[1 + k_p \cdot q_{3,n} + 0.25 \cdot k_p^2 (q_{4,n} - 1) \right]. \quad \text{Gleichung 4.20}$$

Nötige Hilfsgrößen sind

$$k_p = \frac{(x(p) - m)}{s} \quad \text{Gleichung 4.21}$$

und die Zentralmomentquotienten

$$q_{k,n} = \frac{\frac{1}{n} \cdot \sum_1^n (x(i) - m)^k}{\left[\frac{1}{n} \cdot \sum_1^n (x(i) - m)^2 \right]^{k/2}}. \quad \text{Gleichung 4.22}$$

wo $x(p)$ extrapolierter Schätzwert mit Unterschreitungswahrscheinlichkeit p
 n Anzahl Werte (Jahreshochwasserspitzen)
 m der zugehörige Mittelwert
 s die zugehörige Standardabweichung
 $z_{(1-\alpha/2)}$ Wert der Normalverteilung an der Stelle $1-\alpha/2$

Um die Schätzungen wurde in dieser Arbeit jeweils ein Konfidenzband entsprechend der Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0.1$ gelegt. Dies ist ein Mass für die Unbestimmtheit, welche bezüglich der Überschreitungswahrscheinlichkeit eines gegebenen Hochwasserabflusses besteht; der Konfidenzbereich bezieht sich dabei alleine auf die extremwertstatistische Unsicherheit, welche durch den beschränkten Umfang der Stichprobe bedingt ist (MANIAK, 2005). Grundsätzlich wäre die Verwendung hydrologischer Konfidenzintervalle zu bevorzugen, welche sich explizit auf Fehler in den Eingangsgrößen (v. a. Niederschlag, vgl. Kapitel 7), in der hydrologischen Modellierung (Modellstruktur, Parameterunsicherheit, vgl. Kapitel 6) und in der Kalibrierungsgröße (Abflussmessung, vgl. Kapitel 2.2.2) beziehen. Die Einschätzung dieser Unsicherheiten ist aber bis heute schwierig und methodisch noch nicht etabliert (siehe z. B. PAPPENBERGER, 2006); sie können im Rahmen dieser Arbeit folglich nicht ausgewiesen werden.

Als Referenz verwendete Wiederkehrperiode

Als einheitliche Grundlage für die in den Kapiteln 5, 9 und 10 folgenden Fehlerbetrachtungen wird jeweils das hundertjährige Hochwasser (HQ_{100}) verwendet, welches aus der 20-jährigen, stündlich aufgelösten Reihe 1984–2003 gemäss oben beschriebener Methodik extrapoliert wurde. Es muss festgehalten werden, dass für die Ermittlung eines HQ_{100} gemäss DVWK (1999) mindestens eine Reihenlänge von 34 Jahren erforderlich wäre. Weil das HQ_{100} aber ein sehr verbreiteter Referenzwert ist, wird hier ausnahmsweise über den zulässigen Bereich hinaus extrapoliert; so können die Resultate den Fehleranalysen von BARBEN (2003) gegenübergestellt werden, welche ebenfalls auf dem HQ_{100} basieren. Aus diesen Vergleichen sind wichtige Informationen zu erwarten, zumal das hier erarbeitete Modellsystem komplementär zu den von BARBEN (2003) beschriebenen Verfahren verwendet werden soll.

Das Problem der maximal zulässigen Wiederkehrperiode ist in dieser Arbeit insofern nicht ausschlaggebend, als dass bei Ausarbeitung und Diskussion der Kalibrierungs- und Regionalisierungsmethodik ausschliesslich prozentuale Fehler bewertet werden und nicht absolute Schätzwerte. Somit scheint die Verwendung des HQ_{100} in diesem Zusammenhang gerechtfertigt, zumal die Fehlercharakteristiken verschiedener Wiederkehrperioden für den vorliegenden Datensatz sehr ähnlich sind. **Abbildung 4.3**

belegt dies anhand von 49 Gebieten der Priorität A, für welche aus Beobachtung und hochwasserkalibrierter Simulation jeweils der Schätzwert für ein HQ_{20} , ein HQ_{50} und ein HQ_{100} extrapoliert wurde – unter Verwendung des einheitlichen Schätzverfahrens E1-WGM. Es ist ersichtlich, dass sich die Verteilungscharakteristik der prozentualen Schätzfehler zwischen den betrachteten Wiederkehrperioden kaum unterscheidet, abgesehen von einer leicht grösseren Wertespanne bei zunehmender Wiederkehrperiode.

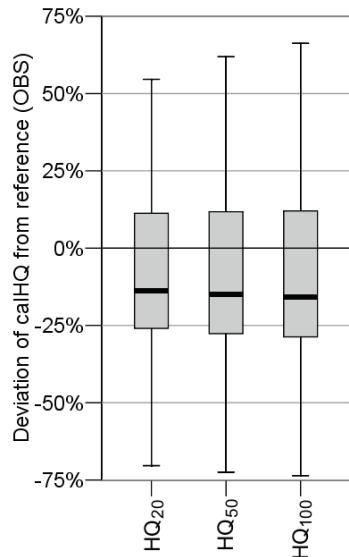


Figure 4.3: Deviation of flood calibrated simulation ($calHQ$) from reference (observation, OBS) concerning HQ_{20} , HQ_{50} and HQ_{100} extrapolated from time series 1984–2003. Data: 49 priority A catchments.

Abbildung 4.3: Abweichung der hochwasserkalibrierten Simulation ($calHQ$) von der Beobachtung (OBS) betreffend eines aus dem Zeitraum 1984–2003 extrapolierten HQ_{20} , HQ_{50} und HQ_{100} . Datenbasis: 49 Einzugsgebiete der Priorität A.

4.3 Feinabstimmung der Methode

4.3.1 Übersicht

Für die Hochwasserkalibrierung steht nun eine Kombination von spezifischen Gütemassen zur Verfügung; die entsprechende Methodik muss aber in verschiedenen Verfahrensdetails noch ausgearbeitet werden (**Abbildung 4.4**). Durch Festlegen von Standardwerten wurde eine Ausgangsvariante geschaffen (schraffiert in **Abbildung 4.4**), welche im Folgenden Punkt für Punkt untersucht wird:

- 1.) Gewichtung der Hochwassergütemasse gegenüber den Standardgütemassen (w_{HQ});
Ausgangswert: 0.75; Alternativwerte: 0.0, 0.25, 0.5, 1.0.
- 2.) Anzahl der Parameter, welche auf Hochwasser kalibriert werden;
Ausgangswert: alle 12 Parameter (14 für vergletscherte Gebiete); Alternativwert: 6 Parameter.
- 3.) Anzahl Durchläufe, welche die vorangehende Mittelwasserkalibrierung umfasst;
Ausgangswert: 2 Durchläufe; Alternativwerte: 0 oder 3 Durchläufe.
- 4.) Kalibrierungszeitraum;
Ausgangswert: 1994–1997; Alternativwerte: 1984–1987, 1989–1992, 1999–2003.

Um den Rechenaufwand in einem vernünftigen Rahmen zu halten, erfolgt die Untersuchung anhand von sechs Testgebieten, welche eine aussagekräftige Stichprobe zu verschiedenen Reaktionstypen, Gebietsgrössen und Kalibrierungsresultaten bilden. Es sind dies Allenbach–Adelboden (AllAde, 28.8 km^2), Birse–Moutier (BirMou, 183 km^2), Dischmabach–Davos/Kriegsmatte (DisDaK, 43.3 km^2), Simme–Oberwil (SimObw, 344 km^2), Thur–Halden (ThuHal, 1085 km^2) und Weisse Lütschine–Zweilütschinen (WLuZwe, 164 km^2). Des weiteren wurden die jeweils für einen Punkt gefundenen optimalen Einstellungen (dick umrahmt in **Abbildung 4.4**) bei der Untersuchung der verbleibenden Punkte nicht mehr verändert.

Zur Bewertung der Resultate dienen jeweils die verschiedenen hochwasser- und mittelwassersensitiven Gütemasse; ergänzend dazu wurden auch die simulierten Ganglinien und die daraus extrapolierten Hochwasserstatistiken betrachtet. Es zeigte sich aber, dass die Gütemasse ausreichend sensitiv und aussagekräftig sind, um die verschiedenen Variationsmöglichkeiten der Methodik zu bewerten.

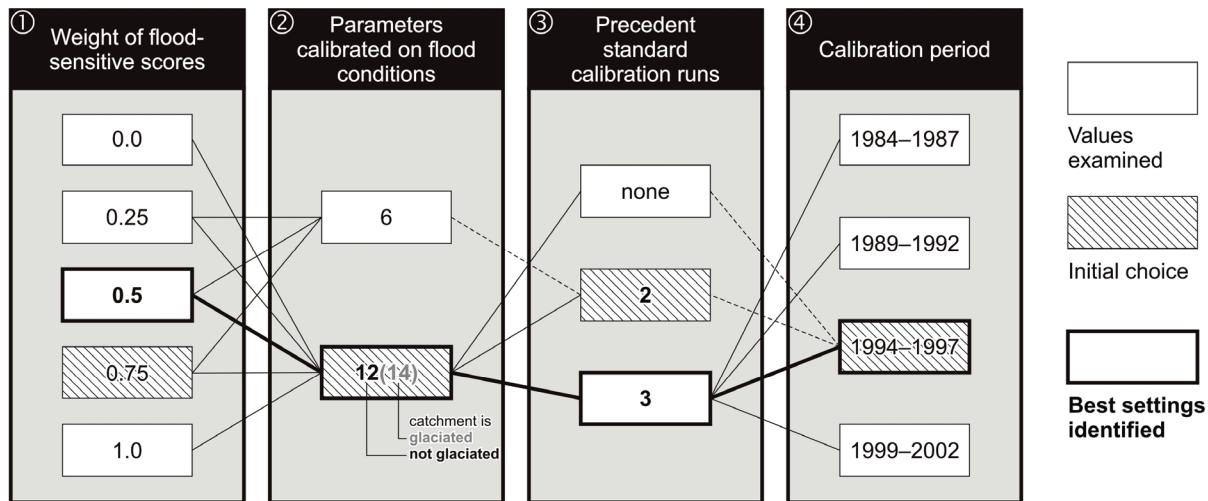


Figure 4.4: Details examined within the flood calibration procedure.

Abbildung 4.4: Untersuchte Details der Hochwasserkalibrierung.

4.3.2 Feinabstimmung 1: Gewichtung der Hochwassergütemasse

Übersicht

In einem ersten Schritt muss die Gewichtung der Hochwassergütemasse gegenüber den Standardgütemassen festgesetzt werden (w_{HQ}). Anhand von **Abbildung 4.5** wird der grundsätzliche Einfluss des Gewichtes der Hochwasserkalibrierung auf die Modellresultate aufgezeigt. Dargestellt ist der Kalibrierungsverlauf für Allenbach–Adelboden mit Bezugszeitraum 1994–1997. Das Modell wurde zuvor mit zwei Kalibrierungsdurchgängen auf Mittelwasser geeicht und zeigt nun in Abhängigkeit von w_{HQ} die folgenden Resultate:

- Bei einem Gewicht von $w_{HQ} = 0.0$ (oben) – also ohne Berücksichtigung der Hochwassergütemasse – werden die Standardgütemasse maximiert. Bei den Hochwassergütemassen zeigt sich hingegen keine eindeutige Tendenz zur Verschlechterung oder Verbesserung; dies bestätigt, dass in diesen Massen nicht dieselben Informationen enthalten sind wie in den Standardgütemassen. Einzig *WAE* scheint sich etwas zu stabilisieren, da dieses Mass ebenfalls die gesamte Ganglinie bewertet. Die Zusatzkalibrierung auf Hochwasser ist nach 108 Modelläufen abgeschlossen.
- Für das Gewicht $w_{HQ} = 0.50$ (Mitte) zeigen die Hochwassergütemasse eine deutliche und stabile Verbesserung. Dies geht allerdings zu Lasten der Standardgütemasse *ALIN*, *ALOG*, *AVOL* und *ATOT*. Diese Masse bleiben zwar ausreichend stabil – also auf dem Niveau der zuvor durchgeföhrten Mittelwasserkalibrierung –, weisen aber im Verlaufe der Kalibrierung keine deutliche Verbesserung auf. Zu beachten ist, dass *NSE* auch bei den Hochwassergütemassen berücksichtigt wird und folglich etwas konstantere Resultate aufweist. Die Zusatzkalibrierung auf Hochwasser benötigt 140 Modelläufe.
- Die Resultate für $w_{HQ} = 1.00$ (unten) gleichen denjenigen von $w_{HQ} = 0.50$ stark; Unterschiede treten erst ab der Kalibrierung des zweiten Parameterpaars in Modellauf 33 auf. Im Endresultat erreicht *PSR* deutlich höhere Werte, während sich *WAE* etwas weniger stark verbessert; *PQT* und *PSAE* erreichen geringfügig bessere Werte.

Wie erwartet geht die Hochwasserkalibrierung also auf Kosten der Standardgütemasse; diesbezüglich gilt es einen Kompromiss zu finden. Zudem scheinen die Hochwassergütemasse auch dann starke Verbesserungen zu zeigen, wenn sie in der Kalibrierung nicht voll gewichtet ($w_{HQ} = 1.00$) sind. Als im Folgenden zu untersuchende Gewichte w_{HQ} wurden wie schon erwähnt 0.00, 0.25, 0.50, 0.75 und 1.00 gewählt. In einigen der betrachteten sechs Testgebiete wurden weitere Werte für w_{HQ} getestet, wenn die Resultate dies nötig erscheinen liessen; insgesamt erwiesen sich die genannten Werte aber als ausreichend repräsentativ, um im Vergleich der Testgebiete eine definitive Wahl für w_{HQ} zu treffen.

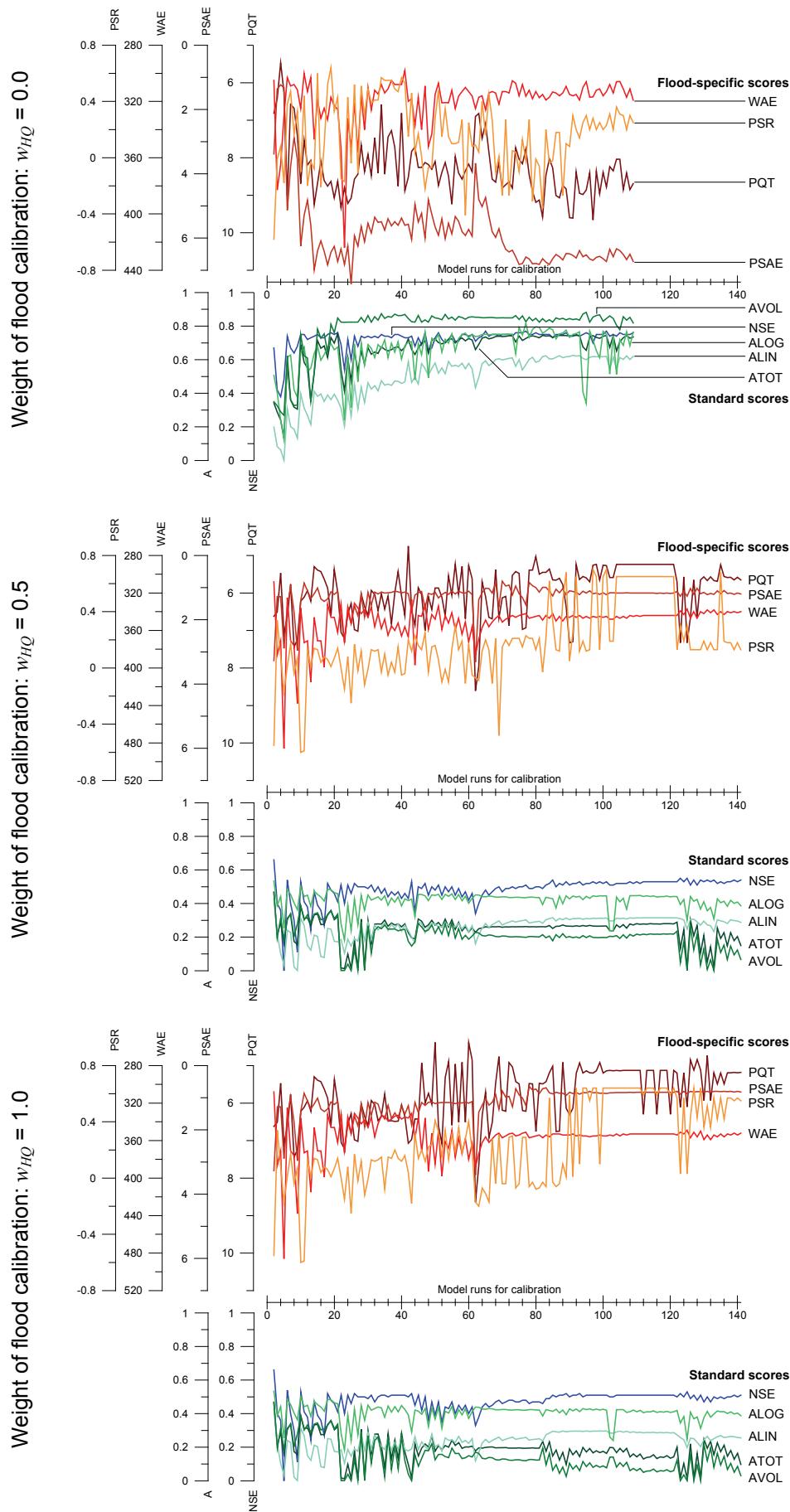


Figure 4.5: Course of standard (NSE, ALIN, ALOG, AVOL, ATOT) and flood specific (PQT, PSAE, WAE, PSR) scores during a flood calibration, for varying flood calibration weights w_{HQ} . Sample catchment: Allenbach–Adelboden (28.8 km^2), calibration period 1994–1997.

Abbildung 4.5: Verlauf der Standard- (NSE, ALIN, ALOG, AVOL, ATOT) und der Hochwassergütemasse (PQT, PSAE, WAE, PSR) während einer Kalibrierung auf Hochwasser, mit unterschiedlicher Gewichtung der Hochwasserkalibrierung (w_{HQ}). Beispieldreieck: Allenbach–Adelboden (28.8 km^2), Kalibrierungsperiode 1994–1997.

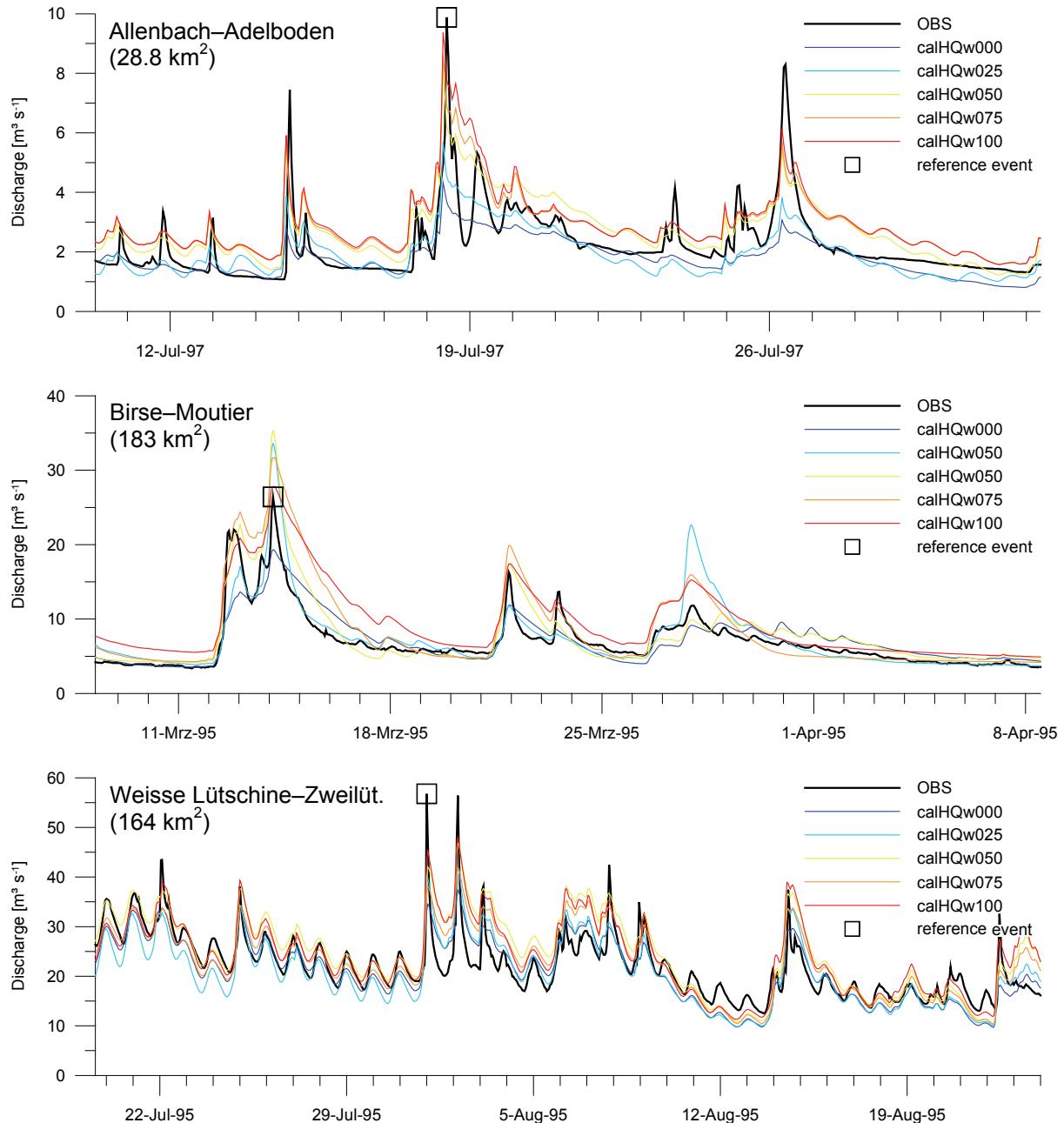


Figure 4.6: Simulated hydrographs according to flood calibration with different weights ($\text{calHQ}000: w_{HQ} = 0.00$, $\text{calHQ}100: w_{HQ} = 1.00$), compared to observation (OBS) for three sample catchments. A reference event is one of the m largest peak discharges which are evaluated by PQT and PSAE.

Abbildung 4.6: Simulierte Ganglinien gemäss Hochwasserkalibrierung mit unterschiedlichen Gewichten ($\text{calHQ}000: w_{HQ} = 0.00$, $\text{calHQ}100: w_{HQ} = 1.00$) im Vergleich zur Beobachtung (OBS) für drei Beispielgebiete. Ein Referenzereignis ist eine der m grössten Hochwasserspitzen, welche von PQT und PSAE bewertet werden.

Wie sich die Wahl von w_{HQ} in der Ganglinie niederschlägt, demonstriert **Abbildung 4.6** anhand von drei Testgebieten. Gut erkennbar ist, wie die grossen Abflussspitzen mit zunehmender Gewichtung der Hochwasserkalibrierung besser abgebildet werden, gleichzeitig nimmt die Simulationsqualität der Rezessionsperioden und der kleineren Abflussspitzen ab.

Resultate

Die Tücken bei der Festlegung des Gewichtes w_{HQ} offenbaren sich in **Abbildung 4.7**: Bis zu einem gewissen Grad zeigt jedes der sechs Testgebiete eine individuelle Reaktion auf die Hochwasserkalibrierung, und zwar sowohl bei den Hochwasser- wie auch bei den Mittelwassergütemassen. Somit wird auch in diesem Punkt wiederum ein Kompromiss zu treffen sein, soll doch eine Einstellung gefunden werden, welche in möglichst vielen Gebieten zu optimalen Resultaten führt. Gleichzeitig gilt es weiterhin, die Verluste im Mittelwasserbereich vertretbar zu halten.

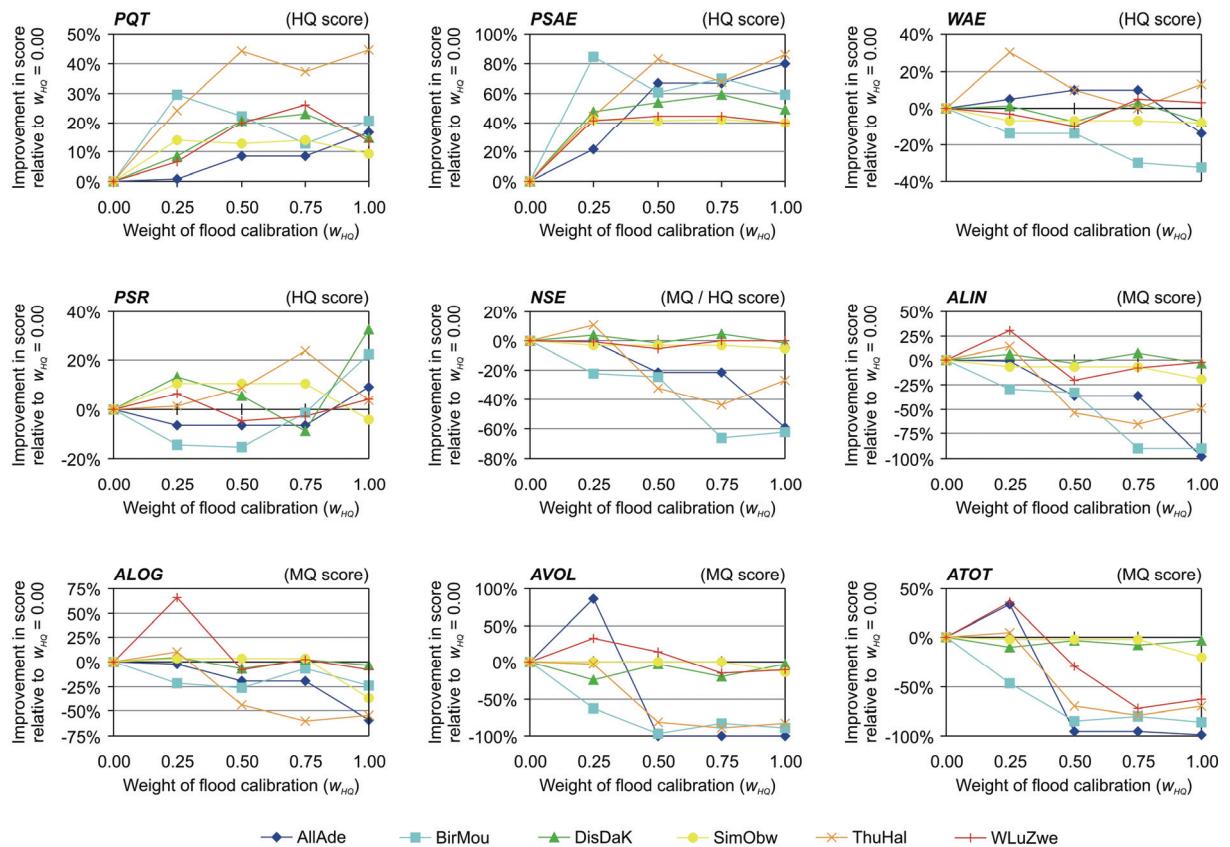


Figure 4.7: Flood-sensitive (HQ) and standard (MQ) scores for six test catchments, depending on weight of flood calibration (w_{HQ}). All results are depicted relative to calibration with $w_{HQ} = 0$.

Abbildung 4.7: Hochwasserspezifische Gütemasse (HQ) und Standardgütemasse (MQ) für sechs Testgebiete in Abhängigkeit vom Gewicht der Hochwasserkalibrierung (w_{HQ}). Alle Resultate sind im Verhältnis zur Kalibrierung mit $w_{HQ} = 0$ dargestellt.

Die in **Abbildung 4.7** andeutungsweise erkennbaren Tendenzen lassen sich gut herausarbeiten, indem pro Gütemass die mittlere Verbesserung (oder Verschlechterung) aller sechs Testgebiete betrachtet wird (**Abbildung 4.8**). Dabei zeigt sich einerseits, dass die beiden wichtigsten hochwassersensitiven Gütemasse *PQT* und *PSAE* ab einem Gewicht von $w_{HQ} = 0.5$ keine Verbesserung mehr zeigen. Andererseits steigen einige der Standardgütemasse bei $w_{HQ} = 0.25$ noch geringfügig an, fallen aber dann bei $w_{HQ} = 0.5, 0.75$ und 1.0 kontinuierlich ab. Als am besten geeignet erscheint deshalb ein Wert von $w_{HQ} = 0.5$: Hier wird eine starke Verbesserung der Hochwassergütemasse erreicht, während der Verlust bei den Mittelwassergütemassen nicht grösser ausfällt als nötig. Bestätigt wird diese Wahl von w_{HQ} durch die Resultate der Hochwasserextrapolation, welche bei Gewichten von $w_{HQ} > 0.5$ in einigen Fällen schlechtere Resultate erzielt (SONDEREGGER, 2005).

Dass die Hochwassergütemasse *PQT* und *PSAE* bei hohen Gewichten w_{HQ} nicht weiter verbessert werden, ist dadurch zu erklären, dass weitere Anpassungen in den fehlerhaftesten Abflussspitzen gleichzeitig zu Lasten besser angepasster Spitzen gehen können. Die Masse verlieren in diesem Fall an Sensitivität, da gemäss ihrer Definition keine objektiv vorzuziehende Parameterkombination besteht.

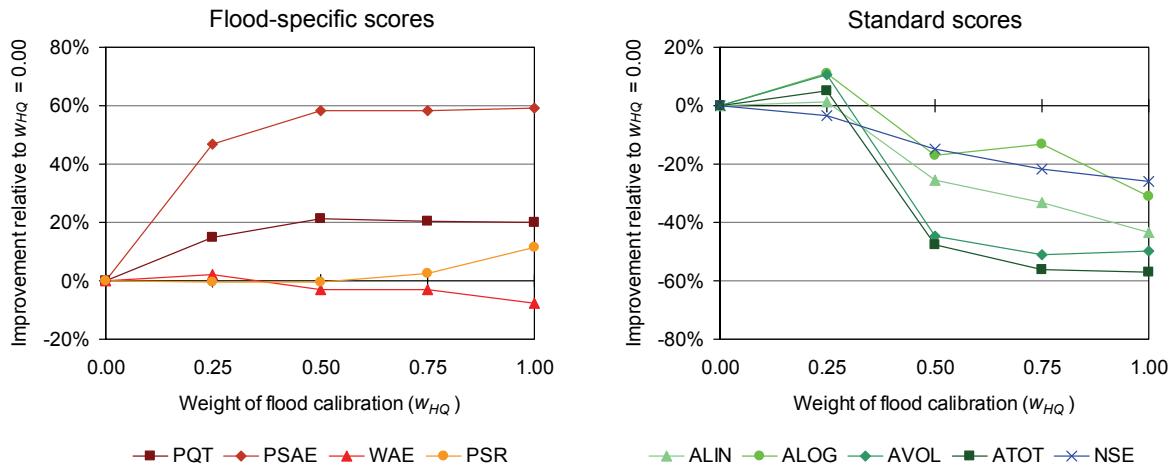


Figure 4.8: Average increase or decrease in calibration results for six test catchments, depending on weight of flood calibration (w_{HQ}), relative to calibration with $w_{HQ} = 0$.

Abbildung 4.8: Durchschnittliche Verbesserung oder Verschlechterung der Kalibrierungsresultate für sechs Testgebiete in Abhängigkeit vom Gewicht der Hochwasserkalibrierung (w_{HQ}), dargestellt relativ zur Kalibrierung mit $w_{HQ} = 0$.

4.3.3 Feinabstimmung 2: Anzahl kalibrierter Parameter

Als zweiten Punkt gilt es zu ermitteln, ob alle freien Modellparameter auf Hochwasser kalibriert werden sollen, oder ob es vorteilhafter ist, nur diejenigen Parameter weiter zu kalibrieren, welche an der Bildung von schnellen Abflussreaktionen am direktesten beteiligt sind. HARLIN UND KUNG (1996) wiesen beispielsweise für das HBV-Modell nach, dass die Güte der Hochwasserextrapolation stark von den Modellparametern $K0H$ und $K1H$ abhängt. Für die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit wurden aus der Modellierungserfahrung heraus sechs entsprechende Parameter ausgewählt und für die Kalibrierung zu drei Paaren zusammengefasst (siehe Abbildung 2.7):

- Paar 1: $K0H$ (Speicherzeit für Oberflächenabfluss $R0$ aus dem oberen Abflussspeicher SUZ) und SGR (Grenzwert für Bildung von $R0$ aus SUZ).
- Paar 2: $K1H$ (Speicherzeit für Zwischenabfluss RI aus SUZ) und $PERC$ (Perkolationsrate aus SUZ in die unteren Abflussspeicher SLZ); da diese beiden Werte den Füllungsgrad von SUZ wesentlich beeinflussen, wirken sie sich auch stark auf das Erreichen von SGR und somit auf die Bildung von $R0$ aus.
- Paar 3: $PKOR$ und $SNOKOR$ (Bilanzkorrekturfaktoren für Regen resp. Schnee); sie beeinflussen die Wassermenge, welche nach Durchlaufen des Bodenfeuchtemoduls in die Abflussspeicher-Kaskade gelangt und sich dort wiederum auf den Füllungsgrad von SUZ und somit auch auf $R0$ und RI auswirkt.

Sowohl im Mittelwasser- wie auch im Hochwasserbereich ist hier im Vergleich zur oben untersuchten Gewichtung über w_{HQ} eine etwas weniger starke Beeinflussung der Resultate zu erwarten. Die ebenfalls von HARLIN UND KUNG (1996) identifizierte Sensitivität der Frühlingshochwasser auf den Grad-Tag-Faktor der Schneeschmelze ($TMFSNOW$) konnte zwar bestätigt werden, wegen der sehr unterschiedlichen Bedeutung dieses Parameters auf Hochwasser in verschiedenen Regionen der Schweiz scheint eine gezielte Rekalibrierung mit den oben vorgestellten Parameterpaaren aber nicht angebracht.

Tabelle 4.2 zeigt nun, dass PQT und $PSAE$ bessere Resultate erreichen, wenn alle Parameter auf Hochwasser kalibriert werden. Offenbar gelingt die Anpassung auf Spitzenabflüsse besser, wenn allen Bereichen des Modells nochmals eine gewisse Freiheit zugestanden wird. Bei den Resultaten im Mittelwasserbereich (repräsentiert durch NSE und $ATOT$) sind dabei sowohl Verbesserungen wie auch Verschlechterungen möglich, wobei die Variante mit Kalibrierung von nur sechs Parametern leicht besser abschneidet – da aber die Spitzenabflüsse interessieren, ist dies wenig relevant.

Table 4.2: Influence of the number of parameters calibrated on flood conditions (n_p) on flood-specific scores PQT, PSAE and WAE in the calibration period. Better results are each marked in grey. Standard scores NSE and ATOT are indicated for comparison with normal flow conditions.

Tabelle 4.2: Einfluss der Anzahl auf Hochwasser kalibrierten Parameter (n_p) auf die Hochwassergütemasse PQT, PSAE und WAE im Kalibrierungszeitraum. Die jeweils besten Resultate sind grau hinterlegt. Als Vergleichswerte für den Mittelwasserbereich sind die Gütemasse NSE und ATOT angegeben.

Catchment	n_p	Flood-specific scores			Standard scores	
		PQT	PSAE	WAE	NSE	ATOT
Allenbach–Adelboden	6	5.29	2.16	334	0.13	0.60
	12	4.59	0.87	336	0.02	0.50
Birse–Moutier	6	7.95	2.63	51	0.20	0.42
	12	5.45	0.97	42	0.09	0.50
Dischmabach–Davos	6	3.35	0.37	161	0.38	0.79
	12	4.91	1.12	164	0.48	0.73
Simme–Oberwil	6	3.48	0.34	85	0.74	0.80
	12	4.41	0.25	79	0.74	0.81
Thur–Halden	6	5.00	4.13	359	0.33	0.66
	12	2.21	1.92	404	0.22	0.47
Weisse Lütschine–Zweilütschinen	6	2.97	0.19	279	0.34	0.84
	12	2.33	0.18	314	0.50	0.80
Best results count		6	2	1	4	3
					2	2

Abbildung 4.9 illustriert die grösitere Flexibilität der Spitzenanpassung bei Kalibrierung aller Parameter, wiederum anhand der schon in **Abbildung 4.6** betrachteten drei Gebiete. Die Ganglinien der nur mit 6 Parametern kalibrierten Gebiete bleiben zwar oft näher an den beobachteten Werten, können aber die Spitzenwerte meist weniger genau wiedergeben. Die Unterschiede fallen aber wie erwartet weit weniger markant aus als bei Veränderung des Gewichtes w_{HQ} . Die etwas schlechtere Mittelwassergüte bei Kalibrierung aller Parameter scheint vertretbar.

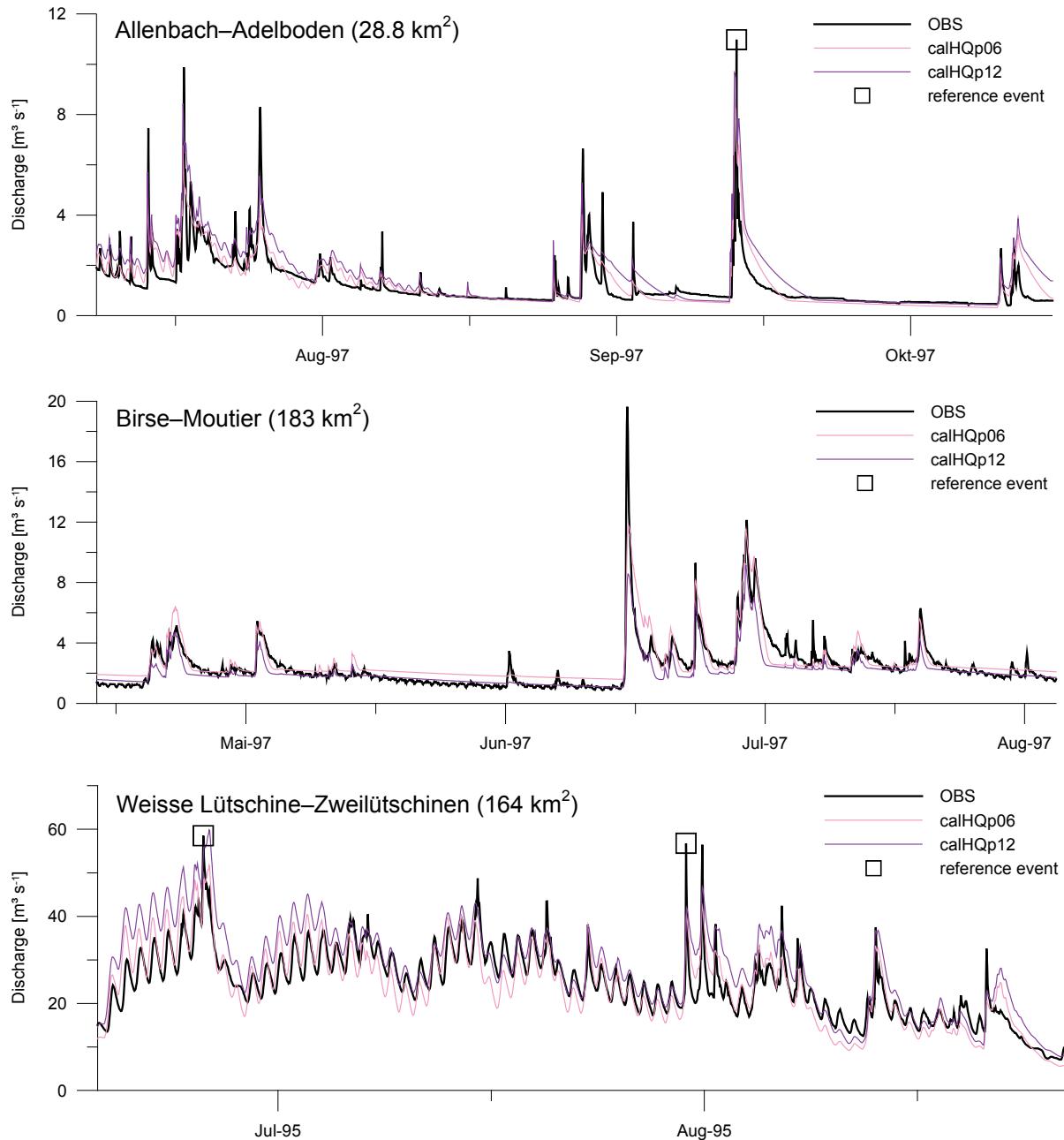


Figure 4.9: Simulated hydrographs according to flood calibration with different number of parameters calibrated on flood conditions (calHQp06: 6 parameters, calHQp12: all 12 or, if applicable, 14 parameters), compared to observation (OBS) for three sample catchments. A reference event is one of the m largest peak discharges which are evaluated by PQT and PSAE.

Abbildung 4.9: Simulierte Ganglinien gemäss Hochwasserkalibrierung mit unterschiedlicher Anzahl neu kalibrierter Parameter (calHQp06: 6 Parameter, calHQp12: alle 12 oder gegebenenfalls 14 Parameter) im Vergleich zur Beobachtung (OBS) für drei Beispielgebiete. Ein Referenzereignis ist eine der m grössten Hochwasserspitzen, welche von PQT und PSAE bewertet werden.

4.3.4 Feinabstimmung 3: Kalibrierung auf Mittelwasser

Die dritte Feinabstimmung betrifft die Mittelwasserkalibrierung, welche vor der Anpassung auf Hochwasser durchgeführt wird. Als Ausgangsvariante (vgl. Abbildung 4.4) wurde hierzu angenommen, dass die Hochwasserkalibrierung von einem Parametersatz ausgeht, welcher mit zwei Kalibrierungs-

durchgängen auf Mittelwasser geeicht wurde – im Sinne einer hydrologisch plausiblen Parameterwahl, welche noch leicht zugunsten der Spitzenabflüsse verbessert wird. Dazu werden zwei Alternativen betrachtet: einerseits eine direkte Hochwasserkalibrierung auf Basis der unkalibrierten Startparameter, andererseits eine Hochwasserkalibrierung mit Ausgangspunkt bei einem etwas genauer (mit drei statt zwei Kalibrierungsdurchgängen) auf Mittelwasser geeichten Parametersatz.

Table 4.3: Influence of the number of preceding standard calibration runs (n_s) on flood-specific scores PQT, PSAE and WAE in the calibration period. Best results are each marked in dark grey, worst ones in light grey. Standard scores NSE and ATOT are indicated for comparison with normal flow conditions.

Tabelle 4.3: Einfluss der Anzahl Vorkalibrierungen auf Mittelwasser (n_s) auf die Hochwassergütemasse PQT, PSAE und WAE im Kalibrierungszeitraum. Die jeweils besten Resultate sind dunkelgrau hinterlegt, die schlechtesten hellgrau. Als Vergleichswerte für den Mittelwasserbereich sind die Gütemasse NSE und ATOT angegeben.

Catchment	n_s	Flood-specific scores			Standard scores	
		PQT	PSAE	WAE	NSE	ATOT
Allenbach–Adelboden	0	18.31	18.45	2154	0.43	0.01
	2	21.91	20.81	2095	0.56	0.02
	3	22.11	15.82	2166	0.50	0.02
Birse–Moutier	0	23.48	3.59	253	0.43	0.16
	2	23.51	4.82	320	-0.02	0.07
	3	23.59	5.76	238	0.50	0.09
Dischmabach–Davos	0	23.06	1.67	1066	0.78	0.29
	2	24.75	5.09	1053	0.77	0.43
	3	23.93	5.01	1116	0.73	0.48
Simme–Oberwil	0	23.85	5.10	485	0.80	0.78
	2	24.08	3.81	533	0.80	0.70
	3	24.04	4.58	514	0.81	0.74
Thur–Halden	0	23.11	15.43	2221	0.52	0.25
	2	22.81	16.68	2486	0.39	0.15
	3	20.29	8.81	2243	0.47	0.22
Weisse Lütschine–Zw.	0	24.40	9.20	1994	0.82	0.22
	2	27.16	10.23	1902	0.83	0.50
	3	25.24	9.54	2022	0.80	0.50
Best results count		0	10	8	8	3
		2	3	3	3	0
		3	5	7	6	3

Betrachtet man die Gütemasse der drei untersuchten Möglichkeiten (Tabelle 4.3), scheint es sich bei der Variante ohne vorherige Kalibrierung auf Mittelwasser um die beste zu handeln. Da bei dieser Variante aber vermutet werden muss, dass das hydrologische Verhalten der Gebiete insgesamt schlechter wiedergegeben wird, sind neben den Gütemassen unbedingt auch die Ganglinien zu betrachten. Abbildung 4.10 zeigt exemplarisch drei Ganglinien: Während die Unterschiede bei der nival geprägten Simme (Oberried) und der glazio-nivalen Weissen Lütschine (Zweilütschinen) gering sind, zeigt sich am Beispiel der nivo-pluvialen Birse (Moutier) deutlich, dass die Variante ohne vorhergehende Mittelwasserkalibrierung trotz guter Resultate eine entscheidende Schwäche hat: Ausserhalb der grösseren Abflussereignisse wird hier der Abflussverlauf nicht mehr immer realistisch (im vorliegenden Beispiel zu hoch) wiedergegeben. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Spitzenabflüsse auf Basis der unkalibrierten Ganglinie mit zu grosser Priorität verbessert werden und dem restlichen Abflussgeschehen nicht mehr genügend Bedeutung zugemessen wird. Dies widerspricht klar dem Grundgedanken des vorlegenden Modellsystems, welches eine hydrologisch sinnvolle Wiedergabe der gesamten Ganglinie zum Ziel hat. Denn damit ein Modellsystem auch aussergewöhnliche Bedingungen möglichst korrekt nachbilden kann, müssen dessen Parameter auf eine hydrologisch sinnvolle

Art und Weise auf das Gebietsverhalten abgestimmt sein. Da die Variante ohne Vorkalibrierung auf Mittelwasser also entfällt, wird die zweitbeste Variante verwendet, welche gemäss **Tabelle 4.3** diejenige mit drei Vorkalibrierungen ist.

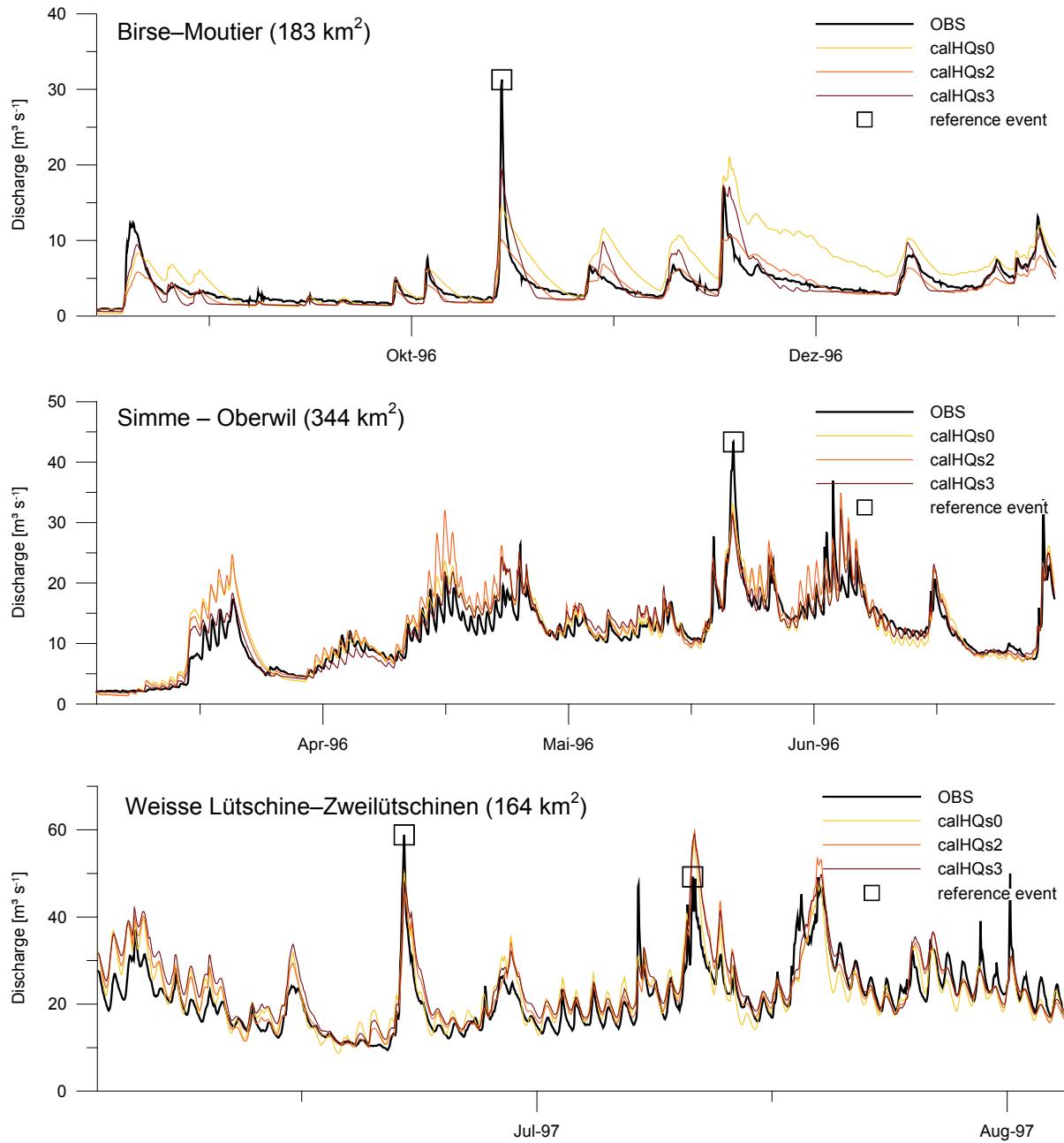


Figure 4.10: Simulated hydrographs according to flood calibration with different number of preceding standard calibration runs ($\text{calHQs}0$: none, $\text{calHQs}2$: 2, $\text{calHQs}3$: 3), compared to observation (OBS) and uncalibrated simulation (cal0) for three sample catchments. A reference event is one of the m largest peak discharges which are evaluated by PQT and PSAE.

Abbildung 4.10: Simulierte Ganglinien gemäss Hochwasserkalibrierung mit unterschiedlicher Anzahl Vorkalibrierungen auf Mittelwasser ($\text{calHQs}0$: ohne, $\text{calHQs}2$: 2, $\text{calHQs}3$: 3) im Vergleich zur Beobachtung (OBS) und zur unkalibrierten Simulation (cal0) für drei Beispielgebiete. Ein Referenzereignis ist eine der m grössten Hochwasserspitzen, welche von PQT und PSAE bewertet werden.

Bestätigt wird die getroffene Wahl durch die mittlere relative Verbesserung in den Hochwassergütemassen PQT_{cal0} , $PSAE_{cal0}$ und WAE_{cal0} . **Tabelle 4.4** zeigt, dass in dieser Analyse die Variante mit drei Vorkalibrierungen auf Mittelwasser am besten abschneidet. Insgesamt zeigt sich in diesem Punkt sehr deutlich, dass die Resultate in einem gewissen Masse von der Betrachtungsweise abhängen können – besonders in solchen Fällen ist es unerlässlich, methodische Überlegungen einzubeziehen und die simulierten Ganglinien zu betrachten.

Table 4.4: Average improvement of relative flood-specific scores $PQT_{rel,cal0}$, $PSAE_{rel,cal0}$ and $WAE_{rel,cal0}$ (calibration period, six test catchments) depending on the number of preceding standard calibration runs (n_s). Best results are each marked in dark grey, worst ones in light grey. Average of standard scores NSE and ATOT are indicated for comparison with normal flow conditions.

Tabelle 4.4: Mittlere Verbesserung der relativen Hochwassergütemasse $PQT_{rel,cal0}$, $PSAE_{rel,cal0}$ und $WAE_{rel,cal0}$ (Kalibrierungszeitraum, sechs Testgebiete) in Abhängigkeit von der Anzahl Vorkalibrierungen auf Mittelwasser (n_s). Die jeweils besten Resultate sind dunkelgrau hinterlegt, die schlechtesten hellgrau. Als Vergleichswerte für den Mittelwasserbereich sind die Mittel der Gütemasse NSE und ATOT angegeben.

n_s	Flood-specific scores (mean)			Standard scores (mean)	
	$PQT_{rel,cal0}$	$PSAE_{rel,cal0}$	$WAE_{rel,cal0}$	NSE	ATOT
0	1.02	4.66	0.51	0.63	0.28
2	1.16	5.67	0.41	0.55	0.31
3	1.21	5.22	0.52	0.65	0.34

4.3.5 Feinabstimmung 4: Kalibrierungszeitraum

Als letzter Punkt der Feinabstimmung soll der Einfluss des zur Kalibrierung verwendeten 4-Jahres-Zeitraums untersucht werden. Als Grundlage dienen die vier unabhängigen Zeitabschnitte 1984–1987, 1989–1992, 1994–1997, 1999–2003 (jeweils mit vorgesetztem Initialisierungsjahr). Das Modell wird gemäss dem bisher ermittelten besten Verfahren für alle Zeiträume mit drei Kalibrierungsdurchgängen auf Mittelwasser geeicht und anschliessend mit einem Gewicht von $w_{HQ} = 0.5$ und unter Berücksichtigung aller Modellparameter weiter auf Hochwasser angepasst.

Table 4.5: Average improvement of relative flood-specific scores $PQT_{rel,cal0}$, $PSAE_{rel,cal0}$ and $WAE_{rel,cal0}$ (validation period, six test catchments) depending on calibration period. Best results are each marked in dark grey, worst ones in light grey. Average of standard scores NSE and ATOT are indicated for comparison.

Tabelle 4.5: Mittlere Verbesserung der relativen Hochwassergütemasse $PQT_{rel,cal0}$, $PSAE_{rel,cal0}$ und $WAE_{rel,cal0}$ (Validierungszeitraum, sechs Testgebiete) in Abhängigkeit vom Kalibrierungszeitraum. Die jeweils besten Resultate sind dunkelgrau hinterlegt, die schlechtesten hellgrau. Als Vergleichswerte für den Mittelwasserbereich sind die Mittel der Gütemasse NSE und ATOT angegeben.

Calibration period	Validation period	Flood-specific scores (mean)			Standard scores (mean)	
		$PQT_{rel,cal0}$	$PSAE_{rel,cal0}$	$WAE_{rel,cal0}$	NSE	ATOT
1984–1987	1989–2003	0.80	2.20	0.22	0.48	0.25
1989–1992	1984–1988, 1993–2003	0.37	0.93	-0.46	0.25	0.13
1994–1997	1984–1993, 1998–2003	1.20	5.20	0.53	0.68	0.34
1999–2003	1984–1998	0.95	4.09	0.14	0.48	0.15

Die relativ deutlichen Unterschiede zwischen den Kalibrierungszeiträumen (**Tabelle 4.5**) überraschen auf den ersten Blick; es muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Resultate aus nur sechs Testgebieten für diese Analyse nur beschränkt repräsentativ sind, kommen doch neben den individuellen Unterschieden zwischen den Gebieten auch noch die Unterschiede im Modellantrieb hinzu. Es ist zu vermuten, dass die jeweiligen Kalibrierungszeiträume nicht alle in einem Gebiet möglichen meteorologischen Bedingungen enthalten. Deshalb fallen Parameterwahl und Resultate unterschiedlich aus. Aus theoretischen Überlegungen heraus ist dies zwar nicht optimal, lässt sich in der Praxis aber

kaum vermeiden. Der Zeitraum 1994–1997 wurde schon in der Mittelwasserkalibrierung verwendet, da er eine ideale Datenlage aufweist und gute Resultate zeigte. Diese Jahre enthalten keine grossflächigen extremen Ereignisse, weshalb die Eignung für die Hochwasserkalibrierung auf den ersten Blick erstaunt. Die Modellkalibrierung stützt sich aber nicht nur auf die grössten jährlichen Spitzen ab und ist offenbar in der Lage, einen geeigneten Parametersatz zu identifizieren. Dies spricht wiederum für die Tauglichkeit von Modell und Kalibrierung (vgl. SEIBERT, 2002).

Als Konsequenz dieser Unsicherheit bezüglich Kalibrierungszeitraum könnte versucht werden, die Modellparameter systematisch auf verschiedene Zeiträume zu kalibrieren und die resultierenden Simulationen als Grundlage für die Bildung von Konfidenzintervallen und einer medianen Ganglinie zu verwenden. In diese Richtung gehen die Analysen in Kapitel 6.4, wo unterschiedliche Kalibrierungszeiträume bezüglich der gefundenen Parametersätze untersucht werden. Eine konsequente Umsetzung dieses Ansatzes in der vorliegenden Arbeit ist aber nicht realisierbar: Einerseits ist damit ein enormer Kalibrierungsaufwand verbunden, andererseits stehen für viele der zu untersuchenden Gebiete keine vollständigen Beobachtungsreihen für 1984–2003 zur Verfügung.

4.4 Zusammenfassung

Eine Zusammenfassung des gesamten Kalibrierungsvorgangs auf Standardbedingungen (Mittelwasserkalibrierung) und auf den Hochwasserbereich (Hochwasserkalibrierung) zeigt **Abbildung 4.11**; mit den verwendeten Gütemassen und der Anzahl Kalibrierungsdurchgängen sind zudem wichtige Details der jeweiligen Prozeduren verzeichnet.

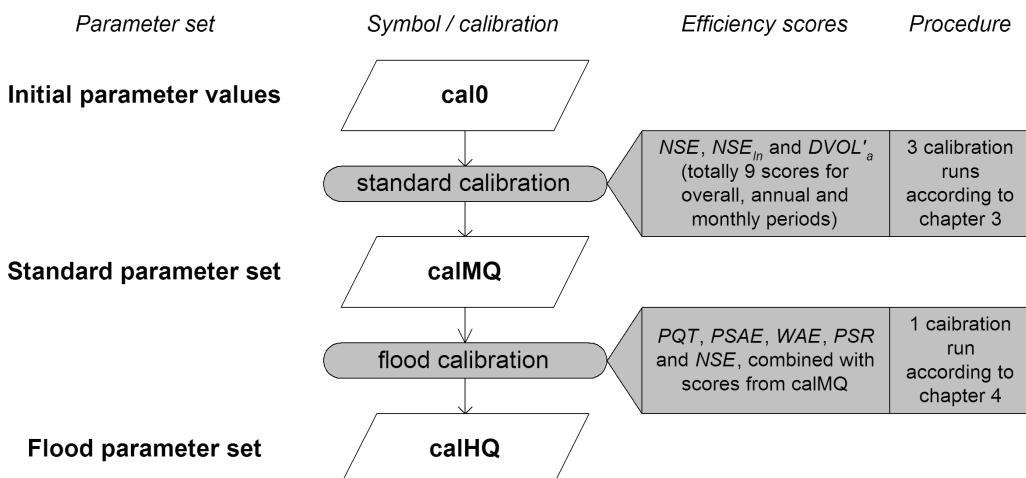


Figure 4.11: Overall scheme for standard calibration (calMQ) and flood calibration (calHQ) according to methods presented in chapters 3 and 4.

Abbildung 4.11: Übersichtsschema zu den in den Kapiteln 3 und 4 vorgestellten Kalibrierungen auf Standardbedingungen (Mittelwasserkalibrierung, calMQ) und auf den Hochwasserbereich (Hochwasserkalibrierung, calHQ).

Kapitel 5

Kalibrierung III: Resultate

The success of standard and flood calibrations is assessed, leading to a final set of 140 successfully calibrated catchments. For these data, results are summarised and discussed in detail, with additional focus on peak discharges. Furthermore, the extensive data set allows findings about range and correlation of model parameters in PREVAH.

Mittelwasser- und Hochwasserkalibrierung werden auf ihren Erfolg hin beurteilt, woraus sich ein definitiver Satz von 140 erfolgreich kalibrierten Einzugsgebieten ableitet. Die Modellgüten dieses Datensatzes werden zusammenfassend dargestellt und diskutiert, insbesondere auch bezüglich der Resultate im Hochwasserbereich. Die umfangreichen Ergebnisse erlauben des weiteren Aussagen zu Parameterbereich und Parameterkorrelation in PREVAH.

5.1 Ausschluss von Gebieten mit fehlgeschlagener Kalibrierung

5.1.1 Bewertungsschema und Nachkalibrierung

Da die kalibrierten Einzugsgebiete als Grundlage für eine Regionalisierung dienen, ist es besonders wichtig, misslungene Kalibrierungen zu erkennen dort gegebenenfalls Verbesserungen anzustreben. Ist die Kalibrierung eines Gebietes auch nach einer korrigierenden Nachkalibrierung mangelhaft, wird es aus dem Datenkollektiv ausgeschlossen, denn es ist dann davon auszugehen, dass aus dem betreffenden Gebiet keine zuverlässigen Informationen zu den Modellparametern gewonnen werden können. Das Verfahren zur Beurteilung des Kalibrierungserfolges mit eventueller Nachkalibrierung wird im Folgenden mit Hilfe der **Abbildung 5.1** erläutert:

- Als gelungen gilt die Kalibrierung, wenn sowohl der Mittelwasser- (calMQ) als auch der Hochwasserkalibrierte (calHQ) Parametersatz im Kalibrierungszeitraum eine Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) von 0.2 oder mehr erreichen. Dieser Grenzwert ist relativ tief angesetzt; er dient aber in erster Linie dazu, um die Eliminierung von unbrauchbaren Gebieten sicherstellen und gleichzeitig den Datensatz nicht unnötig zu verkleinern.
- Ist die Hochwasserkalibrierung misslungen ($\text{NSE}(\text{calHQ}) < 0.2$), wird auf Basis des erreichten Parametersatzes nachkalibriert: Ausser den Bilanzkorrekturfaktoren (PKOR , SNOKOR) werden alle Parameterpaare von calHQ nochmals mit einem Durchgang kalibriert. Die Bilanzkorrekturfaktoren werden nicht mehr verändert, weil die Wasserbilanz in diesem Stadium der Kalibrierung bereits gut angepasst sein sollte. Ist dies nicht der Fall, besitzen die Korrekturfaktoren keine identifizierbaren Optima, und ihre erneute Kalibrierung ist nicht sinnvoll. Erreicht der nachkalibrierte Parametersatz eine Effizienz von mindestens 0.2 ($\text{NSE}(\text{calHQ}^*) \geq 0.2$), wird das Gebiet beibehalten, ansonsten wird es fallengelassen.
- Ist bereits die Mittelwasserkalibrierung misslungen ($\text{NSE}(\text{calMQ}) < 0.2$), wird der frühere Kalibrierungsverlauf herangezogen: Insgesamt wurde calMQ bereits mit 3 Durchgängen (runs) kalibriert. Weist der zweite Durchgang ($\text{calMQ}_{\text{run}2}$) noch eine Effizienz von 0.2 oder höher auf, wird calMQ gemäss dem oben beschriebenen Verfahren ohne Berücksichtigung von PKOR und SNOKOR nachkalibriert; der resultierende Parametersatz calMQ^* wird bei Erfolg weiter auf Hochwasser kalibriert (calHQ^*), beurteilt und gegebenenfalls weiterhin verwendet. Andernfalls wird geprüft, ob der erste Kalibrierungsdurchgang ($\text{calMQ}_{\text{run}1}$) eine Effizienz von 0.2 oder höher aufwies und der entsprechende Volumenfehler ($|DVOL'_a|$) weniger als 20 mm a^{-1} betrug; bei Zutreffen wird ab dem zweiten Durchgang ($\text{calMQ}_{\text{run}2}$) nachkalibriert, wiederum mit Beurteilung der Resultate ($\text{calMQ}_{\text{run}2}^*$, calMQ^* , calHQ^*); treten in einem dieser Schritte Effizienzen von unter 0.2 auf, führt dies zum Ausschluss des Gebietes.

Die auf den ersten Blick naheliegende Verwendung des PREVAH-Gütemasses ATOT als Bewertungskriterium wurde verworfen; ATOT erfasst die hydrologische Plausibilität einer Modellierung zwar umfassender als die Nash-Sutcliffe-Effizienz NSE , gleichzeitig ist es aber schwieriger, einen objektiven

Grenzwert für $ATOT$ festzusetzen, unter welchem eine Simulation als nicht mehr plausibel angesehen werden muss.

Insgesamt entspricht dieses Vorgehen mit einer fallweisen Nachkalibrierung der Philosophie einer überwachten, halbautomatischen Kalibrierung, wie sie in Kapitel 3.1 erläutert wurde. Da sowohl Kontrolle wie auch Nachbesserung der Kalibrierung einem einheitlichen Schema folgen, werden die subjektiven Komponenten der Kalibrierung weiterhin gering gehalten – sie betreffen vor allem die verwendeten Grenzwerte für NSE . Somit werden auch hier alle Gebiete gleich behandelt, was eine wichtige Voraussetzung für die Regionalisierung darstellt.

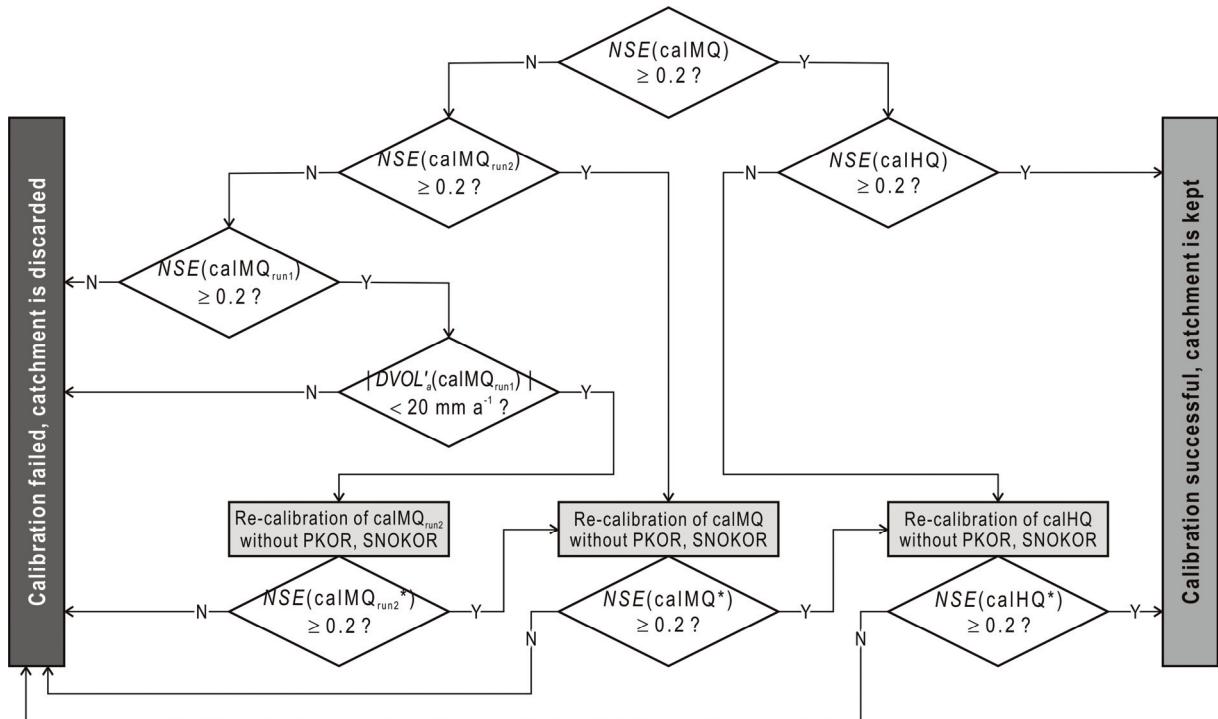


Figure 5.1: Procedure for assessment of calibration success and initiation of a possible re-calibration. Efficiency scores: Nash-Sutcliffe-Efficiency, linear (NSE) and average annual volumetric deviation ($DVOL'$); parameter sets: standard calibration ($calMQ$), flood calibration ($calHQ$), first and second run of standard calibration ($calMQ_{run1}$, $calMQ_{run2}$) and respective re-calibrated parameter sets ($calHQ^*$, $calMQ^*$, $calMQ_{run2}^*$). Since $calMQ$ is achieved from the third (final) standard calibration run, it could also be termed $calMQ_{run3}$.

Abbildung 5.1: Schema zur Beurteilung des Kalibrierungserfolges und Einleitung einer allfälligen Nachkalibrierung. Gütemasse: Nash-Sutcliffe-Effizienz, linear (NSE) und mittlere jährliche Volumenabweichung ($DVOL'$). Parametersätze: Mittelwasserkalibrierung ($calMQ$), Hochwasserkalibrierung ($calHQ$), erster und zweiter Durchgang der Mittelwasserkalibrierung ($calMQ_{run1}$, $calMQ_{run2}$) sowie entsprechende nachkalibrierte Parametersätze ($calHQ^*$, $calMQ^*$, $calMQ_{run2}^*$). Da $calMQ$ aus dem dritten (und letzten) Durchgang der Mittelwasserkalibrierung stammt, könnte dessen Bezeichnung auch $calMQ_{run3}$ lauten.

5.1.2 Fehlgeschlagene Kalibrierungen

Von den insgesamt 159 betrachteten Gebieten wurden 38 gemäss dem oben beschriebenen Verfahren nachkalibriert, für die Hälfte davon (19) war diese Nachbesserung erfolgreich. Die andere Hälfte zeigte weiterhin ungenügende Resultate und wurde folglich aus dem Datensatz ausgeschlossen; betroffen sind nur Gebiete der als weniger bedeutsam eingestuften Kalibrierungsgruppen 3 (1x), 4 (4x) und 5 (14x), und dabei vor allem kleine Gebiete (13 mit einer Fläche von weniger als 50 km^2 , 9 davon weniger als 25 km^2). Die Gründe für das Nichtgelingen der Kalibrierung können folgendermassen differenziert werden:

- Scheitern wegen bei der Kalibrierung aufgedeckten Problemen im beobachteten Abfluss (6x): Chise–Freimettigen (44.9 km^2), Dorfbach–Schwarzenburg (10.8 km^2), Langeneten–Lotzwil (115 km^2), Luterbach–Oberburg (34 km^2), Ruederchen–Schöftland (19 km^2), Urtenen–Schalunen (96 km^2).
- Scheitern wegen grossen, nicht korrigierbaren Fehlern in der Wasserbilanz (5x): Chalière–Moutier (18.1 km^2), Dünnern–Balsthal (139 km^2), Grönbach–Sigriswil (10.6 km^2), Suze–Villeret (52.4 km^2), Talbach–Schinznach-Dorf (14.5 km^2).
- Scheitern trotz genügend oder sogar gut angepasster Wasserbilanz (8x): Fisibach–Fisibach (14.9 km^2), Krauchtalbach–Krauchthal (16.2 km^2), Lyssbach–Schüpfen (22.5 km^2), Ösch–Koppigen (38 km^2), Surb–Döttingen (67.2 km^2), Tägerbach–Wislikofen (13.7 km^2), Ürke–Holziken (25.1 km^2), Worble–Ittigen (60.5 km^2).

Abbildung 5.2 zeigt die räumliche Lage dieser Gebiete und gibt Hinweise zum Scheitern wegen grossen, nicht korrigierbaren Fehlern in der Wasserbilanz: Dieses Problem kann mit den geologischen Verhältnissen erklärt werden, tritt es doch in verkarsteten Regionen auf, insbesondere im Jura. In PREVAH kann Karstabfluss in ein Fremdgebiet berücksichtigt werden: Der entsprechende Abfluss RK wird dem oberen Abflussspeicher SUZ entnommen und durch eine zugehörige Speicherzeit KKH gesteuert (siehe GURTZ ET AL., 1997, dort angewandt für den Pegel Thur–Stein). Da aber kaum Informationen zur Kalibrierung oder Parametrisierung von KKH bestehen und vor allem eine Regionalisierung dieses Wertes sehr problematisch erscheint, wurde auf eine explizite Berücksichtigung von Karsteffekten verzichtet.

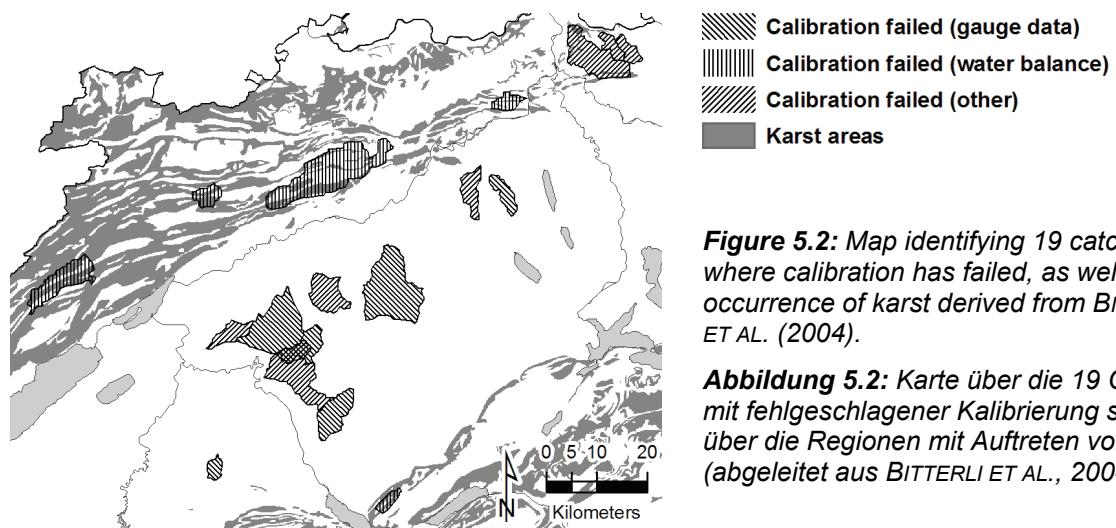


Figure 5.2: Map identifying 19 catchments where calibration has failed, as well as occurrence of karst derived from BITTERLI ET AL. (2004).

Abbildung 5.2: Karte über die 19 Gebiete mit fehlgeschlagener Kalibrierung sowie über die Regionen mit Auftreten von Karst (abgeleitet aus BITTERLI ET AL., 2004).

Für die fehlgeschlagenen Kalibrierungen im mittelländischen Molassegebiet liessen sich weder bezüglich Untergrund (v. a. Hydrogeologie: DEMATTEIS ET AL., 1997; BITTERLI ET AL., 2004) noch Bodentypen (FAP, 1980; BFS, 2003) Hinweise auf eine gemeinsame Ursache finden. **Abbildung 5.3** zeigt anhand des Krauchtalbachs bei Krauchthal (16.2 km^2) einen typischen Vertreter derjenigen Gebiete, welche trotz gut angepasster Wasserbilanz ($DVOL'_a$) schlechte Modellgüten zeigen. Man erkennt, dass vor allem zwischen Juni und Oktober 2001 Abflussspitzen beobachtet werden, welche vom Modell gar nicht oder deutlich zu tief wiedergegeben werden. Das Problem ist in diesem Fall vor allem beim Niederschlag zu suchen. Dieser erscheint zwar bezüglich Zeitpunkt und Menge plausibel, die Intensitätsspitzen werden aber in einem solch kleinen Gebiet stark abgeflacht, wenn im Stundenschritt gerechnet wird. Somit ist das Modell nicht fähig, den erforderlichen Oberflächenabfluss zu produzieren. Es ist anzunehmen, dass insbesondere für kleine Gebiete in kürzeren Zeitschritten (z. B. 5 oder 10 Minuten) gerechnet werden müsste, um die Niederschlagsspitzen in angemessener Intensität ins Modell eingeben zu können; die Interpolation solcher kurzen Intensitätsspitzen aus dem verfügbaren Messnetz wäre dann aber ein weiteres gewichtiges Problem. MCINTYRE ET AL. (2005) weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass die Unterschätzung von Abflussspitzen eine Schwierigkeit ist, welche sich durch Kalibrierung kaum beheben lässt, wenn die Ursache in den Niederschlagsdaten liegt; sind die Niederschlagsspitzen stark ausgemittelt, können Prozesse der schnellen Abflussbildung vom Modell nicht richtig wiedergegeben werden. Die Bereitschaft zur Bildung von Oberflächenabfluss lässt sich in der aktuellen Version von PREVAH allenfalls noch dadurch steigern, dass die entsprechende Speicherzeit KOH in der Kalibrierung nicht auf 10 h gegen unten begrenzt wird (vgl. **Tabelle 3.5**, S. 43), sondern im Extremfall nur auf 1 h. Da geringe Werte von KOH aber zu sehr sprunghaften

Gebietsantworten führen, welche nicht unter allen Bedingungen adäquat sind, wurde in der vorliegenden Arbeit der erwähnte untere Grenzwert von 10 h verwendet.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die im obigen Abschnitt beschriebenen Fehler im Zusammenhang mit zu tiefen Niederschlagsintensitäten vor allem für Gebiete mit einer Fläche von weniger als 25 km^2 ins Gewicht fallen können – 5 der 8 gescheiterten Gebiete mit korrekter Wasserbilanz besitzen diese Größenordnung. Weitere Erfahrungen zur Anwendung von PREVAH in kleinen Einzugsgebieten sind in den Arbeiten von BADOUX (2005) und WEHREN (2005) zu entnehmen.

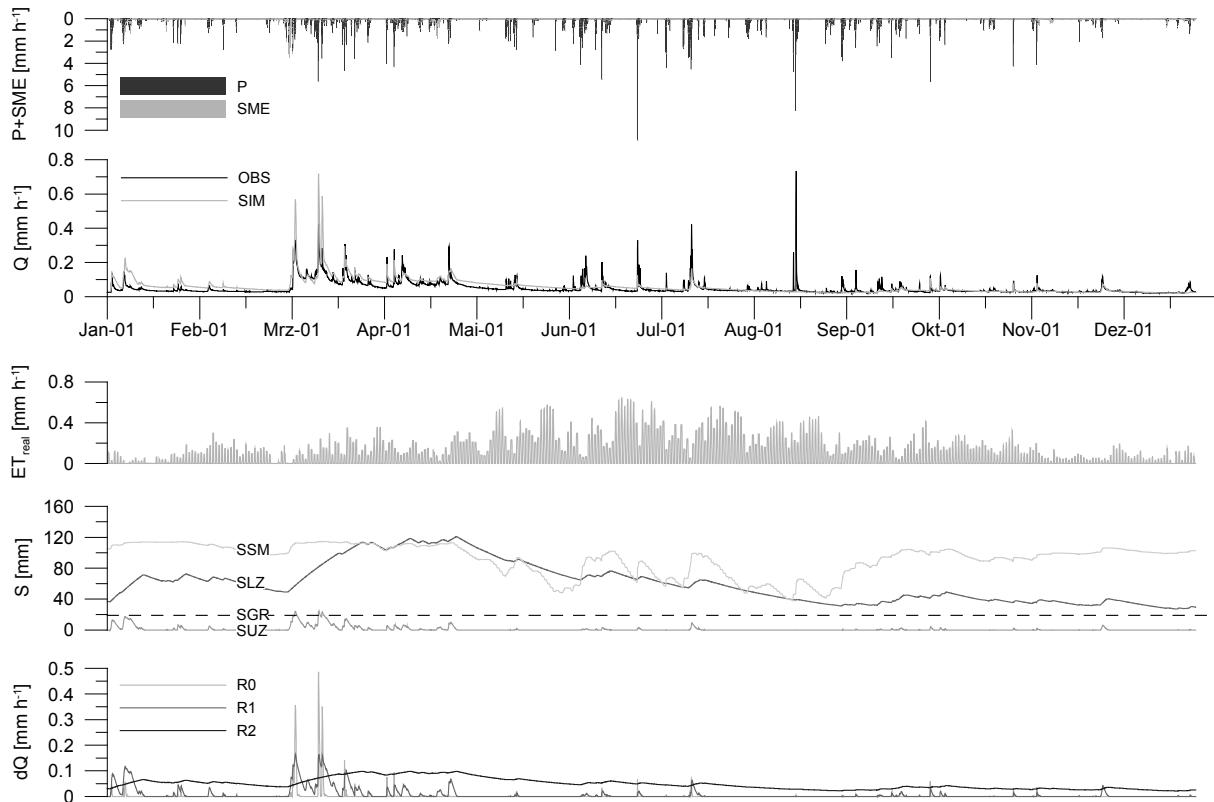


Figure 5.3: Hourly values of observed (OBS) and simulated (SIM, standard calibration) runoff for the Krauchtalbach at Krauchthal (16.2 km^2) in 2001, compared with precipitation (P), melt water influx (SME), real evapotranspiration (ET_{real}), levels of soil moisture (SSM), upper (SUZ) and lower (SLZ) runoff storage, storage threshold value (SGR) and the simulated runoff components (R0: surface runoff, R1: interflow, R2: baseflow).

Abbildung 5.3: Stündliche Werte von beobachtetem (OBS) und simuliertem (SIM, Mittelwasserkalibrierung) Abfluss des Krauchtalbachs bei Krauchthal (16.2 km^2) für das Jahr 2001, im Vergleich zu Niederschlag (P), Schmelzwasserzufluss (SME), realer Verdunstung (ET_{real}), Speicherzuständen von Bodenfeuchte (SSM), oberem (SUZ) und unterem (SLZ) Abflussspeicher, Speichergrenzwert (SGR) und den simulierten Abflusskomponenten (R0: Oberflächenabfluss, R1: Zwischenabfluss, R2: Basisabfluss).

5.1.3 Erfolgreiche Kalibrierungen

Räumliche Abdeckung

Die nun noch im Datensatz verbleibenden 140 Einzugsgebiete bilden die Grundlage für die folgende Diskussion der Kalibrierungsresultate (Abschnitt 5.2 ff.), und vor allem dienen sie später als Grundlage für die Regionalisierung von PREVAH (Kapitel 8 bis 10). Die mit diesen Gebieten erreichte räumliche Abdeckung soll nun aufgezeigt werden.

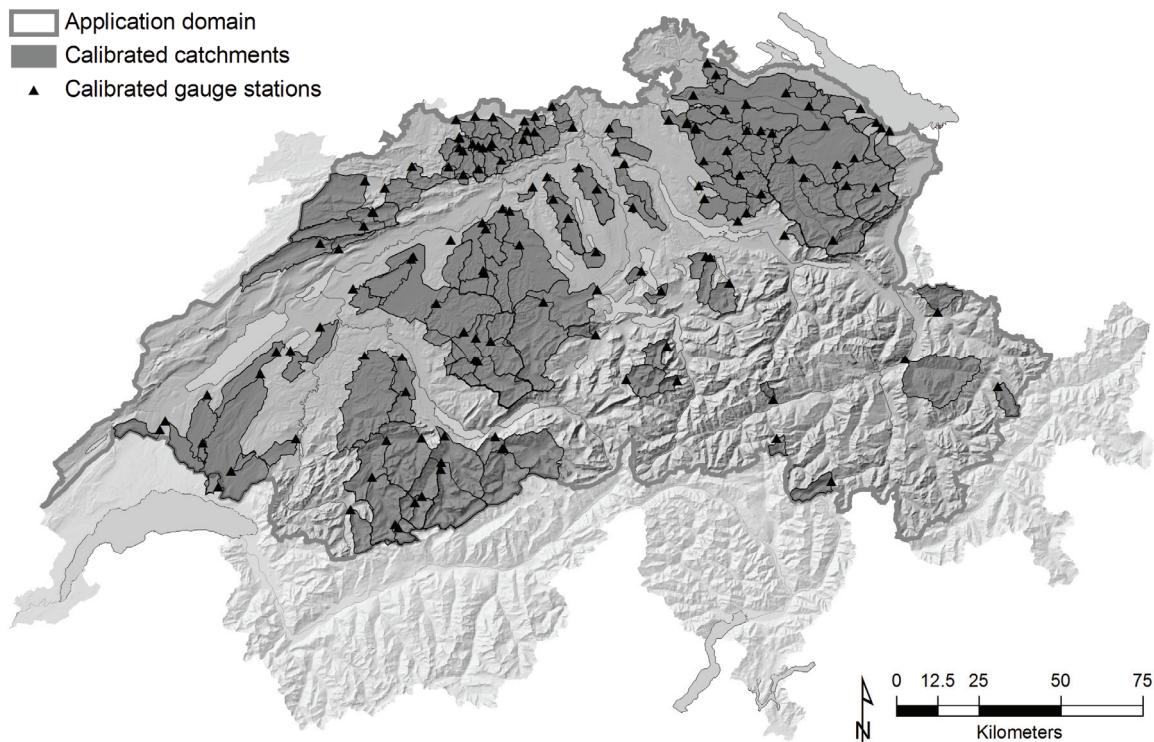


Figure 5.4: 140 catchments calibrated successfully for PREVAH.

Abbildung 5.4: 140 erfolgreich für PREVAH kalibrierte Einzugsgebiete.

Table 5.1: Area and number of catchments with successful calibration (large river basins as defined by BREINLINGER ET AL., 1992, Swiss area only).

Tabelle 5.1: Fläche und Anzahl der Einzugsgebiete mit erfolgreicher Kalibrierung (nach grossen Flusseinzugsgebieten gemäss BREINLINGER ET AL., 1992, nur schweizerische Flächenanteile).

Large river basin	Total area [km ²]	Area covered by calibration [km ²]	Number of catchments	Cumulative area [km ²]	Average area [km ²]
Rhein	10'061	3'914	38.9	67	8'117
Aare	11'734	5'002	42.6	56	8'504
Reuss	3'431	730	21.3	9	1'037
Limmat	2'406	332	13.8	8	356
OVERALL	27'632	9'978	36.1	140	129

Abbildung 5.4 zeigt, wo die kalibrierten Gebiete liegen, während **Tabelle 5.1** die abgedeckte Fläche mit Zahlen charakterisiert. Die kumulierte Gesamtfläche der 140 erfolgreich kalibrierten Gebiete beträgt 18'014 km², die hypothetische mittlere Gebietsfläche ist somit 129 km². Es sind Gebiete mit einer Grösse von minimal 10.1 km² (Köllikerbach–Kölliken) und maximal 1'696 km² (Thur–Andelfingen) berücksichtigt, bei einer medianen Grösse von 52.9 km². Weil Gebiete mit unterschiedlicher hydrographischer Ordnung verwendet werden, treten Überlappungen auf, beispielsweise in den Flussgebieten von Thur und Emme, wo sowohl das Gesamtgebiet wie auch Teilgebiete verschiedener Ordnung kalibriert werden. Insgesamt decken die Gebiete eine Fläche von 10'567 km² ab, was 36% des Anwendungsraumes entspricht; am grössten ist die Abdeckung im Aaregebiet (43%), am geringsten im Gebiet der Limmat (14%). Dies widerspiegelt vor allem die Einschränkungen, welche aus der Beeinflussung der Abflussmessungen durch Wasserkraftnutzung erwachsen (vgl. Kapitel 3.1.3, siehe v. a. auch MARGOT ET AL., 1992). Aus diesem Grund sind die zentralen und östlichen Schweizer Alpen (Aare oberhalb Brienzersee, Urner Reuss, Linth, Seez, Alpenrhein) verhältnismässig schlecht repräsentiert, ebenso wie die Freiburger Alpen (Saane). In den restlichen Gebieten kann insgesamt von einer sehr

guten Abdeckung gesprochen werden; es wird erwartet, dass sich die für eine Regionalisierung nötigen Informationen mit diesem Datensatz erfassen lassen.

Kalibrierungsaufwand

Wenn die Anzahl der zu kalibrierenden Gebiete derart gross ist wie in der vorliegenden Arbeit, wird der mit der Kalibrierung verbundene Rechenaufwand zu einem entscheidenden Zeitfaktor. **Tabelle 5.2** führt die Anzahl Modellläufe auf, welche im vorliegenden Satz von 140 Einzugsgebieten für eine Mittelwasser- und eine Hochwasserkalibrierung erforderlich waren. Während der Aufwand für die Mittelwasserkalibrierung relativ stark schwankt (minimal 204, maximal 408 Modellläufe), sind für eine Hochwasserkalibrierung zwischen 120 und 144 Modellberechnungen zu veranschlagen. Insgesamt ist der durchschnittliche Simulationsaufwand für eine komplette Kalibrierung auf Mittel- und Hochwasser mit im Mittel 448 Durchläufen aber gering, vor allem im Vergleich zur Monte-Carlo-Methodik (vgl. GLUE; BEVEN UND BINLEY, 1992), wo eine typische Kalibrierung ohne weiteres 10'000 Modellläufe umfassen kann (z. B. MCINTYRE ET AL., 2005; siehe auch Kapitel 6). Mit von der Grössenordnung her vergleichbarem Rechenaufwand wie die PREVAH-interne Kalibrierung schneidet PEST (DOHERTY, 2002) ab, allerdings zeigten sich dabei wie schon in Kapitel 3 beschrieben Probleme mit der Plausibilität einzelner Parameter. Zudem benötigt PEST bei der gleichzeitigen Behandlung einer grösseren Anzahl freier Modellparameter auch selbst beträchtliche Rechenzeiten.

Table 5.2: Minimum (n_{\min}), average (n_{mean}) and maximum (n_{\max}) number of model runs necessary for standard and flood calibration of a catchment.

Tabelle 5.2: Minimale (n_{\min}), mittlere (n_{mean}) und maximale (n_{\max}) Anzahl erforderlicher Modellläufe pro Einzugsgebiet für eine Mittelwasser- und eine Hochwasserkalibrierung.

Calibration mode	n_{\min}	n_{mean}	n_{\max}
Standard calibration (calMQ)	204	309	408
Flood calibration (calHQ)	+120	+139	+144
Total	324	448	552

5.2 Diskussion der Modellgüte

5.2.1 Standardgütemasse

Betrachtungszeitraum

Für die folgende Diskussion der Modellgüte werden untenstehende Betrachtungszeiträume verwendet, denen jeweils ein nicht ausgewertetes Initialisierungsjahr vorgeschaltet ist (siehe auch Kapitel 3.1.2):

- *Kalibrierungszeitraum*: 4 durchgehende Jahre; normalerweise 1994–1997, ansonsten vorzugsweise 1984–1987, 1989–1993 oder 1999–2003.
- *Anwendungszeitraum*: derjenige Zeitraum, der durch beobachtete Daten abgedeckt ist und folglich mit Gütemassen bewertet werden kann; maximal 20 Jahre 1984–2003.
- *Validierungszeitraum*: der Anwendungszeitraum ausserhalb des Kalibrierungszeitraums; maximal 15 Jahre, normalerweise 1984–1992 und 1998–2003.

Zu beachten ist nun, dass die Messdaten der 140 erfolgreich kalibrierten Einzugsgebiete zum Teil voneinander abweichende Zeiträume abdecken (vgl. **Abbildung 3.1**). Aufgrund der Datenlage können also nicht alle Betrachtungszeiträume vollkommen homogen gestaltet werden. Insbesondere eine Analyse des Validierungszeitraums ist für alle 140 Gebiete nicht sinnvoll, denn in Gebieten mit kurzen Messreihen ist er aufgrund seiner geringen Länge (im Extremfall fehlt er sogar) nicht aussagekräftig und insgesamt zu unterschiedlich, um sinnvolle Vergleiche anzustellen. Auch beim Anwendungszeitraum ist die Interpretation etwas eingeschränkt, da sich die entsprechenden Reihen nicht immer auf denselben Zeitraum beziehen und bezüglich Länge variieren. Zudem ist das Bewertungsresultat in unterschiedlicher Stärke durch die Kalibrierung beeinflusst: Je kürzer die betrachtete Reihe insgesamt ist, desto grösser ist der Anteil des Kalibrierungszeitraums. Aussagen zur Kalibrierungsperiode selbst sind hingegen stets gut vergleichbar, da sie sich zwar in einigen Fällen auf unterschiedliche Zeiträu-

me, zumindest aber immer auf eine gleichbleibende, ausreichend gross bemessene Anzahl Jahre bezieht.

Einen homogeneren Teildatensatz erhält man, wenn nur die 49 Gebiete mit langen Messreihen (Priorität A) betrachtet werden; vergleichende Aussagen zu Kalibrierung, Validierung und Anwendung sind dann möglich. Im vorliegenden Kapitel werden vorwiegend die Resultate aller 140 Gebiete besprochen, da in diesem Gesamtdatensatz noch wesentlich mehr Informationen enthalten sind. Der reduzierte Datensatz von 49 Gebieten wird dann vor allem in Kapitel 10 zur Beurteilung der Regionalisierung verwendet; dort sind lange Messreihen insbesondere für die Hochwasserextrapolation unerlässlich.

Erreichte Werte

Abbildung 5.5 zeigt Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE , NSE_{ln}) und mittlere jährliche Volumendifferenzen ($DVOL'_a$) für die Kalibrierungsperiode der 140 erfolgreich kalibrierten Gebiete. Die medianen Güten der Mittelwasserkalibrierung betragen 0.74 für NSE , 0.77 für NSE_{ln} und $+2.2 \text{ mm a}^{-1}$ für $DVOL'_a$. Bedenkt man, dass sich diese Resultate auf Gebiete mit sehr unterschiedlichen Bedingungen und eine automatische Kalibrierung beziehen, kann von einem sehr gelungenen Ergebnis gesprochen werden. Zu beachten ist dabei, dass 19 Gebiete mit schlechten Resultaten ausgeschlossen wurden – sie wären als Ausreisser klassifiziert worden; dabei scheiterte die automatische Kalibrierung allerdings nur in 13 dieser Gebiete, 6 Gebiete wiesen Probleme bei den beobachteten Abflüssen auf. Die mit der Hochwasserkalibrierung verbundenen Kompromisse sind einerseits bei NSE und NSE_{ln} zu erkennen, noch deutlicher aber fallen sie beim für die Mittelwasserkalibrierung sehr geringen $DVOL'_a$ auf. Die weiter unten aufgezeigten Verbesserungen in der Hochwasserextrapolation lassen diese Einschränkungen aber als verkraftbar erscheinen.

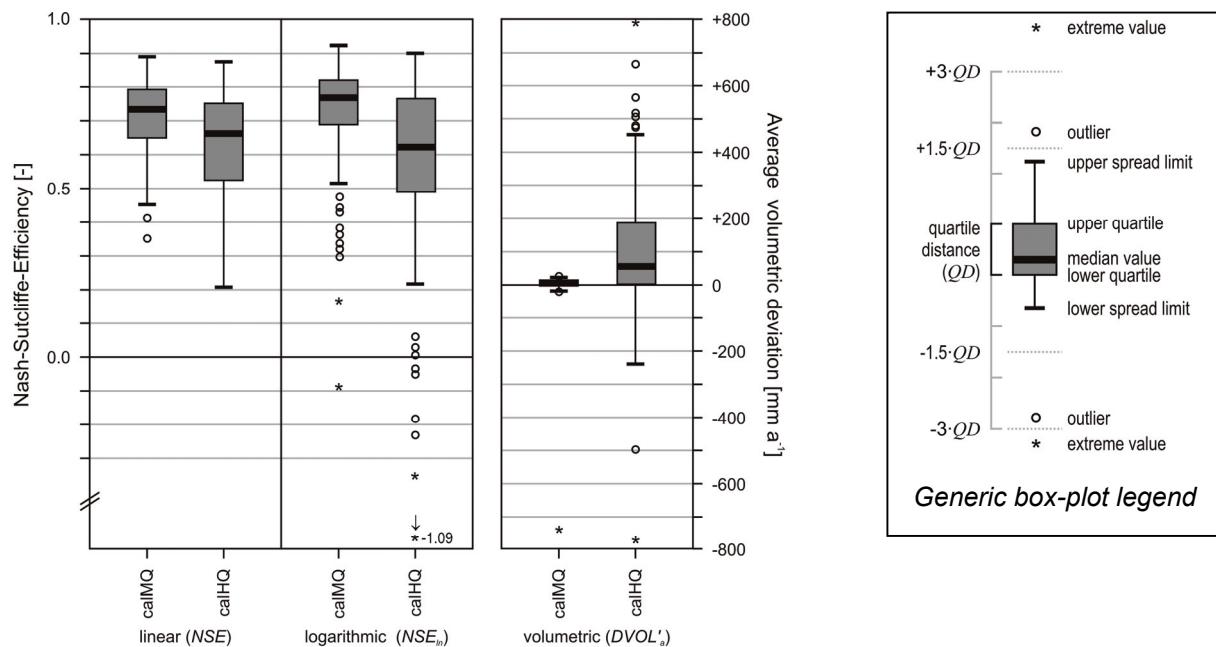


Figure 5.5: Box-Plot for Nash-Sutcliffe-Efficiencies (linear: NSE , logarithmic: NSE_{ln}) and average annual volumetric deviations ($DVOL'_a$) from 140 successfully calibrated catchments in calibration period (4 years, usually 1994–1997) for standard (calMQ) and flood (calHQ) calibration. Note the generic legend on the right which is valid for all box-plots following in this study (definitions as to BROSIUS, 1999).

Abbildung 5.5: Boxplot der Nash-Sutcliffe-Effizienzen (linear: NSE , logarithmisch: NSE_{ln}) sowie der mittleren jährlichen Volumenabweichungen ($DVOL'_a$) für 140 erfolgreich kalibrierte Einzugsgebiete im Kalibrierungszeitraum (4 Jahre, normalerweise 1994–1997) für Mittelwasser- (calMQ) und Hochwasserkalibrierung (calHQ). Die generelle Legende auf der rechten Seite gilt für alle weiteren in dieser Arbeit folgenden Boxplots (Definitionen gemäss BROSIUS, 1999).

Die Resultate für den gesamten durch Beobachtungen abgedeckten Anwendungszeitraum sind den oben aufgezeigten sehr ähnlich, es müssen lediglich etwas mehr Ausreisser gegen schlechte Resultate hin verzeichnet werden. Auf Darstellung und Auswertung dieser Resultate wird hier verzichtet, nicht zuletzt auch, weil sie wie oben gezeigt auf einem stärker heterogenen Datensatz beruhen.

Ausführliche Auswertungen zum Güterverlust von Kalibrierungs- zu Validierungszeitraum und von Mittelwasser- zu Hochwasserkalibrierung werden bei der Diskussion der Regionalisierungsresultate (Kapitel 10) anhand des homogenen Datensatzes von 49 Gebieten erläutert.

In **Tabelle 5.3** sind die Resultate schliesslich noch nach Kalibrierungsgruppen (vgl. **Tabelle 3.1**) und nach grossen Flusseinzugsgebieten aufgeschlüsselt. Wenig überraschend fallen die Ergebnisse für die Gruppen 5.2 und 5.3 etwas ab, da es sich durchgehend um kleine Gebiete ($10.1 \text{ km}^2 - 18.9 \text{ km}^2$) handelt; hier wurden auch bereits viele der fehlgeschlagenen Kalibrierungen verzeichnet. Für die Gebiete der Gruppen 1 bis 5.1 sind keine eindeutigen Tendenzen zu erkennen.

Bezüglich Flussgebieten zeigt das Reussgebiet etwas weniger gute Resultate als Rhein-, Aare- und Limmatgebiet. Sie ist – wie die Limmat – im Verhältnis zu den beiden anderen Flussgebieten mit weniger Kalibrierungen abgedeckt (vgl. **Tabelle 5.1**).

Table 5.3: Median Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE) and median of average annual volume deviation (DVOL'_a) for standard and flood calibration, by calibration groups and by large river basins. Data: 140 successfully calibrated catchments, calibration period.

Tabelle 5.3: Mediane Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) und Median der mittleren jährlichen Volumenabweichung (DVOL'_a) für Mittelwasser- und Hochwasserkalibrierung, nach Kalibrierungsgruppen und nach grossen Flusseinzugsgebieten. Datenbasis: 140 erfolgreich kalibrierte Einzugsgebiete, Kalibrierungsperiode.

Analysis unit	Standard calibration		Flood calibration	
	median NSE [-]	median DVOL' _a [mm a ⁻¹]	median NSE [-]	median DVOL' _a [mm a ⁻¹]
Group				
1	0.70	3.5	0.63	71.0
2	0.78	0.4	0.71	22.4
3	0.74	-0.9	0.63	7.9
4	0.76	2.6	0.68	25.4
5.1	0.76	-0.9	0.66	89.4
5.2	0.64	4.3	0.61	109.6
5.3	0.66	2.6	0.53	65.3
Large river basin				
Rhein	0.76	1.8	0.66	64.9
Aare	0.74	3.0	0.67	41.6
Reuss	0.67	-1.8	0.67	58.7
Limmat	0.76	-7.0	0.72	39.5
OVERALL	0.74	2.2	0.67	53.0

Räumliches Muster der Modellgüte

Mit Hilfe des sehr ausführlichen Datensatzes von 140 erfolgreich kalibrierten Einzugsgebieten lässt sich das räumliche Verteilungsmuster der Gütemasse relativ präzise darstellen. Die dazu verwendete Interpolation mit inverser Distanzgewichtung (IDW) stützt sich auf die 140 Gebietsschwerpunkte ab, für welche die jeweils erreichte Modellgüte als "Messwert" angenommen wurde. **Abbildung 5.6** illustriert anhand der Lage der Gebietsschwerpunkte und der zugehörigen Thiessen-Polygone die räumliche Abstützung dieser Interpolation; sie ist vor allem in den Gebieten von Ergolz und Töss überdurchschnittlich gut, im Bündner Rheingebiet hingegen fällt sie deutlich geringer aus.

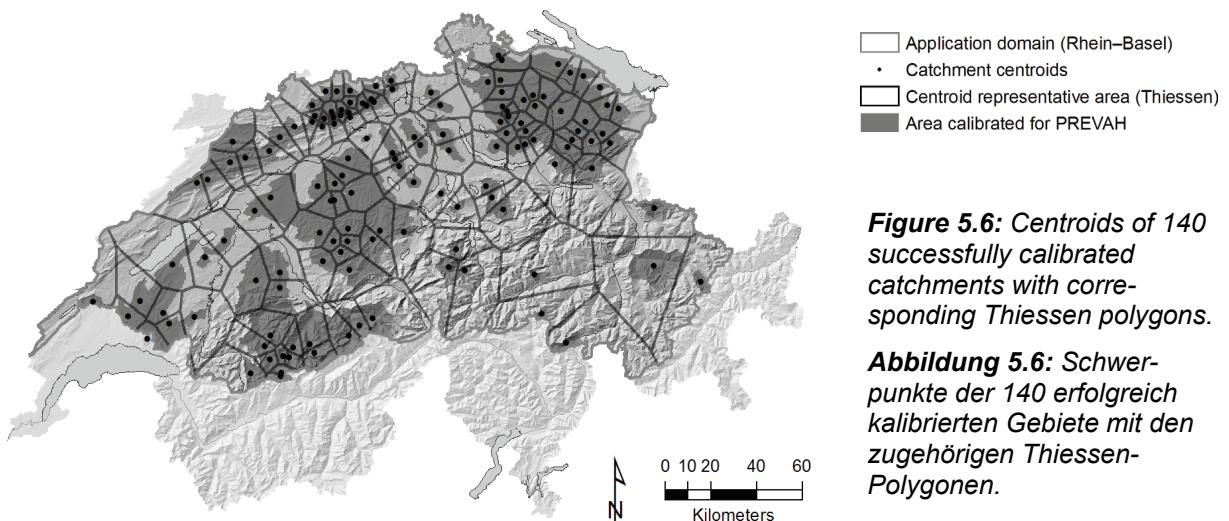
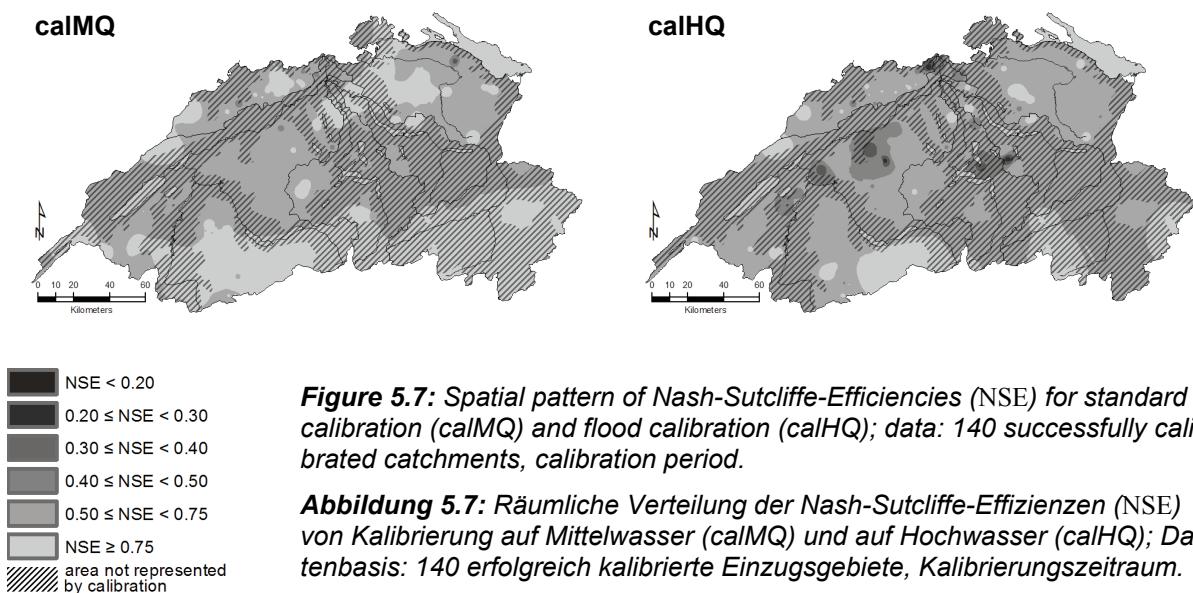


Figure 5.6: Centroids of 140 successfully calibrated catchments with corresponding Thiessen polygons.

Abbildung 5.6: Schwerpunkte der 140 erfolgreich kalibrierten Gebiete mit den zugehörigen Thiessen-Polygonen.

Die Karte der interpolierten Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE, **Abbildung 5.7**) zeigt bei der Mittelwasserkalibrierung ein relativ ausgeglichenes Bild, wobei die Effizienzen in den Alpen und im nordöstlichen Mittelland noch etwas höher ausfallen. Für den Alpenraum muss die bessere Modellgüte mit Vorsicht interpretiert werden, da die lange anhaltenden Niedrigwasserabflüsse in den Wintermonaten bei nivalen und glazialen Abflussregimes tendenziell zu höheren Effizienzen führen. Bei der Hochwasserkalibrierung entstehen einige kleine Regionen mit etwas schlechteren Modellgüten; der Alpenraum weist auch hier höhere Werte auf.



Zeitlicher Verlauf der Modellgüte

Als letzter Aspekt soll untersucht werden, wie sich die Güte der Simulationen über die verschiedenen Jahre hinweg gestaltet, ob es also Jahre gibt, in welchen tendenziell bessere oder schlechtere Simulationen erreicht werden als im Mittel. Dies könnte Hinweise auf stark wechselnde meteorologische Bedingungen oder auf Inhomogenitäten in der Verfügbarkeit von meteorologischen Messwerten geben. Als Grundlage dienen die 140 erfolgreich kalibrierten Einzugsgebiete mit ihren Mittelwasserpараметrersätzen.

Die jährlichen Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) und mittleren Volumenabweichungen ($DVOL'_a$) sind in **Abbildung 5.8** für die 140 Einzugsgebiete aufgezeichnet. Da die Modellgüte nur für Jahre beurteilt werden kann, für welche auch Abflussmessungen vorliegen, sind nicht für alle Gebiete durchgehende Werte von 1984 bis 2003 darstellbar; insgesamt basiert die Abbildung auf 2'349 simulierten Jahren.

Bei NSE sind kaum systematische Veränderungen, Sprünge oder Trends zu erkennen. Festgestellt werden kann, dass die Interquartilsdistanzen und die Spannweiten in den Jahren 1984 bis 1987 grösser sind als in den Folgejahren; diese grössere Variabilität der Resultate in den verschiedenen Gebieten könnte durch die damals noch geringere Abdeckung des Automatischen Messnetzes (ANETZ) bedingt sein. Merklich schlechter als für die vorangehenden Jahre fällt die Simulation des Jahres 2003 aus. Hier sind Schwierigkeiten bei der Wiedergabe von Trockenbedingungen als Ursache zu vermuten. Ob das Jahr 1987 wegen der extremen Hochwasser oder wegen des wenig dichten Messnetzes etwas weniger gut abschneidet, kann hier nicht beurteilt werden. Da aber das ebenfalls von grossen Hochwassern geprägte Jahr 1999 sehr gute Resultate zeigt, sind zumindest in dieser Betrachtungsweise keine Schwierigkeiten zu vermuten, was Jahre mit extrem hohen Abflüssen betrifft.

Bezüglich $DVOL'_a$ fällt auf, dass die Jahre 1993 bis 1997 eine sehr geringe Variabilität der Resultate aufweisen. Dies dürfte dadurch bedingt sein, dass die Kalibrierungsperiode wo immer möglich die Jahre 1994 bis 1997 umfasste und die Wasserbilanz in diesem Zeitraum somit am besten angepasst ist. Wie in Kapitel 10 noch zu zeigen sein wird, sind die Validierungsresultate von $DVOL'_a$ aber im Durchschnitt kaum schlechter als diejenigen der Kalibrierung, weil sich positive und negative Abweichungen bis zu einem gewissen Grad gegenseitig kompensieren. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass bei NSE keine derartige Beziehung zwischen Kalibrierungsperiode und Variabilität oder Güte der Resultate auftritt.

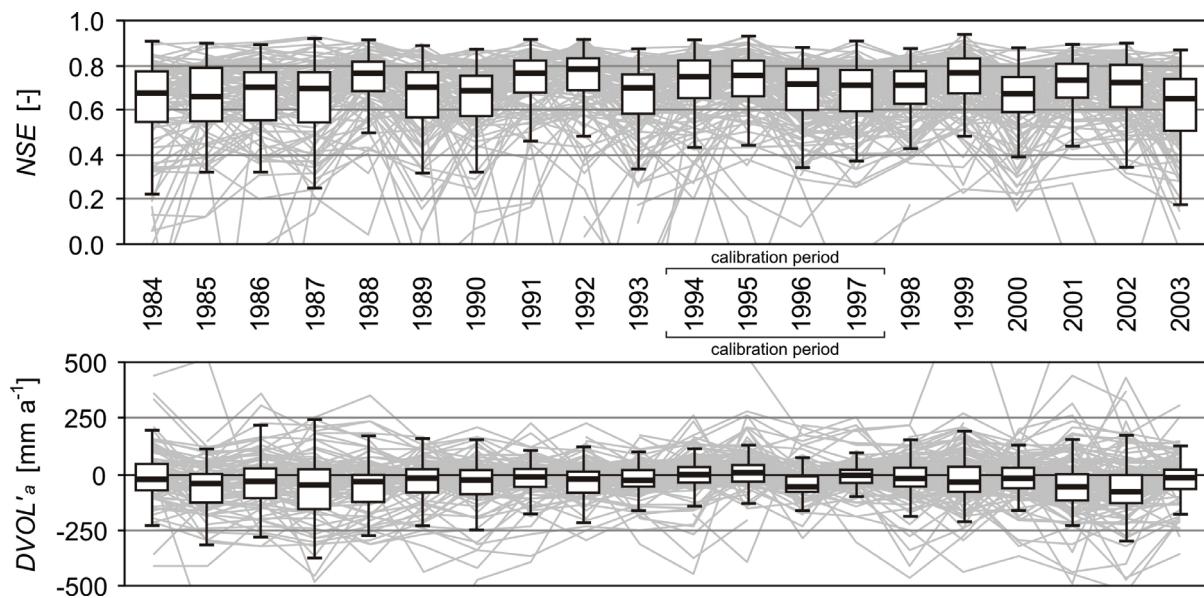


Figure 5.8: Annual Nash-Sutcliffe-Efficiencies (NSE) and annual volumetric deviations ($DVOL'_a$) for 140 standard calibrated catchments. For reasons of clarity, outliers and extreme values are not indicated in the box-plots.

Abbildung 5.8: Jährliche Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) und jährliche Volumenabweichungen ($DVOL'_a$) von 140 auf Mittelwasser kalibrierten Einzugsgebieten. Ausreisser und Extremwerte sind in den Boxplots aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht eingezeichnet.

5.2.2 Resultate im Hochwasserbereich

Bis hierhin wurde aufgezeigt, dass die Kalibrierung für den Mittelwasserbereich insgesamt gute Resultate liefert, und dass die Hochwasserkalibrierung mit vertretbaren Kompromissen in den Standardgütemassen verbunden ist. Nun interessiert natürlich die Frage, wie sich die Hochwasserkalibrierung auf die Spitzenabflüsse selbst ausgewirkt hat – wie genau sind die Hochwasserabschätzungen, welche auf der Extrapolation hochwasserkalibrierter Modellläufe basieren?

Hochwasserspezifische Gütemasse

Für eine erste Übersicht können die hochwasserspezifischen Gütemasse betrachtet werden, welche bei der Spitzenwertanpassung ja auch als Kriterium dienten. **Abbildung 5.9** zeigt die Veränderungen

in den Gütemassen PQT , $PSAE$ und WAE , welche relativ zur Mittelwasserkalibrierung erreicht wurden. Von den beiden anderen Gütemassen der Hochwasserkalibrierung wurde NSE schon im vorigen Abschnitt betrachtet, während PSR lediglich für vergletscherte Gebiete wichtig ist und auf den gesamten Datensatz bezogen nur geringe Aussagekraft besitzt.

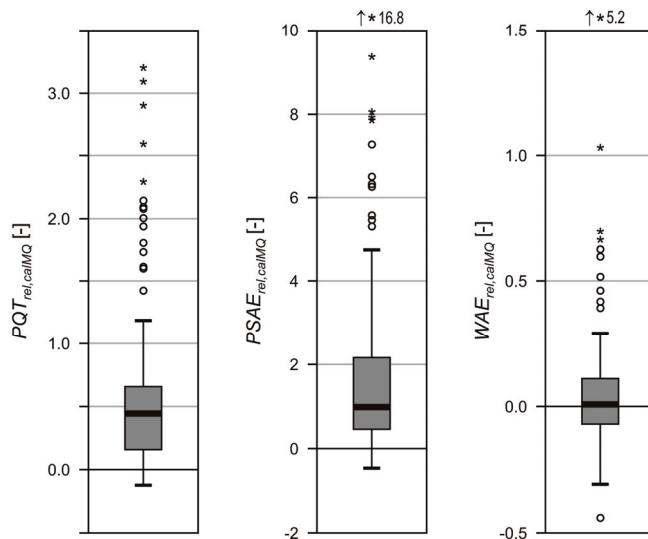


Figure 5.9: Flood-specific scores PQT , $PSAE$ and WAE for flood calibration, relative to standard calibration. Data: 140 successfully calibrated catchments, calibration period. Note that the scales differ.

Abbildung 5.9: Hochwasserspezifische Gütemasse PQT , $PSAE$ und WAE der Hochwasserkalibrierung, relativ zur Mittelwasserkalibrierung. Datenbasis: 140 erfolgreich kalibrierte Einzugsgebiete, Kalibrierungszeitraum. Zu beachten sind die unterschiedlichen Skalen.

Sowohl bei $PQT_{rel,calMQ}$ wie auch bei $PSAE_{rel,calMQ}$ sind – entsprechend dem angestrebten Kalibrierungsziel – deutliche Verbesserungen festzustellen. Dabei sind die relativen Verbesserungen bei $PSAE_{rel,calMQ}$ deutlich höher; da PQT durch die Berücksichtigung des Ereigniszeitpunktes um einiges spezifischer und sensitiver ist, sind dabei nicht derart grosse Verbesserungen zu erreichen wie bei $PSAE$. Weniger deutlich sind die Resultate bei $WAE_{rel,calMQ}$, wo sich Verbesserungen und Verschlechterungen innerhalb der normalen Wertespanne in etwa die Waage halten; dabei muss berücksichtigt werden, dass WAE gemäss Gleichung 4.7 nicht nur die Spitzenabflüsse, sondern die gesamte Ganglinie bewertet, wenngleich grosse Abflüsse durch Potenzierung höheres Gewicht erhalten.

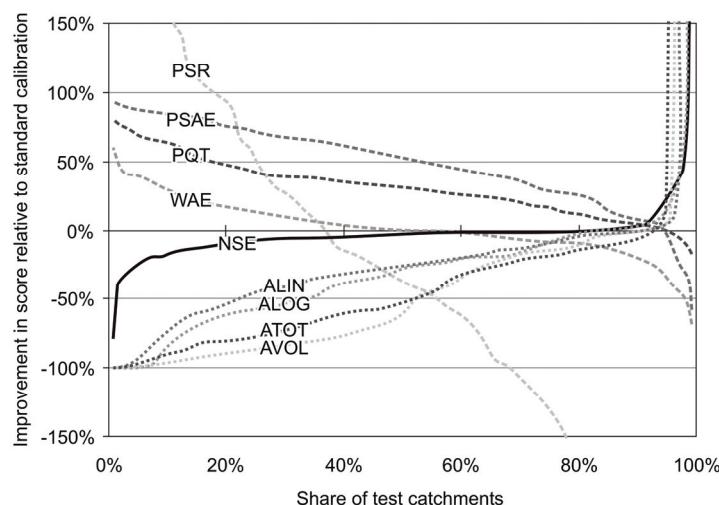


Figure 5.10: Gain or loss in various efficiency scores caused by flood calibration, relative to standard calibration score. Based upon calibration period of 140 successfully calibrated catchments.

Abbildung 5.10: Verbesserung oder Verschlechterung der verschiedenen Gütemasse durch die Hochwasserkalibrierung im Vergleich zur Mittelwasserkalibrierung. Datengrundlage: Kalibrierungszeitraum der 140 erfolgreich kalibrierten Einzugsgebiete.

Wie stark sich die verschiedenen Standard- und Hochwassergütemasse durch die Hochwasserkalibrierung verbessert oder verschlechtert haben, zeigt **Abbildung 5.10** anhand aller 140 erfolgreich kalibrierten Einzugsgebiete. Dargestellt ist der aufsummierte Prozentsatz an Gebieten, welche jeweils eine bestimmte Verbesserung oder Verschlechterung in den verschiedenen Modellgüten aufweisen. Demnach zeigen 18% der Gebiete eine Verbesserung von mehr als 50% bezüglich dem wichtigsten Hochwassergütemass PQT , und PQT verbessert sich insgesamt in 94% der betrachteten Gebiete. Ähnlich positiv gestalten sich die Ergebnisse für das zweitwichtigste Hochwassergütemass $PSAE$, welches sich in insgesamt 95% der Gebiete verbessert, in 51% der Gebiete sogar um mehr als die Hälfte. Die sehr sensiblen PREVAH-Gütemasse $ALIN$, $ALOG$, $AVOL$ und $ATOT$ verschlechtern sich in 50 bis 67% der Gebiete um mehr als die Hälfte, die Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) bleibt hingegen in den meisten Gebieten konstant oder verschlechtert sich nur geringfügig. Beachtet man die für eine

Hochwasserkalibrierung einzugehenden Kompromisse in der Modellgüte und berücksichtigt, dass in einer grossen Vielfalt von Rahmenbedingungen mit einer einheitlichen Methodik kalibriert wurde, können obige Resultate insgesamt als sehr befriedigend eingestuft werden.

Extrapolationsresultate

Das wichtigste Kriterium bei der Beurteilung der Hochwasserkalibrierung sind die Resultate der Spitzenwertextrapolation – als Ziel soll ja aus den simulierten Abflussreihen eine Hochwasserstatistik erstellt werden. Diese Bewertung wird nun nur noch anhand der 49 Gebiete der Priorität A durchgeführt, für welche als Referenz lange und zuverlässige Messreihen des Abflusses zur Verfügung stehen. Die detaillierten Extrapolationsgrafiken aller 49 Gebiete sind in Anhang D zu finden. Da eine Diskussion aller Resultate zu weit führen würde, zeigt **Abbildung 5.11** drei typische Ergebnisse:

- Allenbach–Adelboden (28.8 km^2): Die Hochwasserspitzen werden mit der Mittelwasserkalibrierung stark unterschätzt. Durch die Hochwasserkalibrierung konnte eine deutliche Verbesserung erreicht werden.
- Suze–Soncetboz (150 km^2): Ein Gebiet, in welchem vor allem seltener Hochwasserspitzen durch die Mittelwasserkalibrierung überschätzt werden; auch hier konnte eine Verbesserung erreicht werden.
- Broye–Payerne (392 km^2): Hier wies bereits die Mittelwasserkalibrierung gute Extrapolationsresultate auf; diese konnten auch in der Hochwasserkalibrierung erhalten werden.

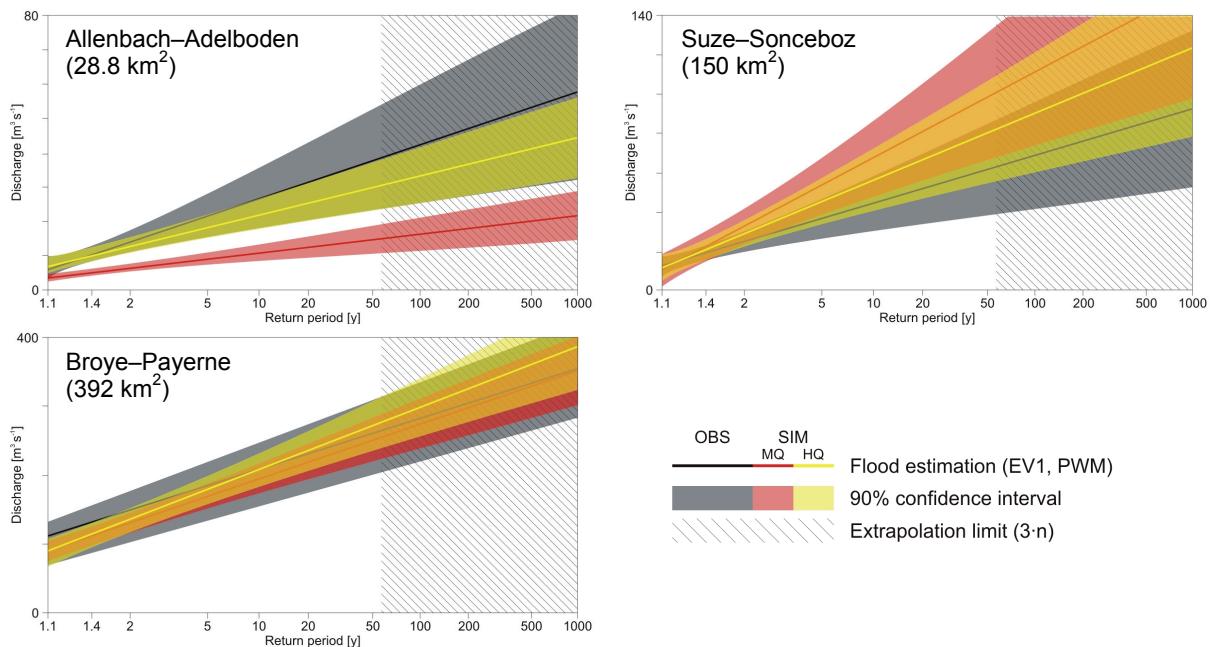


Figure 5.11: Extrapolation of observation (OBS) as well as standard calibrated (SIM, MQ) and flood calibrated (SIM, HQ) simulation for three selected catchments. Similar graphs for 49 priority A catchments are found in appendix D.

Abbildung 5.11: Extrapolation von Beobachtung (OBS) sowie auf Mittelwasser (SIM, MQ) und Hochwasser (SIM, HQ) kalibrierter Simulation für drei ausgewählte Einzugsgebiete. Entsprechende Grafiken für alle 49 Einzugsgebiete der Priorität A finden sich in Anhang D.

Für die meisten der 49 detailliert untersuchten Gebiete (vgl. Anhang D) wird durch die Hochwasserkalibrierung eine Verbesserung der Extrapolationsresultate erreicht. Wenn keine Verbesserung stattfindet, tritt zumindest keine Verschlechterung ein, und wo bereits die Mittelwasserkalibrierung gute Resultate erzielt, bleiben diese auch in der Hochwasserkalibrierung erhalten. Angesichts der relativ heiklen Aufgabe kann dies als deutlicher Erfolg gewertet werden. Am kritischsten zu beurteilen sind Gebiete, in welchen eine deutliche Unterschätzung kaum verbessert werden konnte (v. a. Glatt–Herrisau, 16.2 km^2 ; Minster–Euthal, 59.2 km^2 ; Necker–Mogelsberg, 88.2 km^2). Da hier offenbar eine systematische Unterschätzung der Spitzenabflusswerte stattfindet und keine grossen Gebiete betroffen

sind, kommen als Ursache vor allem Probleme mit zu tiefen Niederschlagsintensitäten und modelltechnische Schwierigkeiten bei der Bildung von schnellen Abflussantworten in Frage (vgl. Abschnitt 5.1.2). Bei einigen wenigen Gebieten ist von Mittel- zu Hochwasserkalibrierung ein Wechsel von leichter Unterschätzung zu leichter Überschätzung zu verzeichnen (Langen-Huttwil, 59.9 km²; Murg–Murgenthal, 207 km²; Thur–Halden, 1085 km²; Thur–Joschwil, 493 km²).

Betrachtet man die Resultate Hochwasserkalibrierung für die 49 repräsentativen Gebiete der Priorität A, beträgt der mediane Schätzfehler für ein HQ₁₀₀ lediglich -15%, bei einer Spannweite von -74% bis +66%. Die Mittelwasserkalibrierung wies demgegenüber bei ähnlichen minimalen und maximalen Fehlern noch einen medianen Schätzfehler von -30% auf. Noch detailliertere Extrapolationsergebnisse von Mittelwasser- und Hochwasserkalibrierung werden in Kapitel 10.2.2 im direkten Vergleich mit der Regionalisierung präsentiert (siehe v. a. **Abbildung 10.8**, S. 191).

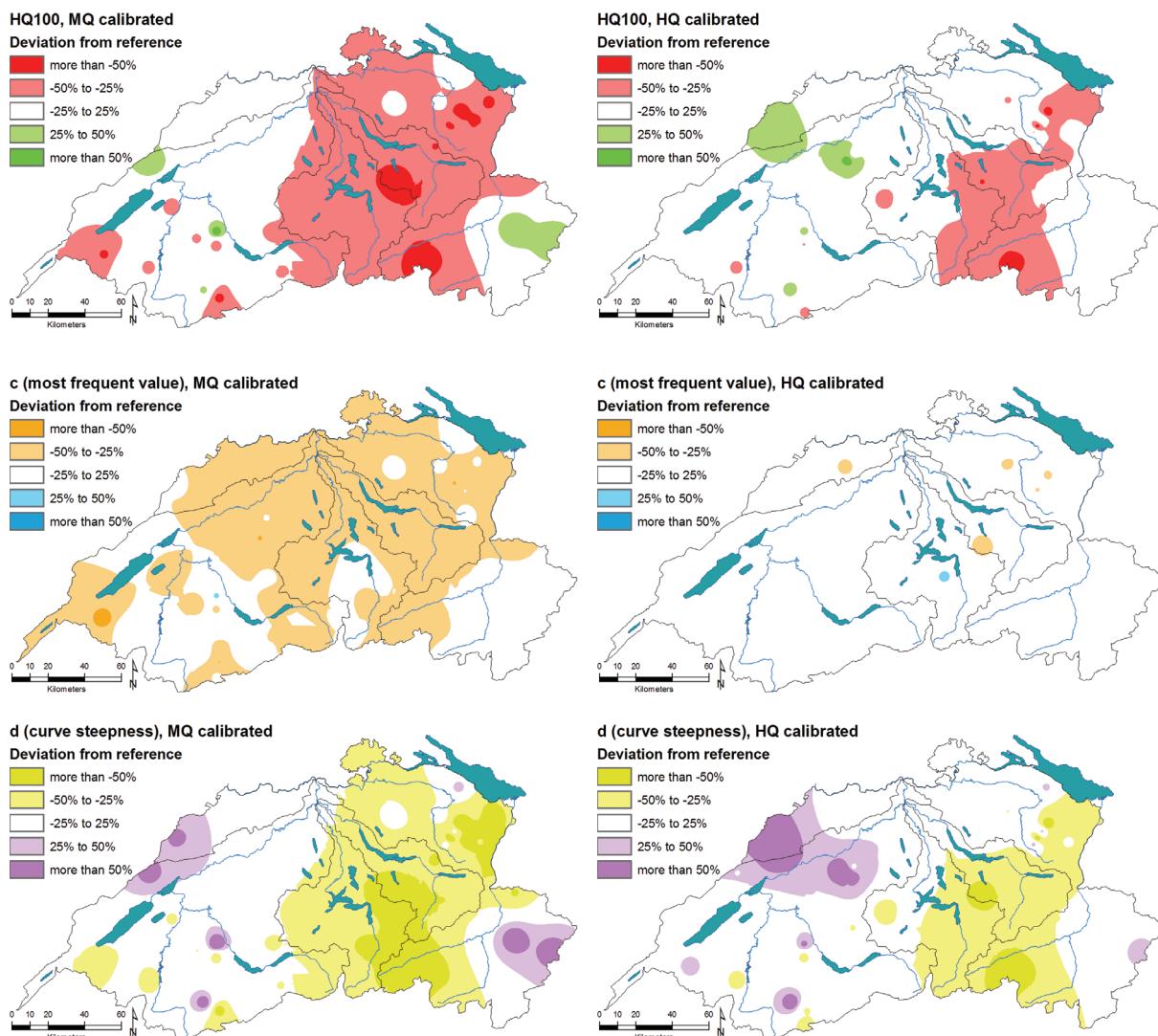


Figure 5.12: Deviation of extrapolated HQ₁₀₀ and extreme value distribution parameters c and d from reference (extrapolated observation) for standard (MQ) and flood calibrated (HQ) simulations. Data: 49 priority A catchments, 1984–2003.

Abbildung 5.12: Abweichung des extrapolierten HQ₁₀₀ sowie der Extremwertverteilungsparameter c und d von der Referenz (extrapolierte Beobachtung) für mittelwasser- (MQ) und hochwasserkalibrierte (HQ) Simulation. Datenbasis: 49 Einzugsgebiete der Priorität A, Zeitraum 1984–2003.

Räumliches Muster der Schätzfehler eines HQ_{100}

Dank der guten räumlichen Abstützung der Kalibrierung können nun auch für die Extrapolationsresultate Karten interpoliert werden (**Abbildung 5.12**). Da für diese Auswertung langjährige Messungen des Abflusses als Vergleichswerte nötig sind, konnten nicht alle 140 erfolgreich kalibrierten Gebiete als Grundlage verwendet werden, sondern nur die 49 Gebiete der Priorität A. Als Güteindikator dient der prozentuale Fehler, welcher bei der Schätzung eines HQ_{100} aus der Simulation gemacht wird, Referenzwert ist das HQ_{100} , welches aus der gleich langen Beobachtungsreihe (1984–2003) extrapoliert wurde; alle Werte beziehen sich jeweils auf stündliche Abflussmaxima. Wie in Kapitel 4.2.3 erläutert wird das HQ_{100} als Indikator verwendet, weil es einerseits die Resultate der Extrapolation gut charakterisiert und andererseits mit den Fehleranalysen von BARBEN (2003) vergleichbar ist. Ergänzend werden in **Abbildung 5.12** die beiden Verteilungsparameter c und d betrachtet (vgl. Kapitel 4.2.3).

Bei der Schätzung eines HQ_{100} aus der Simulation ist ersichtlich, dass von der Mittelwasser- zur Hochwasserkalibrierung auch regional betrachtet eine deutliche Verbesserung stattfindet. Große Teile des Anwendungsräumes weisen Fehler zwischen -25% und +25% auf, was als sehr geringer Wert bezeichnet werden kann; absolute Fehler von mehr als 50% sind sehr selten. Unterschätzungen sind vor allem im Gebiet der östlichen Alpen und Voralpen auszumachen, die Überschätzungen im Juragebiet lassen sich durch den Karsteinfluss erklären (siehe Abschnitt 5.1.2).

Der Lageparameter c (häufigster Wert) wird bei der Mittelwasserkalibrierung moderat, aber grossflächig unterschätzt. Durch die Hochwasserkalibrierung konnte hingegen ein fast fehlerfreies Bild erreicht werden; dies bedeutet, dass der Modalwert der Extremalverteilung sehr gut wiedergegeben wird.

Der Massstabsparameter d (Kurvensteigung) hingegen zeigt im Vergleich von Mittelwasser- und Hochwasserkalibrierung nur geringe Verbesserungen. Die Unterschätzung in den Zentralalpen und den Ostschweizer Voralpen konnte zwar deutlich reduziert werden, was aber nur auf Kosten von Überschätzungen (wiederum vor allem im Jura) gelang.

Ein Zusammenhang zwischen dem Schätzfehler eines HQ_{100} und den Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) von Mittelwasser- oder Hochwasserkalibrierung ist im Vergleich von **Abbildung 5.12** mit **Abbildung 5.7** auf den ersten Blick nicht zu erkennen. **Abbildung 5.13** belegt aber, dass aus dem NSE-Wert der Mittelwasserkalibrierung ($calMQ$) zumindest bis zu einem gewissen Grad auf die Abweichung des HQ_{100} von der Referenz geschlossen werden kann: Von Gebieten, bei welchen die Kalibrierung auf Standardbedingungen gut gelungen ist, sind etwas geringere Fehler in einem extrapolierten HQ_{100} zu erwarten. Der zugehörige Korrelationskoeffizient r_{xy} (absoluter Fehler eines HQ_{100} vs. NSE der Mittelwasserkalibrierung) ist mit 0.26 allerdings recht gering. Noch weniger deutlich ist der entsprechende Zusammenhang mit dem NSE der Hochwasserkalibrierung ($r_{xy} = 0.16$, nicht dargestellt).

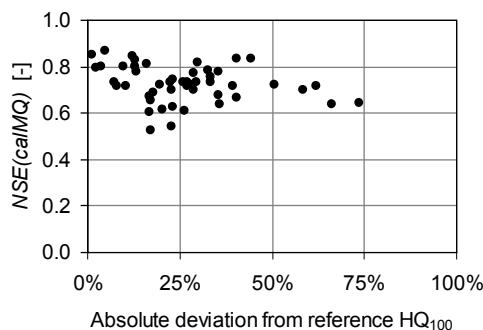


Figure 5.13: Correlation of standard calibration Nash-Sutcliffe-Efficiencies ($NSE(calMQ)$) with absolute error in HQ_{100} estimated from flood calibration.

Abbildung 5.13: Korrelation der Nash-Sutcliffe-Effizienzen der Mittelwasserkalibrierung ($NSE(calMQ)$) mit dem absoluten Fehler eines aus der Hochwasserkalibrierung geschätzten HQ_{100} .

5.2.3 Zusammenhang zwischen Modellgüten und wichtigen Kenngrößen der Einzugsgebiete

Neben der räumlichen Verteilung können weitere Aspekte der erreichten Modellgüte betrachtet werden. Besonders interessant scheint eine Untersuchung der Zusammenhänge mit Gebiets- und mittlerer Hydrotopgrösse, mit mittlerer Gebietshöhe und Schneeschmelze sowie mit mittlerem Gebietsniederschlag und mittlerem beobachteten Abfluss. Betrachtet werden dazu im Folgenden die Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) und Volumenabweichungen ($DVOL'_a$) der Mittelwasserkalibrierung ($calMQ$) sowie die relativen Verbesserungen des Gütemasses PQT von Mittelwasser- zu Hochwasserkalibrierung ($PQT_{rel,calMQ}$); Bezugszeitraum ist jeweils die Kalibrierungsperiode.

Gebietsgrösse und mittlere Hydrotopgrösse

Abbildung 5.14 (oben) zeigt den Zusammenhang zwischen den erwähnten Modellgüten und der Gebietsfläche auf Grundlage der 140 erfolgreich kalibrierten Einzugsgebiete. Erkennbar ist, dass NSE bei grossen Gebieten weniger stark gegen unten streut; dies bedeutet, dass dort tendenziell mit besseren Resultaten zu rechnen ist. Die besten Effizienzen werden im Skalenbereich von 100 bis 500 km² erreicht, in Gebieten von weniger als ca. 30 km² nimmt die maximal erreichte Güte etwas ab. Keine deutliche Größenabhängigkeit ist bei $DVOL'_a$ zu sehen, es fällt einzig auf, dass bei kleineren Gebieten einzelne Ausreisser zu beobachten sind; bei Flächen von über 100 km² sind hingegen kaum mehr nennenswerte Volumenabweichungen zu verzeichnen. Die relative Verbesserung von PQT ($PQT_{rel,calMQ}$) zeigt kein klares Muster.

Etwas deutlichere Zusammenhänge bestehen mit der durchschnittlichen Hydrotopgrösse, genauer gesagt mit der mittleren Anzahl Rasterzellen pro Hydrotop (HRU). **Abbildung 5.14** (unten) legt dar, dass mit zunehmender Hydrotopgrösse seltener mit schlechten NSE -Werten zu rechnen ist; erklären lässt sich dies so, dass Gebiete mit grossen HRU meist auch Gebiete mit grosser Einzugsgebietsfläche sind, welche wie schon gesehen seltener schlechte Resultate liefern. Gute Effizienzen werden aber sowohl mit kleinen wie auch mit grossen Hydrotopen erreicht. Während der Zusammenhang bei $DVOL'_a$ schwach ist, findet bei kleinen HRU eine stärkere Verbesserung von PQT durch die Hochwasserkalibrierung ($PQT_{rel,calMQ}$) statt.

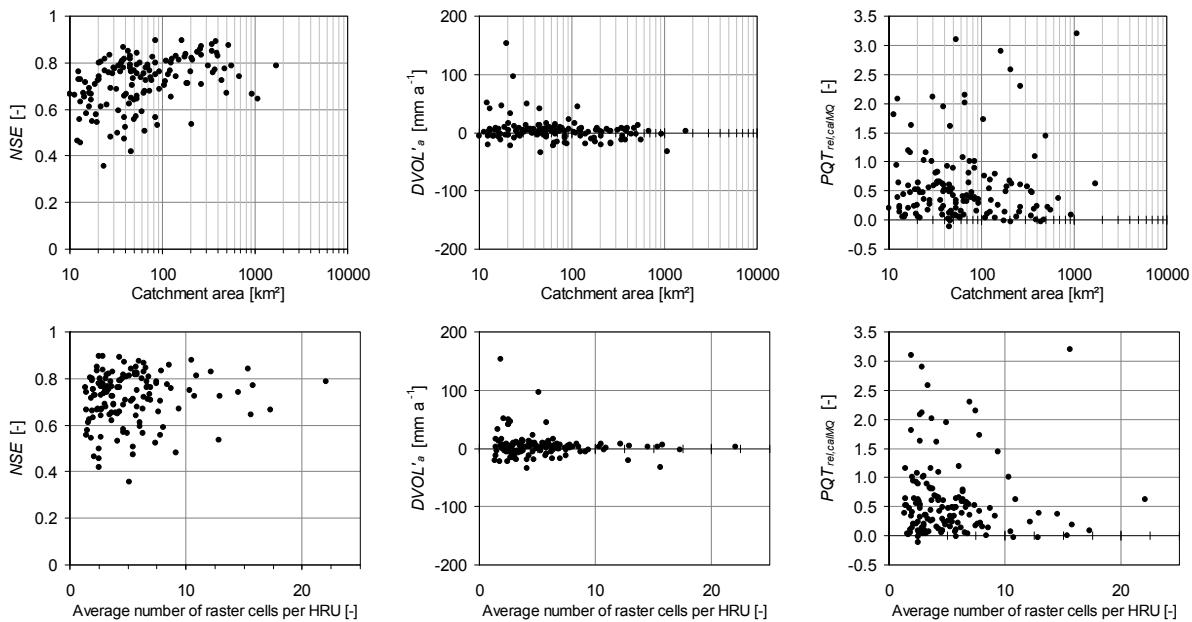


Figure 5.14: Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) und average annual volumetric deviation ($DVOL'_a$) für standard calibration as well as relative improvement in flood score PQT ($PQT_{rel,calMQ}$) für Hochwasserkalibrierung, jeweils aufgetragen nach Gebietsgrösse (in logarithmischer Skalierung, oben) und nach mittlerer Anzahl Rasterzellen pro Hydrotop (HRU) (unten). Datenbasis: 140 erfolgreich kalibrierte Einzugsgebiete, Kalibrierungszeitraum.

Abbildung 5.14: Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) und mittlere jährliche Volumendifferenz ($DVOL'_a$) der Mittelwasserkalibrierung sowie relative Verbesserung des Hochwassergütemasses PQT ($PQT_{rel,calMQ}$) durch die Hochwasserkalibrierung, jeweils aufgetragen nach Gebietsgrösse (in logarithmischer Skalierung, oben) und nach mittlerer Anzahl Rasterzellen pro Hydrotop (HRU) (unten). Datenbasis: 140 erfolgreich kalibrierte Einzugsgebiete, Kalibrierungszeitraum.

Mittlere Gebietshöhe und simulierte Schneeschmelze

Abbildung 5.15 (oben) stellt die Gütemasse der mittleren Gebietshöhe gegenüber. Bei zunehmender mittlerer Höhe NSE ist eine Tendenz zu einer geringeren Anzahl schlechter Resultate sichtbar. Die Erklärung dafür liegt in der schon festgestellten Sensitivität von NSE auf das Abflussregime: Bei nivaler oder glazialer Abflusscharakteristik (also bei zunehmender mittlerer Gebietshöhe) nimmt NSE tenden-

ziell grössere Werte an – PARAJKA ET AL. (2005) kommen für Österreich zu ähnlichen Feststellungen. Die Vermutung wird dadurch bestätigt, dass der Zusammenhang mit der mittleren jährlichen Schneeschmelze **Abbildung 5.15**, unten) ein vergleichbares Muster zeigt.

Ein schlüssiger Zusammenhang zwischen $DVOL'_a$ und mittlerer Gebietshöhe ist hingegen nicht feststellbar; dies bedeutet, dass die mit der Höhe zunehmenden Messfehler des Niederschlags (siehe z. B. SEVRUK, 1985; SEVRUK UND KIRCHHOFER, 1992) durch die PREVAH-interne Messfehlerkorrektur und die Bilanzkorrekturfaktoren $PKOR$ und $SNOKOR$ erfolgreich aufgefangen werden konnte. Das Fehlen eines Zusammenhangs zwischen $DVOL'_a$ und mittleren jährlichen Schneeschmelze weist in dieselbe Richtung, das Schneeschmelzmodul selbst kann auf Jahresbasis nicht bewertet werden.

Die jeweiligen Verteilungen von $PQT_{rel,calMQ}$ lassen sich nicht eindeutig interpretieren.

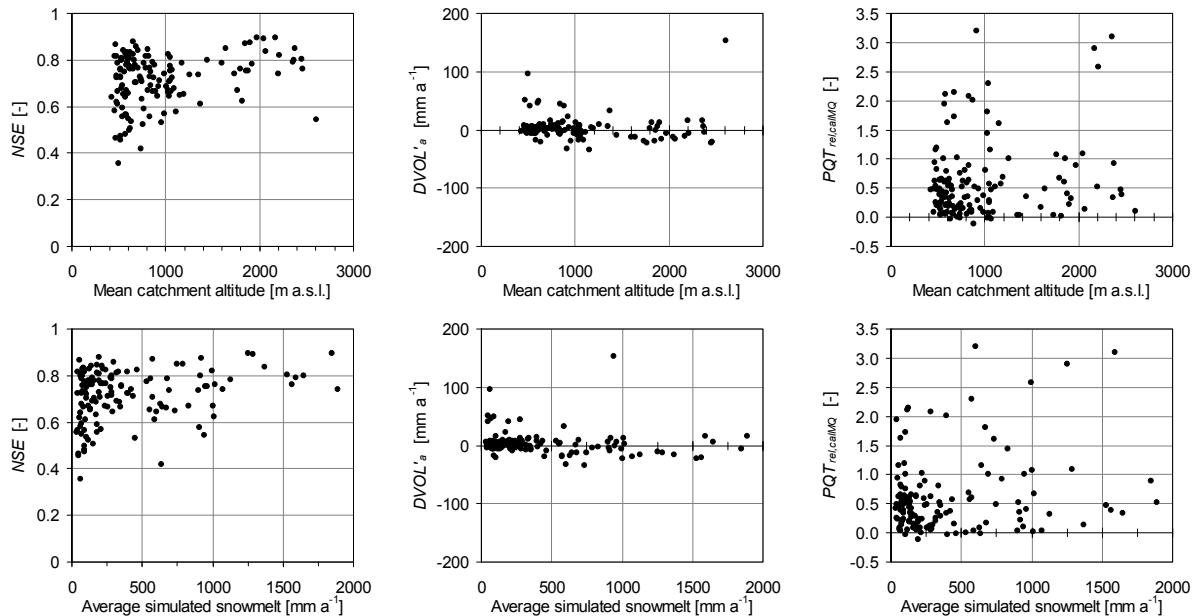


Figure 5.15: Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE) and average annual volumetric deviation ($DVOL'_a$) for standard calibration as well as relative improvement in flood score PQT ($PQT_{rel,calMQ}$) for flood calibration, each relative to mean catchment altitude (top) and average annual simulated snowmelt (bottom). Data: 140 successfully calibrated catchments, calibration period.

Abbildung 5.15: Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) und mittlere jährliche Volumendifferenz ($DVOL'_a$) der Mittelwasserkalibrierung sowie relative Verbesserung des Hochwassergütemasses PQT ($PQT_{rel,calMQ}$) durch die Hochwasserkalibrierung, jeweils aufgetragen zu mittlerer Gebietshöhe (oben) und mittlerer jährlicher simulierter Schneeschmelze (unten). Datenbasis: 140 erfolgreich kalibrierte Einzugsgebiete, Kalibrierungszeitraum.

Niederschlagsmenge und Abflussmenge

Im Laufe der Kalibrierung zeigte sich, dass in Gebieten mit vergleichsweise geringen Niederschlägen Probleme auftreten können – als ein Indikator könnte die aus dem Modellantrieb berechnete Jahressumme des interpolierten Gebietsniederschlags vermutet werden. Schlechte Resultate wurden einzeln in Gebieten mit Niederschlagssummen von weniger als $1'250 \text{ mm a}^{-1}$ beobachtet; von den 19 Gebieten mit fehlgeschlagener Kalibrierung liegen zudem 12 unterhalb dieser Limite, 18 haben Gebietsniederschläge von weniger als $1'350 \text{ mm a}^{-1}$. Die Werte von NSE in **Abbildung 5.16** (oben) bestätigen, dass bei tiefen Gebietsniederschlägen tendenziell mehr schlechte Resultate zu erwarten sind. Allerdings liegen auch dort gute Resultate vor, die Jahresniederschlagsmenge scheint also nicht limitierend auf die Modellgüte zu wirken. Sehr ähnliche Muster sind beim mittleren beobachteten Jahresabfluss (bezogen auf die Kalibrierungsperiode) festzustellen. Vor allem im Bereich von unter $1'000 \text{ mm a}^{-1}$ treten vermehrt schlechtere Resultate auf.

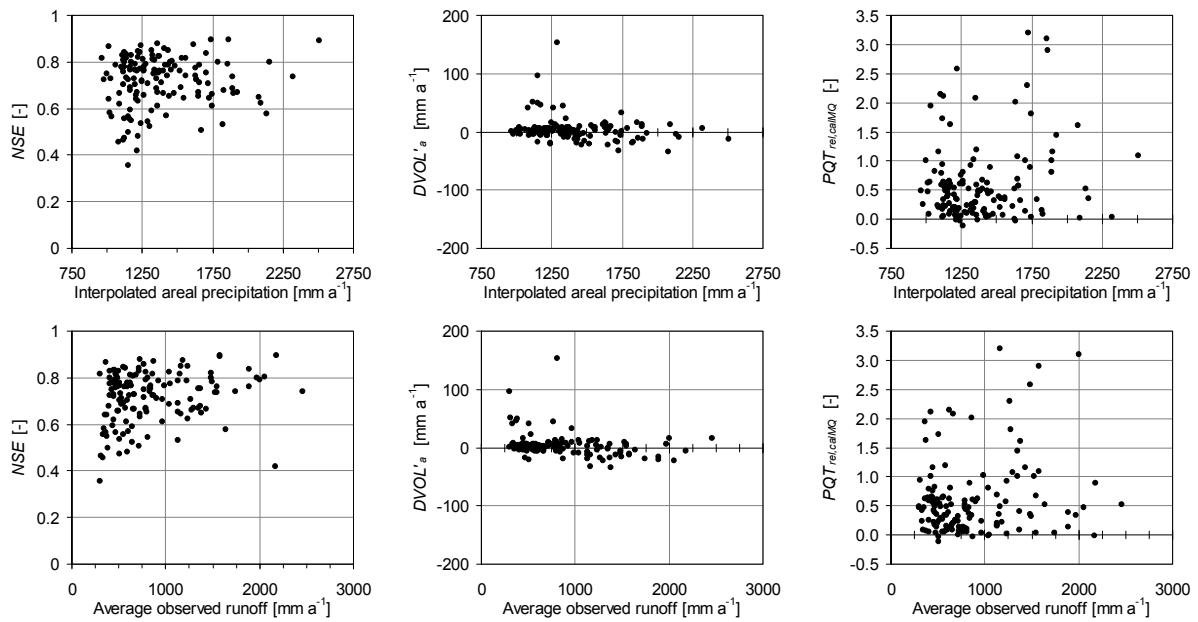


Figure 5.16: Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE) and average annual volumetric deviation ($DVOL'_a$) for standard calibration as well as relative improvement in flood score PQT ($PQT_{rel,calMQ}$) for flood calibration, each relative to mean annual areal precipitation (top) and average observed runoff (bottom). Data: 140 successfully calibrated catchments, calibration period.

Abbildung 5.16: Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) und mittlere jährliche Volumendifferenz ($DVOL'_a$) der Mittelwasserkalibrierung sowie relative Verbesserung des Hochwassergütemasses PQT ($PQT_{rel,calMQ}$) durch die Hochwasserkalibrierung, jeweils aufgetragen zum mittleren jährlichen Gebietsniederschlag (oben) und zum mittleren beobachteten Abfluss (unten). Datenbasis: 140 erfolgreich kalibrierte Einzugsgebiete, Kalibrierungszeitraum.

Zusammenfassend lässt sich also festhalten: Je grösser ein Gebiet ist, je höher es liegt und je mehr Niederschlag es empfängt, desto bessere Resultate sind bei der Modelleffizienz (NSE) zu erwarten. Die genannten Faktoren limitieren aber die Modellgüte nicht, gute Ergebnisse können demnach über den gesamten Bereich der betrachteten Kenngrössen hinweg auftreten. Bei $DVOL'_a$ und $PQT_{rel,calMQ}$ sind keine derart eindeutigen Muster zu erkennen.

5.2.4 Verluste in der Modellgüte

Abrundend zur nun erfolgten Beurteilung der verschiedenen Gütemasse werden anhand von **Abbildung 5.17** zwei weitere wichtige Aspekte untersucht: Der Verlust an Modellgüte im Übergang von der Kalibrierung zur Validierung und derjenige, welcher durch die Zusatzkalibrierung auf Hochwasser verursacht wird. Da hierzu unbedingt ein homogener Validierungszeitraum erforderlich ist, basiert diese Auswertung auf den 49 Einzugsgebieten der Priorität A, welche lange Messreihen besitzen und somit auf einen einheitlichen Zeitraum kalibriert werden konnten. Eine analoge Betrachtung zum Güterverlust durch die Regionalisierung wird in Kapitel 10.1.1 erfolgen.

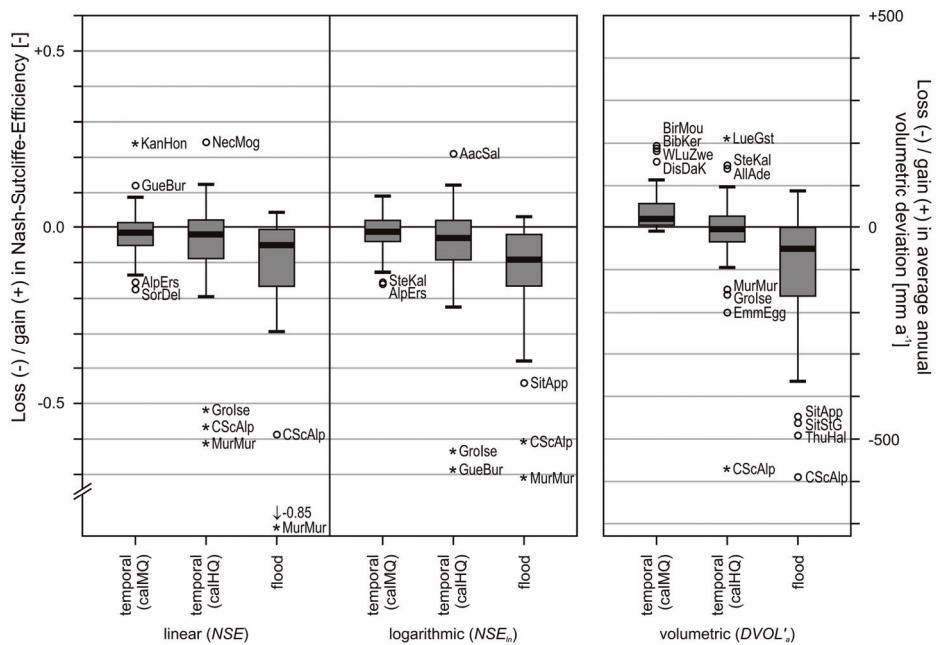


Figure 5.17: Losses in time (calibration period to validation period) for standard (calMQ) and flood calibration (calHQ) as well as loss through flood calibration (calMQ to calHQ, validation period), assessed with Nash-Sutcliffe-Efficiencies (linear: NSE, logarithmic: NSE_{ln}) and annual runoff volumes ($DVOL_a$) for 49 priority A catchments.

Abbildung 5.17: Verluste bezüglich Zeitraum (temporal: Kalibrierungs- vs. Validierungszeitraum) in Mittelwasser- (calMQ) und Hochwasserkalibrierung (calHQ) und Verlust durch die Hochwasserkalibrierung (flood: calMQ vs. calHQ, Validierungszeitraum), bewertet anhand der Nash-Sutcliffe-Effizienzen (linear: NSE, logarithmisch: NSE_{ln}) und der Volumendifferenzen ($DVOL_a$) für 49 Einzugsgebiete der Priorität A.

Als erster Aspekt interessiert derjenige Unterschied in der Modellgüte, welcher zwischen Kalibrierung (1994–1997) und Validierung (1984–1992 und 1998–2003) besteht ("temporal loss"). Verursacht wird dieser Güterverlust dadurch, dass die Kalibrierung bis zu einem gewissen Grade spezifisch auf den verwendeten Zeitraum abgestimmt ist. Je kleiner diese Verschlechterung ausfällt, desto besser ist die Kalibrierung gelungen. Die medianen Veränderungen von NSE (-0.01 für calMQ resp. -0.02 für calHQ), NSE_{ln} (-0.01 resp. -0.03) und $DVOL'_a$ (+19 mm a^{-1} resp. -5 mm a^{-1}) im Mittelwasser- und im Hochwasserparametersatz zeigen, dass die Kalibrierung insgesamt sehr stabil ist, also keine bedeutenden Einbussen resultieren, wenn das Modell ausserhalb des Kalibrierungszeitraums angewendet wird. Der Mittelwasserparametersatz schneidet dabei geringfügig besser ab. Mit dieser Stabilität ist ein wesentliches Ziel der Kalibrierung erreicht, welches vor allem im Hinblick auf die Regionalisierung von grosser Bedeutung ist.

Der zweite Aspekt betrifft die Gütedifferenz zwischen dem auf Mittelwasser (calMQ) und dem auf Hochwasser (calHQ) kalibrierten Parametersatz ("flood loss"); Bezugszeitraum ist dabei immer die Validierungsperiode (1984–1992 und 1998–2003). Hier resultieren nun etwas grössere Verluste: Für den Hochwasserparametersatz werden wie schon erläutert einige Kompromisse bezüglich Standardgütemassen eingegangen, um bessere Resultate bei den Spitzenabflüssen zu erreichen. Dies drückt sich auch darin aus, dass der Verlust für das eher auf hohe Abflüsse sensitive NSE (-0.05) geringer ist als für das vor allem auf Mittelwasser und Niedrigwasser sensitive NSE_{ln} (-0.09). **Abbildung 5.18** zeigt, dass von der Verschlechterung vor allem Gebiete betroffen sind, welche schon bei der Mittelwasserkalibrierung nur mässig gute Resultate zeigten. Bei der Volumenabweichung $DVOL'_a$ (-52 mm a^{-1}) ist ein merklicher Verlust an Güte zu verzeichnen; da aber die Wasserbilanz bei einer Spitzenwertbetrachtung nicht im Zentrum des Interesses liegt, erscheint dies akzeptabel. Eine systematisch stärkere Verschlechterung bei Gebieten, welche bereits in der Mittelwasserkalibrierung grosse Volumenabweichungen aufwiesen, konnte nicht festgestellt werden. Insgesamt bewegen sich die bei der Zusatzkalibrierung auf Hochwasser beobachteten Einbussen in einem Bereich, in welchem nach wie vor von hydrologisch sinnvollen Resultaten gesprochen werden kann.

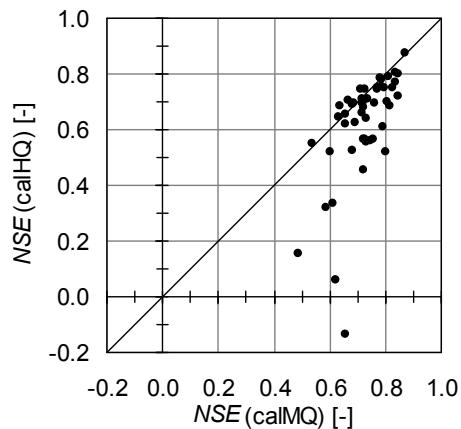


Figure 5.18: Comparison of Nash-Sutcliffe-Efficiencies (NSE) of standard (calMQ) and flood calibration (calHQ) for the validation period of 49 priority A catchments.

Abbildung 5.18: Vergleich der Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) von Mittelwasser- (calMQ) und Hochwasserkalibrierung (calHQ) für den Validierungszeitraum von 49 Einzugsgebieten der Priorität A.

5.3 Aussagen zu den Modellparametern

Nachdem nun die Güte der Simulationsresultate ausführlich besprochen wurde, geht es im Folgenden darum, die den Simulationen zugrundeliegenden Einstellungen der freien Modellparameter genauer zu untersuchen.

5.3.1 Parameterbereich

Den Wertebereich von 12 freien Modellparametern aus den 140 erfolgreich kalibrierten Einzugsgebieten zeigt **Abbildung 5.19**, und zwar jeweils für Mittelwasser- (calMQ) und Hochwasserkalibrierung (calHQ). Die beiden Parameter für Eisschmelze (*ICETMF*, *ICERMF*) werden nicht untersucht, da sie über die Grundlage von nur 19 kalibrierten Gebieten mit Vergletscherung vergleichsweise schlecht abgestützt sind. Die Diagrammskala umfasst jeweils den bei der Kalibrierung zugelassenen Parameterbereich (vgl. **Tabelle 3.5**); dieser Bereich wird in den meisten Fällen voll ausgenutzt.

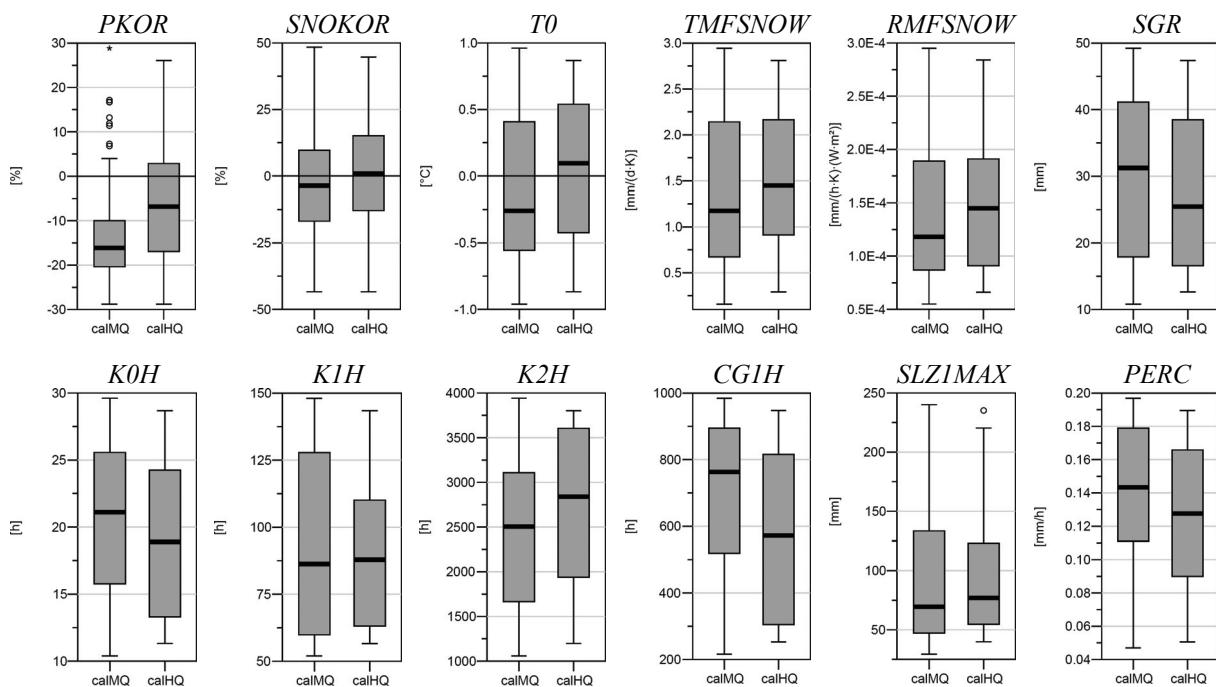


Figure 5.19: Range of 12 PREVAH model parameters (cf. **Figure 2.7**) in standard (calMQ) and flood (calHQ) calibration. Data: 140 successfully calibrated catchments.

Abbildung 5.19: Wertebereich von 12 PREVAH-Modellparametern (vgl. **Abbildung 2.7**) in Mittelwasser- (calMQ) und Hochwasserkalibrierung (calHQ). Datenbasis: 140 erfolgreich kalibrierte Gebiete.

Zwei Aspekte sollen besonders hervorgehoben werden:

- Die Bilanzkorrekturfaktoren für festen (*SNOKOR*) und insbesondere für flüssigen (*PKOR*) Niederschlag nehmen einen vergleichsweise engen Quartilsbereich ein – relevant ist hier *calMQ*, wo die Volumenabweichungen der Simulation wie schon gesehen gering gehalten werden konnten (vgl. Abschnitt 5.2.1). Der mediane Korrekturwert liegt bei *PKOR* mit -16% deutlich im negativen Bereich. Es ist somit anzunehmen, dass die Messfehlerkorrektur (vgl. 2.3.2) beim Regen die Werte etwas zu stark erhöht, so dass die messfehlerbereinigten Werte anschliessend mit der Bilanzkorrektur wieder etwas vermindert werden müssen. *SNOKOR* ist mit einem Median von -4% hingegen gering, die Messfehlerkorrektur für Schnee ist demnach gut getroffen. Insgesamt spielen bei der Wasserbilanz allerdings noch andere Faktoren eine Rolle, wie beispielsweise unterirdische Zu- und Wegflüsse oder Fehler der Abflussmessung (vgl. Kapitel 2.3.2).
- Es sind teils nur sehr geringe (*SNOKOR*, *SLZ1MAX*), teils ein wenig deutlichere (*PKOR*, *CG1H*) Unterschiede in den jeweiligen Parameterbereichen von Mittelwasser- und Hochwasserkalibrierung auszumachen. Das insgesamt aber doch geringe Ausmass dieser Unterschiede impliziert, dass der in der Mittelwasserkalibrierung erreichte Bereich plausibler Parameterwerte nicht verlassen wird.

Die erwähnten Änderungen in den Parametern werden anhand von **Abbildung 5.20** noch etwas genauer erläutert; dargestellt sind für alle 140 erfolgreich kalibrierten Einzugsgebiete die Veränderungen vom Parametersatz *calMQ* (Mittelwasserkalibrierung) zum Parametersatz *calHQ* (Hochwasserkalibrierung), relativ zum bei *calMQ* beobachteten Wertebereich. Während der Vergleich von *calMQ* und *calHQ* in **Abbildung 5.19** nur bezüglich des insgesamt eingenommenen Wertebereichs interpretierbar ist, wurden hier nun die tatsächlichen Parameterveränderungen in den einzelnen Gebieten ausgewertet und dargestellt. Die deutliche Zunahme der Bilanzkorrektur für Regen (*PKOR*) und die leichte Abnahme der Perkolationsrate (*PERC*) lassen sich dahingehend interpretieren, dass im oberen Abflussspeicher *SUZ* insgesamt etwas mehr Wasser für die Bildung von Oberflächen- und Zwischenabfluss (*R0* resp. *R1*) zur Verfügung steht. Gleichzeitig wird die Speicherzeit für Oberflächenabfluss (*K0H*) etwas reduziert, was tendenziell zu einer schärferen Spitze in *R0* führt. Bei der Speicherzeit für Zwischenabfluss (*K1H*) ist dagegen keine eindeutige Tendenz festzustellen, und der Speichergrenzwert für die Bildung von Oberflächenabfluss (*SGR*) wird im Mittel nur geringfügig reduziert. Die Veränderungen von *T0*, *K2H*, *CG1H* und *SLZ1MAX* fallen sehr unterschiedlich aus (große Spannweite der Werte), was als geringere Sensitivität im Bezug auf die Hochwasserkalibrierung interpretiert werden kann. Diese Parameter haben nur indirekte Wirkung auf den Spitzenabfluss, da sie die Schneeschmelze und die langsamen Abflusskomponenten betreffen.

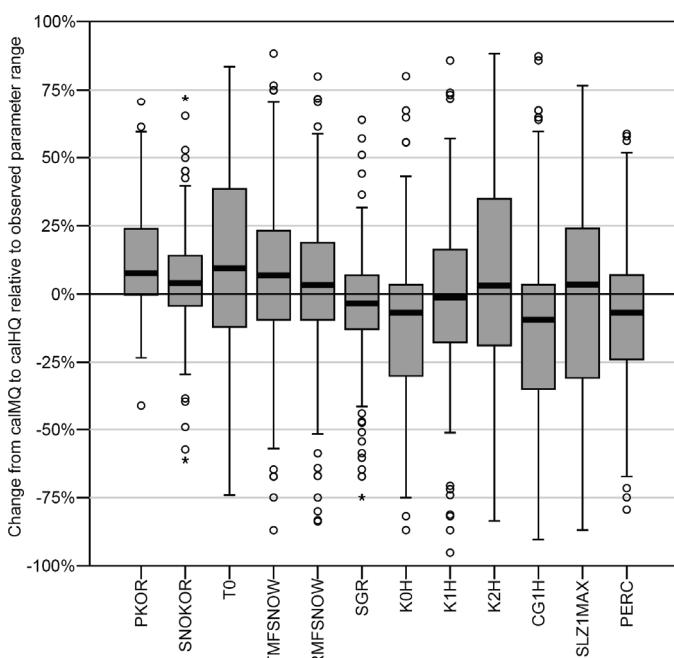


Figure 5.20: Change in parameter value from standard calibrated (*calMQ*) to flood calibrated (*calHQ*) parameter set, relative to observed parameter range in *calMQ*. Values refer to 140 successfully calibrated catchments.

Abbildung 5.20: Veränderung der Modellparameter vom mittelwasser- (*calMQ*) zum hochwasserkalibrierten (*calHQ*) Parametersatz, relativ zum Wertebereich von *calMQ*. Die Werte beziehen sich auf 140 erfolgreich kalibrierte Einzugsgebiete.

Insgesamt kann nicht von einer tiefgreifenden Veränderung der Parametersätze gesprochen werden, sondern eher von einer zielgerichteten Anpassung – damit erfüllt die Hochwasserkalibrierung die diesbezüglich an sie gestellten Anforderungen.

5.3.2 Überparametrisierung

Eine in der Literatur häufig diskutierte Frage betrifft die Überparametrisierung hydrologischer Modelle (z. B. JAKEMAN UND HORNBERGER, 1993; PERRIN ET AL., 2001). Im Bezug auf die freien Modellparameter bedeutet Überparametrisierung, dass der Informationsgehalt der verwendeten Zielgröße(n) nicht ausreicht, um die Werte der Modellparameter und damit die Einstellungen der verwendeten Module zu identifizieren. Da zur Modellkalibrierung normalerweise nur Abflussmessungen zur Verfügung stehen und weitere Messdaten sehr spärlich sind, ist dies in der Praxis ein relevantes Problem; es wurde schon von NASH UND SUTCLIFFE (1970) hervorgehoben und auch für das HBV-Modell beschrieben (BERGSTROM, 1995). Eine Überparametrisierung kann dazu führen, dass die Resultate der Modellvalidierung im Vergleich zur Kalibrierung deutlich abfallen. Falls zudem mehrere Parameter ähnlichen Informationsgehalt haben, manifestiert sich eine Überparametrisierung in deutlichen Korrelationen zwischen den betreffenden Modellparametern. Im Hinblick auf die Anwendung in ungemessenen Gebieten sollte eine Überparametrisierung auch deshalb vermieden werden, weil der Regionalisierungsaufwand mit jedem zusätzlichen Modellparameter steigt.

PREVAH besitzt bei der in dieser Arbeit verwendeten Prozessparametrisierung 12 freie Modellparameter, in der Standardversion sind es typischerweise bis zu 17 (vgl. Kapitel 2.3.3); in vergletscherten Gebieten kommen jeweils noch 2 Parameter für die Eisschmelze hinzu. Im Vergleich zu anderen – allerdings auch weniger detaillierten – Modellen ist dies eine eher grosse Anzahl. Somit stellt sich auch für PREVAH die Frage, ob eine Überparametrisierung besteht.

Klar gegen eine Überparametrisierung spricht, dass das Modell in der Validierung kaum schlechtere Resultate aufweist als in der Kalibrierung; dies konnte in Abschnitt 5.2.4 anhand der 49 Einzugsgebiete der Priorität A deutlich aufgezeigt werden (siehe v. a. Abbildung 5.17). Für die Mittelwasser- und Hochwasserkalibrierung resultieren bezüglich Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) entsprechende mittlere Güteverluste von lediglich 0.01 (calMQ) respektive 0.02 (calHQ), was als sehr stabiles Resultat einzustufen ist.

Wie steht es aber um die Parameterkorrelation? Zur Beantwortung dieser Frage stellt Abbildung 5.21 die Parameterwerte aller 140 erfolgreich kalibrierten Einzugsgebiete paarweise gegenüber, Tabelle 5.4 führt die zugehörigen Korrelationskoeffizienten auf. Grundlage ist dabei die Kalibrierung auf Mittelwasser, da deren Parametersätze im Bezug auf die Anwendung des Modells eine etwas höhere Gesamtplausibilität aufweisen. Die beiden freien Parameter der Eisschmelze (ICETMF, ICERMF) werden wegen der vergleichsweise schlechten Datengrundlage auch hier nicht berücksichtigt. Zur Beurteilung der gefundenen Pearson-Korrelationskoeffizienten (r_{xy}) wird mit einem zweiseitigen t-Test jeweils geprüft, ob diese signifikant verschieden von 0 sind. Dazu wird eine t-verteilte Prüfgrösse verwendet (BAHRENBERG ET AL., 1990):

$$\hat{t} = \sqrt{n-2} \cdot \frac{r_{xy}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}} \quad \text{mit } t_{krit} = t_{n-2,\alpha/2} \quad (\text{zweiseitige Fragestellung}) \quad \text{Gleichung 5.1}$$

wo α Irrtumswahrscheinlichkeit
 n Anzahl Stichproben

Zu berücksichtigen ist, dass aufgrund der grossen Stichprobenanzahl von $n = 140$ bereits relativ tiefe Korrelationskoeffizienten als signifikant eingestuft werden; um dieses Problem etwas zu entschärfen, wird mit $\alpha = 0.0001$ eine unüblich tiefe Irrtumswahrscheinlichkeit gefordert. Bedeutsamer als diese Signifikanz ist aber letztlich die Stärke des Zusammenhangs, welche direkt von r_{xy} gemessen wird. Ein Blick auf Abbildung 5.21 lässt zudem auch optisch erkennen, welche rein statistisch signifikanten Zusammenhänge tatsächlich von Bedeutung sein könnten und welche nicht.

Mit Hilfe von Tabelle 5.4 können die als signifikant korrelierend eingestuften Modellparameter in vier Gruppen unterteilt werden:

a.) *Bilanzkorrektur*

Die stärkste aller Korrelationen ist diejenige zwischen den Bilanzkorrekturfaktoren *PKOR* und *SNOKOR* ($r_{xy} = 0.66$). Eine Kombination der beiden Parameter zu einem einzigen Korrekturwert scheint denkbar, würde aber in einem Teil der Gebiete vermutlich zu einer Verschlechterung der Resultate führen. Auf den ersten Blick könnte erwartet werden, dass für beide Bilanzkorrekturfaktoren ein Zusammenhang mit der mittleren Gebietshöhe besteht. Dies ist aber nicht der Fall und darf nicht überraschen, da zusätzlich zu *PKOR* und *SNOKOR* eine wind- und somit bis zu einem gewissen Grad auch höhenabhängige Messfehlerkorrektur vorgenommen wird. Die über *PKOR*

und *SNOKOR* korrigierten Restfehler (vgl. Abschnitt 5.3.1) besitzen somit keine deutliche Höhen-abhängigkeit mehr.

b.) *Schneeschmelze*

Die Zusammenhänge zwischen *T0*, *TMFSNOW* und *RMFSNOW* können durch den gemeinsamen Einfluss auf die Schneeschmelze erklärt werden; die Absolutwerte von r_{xy} bewegen sich zwischen 0.36 und 0.47. Einzelne Parameter lassen sich hier kaum substituieren, da sie integraler Bestandteil des verwendeten Schneeschmelzmoduls sind. Weil eine genaue Wiedergabe der Schneeschmelze bei nival beeinflussten Regimes aber massgebend für die Modellgüte ist, sind Änderungen in diesem Modellbereich nicht zu empfehlen (zu den in PREVAH verfügbaren Schneeschmelzroutinen und Anwendungserfahrungen siehe ZAPPA, 2002 und ZAPPA ET AL., 2003). Die Korrelation zwischen *TMFSNOW* und *KIH* ($r_{xy} = 0.33$) schlägt die Brücke zur Abflussbildung: Die Schneeschmelze ist auch inhaltlich mit dem Zwischenabfluss – oder genereller dem oberen Abflussspeicher *SUZ* – in Verbindung zu bringen (vgl. GURTZ ET AL., 2003).

c.) *Abflussbildung – schnelle und verzögerte Komponente*

Eine erste Gruppe von Korrelationen im Abflussbildungsmodul betrifft den oberen Abflussspeicher *SUZ*, wo ein signifikanter Zusammenhang zwischen *SGR* und *KOH* ($r_{xy} = 0.55$) sowie zwischen *SGR* und *KIH* ($r_{xy} = 0.36$) festgestellt wird; dies ist insofern plausibel, als *SGR* die Trennung zwischen Oberflächenabfluss *R0* (Speicherzeit *KOH*) und Zwischenabfluss *R1* (Speicherzeit *KIH*) bestimmt.

d.) *Abflussbildung – langsame Komponente*

Die Korrelationen zwischen *CGIH* und *SLZIMAX* ($r_{xy} = -0.35$) sowie zwischen *CGIH* und *K2H* ($r_{xy} = 0.41$) sind modelltechnisch ebenfalls gut erklärbar, da sie jeweils Einfluss auf den unteren Abflussspeicher (*SLZ1–SLZ3*) und dessen Ausfluss *R2* (Basisabfluss) haben.

Die Rolle der Perkolation als Übergangsglied zwischen oberem und unterem Abflussspeicher (*SUZ* resp. *SLZ1–SLZ3*) und somit zwischen den Gruppen c.) und d.) drückt sich in den Zusammenhängen zwischen *PERC* und *KIH* ($r_{xy} = 0.37$) sowie zwischen *PERC* und *SLZIMAX* ($r_{xy} = -0.47$) aus.

Die Korrelationen zwischen Parametern des Abflussbildungsmoduls sind also wie gesehen relativ zahlreich. BERGSTRÖM (1995) hat in diesem Zusammenhang bereits angemerkt, dass die Abflussbildung im HBV-Modelltyp eher zu stark parametrisiert ist. Aber auch was diesen Aspekt betrifft, spricht die Anwendungserfahrung für die Eignung des Modells (siehe Kapitel 2.2.1).

Ausser vielleicht für *PKOR* und *SNOKOR* scheint nun kein pragmatischer Weg erkennbar, die vorgefundene Korrelationen zu verringern und die Anzahl freier Modellparameter weiter zu senken, zumal die Parameterzahl im Hinblick auf die Regionalisierung bereits von 17 auf 12 (plus jeweils 2 weitere für vergletscherte Gebiete) reduziert wurde (Kapitel 2.3.3). Tiefgreifendere Veränderungen in der Modellstruktur sind nicht das Ziel dieser Arbeit und scheinen nicht notwendig, da sowohl die in dieser Arbeit vorliegenden Validierungsresultate wie auch die Erfahrungen der zahlreichen früheren Studien gegen eine Überparametrisierung sprechen. Es sollte zudem berücksichtigt werden, dass nur die Paare *PKOR* und *SNOKOR* sowie *SGR* und *KOH* Korrelationskoeffizienten von über 0.5 aufweisen.

Es fällt im Übrigen auf, dass sechs der sieben für die Kalibrierung unvergletschter Gebiete gebildeten Parameterpaare (vgl. **Tabelle 3.5**) hier als hochsignifikant korrelierend eingestuft wurden. Zur Erinnerung: Diese Paare wurden mit dem Ziel zusammengestellt, inhaltlich miteinander verknüpfte Modellparameter gegeneinander zu kalibrieren. Die vorgefundenen Korrelationen können dahingehend interpretiert werden, dass das für die Wahl der Parameterpaare gesetzte Ziel erreicht wurde. Man könnte allerdings einwenden, dass die beobachteten Korrelationen gerade eben durch diese Kalibrierungspaare erzeugt oder zumindest verstärkt wurden. Dagegen spricht jedoch, dass auch zwischen nicht gemeinsam kalibrierten Parametern Korrelationen bestehen.

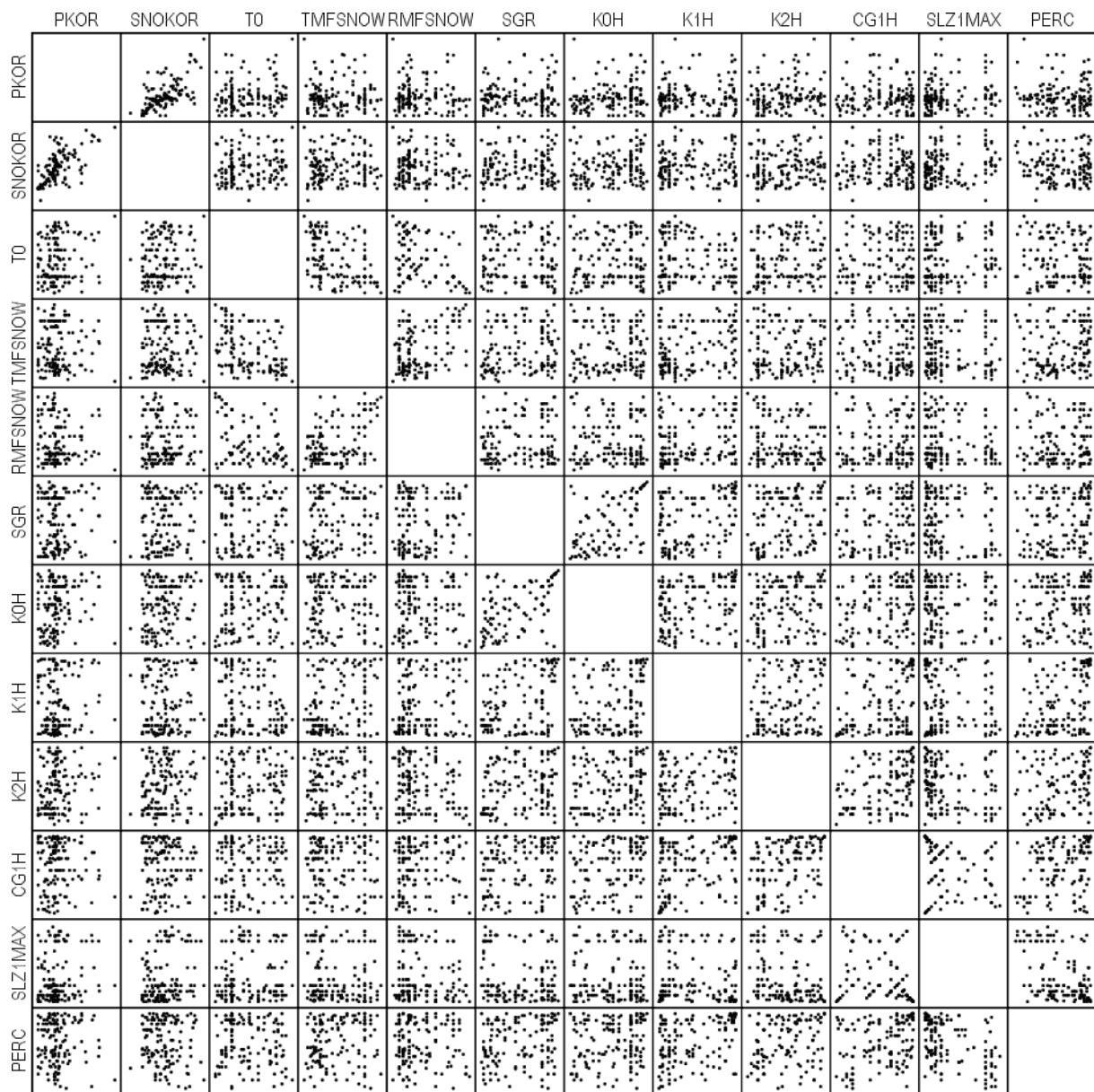


Figure 5.21: Scatter-plot matrix for standard calibrated model parameters from 140 catchments (without ice melt parameters). Plots are scaled relative to calibration limits.

Abbildung 5.21: Scatterplot-Matrix für die auf Mittelwasser kalibrierten Modellparameter aus 140 Gebieten (ohne Parameter für Eisschmelze). Die Plots sind entsprechend der in der Kalibrierung verwendeten Parameterlimiten skaliert.

Table 5.4: Pearson correlation coefficient (r_{xy}) matrix for 12 free model parameters based on 140 catchments calibrated on standard conditions. Parameter pairs with statistically significant correlation (t-test, probability of error $\alpha \leq 0.0001$) are highlighted in grey, letters a) to d) refer to groups of high correlation as explained in the text.

Tabelle 5.4: Matrix der Pearson-Korrelationskoeffizienten (r_{xy}) für 12 freie Modellparameter auf Basis von 140 auf Mittelwasser kalibrierten Gebieten. Statistisch signifikant korrelierende Parameterpaare (t-Test, Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha \leq 0.0001$) sind grau hinterlegt, die Buchstaben a) bis d) verweisen auf die im Text erläuterten Gruppen hoher Korrelation.

r_{xy}	PKOR	SNOKOR	T0	TMFSNOW	RMFSNOW	SGR	K0H	K1H	K2H	CGIH	SLZIMAX	PERC
PKOR	a) 0.66	0.66	0.14	0.00	-0.08	0.04	0.18	0.08	0.13	-0.02	0.13	-0.02
SNOKOR	0.66		0.09	0.04	-0.06	0.07	0.15	0.02	0.10	-0.02	0.23	-0.08
T0	0.14	0.09	b) -0.42	-0.36		-0.12	0.03	-0.18	0.16	0.08	0.10	-0.09
TMFSNOW	0.00	0.04	-0.42		0.47	0.20	0.04	0.33	-0.06	-0.03	-0.08	0.14
RMFSNOW	-0.08	-0.06	-0.36	0.47		0.09	-0.03	0.19	-0.21	0.05	-0.11	-0.02
SGR	0.04	0.07	-0.12	0.20	0.09	c) 0.55	0.36		0.20	0.24	-0.14	0.20
K0H	0.18	0.15	0.03	0.04	-0.03	0.55		0.26	0.19	0.30	-0.05	0.15
K1H	0.08	0.02	-0.18	0.33	0.19	0.36	0.26		0.25	0.29	-0.09	0.37
K2H	0.13	0.10	0.16	-0.06	-0.21	0.20	0.19	0.25	d) 0.41	-0.25		0.24
CGIH	-0.02	-0.02	0.08	-0.03	0.05	0.24	0.30	0.29	0.41		-0.35	0.27
SLZIMAX	0.13	0.23	0.10	-0.08	-0.11	-0.14	-0.05	-0.09	-0.25	-0.35		-0.47
PERC	-0.02	-0.08	-0.09	0.14	-0.02	0.20	0.15	0.37	0.24	0.27		-0.47

5.4 Zusammenfassung

Von insgesamt 159 untersuchten mesoskaligen Einzugsgebieten konnten 140 erfolgreich auf Mittelwasser- und anschliessend auf Hochwasserbedingungen kalibriert werden. Das dazu eingesetzte automatische Kalibrierungsverfahren auf Basis unterschiedlicher Gütekriterien hat sich gut bewährt. Die misslungenen Kalibrierungen sind zum Teil auf starken Karsteinfluss oder auf fehlerhafte Abflussmessdaten zurückzuführen, vor allem aber erwies sich die Simulation in Einzugsgebieten mit einer Fläche von weniger als 25 km^2 als problematisch, wenn die Wiedergabe der Niederschlags spitzen von ungenügender Qualität ist oder das Gebiet zu ausgesprochen schnellen Abflussantworten neigt.

Während bei der Mittelwasserkalibrierung eine mediane Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) von 0.74 erreicht wird, sinkt der mediane NSE-Wert für den hochwasserkalibrierten Parametersatz leicht auf 0.67. Diese Effizienzwerte können als gut bezeichnet werden – sie fallen indes nicht höher aus, weil durchgehend auf eine möglichst stabile und plausible Parameterwahl geachtet wurde, was leichte Kompromisse in der Modellgüte bedingt. Zudem ist zu beachten, dass eine Simulation im Stundenschritt hohe Ansprüche an das Modell stellt und tendenziell zu tieferen NSE-Werten führt als eine Simulation im Tagesschritt. Insgesamt kann aber auch beim hochwasserspezifischen Parametersatz von einer hydrologisch sinnvollen Simulation ausgegangen werden. Das primäre Ziel der Hochwasserkalibrierung – im Vergleich zur Mittelwasserkalibrierung bessere Resultate bei der Extrapolation simulierter Abflussdaten – konnte dabei ebenfalls erreicht werden, wie aus verschiedenen hochwasserspezifischen Gütemassen und aus Fehlerbetrachtungen ersichtlich wurde. Für die Schätzung eines HQ_{100} in 49 repräsentativen Gebieten der Priorität A beträgt die mediane Abweichung von der Referenz lediglich -15%, und die Spannweite der Resultate ist mit -74% bis +66% vergleichsweise gering.

Mit den 140 kalibrierten Parametersätzen steht eine sehr solide Basis für die als Hauptziel dieser Arbeit anvisierte Anwendung in ungemessenen Gebieten (Regionalisierung) zur Verfügung. Nach einer genaueren Prüfung der Unsicherheiten in den Modellparametern (Kapitel 6) und im Niederschlagsinput (Kapitel 7) kann die Regionalisierung in den Kapiteln 8 bis 10 damit in Angriff genommen werden.

Kapitel 6

Unsicherheit und Sensitivität I: freie Modellparameter

After discussing sources of uncertainty in the present model application, the free model parameters are examined concerning their sensitivity and uncertainty. For this, 50'000 randomly generated parameter sets for a single test catchment are assessed firstly (Monte Carlo simulation). Secondly, 49 representative catchments are calibrated using two independent reference periods. Besides insights into reliability and validity of the calibrated model parameters, it is also possible to identify hydrologically meaningful confidence bounds in simulation and extrapolation. The results furthermore point at the methods of parameter regionalisation which might be most promising.

Nach einer Übersicht zu Unsicherheitsquellen in der vorliegenden Modellierung werden die freien Modellparameter bezüglich ihrer Sensitivität und Unsicherheit untersucht. Dazu werden einerseits 50'000 zufällig erzeugt Parametersätze für ein Testgebiet beurteilt (Monte-Carlo-Methode), andererseits wird das Modell für 49 repräsentative Einzugsgebiete auf zwei unabhängige Zeiträume kalibriert. Neben Einsichten in Zuverlässigkeit und Aussagekraft der kalibrierten Modellparameter können auch hydrologisch sinnvolle Konfidenzbereiche in Modellierung und Extrapolation ausgewiesen werden. Die Betrachtung liefert zudem Hinweise auf erfolgversprechende Möglichkeiten der Parameterregionalisierung.

6.1 Übersicht: Unsicherheit und Sensitivität in der vorliegenden Modellierung

Wie schon verschiedentlich angesprochen (v. a. Kapitel 2, 3 und 8), bestehen in der Niederschlag-Abfluss-Modellierung verschiedene Quellen der Unsicherheit. Die genaue Quantifizierung von Unsicherheiten ist eine wichtige Frage der aktuellen Forschung; vermehrt wird in letzter Zeit gefordert, diesem Punkt in Modellierungsstudien grössere Beachtung zu schenken (BEVEN, 2006A; PAPENBERGER UND BEVEN, 2006). Methodisch und inhaltlich bestehen allerdings einige Schwierigkeiten, welche noch nicht zufriedenstellend gelöst sind (MONTANARI, 2007). Erschwerend kommt hinzu, dass die gewonnenen Erkenntnisse auch immer vom untersuchten Einzugsgebiet und vom verwendeten Modell abhängen (MERZ, 2002).

Da das Ziel der vorliegenden Arbeit nun nicht eine vertiefte Unsicherheitsanalyse ist, werden in diesem und dem folgenden Kapitel nur zwei ausgewählte Unsicherheitsquellen betrachtet, welche für das anvisierte Ziel – eine prozessbasierte, modellgestützte Hochwasserabschätzung in ungemessenen Gebieten – relevant sind. Dabei sollen nicht primär die Unsicherheiten in den Resultaten ausgewiesen werden, es geht vielmehr darum, das Modell gezielt auszuloten und daraus die für diese Arbeit relevanten Schlüsse zu ziehen. Es wird sich allerdings zeigen, dass eine solche Untersuchung sehr viel Rechenaufwand erfordert – eine Umsetzung von allfälligen Erkenntnissen sowie damit verbundene Folgeuntersuchungen und Neukalibrierungen sind aus zeitlichen Gründen anschliessend nur beschränkt möglich.

Im Folgenden wird verschiedentlich von Unsicherheit und Sensitivität zu sprechen sein – die beiden damit verbundenen Konzepte sind eng miteinander verknüpft und nicht immer klar zu trennen (vgl. BEVEN, 2001A; SALTELLI ET AL., 2004). Während eine Unsicherheitsanalyse normalerweise den Grad an Unsicherheit in den Resultaten zu ergründen versucht (MONTANARI, 2007), ist das Ziel einer Sensitivitätsanalyse, wenig sensitive (und somit unsicher bestimmbare) Größen zu identifizieren, um sie danach beispielsweise zu ersetzen oder ganz zu eliminieren (SALTELLI, 2006).

In der vorliegenden Arbeit werden die Begriffe folgendermassen verwendet:

- *Unsicherheit* bezieht sich auf die Ungenauigkeit, mit welcher bei der Bestimmung von in der Modellierung verwendeten Eingangs- und Steuergrössen (z. B. Meteorologie, Modellparameter) zu rechnen ist – und weiter darauf, welche Auswirkungen dies auf die Genauigkeit der Resultate hat.
- *Sensitivität* sagt aus, wie stark sich Änderungen in einer (unsicher bestimmbaren) Eingangsgröße auf das Simulationsresultat auswirken.

Eine scharfe Unterscheidung ist auch hier nicht immer möglich, insbesondere wenn es um die zu kalibrierenden Modellparameter geht: Sind sie wenig sensitiv, hängt dies meist damit zusammen, dass wegen ihrer gegenseitigen Beeinflussung (vgl. Abschnitt 5.3.2) kein eindeutiger Bereich optimaler Resultate gefunden werden kann – bei ihrer Bestimmung ist deshalb mit grösseren Unsicherheiten zu rechnen. Geringe Sensitivität und grosse Unsicherheit sind in diesem Fall also eng miteinander verbunden.

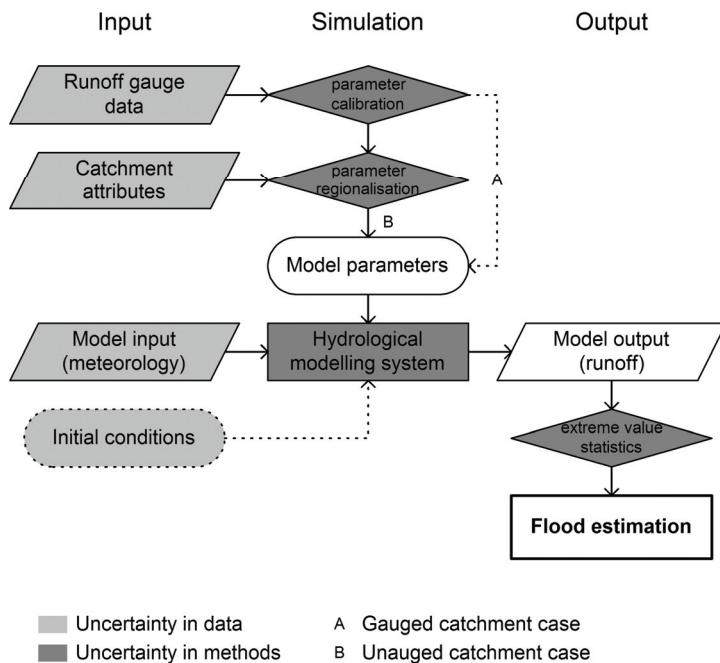


Figure 6.1: Sources of uncertainty in the course of a flood estimation using the approach of hydrological modelling as proposed in this study. Note that uncertainties are cascading and therefore affect all following steps.

Abbildung 6.1: Unsicherheitsquellen im Ablauf einer Hochwasserabschätzung mit dem in dieser Arbeit verwendeten Ansatz der hydrologischen Modellierung. Zu beachten ist, dass sich Unsicherheiten fortpflanzen, also alle jeweils folgenden Schritte betreffen.

Die in **Abbildung 6.1** dargestellte und im folgenden erläuterte Übersicht soll nun dazu dienen, Unsicherheitsquellen der vorliegenden Modellanwendung aufzuzeigen und wo möglich bezüglich ihrer Bedeutung einzuordnen. Gleichzeitig sollen damit diejenigen Unsicherheitsquellen identifiziert werden, welche im Rahmen dieser Arbeit ins Gewicht fallen und folglich zu beachten sind.

- **Eingangsdaten der Modellkalibrierung (gemessener Abfluss)**
Im Vergleich zu anderen Unsicherheiten sind diejenigen des gemessenen Abflusses als deutlich weniger bedeutend einzustufen; eine Ausnahme könnte allenfalls der Abflussmessfehler im Hochwasserfall darstellen (vgl. Kapitel 2.2.2).
- **Eingangsdaten der Modellregionalisierung (Gebietsattribute)**
Auch hier fallen die zu erwartenden Unsicherheiten vergleichsweise gering aus. Am problematischsten sind die Attribute zu den Bodeneigenschaften, welche sehr stark generalisiert sind und die tatsächliche Heterogenität der Bedingungen nicht adäquat wiedergeben können.
- **Modellantrieb (Meteorologie)**
Hier spielen verschiedene Faktoren eine Rolle: Erstens erfolgen bei der Messung Fehler, welche vor allem beim Niederschlag bedeutsam sind; die zur Korrektur eingesetzten Ansätze sind unsicher. Zweitens ist das Messnetz nur beschränkt repräsentativ, wodurch insbesondere grosse Höhen untervertreten sind; gleichzeitig führt die Interpolation vom Punkt in die Fläche zu weiteren Unsicherheiten. Besonders relevant für die vorliegende Arbeit scheint wegen des Einflusses auf Hochwasserabflüsse das Problem der Starkniederschläge: Sie werden wegen der ungenügenden Messnetzdichte meist nur ungenügend erfasst und durch die Interpolation abgeflacht. Diese Punkte wurden bereits in Kapitel 2.3.2 angesprochen.
- **Initialbedingungen**
Kaum relevant ist der Initialisierungsstatus des Modells, da die Methode der kontinuierlichen Langzeitsimulation zum Einsatz kommt. Dabei werden zwar grobe Annahmen über den Modellstatus zu Beginn der Simulation gemacht (oberer und unterer Abflussspeicher, Bodenfeuchtespeicher), das erste Simulationsjahr wird dann aber dazu verwendet, um die Speicher auf einen plausiblen Füllstand einpendeln zu lassen und zudem die winterliche Schneedecke aufzubauen. Dieses Initialisierungsjahr wird anschliessend verworfen und nicht ausgewertet.

- *Modellparameter (kalibriert oder regionalisiert)*

Eine bedeutende und viel diskutierte Unsicherheitsquelle (vgl. Kapitel 3.1.1) sind die freien Modellparameter. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden: Wird das Modell kalibriert (**Abbildung 6.1, A**), gehen die Unsicherheiten der dabei verwendeten Messdaten (Modellantrieb und Zielgröße der Kalibrierung) sowie der Kalibrierungsmethodik (Suchmodus, Gütekriterien, Reihenfolge, Startwerte) ein. Erschwerend wirkt, dass für die freien Modellparameter normalerweise kein eindeutiges Optimum existiert (BEVEN, 2000), dass also je nach Kalibrierungszeitraum und verwendeter Methodik andere – wenn auch durchaus funktionelle – Parametersätze resultieren (vgl. Kapitel 3.1.1). Werden die Modellparameter regionalisiert (**Abbildung 6.1, B**), bleiben die kalibrierten Parameter mit den in ihnen enthaltenen Unsicherheiten wichtig, denn die Ergebnisse der Kalibrierung dienen üblicherweise als Grundlage der Regionalisierung. In der zur Regionalisierung verwendeten Methodik bestehen weitere Unsicherheiten, ebenso wie in den schon oben diskutierten Gebietsattributen.

- *Modellkonzeption*

In den Kapiteln 2.2 und 5 konnte bereits gezeigt werden, dass PREVAH für die hier durchgeführte Anwendung geeignet ist. Es ist davon auszugehen, dass für die vorliegenden Daten und auf der betrachteten Skala keine bedeutend besseren Modelle existieren. Dennoch ist bei den zugrundeliegenden Modellstrukturen immer mit Unsicherheiten zu rechnen, da alle existierenden Modelle ihre Schwächen haben (vgl. UHLENBROOK ET AL., 1999; BEVEN, 2001A; BUTTS ET AL., 2004).

- *Extremwertstatistik*

Nicht zu vergessen sind im vorliegenden Projekt die Unsicherheiten, welche bei der Extrapolation der jährlichen Höchstabflüsse auf seltene Wiederkehrperioden entstehen. Einerseits stellt sich die Frage, ob die verwendete Datengrundlage repräsentativ ist, andererseits geht es auch um die Wahl der geeigneten extremwertstatistischen Verteilungsfunktion und um die Schätzung ihrer Parameter. Grundsätzliches dazu wurde bereits in Kapitel 4.2.3 beschrieben, weitere Erläuterungen finden sich in Kapitel 10.2.2.

Für das auszuarbeitende Modellsystem sind nun zwei der oben besprochenen Punkte besonders relevant: Als erstes spielt die Parameterunsicherheit der Kalibrierung eine bedeutende Rolle. Wichtig ist sie deshalb, weil die kalibrierten Modellparameter als Grundlage der Regionalisierung dienen; somit ist beim Entwickeln der Regionalisierungsmethodik (Kapitel 8) auf diese Grundlagen Rücksicht zu nehmen. Die Parameterunsicherheit wird in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels zu besprechen sein. Als zweiter Punkt ist die Unsicherheit im Modellantrieb wichtig, insbesondere was den Niederschlag angeht; diese Thematik wird im nachfolgenden Kapitel 7 erörtert.

Die Unsicherheit der Hochwasserextrapolation wird in den detaillierten Resultaten (Anhang D) ausgewiesen, und zwar über den extremwertstatistischen Konfidenzbereich mit Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha \leq 0.1$. Dass dieses Konfidenzband nur bezüglich Anpassungsgüte der Extrapolation interpretiert werden darf und darüber hinaus keine Unsicherheitsangaben macht, wurde bereits in Kapitel 4.2.3 diskutiert.

Bei Kalibrierung (Kapitel 3 und 4) und Regionalisierung (Kapitel 8 und 9) wurde schliesslich versucht, die aus prinzipiellen Überlegungen heraus kaum vermeidbaren Unsicherheiten nicht unnötig zu vergrössern: Dazu wurden unter Berücksichtigung der bestehenden Forschungsliteratur möglichst geeignete, an die Anforderungen dieser Arbeit angepasste Verfahren entwickelt und jeweils anhand der vorliegenden Daten geprüft und verfeinert.

6.2 Einführung zur Untersuchung der freien Modellparameter

Vor dem Einstieg in die eigentliche Untersuchung muss an diesem Punkt nochmals klar erläutert werden, wozu genau Sensitivität und Unsicherheit der Modellparameter beurteilt werden sollen: Der hauptsächliche Grund liegt darin, dass in Kapitel 8 und 9 eine Methodik entwickelt werden muss, um die Parametersätze zu regionalisieren, welche mit der in den Kapiteln 3 und 4 vorgestellten Kalibrierung gefunden wurden. In diesem Zusammenhang sind zwei Dinge wichtig: Erstens sollten die kalibrierten Parametersätze eine gute Stabilität aufweisen, was den Übergang vom Kalibrierungs- zum Validierungszeitraum betrifft. Dies ist ein Test für die Eignung der Kalibrierungsmethodik und der Modellstruktur sowie für die Plausibilität der Parametersätze als ganzes; diese Punkte konnten im Kapitel 5 bereits mit positivem Resultat abgeklärt werden. Zweitens – und darum wird es im Folgenden gehen – ist zu untersuchen, ob die freien Modellparameter gebietsspezifische Eigenschaften repräsentieren. Um diesen Anspruch zu erfüllen, müssten die Parameter ein physikalisch begründetes, eindeutiges

Optimum besitzen, welches dann auch noch durch eine Kalibrierung zu identifizieren wäre – Forderungen, die entsprechend der einleitend erläuterten Unsicherheiten kaum erfüllt werden können. Deshalb soll hier ermittelt werden, mit welchem Mass an Unsicherheit bei den einzelnen Parametern zu rechnen ist, um daraus auf erfolgversprechende Methoden der Parameterregionalisierung zu schließen.

Die Untersuchung der Modellparameter gliedert sich in zwei Teile: In einem ersten Teil (folgender Abschnitt 6.3) wird die Parametersensitivität betrachtet. Dabei soll untersucht werden, ob sich deutliche Parameteroptima abzeichnen, welche auf die Vertrauenswürdigkeit der in der Kalibrierung gefundenen Werte hinweisen. Gleichzeitig ist von Interesse, ob sich die Sensitivitäten der freien Modellparameter stark voneinander unterscheiden und ob es folglich Parameter gibt, welche wegen ihrer vergleichsweise geringen Sensitivität gesondert regionalisiert werden könnten – beispielsweise durch die Verwendung von einfach hergeleiteten A-priori-Werten. Im zweiten Teil (Abschnitt 6.4) soll dann die Unsicherheit der kalibrierten Parameter gezielt betrachtet werden. Dies geschieht über die Anwendung der in Kapitel 3 vorgestellten Kalibrierungsmethode, wobei zwei unterschiedliche Kalibrierungszeiträume verwendet werden. Je weniger die jeweils ermittelten Parameter voneinander abweichen, desto geringer ist ihre Unsicherheit einzustufen.

6.3 Untersuchung der Parametersensitivität mittels Monte-Carlo-Methode

6.3.1 Methodik

Als erstes soll nun die Sensitivität der freien Modellparameter untersucht werden. Dazu wird die Monte-Carlo-Methode verwendet, bei welcher vor der Simulation für jeden Parameter ein zufälliger Wert gewählt wird. Die Resultate einer grossen Zahl von Simulationen mit zufällig erzeugten Parametersätzen werden dann mit Gütemassen bewertet, womit ein eine sogenannte "response surface" entsteht, ein Verteilungsbild der Modellgüte in Abhängigkeit der Parameterwerte (vgl. MELCHING, 1995). Auf diesem Grundsatz basiert beispielsweise das bekannte Verfahren GLUE (Generalised Likelihood Uncertainty Estimation) von BEVEN UND BINLEY (1992); die genannten Autoren lehnen die Existenz eines einzigen optimalen Parametersatzes ab und gehen anstatt dessen vom Vorhandensein einer Vielzahl funktionaler ("behavioural") Parametersätze aus, unter welchen kein eindeutig bester identifiziert werden kann.

An dieser Stelle wird die Monte-Carlo-Methode aber nicht verwendet, um geeignete Parametersätze für die Simulation zu finden, sondern um die Sensitivität der Parameter zu untersuchen – es interessiert also vor allem die Reaktion des Modells auf verschiedenste Parameterkombinationen. Die in der Kalibrierung und Regionalisierung gesetzten Parametergrenzen (vgl. **Tabelle 8.9**) geben dabei die entsprechenden Wertebereiche vor. Einzig für die Bilanzkorrektur des flüssigen Niederschlags (*PKOR*) wurde der aufgrund der Kalibrierungserfahrung als eher eng eingeschätzte Bereich von -30% bis +30% auf -40% bis +40% erweitert (vgl. **Abbildung 5.19**). Da dieser Parameter vermutlich grossen Einfluss auf das Resultat hat, soll sein Wert möglichst nicht durch Vorgaben beeinflusst werden. Für die restlichen Parameter schien eine Erweiterung des zu untersuchenden Wertebereichs nicht angezeigt, da entweder keine Häufung in der Nähe der Grenzen zu verzeichnen war oder die Grenzwerte als physikalische Limiten eingehalten werden mussten.

Der zu beurteilende Simulationszeitraum umfasst übereinstimmend mit den Vorgaben der Mittelwasserkalibrierung die Jahre 1994 bis 1997 (mit Initialisierungsjahr 1993), die Resultate werden mittels Nash-Sutcliffe-Effizienz (*NSE*) und PREVAH-Gesamtgütemass (*ATOT*) bewertet. Als Testgebiet wurde mit dem Allenbach bei Adelboden ein Gebiet vom Typ nival alpin gewählt, welches keine Gletscherflächen aufweist. Aufgrund seiner relativ geringen Fläche von 28.8 km² wird erwartet, dass die Sensitivität der Modellparameter gut zu untersuchen ist und sich die Gebietsantwort auf den meteorologischen Input nicht allzu stark ausmittelt. Im Hinblick auf die Abschätzung von Hochwasserspitzen scheint es zudem vorteilhaft, dass der Allenbach in dieser Hinsicht bekanntermassen zu markanten Reaktionen auf Starkniederschlagsereignisse neigt (vgl. NAEF ET AL., 1999).

6.3.2 Resultate

Parametersensitivität

Im Laufe der Untersuchung zeigte sich, dass im vorliegenden Fall eine sehr grosse Anzahl zufälliger Monte-Carlo-Parametersätze durchgerechnet werden muss, um für alle betrachteten Parameter eine zufriedenstellende Abdeckung mit guten Effizienzen zu erreichen; insgesamt wurden 50'000 Modellläufe mit jeweils einem neuen Parametersatz durchgeführt. Dieser enorme Rechenaufwand ist dadurch bedingt, dass mit 12 Parametern eine sehr grosse Anzahl von Kombinationen möglich ist.

Abbildung 6.2 zeigt Nash-Sutcliffe-Effizienz (*NSE*) und PREVAH-Gesamtgütemass (*ATOT*) der 50'000 zufällig erstellten Parametersätze, und zwar jeweils für einen Parameter. Dazu werden die auf den 12-dimensionalen Parameterraum bezogenen Ergebnisse jeweils auf die Achse des zu untersuchenden Parameters projiziert und somit gewissermassen im Querschnitt dargestellt. Die einzelnen Parameter lassen sich bezüglich ihrer Sensitivität in die folgenden Gruppen zusammenfassen:

- Die ausgeprägteste Sensitivität weisen *PKOR* und *SNOKOR* auf. Von allen betrachteten Parametern zeigen sie am deutlichsten einen Bereich mit optimalen Resultaten, auch wenn dieser immer noch relativ breit ist. Das Gütemass *ATOT* weist im Vergleich zu *NSE* eine noch deutlichere Differenzierung auf; dies ist darauf zurückzuführen, dass *ATOT* auch den Volumenfehler der Wasserbilanz berücksichtigt (*AVOL*, vgl. Gleichung 3.16), welcher von *PKOR* und *SNOKOR* stark beeinflusst wird; auch die auf die einzelnen Monate bezogenen Teilgütemasse *ALIN_{mon}*, *ALOG_{mon}* und *AVOL_{mon}* tragen zur Differenzierung von *ATOT* bei, was aufgrund des Einflusses von *PKOR* und *SNOKOR* auf die Saisonalität der Abflüsse (Abflussbildung vs. Aufbau der Schneedecke) plausibel erscheint.
- Eine erkennbare, wenn auch nicht ausgeprägte Sensitivität ist bei *RMFSNOW*, *TMFSNOW* und *SGR* festzustellen. *RMFSNOW* und *TMFSNOW* beeinflussen zwar beide die Schneeschmelze; aus ihrer Sensitivität kann aber geschlossen werden, dass sie trotz ihrer in Kapitel 5.3.2 gefundenen gegenseitigen Korrelation von $r_{xy} = 0.47$ eigenständigen und nicht völlig durch den jeweils anderen Parameter ersetzbaren Informationsgehalt besitzen. Die eingeschränkte Sensitivität des Parameters *SGR* dürfte durch dessen Verwandtschaft mit den stark miteinander vernetzten Abflussbildungsparametern (siehe unten) begründet sein.
- Die bezüglich *NSE* kaum sensiblen Parameter *PERC* und *CG1H* werden unter Zuhilfenahme von *ATOT* etwas deutlicher differenzierbar. In beiden Fällen ist dies vor allem der logarithmischen Effizienz (*ALOG*, vgl. Gleichung 3.15) des PREVAH-Gütemasses zu verdanken – sie gewichtet Fehler bei geringen Abflüssen höher. Diese Differenzierung durch *ALOG* lässt sich dahingehend interpretieren, dass *PERC* und *CG1H* vergleichsweise grossen Einfluss auf das Verhalten des Grundwasserabflusses zu haben.
- Kaum erkennbare Sensitivität weisen in dieser Analyse *K0H*, *K1H*, *K2H* und *SLZIMAX* sowie *T0* auf. Die allenfalls vorliegenden Differenzierungen (bei *K0H* und *K1H* noch zu erahnen) konnten auch durch spezifisch auf das Monte-Carlo-Sampling abgestimmte Auswertungsverfahren (siehe z. B. WAGENER UND WHEATER, 2006) nicht näher bestimmt werden. Wie schon in Kapitel 5.3.2 gesehen, weisen die Parameter des Abflussbildungsmoduls eine relevante gegenseitige Korrelation auf. Auch wenn die dort gefundenen Korrelationsgruppen *SGR-K0H-K1H* und *K2H-CG1H-SLZIMAX* nicht ganz exakt mit den hier besprochenen Sensitivitätsgruppen übereinstimmen, kann doch gefolgert werden, dass die Parameter wegen ihrer gegenseitigen Korrelation relativ unsensitiv erscheinen. Setzt man einen dieser Parameter auf einen beliebigen Wert innerhalb des erlaubten Kalibrierungsbereichs fest, lassen sich mit Hilfe geeigneter Werte für die anderen Parameter immer gute Resultate erzielen. Im Einzelnen können also kaum Bereiche optimaler Parameterwerte identifiziert werden, sehr wohl wichtig ist aber das Zusammenspiel der aufeinander abgestimmten Parameter in einem gebietsspezifischen Parametersatz.

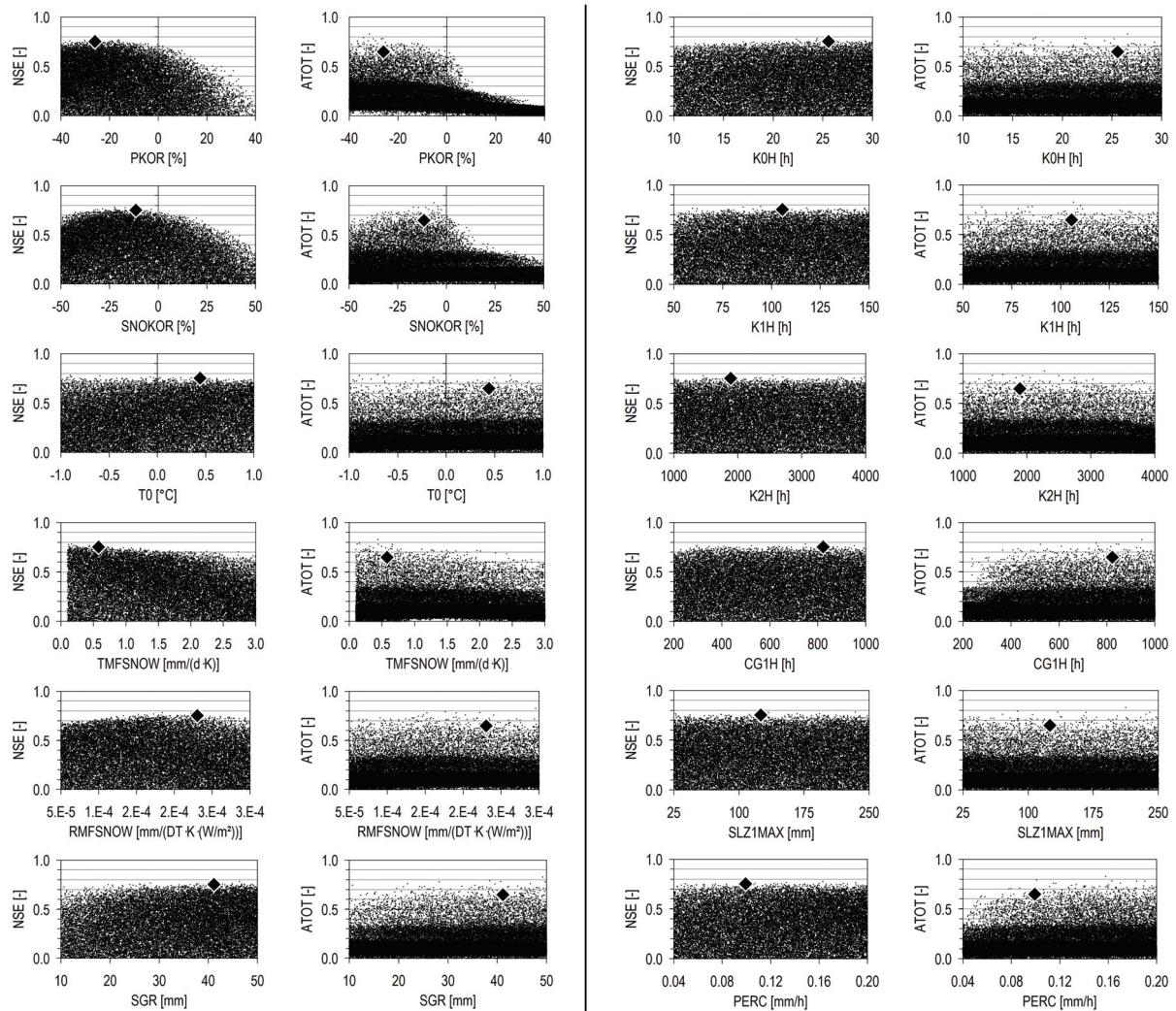


Figure 6.2: Nash-Sutcliffe-Efficiencies (NSE) and PREVAH total scores (ATOT) for 50'000 randomly generated sets of the 12 free model parameters (Monte Carlo simulation); test catchment Allenbach–Adelboden, simulation period 1994–1997. The diamond signature denotes the value which was found using standard calibration 1994–1997.

Abbildung 6.2: Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) und PREVAH-Gesamtgütemasse (ATOT) für 50'000 zufällig erzeugte Sätze der 12 freien Modellparameter (Monte-Carlo-Methode); Testgebiet Allenbach–Adelboden, Simulationszeitraum 1994–1997. Die Rautensignatur bezeichnet den in der Mittelwasserkalibrierung 1994–1997 bestimmten Wert.

Vergleich mit der Mittelwasserkalibrierung

Für alle untersuchten Parameter kann festgehalten werden, dass die mit der Mittelwasserkalibrierung (caIMQ) für die Periode 1994–1997 ermittelten Werte – dargestellt durch Rautensignaturen in **Abbildung 6.2** – meist im Bereich der besten Monte-Carlo-Ergebnisse liegen. Vergleicht man die Nash-Sutcliffe-Effizienz der kalibrierten Version mit denjenigen der Monte-Carlo-Analysen, so liegt die automatische Kalibrierung mit $NSE = 0.75$ an 13. Stelle von 50'000 untersuchten Parametersätzen, hat also die obersten 0.3% der Monte-Carlo-Resultate erreicht. Bei wesentlich geringerem Rechenaufwand – für eine Mittelwasserkalibrierung zwischen ca. 200 und 400 Modellläufen (vgl. **Tabelle 5.2**) – lassen sich also mit der in Kapitel 3 vorgestellten Kalibrierungsmethode sehr gute Ergebnisse erzielen.

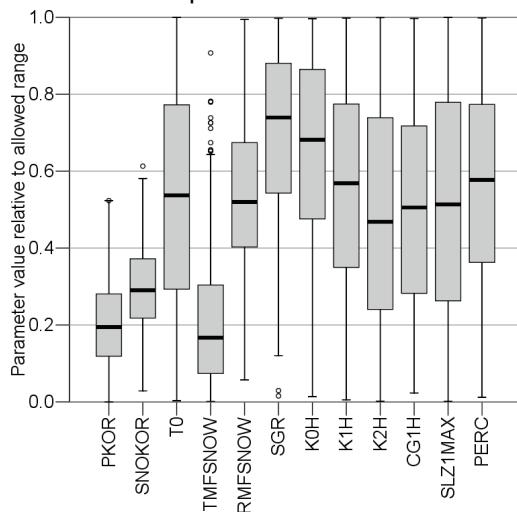
Weiter konnte gezeigt werden, dass die PREVAH-internen Gütemasse (siehe Kapitel 3.2.1) wichtige Zusatzinformationen liefern, insbesondere wenn die in vielen Studien als einziges Mass betrachtete Nash-Sutcliffe-Effizienz keine oder nur eine ungenügende Unterscheidung der Resultate bringt. Das Gesamtgütemass $ATOT$ hat also eine grosse Differenzierungskraft bewiesen; genau aus diesem Grund wären in der hier vorgenommenen Monte-Carlo-Untersuchung allerdings noch mehr Mo-

delläufe nötig gewesen, um auch bei *ATOT* den Bereich guter Resultate besser abzudecken. Wegen der methodisch bedingten Ineffizienz der Monte-Carlo-Methode wurde aber darauf verzichtet.

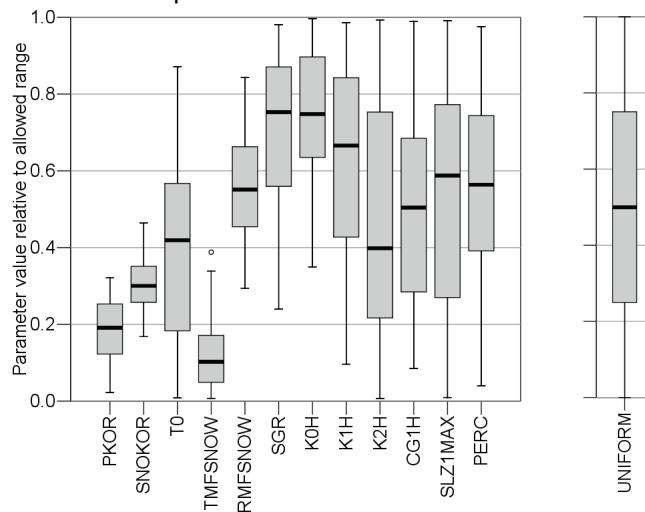
Vertiefte Analyse Parametersensitivität

Die obigen Einschätzungen der Parametersensitivität erfolgten subjektiv aufgrund der in **Abbildung 6.2** dargestellten Muster. Wegen der zum Teil recht gleichförmigen Verteilung der Punktwolken (Modellgüten) gestaltete sich die Interpretation etwas schwierig. Für eine objektivere Einordnung der Sensitivität sollen im Folgenden zwei vertiefende Analysen entwickelt werden. Sie basieren auf einer Auswahl der gemäss Nash-Sutcliffe-Effizienz besten Parametersätze; betrachtet wurden die besten 501 (1%) sowie die besten 51 (1%) erzeugten Parameterkombinationen. Die letztere Auswahl von nur 1% soll eine bessere Differenzierung der Ergebnisse bringen, ist aber wegen ihres geringeren Umfangs etwas weniger repräsentativ.

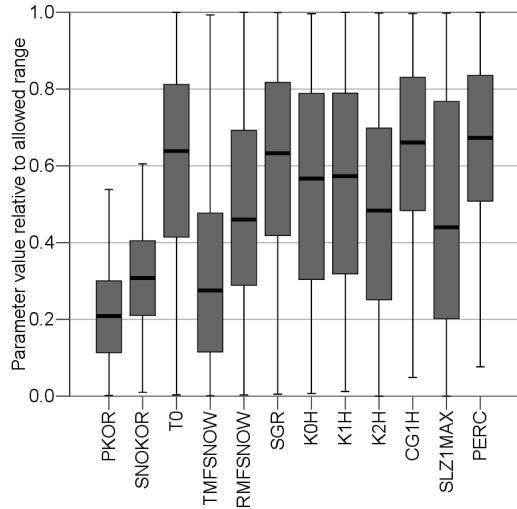
A1. 501 best parameter sets as to NSE



A2. 51 best parameter sets as to NSE



B1. 501 best parameter sets as to ATOT



B2. 51 best parameter sets as to ATOT

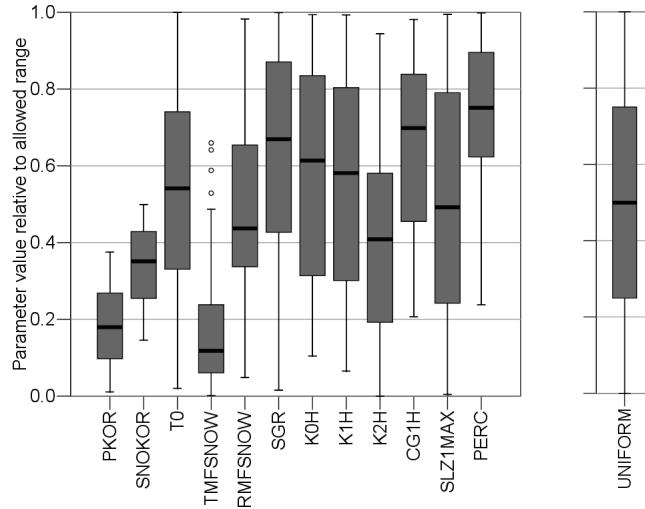


Figure 6.3: Value range of best 501 (1.) and 51 (2.) Monte Carlo parameter sets with respect to efficiency scores NSE (A.) and ATOT (B.). The theoretical result of a uniformly distributed (totally insensitive) parameter is indicated at the far right.

Abbildung 6.3: Wertebereich der jeweils besten 501 (1.) resp. 51 (2.) Parametersätze der Monte-Carlo-Untersuchung; die Auswahl basiert auf den Gütemassen NSE (A.) und ATOT (B.). Das theoretische Ergebnis eines gleichförmig verteilten (völlig insensitiven) Parameters ist am rechten Rand angegeben.

Für die erste Analyse zeigt **Abbildung 6.3** die Parameterwerte der bezüglich Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) besten 501 ($0.69 < NSE \leq 0.78$) respektive 51 ($0.74 < NSE \leq 0.78$) Parametersätze; die Parameterwerte wurden zwecks Vergleichbarkeit auf den in der Monte-Carlo-Analyse untersuchten Parameterbereich (also auf die Grenzen der Kalibrierung) normiert. Nimmt nun ein Parameter in dieser Betrachtung einen geringen Wertebereich ein, weist dies auf das Vorhandensein von Sensitivität hin, da dann nur in diesem engen Bereich gute Resultate erzielt werden können. Bei volliger Insensitivität – also quasi zufälliger Verteilung der Parameterwerte – wären ein Median von 0.5, Quartile von 0.25 und 0.75 sowie eine Spannweite von -1 bis 1 zu erwarten (siehe **Abbildung 6.3**, rechter Rand).

Die Interpretation von **Abbildung 6.3** bestätigt grösstenteils die oben durch subjektive Betrachtung vorgenommene Bewertung der Parametersensitivitäten: *PKOR* und *SNOKOR* sind gut definiert, ebenso wie *TMFSNOW*, welches hier etwas sensitiver erscheint als oben eingeschätzt. Die Unterscheidung zwischen noch feststellbar sensitiven (*RMFSNOW*, *SGR*) und kaum sensitiven Parametern (*T0*, *K1H*, *K2H*, *CG1H*, *SLZIMAX*, *PERC*) ist anhand von nur 51 besten Parametersätzen (**Abbildung 6.3**, A2.) etwas klarer als bei 501 besten Parametersätzen (**Abbildung 6.3**, A1.); in der kleineren Auswahl lässt sich zusätzlich eine gewisse Sensitivität in *K0H* erkennen.

Verwendet man zur Selektion der besten 501 respektive 51 Parameterkombinationen nicht NSE , sondern $ATOT$, fallen die Resultate ähnlich aus. Wie aus der obigen Analyse (vgl. **Abbildung 6.2**) zu erwarten, lässt sich bei *PERC* und *CG1H* aber eine etwas deutlichere Sensitivität erkennen. Im Gegenzug sind die Sensitivitäten bei *T0*, *TMFSNOW* und *SGR* weniger klar – vermutlich, weil diese Parameter stärker auf den Bereich überdurchschnittlich grosser Abflüsse einwirken, welcher von NSE besser erfasst wird als von $ATOT$.

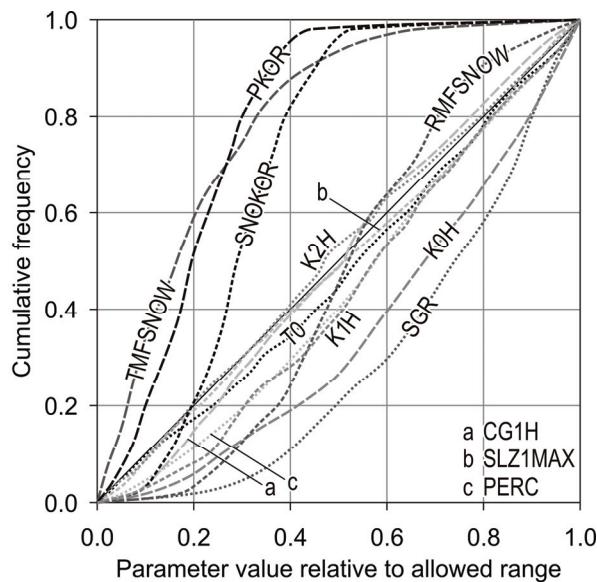


Figure 6.4: Cumulative frequency of parameter values relative to allowed parameter range for 501 best Monte Carlo simulation parameter sets according to Nash-Sutcliffe-Efficiency.

Abbildung 6.4: Kumulative Häufigkeit der Parameterwerte über den normierten Parameterraum für die 501 gemäss Nash-Sutcliffe-Effizienz besten Monte-Carlo-Parametersätze.

Die zweite Analyse lehnt sich an die Arbeit von WAGENER ET AL. (2001) an (siehe auch SPEAR UND HORNBERGER, 1980). Dabei wird die Verteilungscharakteristik der einzelnen Parameter über den erlaubten Parameterraum betrachtet – genauer gesagt die kumulative Häufigkeit der Parameterwerte (**Abbildung 6.4**). Um einen Vergleich aller Parameter zu ermöglichen, wurden die Werte wiederum auf den jeweils erlaubten Bereich (Kalibrierungsgrenzen) normiert. Je stärker sensitiv ein Parameter nun ist und je deutlicher sich ein Optimum identifizieren lässt, desto stärker weicht seine Verteilungskurve von der diagonalen 1:1 Linie ab, welche völlige Gleichverteilung repräsentiert. Um die Prägnanz der Resultate zu erhöhen, wurden wiederum nur die gemäss Nash-Sutcliffe-Effizienz besten 501 Parametersätze betrachtet; bei der Berücksichtigung aller 50'000 Parameterkombinationen überdecken die vielen schlechten Resultate allenfalls vorhandene Sensitivitäten.

Die visuelle Interpretation von **Abbildung 6.4** identifiziert deutliche Sensitivitäten in *PKOR*, *TMFSNOW*, *SNOKOR* sowie noch gut erkennbare in *RMFSNOW*, *SGR* und *K0H*. Wenig bis kaum sensitiv sind *K1H*, *PERC*, *CG1H*, *T0*, *K2H* sowie *SLZIMAX*. Zur Quantifizierung dieser Analyse kann wie von WAGENER ET AL. (2001) vorgeschlagen die Steigung der Kurven verwendet werden: Je steiler die kumulative Häufigkeit eines Parameters in einem beliebigen Teil des Wertebereichs ansteigt, desto grösser ist seine Sensitivität. Um eine gewisse Glättung zu erreichen, wurde für jeden Datenpunkt jeweils die Steigung über ein Intervall von 50 Werten betrachtet. **Tabelle 6.1** führt die so gefundenen maximalen Steigungen auf, welche die Sensitivität der Parameter nun quantifizieren; ein völlig insensitiver Parameter

hätte eine monotone Steigung von 1. Die Ergebnisse bestätigen die subjektive Bewertung, auch wenn *SNOKOR* hier geringfügig sensitiver eingestuft wird als *PKOR*. Da die maximale gefundene Steigung bis zu einem gewissen Grad vom Ausmass der verwendeten Glättung abhängt, sollten die Werte vor allem zur Bewertung der relativen Unterschiede verwendet werden.

Parameter	Maximum gradient	Parameter	Maximum gradient
<i>SNOKOR</i>	4.9	<i>CGIH</i>	1.7
<i>PKOR</i>	4.6	<i>KIH</i>	1.7
<i>TMFSNOW</i>	4.4	<i>SLZIMAX</i>	1.5
<i>SGR</i>	3.2	<i>PERC</i>	1.5
<i>RMFSNOW</i>	2.6	<i>K2H</i>	1.4
<i>KOH</i>	2.1	<i>T0</i>	1.4

Table 6.1: Maximum gradient for free model parameters in curve of cumulative frequency (**Figure 6.4**).

Tabelle 6.1: Maximale Steigung der freien Modellparameter in der Summenhäufigkeitskurve (**Abbildung 6.4**).

6.3.3 Erweiterung der Untersuchung

In den obigen Ausführungen wurde deutlich, dass die Bilanzkorrekturfaktoren für den Niederschlag (*PKOR* und *SNOKOR*) im Gebiet Allenbach–Adelboden ausschlaggebend für die Modellgüte sind; die Sensitivität der anderen freien Modellparameter könnte so überdeckt worden sein. So betrachtet scheint die Wahl des Einzugsgebietes Allenbach–Adelboden für eine Analyse aller Modellparameter ungünstig, da der Niederschlag das Abflussgeschehen noch stärker als erwartet dominiert. Dass die meisten der untersuchten Parameter kaum Sensitivität zeigen, wurde allerdings auch schon in anderen Studien mit Monte-Carlo-Sampling der Parameter beobachtet (z. B. CAMERON ET AL., 2000c). Um dieses Problem anzugehen, werden im Folgenden zwei Erweiterungen der Monte-Carlo-Analysen vorgestellt; sie basieren auf jeweils noch 10'000 zufällig erstellten Parametersätzen.

Als erstes wurde das Gebiet Allenbach–Adelboden mit festgesetzten Werten für *PKOR* und *SNOKOR* nochmals untersucht. Die beiden Bilanzkorrekturfaktoren wurden dabei auf 0 gesetzt; als Alternative könnten auch die in der Kalibrierung gefundenen Werte verwendet werden; im vorliegenden Fall sind daraus aber keine allzu grossen Unterschiede zu erwarten, da sowohl die Nullwerte wie auch die kalibrierten Werte gute Ergebnisse erzielen. Die verbleibenden freien Modellparameter wurden wiederum zufällig innerhalb des Kalibrierungsbereichs gewählt. Die Idee hinter dieser Untersuchung ist, den Einfluss von *PKOR* und *SNOKOR* auf die Resultate der anderen Parameter auszuschalten und Sensitivitäten aufzudecken, welche durch die Dominanz der Bilanzkorrekturfaktoren zuvor eventuell maskiert wurden. Die Ergebnisse (**Abbildung 6.5**) zeigen aber, dass dies nicht gelang: Keiner der restlichen Parameter zeigt eine deutlichere Sensitivität. Dies muss dahingehend interpretiert werden, dass bei den verbleibenden zehn freien Modellparametern immer noch keine eindeutig "besten" Werte identifiziert werden können, weil das Zusammenspiel der einzelnen Parameter nach wie vor sehr viele funktionelle Kombinationen erlaubt.

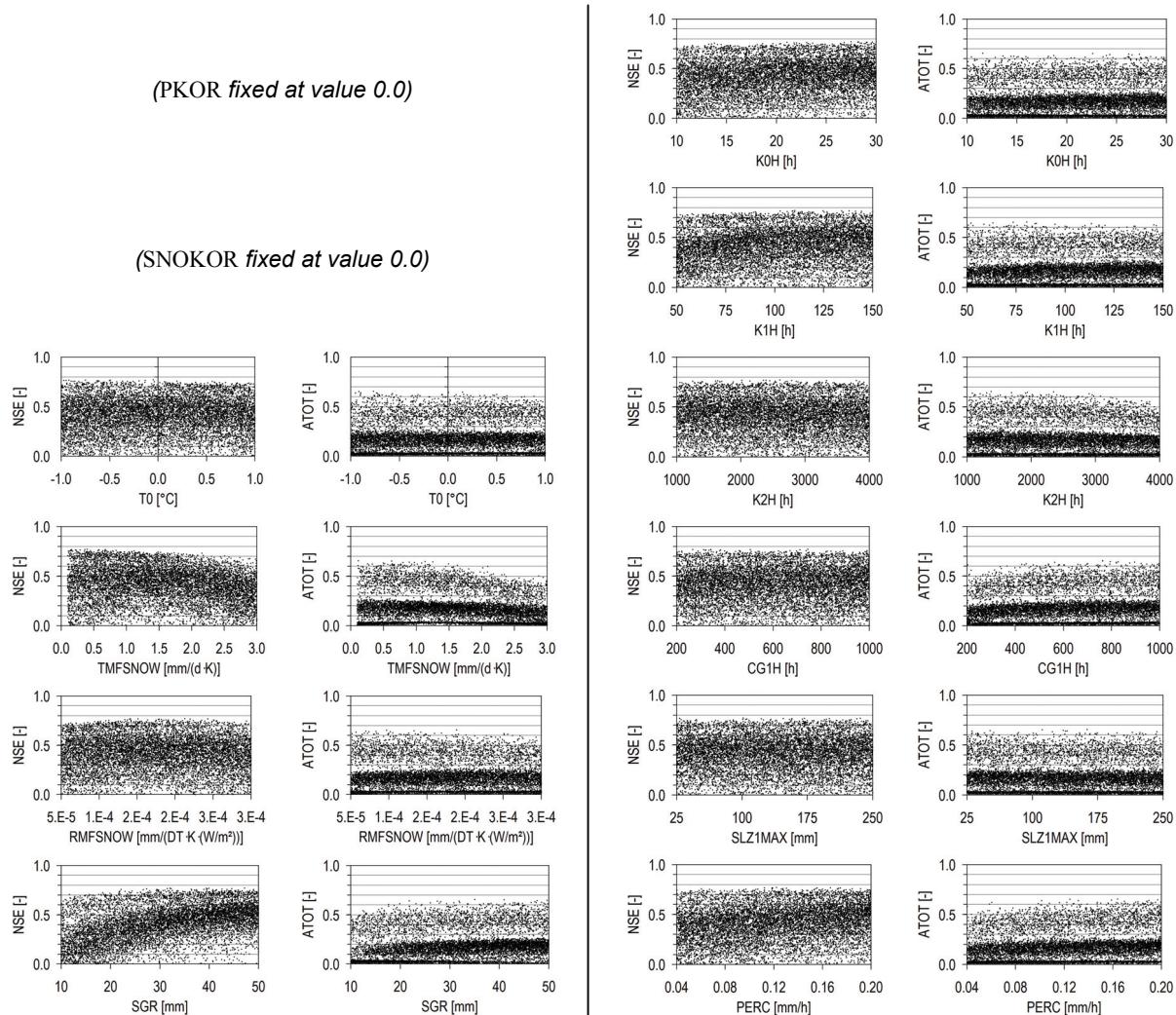


Figure 6.5: Nash-Sutcliffe-Efficiencies (NSE) and PREVAH total scores (ATOT) for 10'000 randomly generated sets of 10 free model parameters (Monte Carlo simulation); parameters PKOR and SNOKOR have been fixed at value 0.0. Test catchment Allenbach–Adelboden, simulation period 1994–1997.

Abbildung 6.5: Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) und PREVAH-Gesamtgütemasse (ATOT) für 10'000 zufällig erzeugte Sätze von 10 freien Modellparametern (Monte-Carlo-Methode); die Parameter PKOR und SNOKOR wurden auf den Fixwert 0.0 gesetzt. Testgebiet Allenbach–Adelboden, Simulationszeitraum 1994–1997.

Als zweites wurde die ursprüngliche Untersuchungsmethodik auf die Emme bei Emmenmatt angewendet. Das Gebiet weist mit dem Typ nivo-pluvial préalpin ein ähnliches Regime auf wie der Allenbach, ist aber mit einer Fläche von 443 km^2 deutlich grösser. Damit soll ermittelt werden, ob die beim Allenbach beobachtete Dominanz von *PKOR* und *SNOKOR* auf die geringe Gebietsgrösse und auf die ausgeprägte Reaktion auf Niederschläge zurückzuführen sein könnte. Die Wertespanne von *PKOR* wurde auf dem in der Kalibrierung verwendeten Bereich von -30% bis +30% belassen, um – in Erwartung eines starken Einflusses von *PKOR* auf die Modellgüte – die Streuung in den Ergebnissen für die anderen Parameter etwas zu reduzieren. Die Resultate (**Abbildung 6.6**) sind grundsätzlich mit denjenigen des Allenbachs vergleichbar, es sind aber zwei Unterschiede festzustellen:

- Erstens hat *PKOR* zwar ebenfalls die am deutlichsten ausgeprägte Sensitivität, im Bereich mit den besten Ergebnissen (ca. -25% bis -15%) sind aber kaum Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) von weniger als 0.4 zu verzeichnen. Beim Allenbach waren hingegen auch im Bereich der optimalen Einstellungen von *PKOR* sehr schlechte Effizienzen zu verzeichnen, häufig sogar mit $NSE < 0$. Bezuglich *ATOT* zeigt *PKOR* ein sehr deutlichen Bereich bester Resultate, welcher vor allem dank des Teilgütemasses zum Bilanzfehler (*AVOL*) gut differenziert wird.

- Zweitens ist im Bereich der Schneedecke (*TMFSNOW*, *RMFSNOW*, aber auch *SNOKOR*) eine geringere Sensitivität festzustellen. Dies dürfte dadurch bedingt sein, dass Schneedeckenaufbau und Schneeschmelze hier etwas weniger Einfluss auf das Abflussgeschehen haben (vgl. Regimetypen und mittlere Gebietshöhen); folglich haben die entsprechenden Parameter für die Güte der Simulation eine etwas geringere Bedeutung.

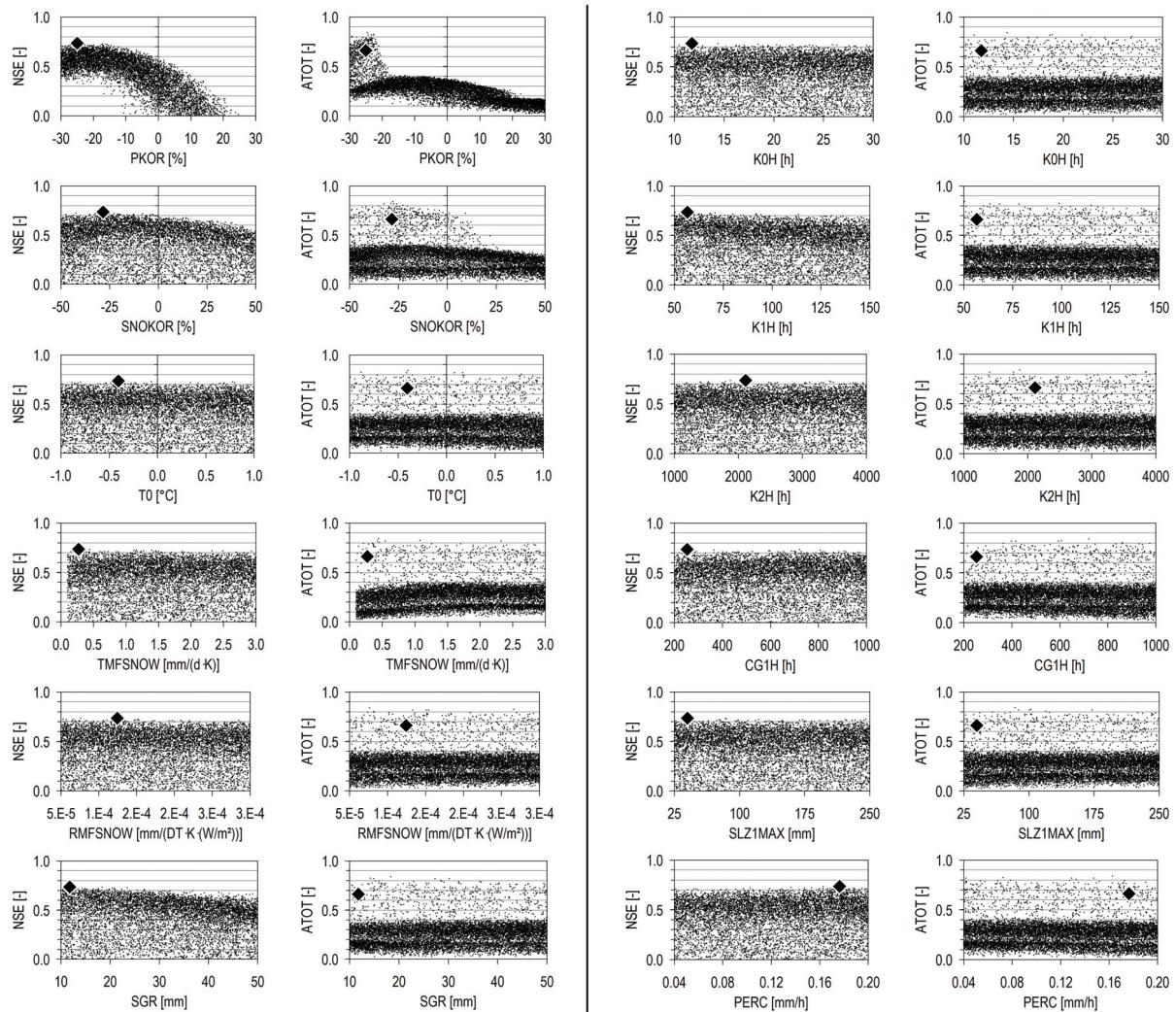


Figure 6.6: Nash-Sutcliffe-Efficiencies (NSE) and PREVAH total scores (ATOT) for 10'000 randomly generated sets of 12 free model parameters (Monte Carlo simulation); test catchment Emme–Emmenmatt, simulation period 1994–1997.

Abbildung 6.6: Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) und PREVAH-Gesamtgütemasse (ATOT) für 10'000 zufällig erzeugte Sätze von 12 freien Modellparametern (Monte-Carlo-Methode); Testgebiet Emme–Emmenmatt, Simulationszeitraum 1994–1997.

6.3.4 Fazit

Ein grosser Nachteil der Monte-Carlo-Methodik liegt sicherlich darin, dass ein bedeutender Teil der untersuchten Parametersätze nur schlechte oder sogar sehr schlechte Resultate erzielt. Im Testgebiet Allenbach–Adelboden erreichten beispielsweise lediglich 49% der zufällig erzeugten Parametersätze eine Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) von über 0 und sogar nur 12% eine von über 0.5. Die Methode ist also sehr ineffizient, weil ein grosser Teil des Rechenaufwandes für unrealistische Parameterkombinationen eingesetzt wird. Dieses Problem wird umso grösser, je mehr Parameter gleichzeitig untersucht werden. Wenn der ausschlaggebende Parameter *PKOR* hier auf Null festgesetzt wird, ist *NSE* in 94% der Fälle immerhin grösser 0 und in 33% der Fälle grösser 0.5. Die Resultate des zweiten Test-

gebiets Emme–Emmenmatt weisen allerdings darauf hin, dass mit Allenbach–Adelboden ein extremes Beispiel untersucht wurde.

Eine weniger aufwendige Möglichkeit zur Untersuchung der Parametersensitivität wäre, nur jeweils einen Parameter systematisch zu variieren, wie dies SCHWANBECK (2004) durchgeführt hat. Dabei muss allerdings von einem kalibrierten Parametersatz ausgegangen werden, welcher wie oben gesehen immer nur eine von vielen Möglichkeiten einer funktionellen Parameterkombination darstellt; die Resultate der Sensitivitätsuntersuchung könnten dadurch beeinflusst werden. Die Schlussfolgerungen von SCHWANBECK (2004) sind allerdings denen der vorliegenden Arbeit ähnlich: *PKOR* und *SNOKOR* weisen generell die stärkste Sensitivität auf und beeinflussen die Resultate somit massgeblich.

Die hier sehr umfassend erfolgte Untersuchung des Parameterraums für das Gebiet Allenbach–Adelboden hat einen vertieften Einblick in das Zusammenspiel der freien Modellparameter vermittelt. Das in Kapitel 3.1.1 angesprochene Problem der "equifinality" (BEVEN UND BINLEY, 1992) wird dabei sehr deutlich sichtbar: Für die meisten freien Modellparameter lassen sich keine eindeutigen Bereiche identifizieren, in welchen die besten Ergebnisse resultieren; auch das Eliminieren der beiden sehr dominanten Einflussfaktoren *PKOR* und *SNOKOR* brachte diesbezüglich keine bedeutende Veränderung. Entscheidend ist das Zusammenspiel der Parameter in einem auf das jeweilige Einzugsgebiet abgestimmten Satz. Das Problem der vielen funktionellen Parameterkombinationen tritt auch bei Modellen mit geringerer Anzahl Parameter auf, wie LAMB (1999) – ebenfalls mit Monte-Carlo-Experimenten – anhand eines Modells mit fünf Parametern zeigte. Welche Konsequenzen daraus für Kalibrierung und Regionalisierung gezogen werden müssen, wird in Abschnitt 6.6 noch zu besprechen sein.

6.4 Untersuchung der Parameterunsicherheit anhand verschiedener Kalibrierungszeiträume

6.4.1 Methodik

Ausgehend von den nun ermittelten Sensitivitäten soll im Folgenden genauer bestimmt werden, mit welchem Mass an Unsicherheit bei der Bestimmung der freien Modellparameter zu rechnen ist. Die Parameter von PREVAH werden dazu gesondert für die unabhängigen Zeiträume 1984–1987 und 1994–1997 kalibriert und anschliessend verglichen. Dabei wird die Mittelwasserkalibrierung verwendet (vgl. Kapitel 3), um die Vergleichbarkeit mit anderen Studien sicherzustellen. Die Untersuchung erfolgt für die 49 Einzugsgebiete der Priorität A, wobei anschliessend sowohl auf die einzelnen Parameter wie auch auf die einzelnen Gebiete bezogene Auswertungen möglich sind; die Parameter der Eisschmelze werden wegen zu geringer Abstützung mit kalibrierten Gebieten nicht betrachtet.

Falls sich die Parameterwerte der beiden Kalibrierungszeiträume nun nur wenig unterscheiden, kann davon ausgegangen werden, dass die Kalibrierung lediglich zu geringen Unsicherheiten führt und die einzelnen Parameter eindeutige, gebietsspezifische Eigenschaften repräsentieren; solche sicher bestimmmbaren Parameter können auch als stabil bezeichnet werden, da ihre Werte vergleichsweise schwach von den in der Kalibrierung eingesetzten Daten abhängen. MERZ (2002) merkt an, dass diese Art von 2-Perioden-Kalibrierung einen strengeren Test darstellt als eine Monte-Carlo-Analyse, da neben der Unsicherheit der Parameterwahl auch noch Stationarität und Qualität der Eingangsdaten bewertet werden.

6.4.2 Resultate für die Modellparameter

Die erste Analyse befasst sich mit der Stabilität der einzelnen Parameter: Dazu zeigt **Abbildung 6.7** den Vergleich der auf 1984–1987 und auf 1994–1997 kalibrierten Parameterwerte (Mittelwasserkalibrierung) sowie die zugehörigen Korrelationskoeffizienten r_{xy} . Je näher die Punktwolke bei der 1:1-Linie liegt, desto sicherer ist der entsprechende Parameter zu bestimmen. Eine detaillierte graphische Darstellung aller Parameterwerte findet sich in Anhang C.

Wie aufgrund der Dominanz bei der Sensitivitätsanalyse zu erwarten, zeigt *PKOR* die deutlichste Übereinstimmung ($r_{xy} = 0.76$) und somit die geringste Unsicherheit. Ebenfalls recht hohe Korrelationen ($r_{xy} > 0.50$) bestehen bei *SGR*, *PERC*, *SNOKOR* und *K0H*, wobei bei *SGR* und *K0H* einige sehr starke Abweichungen festzustellen sind. Die weiteren Parameter des Abflussbildungsmoduls (*K1H*, *K2H* und *CGIH*) weisen zunehmend schwächere Korrelationen auf, ebenso wie die Parameter der Schneeschmelze (*TMFSNOW*, *T0* und *RMFSNOW*). Am unsichersten ist *SLZIMAX* mit $r_{xy} = 0.05$.

Mit der Arbeit von MERZ UND BLÖSCHL (2004) liegt eine vergleichbare Analyse der Parameterunsicherheit vor, welche auf derselben Methodik von zwei Kalibrierungsperioden basiert – die Autoren wendeten in 459 österreichischen Einzugsgebieten ein HBV-Modell mit 11 freien Parametern an, allerdings in täglicher Auflösung und ohne interne räumliche Differenzierung ("lumped"). In ihrer Untersuchung stellten sie geringere Unsicherheiten fest als die hier gefundenen, auch wenn die gezeigten Werte zum Teil eine recht starke Streuung aufweisen. Die grössten Unsicherheiten identifizierten sie beim Koeffizienten des langsamen Abflusses (vergleichbar mit $K2H$) und einem Routing-Parameter (ohne Äquivalent in der hier verwendeten PREVAH-Konfiguration), die kleinsten bei den Parametern des schnellen Abflusses (vergleichbar mit $K0H$ und $K1H$). Wie die Autoren schon selbst im Vergleich mit weiteren ähnlichen Studien (SEIBERT, 1997; UHLENBROOK ET AL., 1999) feststellten, hängen die Resultate einer solchen Analyse stark von den verwendeten Daten und dem Anwendungsbereich ab – es ist also schwierig, über die jeweils betrachtete Anwendung hinaus Schlussfolgerungen zu ziehen. So ist auch zu erklären, dass die Ergebnisse von MERZ UND BLÖSCHL (2004) und diejenigen der vorliegenden Studie kaum klare Übereinstimmungen zeigen; bei diesem konkreten Vergleich dürften auch die unterschiedlichen Berechnungsintervalle der Modelle (stündlich vs. täglich) eine Rolle spielen.

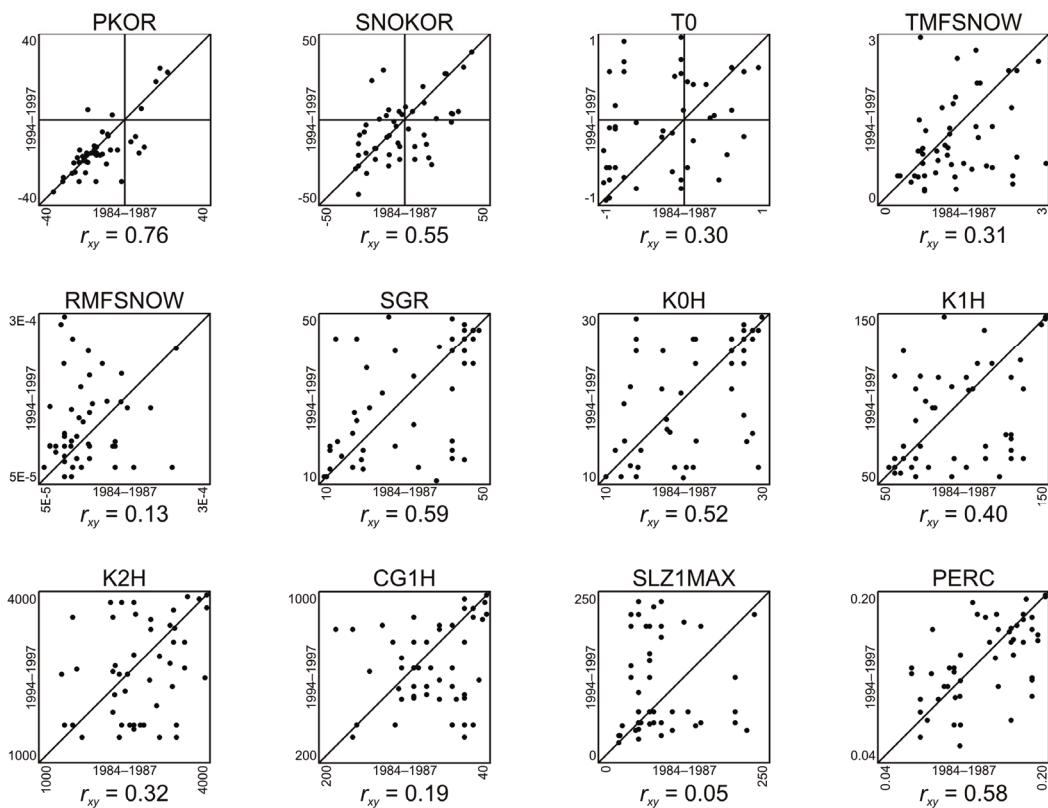


Figure 6.7: Parameter values from standard calibration on periods 1984–1987 and 1994–1997 in comparison, with respective Pearson correlation coefficients (r_{xy}). Calibration based on data from 49 priority A catchments.

Abbildung 6.7: Gegenüberstellung der mit Mittelwasserkalibrierung auf 1984–1987 und 1994–1997 gefundenen Parameterwerte mit zugehörigem Pearson-Korrelationskoeffizienten (r_{xy}). Datengrundlage der Kalibrierung: 49 Einzugsgebiete der Priorität A.

Die mit dem Pearson-Korrelationskoeffizienten etwas abstrakt quantifizierte Unsicherheit lässt sich nun noch besser auf die Modellierung beziehen, indem man die Abweichungen zwischen den mit unterschiedlicher Kalibrierungsperiode gefundenen Parameterwerten (ε) betrachtet. **Abbildung 6.8** zeigt dazu die Verteilung dieser Abweichungen, für jeden Parameter normiert auf den jeweils in der Kalibrierung erlaubten Parameterbereich. Der Medianwert drückt dabei beispielsweise aus, wie gross die Unsicherheit (Abweichung der Parameter aus zwei Kalibrierungsperioden) in der Hälfte der betrachteten Gebiete höchstens ist. Mit einer medianen Abweichung ($\tilde{\varepsilon}$) von 5% erscheint auch hier $PKOR$ als am eindeutigsten definierbar. Etwas unerwartet folgt $K0H$ mit $\tilde{\varepsilon} = 11\%$; der Parameter weist aber eine

sehr grosse Streuung auf. Für die restlichen Parameter bleibt die Hierarchie grösstenteils gewahrt, und für $SLZ1MAX$ wird auch hier die grösste Unsicherheit gefunden ($\tilde{\varepsilon} = 25\%$).

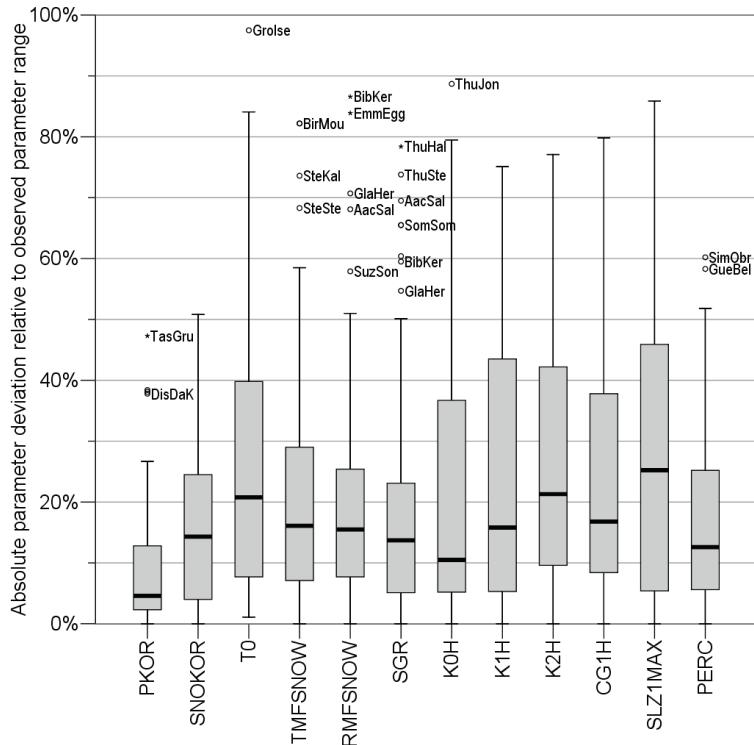


Figure 6.8: Deviation between parameter values calibrated on 1984–1987 and 1994–1997 (absolute values), standardised to the occurring parameter range. Data from 49 priority A catchments.

Abbildung 6.8: Abweichung zwischen den auf 1984–1987 und 1994–1997 kalibrierten Parameterwerten (Absolutwerte), normiert am bei der Modellierung insgesamt auftretenden Parameterbereich. Datengrundlage: 49 Einzugsgebiete der Priorität A.

6.4.3 Resultate für die Einzugsgebiete

Genauso wie die Parameterunsicherheit für jeden Parameter einzeln betrachtet werden kann, kann sie auch zusammenfassend pro Einzugsgebiet analysiert werden – mit Hilfe der schon oben beschriebenen Abweichungen zwischen zwei Kalibrierungsperioden. Hier wird nun jeweils anhand der Werte aller 12 betrachteten Parameter untersucht, welche Einzugsgebiete sichere (stabile) und welche unsichere (instabile) Parametersätze besitzen.

Dazu sind in **Abbildung 6.9** die Unterschiede zwischen den auf 1984–1987 und auf 1994–1997 kalibrierten Parameter pro Gebiet als Boxplot dargestellt. Pro Einzugsgebiet werden die Abweichungen in 12 Parametern relativ zum beobachteten Parameterbereich betrachtet. Die kleinsten medianen Fehler ($\tilde{\varepsilon}$) und somit die sichersten Parametersätze besitzen die Gebiete Langen–Huttwil, Plessur–Chur, Murg–Frauenfeld, Murg–Murgenthal, Mentue–Yvonand, Kander–Hondrich und Lütschine–Gsteig; $\tilde{\varepsilon}$ beträgt hier zwischen 3% und 9%, wobei bei einigen dieser Gebieten eine grösse Streuung der Fehler zu beobachten ist, einzelne Parameter also grösere Unsicherheit besitzen. Die grössten Unsicherheiten sind mit $\tilde{\varepsilon}$ von 30% bis 46% bei Sitter–Appenzell, Hinterrhein– Hinterrhein, Thur–Jon–schwil, Taschinasbach–Grüschi und Aach–Salmsach zu verzeichnen. Die grösste Streuung der Fehler tritt beim Grosstalbach–Isenthal auf, welcher schon in der Mittelwasserkalibrierung Probleme verursachte; dass hier die absolut höchsten Unsicherheiten auftreten, ist deshalb wenig überraschend.

Zwischen $\tilde{\varepsilon}$ und elementaren hydrologischen Kenngrössen wie Gebietsfläche oder mittlere Höhe konnten keinerlei signifikante Korrelationen festgestellt werden. Auch mit der in der Mittelwasserkalibrierung 1994–1997 erreichten Güte (Nash-Sutcliffe-Effizienz) besteht kein signifikanter Zusammenhang – die Parametersätze von Gebieten mit guten Simulationsresultaten sind also nicht weniger unsicher als diejenigen von Gebieten mit geringerer Simulationsgüte. Es muss deshalb provisorisch davon ausgegangen werden, dass die untersuchten Abweichungen entweder zufällig zustande kommen oder durch spezifischere Gebietseigenschaften verursacht werden. Denkbar ist allenfalls, dass der mit der verwendeten Analysemethode gewonnene Unsicherheitsindikator ε weniger Information enthält als erhofft.

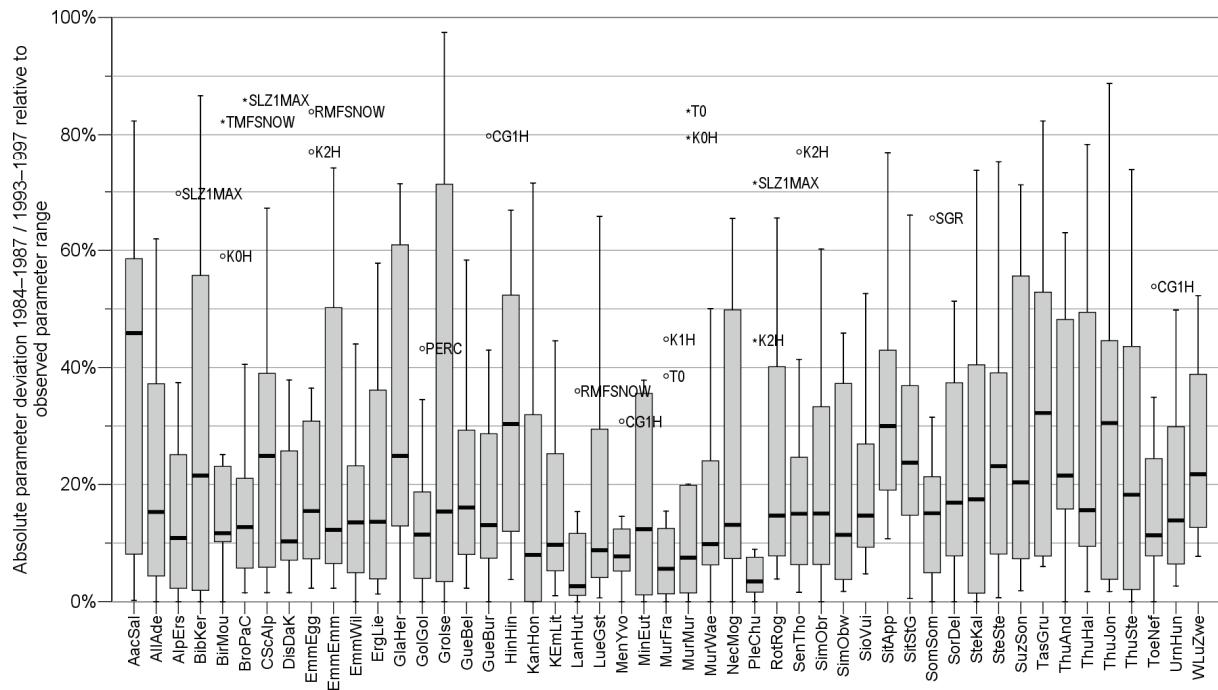


Figure 6.9: Deviation between parameter values calibrated on 1984–1987 and 1994–1997 (absolute values) for 49 priority A catchments, relative to observed parameter range. For each catchment, the 12 free model parameters (without ice melt parameters) have been analysed.

Abbildung 6.9: Abweichung zwischen den auf 1984–1987 und 1994–1997 kalibrierten Parameterwerten (Absolutwerte) für 49 Einzugsgebiete der Priorität A, relativ zum beobachteten Parameterbereich. Pro Gebiet wurden jeweils die 12 freien Modellparameter (ohne Parameter der Eisschmelze) ausgewertet.

Um die Resultate der oben verwendeten Methodik zu überprüfen, wird an dieser Stelle eine zweite Analyse durchgeführt. Sie basiert auf dem Ähnlichkeitsmaß von ANDREWS (1972), welches speziell zur Auswertung mehrdimensionaler Datensätze entwickelt wurde. Dazu werden als erstes die zu untersuchenden Werte x mit Hilfe von Mittelwert (\bar{x}) und Standardabweichung (s_x) normalisiert:

$$x' = \frac{x - \bar{x}}{s_x} \quad \text{Gleichung 6.1}$$

Die Funktion $f_x(t)$ zur Auswertung der n verwendeten Werte x_i berechnet sich dann als

$$f_x(t) = \sqrt{\frac{1}{2}} + x_2' \sin(t) + x_3' \cos(t) + x_4' \sin(2t) + x_5' \cos(2t) + \dots \quad \text{Gleichung 6.2}$$

mit einem Wertebereich von $-\pi < t < \pi$.

Durch graphische Darstellung von f_x und f_y kann die Ähnlichkeit zweier Datensätze x und y nun visuell eingeschätzt werden. Sie ist zudem aber auch mit Hilfe der Fläche zwischen den beiden Kurven objektiv zu beurteilen; dazu wird das Distanzmaß d_A definiert:

$$d_A = \int_{-\pi}^{\pi} |f_x(t) - f_y(t)| dt \quad \text{Gleichung 6.3}$$

Je kleiner d_A , desto ähnlicher sind sich die beiden Kurven f_x und f_y respektive die zugrundeliegenden Datensätze x und y .

Das d_A aller 49 Einzugsgebiete der Priorität A kann nun anhand der $n = 12$ betrachteten Parameter berechnet werden; **Tabelle 6.2** führt die so gefundenen Gebiete mit den ähnlichsten (sichersten) und unähnlichsten (unsichersten) Parametersätzen auf, **Abbildung 6.10** visualisiert die Ähnlichkeit anhand der Funktionen f_x (1984–1987) und f_y (1994–1997) für das ähnlichste und das unähnlichste Gebiet sowie für das Gebiet mit dem medianen Ähnlichkeitsmass.

Table 6.2: Catchments with most similar (certain) and most dissimilar (uncertain) parameter sets as to ANDREWS (1972) distance measure d_A . The median distance is 221.1.

Tabelle 6.2: Gebiete mit den ähnlichsten (sichersten) und unähnlichsten (unsichersten) Parametersätzen gemäss Distanzmass d_A von ANDREWS (1972). Die mediane Distanz beträgt 221.1.

10 most similar parameter sets		10 least similar parameter sets	
Catchment name	d_A	Catchment name	d_A
Kleine Emme–Littau	100.5	Aach–Salmsach	378.5
Murg–Frauenfeld	117.4	Grosstalbach–Isenthal	358.2
Mentue–Yvonand	131.7	Glatt–Herisau	316.0
Goldach–Goldach	140.3	Hinterrhein–Hinterrhein	314.1
Langeten–Huttwil	142.4	Taschinasbach–Grüsch	293.5
Plessur–Chur	143.8	Steinach–Steinach	293.2
Emme–Wiler	148.3	Steinenbach–Kaltenbrunn	282.9
Simme–Oberwil	155.3	Lütschine–Gsteig	273.8
Töss–Neftenbach	158.4	Thur–Jonschwil	272.6
Alpbach–Erstfeld	161.1	Ergolz–Liestal	270.8

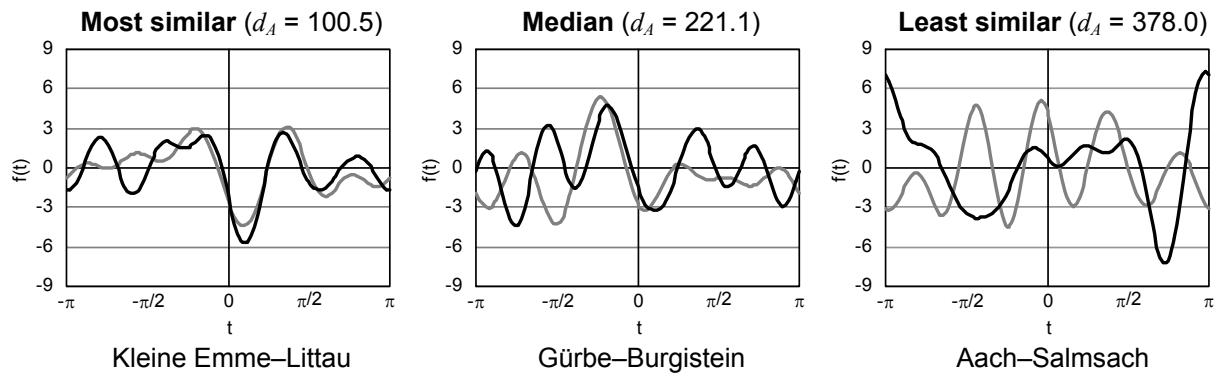


Figure 6.10: Plot of functions f_x (grey; calibration 1984–1987) and f_y (black; calibration 1994–1997) for the catchments with smallest, median and largest ANDREWS (1972) distance measure d_A .

Abbildung 6.10: Plot der Funktionen f_x (grau; Kalibrierung 1984–1987) und f_y (schwarz; Kalibrierung 1994–1997) für die Gebiete mit der kleinsten, der medianen sowie der grössten ANDREWS (1972)-Distanz d_A .

Vergleicht man nun die mit Hilfe der Ähnlichkeit nach ANDREWS (1972) (d_A) gefundene Hierarchie mit derjenigen der Parameterabweichung (ε), besteht bei einem Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten (vgl. Gleichung 4.9) von $r_s = 0.64$ ein gewisses Mass an Übereinstimmung. Von d_A am deutlichsten anders eingeschätzt wird die Lütschine bei Gsteig; ihre mit unterschiedlichen Referenzperioden kalibrierten Parameterwerte sind gemäss $\tilde{\varepsilon}$ sehr ähnlich, gemäss d_A aber sehr unähnlich. In **Abbildung 6.9** ist sichtbar, dass die ε eine relativ grosse Streuung aufweisen, welche im Medianwert $\tilde{\varepsilon}$ nicht erfasst wird, in d_A aber gut zum Tragen kommt; aufgrund seines Aufbaus kann d_A die Ähnlichkeit über alle Parameter hinweg besser bewerten und besitzt somit grössere Aussagekraft als $\tilde{\varepsilon}$.

Lässt sich nun bei der Andrews-Distanz d_A ein Zusammenhang zwischen elementaren Gebietseigenschaften und der Unsicherheit eines Parametersatzes finden? Die entsprechenden Grafiken (**Abbildung 6.11**) lassen auch in diesem Fall kaum auf signifikante Zusammenhänge schliessen. Für

die Gebietsfläche beträgt der Korrelationskoeffizient (r_{xy}) bei einem logarithmischen Regressionsmodell ($y = a + b \cdot \log(x)$) lediglich -0.23; das negative Vorzeichen von r_{xy} zeigt an, dass bei grossen Einzugsgebieten tendenziell etwas geringere Unsicherheiten zu erwarten sind. Zwischen mittlerer Gebietshöhe und d_A kann hingegen keinerlei Zusammenhang erkannt werden ($r_{xy} = 0.04$).

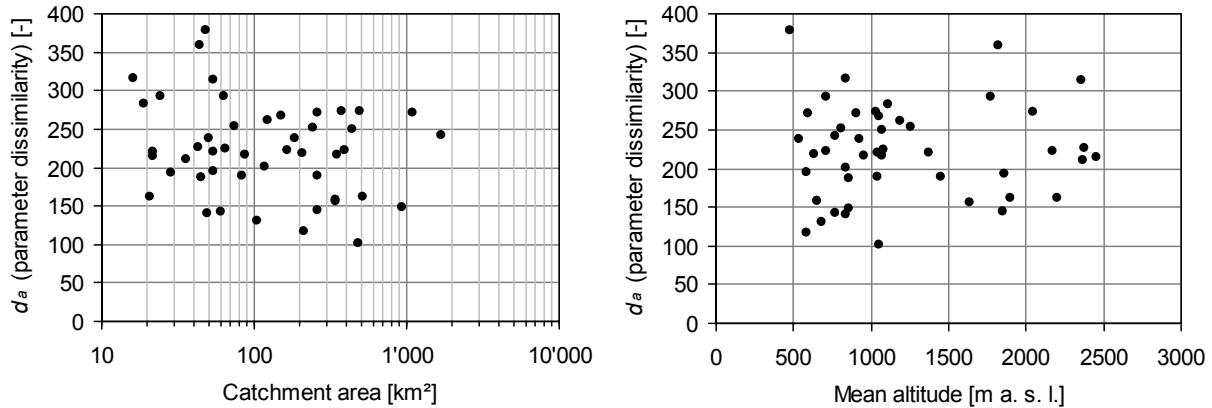


Figure 6.11: Comparison of Andrews-distances d_A with catchment area (left) and with average catchment altitude (right).

Abbildung 6.11: Vergleich der Andrews-Distanzen d_A mit der Gebietsfläche (links) und mit der mittleren Gebietshöhe (rechts).

6.4.4 Eignung der Kalibrierungszeiträume

Da nun für die 49 Einzugsgebiete der Priorität A Simulationen auf Basis von zwei unabhängigen Kalibrierungsperioden 1984–1987 und 1994–1997 vorliegen, kann genauer abgeschätzt werden, ob sich einer der beiden verwendeten Zeiträume besser für die Kalibrierung eignet. In Kapitel 4.3.5 wurde dies bereits kurz untersucht, allerdings anhand eines deutlich weniger umfassenden Datensatzes von nur sechs Testgebieten und mit Fokus auf die Hochwasserkalibrierung.

Table 6.3: Nash-Sutcliffe-Efficiencies (NSE) and mean annual volume deviations (DVOL'_a) for calibration and validation periods of standard calibrations 1984–1987 and 1994–1997 as well as loss from calibration to validation; average from 49 priority A catchments.

Tabelle 6.3: Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) und mittlere jährliche Volumendifferenzen (DVOL'_a) für Kalibrierungs- und Validierungszeitraum der Mittelwasserkalibrierungen auf 1984–1987 und 1994–1997 sowie Verlust von Kalibrierungs- zu Validierungszeitraum; Mittelwert von 49 Einzugsgebieten der Priorität A.

	calMQ(1984–1987)		calMQ(1994–1997)	
	NSE [-]	DVOL' _a [mm a ⁻¹]	NSE [-]	DVOL' _a [mm a ⁻¹]
Calibration period	0.74	0.9	0.74	1.8
Validation period	0.72	24.4	0.73	-21.3
Loss from calibration to validation	-0.02	23.5	-0.01	19.5

Tabelle 6.3 zeigt, dass sich die jeweiligen Durchschnittswerte der in 49 Gebieten erzielten Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) sowie diejenigen der mittleren jährlichen Volumendifferenzen (DVOL') sehr ähnlich sind. Ebenso fallen die Verluste im Übergang von Kalibrierungs- zu Validierungszeitraum bei beiden Kalibrierungen sehr gering aus (NSE: -0.02 für 1984–1987, -0.01 für 1994–1997, DVOL': 23.5 mm a⁻¹ für 1984–1987, 19.5 mm a⁻¹ für 1994–1997). Obwohl der Zeitraum 1994–1997 gegenüber 1984–1997 minim stabilere Resultate aufweist, rechtfertigen diese geringen Unterschiede allein noch keine Auswahl zugunsten einer Variante. Für den Zeitraum 1994–1997 ist aber mit einer besseren

Konsistenz der für den Modellantrieb verwendeten meteorologischen Reihen zu rechnen, da das automatische Messnetz ANETZ in den 1980er Jahren noch im Aufbau begriffen war. Diese Argumentation kann im nachfolgenden Abschnitt 6.5.1 mit weiteren Analysen quantitativ belegt werden – womit der Zeitraum 1994–1997 für die Kalibrierung zu bevorzugen ist. Dass die im Mittel erreichten Güten der zwei unabhängigen Kalibrierungsperioden so ähnlich ausfallen, spricht insgesamt sehr für die Eignung der Kalibrierungsmethode und die Stabilität der damit erzielten Resultate.

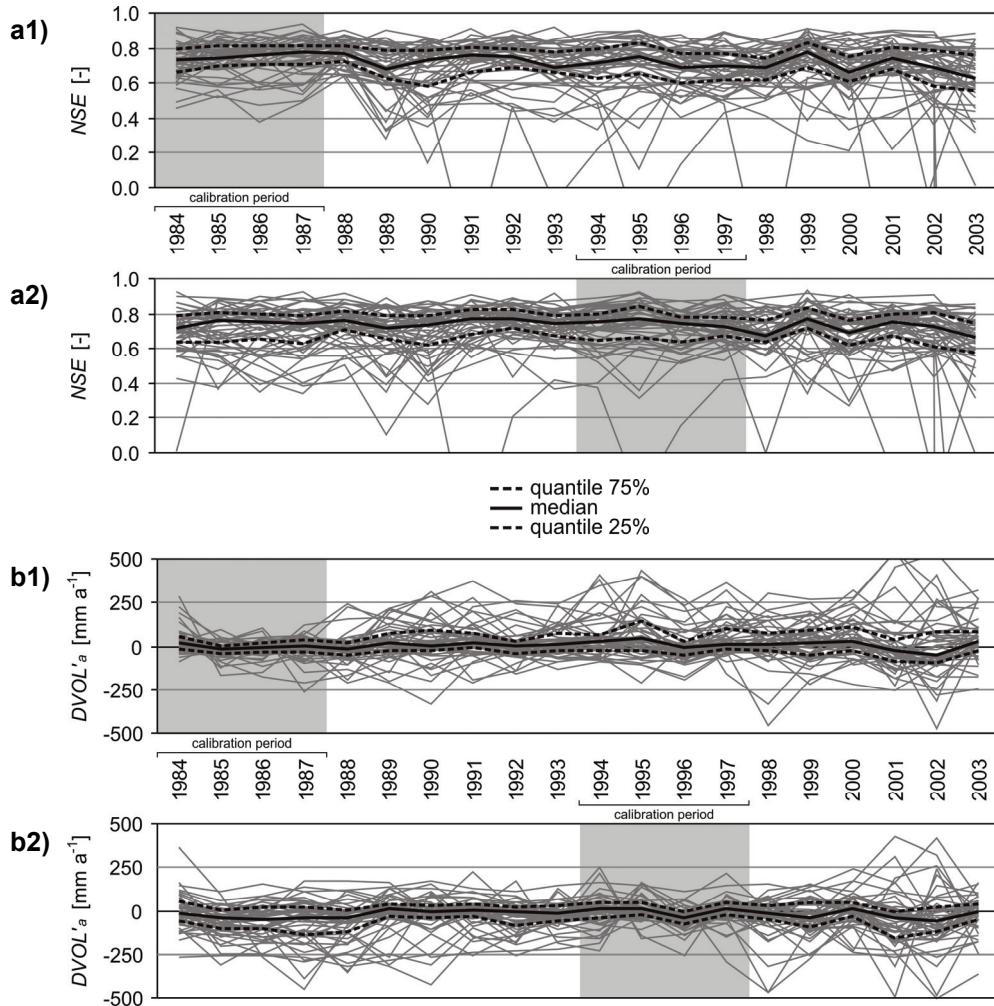


Figure 6.12: Annual Nash-Sutcliffe-Efficiencies (NSE, a) and annual volumetric deviations ($DVOL'_a$, b) for 49 standard calibrated priority A catchments with respective median and quartiles, each using calibration periods 1984–1987 (1) and 1994–1997 (2).

Abbildung 6.12: Jährliche Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE, a) und jährliche Volumenabweichungen ($DVOL'_a$, b) von 49 auf Mittelwasser kalibrierten Einzugsgebieten der Priorität A, inklusive der zugehörigen Mediane und Quartile. Es wurden die Kalibrierungszeiträume 1984–1987 (1) und 1994–1997 (2) verwendet.

Eine genauere Analyse der in den einzelnen Jahren erzielten Modellgüten zeigt **Abbildung 6.12**, wiederum auf Basis der 49 Gebiete der Priorität A mit den zwei Kalibrierungsperioden 1984–1987 (jeweils oben) und 1994–1997 (jeweils unten). Bei den Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE, a) können zwar Unterschiede zwischen den im Einzelnen erreichten Güten ausgemacht werden, die Gesamtmerkmale von Median und Quartilsbereich sind sich jedoch bemerkenswert ähnlich. Bezuglich jährlichen Volumendifferenzen ($DVOL'_a$, b) bestehen leichte Vorteile für die Kalibrierungsperiode 1994–1997; neben den noch zu erläuternden Bedingungen bezüglich des meteorologischen Messnetzes dürfte auch eine Rolle spielen, dass die Periode 1984–1987 am Rande des Simulationszeitraums (1984–2003) liegt und somit in Jahren angewendet wird, welche deutlich weiter von der Eichung entfernt liegen, als dies für die Kalibrierung auf 1994–1997 der Fall ist. Abweichungen aufgrund von mittelfristigen Schwankungen in der Wasserbilanz der Einzugsgebiete treten somit deutlicher zutage. Auch in der Detailbe-

trachtung weist der Kalibrierungszeitraum 1994–1997 somit minime Vorteile auf, diese stellen die methodische Konsistenz der Kalibrierung aber nicht in Frage.

6.5 Anwendung auf die Abflusssimulation

Obwohl nicht als primäres Ziel angestrebt, steht mit den in diesem Kapitel erfolgten Untersuchungen eine umfangreiche Datenmenge zur Verfügung, welche die interessante Möglichkeit eröffnet, Unsicherheiten im simulierten Abfluss eines Gebietes zu quantifizieren. Darauf soll im Folgenden anhand des Allenbachs bei Adelboden eingegangen werden. Einige inhaltliche Überschneidungen mit bereits aufgezeigten Resultaten sind dabei nicht zu vermeiden, es sollte aber beachtet werden, dass sich alle folgenden Analysen auf die konkrete Abflusssimulation in einem einzelnen Gebiet beziehen.

Die Datengrundlage wird wie folgt ausgewertet:

- Um die Auswirkungen der Parameterunsicherheit auf die Modellresultate zu untersuchen, werden aus den 50'000 mit der Monte-Carlo-Methode analysierten Parametersätzen wiederum diejenigen 51 herausgesucht, welche die besten Ergebnisse bezüglich des Gütemasses NSE erzielen. Die in diesem Teildatensatz ausweisbare Unsicherheit betrifft die Wahl eines "besten" Parametersatzes.
- Direkt als Parameterunsicherheit interpretiert werden können die Analysen mit verschiedenen Kalibrierungszeiträumen; diese Unsicherheit bezieht sich auf die Kalibrierungsmethode sowie die dabei verwendeten Inputdaten. Aus den Untersuchungen in Kapitel 4.3.5 stehen für den Allenbach–Adelboden neben 1984–1987 und 1994–1997 auch Kalibrierungen auf die Zeiträume 1989–1992 und 1999–2003 zur Verfügung. Sie werden hier zur Verbesserung der Datengrundlage mit einbezogen, womit vier Parametersätze ausgewertet werden können; diese Parametersätze wurden mit derselben Methode erstellt, basieren aber auf verschiedenen, unabhängigen Kalibrierungsperioden.

6.5.1 Jährlich erreichte Modellgüten

Als erste Möglichkeit können die ermittelten Parameterunsicherheiten dazu verwendet werden, die Konstanz der Simulationsergebnisse über den Anwendungszeitraum hinweg zu beurteilen. Dazu werden in **Abbildung 6.13** die jährlichen Werte der Gütemasse NSE (Nash-Sutcliffe-Effizienz) und $DVOL'_a$ (mittlere jährliche Volumenabweichung) betrachtet.

Bemerkenswert ist als erstes, wie gut die Ergebnisse innerhalb beider vorgenommenen Unsicherheitsanalysen "Monte-Carlo" und "Kalibrierungsperioden" übereinstimmen. Auch der Vergleich der beiden Analysen miteinander zeigt für beide Gütemasse ein widerspruchsfreies Bild. Die sehr schlechten Effizienzen im Jahr 1989 könnten durch eine Inkonsistenz im für die Interpolation verwendeten Datensatz von ANETZ-Stationen verursacht sein – ab Mai dieses Jahres liefert die Station Grimsel-Hospitz Daten, die Station Plaffeien ab Oktober 1989; von den restlichen ANETZ-Stationen sind Daten für die gesamte Simulationsperiode verfügbar. Der reduzierte Datensatz vor 1989 verursacht vermutlich auch die schlechteren und breiter streuenden Effizienzen sowie die grösseren Volumenabweichungen im Zeitraum 1984–1988. Zu erwägen ist aber auch, dass in den einzelnen Jahren unterschiedliche hydrologische Prozessbereiche dominant sind – beispielsweise bei Niedrig- oder Hochwasser –, welche das Modell bei der gegebenen Parametrisierung unter Umständen nicht mit gleicher Qualität simulieren kann. Allerdings zeigen markante Hochwasser- (z. B. 1987, 1999) und Trockenjahre (2003) in dieser Betrachtung keine schlechteren Resultate.

Bei der Monte-Carlo-Analyse (**Abbildung 6.13 a)** fällt auf, dass im für Modellbeurteilung und Auswahl der besten Parametersätze verwendeten Zeitraum 1994–1997 gute und konstante Resultate erreicht werden, insbesondere bezüglich $DVOL'_a$. Gegen einen dominanten Einfluss des Kalibrierungszeitraums auf die Simulationsergebnisse sprechen aber die Simulationen mit verschiedenen Kalibrierungsperioden (**Abbildung 6.13 b)**, denn dort ist dasselbe, relativ eindeutige Muster zu beobachten – auch für die von 1994–1997 abweichenden Kalibrierungszeiträume. Es kann deshalb angenommen werden, dass die Jahre 1994 bis 1997 im vorliegenden Einzugsgebiet wie schon vermutet besonders gute Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Kalibrierung und Simulation bereitstellen; dies dürfte vor allem auf den Modellinput zutreffen.

Es kann festgehalten werden, dass sich für den Allenbach bei Adelboden weder mit anderen Kalibrierungsperioden noch mit der sehr aufwendigen Monte-Carlo-Methode Effizienzen erreichen lassen, welche klar höher sind als diejenigen der in Kapitel 3 eingeführten Mittelwasserkalibrierung. Zumindest für das angesprochene Einzugsgebiet und für das Gütemass NSE zeigt dies, dass die für eine

stabile und plausible Parameterwahl eingegangenen Kompromisse (vgl. Kapitel 3 und 5) nicht übermäßig gross ausfallen.

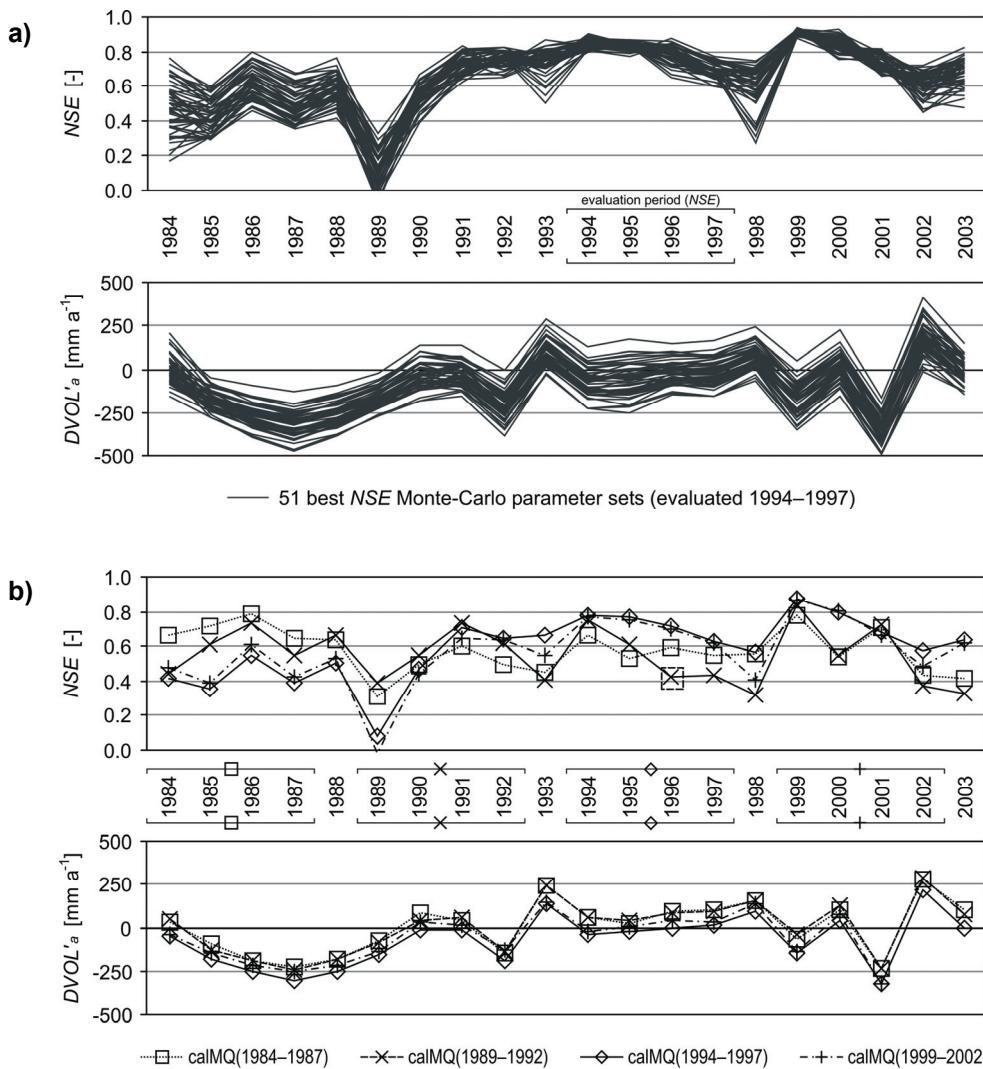


Figure 6.13: Nash-Sutcliffe-Efficiencies (NSE) and mean annual volumetric deviations ($DVOL'_a$) 1984–2003 for Allenbach–Adelboden using a) 51 out of totally 50'000 Monte Carlo parameter sets with best performance according to Nash-Sutcliffe-Efficiency in period 1994–1997 and b) four standard calibrated parameter sets (calibration periods 1984–1987, 1989–1992, 1994–1997 and 1999–2002).

Abbildung 6.13: Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) und mittlere jährliche Volumenabweichungen ($DVOL'_a$) der Jahre 1984–2003 für Allenbach–Adelboden auf Basis der a) 51 im Zeitraum 1994–1997 gemäss NSE besten Parametersätze aus 50'000 Monte-Carlo-Realisierungen sowie mit b) vier auf Mittelwasser kalibrierten Parametersätzen (Kalibrierungszeiträume 1984–1987, 1989–1992, 1994–1997 und 1999–2002).

6.5.2 Aussagekräftige Konfidenzbereiche

Die zweite Auswertungsmöglichkeit für die umfangreichen Daten des Allenbach bei Adelboden betrifft die Simulations- und Extrapolationsresultate: Die Unsicherheiten der Parameterkalibrierung können in den Simulationsergebnissen nun sinnvoll quantifiziert werden. MONTANARI (2007) merkt an, dass aus statistischen Gründen insbesondere die aus Monte-Carlo-Analysen abgeleiteten Vertrauensbereiche nicht als Konfidenzintervalle bezeichnet werden sollten, sondern als Umhüllende von Sensitivitätsanalysen. Der Verständlichkeit halber wird im Folgenden aber einheitlich der Begriff der Konfidenzintervalle verwendet.

Unsicherheit in den Simulationsresultaten

Um einen Konfidenzbereich in den simulierten Abflussganglinien auszuweisen, können die verschiedenen ermittelten Parametersätze direkt zur Simulation verwendet und anschliessend aufgetragen werden.

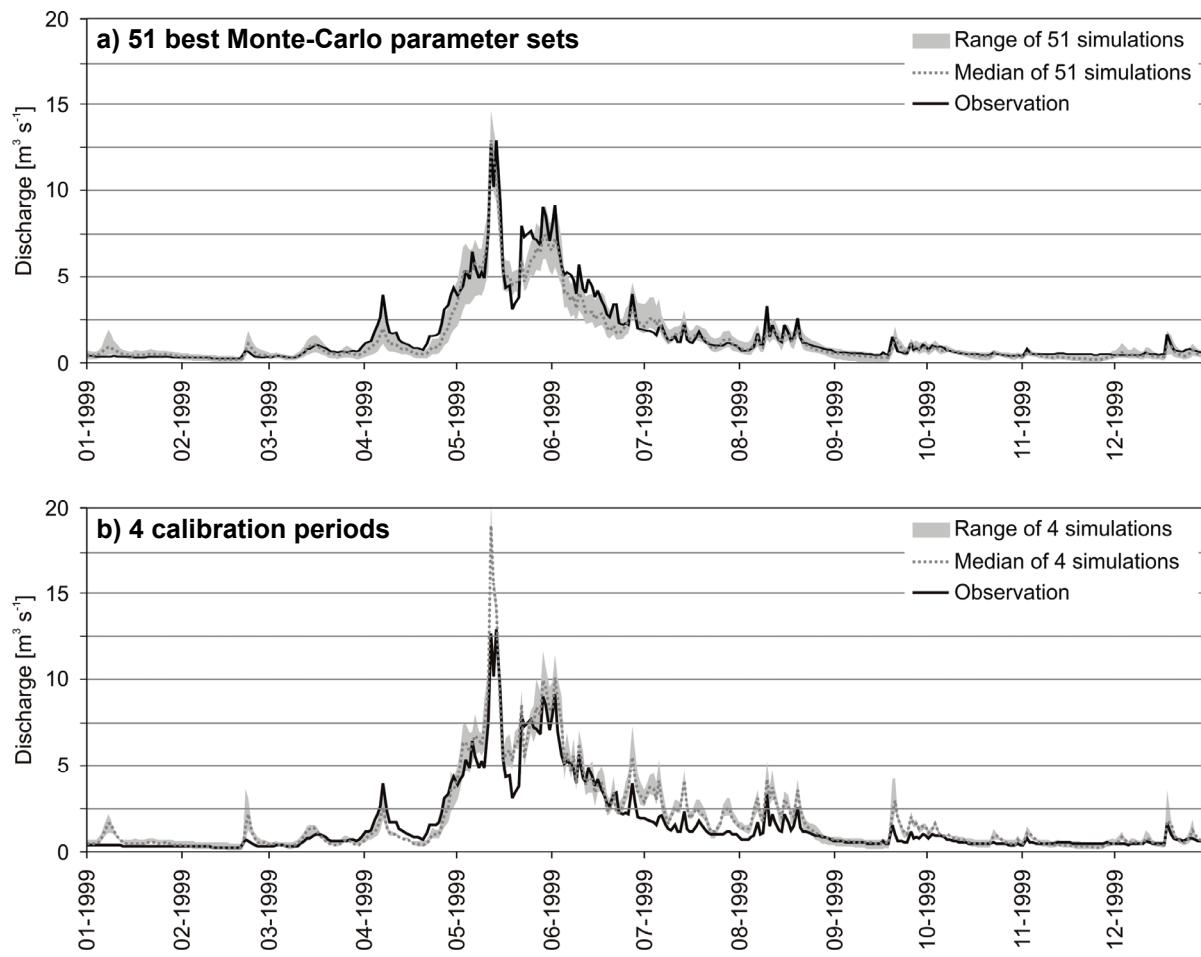


Figure 6.14: Discharge simulation for Allenbach–Adelboden 1999 using a) 51 out of totally 50'000 Monte Carlo parameter sets with best performance according to Nash-Sutcliffe-Efficiency in period 1994–1997 and b) four standard calibrated parameter sets with calibration periods 1984–1987, 1989–1992, 1994–1997 and 1999–2002. The graphs show daily mean values.

Abbildung 6.14: Abflusssimulation des Jahres 1999 für Allenbach–Adelboden mit a) 51 im Zeitraum 1994–1997 gemäss NSE besten Parametersätzen aus 50'000 Monte-Carlo-Realisierungen sowie mit b) vier auf Mittelwasser kalibrierten Parametersätzen auf Basis der Kalibrierungsperioden 1984–1987, 1989–1992, 1994–1997 und 1999–2002. Dargestellt sind die Tagesmittelwerte.

Abbildung 6.14 (oben) zeigt dazu für den Allenbach bei Adelboden die Simulation Jahres 1999 mit denjenigen 51 Monte-Carlo-Parametersätzen, welche im Zeitraum 1994–1997 die besten Resultate bezüglich NSE aufweisen. Aufgetragen sind für jeden Zeitschritt (hier als Tageswerte) der Wertebereich sowie der mediane Wert der 51 Simulationen. Die Breite des Konfidenzbereichs ist über das ganze Jahr hinweg relativ gering und trifft in den meisten Fällen den beobachteten Wert. Auch der Median zeigt abgesehen von einigen zeitweiligen Abweichungen eine gute Übereinstimmung mit der Beobachtung. Bemerkenswert ist, wie gut die Spitze des Pfingsthochwassers vom Mai 1999 wiedergegeben wird, sowohl was den Medianwert wie auch die geringe Streuung der 51 Simulationen betrifft – dies, obwohl das Jahr 1999 nicht im Zeitraum 1994–1997 liegt, welcher für Bewertung und Auswahl der Monte-Carlo-Parametersätze verwendet wurde. Für den gesamten Simulationszeitraum 1984–2003 beträgt das NSE der medianen Simulationswerte 0.73, die 51 Simulationen selbst weisen NSE-

Werte zwischen 0.74 und 0.78 auf. Selbst wenn die Wahl des "besten" Parametersatzes also wie oben gesehen relativ unsicher ist, lassen sich mit verschiedenen Parametersätzen gute Simulationsergebnisse erzielen.

Abbildung 6.14 (unten) weist den Konfidenzbereich aus, welcher auf den vier unabhängigen Kalibrierungsperioden beruht; der Vergleichbarkeit halber wurde die Mittelwasserkalibrierung verwendet. Es fällt auf, dass die Breite des Vertrauensintervalls für das Jahr 1999 insgesamt etwas schmäler ist als bei der Monte-Carlo-Analyse. Dabei spielen allerdings zwei zusätzliche Faktoren eine Rolle: Einerseits werden hier nur 4 statt 51 Simulationen betrachtet, andererseits wurden nicht beste Simulationen ausgewählt, sondern es wurden direkt die Resultate von Mittelwasserkalibrierungen verwendet. Wie sich diese beiden Faktoren genau auf das Resultat auswirken, kann anhand der vorliegenden Daten nicht genauer bestimmt werden. Insgesamt sind die Abweichungen von der beobachteten Ganglinie zum Teil etwas grösser, und das Pfingsthochwasser wird relativ deutlich überschätzt. Für dieses Jahr existieren also noch geeignete Parametersätze, welche zwar mit der Monte-Carlo-Analyse, nicht aber mit Mittelwasserkalibrierung auf die vier unabhängigen Perioden gefunden werden konnten. Die einzelnen Kalibrierungen erreichen für den Anwendungszeitraum 1984–2003 NSE-Werte zwischen 0.64 und 0.65; für die mediane Ganglinie resultiert ein vergleichsweise tiefes NSE von 0.50.

Unsicherheit in den Extrapolationsresultaten

Für diese Arbeit besonders interessant sind Aussagen zur Unsicherheit in den Hochwasserabschätzungen, welche ja durch Extrapolation der Simulationsresultate ermittelt werden. Als hydrologisch wesentlich überzeugendere Alternative zu den extremwertstatistischen Konfidenzintervallen können mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Kalibrierungen auch Konfidenzintervalle bestimmt werden, welche sich direkt aus der Parameterunsicherheit in der Modellierung ergeben. Dazu werden einfach die oben erstellten Parametersätze zur Simulation verwendet, worauf die Spitzenwerte der Simulation wiederum extrapoliert werden. Die extremwertstatistische Unsicherheit bleibt dabei natürlich weiterhin bestehen, wird aber der Übersichtlichkeit halber nicht ausgewiesen.

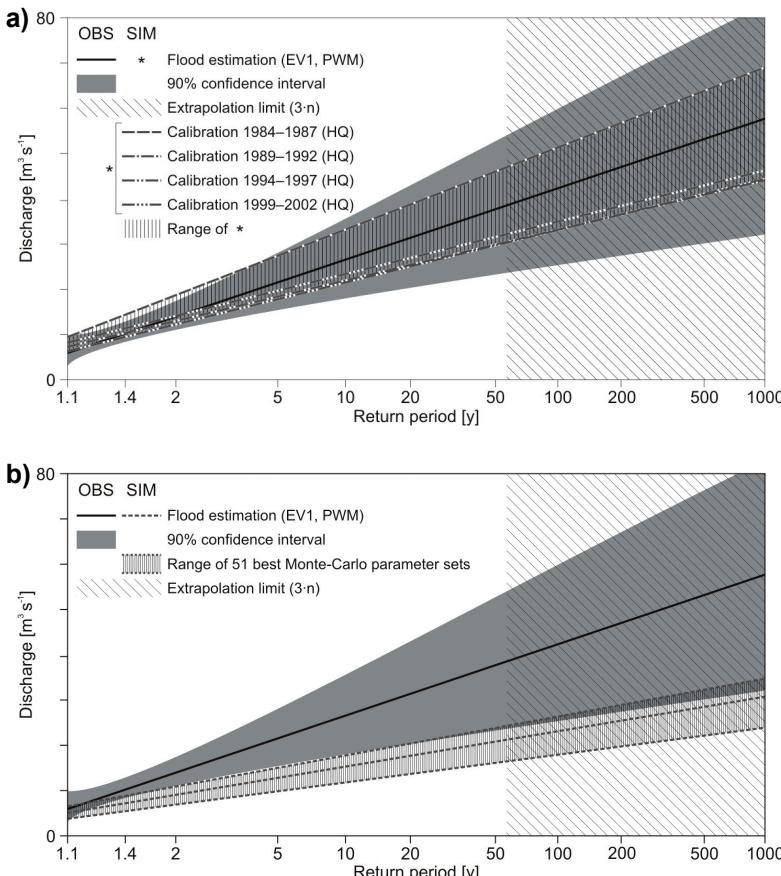


Figure 6.15: Flood estimation for Allenbach–Adelboden using a) 51 best parameter sets from 50'000 Monte Carlo runs (according to Nash-Sutcliffe-Efficiency) and b) four flood-calibrated parameter sets with calibration periods 1984–1987, 1989–1992, 1994–1997 and 1999–2002. Reference is extrapolation from observation (OBS).

Abbildung 6.15: Hochwasserextrapolation für Allenbach–Adelboden mit a) den 51 gemäss Nash-Sutcliffe-Effizienz besten Parametersätzen aus 50'000 Monte-Carlo-Simulationen und b) vier auf Hochwasser kalibrierten Parametersätzen auf Basis der Kalibrierungszeiträume 1984–1987, 1989–1992, 1994–1997 und 1999–2002. Referenz ist die aus der Beobachtung (OBS) extrapolierte Schätzung.

Die Resultate für den Allenbach bei Adelboden (1984–2003) zeigt **Abbildung 6.15**. Um eine bezüglich Hochwasserextrapolation sinnvolle Aussage zu erhalten, wurde für die Kalibrierungen auf die vier unabhängigen Zeitabschnitte die Hochwasserkalibrierung verwendet. Aus methodischen Gründen ist

es bei den Monte-Carlo-Experimenten es nicht möglich, eine vergleichbare Hochwasservariante zu erstellen. Wenig praktikabel ist es auch, ausschliesslich das Hochwassergütemass PQT zur Auswahl "bester" Parametersätze zu verwenden, da dann Sätze mit teilweise sehr schlechten NSE selektiert werden. Genau aus diesem Grund wurde ja die Hochwasserkalibrierung als leichte Anpassung der Mittelwasserparameter konzipiert.

Erwartungsgemäss zeigen die 51 bezüglich NSE besten Monte-Carlo-Parametersätze eine relativ deutliche Unterschätzung der Referenz (aus Beobachtung extrapolierte Schätzung), da sie nicht aufgrund spezifischer Hochwasserindikatoren ausgewählt wurden. Der Konfidenzbereich ist aber auch hier – wie schon bei den Abflussganglinien – bemerkenswert schmal.

Schon wesentlich bessere Extrapolationsresultate zeigen die vier Kalibrierungsperioden, von welchen drei sehr ähnliche Schätzungen liefern. Bedenkt man, dass die Konsistenz des Modellantriebs im Zeitraum 1984–1987 wie weiter oben erläutert fraglich ist, erscheint die abweichende Schätzung für diesen Zeitraum durchaus plausibel.

6.6 Fazit

Viele der zwölf freien Modellparameter zeigen eine nur schwach ausgeprägte Sensitivität. Zudem erschwert das Zusammenspiel der Parameter in einem gebietsspezifischen Satz von Werten die Identifikation eindeutiger Optima. Somit ist bei der Bestimmung der freien Modellparameter mit grösseren Unsicherheiten zu rechnen, auch wenn viele der unsicheren Parameterkombinationen gute Simulationsresultate liefern.

Im Hinblick auf die Resultate von Simulation und Hochwasserabschätzung konnten einige vielversprechende Möglichkeiten aufgezeigt werden, welche eine Quantifizierung der Parameterunsicherheit ermöglichen. Eine konsequente Umsetzung für die Anwendung im Rahmen dieser Arbeit scheitert allerdings schon am dafür nötigen Aufwand, welcher bei einer mehrfachen Kalibrierung der 140 verwendeten Gebiete – beispielsweise unter Verwendung unterschiedlicher Referenzzeiträume – beträchtlich ist. Zudem stehen längst nicht für alle untersuchten Gebiete ausreichend lange Messreihen zur Verfügung, anhand welcher verschiedene Kalibrierungsperioden erstellt werden könnten. Mit den gegenwärtigen Prozessorleistungen kaum zu bewältigen wäre eine Monte-Carlo-Analyse aller 140 Gebiete.

Welche Schlussfolgerungen sind aus den erkannten Sensitivitäten und Unsicherheiten nun für Kalibrierung und Regionalisierung zu ziehen?

6.6.1 Schlussfolgerungen für die Kalibrierung

Als erstes hat sich gezeigt, dass die Kalibrierung mit einem kombinierten Gütemass Vorteile gegenüber der Verwendung der Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) als einziges Kriterium hat. Das in Kapitel 3.2.1 entwickelte und in der folgenden Kalibrierung verwendete Gesamtgütemass ($ATOT$) hat sich bewährt und konnte in einigen Fällen Sensitivitäten aufdecken, wo NSE keine Differenzierung zeigte. Dadurch kann die Unsicherheit in der Kalibrierung zumindest etwas reduziert werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Verminderung der Parameterunsicherheit könnte sein, die für die Kalibrierung erlaubten Wertebereiche aufgrund von Vorwissen einzuengen oder Abweichungen von einer erwarteten Parameterverteilung in der Kalibrierung negativ zu bewerten (siehe z. B. ECKHARD ET AL., 2005; COOPER ET AL., 2007; PARAJKA ET AL., 2007). Beispielsweise könnten aus Eigenschaften des Untergrundes (hydrogeologische Karten) engere Grenzwerte für die Parameter des langsam Abflusses (Perkolation, Speicherzeiten) abgeleitet werden. Erste entsprechende Untersuchungen von CORTI (2003) stimmten diesbezüglich allerdings eher skeptisch, da die entsprechenden Simulationsresultate im Bereich des Grundwasserabflusses nicht immer plausibel waren. Dieser Ansatz wurde in der vorliegenden Arbeit deshalb nicht weiter verfolgt.

6.6.2 Schlussfolgerungen für die Regionalisierung

Für die Regionalisierung muss zunächst ein ernüchterndes Fazit gezogen werden, da die kalibrierten Modellparameter kaum gebietsspezifische Eigenschaften wiederzugeben scheinen: Das Zusammenwirken der einzelnen Parameter in einem Parametersatz überdeckt die aus physikalischen Überlegungen heraus zu erwartenden Sensitivitäten offenbar stark und lässt kaum darauf hoffen, dass sich durch Gebietsattribute messbare Eigenschaften mit den gefundenen Parameterwerten in Verbindung

bringen lassen. MERZ UND BLÖSCHL (2004) kamen in ihren Untersuchungen allerdings zum Schluss, dass Beziehungen zu Gebietsattributen trotz einer gewissen Parameterunsicherheit erkennbar bleiben. Sie merken auch an, dass das Problem durch eine einheitliche automatische Kalibrierung etwas entschärft werden kann; diesbezüglich besteht mit dem in der vorliegenden Arbeit verwendeten Verfahren eine gute Ausgangslage. Es ist auch nicht ganz klar, ob Unsicherheiten in der Modellierung überhaupt zuverlässig quantifiziert werden können, ebenso wie auch nicht genau gesagt werden kann, ob sie durch Monte-Carlo-Analysen eher überschätzt werden (vgl. BEVEN, 2006B).

Den obigen Erkenntnissen schliesst die Folgerung an, dass das Zusammenspiel der Parameter für eine erfolgreiche Simulation von grosser Bedeutung ist. BEVEN (2001A:7) fasst die angesprochenen Probleme treffend zusammen: *"It is very rarely the case that the simulations are so sensitive to a particular parameter that only certain values of that parameter will give good simulations. More often a particular parameter value will give either good or bad simulations depending on the other parameter values in the set. Thus, bringing together different parameter values from different sources is no guarantee that, even if they were optimal in the situations where they were determined, they will give good results as a set in a new set of circumstances. Be warned!"*

Im Hinblick auf die Regionalisierung ist deshalb folgendes festzuhalten:

- Die Entfernung unsensitiver Parameter scheint in der hier verwendeten Parametrisierung von PREVAH schwierig, da kein einzelner Parameter als offensichtlicher Kandidat für eine Eliminierung heraussticht. Dazu wären unter Umständen noch vertiefende Sensitivitätsanalysen angebracht (z. B. WAGENER ET AL., 2003; VAN GRIENSVEN ET AL., 2006), welche hier aus Zeitgründen nicht erfolgen konnten. Zudem wurde in Kapitel 2.3.3 schon auf eine Reduktion Anzahl freier Parameter hingearbeitet, womit einzelne Parameter bereits eliminiert (*TMFMIN* und *TMFMAX*), aus der Kalibrierung entfernt (*TGR* und *TTRANS*) oder modellintern parametrisiert (*BETA*) wurden.
- Freie Modellparameter auf regional differenzierte Festwerte zu setzen – ähnlich dem im vorigen Abschnitt vorgeschlagenen Vorgehen für die Kalibrierung – scheint ebenfalls wenig erfolgversprechend: GASSER (2004) folgerte aus diesbezüglichen Untersuchungen mit den langsam Abflusskomponenten von PREVAH, dass bei deren Festlegung Unsicherheiten entstehen, welche durch die verbleibenden Parameter kompensiert werden müssen. Dadurch verschlechtert sich die Plausibilität dieser restlichen Parameterwerte, was wiederum nachteilig für die Regionalisierung ist.
- Als schwierig ist auch das Ableiten der Modellparameter aus gebietsspezifischen Attributen einzuschätzen, denn es muss vermutet werden, dass die entsprechenden physikalischen Zusammenhänge – falls sie bestehen – nur in geringem Ausmass erfasst werden konnten. Gleichermassen fraglich scheint es, aus der geographischen Lage eines Einzugsgebietes auf dessen Parameter zu schliessen. Gemäss den Auswertungen von MERZ UND BLÖSCHL (2004) besteht allerdings in beiden Fällen trotz aller Vorbehalte eine gewisse Chance auf Erfolg.
- Am aussichtsreichsten scheint es, die Parameter nicht getrennt, sondern als kompletten Satz zu regionalisieren – beispielsweise, indem der gesuchte Parametersatz aus einem dem Zielgebiet möglichst ähnlichen Spendergebiet entnommen wird. Damit bleibt das Zusammenspiel der kalibrierten Parameter gewahrt.

Auf die verschiedenen Möglichkeiten der Parameterregionalisierung wird in Kapitel 8 noch ausführlich einzugehen sein. Die hier gewonnenen Erkenntnisse sollen dabei als Hintergrundinformation dienen, welche die Auswahl geeigneter Verfahren und deren Detailausarbeitung erleichtern soll.

Kapitel 7

Unsicherheit und Sensitivität II: Niederschlagsinput

In order to achieve a precipitation input with better representation of peak values, an interpolation method is introduced which uses weather radar data to produce spatially and temporally high-resolved precipitation maps. Simulations with this input are compared with results for standard input and further more advanced and more simple inputs. This serves on the one hand to investigate whether precipitation fields with increased information content lead to better simulations, on the other hand, the sensitivity of PREVAH regarding precipitation input is examined.

Zwecks genauerer Wiedergabe von Niederschlagsspitzen im Modellinput wird eine Interpolationsmethode eingeführt, welche mit Hilfe von Wetterradardaten zeitlich und räumlich hochauflösende Niederschlagsinputs erzeugt. Die Simulationsergebnisse dieses Inputs werden mit den Resultaten des Standardinputs sowie weiteren anspruchsvoller und einfacheren Interpolationsmethoden verglichen. Damit soll einerseits herausgefunden werden, ob Niederschlagsfelder mit höherem Informationsgehalt zu besseren Modellergebnissen führen, andererseits wird die Sensitivität von PREVAH auf den Niederschlagsinput untersucht.

7.1 Einführung

Im Anschluss an die im vorangehenden Kapitel erfolgten Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen zu den freien Modellparametern soll in diesem Kapitel nun untersucht werden, wie stark die Simulationsergebnisse von PREVAH vom verwendeten Niederschlagsinput abhängen. Neben dieser eigentlichen Sensitivitätsanalyse soll aber vor allem auch ermittelt werden, ob sich mit einem methodisch fortschrittlichen Niederschlagsinput bessere Simulationsergebnisse erzielen lassen.

Dazu wird mit Hilfe des schweizerischen Wetterradars ein flächendeckender, hochauflösender Niederschlagsdatensatz erstellt, welcher im Bezug auf Verteilung und Spitzenwerte grössere Vertrauenswürdigkeit besitzt als die üblicherweise verwendete Interpolation aus dem konventionellen Stationsmessnetz. Es interessiert vor allem die Frage, ob sich mit diesem Datensatz bessere Simulationsergebnisse erzielen lassen. Um die entsprechenden Resultate besser einordnen zu können, muss auch untersucht werden, wie stark die Simulationsergebnisse überhaupt vom verwendeten Niederschlagsinput beeinflusst werden, wie sich also die Sensitivität von PREVAH in dieser Hinsicht gestaltet. Dazu werden anstatt des bisher eingesetzten DTIDW (Detrended Inverse Distance Weighting) komplexere und einfachere Niederschlagsinputs in das Modell eingespielen. Für die nachfolgende Untersuchung erfolgt zuerst eine Beschreibung der verwendeten Niederschlagsinputs, bevor die Resultate vergleichend dargestellt und diskutiert werden. Ergänzend wird auch untersucht, wie sich eine zeitliche Verschiebung des Niederschlagsinputs auf die Simulationsergebnisse auswirkt. Und schliesslich kann auf Basis der vorgestellten Inputvarianten aufgezeigt werden, wie sich die Unsicherheit des Niederschlagsinputs in der Simulation von Hochwasserereignissen ausweisen lässt.

Die vorgenommenen Änderungen am Modellantrieb betreffen in allen Fällen nur den Niederschlag, alle weiteren meteorologischen Variablen stammen aus dem mit DTIDW interpolierten Standarddatensatz. Die zur Simulation verwendeten Parametersätze sind zu Beginn identisch mit den in den Kapiteln 3 und 4 erarbeiteten, für alle Niederschlagsinputs wird im Verlaufe der Untersuchung aber eine spezifische Kalibrierung erstellt (vgl. Abschnitt 7.2.3).

Als Testdatensatz wurden acht repräsentative Einzugsgebiete mit langen Datenreihen ausgewählt (**Tabelle 7.1**), von welchen zumindest eine gewisse Sensitivität im Bezug auf den Niederschlag erwartet wird; Vertreter von schnee- und gletscherdominierten Regimes sollen sicherstellen, dass die Rücklage von Niederschlag in Schnee respektive die Eisschmelze in ihren Auswirkungen auf die Niederschlagssensitivität ebenfalls berücksichtigt werden. Gebiete mit Flächen von über 500 km² wurden nicht berücksichtigt, da in diesen Fällen von einer starken Ausmittelung sowohl des Niederschlagsinputs wie auch der Gebietsantwort ausgegangen werden muss. Die Anwendung des Modells erfolgt auf die Jahre 1994–2002, allfällige Kalibrierungen beziehen sich auf den Zeitraum 1994–1997; es wurde jeweils ein Initialisierungsjahr vorgeschaltet. Die Modellanwendungen dieses Kapitels wurden zu grossen Teilen von DECURTINS (2006) erarbeitet.

<i>Symbol</i>	<i>Test catchment</i>	<i>Area [km²]</i>	<i>Discharge regime</i>
AllAde	Allenbach–Adelboden	28.8	nival alpin
EmmEmm	Emme–Emmenmatt	443	nivo-pluvial préalpin
LanHut	Langeneten–Huttwil	59.9	pluvial inférieur
LueGst	Lütschine–Gsteig	379	a-glacio-nival
RotRog	Rot–Roggwil	53.6	pluvial inférieur
SitApp	Sitter–Appenzell	74.2	nival de transition
SomSom	Somvixer Rhein–Somvix	21.8	b-glacio-nival
ThuJon	Thur–Jonschwil	493	nivo-pluvial préalpin

Table 7.1: Test catchments used in this chapter.

Tabelle 7.1: In diesem Kapitel verwendete Testgebiete.

7.2 Methoden

7.2.1 Verwendung von Wetterradardaten zur Erstellung hochauflösender Niederschlagsfelder

Motivation

Das Herleiten einer flächendeckenden Niederschlagsverteilung aus Punktmessungen ist mit verschiedenen Einschränkungen verbunden. Im Bezug auf die räumliche Struktur von Niederschlagsfeldern ist insbesondere von Bedeutung, dass jede Interpolation aus diskreten Messungen die Variabilität des natürlichen Prozesses unterschätzt. Diese Probleme betreffen insbesondere auch die räumliche Intermittenz von Starkniederschlagsfeldern, welche bei der Hochwasserentstehung in Gebieten von weniger als 100 km² eine wichtige Rolle spielen dürfte (BÁRDOSSY, 1993). So konnten etwa WILSON ET AL. (1979) für ein Testgebiet von ca. 70 km² zeigen, dass unterschiedliche räumliche Verteilungen des Niederschlags selbst bei gleichbleibender Niederschlagsmenge einen Einfluss auf Volumen und Anstiegszeit einer simulierten Abflusskurve haben; bei konvektiven Ereignissen fallen die Unterschiede zudem noch grösser aus als bei frontalen Ereignissen.

Wie aus den Untersuchungen von WÜTHRICH (2004) und REBER (2005) im Napfgebiet abgeleitet werden kann, reicht die Dichte des Automatischen Messnetzes (ANETZ) nicht aus, um die grosse räumliche Variabilität von Starkniederschlagsfeldern in der Schweiz zu erfassen. Insbesondere bei grossen Niederschlagsereignissen wie etwa demjenigen vom August 2005 ist die ungenügende räumliche Repräsentativität von Punktmessungen ein entscheidender Faktor, welcher deutlich vor dem Messfehler rangiert (FREI ET AL., 2006).

Eine naheliegende Möglichkeit zur Berücksichtigung hochauflösender räumlicher Niederschlagsstrukturen bieten Daten von Wetterradars, welche bisher vor allem für die Vorhersage eingesetzt wurden (z. B. JAMES ET AL., 1993; BELL UND MOORE, 1998; BORGA ET AL., 2000; ZHANG ET AL., 2004; ZHIJA ET AL., 2004); stärker auf die Untersuchung von Einzelereignissen ausgerichtete Studien führten beispielsweise GIANNONI ET AL. (2003) und HABERLANDT (2007) durch. Dank der stetig wachsenden Anwendungserfahrung vermindern sich inzwischen die Probleme, welche insbesondere in alpinen Regionen auftreten (vgl. ANDRIEU ET AL., 1997; PELLARIN ET AL., 2000; GERMANN ET AL., 2004; siehe auch folgenden Abschnitt). Deshalb erscheint es auch für die vorliegende Arbeit aussichtsreich, mit Wetterradars ermittelte hochauflösende räumliche Niederschlagsstrukturen in die Interpolation einzubinden. Ziel ist, die Grundlagen zur Simulation von Hochwassereignissen zu verbessern und damit auch eine genauere Extrapolation seltener Spitzenabflüsse zu erreichen.

Datenqualität des Wetterradars

Um die Daten eines Wetterradars in hydrologischen Anwendungen nutzen zu können, sind einige Probleme zu umgehen (siehe z. B. UIJLENHOET ET AL., 2006). In Gebirgsregionen fallen topographisch bedingte Fehlerquellen wie etwa Abschattungseffekte (vgl. **Abbildung 7.1**) und Bodenechos am stärksten ins Gewicht (vgl. GERMANN UND JOSS, 2004; GERMANN ET AL., 2006). Doch auch Abschwächung und Beugung des Radarpulses im Zuge seiner Ausbreitung durch die Atmosphäre führen zu Schwierigkeiten. Zudem steigt mit zunehmender Entfernung von der Antenne der Abstand des Strahls von der Erdoberfläche; dadurch bleiben meteorologische Prozesse verborgen, wenn sie sich in Nähe der Landoberfläche abspielen; dies betrifft beispielsweise das Verdunsten von Niederschlägen oder die Kondensation von Wasserdampf sowie die Windverfrachtung. Somit kann die am Boden beobachtete Niederschlagsmenge deutlich von derjenigen abweichen, welche gemäss Radarecho erwartet wurde. Schliesslich stellt die Umrechnung der in diskreten, logarithmischen Intensitätsstufen regi-

strierten Radarechos (Z , [$\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$]) in Niederschlagsintensitäten (R , [mm h^{-1}]) über die empirisch zu parametrisierende Z - R -Beziehung eine weitere Herausforderung dar.

Für hydrologische Anwendungen ist aus den genannten Problemen vor allem zu folgern, dass das Wetterradar – trotz ständig weiterentwickelter Korrekturtechniken (siehe z. B. GERMANN ET AL., 2004) nur sehr eingeschränkt zur Bestimmung absoluter Niederschlagsmengen geeignet ist. Dennoch enthalten Radarbilder wertvolle Informationen über Zeitpunkt und Ort von Niederschlägen (JOSS UND GERMANN, 2000; HOSSAIN ET AL., 2004), welche durch eine geschickte Methodik in Wert gesetzt werden können. Ein solches Vorgehen wird im Folgenden vorgestellt; es wurde von FREI UND WÜEST an der ETH Zürich entwickelt und für die vorliegende Anwendung freundlicherweise zur Verfügung gestellt (CHRISTOPH FREI, persönliche Mitteilung vom 28.10.2003).

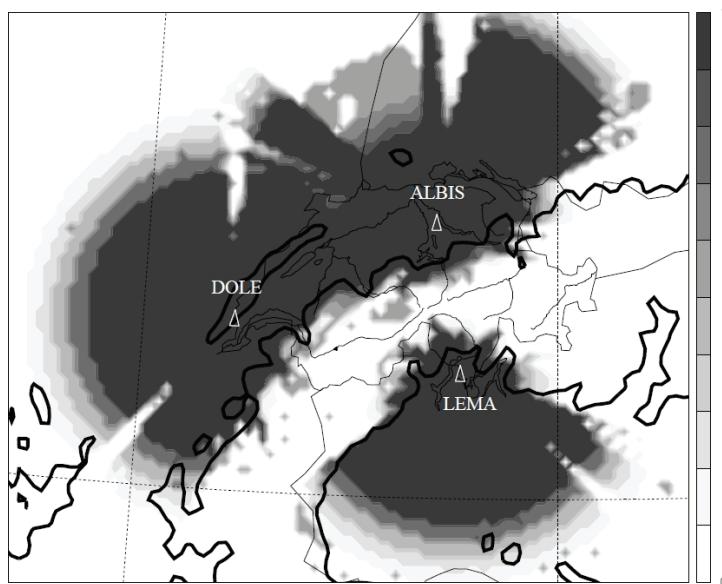


Figure 7.1: Visibility-based quality indicator for the Swiss radar network from LEUENBERGER (2005); 1 (dark) = best, 0 (bright) = worst. The bold line refers to the digital elevation model's 1'000 m contour.

Abbildung 7.1: Qualitätsindikator auf Basis der Sichtbarkeit für das schweizerische Radarmessnetz aus LEUENBERGER (2005); 1 (dunkel) = beste Qualität, 0 (hell) = schlechteste Qualität. Die dick gezogene Linie bezieht sich auf die 1'000 m-Höhenstufe des digitalen Höhenmodells.

Interpolationsmethodik

Die angesprochenen Probleme des Wetterradars können zumindest im Bezug auf die absoluten Mengen dadurch umgangen werden, dass die Niederschlagswerte des Radars nicht direkt als Modellinput verwendet werden. Vielmehr soll eine Kombination mit robust interpolierten Tagesniederschlagswerten sicherstellen, dass die beim Wetterradar auftretenden Probleme bezüglich absoluter Niederschlagsmengen vermieden werden können. Konkret werden dazu aus dem täglichen Niederschlagsmessnetz interpolierte Werte mit Hilfe der Radar-Composites auf die einzelnen Stunden des Tages verteilt (disaggregiert).

Bezüglich der verwendeten Niederschlagsfelder in täglicher Auflösung muss erwähnt werden, dass die verschiedenen Probleme wie etwa die ungenügende Messnetzdichte (vgl. GOODRICH ET AL., 1995) und die Inhomogenität der Messnetzverteilung bestehen bleiben. Beide Punkte betreffen insbesondere auch hochgelegene Gebiete (BRIGGS UND COGLEY, 1996). Durch eine geeignete Methodik (siehe Punkt 2, unten) können diese Probleme jedoch etwas entschärft werden.

Die Erstellung des hochauflösenden stündlichen Niederschlagsinputs unter Verwendung von Radardaten (CH02H) läuft wie in **Abbildung 7.2** aufgezeigt folgendermassen ab (CHRISTOPH FREI, persönliche Mitteilung vom 28.10.2003):

- 1.) Von den täglichen Niederschlagsmessungen (NIME) wird jeweils die Abweichung (Anomalie) zum aktuellen Monatsmittel berechnet (ANOM°). Diese Anomalien werden anschliessend mit dem SYMAP-Algorithmus von SHEPARD (1968, 1984) auf ein Gradnetz mit Maschenweite 1.25' interpoliert (ANOM); das SYMAP-Verfahren verwendet eine inverse Distanzgewichtung und berücksichtigt dabei die jeweilige Verteilung der Messstandorte im Umkreis des zu interpolierenden Gitterpunkts. Für die Interpolation stehen täglich ca. 450 Stationen aus der Schweiz und dem benachbarten Ausland zur Verfügung, der Stationsabstand beträgt typischerweise zwischen 10 und 15 km.
- 2.) Die interpolierten täglichen Anomalien (ANOM) werden der entsprechenden mittleren monatlichen Niederschlagsklimatologie 1971–1990 von SCHWARB ET AL. (2001b) durch Multiplikation aufgeprägt, was den täglich aufgelösten Niederschlagsdatensatz CH02D ergibt. Die Verwendung der

Anomalien bietet im Gegensatz zur direkten Interpolation der Tageswerte den Vorteil, dass die Fehlverteilung der Niederschlagssammler im Gebirge implizit korrigiert wird: SCHWARB ET AL. (2001B) setzten für ihre Analysen den PRISM-Algorithmus (Precipitation-elevation Regressions on Independent Slopes Model; DALY ET AL., 1994) ein, welcher die Höhenabhängigkeit des Niederschlags erfasst und zudem die verwendeten Punktmessungen gemäss den topographischen Bedingungen des Anwendungsräums gruppiert. Damit kann auch für Regionen mit komplexer Topographie eine vertrauenswürdige Interpolation erstellt werden.

- 3.) Die Werte des Wetterradars (RADAR) werden abschliessend zur Disaggregation der täglichen Werte von CH02D auf stündliche Werte (CH02H) eingesetzt. Dazu werden die Radarwerte vom 10-Minuten-Intervall auf Stunden- und Tageswerte summiert und dann zur Verteilung von CH02D auf die Stunden des Tages verwendet; die in CH02D ausgewiesenen Tagesniederschlagssummen bleiben also unverändert. Da die verwendete Auflösung der Radarbilder ($2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$) in etwa derjenigen von CH02D ($1.25' \times 1.25'$) entspricht, kann jeweils dasjenige Pixel der Radar-Composites verwendet werden, welches der betreffenden Gitterzelle von CH02D am nächsten ist. Falls CH02D Niederschlag aufweist, welcher mit RADAR nicht verteilt werden kann (fehlende Daten oder kein Echo registriert), werden die Werte von CH02D gleichmässig über 24 Stunden verteilt, um in Hinblick auf das hydrologische Anwendungsziel eine korrekte Wasserbilanz zu gewährleisten.

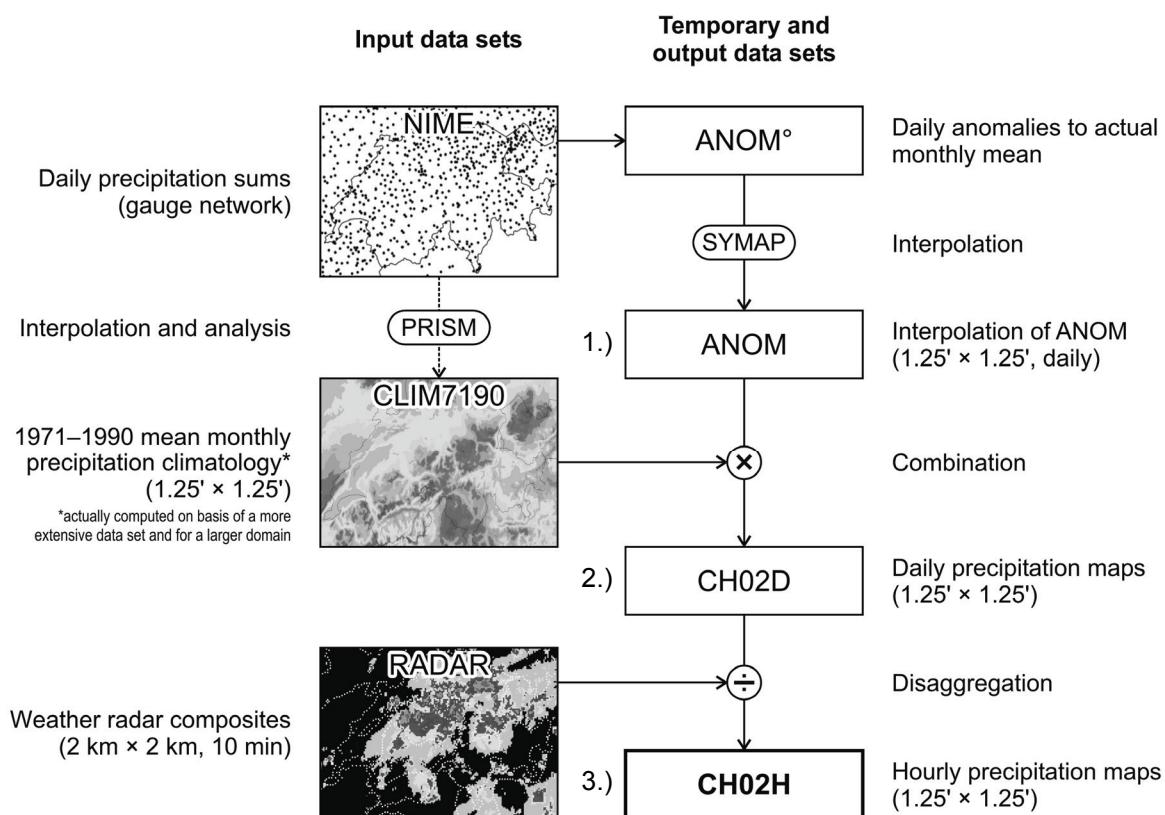


Figure 7.2: Procedure to derive high-resolution hourly precipitation fields (CH02H) from daily precipitation observations (NIME; METEOSCHWEIZ, 2003A), mean monthly climatology 1971–1990 (CLIM7191; SCHWARB ET AL., 2001B) and weather radar data (RADAR; METEOSCHWEIZ, 2003B).

Abbildung 7.2: Prozedur zur Erstellung hochauflösender stündlicher Niederschlagsfelder (CH02H) aus täglichen Niederschlagsmessungen (NIME; METEOSCHWEIZ, 2003A), mittlerer monatlicher Klimatologie 1971–1990 (CLIM7191; SCHWARB ET AL., 2001B) und Daten des Wetterradars (RADAR; METEOSCHWEIZ, 2003B).

Weitere Details zum beschriebenen Verfahren und insbesondere auch zu Aufbereitung und Korrektur der Radar-Composites können den Arbeiten von ALTENHOFF (2004) und LITSCHI (2005) entnommen werden. Von den Daten und der Methodik her ist es sogar möglich, CH02H in einer Auflösung von 10

Minuten zu erstellen – allerdings kann PREVAH diesen zeitlich hochauflösenden Input gegenwärtig nicht ausnutzen, da es in seiner aktuellen Version auf Stundenschritte hin ausgelegt ist.

Welchen Gewinn an Feinstrukturen die hochauflösenden Niederschlagsfelder bringen, zeigt **Abbildung 7.3** exemplarisch am Beispiel der Emme bei Emmenmatt für eine einzelne Stunde des Pfingsthochwassers vom Mai 1999. Während das räumliche Verteilungsmuster von DTIDW von den verfügbaren Messstationen abhängt und sehr flächenhaft ausfällt, zeigt CH02H ein stark differenzierteres Verteilungsmuster. Eine vertrauenswürdige zeitliche Dynamik (Stundenintervall) ist dank der verwendeten Radarbilder ebenfalls gewährleistet.

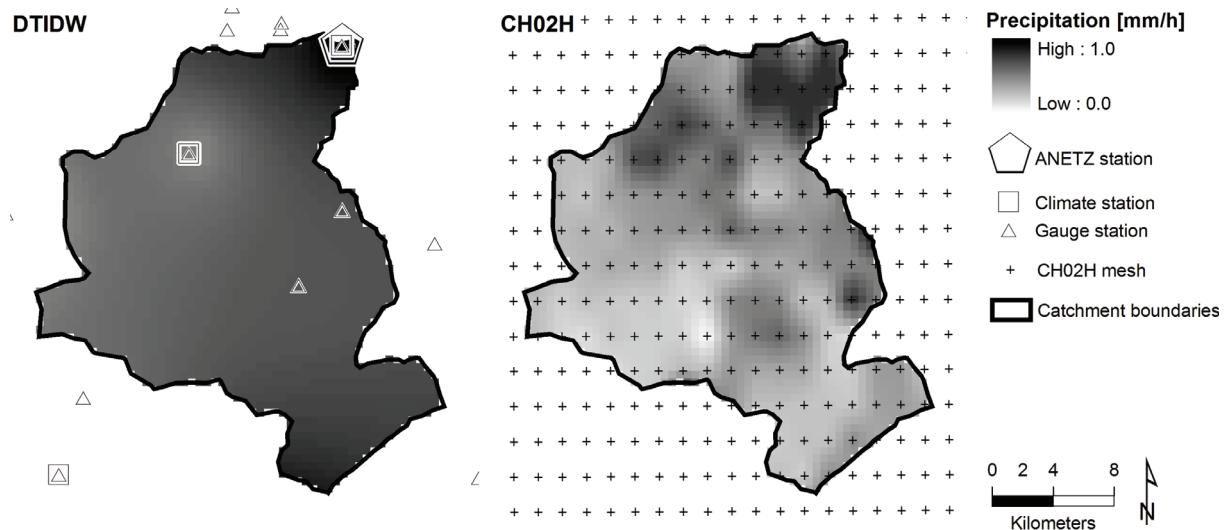


Figure 7.3: Precipitation fields interpolated with the Detrended Inverse Distance Weighting procedure (DTIDW, left) in comparison with radar-aided high-resolution precipitation fields from CH02H (right) for the Emme River at Emmenmatt (443 km^2), 15.02.1999, $13^{00} - 14^{00} \text{ h}$.

Abbildung 7.3: Mit Detrended Inverse Distance Weighting (DTIDW) interpoliertes Niederschlagsfeld (links) im Vergleich mit einem hochauflösenden Niederschlagsfeld des radargestützten Datensatzes CH02H (rechts) am Beispiel der Emme bei Emmenmatt (443 km^2) für den 15.02.1999, $13^{00} - 14^{00} \text{ h}$.

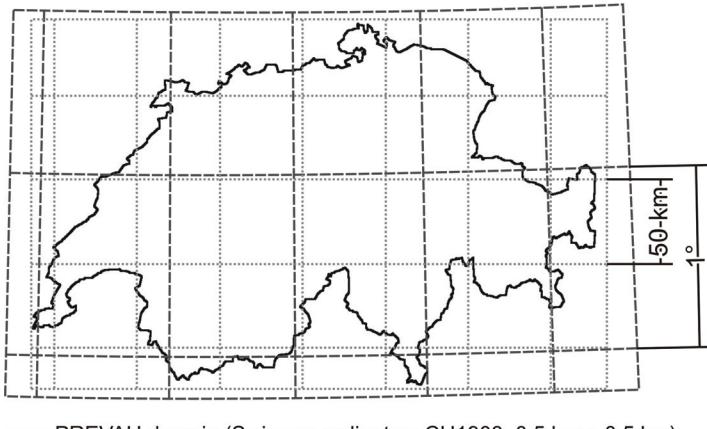
Da in der nun beschriebenen Methodik weder die täglichen Niederschlagsmessungen (NIME) noch die via SCHWARB ET AL. (2001B) eingebrachten absoluten Niederschlagsmengen (CLIM7190) eine Messfehlerkorrektur enthalten, sind auch die resultierenden Werte von CH02H unkorrigiert. In der Anwendung hat es sich bewährt, stets die in PREVAH implementierte Messfehlerkorrektur (Kapitel 2.3.2) auf CH02H anzuwenden, da der Messfehler ansonsten alleine über die Bilanzkorrekturfaktoren eliminiert werden muss – und dies sollte wie in Kapitel 2.3.2 erläutert möglichst vermieden werden. Sinnvoll kann es allenfalls sein, die PREVAH-Bilanzkorrektur für flüssigen und festen Niederschlag (PKOR und SNOKOR) vorerst nicht zu verwenden (respektive auf Null zu setzen), um die Werte von CH02H gegenüber anderen Interpolationsverfahren einschätzen zu können. Diese Variante wird im Folgenden als CH02H₀ bezeichnet.

Da die Radar-Composites erst ab 1992 in digitaler Form vorliegen, ist die Anwendung der oben beschriebenen Methodik auch erst ab diesem Jahr möglich. Daten für die 1980er Jahre existierten zur Zeit lediglich auf Mikrofilm und wurden bisher nicht digital aufbereitet.

Schnittstelle zu PREVAH

Die mit Hilfe des Wetterradars interpolierten stündlichen Niederschlagsdaten (CH02H) liegen im plattformunabhängigen Format NetCDF (RUSS UND PINCUS, 2002) vor und sind auf ein Gradnetz mit 1.25 Bogenminuten Maschenweite (0.02083° , im Mittel $1.55 \text{ km} \times 2.31 \text{ km}$) referenziert (vgl. **Abbildung 7.4**). Zur Verwendung der Werte in PREVAH musste eine Schnittstelle erstellt werden, welche zwei Funktionen zu erfüllen hat: Erstens müssen die NetCDF-Werte eingelesen und auf das schweizerische Koordinatensystem umgerechnet werden, welches in PREVAH benutzt wird. Zweitens

diese umgerechneten Werte dann pro Meteozone gemittelt und in für PREVAH lesbare Tabellen umgewandelt werden (vgl. Kapitel 2.1.1 und VIVIROLI ET AL., 2007).



..... PREVAH domain (Swiss co-ordinates: CH1903, 0.5 km × 0.5 km)
— CH02H domain (geographic co-ordinates: WGS84, 1.25° × 1.25°)

Das Einlesen der NetCDF-Werte geschieht über Programmbibliotheken von RUSS UND PINCUS (2002); zusätzliche FORTRAN-Routinen wurden von der ETH zur Verfügung gestellt (CHRISTOPH FREI, persönliche Mitteilung vom 02.06.2003). Um eine für PREVAH geeignete Auflösung und Geometrie zu erhalten, müssen die Gitterpunkte von CH02H anschliessend auf die aktuell verwendete PREVAH-Rasterauflösung interpoliert werden. Dazu wird wie in **Abbildung 7.5** skizziert eine bilineare Interpolation verwendet (siehe z. B. RICHARDS, 1994):

$$z = u \cdot (1-v) \cdot z_1 + (1-u) \cdot (1-v) \cdot z_2 + (1-u) \cdot v \cdot z_3 + u \cdot v \cdot z_4$$

Mit $u = \frac{d_u}{d_x}$ und $v = \frac{d_v}{d_y}$ Gleichung 7.1

Wo z zu interpolierender Punkt des Zielrasters
 $z_1 - z_4$ Stützpunkte des Ausgangsrasters
 d_x, d_y Maschenweite des Ausgangsrasters in x- resp. y-Richtung
 d_u, d_v Entfernung von z zu z_2 in x- resp. y-Richtung

} vgl. **Abbildung 7.5**

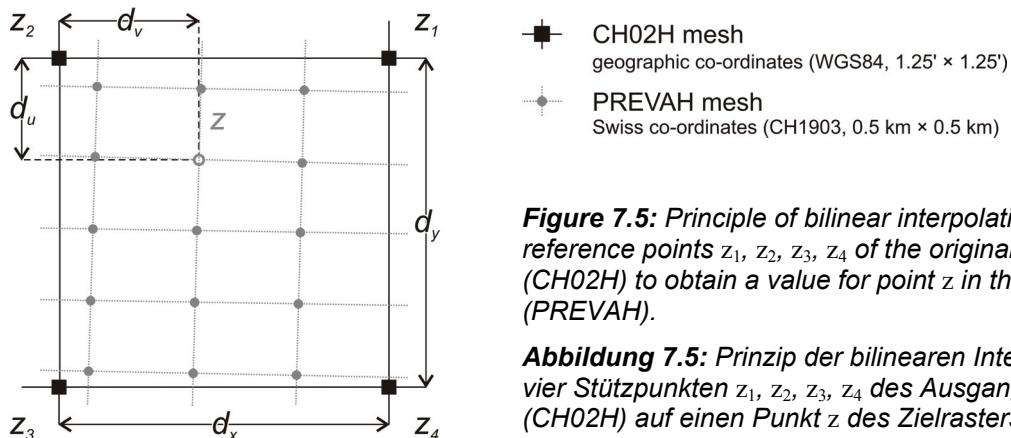


Figure 7.5: Principle of bilinear interpolation using four reference points z_1, z_2, z_3, z_4 of the original raster (CH02H) to obtain a value for point z in the target raster (PREVAH).

Abbildung 7.5: Prinzip der bilinearen Interpolation aus vier Stützpunkten z_1, z_2, z_3, z_4 des Ausgangsrasters (CH02H) auf einen Punkt z des Zielrasters (PREVAH).

Um rechnerische Schwierigkeiten bei der bilinearen Interpolation zu vermeiden, sollten die zu interpolierenden Werte des Ausgangsrasters möglichst in einem orthogonal ausgerichteten Koordinatensystem vorliegen; die Geometrie des Zielrasters ist hingegen irrelevant, da von diesem immer nur ein Rasterpunkt betrachtet wird. Die Interpolation wird deshalb im Gradnetz vorgenommen, wo die Rasterpunkte von CH02H orthogonal, diejenigen von PREVAH jedoch verzerrt erscheinen (vgl. **Abbildung 7.5**); dies ist zulässig, da die Abstände d_u, d_v, d_x und d_y nur in ihren Relationen und nicht in ihren Absolutwerten bedeutsam sind. Die dabei nötige Referenzierung der PREVAH-Gitterpunkte (Kilometer-Koordinatensystem CH1903) auf das Gradnetz von CH02H (geographisches Koordinaten-

system WGS84) geschieht mit Näherungsformeln von SWISSTOPO (2001), welche für die ganze Schweiz einen Positionsfehler von weniger als einem Meter aufweisen.

Als Alternative zur bilinearen Interpolation kann auch der jeweils am nächsten liegende Punkt von CH02 verwendet werden. Bei der gewählten Auflösung von $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ ergibt dies allerdings etwas unschöne Stufen.

Da die Niederschlagssammler jeweils den Zeitraum zwischen 05^{40} h UTC des aktuellen Tages und des Folgetages abdecken, ist der erste Wert eines CH02H-Jahresdatensatzes die Stunde von 05^{40} h bis 06^{40} h . Die Stunden von 23^{40} h bis 05^{40} h müssen für das erste Jahr (normalerweise 1992) deshalb mit Nullwerten gefüllt werden, in den folgenden Jahren können die fehlenden Werte des 01.01. jeweils dem 31.12. des Vorjahrs entnommen werden. Es wird angenommen, dass die leichte Differenz in der zeitlichen Referenzierung von CH02H (Beginn bei 23^{40} h) und PREVAH (Beginn bei 00^{00} h) bei der Simulation mesoskaliger Einzugsgebiete im Stundenschritt nicht ins Gewicht fällt.

Um die nun im PREVAH-Raster vorliegenden Niederschlagsdaten als Modellinput verwenden zu können, müssen diese abschliessend noch auf die im aktuellen Modellprojekt verwendeten Meteozenonen (siehe Kapitel 2.1.1) gemittelt werden; in der vorliegenden Anwendung sind dies Höhenzonen mit einer vertikalen Ausdehnung von 100 m. Als Resultat entstehen Tabellen, welche den mittleren Niederschlag pro Meteozone und pro Zeitschritt aufführen. Die entsprechenden Dateien können dann als Modellinput für PREVAH verwendet werden.

Sämtliche beschriebenen Aufgaben, welche zur Verwendung von CH02H in PREVAH nötig sind, übernimmt das Dienstprogramm IMPORT_RADAR (**Abbildung 7.6**). Nach dem Einlesen einer beliebigen Jahresdatei von CH02H (a) spezifiziert der Benutzer das interessierende Gebiet, indem er die entsprechende PREVAH-Rasterdatei des Einzugsgebiets (.ezg) öffnet (b); IMPORT_RADAR definiert daraus Ausdehnung und Auflösung des Zielrasters und übernimmt sämtliche nötigen Koordinatentransformationen. Der Benutzer hat noch anzugeben, welche Ausgabedateien erstellt (NetCDF-Datei und PREVAH-Grid der Interpolation, Niederschlagstabellen für PREVAH) und wo diese abgelegt werden sollen; falls PREVAH-Tabellen zu erstellen sind, muss die entsprechende Definitionsdatei für die Meteozenonen (.mez) angegeben werden (c). Wenn Zeitraum und Interpolationsmethode für den Transfer von CH02H nach PREVAH definiert sind, wird das Programm mit GO! gestartet.

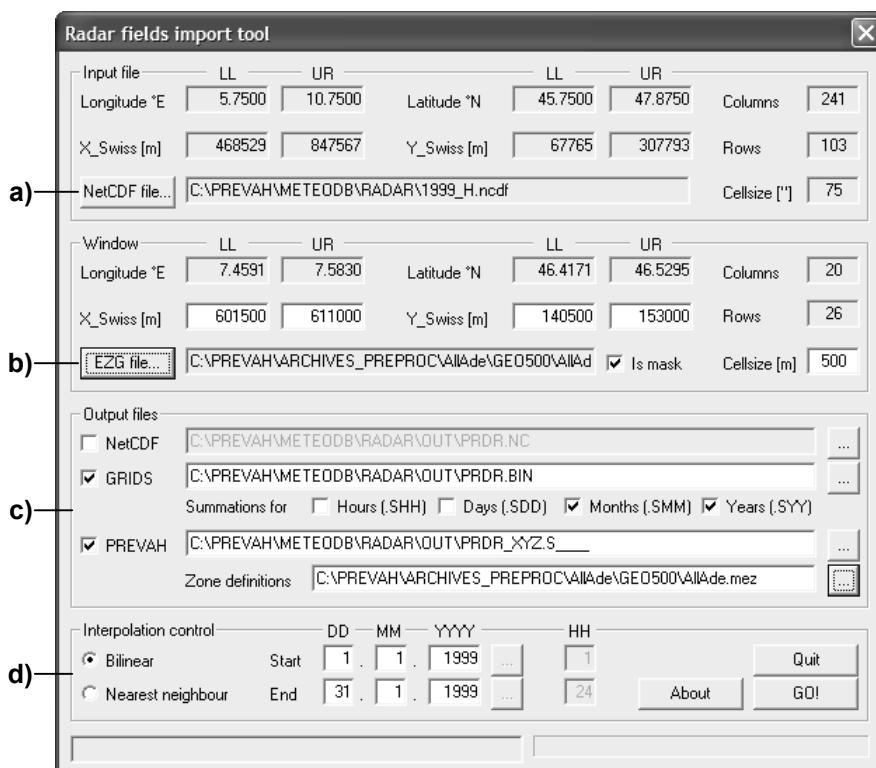


Figure 7.6: PREVAH interface for high-resolution radar-aided precipitation fields CH02H.

Abbildung 7.6: PREVAH-Schnittstelle für die hochauflösenden, radargestützten Niederschlagsfelder des Datensatzes CH02H.

7.2.2 Weitere Verfahren zur Erstellung von Niederschlagsfeldern

Wie schon erläutert werden weitere Verfahren zur Interpolation von Niederschlagsfeldern auf ihre Simulationsresultate hin untersucht. Diese Verfahren sollen im Folgenden kurz beschrieben werden.

Interpolation mit Detrended Inverse Distance Weighting (DTIDW)

Als Referenzvariante dienen die mit Detrended Inverse Distance Weighting (DTIDW) interpolierten Niederschlagsfelder, wie sie in dieser Arbeit normalerweise verwendet werden. Die detaillierte Beschreibung des Verfahrens ist in Kapitel 2.1.1 nachzulesen.

Interpolation mit Detrended Kriging (DTKRIG)

Als Vertreter einer geostatistisch anspruchsvollen Interpolationsmethode kommt das Kriging zum Einsatz. Dabei handelt es sich – wie beim Inverse Distance Weighting (IDW) – um ein distanzorientiertes lineares Verfahren. Bei der Interpolation eines Wertes werden also diejenigen Stützstellen stärker gewichtet, welche näher beim zu interpolierenden Punkt liegen. Die Gewichte werden dazu aus einem Variogramm abgeleitet, welches die räumliche Autokorrelation (Erhaltensneigung) der Messwerte beschreibt. Der mittlere Fehler soll dabei möglichst gleich Null, die Varianz der Fehler minimal sein (für Details siehe z. B. FÜRST, 2004).

Die Höheninformationen werden wie schon beim DTIDW-Verfahren dadurch einbezogen, indem an allen verfügbaren Messpunkten die Residuen zur jeweils ermittelten Höhenregression berechnet werden. Diese Residuen (und nicht die Messwerte selbst) werden räumlich interpoliert und anschliessend mit der theoretischen, aus der Höhenregression berechneten Werteverteilung kombiniert. Was den Einbezug von Höheninformationen angeht, können mit einem solchen Vorgehen ähnlich gute Resultate erzielt werden wie mit komplexeren Kriging-Varianten (z. B. Cokriging, External Drift Kriging) (GOOVAERTS, 2000).

Es muss angemerkt werden, dass bei der Anwendung von Kriging-Verfahren für die Niederschlagsinterpolation in der Schweiz mit Problemen zu rechnen ist, da beträchtliche räumliche Unterschiede in Mittelwert und Varianz der Niederschlagswerte auftreten – dies widerspricht den theoretischen Annahmen, unter welchen Kriging eine optimale Interpolation erreichen kann. Weil von anisotropen (nicht richtungsunabhängigen) sowie räumlich variablen Variogrammen ausgegangen werden muss, können insbesondere bei mesoskaligen und konvektiven Ereignissen im Alpenraum grössere Schätzfehler resultieren. Es ist also möglich, dass die methodischen Vorteile eines Kriging durch die praktischen Einschränkungen im Anwendungsraum beeinträchtigt werden. In der Praxis kann das IDW-Verfahren deshalb ebenso robust und geeignet sein wie das Kriging (WEBER UND ENGLUND, 1992; siehe auch PHILLIPS ET AL., 1992).

Gebietsmittelwert (AVG)

Die dritte Variante leitet sich aus der als Standard verwendeten Interpolation mit DTIDW ab: Die mit letzterer Methode erstellten Niederschlagsfelder werden über das gesamte Gebiet gemittelt und dann in gleichmässiger räumlicher Verteilung in das Modell eingegeben. Die Simulationsresultate sollen Rückschlüsse darauf erlauben, wie stark sensitiv PREVAH auf die räumliche Verteilung der Niederschläge ist.

ANETZ-Stationen

Bei der letzten Variante dient die jeweils nächstgelegene Station des automatischen Messnetzes (ANETZ) unmittelbar als Input. Die aufsummierten Stundenwerte des ANETZ werden dabei ohne Abminderung und räumlich homogen verteilt direkt als Niederschlagsinput für PREVAH eingesetzt. Die Idee dahinter ist, möglichst lokale, zeitlich hochauflösende Messdaten in das Modell einzubringen, gleichzeitig aber auch die mit einer Interpolation verbundene Glättung zu umgehen. Die verwendeten ANETZ-Stationen sind zusammen mit den entsprechenden Distanzen in **Tabelle 7.2** aufgeführt.

Table 7.2: Stations of the automatic network (ANETZ) used for the individual test catchments, with distance to catchment centroid (d_{centroid}), distance to catchment boundary (d_{boundary}), average catchment altitude (mH) and altitude of ANETZ station (h_{ANETZ}).

Tabelle 7.2: Für die jeweiligen Testgebiete verwendeten Stationen des Automatischen Messnetzes (ANETZ) mit Distanz zum Schwerpunkt (d_{centroid}), Distanz zur Gebietsgrenze (d_{boundary}), mittlerer Gebietshöhe (mH) und Höhe der ANETZ-Station (h_{ANETZ}).

Test catchment	ANETZ station	d_{centroid} [km]	d_{boundary} [km]	mH [m a. s. l.]	h_{ANETZ} [m a. s. l.]
Allenbach–Adelboden	Adelboden	4	^a <1	1856	1320
Emme–Emmenmatt	Napf	16	^a <1	1070	1406
Langeten–Huttwil	Napf	13	7	766	1406
Lütschine–Gsteig	Interlaken	11	<1	2050	580
Rot–Roggwil	Wynau	10	5	586	422
Sitter–Appenzell	St. Gallen	15	10	1252	779
Somvixer Rhein–Somvix	Disentis	14	12	2450	1190
Thur–Jonschwil	Tänikon ^b	30	11	1030	536

^a located inside of the catchment, close to the catchment's boundary

^b Station Lägern is closer but does not provide precipitation data

7.2.3 Kalibrierung

Methodisch gesehen ist es sinnvoll, das Modell auf die verschiedenen zur Untersuchung vorgesehnen Niederschlagsinputs zu kalibrieren, um die in den Inputvarianten jeweils enthaltenen Informationen möglichst gut nutzen zu können. Die Kalibrierung erfolgte analog zu den in den Kapiteln 3 und 4 vorgestellten Methoden zuerst auf Mittelwasser und dann Hochwasser (vgl. Abbildung 4.11). Insgesamt werden für jeden Niederschlagsinput drei Kalibrierungsvarianten betrachtet (DECURTINS, 2006):

- *Keine inputspezifische Kalibrierung*: Die freien Modellparameter beziehen sich auf die Mittelwasserkalibrierung und den Standardinput DTIDW.
- *Inputspezifische Mittelwasserkalibrierung*: jeweils gemäss Kapitel 3 für alle freien Parameter.
- *Inputspezifische Hochwasserkalibrierung*: jeweils gemäss Kapitel 4 für alle freien Parameter.

Der radargestützte Input ohne Bilanzkorrektur (CH02H_0) wird nur ohne inputspezifische Kalibrierung untersucht. Bei den auf den jeweiligen Niederschlagsinput kalibrierten Parametersätzen ist seine Verwendung nicht angezeigt, da die Bilanzkorrekturfaktoren in diesen Fällen ja kalibriert werden und somit auch bei der Anwendung von CH02H Bestandteil eines konsistenten Modells sind.

7.2.4 Zusammenfassung

Tabelle 7.3 gibt einen Überblick über die zur Verfügung stehenden Niederschlagsinputs. Für alle Datensätze existieren neben den Standardparametersätzen (Mittelwasserkalibrierung bezogen auf DTIDW) jeweils auch spezifische auf Mittel- und auf Hochwasser kalibrierte Parametersätze. Einzige Ausnahme ist der Datensatz CH02H_0 , welcher wie erläutert nur in der Simulation ohne inputspezifische Kalibrierung verwendet wird.

Table 7.3: Precipitation inputs used in this chapter.

Tabelle 7.3: In diesem Kapitel verwendete Niederschlagsinputs.

Symbol	Description
CH02H	Radar-aided temporal disaggregation of climatologically robust daily interpolation
CH02H₀	CH02H without PREVAH water balance adjustment (only for default calibration)
DTKRIG	Detrended Kriging interpolation from local hourly and daily stations
DTIDW	Detrended Inverse Distance interpolation from local hourly and daily stations (default)
AVG	Average areal precipitation from DTIDW in uniform distribution
ANETZ	Direct hourly input from nearest automatic network (ANETZ) station

7.3 Resultate

7.3.1 Anwendung auf gesamten Zeitraum 1994–2003

Als erstes zeigt **Abbildung 7.7** für die untersuchten Testgebiete einen summarischen Überblick über die jeweils besten Inputvarianten im Anwendungszeitraum 1994–2003. Als Güteindikatoren wurden Nash-Sutcliffe-Effizienz (linear, NSE , und logarithmisch, NSE_{ln}), Volumendifferenz ($DVOL$) sowie die Hochwassergütemasse PQT , $PSAE$ und WAE ausgewählt (vgl. Kapitel 3.1.4 und 4.2.1). Es muss angemerkt werden, dass das Resultat einer solchen Auswertung – besonders was die Identifikation des insgesamt besten Inputs betrifft – von Gewichtung und Zusammenstellung der Gütemasse abhängt. Hier werden die gewählten Gütemasse der Einfachheit halber gleichberechtigt betrachtet.

Ohne erneute Kalibrierung – also mit Parametersätzen, welche auf den Standardinput DTIDW geeicht sind – schneidet der radargestützte Input ohne Bilanzkorrektur ($CH02H_0$) relativ deutlich am besten ab (**Abbildung 7.7, a)**. DTIDW erscheint einzig bei der Wasserbilanz ($DVOL$) als die vorteilhaftere Variante. Bei inputspezifischer Kalibrierung auf Mittelwasser (**Abbildung 7.7, b)** ist das Bild deutlich heterogener: Während $CH02H$ zwar am häufigsten als bester Input auftritt, liegt ANETZ bei den Hochwassergütemassen meist an erster Stelle. Auch bei hochwasserspezifischer Kalibrierung auf den jeweiligen Input (**Abbildung 7.7, c)** erreicht $CH02H$ am häufigsten das beste Ergebnis, wiederum gefolgt vom ANETZ-Input, welcher in den beiden Gebieten Langete–Huttwil und Rot–Roggwil fast durchgehend die günstigsten Resultate erzeugt.

Welcher Niederschlagsinput die besten Resultate liefert, scheint bis zu einem gewissen Grad von der betrachteten Region abzuhängen. Darauf weisen die ähnlichen Ergebnisse von Langeten und Rot sowie Sitter und Thur hin. Zusammenhänge mit mittlerer Gebietshöhe oder Fläche des Einzugsgebiets sind im vorliegenden Datensatz hingegen nicht auszumachen.

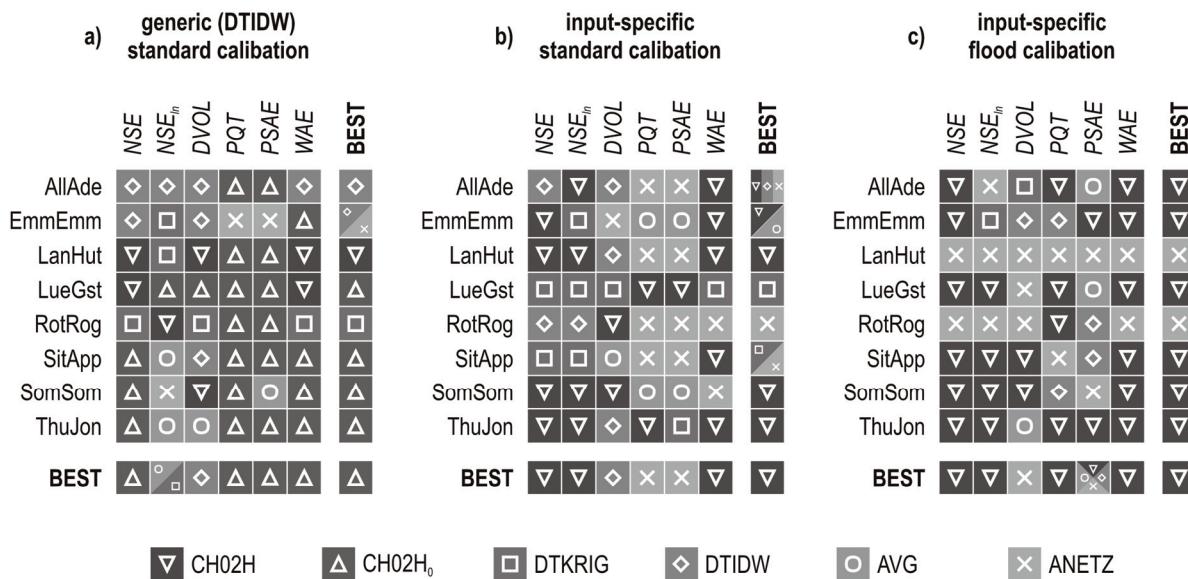


Figure 7.7: Matrix showing best-performing precipitation inputs in application period 1994–2002. Efficiency scores (arranged horizontally): Nash-Sutcliffe (NSE), Nash-Sutcliffe logarithmic (NSE_{ln}), average volumetric deviation ($DVOL$) and flood-specific scores PQT , $PSAE$ and WAE . Test catchment symbols (arranged vertically) see **Table 7.1**.

Abbildung 7.7: Matrix der Niederschlagsinputs mit den besten Simulationsresultaten in der Anwendungsperiode 1994–2002. Gütemasse (horizontal angeordnet): Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE), Nash-Sutcliffe-Effizienz logarithmisch (NSE_{ln}), mittlere Volumenabweichung ($DVOL$) sowie hochwassersensitive Gütemasse PQT , $PSAE$ und WAE . Testgebiete (vertikal angeordnet) siehe **Tabelle 7.1**.

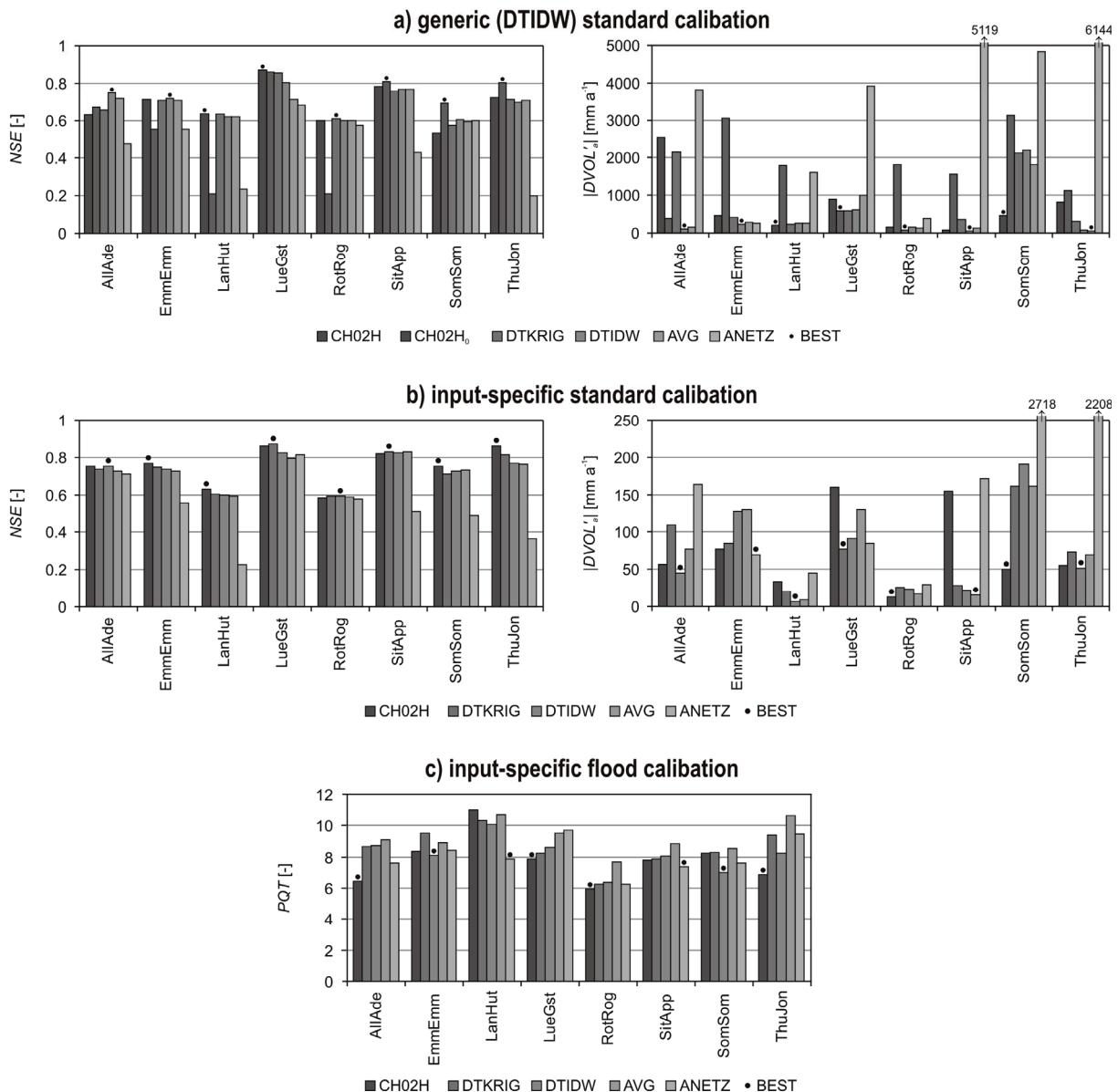


Figure 7.8: Efficiency scores for various precipitation inputs and for various calibrations in eight test catchments, period 1994–2002 (NSE: Nash-Sutcliffe-Efficiency, $|DVOL'_a|$: average annual volumetric deviation (absolute value), PQT: flood sensitive score). For each catchment, the precipitation input achieving best results is identified.

Abbildung 7.8: Gütemasse von acht Testgebieten für verschiedene Niederschlagsinputs und verschiedene Kalibrierungen im Zeitraum 1994–2002 (NSE: Nash-Sutcliffe-Effizienz, $|DVOL'_a|$: mittlere jährliche Volumenabweichung (Absolutwert), PQT: hochwassersensitives Gütemass). Pro Einzugsgebiet ist der Niederschlagsinput mit dem besten Resultat jeweils gekennzeichnet.

Relevant scheint nun die Frage, wie gross die Unterschiede zwischen den verschiedenen Niederschlagsinputs ausfallen. Ist der oft als beste Variante identifizierte Input CH02H den anderen Verfahren deutlich überlegen? Dazu werden im Folgenden einige Detailresultate der drei oben diskutierten Kalibrierungsvarianten betrachtet.

Abbildung 7.8 zeigt zu diesem Zweck Gütemasse für die Simulationen ohne erneute Kalibrierung (a), mit inputspezifischer Mittelwasserkalibrierung (b) sowie mit inputspezifischer Hochwasserkalibrierung (c). Während für a) und b) die Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) und die mittleren jährlichen Volumendifferenzen ($DVOL'_a$) als Indikatoren für die Gesamtgüte der Modellierung interessieren, wird c) anhand des Hochwassergütemasses PQT beurteilt.

Ohne inputspezifische Kalibrierung weisen die *NSE* der verschiedenen Inputs vereinzelt grössere Unterschiede auf (**Abbildung 7.8 a, links**); CH02H und CH02H₀ können mit den bestehenden Parametersätzen teilweise etwas bessere Modellgüten erzielen, fallen in einigen Gebieten aber deutlich ab. Die inputspezifische Kalibrierung (**Abbildung 7.8 b, links**) bringt hingegen für fast alle Niederschlagsvarianten sehr ähnliche *NSE*-Werte; insgesamt liefert aber keiner der betrachteten Inputs deutlich bessere Resultate. Ungünstig erschien in dieser Analyse die Verwendung der nächstgelegenen ANETZ-Station.

Bei den *DVOL'*_a sind die Unterschiede hingegen deutlich grösser, wobei ohne inputspezifische Kalibrierung ausser bei DTIDW ausgesprochen grosse Abweichungen (**Abbildung 7.8 a, rechts**) resultieren. Mit Kalibrierung auf den jeweiligen Input (**Abbildung 7.8 b, rechts**) verringern sich die absoluten Abweichungen meist merklich; gemäss den Werten von *DVOL'*_a scheint auch CH02H in Sachen Wasserbilanz durchaus zur Verwendung geeignet. Im Gegensatz dazu zeigt der ANETZ-Input grosse Abweichungen im mittleren jährlichen Abflussvolumen, welche sich offenbar auch durch eine Kalibrierung nicht beheben lassen.

Im Bezug auf die Hochwasserabschätzung besonders wichtig sind die Resultate der hochwasserspezifischen Kalibrierung auf den jeweiligen Input (**Abbildung 7.8 c**); da *NSE* und *DVOL'*_a hier weniger relevant sind, wird nur das spitzenwertbezogene Gütemass *PQT* betrachtet. Je nach Gebiet sind kleine oder grosse Differenzen zwischen den *PQT* der verschiedenen Inputs festzustellen, doch auch hier kann keine systematisch beste Variante ausgemacht werden.

7.3.2 Die zehn grössten Hochwasserereignisse 1994–2003

Für eine stärker auf Hochwasserabflüsse ausgerichtete Betrachtung wurden für jedes der acht Testgebiete die zehn grössten beobachteten Hochwasser des Zeitraums 1994 bis 2003 analysiert. Als Grundlage diente für ein für jeden Niederschlagsinput spezifisch auf Hochwasser kalibrierter Parametersatz (vgl. DECURTINS, 2006).

Tabelle 7.4 zeigt für jeden der untersuchten Niederschlagsinputs die Abweichung zwischen simulierter und beobachteter Abflussspitze. Als Suchzeitraum für die grösste simulierte Spitze dienen die 48 Stunden vor und nach dem beobachteten Abflussmaximum. Betrachtet man den mittleren relativen Fehler in der Spitzenwertsimulation, schneidet die radargestützte Interpolation (CH02H) mit +9.4% etwas besser ab als die Interpolationen mit DTKRIG und DTIDW (14.2%, 15.7%); bei den absoluten Abweichungen sind für die drei genannten Inputs allerdings kaum Unterschiede festzustellen (Wertebereich 25.6% bis 27.5%). Die Mittelung des mit DTIDW interpolierten Inputs (AVG) führt nur zu leichten Verschlechterungen, deutlich grössere Fehler resultieren hingegen bei der Verwendung der nächstgelegenen ANETZ-Station.

Table 7.4: Average deviation from observed peak discharge, average absolute deviation from observed peak discharge and Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE) for period covering 48 h before / after observed peak, each for precipitation input variants CH02H (radar-aided), DTKRIG (Detrended Kriging), DTIDW (Detrended Inverse Distance Weighting), AVG (average of altitude zones) and ANETZ (nearest station from automatic network).

Tabelle 7.4: Mittlere Abweichung vom beobachteten Spitzenabfluss, mittlere absolute Abweichung vom beobachteten Spitzenabfluss sowie Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) des Zeitraums 48 h vor bis 48 h nach der beobachteten Spitze für die Niederschlagsinputvarianten CH02H (radargestützt), DTKRIG (Detrended Kriging), DTIDW (Detrended Inverse Distance Weighting), AVG (Gebietsmittel) und ANETZ (nächstliegende Station des automatischen Messnetzes).

	CH02H	DTKRIG	DTIDW	AVG	ANETZ
Average deviation in peak discharge	9.4%	14.2%	15.7%	15.1%	28.0%
Average absolute deviation in peak discharge	25.6%	27.5%	26.8%	31.0%	40.9%
Median <i>NSE</i> for peak event +/- 48 h	0.39	0.47	0.37	0.37	0.20

Als zweite Betrachtungsweise wurde für jedes der insgesamt 80 untersuchten Hochwasserereignisse eine Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) berechnet (**Tabelle 7.4**, unterste Zeile). Die etwas unkonventionelle Verwendung von *NSE* soll einen zeitlich besser abgestützten Vergleich zwischen den verschiedenen Ereignissen und Gebieten ermöglichen und den gesamten Abflussverlauf während des Ereignisses darstellen.

nisses bewerten. Dazu wurde ein einheitlicher Ganglinienausschnitt von wiederum 48 h vor bis 48 h nach dem beobachteten Abflussmaximum untersucht – also 97 Stunden, wobei die beobachtete Spitze in der Mitte des von *NSE* bewerteten Zeitraums zu liegen kommt. Dass dabei Ereignisse von ganz unterschiedlicher Dauer und Entstehungsart mit demselben Gütemass bewertet werden, ist zulässig, da jeweils nur die relativen Verbesserungen oder Verschlechterungen in der Modellgüte interessieren. Die Ergebnisse zeigen sich hier für CH02H, DTIDW und AVG sehr ähnlich (*NSE* zwischen 0.37 und 0.39); DTKRIG schneidet deutlich besser ab (*NSE* = 0.47), ANETZ deutlich schlechter (*NSE* = 0.20).

7.3.3 Das Pfingsthochwasser 1999

Zur Konkretisierung der obigen Analysen kann anhand eines einzigen Hochwasserereignisses gezeigt werden, wie die Unterschiede zwischen den verschiedenen Inputvarianten ausfallen. Dazu sind in **Abbildung 7.9** die Abflussdiagramme für das Pfingsthochwasser vom Mai 1999 aufgetragen. Es wurden wiederum die jeweils spezifisch auf den verwendeten Niederschlagsinput kalibrierten Modellparametersätze (Hochwasserkalibrierung) verwendet (DECURTINS, 2006).

Sehr ähnliche und gut mit der Beobachtung übereinstimmende Simulationen sind bei Sitter–Appenzell und Thur–Jonschwil zu beobachten – in denjenigen Gebieten also notabene, in welchen das Hochwasserereignis 1999 grosse Jährlichkeiten aufwies (vgl. BWG, 2000). Ebenfalls grosse Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Simulationen zeigen Langete–Huttwil und Rot–Roggwil, allerdings bei deutlicher Abweichung von der Beobachtung. Bei den verbleibenden Gebieten sind stärkere Unterschiede zwischen den Inputvarianten festzustellen, wobei keine eindeutig beste Variante identifiziert werden kann. Eher schlechte Resultate weist der über die Gebietsfläche gemittelte Input AVG auf, welcher in den vorherigen Analysen noch kaum Auffälligkeiten zeigte. Es kann gefolgert werden, dass die räumliche Verteilung des Niederschlags im Einzelereignis durchaus einen Einfluss auf das Simulationsresultat haben kann.

Insgesamt kann aber für das Ereignis von Mitte Mai 1999 kein Niederschlagsinput identifiziert werden, welcher stets gute oder sogar optimale Resultate liefert. Soll ein einzelnes Ereignis im Detail betrachtet werden, ist daher vermutlich stets eine individuelle Auswahl zu treffen – eine Erkenntnis, die auch in PREVAH-basierten Studien zum Hochwasser 2005 gemacht wurde (siehe WEINGARTNER ET AL., 2007; SCHWANBECK ET AL., in Vorbereitung). Auffällig ist, dass die Verwendung der nächstgelegenen ANETZ-Station sowohl die besten Ergebnisse (Somvixer Rhein–Somvix, Rot–Roggwil) wie auch deutliche Abweichungen (Emme–Emmenmatt, Lütschine–Gsteig) zeigen kann. Dazu muss sicher die Repräsentativität der jeweils eingesetzten ANETZ-Station berücksichtigt werden, gleichzeitig ist aber auch zu vermuten, dass der Erfolg dieser Inputvariante vom einzelnen Ereignis abhängt.

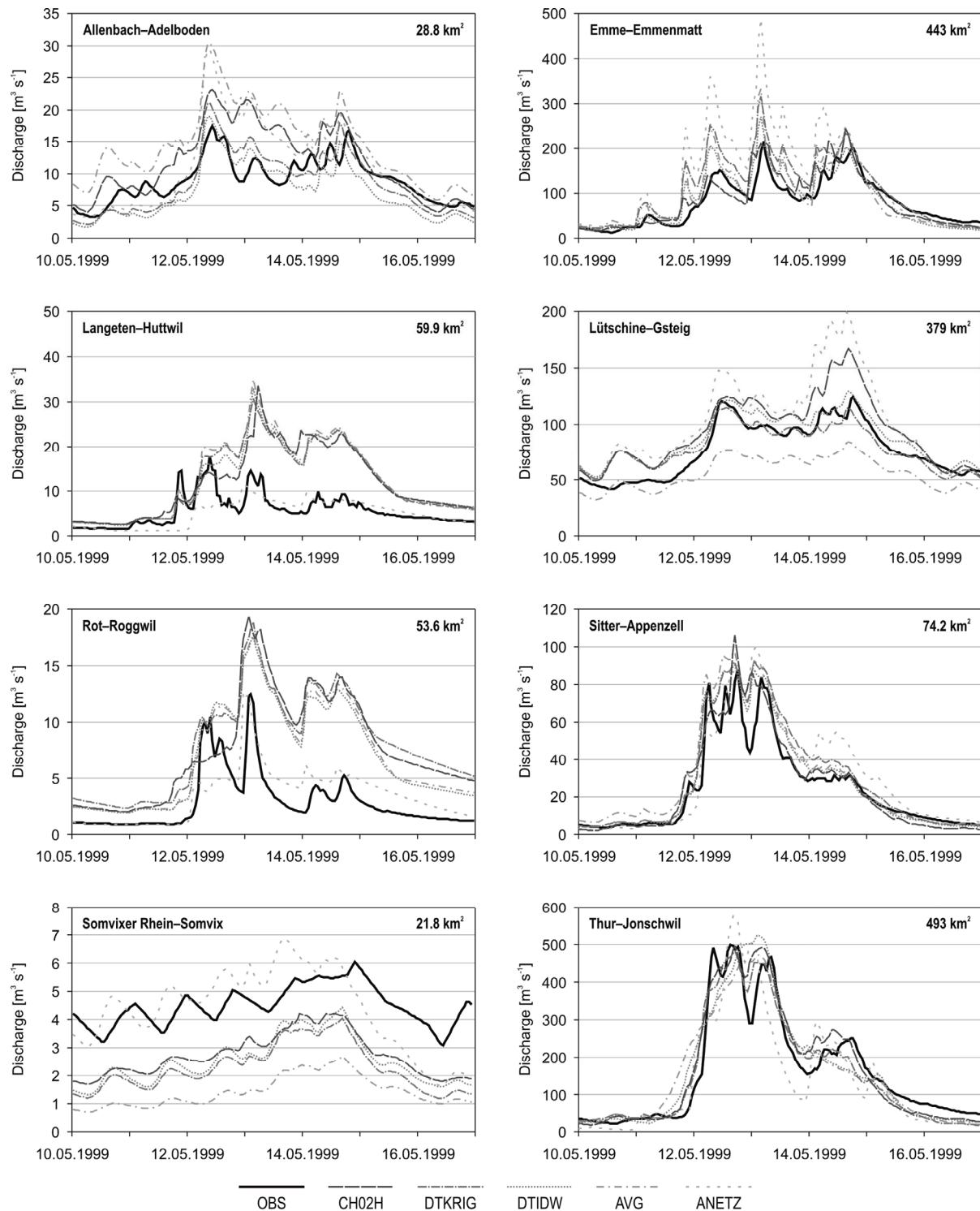


Figure 7.9: Discharge for May 1999 flood event as observed and as simulated using different precipitation inputs (each with input-specific flood calibration); CH02H: radar-aided, DTKRIG: Detrended Kriging, DTIDW: Detrended Inverse Distance Weighting, AVG: average of altitude zones, ANETZ: nearest station from automatic network.

Abbildung 7.9: Beobachtete und mit verschiedenen Varianten des Niederschlagsinputs simulierte Abflüsse für das Pfingsthochwasser 1999 (jeweils inputspezifische Kalibrierung auf Hochwasser); CH02H: radargestützt, DTKRIG: Detrended Kriging, DTIDW: Detrended Inverse Distance Weighting, AVG: Gebietsmittel, ANETZ: nächstliegende Station des automatischen Messnetzes.

7.3.4 Erweiterung: Sensitivität bezüglich einer zeitlichen Verschiebung

Abschliessend soll erörtert werden, wie entscheidend die korrekte zeitliche Referenzierung der Niederschlagsdaten für die Güte der Simulationsresultate ist. Dazu muss folgendes vorausgeschickt werden: Wie schon angedeutet bezieht PREVAH sich entsprechend der Referenzierung der gemessenen Abflüsse auf die volle Stunde (erster Wert des Tages: 00⁰⁰ h bis 01⁰⁰ h), im Gegensatz zu den Meteoinputs, welche wie beispielsweise im Fall von CH02H (erster Wert des Tages: 23⁴⁰ h bis 00⁴⁰ h) leicht abweichende Zeitintervalle beschreiben. Die Vor- und Rückverschiebung des für PREVAH verwendeten Niederschlagsinputs soll einerseits zeigen, ob so noch bessere Simulationsresultate erzielt werden können, andererseits kann die diesbezügliche Sensitivität des Modells untersucht werden. Die vorgenommenen Verschiebungen umfassen Beträge von 1, 2, 5 und 10 Stunden. Verschiebungsbezüge von weniger als einer Stunde werden nicht untersucht, da angesichts des betrachteten Skalenbereichs (Mesoskala) und des verwendeten Modelltyps (deterministisches Konzeptmodell) kaum bedeutende Auswirkungen zu erwarten sind; zudem wären geringe Verschiebungen nur mit beträchtlichem Aufwand in den Ablauf der verschiedenen Aufbereitungs-Dienstprogramme zu implementieren.

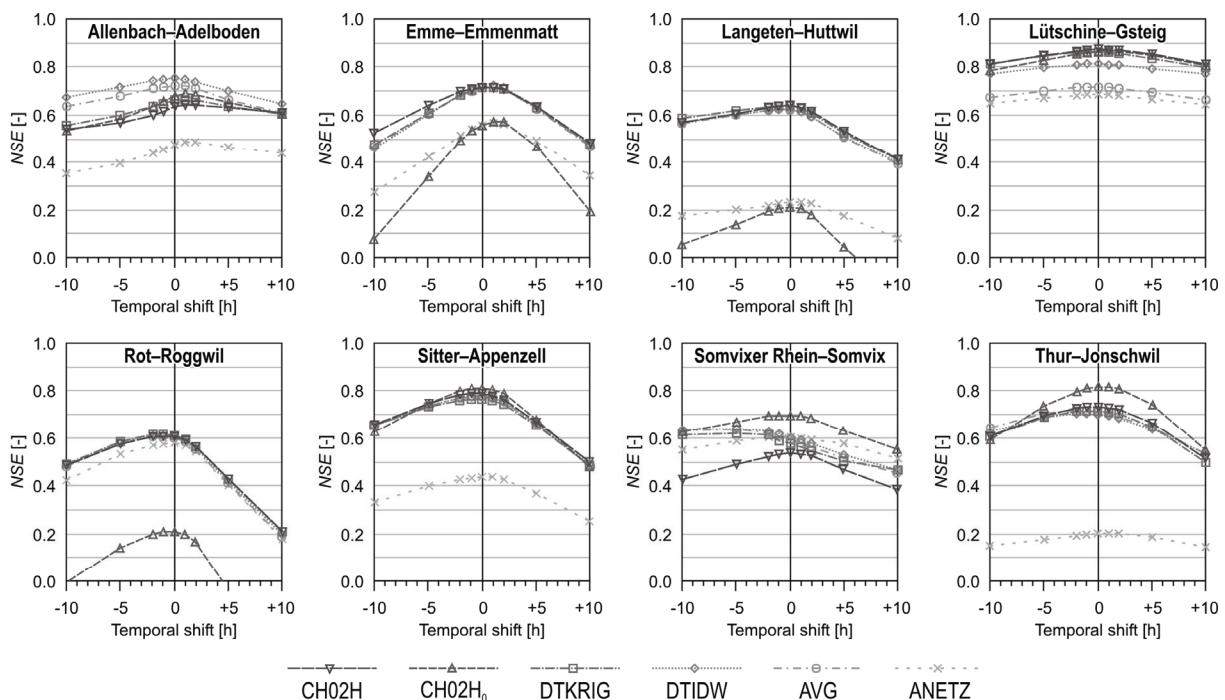


Figure 7.10: Nash-Sutcliffe-Efficiencies (NSE) achieved when precipitation input is shifted forward or backward in time; results for simulation period 1994–2003.

Abbildung 7.10: Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) bei zeitlicher Vor- oder Rückverschiebung des Niederschlagsinputs; Resultate für den Simulationszeitraum 1994–2003.

Die Resultate der zeitlichen Inputverschiebung sind in **Abbildung 7.10** anhand der Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) dargestellt; bewertet wird der gesamte Anwendungszeitraum 1994–2003. Um die Ergebnisse vergleichbar zu halten, wurde als Grundlage nicht eine inputspezifische Kalibrierung, sondern die Mittelwasserkalibrierung verwendet; diese bezieht sich wie in Abschnitt 7.2.3 erläutert auf den mit DTIDW erzeugten Input. Somit basieren alle NSE-Werte auf demselben Parametersatz, Sensitivitätsunterschiede aufgrund abweichender Parameterwahl sind somit ausgeschlossen. Einzig bei CH02H₀ sind die Bilanzkorrekturfaktoren PKOR und SNOKOR wie schon beschrieben auf 0 gesetzt.

Als generelles Resultat zeigt **Abbildung 7.10**, dass die Niederschlagsinputs ohne zeitliche Verschiebung meist die besten Simulationsergebnisse erzielen, während grössere zeitliche Abweichungen zu zunehmend schlechteren Modellgüten führen. Grosse Sensitivität auf zeitliche Verschiebungen zeigen insbesondere Emme-Emmenmatt, Langeten-Huttwil, Rot-Roggwil, Sitter-Appenzell und Thur-Jonschwil, also Gebiete unter dominantem Regen- bis Regen-Schnee-Einfluss (Regimes: pluvial inférieur, nivo-pluvial préalpin und nival de transition) und mit einer Fläche von 50 bis 500 km². Etwas weniger

ausgeprägt ist die Sensitivität bei den kleinen alpinen Gebieten Allenbach–Adelboden (nival alpin, 28.8 km^2) und Somvixer Rhein–Somvix (b-glacio-nival, 21.8 km^2). Beim Allenbach überrascht die geringe Sensitivität, wo doch in Kapitel 6 ein grosser Einfluss der Bilanzkorrekturfaktoren für den Niederschlag festgestellt wurde. Sowohl beim Allenbach wie auch beim Somvixer Rhein dürfte die Sensitivität durch den Einfluss von Schnee – und im Fall des Somvixer Rheins durch Gletscher – vermindert werden; zudem geht es hier eben nicht um die Niederschlagsmengen selbst, sondern um deren zeitliche Referenzierung. In beiden Gebieten ist deshalb davon auszugehen, dass die ungenügende Repräsentativität des Messnetzes einen weitaus grösseren Einfluss auf die Ergebnisse hat als die zeitliche Referenzierung der interpolierten Niederschlagswerte. Die geringste Sensitivität zeigt erwartungsgemäss die Lütschine bei Gsteig, welche wegen ihres ausgeprägt gletscher- und schneedominierten Regimes (a-glacio-nival) weniger direkt durch den Niederschlagsinput kontrolliert wird.

Eine Ausweitung der Untersuchung auf Ganglinien einzelner Ereignisse (vgl. Kapitel 7.3.2 und 7.3.3) würde hier zu weit führen, könnte aber sicherlich weitere aufschlussreiche Informationen zur Qualität der verschiedenen Niederschlagsinputs und der diesbezüglichen Sensitivität von PREVAH liefern.

7.4 Anwendung: Unsicherheit bei den zwei grössten Hochwasserereignissen 1994–2003

Als Anwendungsmöglichkeit können die in Abschnitt 7.2 vorgestellten Inputvarianten dazu eingesetzt werden, um niederschlagsbezogene Unsicherheiten in der Simulation von Abflüssen und insbesondere von Hochwasserereignissen auszuweisen. Die Aussagekraft solcher Analysen beschränkt sich selbstredend auf diejenigen Methoden, welche zur Erzeugung der verwendeten Niederschlagswerte berücksichtigt wurden. Da aber methodisch sehr unterschiedliche Verfahren zur Verfügung stehen, können doch Hinweise darauf erwartet werden, wie stark die Simulationsresultate durch die Unsicherheit im Niederschlagsinput beeinflusst werden.

Entsprechende Grafiken für die pro Gebiet jeweils zwei grössten Hochwasserereignisse der Jahre 1994 bis 2003 sind in **Abbildung 7.11** dargestellt. Die dafür verwendeten Parametersätze wurden jeweils spezifisch pro Niederschlagsinput auf Hochwasser kalibriert (DECURTINS, 2006). Um den Unsicherheitsbereich auf ein sinnvolles Ausmass einzugrenzen und unrealistische Simulationsresultate auszuschliessen, werden von den fünf verfügbaren Niederschlagsinputs pro Einzugsgebiet nur diejenigen drei verwendet, welche im gesamten Anwendungszeitraum 1994–2003 die besten Nash-Sutcliffe-Effizienzen erzielten. Die Resultate fallen sowohl für die verschiedenen Einzugsgebiete wie auch für die beiden jeweils betrachteten Hochwasserereignisse sehr unterschiedlich aus. Geringe Unsicherheit bei guter Übereinstimmung mit der Beobachtung ist beispielsweise bei Emme–Emmennatt 2001 und Sitter–Appenzell 1999 zu verzeichnen. Bei grossen Unsicherheiten liegt zumindest der Spitzenwert häufig im ausgewiesenen Konfidenzbereich (z. B. Langente–Huttwil 1995), vereinzelt auch der gesamte Ereignisverlauf (Lütschine–Gsteig, 2000). In Fällen wie Somvixer Rhein–Somvix 1998 oder Thur–Jonschwil 1995 hingegen wird die Abflussspitze mit allen verfügbaren Niederschlagsinputs unterschätzt; ob dies durch die Parameterwahl, durch die Niederschlagsfelder oder gegebenenfalls durch Modellstruktur und Modellauflösung verursacht ist, müssten genauere Untersuchungen zeigen.

Analog zu den in Kapitel 6.5.2 durchgeföhrten Analysen könnten auch die hier aufgezeigten Unsicherheiten in der Hochwasserabschätzung ausgewiesen werden, indem aus den Jahresspitzen der verschiedenen Simulationsresultate eine Extrapolation erstellt wird.

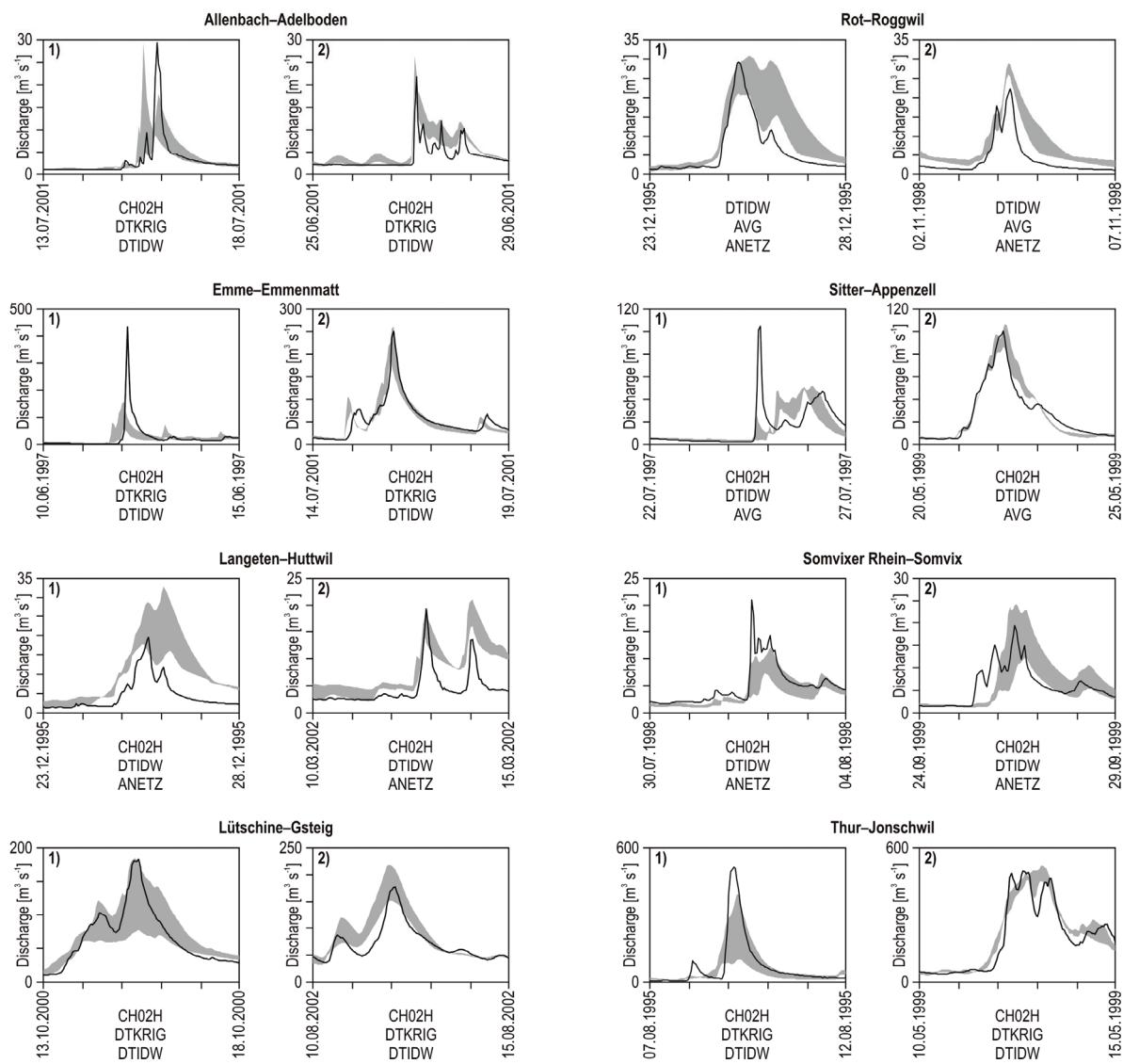


Figure 7.11: Simulation of the two largest floods 1994–2003 per catchment, using the three precipitation inputs with best performance in the entire simulation period. All parameter sets were adjusted specifically for the respective precipitation input using flood calibration.

Abbildung 7.11: Simulation der zwei pro Gebiet grössten Hochwasserereignisse 1994–2003 mit den drei im Gesamtzeitraum am jeweils besten abschneidenden Niederschlagsinputs. Alle verwendeten Parametersätze wurden spezifisch für den jeweiligen Niederschlagsinput auf Hochwasser kalibriert.

7.5 Fazit

Eine eindeutig beste Variante des Niederschlagsinputs konnte nicht ermittelt werden, wenngleich die radargestützte Disaggregation von robust interpolierten Tageswerten (CH02H) in einzelnen Analysen leichte Vorteile aufwies. Ausgehend von den durchgeföhrten Untersuchungen kann aber nicht auf systematisch bessere Simulationsresultate mit CH02H geschlossen werden. Insbesondere in Studien für einzelne Gebiete oder Ereignisse muss deshalb von Fall zu Fall entschieden werden, welcher Methodik zur Herstellung des Niederschlagsinputs der Vorzug zu geben ist. Gleichzeitig können die verschiedenen vorgestellten Inputvarianten aber auch verwendet werden, um den Unsicherheitsbereich aufzuzeigen, welcher durch den nicht exakt bestimmbarer Niederschlagsinput entsteht.

Als grosser Vorteil sind die mit CH02H erzeugten Niederschlagsfelder sehr flexibel einsetzbar, beispielsweise, um Niederschlagsszenarien mit hoher meteorologischer Plausibilität zu erzeugen. So

konnten beispielsweise in Studien zum Hochwasser 2005 realistische Verschiebungen und Aufhöhungen des gesamten Niederschlagsfeldes vorgenommen werden (WEINGARTNER ET AL., 2007; SCHWANBECK ET AL., in Vorbereitung). In zukünftigen Untersuchungen zu bedenken ist des weiteren die Aussage von JOHANSSON (2000), dass vor allem für die Anwendung in ungemessenen Gebieten eine robuste Interpolationsmethode von grosser Wichtigkeit ist: Da nämlich im Regionalisierungsfall keine Möglichkeit zur Kalibrierung der freien Modellparameter besteht, können zufällige Fehler im meteorologischen Input nicht ausgeglichen werden. Die radargestützte Interpolation könnte diesbezüglich Vorteile aufweisen; dieser Punkt wird in der vorliegenden Arbeit allerdings nicht untersucht.

Nachteilig für das in dieser Arbeit anvisierte Ziel ist, dass die radargestützten Niederschlagsfelder erst ab 1992 vorliegen. Dies verringert den Anwendungszeitraum der Langzeitsimulation, was wiederum zu einer geringeren Datenbasis für die Extrapolation seltener Hochwasser führt. Da sich mit den hochauflösenden Feldern von CH02H kein "Quantensprung" in der Simulation seltener Hochwasser erreichen liess, ist eine Anwendung im vorliegenden Projekt wegen der schlechteren Extrapolationsbasis gegenwärtig nicht gerechtfertigt.

Die Interpolation mit den beiden linearen distanzabhängigen Verfahren Inverse Distance Weighting (DTIDW) und Kriging (DTKRIG) hat in den Simulationsresultaten kaum grosse Unterschiede gezeigt. Damit bestätigt sich die in der Methodenbeschreibung (Abschnitt 7.2.2) gemachte Vermutung, dass die beiden Verfahren unter den praktischen Anwendungsbedingungen in der Schweiz gleichwertige Resultate erzielen; es ist anzunehmen, dass vor allem die Dichte des Automatischen Messnetzes ANETZ limitierend für die Güte der erstellten Niederschlagsfelder ist und weniger das verwendete Interpolationsverfahren. Deshalb scheint es zulässig, hier weiterhin die mit DTIDW interpolierten Niederschläge zu verwenden.

Kapitel 8

Regionalisierung I: Methoden

Methods for regionalisation are discussed. An overview of regionalisation attempts in literature is followed by introduction of the procedures used in the present study, namely Nearest Neighbours, Kriging, Regression and a combined approach. For assessment of regionalisation success, various criteria are presented; this is followed by introduction of an extensive set of selected catchment attributes.

Die methodischen Grundlagen der Regionalisierung werden diskutiert. Nach einer Übersicht zu entsprechenden Arbeiten in der Fachliteratur werden die hier verwendeten Verfahren Nearest Neighbours, Kriging und Regression sowie ein kombiniertes Verfahren erläutert; weiter sind Kriterien zur Bewertung der Regionalisierung vorzuschlagen. Schliesslich sind die Grundlagen zur Erhebung und Auswahl von Gebietsattributen vorzustellen.

8.1 Grundüberlegungen

8.1.1 Ziel einer Regionalisierung

Das Ziel einer Regionalisierung ist es, eine Grösse für ein Gebiet abzuschätzen, in welchem keine oder nur unzureichende Informationen zu eben dieser Grösse vorliegen (BERAN, 1990). Da es keine allgemeingültigen Regionalisierungsverfahren gibt, muss eine Regionalisierung stets auf einen bestimmten Zweck hin orientiert sein (MOSLEY, 1981). In der vorliegenden Arbeit werden die freien Parameter des hydrologischen Modellsystems PREVAH für Einzugsgebiete geschätzt, für welche keine Messungen des Abflusses zur Verfügung stehen und das Modell somit nicht kalibriert werden kann. Die Abschätzung der Modellparameter eines unkalibrierten Zielgebietes geschieht in der Regel auf Basis kalibrierter Spendengebiete und erfolgt meist mit Hilfe von Gebietsattributen, welche für den gesamten Anwendungsbereich erhebbar sind. Sowohl von den Attributen selbst wie auch von den verschiedenen Regionalisierungsmethoden wird im Folgenden zu sprechen sein.

8.1.2 Bestehende Arbeiten zur Regionalisierung hydrologischer Modelle

Da einerseits lange hydrologische Messreihen nur für relativ wenige Stellen verfügbar sind, andererseits aber viele Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Wasserkreislauf grosse Relevanz haben und typischerweise auch immer für Gebiete ohne Messungen des Abflusses angegangen werden müssen (vgl. Kapitel 1), ist Regionalisierung in der Hydrologie einer der wichtigsten aktuellen Forschungsschwerpunkte. Davon zeugt die grossangelegte Initiative der PUB ("prediction in ungauged basins") der International Association of Hydrological Sciences (IAHS) (siehe z. B. SIVAPALAN ET AL., 2003; FRANKS ET AL., 2005).

Ein grundlegendes Problem bei der Regionalisierung hydrologischer Modelle ist, dass sich kaum universelle Beziehungen zwischen Gebietseigenschaften und den freien Modellparametern finden lassen, da letztere stark von Klimaregion, Modellstruktur und Datengrundlage abhängen (siehe Kapitel 5, 6 und 7; vgl. auch MERZ UND BLÖSCHL, 2004).

Zur Regionalisierung der Parameter hydrologischer Modelle existieren zahlreiche Studien, welche ein grosses Spektrum an Skalen, Zielgrössen und Anwendungsbereichen umfassen. Nachfolgend werden wichtige Beispiele aus mesoskaligen Anwendungen kurz vorgestellt, zusammen mit den für diese Arbeit wichtigen Erkenntnissen. Nebst einem Vertreter eines einfachen Niederschlag-Abfluss-Modells (Unit Hydrograph) stehen hier vor allem prozessorientierte hydrologische Modelle im Vordergrund.

- BURN UND BOORMAN (1993) verwendeten Ähnlichkeitsmasse, um ungemessene Einzugsgebiete in Grossbritannien bezüglich verschiedener Kennwerte eines Unit Hydrograph einzuordnen. Sie kamen unter anderem zum Schluss, dass räumliche Nähe nicht unbedingt ausschlaggebend ist; vor allem die hydrologische Ähnlichkeit bestimme, ob die Parameterübertragung in ein ungemessenes Gebiet erfolgreich ist (vgl. auch MOSLEY, 1981).

- VANDEWIELE UND ELIAS (1995) regionalisierten verschiedene 3-Parameter-Modelle für den mittleren monatlichen Wasserhaushalt in Belgien. Dabei verglichen sie die räumliche Interpolation (Kriging) der Parameter mit einem einfachen Nachbarschaftsverfahren. Das Kriging schnitt in dieser Untersuchung besser ab, allerdings wurden beim Nachbarschaftsverfahren nur räumliche und keine physikalischen Ähnlichkeitsbeziehungen berücksichtigt – was gemäss BURN UND BOORMAN (1993) nicht optimal ist.
- SEFTON UND HOWARTH (1998) benutzten multiple Regressionen mit Gebietsattributen, um ein täglich aufgelöstes Niederschlag-Abfluss-Modell mit 6 Parametern für England und Wales zu regionalisieren. Die Auswahl der in der Regression verwendeten Attribute erfolgte aufgrund statistischer Verfahren und Überlegungen zu hydrologisch sinnvollen Größen.
- SEIBERT (1999) verwendete verschiedene Regressionsfunktionen mit zwei Parametern, um für schwedische Einzugsgebiete Beziehungen zwischen den Parametern des HBV-Modells und Gebietsattributen herzustellen. Nur für 6 der 13 Parameter konnten ausreichend signifikante Beziehungen gefunden werden, für die anderen Parameter wurde der Medianwert aller kalibrierten Gebiete verwendet. Die Beziehungen konnten zum Teil physikalisch erklärt werden, widersprachen aber vereinzelt auch den physikalischen Grundlagen des Modells.
- PEEL ET AL. (2000) setzten die sieben Parameter eines einfachen Konzeptmodells in Beziehung zu Gebietsattributen, um monatliche Abflüsse in Australien zu regionalisieren. Dominante Einflussgrösse war ein Klimaindikator, und eine Aufteilung der Regionalisierung nach Klimazonen brachte bessere Resultate als eine für alle Gebiete identische Regionalisierung – in diesem Fall ist dies vermutlich auf die Bedeutung von Trockenperioden im Anwendungsgebiet zurückzuführen. Für den Klimaindikator fanden sich mit allen freien Modellparametern signifikante Korrelationen, weitere Zusammenhänge bestanden mit Attributen zu Boden und Relief.
- LAMB ET AL. (LAMB, 1999; LAMB ET AL., 2002; CALVER ET AL., 2004; LAMB UND KAY, 2004) regionalisierten vier von total fünf Parametern eines konzeptuellen Niederschlag-Abfluss-Modells für Grossbritannien aufgrund von Geologie, Bodenbeschaffenheit, Gebietsgeometrie, Anordnung der Flussläufe, Landnutzung, klimatischen Eigenschaften und weiteren Standardattributen, welche ohne Abflussdaten ermittelt werden können. Dazu wurde eine univariate multiple Regression verwendet, wobei jeweils ein Parameter regionalisiert und die noch verbleibenden wiederum unter den neuen Bedingungen kalibriert wurden (sequentialles Vorgehen). Bei der Kalibrierung wurde allerdings eine manuelle Auswahl aus verschiedenen Varianten vorgenommen – eine subjektive und nicht automatisierbare Komponente, welche noch verbesserungsfähig scheint (vgl. Kapitel 4.2.2). In ihrer Anwendung auf die Hochwasserabschätzung kamen die Autoren zum Schluss, dass die Unsicherheit in der Extrapolation regionalisierter Langzeitsimulationen von der Grösstenordnung her vergleichbar ist mit derjenigen Unsicherheit, welche bei der Anpassung empirischer Extremwertverteilungen an kurze Messreihen des Abflusses auftritt.
- MERZ ET AL. (MERZ, 2002; MERZ UND BLÖSCHL, 2004; PARAJKA ET AL., 2005; LAAHA UND BLÖSCHL, 2005) verwendeten ein täglich aufgelöstes HBV- Modell mit 11 freien Parametern im Rahmen von räumlich und thematisch sehr umfangreichen Regionalisierungsanwendungen in Österreich. Sie wiesen nach, dass sich die räumliche Parameterinterpolation mittels Kriging gut für eine Regionalisierung eignet. Die besten Resultate erreichten sie aber mit einem "nested catchment approach", bei welchem die Parameter des jeweils nächsten ober- und unterliegenden Pegels gemittelt werden. Dies bedeutet, dass die räumliche Nähe unter Umständen eine geeigneter Grundlage für die Regionalisierung darstellt als andere Gebietseigenschaften – eine Erkenntnis, die früheren Erfahrungen mit der Regionalisierung hydrologischer Größen (MOSLEY, 1981; NATHAN UND McMAHON, 1990A; BURN UND BOORMAN, 1993; REED ET AL., 1999; WEINGARTNER, 1999) wie auch prinzipiellen Überlegungen zum Verteilungsmuster hydrologischer Größen zu widersprechen scheint.
- HUNDECHA UND BÁRDOSSY (2004) regionalisieren ein modifiziertes HBV-Modell mit täglichen Inputs und stündlichem internen Rechenschritt für einen Teil des Rheineinzugsgebietes, indem sie die freien Modellparameter mit der Landnutzung und weiteren wichtigen Gebietsattributen (Formindex, Neigung, Grösse) verknüpften. Dazu wurde jeweils eine generelle Transferfunktion von den Gebietsattributen auf die Modellparameter berechnet (stark sensitive Parameter) oder geschätzt (wenig sensitive Parameter). Anstelle der Modellparameter wurden anschliessend die Parameter der Transferfunktion kalibriert, indem das Modell jeweils simultan mit einer Transferfunktion für alle Gebiete ausgeführt und anschliessend bewertet wurde. Vorteil dieser eleganten, aber auch relativ aufwendigen Methode ist, dass die Modellparameter dabei tatsächlich direkt mit den Gebietsattributen verknüpft sind.

- YOUNG (2006) regionalisierte 260 mesoskalige Einzugsgebiete in Grossbritannien im Hinblick auf Fragen der Wasserressourcen. Beste Ergebnisse erzielte hier der Regressionsansatz, der Autor merkt aber an, dass die Modellparameter deshalb nicht unbedingt eine grosse physikalische Relevanz haben müssen. Die konzeptuellen Vorteile eines Nearest-Neighbour-Verfahrens – die interne Abstimmung der Parametersätze aus den Spendergebieten wird nicht verändert – werden hervorgehoben.
- OUDIN ET AL. (eingereicht) untersuchten verschiedene Regionalisierungsansätze mit zwei täglich aufgelösten Niederschlag-Abfluss-Modellen (4 resp. 6 freie Parameter), um die Kenntnisse zur Regionalisierung im Generellen zu vertiefen. Als Grundlage dienten Modellierungen für 913 gemessene Einzugsgebiete in Frankreich. Die besten Ergebnisse wurden erreicht, indem die räumliche Nähe als Ähnlichkeitsmaß für eine Parameterübertragung verwendet wurde; dies bedeutet einen Konsens mit den Erkenntnissen aus Österreich (PARAJKA ET AL., 2005). Nur sehr schlechte Ergebnisse zeigte hingegen der Regressionsansatz – im Widerspruch zur Studie von YOUNG (2006). Die Autoren merken an, dass das schlechte Abschneiden der Regression wahrscheinlich durch das Fehlen von Bodenkarten für Frankreich bedingt ist.

Anhand dieser Übersicht kann bestätigt werden, dass es kein universell geeignetes Regionalisierungsverfahren gibt – die Schlussfolgerungen der verschiedenen Studien widersprechen sich sogar vereinzelt. Somit existiert auch kein Regionalisierungsverfahren, welches für die Anwendung im Rahmen der vorliegenden Arbeit besonders geeignet erscheint. Offenbar hängt die Güte der Resultate von den spezifischen Bedingungen der jeweiligen Studie ab, etwa vom Anwendungsbereich und vom Anwendungsziel, aber auch vom verwendeten Modell und der dabei angestrebten zeitlichen und räumlichen Auflösung.

8.1.3 In dieser Arbeit verwendete Regionalisierungsansätze

Die Abschätzung hydrologischer Größen für ungemessene Gebiete ist im Alpenraum besonders schwierig, da die hydrologischen Bedingungen hier eine grosse Variabilität aufweisen (PARAJKA ET AL., 2005). Gleichzeitig sind die Messnetze aber weniger dicht als in tieferen Lagen, was wiederum bedeutet, dass weniger Gebiete kalibriert und als Spendergebiete verwendet werden können. Wichtig ist vor allem, eine ausreichende Abdeckung des zu regionalisierenden Anwendungsbereichs mit kalibrierten Spendergebieten zu erreichen (siehe SEIBERT, 1999). Als Grundlage der hier vorzunehmenden Regionalisierung stehen 140 erfolgreich kalibrierte mesoskalige Einzugsgebiete zur Verfügung. Für diese Spendergebiete wurden die freien Modellparameter anhand des gemessenen Abflusses nach einem einheitlichen Schema auf Standardbedingungen (Mittelwasserkalibrierung, Kapitel 3) und anschliessend zusätzlich auf den Hochwasserbereich (Hochwasserkalibrierung, Kapitel 4) kalibriert.

Die im Folgenden durchgeführte Übertragung der freien Modellparameter auf ungemessene Gebiete (Regionalisierung) geschieht unter Verwendung von Gebietsattributen. Diese müssen repräsentativ und eindeutig bestimmbar, vor allem aber auch für den gesamten Anwendungsbereich erhebbar sein (siehe WEINGARTNER, 1999). Zudem ist die Qualität der zugrundeliegenden räumlichen Informationen sehr wichtig (PFAUNDLER, 2001) – je nach Attribut muss diese auch für die Schweiz kritisch beurteilt werden, beispielsweise was Bodeneigenschaften oder Starkniederschläge betrifft.

Mit Hilfe der Gebietsattribute ist es anschliessend möglich, die unbekannten Modellparameter eines Zielgebietes aus den kalibrierten Spendergebieten abzuschätzen. In dieser Arbeit sollen dazu drei Verfahren erprobt werden:

- **NNBR:** Übertragung kompletter und unveränderter Parametersätze aus einem oder mehreren ähnlichen Gebieten (*Nearest Neighbours*) (Abschnitt 8.3),
- **KRIG:** Räumliche Interpolation der Modellparameter mittels *Kriging* (Abschnitt 8.4) sowie
- **REGR:** Ableiten der Modellparameter aus *Regressionsbeziehungen* zwischen Gebietsattributen und Modellparametern (Abschnitt 8.5).

Diese Auswahl basiert auf der oben vorgestellten Literatur und bezieht Überlegungen zur Eignung für die angestrebte Anwendung in der Schweiz mit ein. Der sehr pragmatische und in Österreich mit Erfolg angewandte "Nested Approach" (MERZ UND BLÖSCHL, 2004; siehe Abschnitt 8.1.2) kam nicht in Frage, da für ein zu regionalisierendes Gebiet sowohl im ober- wie auch im unterliegenden Gewässerabschnitt jeweils ein gemessenes und somit kalibrierbares Gebiet zur Verfügung stehen muss; diese Bedingung ist als eine zu grosse Einschränkung einzustufen, wenn entsprechend dem Ziel dieser Arbeit beliebige Gebiete regionalisiert werden sollen.

Da für alle drei ausgewählten Ansätze zahlreiche Konfigurationsmöglichkeiten bestehen, muss im nachfolgenden Kapitel 9 jeweils eine möglichst optimale Einstellung der verschiedenen Freiheitsgrade gefunden werden. Dieser Feinabstimmung der Regionalisierungsmethoden folgt in Kapitel 10 ein Vergleich der entsprechenden Resultate. Dabei wird unter anderem auch eine Kombination der drei obengenannten Regionalisierungsverfahren getestet:

- **COMB:** *Kombination* der Verfahren NNBR, KRIG und REGR durch Bildung einer medianen Abflussganglinie (Methodik siehe Abschnitt 8.6).

Aus der Literaturstudie ergibt sich zusätzlich, dass eine Aufteilung des Anwendungraums in Regionen (z. B. Klimaregionen) vorteilhaft sein könnte, da dadurch etwas homogenere Sätze von Spendergebieten geschaffen werden können. Es soll deshalb auch untersucht werden, ob eine räumlich differenzierte Regionalisierung des Modells bessere Resultate bringt. Als Grundlage dazu scheinen die Unterteilung nach Klimaregionen und nach Hochwasserregionen am ehesten geeignet. Zudem könnte eine Differenzierung nach mittlerer Gebietshöhe sinnvoll sein (siehe Abschnitt 8.2.9).

Schliesslich soll auch überprüft werden, wie gut die drei methodisch anspruchsvolleren Regionalisierungsmethoden und das kombinierte Verfahren gegenüber sehr einfachen Ansätzen abschneiden. Deshalb werden ergänzend zwei sehr rudimentäre Verfahren angewendet, nämlich:

- **MEAN:** Pro Parameter *Mittelwertbildung* aus den Werten aller erfolgreich kalibrierten Gebiete. Um eine gewisse Differenzierung zu erreichen, werden die Gebiete nach ihrer mittleren Höhe in drei Gruppen unterteilt, für welche jeweils spezifische Parametermittelwerte gebildet werden. Die Details der Höheneinteilung können Abschnitt 8.2.9 entnommen werden.
- **DEFA:** Einsetzen der unkalibrierten Parameterstartwerte (*Default-Werte*), wie sie zu Beginn der Kalibrierung festgelegt werden.

Die Regionalisierung wird entsprechend dem Ziel dieser Arbeit für die hochwasserkalibrierten Parametersätze entwickelt. Ob sich das gefundenen Verfahren aber auch die mittelwasserkalibrierten Parametersätze eignet, wird theoretisch (Abschnitt 8.8) und auch praktisch (Kapitel 10.4) noch zu untersuchen sein.

8.1.4 Zu regionalisierende PREVAH-Parameter

Wie bereits in Kapitel 2.3.3 dargelegt, wurde versucht, die Anzahl der freien – und somit zu regionalisierenden – Parameter im Hinblick auf die Anwendung in ungemesenen Gebieten zu reduzieren. Da PREVAH aber ausgewählt wurde, weil seine Eignung für Einzugsgebiete der Schweiz bereits umfangreich dokumentiert ist (beispielsweise GURTZ ET AL., 1997, 1999 und 2003; KLOK ET AL., 2001; ZAPPA, 2002; VERBUNT ET AL., 2003; ZAPPA UND GURTZ, 2003; ZAPPA ET AL., 2003; VERBUNT, 2005), wurde bei der Parameterreduktion eher zurückhaltend vorgegangen, um weiter auf die Fülle der bestehenden Anwendungserfahrungen zurückgreifen zu können.

Nicht weiterverfolgt wurde beispielsweise der Versuch, die Basisabflussparameter von PREVAH über geeignete Grundlagen räumlich differenziert festzulegen (GASSER, 2004). Da diese Parameter inhaltlich einen deutlichen Bezug zu kartierten Gebietseigenschaften wie etwa der Geologie oder der Hydrogeologie haben, wurde ursprünglich vermutet, dass eine solche Festlegung machbar ist. Als Grundlage am geeignetsten schien dazu die Untersuchung von SCHWARZE ET AL. (1999), welche sich mit der Regionalisierung von Grundwasserparametern in Festgesteinregionen befasst (zur Methodik siehe auch SCHWARZE ET AL., 1994). Aus dieser Arbeit wurde auch das Teilmmodell SLOWCOMP übernommen, welches die Konfiguration des Grundwassermoduls in PREVAH vorgibt. Es zeigte sich allerdings, dass die von SCHWARZE ET AL. (1999) angegebenen Speicherzeiten nicht ohne weiteres auf das Anwendungsgebiet der Schweiz übertragbar sind (vgl. CORTI, 2003). Zudem waren die Modellparameter für den Grundwasserabfluss weniger stark mit den damit verwandten Gebietsattributen (z. B. Hydrogeologie) korreliert, als dies für eine direkte Festlegung erwünscht war (für Details siehe GASSER, 2004).

Von den 17 freien Parametern von PREVAH in seiner Ursprungsversion sind demnach also deren 12 zu regionalisieren. Für vergletscherte Gebiete kommen noch zwei weitere Parameter hinzu.

Die zugrundeliegenden kalibrierten Parametersätze sind aus prinzipiellen Gründen mit einigen Problemen behaftet, welche die Übertragung auf ungemesene Gebiete erschweren. Vor allem sind die Modellparameter nicht eindeutig festlegbar ("equifinality"; siehe z. B. BEVEN, 2002 und 2006A) und unterliegen gewissen Unsicherheiten (HARLIN UND KUNG, 1992; KUCZERA UND MROCKOWSKI, 1998); zudem werden ihre Werte von der Wahl der Kalibrierungsmethodik beeinflusst (BOTTERWEG, 1995;

SEIBERT, 1997). Die Berücksichtigung dieser Probleme bei der Kalibrierung wurde bereits in Kapitel 3 diskutiert, vertiefte Analysen enthält Kapitel 6. Auf die Konsequenzen bezüglich Regionalisierung wird bei der Diskussion der verschiedenen Regionalisierungsansätze in den Abschnitten 8.3 bis 8.5 noch einzugehen sein.

8.1.5 Testgebiete und Simulationsperiode

Wegen des grossen Rechenaufwandes müssen Entwicklung und Feinausarbeitung der Regionalisierungsmethoden anhand einer reduzierten Anzahl von Testeinzugsgebieten erfolgen. Erste grobe Experimente zu den verschiedenen Regionalisierungsansätzen und deren Rahmenbedingungen erfolgten anhand der 17 Testgebiete der Gruppe 1 (vgl. Kapitel 3.1.3). Für die detaillierten Untersuchungen des folgenden Kapitels werden alle 49 Einzugsgebiete der Priorität A als Zielgebiete untersucht – für diese mesoskaligen Gebiete liegen in den Jahren 1984–2003 qualitativ hochwertige Abflussdaten in stündlicher Auflösung vor, und gleichzeitig sind die unterschiedlichen hydrologischen Bedingungen des Anwendungsraums adäquat berücksichtigt. Weiter ist für diese 49 Gebiete eine fundierte Be- trachtung der extrapolierten Jahreshochwasser möglich, welche die Bewertung der Resultate im Hin- blick auf das Ziel dieser Arbeit gewährleistet. Als Spendergebiete werden stets alle 140 erfolgreich kalibrierten Einzugsgebiete verwendet, womit die Untersuchungen auf der besten hier möglichen Da- tengrundlage basieren.

Um die umfangreichen Konfigurationsmöglichkeiten innerhalb der drei Regionalisierungsansätze grob zu untersuchen, wurde der Zeitraum 1994–1997 verwendet; die Vergleiche zwischen den definitiv ausgearbeiteten Regionalisierungsmethoden selbst werden dann anhand des Zeitraumes 1984–2003 durchgeführt. Alle Simulationen erfolgen jeweils mit einem vorgeschalteten Initialisierungsjahr.

Damit nicht Einzugsgebiete mit mangelhaft kalibrierten Parametersätzen als Spendergebiete verwen- det werden, kann ein unterer Schwellenwert der Nash-Sutcliffe-Efficiency vorgegeben werden. Ge- biete werden nur dann als Spendergebiete verwendet, wenn ihre Modellgüte über dem geforderten Wert liegt. Übereinstimmend mit dem bereits bei der Modellkalibrierung beschriebenen Verfahren zum Ausschluss mangelhaft kalibrierter Gebiete sollte dieser Wert auf 0.2 festgesetzt werden. Der beste- hende Datensatz von 140 Gebieten wird dadurch nicht verkleinert, da für ihn bereits eine minimale Effizienz von 0.2 für alle Kalibrierungsschritte verlangt wurde (vgl. Kapitel 5.1).

8.1.6 Vorgehen

Da für alle Regionalisierungen zahlreiche Details festgelegt werden müssen, ist es erforderlich, für die einzelnen Verfahren – nach ersten groben Experimenten – eine Feinabstimmung vorzunehmen. Diese wird in Kapitel 9 diskutiert, gefolgt von einer eingehenden Analyse der Resultate (Kapitel 10). Im vor- liegenden Kapitel sind nun die Methoden und die Datengrundlagen im Detail zu erläutern.

Alle im Folgenden vorgestellten Regionalisierungsverfahren wurden in einem Hilfsprogramm zusam- mengefasst, welches die Regionalisierung und die anschliessende Modellierung selbstständig abwickelt. Dabei wurde auf möglichst grosse Flexibilität geachtet: Zahlreiche Einstellungen zu den Regionalisierungsverfahren können in einer Steuerdatei geändert werden, und das Hinzufügen neuer Gebiete – sowohl kalibrierter Spendergebiete wie auch unkalibrierter Zielgebiete – ist ohne übermässigen Aufwand möglich.

8.2 Auswahl und Erzeugung von Gebietsattributen

8.2.1 Anforderungen und Auswahl

Als erstes muss als Grundlage der beiden Regionalisierungsmethoden Nearest Neighbours (NNBR) und Regression (REGR) ein breit abgestützter Satz von Gebietsattributen erstellt werden, mit wel- chem die einzelnen Einzugsgebiete möglichst gut beschrieben werden können. Für den Regionalisie- rungsansatz auf Basis von Kriging (KRIG) müssen lediglich die Koordinaten des Gebietsschwerpunk- tes bekannt sein, weitere Gebietsattribute werden nicht benötigt.

Bei der Attributerhebung sollen insbesondere Eigenschaften berücksichtigt werden, welche die Ein- zugsgebiete bezüglich ihres hydrologischen Verhaltens gut differenzieren (siehe dazu auch PFAUNDLER, 2001). Zudem müssen die Gebietsattribute aus digitalen Grundlagen ableitbar sein, wel- che für das gesamte Anwendungsgebiet (nordalpine Schweiz) verfügbar sind. Dazu sind auf der einen

Seite digitale Karten verfügbar, welche physiographische, geologische oder hydrologische Eigenschaften des Raums beschreiben (BFS, 2003). Andererseits stehen auch alle Karten und Tabellen zur Verfügung, welche über das Preprocessing von PREVAH erstellt werden und somit für sämtliche untersuchten Gebiete vorhanden sind – insbesondere können dadurch auch Werte zur Meteorologie und zur Klimatologie sehr einfach erhoben werden.

Da der Abfluss eine integrale Antwort auf die physiographischen und klimatischen Bedingungen eines Einzugsgebietes darstellt (DRACOS, 1980), ist eine Vielzahl von Attributen denkbar, um das hydrologische Verhalten eines Gebietes zu beschreiben. Eine jeweils auf Anwendungsbereich, Anwendungsziel und hydrologisches Modell bezogene Auswahl findet sich beispielsweise in den Studien von PEARSON (1991), SEFTON UND HOWARTH (1998), SEIBERT (1999), PEEL ET AL. (2000), PFAUNDLER (2001), BLÖSCHL UND MERZ (2002), LAMB UND KAY (2004), MERZ UND BLÖSCHL (2004) sowie BÁRDOSSY ET AL. (2005); grundsätzlichere Überlegungen stellt z. B. MCCUEN (1998) an. Für die Schweiz ist vor allem die sehr ausführliche Zusammenstellung von BREINLINGER ET AL. (1992) relevant (siehe auch GAMMA, 1992, und BREINLINGER, 1996), eine grosse Zahl von Attributen publizierte zudem ASCHWANDEN (1996). Für die vorliegende Arbeit wurden aus der erwähnten Literatur geeignet erscheinende Attribute ausgewählt und gegebenenfalls angepasst; dabei sollte auch das Hochwasserverhalten der Gebiete adäquat berücksichtigt werden. Wo Lücken bestanden, wurden weitere Attribute hinzugefügt; dies betrifft insbesondere das Niederschlagsgeschehen, welches für den Hochwasserverlauf ein wichtiger Faktor ist, in den oben erwähnten Arbeiten aber kaum berücksichtigt wird.

Im Sinne einer breiten Palette, aus welcher dann mittels statistischer Verfahren und anhand der konkret erreichten Regionalisierungsgüten eine Auswahl getroffen werden soll, wurde die Zusammenstellung von Gebietsattributen bewusst umfangreich gestaltet. Die Anzahl erhobener Gebietsattribute ist mit 80 im Vergleich zu anderen Studien sehr hoch (vgl. CASTELLARIN ET AL., 2001). Das Flood Estimation Handbook für Grossbritannien (IH, 1999) empfiehlt beispielsweise ebenso wie CALVER ET AL. (2004) höchstens 3 Attribute zur Übertragung, SAMANIEGO UND BÁRDOSSY (2005) wählten 7 Attribute aus. Die ausgeprägte Variabilität der hydrologischen Bedingungen in der Schweiz sowie die relativ grosse Anzahl freier Parameter in PREVAH lassen allerdings erwarten, dass für die Regionalisierung mehr Informationen und somit mehr Gebietsattribute zur Verfügung stehen müssen als in anderen Arbeiten.

Für die Auswahl der Attribute sind verschiedene Verfahren denkbar:

- Die Auswahl von Attributen, welche gegenseitig möglichst unkorreliert sind, d. h. eine möglichst grosse Menge an ungeteilter Information enthalten.
- Der Einsatz von Expertenwissen, d. h. eine Auswahl aufgrund hydrologischer Überlegungen. Dabei können beispielsweise Attribute ausgewählt werden, welche die Unterschiede der Gebiete bezüglich Abflussbildung, Grundwasserverhalten o. ä. besonders gut charakterisieren.
- Ein Vorgehen aufgrund statistischer Überlegungen, also die Suche nach Attributen, welche die Gebiete am deutlichsten trennen können. Hinderlich ist dabei, dass es keine eindeutige Zielgröße gibt, auf welche man diese Trennschärfe beziehen kann. Die Verwendung von Hochwasserkennzahlen (HQ_x , mHQ , sHQ) wäre nur beschränkt plausibel, da damit die Rahmenbedingungen der hydrologischen Modellierung nicht unbedingt treffend wiedergegeben werden. Deshalb werden die freien Parameter von PREVAH als Zielgröße verwendet; einschränkend wirkt dabei allerdings, dass deren Zusammenhang mit den Gebietsattributen wie schon gezeigt nicht so stark ist wie erwünscht (vgl. Kapitel 6.6.2).

Details zu Auswahlverfahren und den getesteten Varianten können bei MITTELBACH (2006) und FLACH (2006) nachgelesen werden, in der vorliegenden Arbeit werden die jeweils besten Varianten diskutiert.

Die Attribute werden über ein zusätzliches Hilfsprogramm erhoben, welches die berechneten Werte in Tabellenform ausgibt; die so entstandenen Zusammenstellungen dienen einerseits als Ausgangslage für die Regionalisierung, können andererseits aber auch für andere hydrologische Studien verwendet werden. In der Regionalisierungssoftware selbst werden Tabellen zur Korrelation zwischen den verschiedenen Gebietsattributen sowie zur Korrelation zwischen Gebietsattributen und Modellparametern ausgegeben. Diese können als Grundlage für die Auswahl der schliesslich zu verwendenden Attribute dienen.

Für Attribute, welche eine hohe räumliche Variabilität aufweisen (z. B. Bodeneigenschaften, Niederschlag), wurden neben gebietsbezogenen Mittelwerten auch höhere statistische Momente erhoben – Standardabweichung, Schiefe und Wölbung sollen dazu dienen, die räumliche Heterogenität der Gebietscharakteristika zu erfassen. Die genauen Formeln für die Momentenberechnung können beispielsweise SCHÖNWIESE (2000) entnommen werden.

Die Gebietsattribute werden im Folgenden thematisch gruppiert vorgestellt; eine alphabetische Liste der Attribute befindet sich im Anhang.

8.2.2 Attribute zur Physiographie

Physiographische Attribute dienen dazu, ein Einzugsgebiet in Bezug auf naturräumliche Bedingungen zu beschreiben, welche beispielsweise Abflussbildung und Abflusskonzentration massgeblich beeinflussen. Als Datengrundlage diente hier das digitale Höhenmodell (BFS, 2003); wichtige methodische Grundlagen zu Erhebung und Bedeutung dieser Attribute in der Schweiz sind bei GAMMA (1992) zu finden.

Table 8.1: Physiographic catchment attributes.

Tabelle 8.1: Physiographische Gebietsattribute.

Symbol	Explanation	Unit
<i>AREA</i>	catchment area	[km ²]
<i>HAVG</i>	average altitude	[m a. s. l.]
<i>HMIN</i>	minimum altitude	[m a. s. l.]
<i>HMAX</i>	maximum altitude	[m a. s. l.]
<i>RELI</i>	relief energy	[m]
<i>IN03</i>	share of surfaces with inclination <3°	[%]
<i>IN15</i>	share of surfaces with inclination >15°	[%]
<i>IAVG</i>	average inclination	[°]
<i>ASPN</i>	share of north-exposed surfaces	[%]
<i>ASPE</i>	share of east-exposed surfaces	[%]
<i>ASPS</i>	share of south-exposed surfaces	[%]
<i>ASPW</i>	share of west-exposed surfaces	[%]
<i>PERI</i>	catchment perimeter	[m]
<i>CRCL</i>	circularity index	[‐]
<i>SHP1</i>	shape parameter as to HUNDECHA AND BÁRDOSSY (2004)	[‐]
<i>SHP2</i>	shape parameter as to LUTZ (1984)	[‐]

Zu den in **Tabelle 8.1** aufgeführten Attributen ist folgendes anzumerken:

- Die mittlere Gebietshöhe (*HAVG*) korreliert stark mit zahlreichen weiteren Gebietseigenschaften wie z. B. Reliefenergie, Bodentiefe, Niederschlagsmenge oder Temperatur. Ihre Verwendung zusammen mit anderen Attributen ist also nicht sinnvoll, weil dann unter Umständen dieselbe Information mehrfach repräsentiert ist. Diesem bekannten Problem wird im Verlaufe der Regionalisierung begegnet, indem die Einzugsgebiete nach mittlerer Gebietshöhe in drei Zonen aufgeteilt werden; *HAVG* wird anschliessend nicht mehr als Gebietsattribut verwendet (siehe Abschnitt 8.2.9).
- Die Reliefenergie berechnet sich als Differenz zwischen *HMAX* und *HMIN*.
- Die Klasseneinteilung für die Hangneigung (*IN03*, *IN15*) begründet sich gemäss GAMMA (1992) folgendermassen: Flächen mit einer Neigung von weniger als 3° (*IN03*) tendieren zu Muldenrückhalt und verhindern weitgehend Oberflächenabfluss, bei Hangneigungen von über 15° (*IN15*) ist hingegen mit verstärktem Oberflächenabfluss zu rechnen.
- Der Kreisförmigkeitsindex *CRCL* berechnet sich mit Hilfe von Gebietsfläche (*AREA*) und Gebietsumfang (*PERI*) nach GAMMA (1992) als

$$CRCL = 4 \cdot \pi \frac{AREA}{PERI^2}, \quad \text{Gleichung 8.1}$$

wobei *CRCL* für eine perfekte Kreisform den Wert 1 annimmt. Je elliptischer das Gebiet, desto kleiner wird *CRCL*.

- Der erste Formparameter lehnt sich an HUNDECHA UND BÁRDOSSY (2004) an und wird berechnet als

$$SHP1 = \frac{AREA}{R_{\max}^2}, \quad \text{Gleichung 8.2}$$

wo R_{\max} die Distanz zwischen Gebietsschwerpunkt und dem am weitesten entfernten Punkt des Einzugsgebietes angibt. Auch dieses Attribut nimmt für ein völlig kreisförmiges Gebiet den Wert 1 an und strebt mit zunehmender Ellipsenform gegen 0.

- Der zweite Formparameter stammt schliesslich von LUTZ (1984) und ist definiert als

$$SHP2 = \frac{L}{L_C}. \quad \text{Gleichung 8.3}$$

L bezeichnet die maximale Fliessweglänge im Gewässernetz, L_C bezeichnet die im Gewässernetz gemessene Strecke zwischen dem Punkt mit grösster Nähe zum Gebietsschwerpunkt und dem Gebietsauslass. Als Grundlage wurde das im Preprocessing von PREVAH erzeugte Gewässernetz in einer Rasterung von 500 m × 500 m verwendet.

8.2.3 Attribute zur Lage im Raum

Zur Charakterisierung der räumlichen Lage der Einzugsgebiete dienen die Gebietsschwerpunkte im rechtwinkligen Kilometer-Koordinatensystem der Schweiz (vgl. **Tabelle 8.2**); sie sind vor allem für die Anwendung im Kriging-Verfahren prädestiniert (siehe Abschnitt 8.4). Es ist anzumerken, dass im nordalpinen Raum insbesondere *CTRY* stark mit weiteren Gebietsattributen korreliert, da in Nord-Süd-Richtung gleichzeitig der Anstieg vom Mittelland zu den zentralen Alpenmassiven stattfindet; somit sind ähnliche Zusammenhänge zu erwarten, wie sie bei der mittleren Gebietshöhe beobachtet werden können.

Table 8.2: Catchment attributes referring to position in physical space.

Tabelle 8.2: Gebietsattribute zur Lage im Raum.

Symbol	Explanation	Unit
<i>CTRX</i>	easting of catchment centroid in Swiss co-ordinate system	[km]
<i>CTRY</i>	northing of catchment centroid in Swiss co-ordinate system	[km]

8.2.4 Attribute zu Landnutzung und Bodeneigenschaften

Die Eigenschaften der Landoberfläche und des Bodens spielen bei der Abflussbildung eine entscheidende Rolle (LÖHMANNSRÖBEN, 2002). Zwar werden solche Eigenschaften in der Modellierung mit PREVAH im Bodenfeuchtemodul bereits berücksichtigt (vgl. GURTZ ET AL., 1997), sie können aber dennoch wichtige zusätzliche Informationen zur Gebietsbeschreibung beinhalten. Grenzen sind der Aussagekraft von Bodeneigenschaften gesetzt, weil Makroporen und andere Struktureigenschaften gleichfalls sehr wichtig, aber kaum zu kartieren sind (siehe BLÖSCHL UND MERZ, 2002).

Wichtig ist ebenfalls der Topographische Index (KIRKBY, 1975; siehe auch BEVEN UND KIRKBY, 1979); gestützt auf das digitale Höhenmodell charakterisiert er die Sättigungsbereitschaft einer Flächeneinheit (Rasterzelle) und weist und damit auf das Potenzial zur Bildung von schnellen Abflusskomponenten hin (siehe auch WESTERN ET AL., 1999). In dieser Arbeit wird der bodentopographische Index verwendet, welcher zusätzlich die Transmissivität des Bodens einbezieht (BEVEN ET AL., 1995).

Da bei hydraulischer Leitfähigkeit, nutzbarer Feldkapazität und bodentopographischem Index nicht nur der Mittelwert über das Gebiet, sondern auch die räumlichen Verteilungseigenschaften eine Rolle spielen, wurden zu diesen Grössen zusätzlich die höheren statistischen Momente als Gebietsattribute bereitgestellt.

Datengrundlage der in **Tabelle 8.3** aufgeführten Attribute sind Arealstatistik (BFS, 2003) und Bodeneignungskarte (FAP, 1980; BFS, 2003). Für die gletscherbezogenen Attribute *GLCC* und *GLBL* werden

zusätzlich die im Preprocessing von PREVAH erstellten Gleichgewichtslinien verwendet (siehe Kapitel 2.3.1), für den topographischen Index ($TSM1-TSM4$) wie schon erläutert das digitale Höhenmodell.

Table 8.3: Catchment attributes referring to land use and soil properties.

Tabelle 8.3: Landnutzungs- und bodenbezogene Gebietsattribute.

Symbol	Explanation	Unit
<i>FRST</i>	share of forest areas	[%]
<i>AGRC</i>	share of pastures and arable land	[%]
<i>GLCR</i>	share of glaciated areas	[%]
<i>GLCC</i>	share of glaciated areas, accumulation zone	[%]
<i>GLBL</i>	share of glaciated areas, ablation zone	[%]
<i>BULT</i>	share of urban areas	[%]
<i>ROCK</i>	share of hard-rock areas	[%]
<i>SOLS</i>	share of soil-covered areas	[%]
<i>KWMI</i>	hydraulic conductivity, average	[mm h ⁻¹]
<i>KWM2</i>	hydraulic conductivity, standard deviation	[mm h ⁻¹]
<i>KWM3</i>	hydraulic conductivity, skewness	[\cdot]
<i>KWM4</i>	hydraulic conductivity, kurtosis	[\cdot]
<i>NFM1</i>	net field capacity, average	[%]
<i>NFM2</i>	net field capacity, standard deviation	[%]
<i>NFM3</i>	net field capacity, skewness	[\cdot]
<i>NFM4</i>	net field capacity, kurtosis	[\cdot]
<i>TSM1</i>	soil-topographic index, average	[\cdot]
<i>TSM2</i>	soil-topographic index, standard deviation	[\cdot]
<i>TSM3</i>	soil-topographic index, skewness	[\cdot]
<i>TSM4</i>	soil-topographic index, kurtosis	[\cdot]

8.2.5 Attribute zu beitragenden Flächen

Das Konzept der beitragenden Flächen basiert auf der Annahme, dass bei einem Hochwasserereignis nur gerinnenähe Flächen relevant für den Spitzenabfluss sind. Gemäß KÖLLA (1987) trägt bei einem HQ_{20} das Gelände bis zu einer Distanz von 100 m beidseitig des Gerinnes zum Hochwasser bei. Da es in der vorliegenden Arbeit um eine Regionalisierung mit Schwerpunkt auf den Hochwasserabflüssen geht, ist dieser Ansatz für die Betrachtung von Gebietsattributen als wichtig einzustufen.

Table 8.4: Catchment attributes referring to contributing areas.

Tabelle 8.4: Auf beitragende Flächen bezogene Gebietsattribute.

Symbol	Explanation	Unit
<i>FBTR</i>	share of contributing areas (average distance to channel 250 m)	[%]
<i>BFST</i>	share of forest area in contributing areas	[%]
<i>BAGR</i>	share of pasture and arable land in contributing areas	[%]
<i>BBLT</i>	share of urban area in contributing areas	[%]
<i>BSLS</i>	share of soil-covered area in contributing areas	[%]
<i>BRCK</i>	share of hard-rock area in contributing areas	[%]

Zur Erhebung der entsprechenden Attribute wurde das im Preprocessing von PREVAH erzeugte Gewässernetz in einer Auflösung von 500 m × 500 m verwendet. Als Generalisierung wurden die beitragenden Flächen als diejenigen Rasterzellen interpretiert, welche in dieser Auflösung als Gewässer klassiert werden. Damit werden im Mittel Flächen mit einer Entfernung von ca. 250 m, maximal aber 500 m zum Gerinne berücksichtigt. Es wird angenommen, dass mit dieser Generalisierung immer noch ein gerinnenäher Bereich identifiziert wird, welcher hochwasserrelevant ist; er ist jedoch nicht wie bei KÖLLA (1987) einem bestimmten Hochwasserabfluss (Jährlichkeit) zuzuordnen.

Zusätzlich wurden auf den beitragenden Flächen (FBTR) auch die Landnutzungseigenschaften erhoben, da diese im gerinnenahen Bereich besonders wichtig für die Abflussbildung im Hochwasserfall sind.

8.2.6 Attribute zu Hydrogeologie und Geologie

Von geologischen und hydrogeologischen Attributen ist Unterscheidungskraft vor allem in Bezug auf die Bildung langsamer Abflussprozesse zu erwarten. Erste Erfahrungen mit der Regionalisierung der entsprechenden Parameter von PREVAH (GASSER, 2004) haben gezeigt, dass die Karte der Grundwasservorkommen (Hydrogeologie) von BITTERLI ET AL. (2004) in dieser Beziehung einen hohen Informationsgehalt besitzt. Die hier ebenfalls verwendete geotechnische Karte (Geologie) (BFS, 2003) ist als Ergänzung nutzbar.

Die hohe Zahl unterschiedener Gesteinstypen in der Karte der Grundwasservorkommen musste auf 7 Klassen generalisiert werden, um sie als hydrogeologischen Indikator in der Regionalisierung verwendbar zu machen. Aus denselben Gründen wurden die Informationen der geotechnischen Karte in 6 Klassen zusammengefasst.

Table 8.5: Hydrogeological catchment attributes (always share in total area in [%]).

Tabelle 8.5: Hydrogeologische Gebietsattribute (jeweils Flächenanteil in [%]).

Symbol	Explanation	Details
HG_1	unconsolidated 1	well-permeable gravel in valley bottoms
HG_2	unconsolidated 2	permeable gravel outside of valley bottoms, sandy gravel, medium- to coarse-grained gravel
HG_3	unconsolidated 3	loamy gravel, fine- to medium-grained debris, moraines
HGKR	karstic rock	carbonate rock: limestone, dolomite, rauhwacke; sulphate-containing rock: gypsum, anhydrite
HGFG	hard rock	fissured and porous, non-karstic hard rock: conglomerates, sandstone, limestone with marl layers; crystalline rock: granite, granodiorites, tonalite.
HG0A	impermeable, unconsolidated.....	clay, silt, fine sands and loamy moraines
HG0B	impermeable hard rock	marl, shale, gneiss and cemented sandstone

Table 8.6: Geological catchment attributes (always share in area in [%]).

Tabelle 8.6: Geologische Gebietsattribute (jeweils Flächenanteil in [%]).

Symbol	Explanation	Details
G_L1	unconsolidated, low permeability.....	loamy silt to clay
G_L2	unconsolidated, variable permeability	silt, sand, gravel, square debris
G_L3	unconsolidated, high permeability	gravel and sand
G_F1	hard rock: pores, fissures or karst	sandstone, arkose, marl schist, carbonate phyllite, carbonate mica schist, slated limestone, siliceous limestone, dolomite, gypsum, radiolarite, conglomerates, granite, diorite, porphyrite, quarzite, gneiss, amphibolite, shale, greenschist, serpetinite, peridotite
G_F2	hard rock: variable permeability.....	marl, sandstone, conglomerate
G_F3	hard rock: impermeable	marl, clay, clay slate, phyllite, marl schist, marl clay

8.2.7 Attribute zu Niederschlag und weiteren Klimavariablen

Durch meteorologische und klimatologische Attribute sollen die Einzugsgebiete bezüglich der Eingangsgrössen des hydrologischen Kreislaufs charakterisiert werden; besondere Aufmerksamkeit ist dabei dem Niederschlag beizumessen, welcher eine massgebliche Grösse für das Hochwasserge schehen ist. Da diese meteorologischen und klimatologischen Gebietseigenschaften in Studien zur Regionalisierung meist untervertreten sind oder überhaupt nicht berücksichtigt werden, wurden für die

vorliegende Arbeit verschiedenste derartige Attribute bereitgestellt (**Tabelle 8.7** und **Tabelle 8.8**), aus welchen bei der Detailausarbeitung der Regionalisierungsansätze eine Auswahl zu treffen ist; dies wird anhand hydrologischer und statistischer Überlegungen sowie mit Hilfe der konkreten Regionalisierungsresultate geschehen (Kapitel 9). Es ist allerdings zu erwarten, dass viele der erhobenen Charakteristika – insbesondere diejenigen des Niederschlags – stark mit der mittleren Gebietshöhe korrelieren (siehe LANG, 1985; BLUMER, 1994).

Table 8.7: Catchment attributes referring to further meteorological variables.

Tabelle 8.7: Weitere meteorologische Gebietsattribute.

Symbol	Explanation	Unit
<i>SSDR</i>	annual average of sunshine duration	[%]
<i>TEMP</i>	annual average temperature	[°C]
<i>T_SP</i>	range of monthly average temperatures	[°C]
<i>VAPO</i>	average vapour pressure	[hPa]
<i>WIND</i>	average wind speed	[m s ⁻¹]

Table 8.8: Catchment attributes referring to precipitation.

Tabelle 8.8: Gebietsattribute zum Niederschlag.

Symbol	Explanation	Unit
<i>PSUM</i>	average annual precipitation sum	[mm]
<i>PAVG</i>	hourly precipitation (≥ 0.02 mm), average	[mm]
<i>PSDV</i>	hourly precipitation (≥ 0.02 mm), standard deviation	[mm]
<i>PSKW</i>	hourly precipitation (≥ 0.02 mm), skewness	[\cdot]
<i>PKRT</i>	hourly precipitation (≥ 0.02 mm), kurtosis	[\cdot]
<i>PCVA</i>	hourly precipitation (≥ 0.02 mm), coefficient of variation	[\cdot]
<i>P_MD</i>	hourly precipitation (≥ 0.02 mm), average Julian Date (<i>MD</i>)	[\cdot]
<i>P_RR</i>	hourly precipitation (≥ 0.02 mm), variability of Julian Date (<i>r</i>)	[\cdot]
<i>PMXA</i>	average of maximum annual precipitation intensities	[mm h ⁻¹]
<i>PMXX</i>	maximum precipitation intensity	[mm h ⁻¹]
<i>PMRL</i>	relation of <i>PMXX</i> to <i>PMXA</i>	[\cdot]
<i>PDMD</i>	maximum 24 h-precipitation, average Julian date (<i>MD</i>)	[\cdot]
<i>PDRR</i>	maximum 24 h-precipitation, variability of Julian Date (<i>r</i>)	[\cdot]
<i>PXXA</i>	maximum 1 h-precipitation intensity with return period 2.33 a	[mm]
<i>PXXB</i>	maximum 1 h-precipitation intensity with return period 100 a	[mm]
<i>PXXC</i>	maximum 24 h-precipitation intensity with return period 2.33 a	[mm]
<i>PXXD</i>	maximum 24 h-precipitation intensity with return period 100 a	[mm]
<i>PXXG</i>	maximum 15 min-precipitation intensity with return period 2.33 a	[mm]

Die meisten Attribute wurden aus dem für PREVAH erzeugten meteorologischen Input errechnet. Sie basieren damit auf der für das jeweilige Gebiet interpolierten Meteorologie, welche mit dem höhenbereinigten Inverse-Distance-Ansatz (DTIDW) aus dem Messnetz der MeteoSchweiz erstellt wurde; Bezugszeitraum ist in Übereinstimmung mit der Modellierung die Periode 1984–2003. Die Intensitäten extremer Punktniederschläge unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperiode stammen aus JENSEN ET AL. (1997); weitere Informationen dazu können auch GEIGER ET AL. (1992) entnommen werden.

Den in **Tabelle 8.8** aufgeführten Attributen gilt es die folgenden Erläuterungen anzufügen:

- Bei der Erhebung von Eigenschaften der jährlichen Niederschlagsverteilung wurden nur diejenigen Messungen verwendet, für welche eine Intensität von 0.02 mm h^{-1} oder höher registriert wurde. Unbedeutend kleine Niederschlagsmengen werden so von der Analyse ausgeschlossen.
- Die für *P_MD*, *P_RR*, *PDMD* und *PDRR* verwendete Charakterisierung von mittlerem Auftreten und Variabilität des Auftretens von Ereignissen wird nach BURN (1997) folgendermassen berechnet (siehe auch PFAUNDLER, 2001): Für ein Ereignis *i*, welches am julianischen Datum *D_i* auftritt, ist

$$\theta_i = D_i \left(\frac{2\pi}{365} \right), \quad \text{Gleichung 8.4}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_i \cos(\theta_i)}{n}, \quad \text{Gleichung 8.5}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_i \sin(\theta_i)}{n}, \quad \text{Gleichung 8.6}$$

$$\bar{\theta} = \arctan \left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}} \right). \quad \text{Gleichung 8.7}$$

Daraus berechnen sich das mittlere julianische Datum

$$MD = \bar{\theta} \left(\frac{2\pi}{365} \right) \quad \text{Gleichung 8.8}$$

sowie die Variabilität

$$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}. \quad \text{Gleichung 8.9}$$

8.2.8 Einbezug von Hochwasser- und Klimaregionen

Für den Nearest-Neighbour-Ansatz sollen zusätzlich zu den von der räumlichen Lage nicht direkt abhängigen Gebietsattributen auch noch Merkmale zur Verfügung stehen, welche das Erzwingen einer gewissen räumlichen Homogenität erlauben. Dies kann beispielsweise über die Definition von Hochwasser- und von Klimaregionen geschehen.

Hochwasserregionen

Die Hochwasserregionen stammen aus der Arbeit von WEINGARTNER (1999) (**Abbildung 8.1**). Ihnen zugrunde liegt die Bereitschaft von Einzugsgebieten, über- oder unterdurchschnittlich grosse Hochwasserabflüsse zu erzeugen. Einzugsgebiete mit einem ähnlichen Hochwasserverhalten werden dadurch zusammengefasst; folglich scheint es sinnvoll, die Eignung dieser Regionen für eine Parameter-regionalisierung im Hinblick auf Hochwasser zu untersuchen. Details zur Methodik und zur Bezeichnung der Regionen können WEINGARTNER (1999) entnommen werden.

Vier Regionen haben keinen Anteil am Rheineinzugsgebiet bis Basel, wodurch sich die Anzahl der Regionen für die vorliegende Anwendung auf elf verringert. Die Zuordnung eines Einzugsgebietes zu einer Hochwasserregion wird gemäss WEINGARTNER (1999) aufgrund der Pegelkoordinaten definiert.

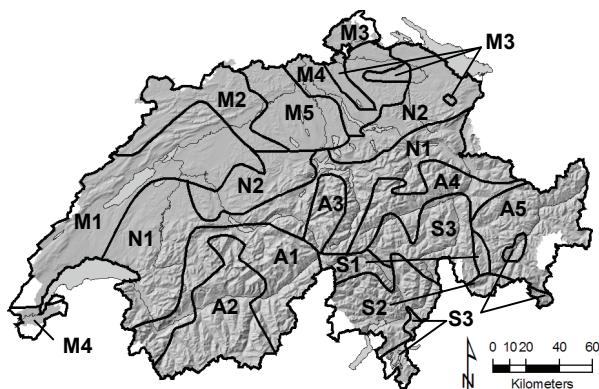


Figure 8.1: 15 flood regions for Switzerland (according to WEINGARTNER, 1999), out of which 11 concern the regionalisation application domain.

Abbildung 8.1: 15 Hochwasserregionen für die Schweiz (nach WEINGARTNER, 1999); 11 davon haben Anteil am Anwendungsgebiet der Regionalisierung.

Klimaregionen

Die neun klimatischen Regionen basieren auf der Arbeit von SCHWARB ET AL. (2001) und wurden von ZAPPA (2002) verwendet, um bei der Anwendung von PREVAH auf die gesamte Schweiz eine Klimadifferenzierung zu erreichen (**Abbildung 8.2**). Weil sich diese räumliche Differenzierung in der Model-

lierung bewährt hat, soll ihre Eignung für die Regionalisierung geprüft werden. Ihr Einsatz könnte dazu dienen, die zu regionalisierenden Gebiete bezüglich Charakteristik des meteorologischen Geschehens und der klimatischen Grunddisposition etwas zu homogenisieren. Die gängigen sieben Klimaregionen der Schweiz, wie sie etwa von SCHÜEPP (1978) definiert werden, sind etwas stärker generalisiert, insbesondere was die nordalpine Schweiz betrifft. SCHWARB ET AL. (2001) differenzieren hier die Regionen Jura, westliches Mittelland, östliches Mittelland, Voralpen, westliche Alpen und östliche Alpen; ein Kritikpunkt könnte allenfalls sein, dass die Voralpen im Westen mit den Alpen zusammengefasst sind. Andererseits würde eine entsprechende Aufteilung zwei relativ kleine Regionen schaffen.

Für das Anwendungsgebiet sind sechs Klimaregionen relevant (vgl. **Abbildung 8.2**), die Zugehörigkeit eines Einzugsgebietes zu einer klimatischen Region wird aufgrund des am häufigsten auftretenden Wertes definiert.

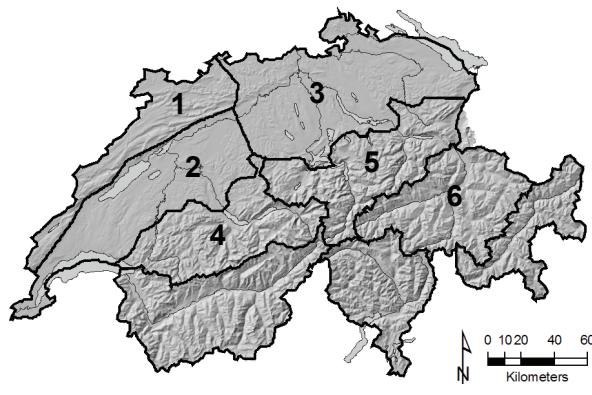


Figure 8.2: Nine climate regions for Switzerland (according to SCHWARB ET AL., 2001). Relevant for the present application are Jura (1), Western Plateau (2), Eastern Plateau (3), Pre-Alps (4), Western Alps (5) and Eastern Alps (6).

Abbildung 8.2: Neun Klimaregionen der Schweiz (nach SCHWARB ET AL., 2001). Für die vorliegende Anwendung relevant sind Jura (1), westliches Mittelland (2), östliches Mittelland (3), Voralpen (4), westliche Alpen (5) sowie östliche Alpen (6).

Rechnerische Umsetzung

Die Regionszugehörigkeit von Einzugsgebieten kann in der Nearest-Neighbour-Regionalisierung auf eine der beiden folgenden Arten implementiert werden (Details siehe Abschnitt 8.3.2):

- Die Spendergebiete (Nearest Neighbours) werden nur in derjenigen Region gesucht, welcher das Zielgebiet angehört; dies hat den Nachteil, dass die Anzahl zur Verfügung stehender Spendergebiete stark verringert wird, insbesondere bei Verwendung der Hochwasserregionen. Diese Methodik ist auch für die Regionalisierungen mit Kriging und Regression verwendbar, indem der Pool der berücksichtigten kalibrierten Gebiete einfach entsprechend eingeschränkt wird.
- Die Regionszugehörigkeit eines potenziellen Spendergebietes (R_i) wird mit derjenigen des Zielgebietes (R_j) verglichen, die Übereinstimmung oder Nicht-Übereinstimmung wird als Faktor in die Ähnlichkeitsberechnung (Distanz) mit einbezogen.

8.2.9 Einbezug von Zonen mittlerer Gebietshöhe

Wie schon beschrieben ist die Verwendung der mittleren Gebietshöhe als Attribut zu vermeiden, da diese mit vielen weiteren Attributen hochsignifikant korreliert; dies widerspricht den dargelegten Grundlagen der Attributauswahl. Aus den Betrachtungen von WEINGARTNER (1999) lässt sich aber folgern, dass eine Unterteilung der Schweiz in Grossregionen mittlerer Gebietshöhe vorteilhaft sein kann, da dadurch homogenerne Bedingungen für eine Regionalisierung der Modellparameter entstehen (siehe MITTELBACH, 2006). Für die vorliegende Regionalisierung können deshalb Höhenzonen spezifiziert werden; die Regionalisierung wird dann nur noch auf Basis derjenigen Spendergebiete durchgeführt, welche sich in derselben Zone mittlerer Höhe befinden wie das Zielgebiet. Gleichzeitig entfällt die mittlere Höhe (H AVG, s. **Tabelle 8.1**) als Gebietsattribut.

Ausgehend von den Abflussregimes (WEINGARTNER UND ASCHWANDEN, 1992) und der Abflussvariabilität (VIVIROLI UND WEINGARTNER, 2004B) im nordalpinen Raum der Schweiz wurden drei Zonen mittlerer Gebietshöhe unterschieden: Mittelland und Jura (< 1'000 m ü. M.), Voralpen (1'000–1'550 m ü. M.) und Alpen ($\geq 1'550$ m ü. M.). Da einige wenige Gebiete im Jura mittlere Höhen von mehr als 1'000 m ü. M. aufweisen (z. B. Suze–Sonceboz, 1'050 m ü. M., Suze–Péry, 1'029 m ü. M.), musste eine Vermischung mit der voralpinen Region zusätzlich unterbunden werden. Dies erfolgt über Angabe einer Trennlinie zwischen Jura und Voralpen, welche etwas vorversetzt entlang des Jurasüdfusses

verläuft. Alle Gebiete nördlich dieser Trennlinie werden unabhängig ihrer mittleren Höhe der untersten Höhenzone, also Mittelland und Jura, zugeordnet.

Unvorteilhaft an einer nach mittlerer Höhe differenzierten Regionalisierung erscheint vorerst einzig, dass der grosse Satz an Spendergebieten bei der Anwendung in voralpinen und alpinen Regionen stark reduziert wird. In diesen Höhenlagen sind lange und unbeeinflusste Abflussmessreihen seltener und somit die Möglichkeiten zur Kalibrierung von Spendergebieten geringer. Mit der vorgeschlagenen Unterteilung finden sich in der Zone Mittelland und Jura 95 Gebiete, in der voralpinen Zone 22 und in der alpinen Zone 23 Gebiete. Zudem sind in der alpinen Zone noch vergletscherte und unvergletscherte Gebiete zu unterscheiden, zwischen welchen die Parameter nicht ohne weiteres übertragen werden können (Details dazu siehe Abschnitt 8.3.1). Insgesamt muss aber so oder so davon ausgegangen werden, dass die Auswahl an ähnlichen Gebieten für voralpine und alpine Einzugsgebiete geringer ist als im Mittelland; deshalb sollte aus der Verwendung der vorgeschlagenen Zonen mittlerer Gebietshöhe kein Nachteil entstehen. Werden aber mehr Höhenzonen unterschieden, reduziert sich die Auswahl an Spendergebieten übermäßig stark. Zudem ist eine deutlich feinere Einteilung auch inhaltlich nicht angezeigt, da sie sich nicht mehr durch eine klare hydrologische Differenzierung rechtfertigen liesse.

Abbildung 8.3 zeigt, wie sich die Einteilung der Gebiete nach mittlere Höhe in die Topographie einfügt. Die Trennlinien wurden dabei aus der Zugehörigkeit der betrachteten 140 Einzugsgebiete abgeleitet und stellen nur eine Orientierung dar, da jedes neue Gebiet wiederum aufgrund seiner mittleren Höhe beurteilt wird. Zur Einordnung ist in **Abbildung 8.3** zudem die Ausdehnung der Hochwasserzonen N1 und N2 (WEINGARTNER, 1999; vgl. **Abbildung 8.1**) eingetragen, welche die nördlichen Alpen und Voralpen mit ihrer überdurchschnittlich grossen Bereitschaft zur Bildung grosser Hochwasser umfassen. Berücksichtigt man nun noch, dass sich diese Hochwasserregionen auf den Pegelstandort beziehen, die Zonen mittlerer Höhe aber auf den Gebietsschwerpunkt, kann eine grosse Ähnlichkeit festgestellt werden, mit Abweichungen bei den Voralpengebieten der äusseren West- und Ostschweiz sowie dem Urner Reusstal. Insgesamt bedeutet dies, dass das Hochwasserverhalten mit den Zonen mittlerer Gebietshöhe bis zu einem gewissen Grad ebenfalls unterschieden werden kann.

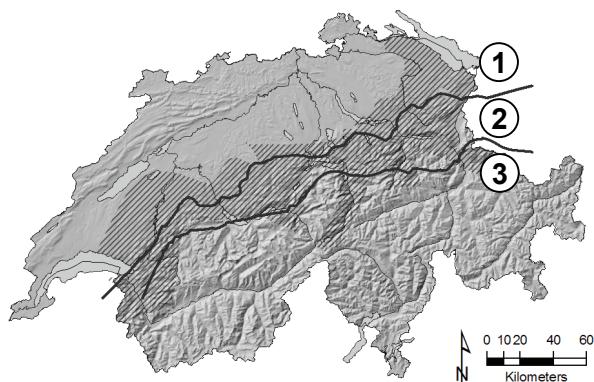


Figure 8.3: Overview of zones of mean catchment altitude, based on centroids of 140 catchments. 1) Swiss Plateau and Jura, 2) Pre-Alps, 3) Alps. Hatch: Flood regions N1 and N2 as to WEINGARTNER (1999) (cf. **Figure 8.1**).

Abbildung 8.3: Übersicht zu den Zonen mittlerer Gebietshöhe, bezogen auf die Schwerpunkte von 140 Einzugsgebieten. 1) Mittelland und Jura, 2) Voralpen, 3) Alpen. Schraffur: Hochwasserregionen N1 und N2 gemäss WEINGARTNER (1999) (vgl. **Abbildung 8.1**).

Mit den nun vorhandenen Gebietsattributen und Regionen als Grundlage können die einzelnen Regionalisierungsansätze im Detail erläutert und entwickelt werden.

8.3 Regionalisierung mit Nearest Neighbours (NNBR)

8.3.1 Grundlagen

Der Grundgedanke des Nearest-Neighbour-Verfahrens ist es, die freien Modellparameter eines ungemessenen Zielgebietes aus einem oder mehreren ähnlichen kalibrierten Spendergebieten zu gewinnen. Die Parameter werden dabei als kompletter Satz unverändert auf das Zielgebiet übertragen. Dies hat den Vorteil, dass die gegenseitige Abstimmung der Modellparameter aufeinander nicht beeinträchtigt wird (vgl. YOUNG, 2006) und keine unsicheren Annahmen über Beziehungen zwischen Modellparametern und Gebietsattributen gemacht werden müssen (KOKKONEN ET AL., 2003) – die in Kapitel 6 gewonnenen Erkenntnisse werden damit gut berücksichtigt. Weiter kann mit diesem Ansatz auch die Schwierigkeit umgangen werden, dass die Beziehungen zwischen Gebietsattributen und Modellparametern meist nicht linear sind (PARAJKA ET AL., 2005; HUNDECHA UND BÁRDOSSY, 2004; BÁRDOSSY, 2007). Nearest-Neighbour-Ansätze wurden für die Schweiz in den letzten Jahren bei-

spielsweise von PFAUNDLER (2001) und BARBEN (2003) angewendet, um Parameter verschiedener Hochwasserabschätzverfahren zur regionalisieren.

Es wird noch zu zeigen sein, dass eine Parameterübertragung aus dem ähnlichsten Gebiet nicht unbedingt zu den besten Resultaten führt, dass also die Parameter von in der Ähnlichkeitshierarchie tiefer gelegenen Gebieten bessere Ergebnisse liefern können (Kapitel 9.1.1). Deshalb wird folgendes Verfahren vorgeschlagen: Es werden jeweils die fünf dem Zielgebiet ähnlichsten Spendergebiete gesucht, aus welchen die Parametersätze unverändert auf das Zielgebiet übertragen und zur Simulation von regionalisierten Ganglinien verwendet werden. Aus diesen fünf Ganglinien wird dann zu jedem Zeitpunkt der mediane Abflusswert ermittelt, um einen endgültigen mit Nearest Neighbours regionalisierten Abflussverlauf zu erhalten.

Bei der Übertragung von Parametern zwischen vergletscherten und unvergletscherten Gebieten ist Vorsicht geboten, da Gletscher den Jahresgang des Wasserhaushaltes massgeblich beeinflussen (vgl. VERBUNT ET AL., 2003) und somit auch Auswirkungen auf die Modellparameter haben. Deshalb sollte ein oberer Grenzwert der Vergletscherung festgelegt werden, bis zu welchem eine Übertragung von vergletscherten in unvergletscherte Gebiete zulässig ist. Die Grenze wurde hier bei einer Vergletscherung von 7.5% gezogen, was gemäß WEINGARTNER UND ASCHWANDEN (1992) im mittleren Bereich eines nivo-glazialen Regimes liegt (Vergletscherungsgrad zwischen 3 und 12%). Für die Übertragung aus einem schwach vergletscherten in ein unvergletschertes Gebiet werden die gletscherbezogenen Parameter auf Null gesetzt, da sie in der Modellierung nicht benötigt werden. In umgekehrter Richtung, bei der Übertragung aus einem unvergletscherten in ein vergletschertes Gebiet, wurde hingegen keine Einschränkung verwendet. Eine solche Übertragung ist also immer zulässig; da aber bei der Ähnlichkeitsbewertung auch Attribute zur Vergletscherung berücksichtigt werden, sind unsinnige Übertragungen nicht zu erwarten. Für die beiden Gletscherparameter wird dann jeweils der Mittelwert aus allen kalibrierten Einzugsgebieten mit Vergletscherung eingesetzt.

Die Schwierigkeit liegt nun in der Definition eines geeigneten Masses, welches die Ähnlichkeit der Gebiete in Bezug auf die Modellierung mit PREVAH möglichst gut ausdrücken kann. Erprobt wurden dazu die Euklidische Distanz mit zwei verschiedenen Varianten zur Gewichtung einzelner Gebietsattribute sowie die Mahalanobis-Distanz. Diese beiden Verfahren sollen im folgenden Abschnitt erläutert werden. Weitere Distanzmasse wie beispielsweise die Ähnlichkeit nach ANDREWS (1979) (vgl. Kapitel 6.4.3) stehen im erstellten Regionalisierungsprogramm zur Verfügung, brachten aber in ersten Versuchen keine besseren Resultate und wurden deshalb nicht weiter untersucht. ANDREWS (1979) hat im Übrigen gezeigt, dass das von ihm vorgeschlagene Ähnlichkeitsmass proportional zur Euklidischen Distanz ist.

Zur Berechnung des Ähnlichkeitsmasses können die im Kapitel 8.2 vorgestellten Gebietsattribute verwendet werden. Der Einsatz aller 80 Attribute ist allerdings nicht empfehlenswert, da viele der eingeführten Attribute untereinander korreliert sind und somit mehr oder weniger redundante Informationen enthalten. Gerade letzteres wurde bei der Zusammenstellung der Attribute auch in Kauf genommen, damit aus verschiedenen Auswahlmöglichkeiten die geeignetste verwendet werden kann. Diese Auswahl wird bei den jeweiligen Regionalisierungsverfahren noch zu diskutieren sein.

8.3.2 Euklidische Distanz mit benutzerdefinierter Gewichtung (NNBR_{EUCL})

Die Euklidische Distanz basiert auf einfachen geometrischen Grundlagen. Vor ihrer Berechnung müssen alle Attribute x normalisiert werden, um den Einfluss ihrer unterschiedlichen Skalierung zu eliminieren:

$$x^* = \frac{x - \bar{x}}{s_x} \quad \text{Gleichung 8.10}$$

wo x^* Normalisiertes Gebietsattribut x .
 \bar{x} Mittelwert des Gebietsattributes x .
 s_x Standardabweichung des Gebietsattributes x .

Im n -dimensionalen Raum, welcher von den ausgewählten Gebietsattributen aufgespannt wird, berechnet sich die Distanz zwischen zwei Punkten nun als (vgl. BAHRENBERG ET AL., 1992)

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik}^* - x_{jk}^*)^2} \quad \text{Gleichung 8.11}$$

wo $\frac{n}{x_{in}^*, x_{jn}^*}$ Anzahl Gebietsattribute
 x_{in}^*, x_{jn}^* normalisierte Datenmatrizen der Attribute von Gebiet i resp. j mit jeweils n Elementen

Abbildung 8.4 illustriert dies für den stark vereinfachten Fall von vier Gebieten C_1 – C_4 und drei Attributen x_1^* , x_2^* und x_3^* . Die Euklidische Distanz $d_{i,j}$ wird nun um so grösser, je weiter zwei Gebiete i und j im Attributraum voneinander entfernt sind; damit ist $d_{i,j}$ streng genommen ein Unähnlichkeitsmaß, welches minimiert werden muss. Entscheidend ist hier eine geeignete Auswahl der Gebietsattribute, welche in die Berechnung eingehen – dies wird im nachfolgenden Kapitel 9 zu diskutieren sein.

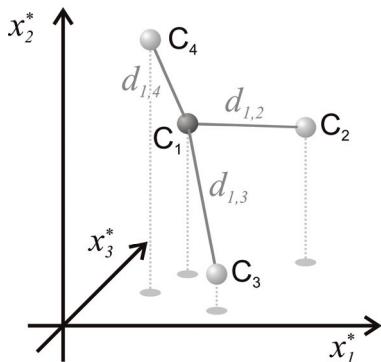


Figure 8.4: Euclidean Distance between a target catchment C_1 and three potential donor catchments C_2 – C_4 in a three-dimensional space of normalised attributes x_1^* , x_2^* and x_3^* .

Abbildung 8.4: Euklidische Distanz zwischen einem Zielgebiet C_1 und drei potentiellen Spendergebieten C_2 – C_4 in einem dreidimensionalen Raum der normalisierten Attribute x_1^* , x_2^* und x_3^* .

Sollen nicht alle ausgewählten Gebietsattribute gleichberechtigt eingehen, können sie individuell gewichtet werden. Die entsprechende Distanzberechnung erfolgt dann über die gewogene Euklidische Distanz (vgl. FISCHER, 1982).

$$g d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^n g_k (x_{ik}^* - x_{jk}^*)^2} \quad \text{Gleichung 8.12}$$

wo g_k Gewichtungsfaktor für Attribut k

Für diese Arbeit können die Gewichte auf zwei Hierarchiestufen festgelegt werden:

- Für die einzelnen Attribute und für
- Gruppen von Attributen. Diese Gruppen bilden jeweils eine thematische Einheit und sollen verhindern, dass Attribute aus einem ähnlichen Bereich von Gebietseigenschaften (z. B. Physiographische Kenngrößen) unbeabsichtigt stark gewichtet werden, weil sie in grösserer Zahl zur Verfügung stehen. Andererseits können einzelne Attributgruppen (z. B. die geographische Position) auf einfache Art und Weise je nach Anforderung gewichtet werden. Die Attribute werden für diese Arbeit zu den folgenden Gruppen zusammengefasst:
 - Physiographie (Grösse, Form, Neigung, Höhe, Exposition),
 - Lage im Raum (Koordinaten),
 - Gletscher (Anteile von Ablationsflächen, Akkumulationsflächen und Gesamtanteil am Gebiet),
 - Landnutzung (jeweils nach Nutzungsart Gesamtanteil und Anteil auf beitragenden Flächen),
 - Bodenphysik (k-Wert, nutzbare Feldkapazität),
 - Hydrogeologie und Geologie (diverse thematisch zusammengefasste Einheiten),
 - Niederschlag (Jahresniederschlag, Starkniederschläge, Saisonalitäten) und
 - weitere Klimaparameter (Temperatur, Windgeschwindigkeit, u. a.).

Die Details der Gruppenzuteilung können Anhang B entnommen werden.

Das Gewicht $g_k(l)$ für ein in Gruppe l enthaltenes Attribut k berechnet sich folgendermassen:

$$g_k(l) = \frac{gG_l}{\sum gG} \cdot \frac{gA_k(l)}{\sum gA(l)}, \quad \sum g = 1 \quad \text{Gleichung 8.13}$$

wo $\begin{aligned} gG_l & \quad \text{Gewicht der Attributgruppe } l \\ gA_k(l) & \quad \text{Gewicht des Attributs } k, \text{ welches der Attributgruppe } l \text{ angehört} \end{aligned}$

Zusätzlich kann als Gewichtungsfaktor auch bewertet werden, ob zwei verglichene Gebiete i und j aus derselben Hochwasser- und/oder Klimaregion stammen (vgl. Abschnitt 0). Da es sich bei der Regionszugehörigkeit um ein klassiertes Merkmal handelt, muss für die Distanzberechnung ein nominal skaliertes Hilfsmass erstellt werden (vgl. Voß, 2004):

$$dR_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{falls } R_i \neq R_j \\ 0, & \text{falls } R_i = R_j \end{cases} \quad \text{Gleichung 8.14}$$

Diese Regionen-Distanz $dR_{i,j}$ bezieht sich auf die Regionszugehörigkeit von Gebiet i (R_i) und von Gebiet j (R_j) und wird anschliessend mit der Euklidischen Distanz ($d_{i,j}$ resp. ${}_g d_{i,j}$ bei benutzerdefinierter Gewichtung) verrechnet. Dazu werden die maximale Euklidische Distanz (d_{\max} resp. ${}_g d_{\max}$) und ein frei wählbarer Gewichtungsfaktor (gR) verwendet:

$${}_R d_{i,j} = d_{i,j} + (dR_{i,j} \cdot d_{\max} \cdot gR) \text{ resp. } {}_{Rg} d_{i,j} = {}_g d_{i,j} + (dR_{i,j} \cdot {}_g d_{\max} \cdot gR) \quad \text{Gleichung 8.15}$$

8.3.3 Euklidische Distanz, korrelationsbereinigt (NNBR_{ECRR})

Als Alternative zur manuellen Vergabe von Gewichten kann die Gewichtung auch automatisch aufgrund der gegenseitigen Korrelation der Attribute erfolgen. Eine solche korrelationsbereinigte Euklidische Distanz hat zum Ziel, das auf einem orthogonalen (korrelationsfreien) Attributraum basierende Distanzmass dem in der Realität schiefwinkeligen Attributraum (es treten Korrelationen auf) anzupassen (vgl. FISCHER, 1982). Dazu wird der Produktmoment-Korrelationskoeffizient nach Pearson ($r_{k,l}$) verwendet, welcher sich für ein Attributpaar k, l aus den m zur Verfügung stehenden Gebieten berechnet (BAHRENBERG ET AL., 1992):

$$r_{k,l} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_k) \cdot (x_{il} - \bar{x}_l)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_k)^2 \cdot \sum_{i=1}^m (x_{il} - \bar{x}_l)^2}} \quad \text{Gleichung 8.16}$$

Da normalisierte Attributwerte verwendet werden und somit $\bar{x} = 0$ ist, entspricht $r_{k,l}$ dem partiellen Ähnlichkeitsmass $\cos \theta$ (FISCHER, 1982), welches proportionale Grössendifferenzen vernachlässigt:

$$\cos \theta_{k,l} = \frac{\sum_{i=1}^m x_{ik}^* \cdot x_{il}^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ik}^{*2} \cdot \sum_{i=1}^m x_{il}^{*2}}} \quad \text{Gleichung 8.17}$$

Weil nun schwach korrelierte Attribute grösseren zusätzlichen Informationsgehalt haben und die auf ihnen basierenden Teildistanzen stärker gewichtet werden sollen, muss ein transformierter Wert θ' erstellt werden, welcher bei völliger Übereinstimmung zweier Attribute den Wert 0 und bei orthogonalem Winkel zwischen den beiden betreffenden Attributen den Wert 1 annimmt (Berechnung im Bogenmass):

$$\theta'_{k,l} = \arccos(\cos \theta_{k,l}) \cdot \frac{2}{\pi} \quad \text{Gleichung 8.18}$$

Damit lässt sich die endgültige Form der korrelationsbereinigten Euklidischen Distanz schreiben als (FISCHER, 1982)

$$\tilde{d}_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n |(x_{ik}^* - x_{jk}^*) \cdot (x_{il}^* - x_{jl}^*)| \cdot \theta'_{k,l}}. \quad \text{Gleichung 8.19}$$

Problematisch ist, dass die Berechnung bei einer grossen Anzahl von Attributen nur noch schlecht nachvollziehbar und wenig transparent ist. Einer individuellen, inhaltlich begründeten Gewichtung (wie sie bei der gewichteten Euklidischen Distanz vorgenommen werden kann) ist demgegenüber der Vorzug zu geben. Weil erste Untersuchungen anhand der in dieser Arbeit verwendeten Daten keine Hinweise auf bessere Resultate zeigten, wurde die korrelationsbereinigte Form nicht weiter im Detail untersucht.

8.3.4 Mahalanobis-Distanz (NNBR_{MAHA})

Als Alternative zur Euklidischen Distanz kann beispielsweise die Mahalanobis-Metrik verwendet werden (siehe STEINHAUSEN UND LANGER, 1977; FISCHER, 1982). Sie berücksichtigt – wie auch die korrelationsbereinigte Euklidische Distanz – die gegenseitige Korrelation der Gebietsattribute. Dazu wird eine korrelationsfreie Distanzberechnung durchgeführt, und zwar mit

$${}_M d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k,l=1}^n (x_{ik} - x_{jk}) \cdot {}_{S_{kl}}^{-1} \cdot (x_{il} - x_{jl})}, \quad \text{Gleichung 8.20}$$

wobei ${}_{S_{kl}}^{-1}$ die Inverse der Kovarianzmatrix S_{kl} ist, welche die Elemente

$$s_{kl} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_k) \cdot (x_{il} - \bar{x}_l) \quad \text{Gleichung 8.21}$$

enthält (FISCHER, 1982). Zur Inversion der Matrix werden Subroutinen von REEVES (1987) verwendet. Die Mahalanobis-Metrik (oder generalisierte Distanz) besitzt den Vorteil, dass sie etwaige Korrelationen zwischen den Attributen eliminiert. Da sie skaleninvariant ist, müssen die Attribute nicht normalisiert werden. Die Bildung des Mahalanobis-Distanzmasses ist allerdings bei grösserer Anzahl von Attributen ebenfalls nicht mehr gut nachvollziehbar.

8.3.5 Verwendung zur Beurteilung der Parameterunsicherheit

Die Nearest-Neighbour-Methode kann nicht nur zur Regionalisierung, sondern auch zur Abschätzung der Parameterunsicherheit eingesetzt werden; Hinweise darauf finden sich beispielsweise bei BURN UND BOORMAN (1992) oder YOUNG (2006). Auf diesen interessanten Zusatznutzen soll bei der Feinausarbeitung der Regionalisierung im Kapitel 9.1.4 ebenfalls eingegangen werden, insbesondere als Vergleich zur bereits erfolgten Unsicherheitsabschätzung aus zwei Kalibrierungsperioden und aus Monte-Carlo-Analysen (vgl. Kapitel 6.4 und 6.5.2).

Die Parameterunsicherheit wird dadurch bewertet, dass die kalibrierten Modellparameter jedes Zielgebietes mit denjenigen der gemäss Nearest-Neighbour-Analyse ähnlichsten fünf Spendergebiete verglichen werden. Die Abweichungen werden dann pro Parameter relativ zum jeweils beobachteten Wertebereich betrachtet und dienen als Mass für die Parameterunsicherheit. Wichtig ist dabei, die Unabhängigkeit von untersuchtem Gebiet und Regionalisierung sicherzustellen; dies kann über die Jack-Knife-Methode erreicht werden, welche in Kapitel 8.7 noch zu erläutern sein wird.

Eine nicht zu unterschätzende Einschränkung muss bei dieser Bewertung allerdings gemacht werden: Die bereits in der Kalibrierung enthaltene Parameterunsicherheit geht natürlich in die Resultate dieser neuerlichen Unsicherheitsanalyse mit ein, da die Parameterwerte der Nearest Neighbours ja ebenfalls aus kalibrierten Einzugsgebieten stammen.

8.4 Regionalisierung durch Interpolation (Kriging) der Modellparameter im Raum (KRIG)

Bei diesem Verfahren werden die Modellparameter jeweils einzeln im Raum interpoliert. Als Stützstellen der Interpolation dienen die Schwerpunkte der 140 erfolgreich kalibrierten Einzugsgebiete; somit werden lediglich die östliche und nördliche Lage des Gebietsschwerpunktes als Attribute verwendet (vgl. Abschnitt 8.2.3). Dabei wird angenommen, dass die Modellparameter für diese Bezugspunkte jeweils repräsentativ sind. Anschliessend erfolgt die räumliche Interpolation der Modellparameter, welche hier mittels Ordinary Kriging (siehe z. B. GOOVAERTS, 1997) vorgenommen wird.

Die erstellte Regionalisierungssoftware führt die räumliche Interpolation selbstständig durch; dazu wurden FORTRAN-Routinen aus der Geostatistik-Bibliothek GSLIB (DEUTSCH UND JURNEL, 1997) verwendet. Die in diesen Routinen bereitgestellten Einstellungsmöglichkeiten stehen auch dem Benutzer der Regionalisierungssoftware zur Verfügung. Die wichtigsten Grössen sind dabei Suchradius (Ausgangswert 100 km) sowie minimale und maximale Anzahl Stützstellen für das Kriging einer Rasterzelle (Ausgangswert 3 resp. 15). Die Ausgangswerte wurden spezifisch für die vorliegende Anwendung festgelegt. Nugget-Wert (2.0) und Formparameter (10.0) wurden auf den von DEUTSCH UND JURNEL (1997) empfohlenen Standardwerten belassen. Grössere Unterschiede in den Resultaten lassen sich erreichen, indem der Parameter für die Strukturgrösse (a_{KRIG}) verändert wird; je grösser dieser Wert ist, desto stärker ist die räumliche Generalisierung des Kriging. Die detaillierten Untersuchungen dazu folgen in Kapitel 9.2.1.

Die Interpolation wird auf ein Raster von 1 km × 1 km durchgeführt, was angesichts der verwendeten Modellauflösung von 500 m × 500 m als ausreichend erachtet wird. Aus diesem Parameter für Parameter erstellten Raster werden anschliessend die Werte für den Gebietsschwerpunkt des zu regionalisierenden Zielgebietes herausgelesen. Anschliessend werden diese Parameter zu einem Satz zusammengestellt, welcher im Folgenden zur Simulation dient.

Ein interpolationsspezifisches Problem können dabei Randeffekte darstellen – dies würde bedeuten, dass Regionen am Rand des Anwendungsgebietes eine geringere Zuverlässigkeit der Interpolation besitzen. Ausgehend vom Abdeckungsmuster mit kalibrierten Gebieten (vgl. Abbildung 5.6) ist gegebenenfalls in den Bündner Alpen mit eingeschränkter Aussagekraft des Kriging zu rechnen, für die untersuchten Einzugsgebiete zeigten sich aber diesbezüglich keine Probleme. Zudem konnte innerhalb des gewählten Suchradius für das gesamte Anwendungsgebiet die jeweils erforderliche Minimanzahl von Stützstellen gefunden werden.

Aus theoretischen Überlegungen heraus ist dieses Vorgehen insgesamt weniger geeignet als das Nearest-Neighbour-Verfahren, da das Zusammenspiel der Parameter innerhalb eines kalibrierten Parametersatzes nicht explizit erhalten wird. Ein weiterer Einwand gegen das Verfahren ist die Heterogenität der Bodeneigenschaften und in geringem Masse auch diejenige des geologischen Untergrundes (vgl. z. B. KÖLLA, 1987); granitdominierte Gebiete mit schlecht entwickelten Böden können beispielsweise in grosser Nähe zu alluvialen Tälern liegen, welche mächtige Schotterablagerungen und gut entwickelte Böden besitzen. Die räumliche Nähe als Ähnlichkeitsmerkmal scheint vom diesem Standpunkt aus fragwürdig, wenngleich der Bezug auf komplett hydrologische Einzugsgebiete (und nicht auf beliebige Flächen) die Situation etwas entschärft. Dass eine Anwendung im Alpenraum aber trotz der geäusserten Vorbehalte sehr erfolgreich sein kann, haben MERZ UND BLÖSCHL (2005) und PARAJKA ET AL. (2005) überzeugend aufgezeigt, wie auch früher schon VANDEWIELE UND ELIAS (1995).

8.5 Regionalisierung über Regressionsbeziehungen zwischen Modellparametern und Gebietsattributen (REGR)

Beim Regressionsverfahren werden die Modellparameter aufgrund von Beziehungen zu ausgewählten Gebietsattributen geschätzt. Dazu wird für jeden Modellparameter ein Regressionsmodell zu den am stärksten mit ihm korrelierenden Gebietsattributen erstellt. Für das zu regionalisierende Gebiet werden die Modellparameter dann über diese Beziehung aus den für das gesamte Anwendungsgebiet verfügbaren Gebietsattributen abgeleitet.

Vorerst sind einige kritische Anmerkungen zu dieser Methode anzubringen:

- Die für eine regressionsbasierte Regionalisierung erforderlichen Voraussetzungen wie völlige Unabhängigkeit der Gebietseigenschaften oder eindeutig kausale Beziehungen zwischen Gebietsattributen und Modellparametern (JOHANSSON, 1994) sind in der Praxis kaum erfüllt.
- Problematisch ist vor allem die Unsicherheit in den Modellparametern (vgl. Kapitel 6), welche darauf zurückzuführen ist, dass die Zusammenhänge zwischen Modellparametern und Gebietsattributen teilweise nicht sehr ausgeprägt sind (PARAJKA ET AL., 2005; WAGENER UND WHEATER, 2006). Dies ist wiederum bedingt durch Skaleneffekte (BLÖSCHL UND GRAYSON, 2000; BLÖSCHL, 2001; BLÖSCHL UND MERZ, 2002), Unsicherheiten in der Modellstruktur (PERRIN ET AL., 2001) sowie Fehler in den Messdaten von Modellantrieb (Meteorologie) und Zielgröße (Abfluss) (vgl. YOUNG, 2006). Um die Problematik der ungenügenden Parameter-Attribut-Zusammenhänge etwas zu entschärfen, wurde in der Kalibrierung ein einheitliches und objektives Verfahren eingeführt, welches stabile und ausgeglichen gute Parametersätze finden soll (vgl. MERZ UND BLÖSCHL, 2004; siehe auch Kapitel 3.1.1).
- Existierende Beziehungen zwischen Modellparametern und Gebietsattributen sind in der Hydrologie oft ausgeprägt nicht-linear (BÁRDOSSY ET AL., 2005; BÁRDOSSY, 2007). Ein möglicher Ausweg dazu wäre, zuerst einen Satz ähnlicher Gebiete auszuwählen (über den Nearest-Neighbour-Ansatz) und darin dann nach Regressionsbeziehungen zu suchen – somit könnte eine stärkere Linearität herbeigeführt werden; dasselbe Vorgehen ist im Übrigen auch für die Regionalisierung mit Kriging denkbar. Experimente haben aber sowohl für das Kriging- wie auch das Regressionsverfahren gezeigt, dass sich die Resultate für die vorliegende Anwendung und für den in Betracht stehenden Datensatz nicht verbessern lassen (vgl. FLACH, 2007).

Trotz all dieser Vorbehalte: MERZ UND BLÖSCHL (2004) konnten zeigen, dass eine Regionalisierung über den Regressionsansatz möglich ist. Dazu ist ein pragmatisches Vorgehen gefragt, wobei man sich der theoretischen Einschränkungen bewusst sein muss. Gleichzeitig besteht aber beim Regressionsansatz die Möglichkeit, dass Bedingungen wiedergegeben werden können, die im zugrundeliegenden Satz kalibrierter Spendergebiete nur schlecht repräsentiert sind (vgl. HEUVELMANS ET AL., 2006). Erste Versuche zur Regionalisierung von PREVAH (GASSER, 2004) haben gezeigt, dass vor allem eine gute Abstützung der Regressionsbeziehungen an einer grossen Anzahl kalibrierter Gebiete von zentraler Bedeutung ist, um die Regressionsbeziehungen stabil zu halten. Als wenig erfolgversprechend erwies sich ein schrittweises Vorgehen; bei diesem werden nach der Regionalisierung eines Modellparameters jeweils die noch verbleibenden freien Modellparameter neu kalibriert. Da bei jeder dieser Neukalibrierungen allfällige Fehler der bereits erfolgten Parameterregionalisierungen mitkorrigiert werden müssen, wir das Verfahren bei der vorliegenden Anzahl von 12 respektive 14 zu behandelnden Modellparametern instabil. Zudem ist der Rechenaufwand für die Neukalibrierungen in Anbetracht der für diese Arbeit gegebenen Rahmenbedingungen (140 mesoskalige Gebiete) unverhältnismässig gross. Die von LAMB (1999) berichteten Erfolge mit diesem sequentiellen Vorgehen sind vermutlich nur mit einer geringen Anzahl Parameter zu erreichen.

Als grosses Problem des Regressionsansatzes erwies sich vorerst auch das Auftreten von Ausreisern; es betrifft Gebiete mit Attributwerten am Rande des beobachteten Spektrums. Für die Modellparameter werden dann unter Umständen regionalisierte Werte eingesetzt, welche physikalisch unplausibel sind oder ausserhalb des mit Erfahrungen belegten Bereichs liegen. BLÖSCHL UND GRAYSON (2002) merken dazu an, dass die Anwendung gewisser Grenzwerte nötig sein kann, da das erstellen einer "perfekten" Regionalisierung nicht möglich ist. Zur Lösung des Problems können für die hier zu erarbeitende Regionalisierung Parameterbereiche festgelegt werden. Liegt ein regionalisierter Modellparameter ausserhalb dieses Bereiches, wird er auf den entsprechenden oberen oder unteren Grenzwert zurückgesetzt.

Zur Auswahl stehen die folgenden Parameterlimiten (vgl. **Tabelle 8.9**):

- Der physikalisch plausible Wertebereich,
- ein pragmatischer Wertebereich gemäss Anwendungserfahrung in der Schweiz, wie er auch für die Kalibrierung verwendet wird, und
- der in den kalibrierten Spendergebieten beobachtete Wertebereich, welcher sich im vorliegenden Fall auf die Hochwasserkalibrierung von 140 Gebieten bezieht.

Der pragmatische Wertebereich scheint am plausibelsten, da er die Parameter auf einen gut dokumentierten Bereich beschränkt, gleichzeitig aber auch eine gewisse Flexibilität für Bedingungen zulässt, welche in den kalibrierten Spendergebieten nicht vorkommen. Da sich dieser Bereich auch in der Anwendung der Regionalisierung bewährte, wurde er schliesslich beibehalten.

Table 8.9: Three possible parameter ranges for PREVAH based on different considerations; pragmatic range corresponds to calibration limits, observed range refers to flood calibrated parameter set.

Tabelle 8.9: Drei unterschiedlich begründete Parameterbereiche für PREVAH; der pragmatische Wertebereich entspricht den Kalibrierungsgrenzwerten, der beobachtete Wertebereich bezieht sich auf den hochwasserkalibrierten Parametersatz.

Parameter	Unit	Physical range	Pragmatic range	Observed range
PKOR	[%]	-100 – 100	-30 – 30	-29 – 26
SNOKOR	[%]	-100 – 100	-50 – 50	-43 – 45
T0	[°C]	-5.00 – 5.00	-1.00 – 1.00	-0.87 – 0.87
TMFSNOW	[mm d ⁻¹ K ⁻¹]	0.10 – 7.00	0.10 – 3.00	0.29 – 2.81
RMFSNOW	[mm h ⁻¹ K ⁻¹ (W m ⁻²) ⁻¹]	1·10 ⁻⁵ – 1·10 ⁻³	5·10 ⁻⁵ – 3·10 ⁻⁴	7·10 ⁻⁵ – 3·10 ⁻⁴
SGR	[mm]	1 – 500	10 – 50	13 – 47
KOH	[h]	1 – 500	10 – 30	11 – 29
KIH	[h]	1 – 750	50 – 150	57 – 143
K2H	[h]	1 – 10'000	1'000 – 4'000	1'198 – 3'803
CGIH	[h]	1 – 2'500	200 – 1'000	253 – 947
SLZIMAX	[mm]	1 – 2'500	25 – 250	40 – 235
PERC	[mm h ⁻¹]	0.01 – 0.50	0.04 – 0.20	0.05 – 0.19
ICETMF	[mm d ⁻¹ K ⁻¹]	0.10 – 10.00	0.50 – 3.00	0.66 – 2.84
ICERMF	[mm h ⁻¹ K ⁻¹ (W m ⁻²) ⁻¹]	1·10 ⁻⁵ – 1·10 ⁻³	5·10 ⁻⁵ – 3·10 ⁻⁴	7·10 ⁻⁵ – 3·10 ⁻⁴

Der Regressionsansatz wird nun folgendermassen umgesetzt:

Anhand der vorhandenen Modellparameter und Gebietsattribute – hier also diejenigen der 140 erfolgreich kalibrierten Gebiete – wird eine Tabelle der Korrelationskoeffizienten erstellt, welche zudem die Signifikanz der Korrelationen anhand eines t-Tests ausweist (siehe Gleichung 5.1). Für jeden einzelnen Modellparameter werden anschliessend eine Anzahl signifikant korrelierender Gebietsattribute ausgewählt, auf deren Basis ein Regressionsmodell erstellt wird. Die minimale und maximale Anzahl der in die Regression aufzunehmenden Attribute kann festgelegt werden. Dieses Verfahren soll sicherstellen, dass die Regression gut an die in den Gebietsattributen enthaltenen Informationen angepasst werden kann, und zwar spezifisch für jeden einzelnen Modellparameter. Wie schon in Kapitel 5.3.2 erläutert, werden bei der grossen Anzahl von 140 Stichproben schon relativ geringe Korrelationskoeffizienten als signifikant verschieden von 0 eingestuft. Das spielt hier aber kaum eine Rolle, da lediglich die Beziehungen mit höherer Signifikanz von denjenigen mit tieferer Signifikanz getrennt werden sollen.

Die Auswahl der Gebietsattribute für das Regressionsmodell geschieht dann jeweils automatisch nach untenstehendem Schema.

- Hochsignifikant mit dem jeweiligen Parameter korrelierte Attribute (Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha \leq 0.025$ gemäss t-Test, vgl. Gleichung 5.1, S. 89) werden in jedem Fall aufgenommen.
- Signifikant mit dem jeweiligen Parameter korrelierte Attribute (Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha \leq 0.05$) gehen in das Regressionsmodell ein, sofern die maximale Anzahl Attribute noch nicht erreicht ist.
- Nicht signifikant mit dem jeweiligen Parameter korrelierte Attribute (Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha > 0.05$) gehen in das Regressionsmodell ein, sofern die minimale Anzahl Attribute noch nicht erreicht ist.

Welche der insgesamt 80 Attribute überhaupt so untersucht werden, kann vorgängig festgelegt werden, ebenso wie die verwendeten Signifikanzniveaus. Als minimale Anzahl in das Modell aufzunehmender Attribute werden 5, als maximale Anzahl 20 Attribute gefordert.

Für die Formulierung des Regressionsmodells stehen wiederum verschiedene Varianten zur Verfügung. Als am besten geeignet erschien die Form mit Achsenabschnitt a und einem pro Attribut spezifischen Proportionalitätsfaktor b . Für die n in das parameterspezifische Regressionsmodell aufgenommenen Gebietsattribute x_i berechnet sich der regionalisierte Parameterwert y dann jeweils als

$$y = a + \sum_{i=1}^n (b_i \cdot x_i). \quad \text{Gleichung 8.22}$$

Die Kalibrierung des Regressionsmodells erfolgt mit Hilfe der Software PEST (DOHERTY, 2002), welche mit der Gauss-Marquardt-Levenberg-Methode arbeitet – dies ist ein Schätzalgorithmus, welcher sich iterativ im n -dimensionalen Parameterraum bewegt und sich anhand der Gradienten der Modellgüte orientiert (für eine aktuelle Anwendung in der hydrologischen Modellierung siehe z. B. KUNSTMANN ET AL., 2005). Die für die vorliegende Regionalisierung programmierte Software übergibt dabei alle nötigen Steuerdateien an PEST, startet dieses und liest nach beendeter Kalibrierung die Werte für a und b ein, um daraus die Parameter für das unkalibrierte Zielgebiet zu schätzen.

Die Anwendung anderer Regressionsmodelle – beispielsweise die Bildung von Potenzen oder von Quotienten mit b_i und x_i – führte zu instabileren Resultaten und wurde deshalb nicht weiter verfolgt. Zu Beginn wurde auch mit einem Potenzierungsfaktor c für die Gebietsattribute x_i gearbeitet (x_i^c), welcher aber keine wesentlichen Verbesserungen in den von PEST optimierten Regressionsmodellen brachte. Dass insgesamt nur zwei Regressionsparameter notwendig sind, deckt sich im Übrigen mit den Erfahrungen von SEIBERT (1999).

Wie schon von PARAJKA ET AL. (2005) festgehalten, muss auch hier angemerkt werden, dass die Verwendung linearer Regressionsmodelle kaum der hydrologischen Realität entspricht; da sich die Modelle so aber am besten handhaben lassen und auch gute Resultate liefern, scheint die gewählte Formulierung gerechtfertigt.

Um schliesslich der unterschiedlichen Güte der Kalibrierung Rechnung zu tragen, werden die für das Regressionsmodell verwendeten PREVAH-Modellparameter jeweils nach der Nash-Sutcliffe-Effizienz (*NSE*) ihrer Kalibrierung gewichtet; es wurden mit Absicht nicht die *NSE* der Validierungsperiode verwendet, da dieser Zeitraum je nach Gebiet unterschiedlich lange ist. Modellparameter aus Gebieten mit guten Kalibrierungsergebnissen erhalten also höheres Gewicht als solche aus Gebieten mit schlechten Resultaten. Da die erfolgreich kalibrierten Gebiete bereits alle eine Effizienz von grösser als 0.2 aufweisen (vgl. Kapitel 5.1), nimmt dieses Gewicht Werte zwischen 0.2 und 1.0 an. Allenfalls auftretende negative Werte würden automatisch mit einem Gewicht von 0 versehen. Eine Potenzierung dieses Gewichtes kann in PEST vorgenommen werden, erschien aber nicht angezeigt; weiter können auch alle anderen von PREVAH berechneten Gütemasse als Gewichtungsfaktoren verwendet werden.

8.6 Kombination der Regionalisierungsansätze (COMB)

Mit den nun dargelegten Methoden liegen drei Regionalisierungsansätze vor, welche jeweils einen sehr unterschiedlichen Weg verfolgen. Es kann folglich angenommen werden, dass jedes Verfahren – zumindest teilweise – einen Informationsgehalt besitzt, welcher in den jeweils anderen Verfahren nicht enthalten ist. Somit liegt der Gedanke nahe, die drei Verfahren zu kombinieren, um die verschiedenen Informationen besser auszunutzen.

Am aussichtsreichsten scheint es, aus den mit den drei Verfahren Nearest Neighbours (NNBR), Kriging (KRIG) und Regression (REGR) simulierten Zeitreihen eine mediane Ganglinie zu bilden. Dazu wird zu jedem Simulationszeitpunkt, also für jede Stunde, der mittlere der drei regionalisierten Abflusswerte (Median) verwendet. Im Gegensatz zur Mittelwertbildung wird dieses Vorgehen nicht durch einzelne Ausreisser beeinflusst. Dies ist von Vorteil, wenn eine einzelne Regionalisierung stark abweichende, unplausible Werte liefert; im Falle von Spitzenabflüssen kann es allerdings auch ein Nachteil sein, wenn die Ausreisser den tatsächlich beobachteten Werte näher sind. Ob sich dieses Verfahren bewährt, wird bei der Vorstellung der Regionalisierungsergebnisse (Kapitel 10) zu diskutieren sein.

Wie schon bei der Regionalisierung mit 5 ähnlichsten Gebieten (Nearest Neighbours) bietet sich auch bei der vorgeschlagenen Kombination die Möglichkeit, einen rudimentären Unsicherheitsbereich des regionalisierten Abflusses anzugeben. Darauf wird bei der Präsentation der Ergebnisse in Kapitel 10 ebenfalls kurz eingegangen.

Im Hinblick auf die Extrapolation wäre grundsätzlich auch denkbar, nur die Spitzenabflusswerte der drei Regionalisierungen zu verwenden und dann beispielsweise wiederum den mittleren Wert in der Extremwertstatistik einzusetzen. Dagegen spricht allerdings, dass die Spitzenwerte der verschiedenen Regionalisierungen dann nicht zwingend vom selben Ereignis stammen – was aus methodischer Sicht wenig überzeugend scheint. Mit dem im vorigen Absatz vorgeschlagenen Medianverfahren steht hingegen weiterhin eine regionalisierte Ganglinie zur Verfügung, welche beispielsweise auch zur Ermittlung von Volumina des Direktabflusses verwendet werden kann (vgl. Kapitel 12).

Eine weitere Kombinationsmöglichkeit für die Hochwasserextrapolation bestünde darin, nicht Abflusswerte, sondern die Parameter der Extremwertverteilung zu kombinieren. Erste Experimente zeigten

aber, dass sich die Extrapolationsergebnisse nicht stark von denjenigen unterschieden, welche aus der kombinierten Ganglinie berechnet wurden. Somit sind auch keine genaueren Schätzwerte zu erwarten, weshalb dieses Vorgehen nicht weiter verfolgt wurde.

8.7 Bewertung der Regionalisierungsresultate

Die Bewertung der Regionalisierungsresultate geschieht über eine Kreuzvalidierung mit Auslassen von jeweils einem Gebiet (Jack-Knife-Ansatz oder "leave-one-out-cross-validation"). Jedes betrachtete Einzugsgebiet wird dazu jeweils einmal als ungemessen und unkalibriert behandelt und geht so in keiner Weise in die Datengrundlagen der Regionalisierung ein; anschliessend werden die regionalisierten Parameter für dieses Gebiet berechnet und für eine Simulation verwendet. Diese regionalisierten Resultate des ausgeschlossenen Gebietes können dann mit den tatsächlich beobachteten Werten verglichen und damit völlig unabhängig bewertet werden. Führt man das Verfahren nacheinander für alle zur Verfügung stehenden Gebiete durch, ist eine umfassende und objektive Beurteilung der Regionalisierung möglich.

Die Bewertung der Resultate erfolgt in einem ersten Schritt über die Modellgüte (Effizienz) nach NASH UND SUTCLIFFE (1970) (*NSE*, siehe Kapitel 3.1.4). Auch wenn dieses Gütemass nicht alle Aspekte der Ganglinie zu beschreiben vermag, ist sein Einsatz als Indikator vertretbar; die Alternative – ein visueller Vergleich von Beobachtung und Simulation – ist hingegen stets subjektiv und zudem vom Aufwand her in dieser Arbeit nicht durchführbar. Als Massstab für die Güte der Regionalisierung werden die in **Tabelle 8.10** aufgeführten Grenzwerte verwendet. Sie orientieren sich grob an einem *NSE*-Wert von 0.5, welcher im Allgemeinen als Minimum für eine effiziente Simulation gefordert wird (ZAPPA, 2002). Um bei guter Übersichtlichkeit gleichzeitig eine zweckdienliche Differenzierung der genügenden, problematischen und ungenügenden Resultate zu erreichen, wurde zwischen *NSE*-Werten von 0.20 und 0.50 eine Klassenbreite von 0.10 gewählt. Gute und sehr gute Resultate mit $NSE \geq 0.50$ werden mit einer Klassenbreite von 0.25 unterteilt, *NSE*-Werte von unter 0.20 ohne weitere Unterscheidung als fehlgeschlagen interpretiert. Angestrebt wird bei der Regionalisierung, dass möglichst viele Gebiete gute ($NSE \geq 0.50$) oder sehr gute Resultate ($NSE \geq 0.75$) aufweisen und möglichst wenig gescheiterte Gebiete ($NSE < 0.20$) zu verzeichnen sind.

NSE	Assessment
≥ 0.75	very well
0.50 – 0.75	well
0.40 – 0.50	fair
0.30 – 0.40	questionable
0.20 – 0.30	insufficient
≤ 0.20	failed

Table 8.10: Assessment of regionalisation results using Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE).

Tabelle 8.10: Bewertung der Regionalisierungsresultate anhand der Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) in die Klassen sehr gut, gut, genügend, problematisch, ungenügend und misslungen.

Ergänzend dazu wird mit *PQT* auch das wichtigste Hochwassergütemass verwendet (siehe Kapitel 4.2.1). Es kommt aber erst beim Vergleich der besten ermittelten Einstellungen für die drei untersuchten Regionalisierungsansätze zum Einsatz. Dahinter steht wie schon bei der Kalibrierung die Idee, dass mit *NSE* zuerst diejenige Regionalisierungsvariante gefunden werden soll, welche bezüglich der Ganglinienwiedergabe die besten Resultate erzielt. Die Gegenüberstellung von *PQTrel* (vgl. Gleichung 4.2 bis Gleichung 4.4) für hochwasserkalibrierte und regionalisierte Gebiete soll anschliessend zeigen, ob die bei der Hochwasserkalibrierung erreichte gute Wiedergabe der Spitzenabflüsse auch in der Regionalisierung erhalten bleibt.

Um die Resultate bezüglich Hochwasserabschätzung konkret einordnen zu können, müssen unbedingt auch extrapolierte Schätzwerte betrachtet werden. Aus Gründen der Vergleichbarkeit erfolgte die Extrapolation wie schon in Kapitel 4.2.3 beschrieben immer nach demselben Verfahren, nämlich unter Verwendung der ersten Extremalverteilung (E1), wobei die Verteilungsparameter mittels der wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente (WGM) geschätzt wurden. Die detaillierten Auswertungen bezüglich Hochwasser umfassen – gleich wie bei der Diskussion der Kalibrierungsresultate – eine vollständige graphische Extrapolation (Anhang D) mit E1-WGM. Zusätzlich sind dort die von HQ_x_meso_CH (BARBEN, 2003; SPREAFICO ET AL., 2003) verfügbaren Schätzungen für ein HQ₂₀, HQ₅₀, HQ₁₀₀ und Q_{max} als Vergleichswerte eingezeichnet.

8.8 Anwendung auf Mittelwasserbedingungen

Ein interessanter Zusatznutzen der Regionalisierung könnte erreicht werden, wenn sich das Verfahren auch auf die Mittelwasserkalibrierung – also auf Normalbedingungen des Abflusses – anwenden ließe. Die Regionalisierung wird im Folgenden zwar anhand der hochwasserkalibrierten Parametersätze erstellt, ist methodisch aber nicht an diese Grundlagen gebunden. Spezifisch zu den einzelnen Verfahren gilt es dazu folgendes anzumerken:

- Nearest Neighbours (NNBR): Das Verfahren selbst ist unabhängig vom zu regionalisierenden Parametersatz. Einzig die Auswahl der für die Nachbarschaftsbeziehungen verwendeten Gebietsattribute und allenfalls deren Gewichtung kann bis zu einem gewissen Grad Einfluss auf das Resultat nehmen. Es wird sich zeigen, dass eine Attributauswahl auf Grund von statistischen Analysen zwischen den Gebietsattributen und den – auf Hochwasser kalibrierten – Modellparametern die besten Ergebnisse liefert. Auf Grund methodischer Überlegungen kann vermutet werden, dass die ausgewählten Attribute vor allem repräsentativ für generelle Unterschiede in den Parametern sind und nicht spezifisch auf den Hochwasserfall zutreffen. Zudem wird aufgrund hydrologischer Überlegungen – welche sich wiederum nicht spezifisch auf Hochwasser beziehen – eine Attributauswahl erstellt werden können, welche ebenfalls sehr gute Resultate liefert. Dies verstärkt die Vermutung, dass das bestehende Nearest-Neighbour-Verfahren ohne Änderung auch auf den Mittelwasserfall erfolgreich angewandt werden könnte.
- Kriging (KRIG): Die räumliche Interpolation der Modellparameter wird ausschliesslich durch das verwendete geostatistische Verfahren – hier das Kriging – kontrolliert, als Attribute dienen einzig die Koordinaten der Gebiete. Die für die Interpolation zu ermittelnden Vorgaben wie Strukturgrösse und zu verwendende Anzahl von Stützstellen sind nicht hochwasserspezifisch. Es spricht methodisch nichts dagegen, dasselbe Verfahren mit den auf Mittelwasser kalibrierten Parametern als Eingangsgrösse durchzuführen.
- Regression (REGR): Wie bei den Nearest Neighbours hat einzig die Auswahl der zu verwendenden Attribute einen entscheidenden Einfluss auf die Resultate; weder die Formulierung des Regressionsmodells noch dessen Optimierung sind hochwasserspezifisch. Beim hier entwickelten Regressionsverfahren wird jeweils bei jeder Anwendung ermittelt, welche Attribute am stärksten mit den verwendeten Parametern korrelieren. Vom Benutzer vorgegeben wird nur die Auswahl an Attributen, welche automatisch untersucht werden sollen. Das Programm entscheidet dann aufgrund weiterer nicht hochwasserspezifischer Vorgaben (Anzahl der zu verwendenden Attribute, erforderliche Signifikanz), welche Attribute in das Regressionsmodell mit dem Parameter eingehen. Somit kann auch hier erwartet werden, dass sich das Verfahren unverändert auf den Mittelwasserfall anwenden lässt.

Ob eine erfolgreiche Regionalisierung für die mittelwasserkalibrierten Parameter tatsächlich möglich ist, wenn dieselben Verfahren und Vorgaben wie im Hochwasserfall verwendet werden, soll in den Resultaten ergänzend untersucht werden (Kapitel 10.4).

8.9 Zusammenfassung

Der Übersichtlichkeit halber sind Nomenklatur und wichtigste Eigenschaften der oben vorgestellten Regionalisierungsmethoden in **Tabelle 8.11** nochmals aufgeführt.

Table 8.11: *Regionalisation approaches and regional differentiations used in this study.*

Tabelle 8.11: *Übersicht über die in dieser Arbeit verwendeten Regionalisierungsmethoden und räumlichen Differenzierungen.*

Symbol	Procedure	Description
Regionalisation approach		
DEFA	Default parameters	uncalibrated parameter set with standard initial values
MEAN	Average parameters	parameter mean values from successfully calibrated catchments, distinguished in three groups of average catchment altitude
NNBR	Nearest Neighbours.....	direct parameter transfer from one or multiple most similar catchment(s), using one of the following similarity measures: – NNBR _{EUCL} : Euclidean Distance – NNBR _{ECRR} : correlation-adjusted Euclidean Distance – NNBR _{MAHA} : Mahalanobis-metrics
KRIG	Kriging.....	interpolation of parameter values in space, with catchment centroids as reference co-ordinates
REGR	Regression.....	parameters are estimated using regressions to universally available catchment attributes
COMB	Combined approach	median hydrograph from simulations with NNBR, KRIG and REGR regionalised parameter sets
Regional differentiation		
wHQ	Flood regions (weighted)	flood region is considered (weighted) in the similarity measure
zHQ	Flood regions (strict).....	regionalisation only within relevant flood region
wCL	Climate regions (weighted).....	climate region is considered (weighted) in the similarity measure
zCL	Climate regions (strict).....	regionalisation only within relevant climate region
° / *	Average altitude.....	regionalisation only within zone of similar mean catchment altitude (°: not in use; *: in use)

Kapitel 9

Regionalisierung II: Feinabstimmung der einzelnen Verfahren

The regionalisation approaches which were presented in the preceding chapter are discussed in detail for the actual application domain. It will be necessary to fine-tune the regionalisation methods; for this, the results of various variants are compared and discussed.

Die im vorangehenden Kapitel vorgestellten Regionalisierungsmethoden werden für den vorgesehenen Anwendungsraum im Detail betrachtet und diskutiert. Dabei muss eine Feinabstimmung der verschiedenen Methoden vorgenommen werden, wofür die einzelnen Varianten aufgrund ihrer Ergebnisse verglichen werden.

9.1 Nearest Neighbours

Als erstes wird im Folgenden das Nearest-Neighbour-Verfahren im Detail auszuarbeiten sein, basierend auf den in Kapitel 8 dargelegten methodischen Grundlagen. Zu bestimmen sind vor allem die Auswahl der zu verwendenden Attribute und allenfalls deren Gewichtung. Aus den drei zu untersuchenden Distanzberechnungsmethoden $NNBR_{EUCL}$ (Euklidische Distanz, benutzergewichtet), $NNBR_{ECRR}$ (Euklidische Distanz, korrelationsbereinigt) und $NNBR_{MAHA}$ (Mahalanobis-Distanz) soll zudem die am besten geeignete identifiziert werden.

9.1.1 Euklidische Distanz mit benutzerdefinierter Gewichtung ($NNBR_{EUCL}$)

Die Untersuchungen zur Nearest-Neighbour-Methode erfolgten in erster Linie anhand der benutzergewichteten Euklidischen Distanz ($NNBR_{EUCL}$), welche die grösste methodische Transparenz aufweist. Um eine möglichst geeignete Auswahl und Gewichtung der zu verwendenden Attribute zu ermitteln, hat MITTELBACH (2006) aus den insgesamt 80 zur Verfügung stehenden Attributen (vgl. Kapitel 8.2) zahlreiche Attributsätze ausgearbeitet und 13 davon ausführlich getestet. Wie **Tabelle 9.1** zeigt, richten sich Auswahl und Gewichtung der Attribute dabei in unterschiedlichem Masse auf statistische (V01, V02) und hydrologische (V04–V21) Überlegungen; weitere Details können der Arbeit von MITTELBACH (2006) entnommen werden.

Table 9.1: Overview of the 13 attribute sets composed by MITTELBACH (2006).

Tabelle 9.1: Übersicht über die 13 von MITTELBACH (2006) zusammengestellten Attribut-sätze.

Set	Attribute selection and weighting criteria
V01	All attributes with significant correlation ($\alpha \leq 0.05$) to model parameters, equally weighted
V02	From each model parameter the two attributes with highest correlation, equally weighted ^a
V04	26 parameters selected on basis of hydrological expert judgement, equally weighted
V05	like V04, but with two additional parameters for extreme precipitation
V06	like V04, but skewness of soil-related attributes is considered instead of their mean values
V09	like V04, but with double weight on hydrogeology attributes
V10	like V04, but with double weight on soil physics attributes
V14	like V05, but with double weight on precipitation attributes
V16	like V05, but with double weight on precipitation, hydrogeology and soil physics attributes
V17	like V04, but with double weight on land use attributes
V19	like V04, but with higher weight on hydrogeology ($\times 5$) and land use ($\times 2$) attributes ^b
V20	like V04, but with double weight on hydrogeology, soil physics and land use attributes
V21	like V04, but with tenfold weight on land use attributes

^a see Table 9.2; ^b see Table 9.3

Nash-Sutcliffe-Efficiency

Für alle in **Tabelle 9.1** aufgeführten Varianten von Attributauswahl und -gewichtung wurde als erster grober Indikator die Nash-Sutcliffe-Efficiency (*NSE*) des Zeitraums 1994–1997 (Initialisierungsjahr: 1993) berechnet, wobei wie im vorigen Kapitel beschrieben die mediane Ganglinie der fünf ähnlichsten Gebiete als Regionalisierung zur Anwendung kam. Gleichzeitig wurde untersucht, ob eine Beschränkung der Ähnlichkeitssuche auf Gebiete derselben Zone mittlerer Höhe (vgl. Kapitel 8.2.9) zu empfehlen ist. Gesucht wurde eine Variante, welche in möglichst vielen der 49 Gebiete von Priorität A gute bis sehr gute Ergebnisse liefert ($NSE \geq 0.5$), gleichzeitig aber auch einen möglichst geringen Anteil an misslungenen Simulationen aufweist ($NSE \leq 0.2$).

Abbildung 9.1 zeigt die Resultate für die 13 untersuchten Varianten. Vergleicht man die Ergebnisse unter dem Gesichtspunkt der Höhenzonierung, ist klar erkennbar, dass eine Beschränkung der Ähnlichkeitssuche auf diese Zonen mittlerer Gebietshöhe in den meisten Fällen bessere Resultate bringt. Für 9 von 13 Attributsätzen weist die Variante mit Höhenzonierung mehr gute Resultate ($NSE \geq 0.5$) auf, in 2 weiteren Fällen gleich viele. Damit bestätigt sich die in Kapitel 8.2.9 geäusserte Vermutung, wonach der Einbezug von Zonen mittlerer Gebietshöhe vorteilhafte Bedingungen für die Nearest-Neighbour-Regionalisierung schafft; FLACH (2007) konnte in diesem Zusammenhang aufzeigen, dass die Zonierung in drei Höhenstufen tatsächlich zu einer Homogenisierung der Modellparameter führt.

Der Übersichtlichkeit halber wird im Folgenden nur die jeweils erfolgreichste der Varianten mit (*) und ohne (°) Höheneinteilung diskutiert; die ausführlichen Analysen aller Varianten sind bei MITTELBACH (2006) nachzulesen.

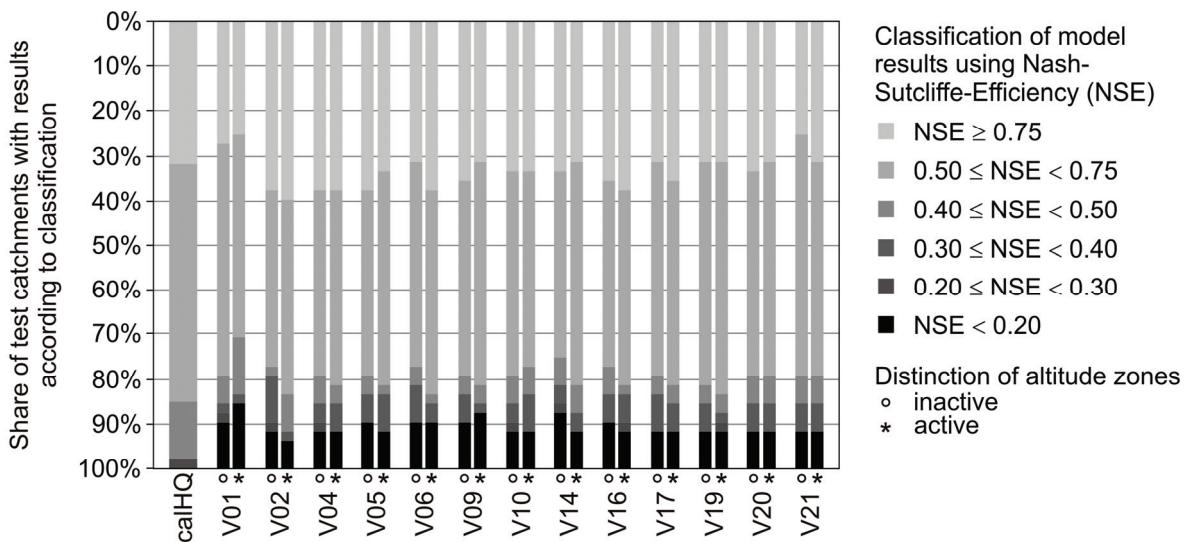


Figure 9.1: Results of Nearest Neighbours regionalisation for various attribute sets and weighting schemes (V01–V21), with (*) and without (°) restriction to similar zone of mean catchment altitude. Based upon 49 priority A catchments, simulation period 1994–1997 (with initialisation year 1993) (data: MITTELBACH, 2006). Results for flood calibrated simulation are indicated for comparison (calHQ).

Abbildung 9.1: Ergebnisse einer Nearest-Neighbours-Regionalisierung mit verschiedenen Varianten von Attributzusammenstellungen und -gewichtungen (V01–V21) sowie mit (*) und ohne (°) Beschränkung auf Zonen mittlerer Gebietshöhe. Basierend auf 49 Einzugsgebieten der Priorität A, Zeitraum 1994–1997 (mit Initialisierungsjahr 1993) (Daten: MITTELBACH, 2006). Zum Vergleich angegeben sind die Resultate der Hochwasserkalibrierung (calHQ).

Die insgesamt besten Ergebnisse liefert Variante V02* mit 83% guten ($NSE \geq 0.5$) und 44% sehr guten ($NSE \geq 0.75$) Resultaten; lediglich in 6% der Gebiete sind die Resultate misslungen ($NSE < 0.2$). Der dieser Variante zugrundeliegende Attributsatz wurde aufgrund einer Korrelationsanalyse zwischen Gebietsattributen und Modellparametern erstellt. Dabei wurden pro Modellparameter jeweils die zwei höchstkorrelierten Attribute übernommen und mit einem einheitlichen Gewicht von 1 versehen. Der daraus entstehende Satz von maximal 24 Attributen (resp. 28 für die Alpen, wo noch zwei Gletscherparameter berücksichtigt werden) wird dann für die Berechnung der Euklidischen Distanzen zwischen

den Gebieten verwendet. Die Ähnlichkeitssuche ist auf Gebiete derselben Zone mittlerer Gebietshöhe beschränkt, und folglich wurde auch der Attributsatz nach dem beschriebenen Auswahlverfahren für jede Höhenzone separat erstellt.

Tabelle 9.2 führt die für V02* ausgewählten Attribute auf, gruppiert nach ihrer Korrelation mit den Modellparametern. Es finden sich inhaltlich nachvollziehbare Korrelationen wie beispielsweise zwischen der Bilanzkorrektur (*PKOR*, *SNOKOR*) und Attributen des Niederschlags (*PAVG*, *PDRR*, *PXXB*, *PMRL*) oder zwischen dem Oberflächenabfluss (*K0H*) und Kennwerten der Bodenphysik (*NFMI*, *KWMI*); hydrogeologische Gebietseigenschaften (*HG_2*, *HGFG*) werden auf plausible Weise mit dem oberen Abflussspeicher (*SLZIMAX*) und der Perkolation (*PERC*) in Verbindung gebracht. Nicht alle Beziehungen lassen sich jedoch hydrologisch schlüssig interpretieren, am wenigsten diejenigen für die Schneeschmelzparameter (*TMFSNOW*, *RMFSNOW*). Die räumliche Nähe wird einzig in den Voralpen über die Nord-Süd-Position (*CTRY*) mit einbezogen; sie besitzt hier Informationsgehalt für die Perkolationsrate (*PERC*), was vermutlich durch die in Richtung Süden ansteigende mittlere Höhe (*HAVG*) und weitere damit korrelierte Attribute des Untergrundes bedingt ist. *HAVG* selbst ist in dieser Attributauswahl nicht vertreten.

Table 9.2: Two most significantly correlating catchment attributes per model parameter, distinguished by zone of medium catchment altitude. This analysis results in attribute set V02*.

Tabelle 9.2: Die zwei pro Modellparameter höchstkorrelierenden Gebietsattribute, differenziert nach Zone mittlerer Gebietshöhe. Diese Analyse führt zum Attributsatz V02*.

Model parameter	Two catchment attributes with highest correlation to model parameter		
	Swiss Plateau, Jura (<1'000 m a. s. l.)	Pre-Alps (1'000–1'550 m a. s. l.)	Alps (>1'550 m a. s. l.)
<i>PKOR</i>	<i>PDRR</i> , <i>FBTR</i>	<i>PXXB</i> , <i>TSM1</i>	<i>G_F3</i> , <i>G_F1</i>
<i>SNOKOR</i>	<i>PDRR</i> , <i>TSM3</i>	<i>T_SP</i> , <i>PMRL</i>	<i>PAVG</i> , <i>P_RR</i>
<i>T0</i>	<i>PMRL</i> , <i>G_L2</i>	<i>PMXX</i> , <i>TSM4</i>	<i>ASPN</i> , <i>SHP1</i>
<i>TMFSNOW</i>	<i>KWM3</i> , <i>HG_2</i>	<i>G_L1</i> , <i>TSM2</i>	<i>TSM2</i> , <i>IN15</i>
<i>RMFSNOW</i>	<i>PDMD</i> , <i>HG_2</i>	<i>FRST</i> , <i>AGRC</i>	<i>CRCL</i> , <i>T_SP</i>
<i>SGR</i>	<i>PXXC</i> , <i>PXXD</i>	<i>KWM1</i> , <i>TSM4</i>	<i>TSM4</i> , <i>GLCC</i>
<i>K0H</i>	<i>KWM1</i> , <i>NFMI</i>	<i>KWM1</i> , <i>SSDR</i>	<i>BFST</i> , <i>ASPN</i>
<i>K1H</i>	<i>NFM4</i> , <i>PDRR</i>	<i>KWM2</i> , <i>KWM1</i>	<i>T_SP</i> , <i>ASPN</i>
<i>K2H</i>	<i>NFMI</i> , <i>FRST</i>	<i>ASPS</i> , <i>WIND</i>	<i>ASPS</i> , <i>PDMD</i>
<i>CGIH</i>	<i>PDRR</i> , <i>TSM1</i>	<i>P_MD</i> , <i>KWM2</i>	<i>TSM3</i> , <i>TSM1</i>
<i>SLZIMAX</i>	<i>G_L1</i> , <i>HG_2</i>	<i>HMIN</i> , <i>P_RR</i>	<i>HG_2</i> , <i>HGFG</i>
<i>PERC</i>	<i>NFM2</i> , <i>TSM1</i>	<i>CTRY</i> , <i>HG_2</i>	<i>CRCL</i> , <i>SHP1</i>
<i>ICETMF</i>	-	-	<i>WIND</i> , <i>GLCC</i>
<i>ICERMF</i>	-	-	<i>KWM2</i> , <i>HG_2</i>
<i>Occurring attributes</i>	18	20	21

Die besten Resultate ohne Berücksichtigung der Höheneinteilung stammen von Variante V19°. Sie zeigt in 81% der Gebiete gute ($NSE \geq 0.5$), in 38% der Gebiete sehr gute ($NSE \geq 0.75$) und in 8% der Gebiete misslungene ($NSE < 0.2$) Resultate. Der entsprechende Attributsatz wurde aus hydrologischen Überlegungen heraus aufgebaut, wobei den für Abflussbildung und -konzentration wichtigen Gebietseigenschaften starke Bedeutung zugemessen wurde (MITTELBACH, 2006). Die Attribute werden gemäss den bereits in Kapitel 8.3.2 vorgestellten thematischen Gruppen zusammengefasst und gewichtet, nämlich Physiographie, Lage im Raum, Landnutzung, Bodenphysik, Hydrogeologie, Niederschlag und weitere Klimaparameter; Attribute zu Vergletscherung und Geologie wurden nicht verwendet. Für jede dieser Gruppen wurden zuerst diejenigen Attribute ausgewählt, welche aus hydrologischer Sicht am wichtigsten erschienen (z. B. *KWMI*, *NFMI* und *TSM1* für die Bodenphysik); sie sind innerhalb der entsprechenden thematischen Attributgruppe gleichberechtigt – für eine Gruppe von drei Attributen beträgt das Gewicht pro Attribut also jeweils $\frac{1}{3}$. Anschliessend werden die Attributgruppen gewichtet zusammengeführt, und zwar mit einem Gewicht von 5 für die Hydrogeologie, 2 für die Landnutzung und jeweils 1 für die verbleibenden Gruppen (vgl. Gleichung 8.13). Die detaillierte Attributliste mit den resultierenden Gesamtgewichten ist **Tabelle 9.3** zu entnehmen.

Um die Schlüssigkeit der Auswahl zu prüfen, sind in **Tabelle 9.3** pro verwendetem Attribut zusätzlich alle signifikant korrelierenden (Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha \leq 0.05$) Modellparameter aufgeführt. Wiederum finden sich hydrologisch plausible Zusammenhänge, welche die getroffene Attributauswahl bestätigen, so zum Beispiel zwischen Physiographie (*FBTR, SHPI*), Landnutzung (*BFST, BAGR, BRCK*), Bodenphysik (*KWIM, NFM1*) und Oberflächenabfluss (*KOH*) oder zwischen Hydrogeologie und langsameren Abflusskomponenten (*HG_1–CGIH, HG_3–SGR, HGKR–SGR*); ausführliche Korrelationstabellen sind bei MITTELBACH (2006) zu finden. Ausser für *K2H* und die beiden Gletscherparameter (*ICETMF, ICERMF*) ist für jeden Modellparameter ein signifikant korrelierendes Attribut vorhanden.

Table 9.3: Catchment attributes selected with help of hydrological considerations for set V19° (no distinction into zones of medium altitude). Attributes are listed by thematic groups, with corresponding group (gG), attribute (gA) and overall (g) weights. Additionally, model parameters with significant correlation (probability of error $\alpha \leq 0.05$) are indicated.

Tabelle 9.3: Für den hydrologisch motivierten Satz V19° ausgewählte Gebietsattribute (ohne Beschränkung auf Zonen mittlerer Gebietshöhe), gruppiert nach thematischer Zuordnung und mit entsprechenden Attributgruppen- (gG), Attribut- (gA) und Gesamtgewichten (g). Die jeweils signifikant korrelierenden Modellparameter (Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha \leq 0.05$) sind ergänzend aufgeführt.

gG	Attribute group	gA	Attribute	g	Parameters with significant correlation
1	Physiography	1	AREA	$1/_{12} \cdot 1/_{6} = 0.014$	-
		1	FBTR	$1/_{12} \cdot 1/_{6} = 0.014$	PKOR, SGR, KOH, T0, K1H
		1	IAVG	$1/_{12} \cdot 1/_{6} = 0.014$	KOH, SGR
		1	SHPI	$1/_{12} \cdot 1/_{6} = 0.014$	KOH
		1	ASPN	$1/_{12} \cdot 1/_{6} = 0.014$	-
		1	ASPS	$1/_{12} \cdot 1/_{6} = 0.014$	-
1	Site location	1	CTRX	$1/_{12} \cdot 1/_{2} = 0.042$	PKOR
		1	CTRY	$1/_{12} \cdot 1/_{2} = 0.042$	K1H, KOH, SGR
2	Land use	1	BFST	$2/_{12} \cdot 1/_{5} = 0.033$	T0, K1H, SNOKOR
		1	BAGR	$2/_{12} \cdot 1/_{5} = 0.033$	KOH
		1	BBLT	$2/_{12} \cdot 1/_{5} = 0.033$	-
		1	BSLS	$2/_{12} \cdot 1/_{5} = 0.033$	SGR, K1H
		1	BRCK	$2/_{12} \cdot 1/_{5} = 0.033$	SGR, KOH
1	Soil physics	1	KWIM	$1/_{12} \cdot 1/_{3} = 0.028$	CGIH, KOH, K1H, SGR, PERC
		1	NFM1	$1/_{12} \cdot 1/_{3} = 0.028$	KOH, SGR
		1	TSM1	$1/_{12} \cdot 1/_{3} = 0.028$	CGIH, SNOKOR, PERC, PKOR
5	Hydrogeology	1	HG_1	$5/_{12} \cdot 1/_{7} = 0.060$	CGIH
		1	HG_2	$5/_{12} \cdot 1/_{7} = 0.060$	SLZIMAX
		1	HG_3	$5/_{12} \cdot 1/_{7} = 0.060$	SGR
		1	HGKR	$5/_{12} \cdot 1/_{7} = 0.060$	KOH, SGR, PKOR
		1	HGFG	$5/_{12} \cdot 1/_{7} = 0.060$	SLZIMAX, TMFSNOW
		1	HG0A	$5/_{12} \cdot 1/_{7} = 0.060$	-
		1	HG0B	$5/_{12} \cdot 1/_{7} = 0.060$	PKOR, KOH
1	Precipitation	1	PSUM	$1/_{12} \cdot 1 = 0.083$	PKOR
1	Climate	1	SSDR	$1/_{12} \cdot 1/_{2} = 0.042$	KOH, SGR, K1H
		1	WIND	$1/_{12} \cdot 1/_{2} = 0.042$	KOH, SGR, RMFSNOW

Es mag auf den ersten Blick erstaunen, dass die rein statistisch erstellte Variante V02* bessere Resultate erzielt als alle hydrologisch basierten Varianten V04–V21. Zu bedenken ist allerdings, dass bereits die in dieser Arbeit verwendeten Gebietsattribute (Kapitel 8.2) aufgrund hydrologischer Überlegungen zusammengestellt wurden. Dass bei der grossen Zahl von 80 bereits zielspezifisch ausgewählten Attributen eine statistische Selektion erfolgreicher sein kann als eine manuell durch einen Experten vorgenommene, scheint plausibel. Immerhin erreicht die benutzerdefinierte Variante V19°

die besten Resultate der Varianten ohne Höhenzoneneinteilung – offenbar führen die getroffenen Annahmen über die Bedeutung der Gebietsattribute zumindest auf den gesamten Anwendungsbereich bezogen zum grössten Erfolg. Wegen der besseren Resultate werden aber im Folgenden vor allem die Varianten mit Höhenzonierung und im Besonderen die beste Variante V02* betrachtet.

Hochwassergütemass PQT

Da für diese Arbeit eine Regionalisierung von Hochwasserabflüssen angestrebt wird, ist nun zu überprüfen, ob die oben ermittelte Variante V02* mit den besten Nash-Sutcliffe-Effizienzen auch die besten Resultate im Hochwasserbereich ergibt. Dazu wird das aussagekräftigste Hochwassergütemass PQT betrachtet, und zwar in Relation zu demjenigen Wert, welchen PQT in der Hochwasserkalibrierung erreichte ($PQT_{rel,calHQ}$, vgl. Gleichung 4.4). Zu erwarten ist, dass mit der Regionalisierung eine Verschlechterung von PQT eintritt; entscheidend wird sein, bei welcher Variante diese Verschlechterung am geringsten ausfällt.

Die negativen Mittelwerte von $PQT_{rel,calHQ}$ in **Tabelle 9.4** zeigen, dass die Güte der Spitzenanpassung tatsächlich abgenommen hat. Am geringsten ist der Verlust für die Variante V16*, am zweitgeringsten für V02*; der Wert von -0.257 für V02* ist als eine mittlere Verschlechterung um knapp 26% zu interpretieren. Da der Unterschied zwischen V16* und V02* nur klein ausfällt und vor allem auch weil die Standardabweichung von $PQT_{rel,calHQ}$ für V02* die geringste ist, kann dieser Attributsatz V02* auch für die Regionalisierung im Hochwasserbereich als der am besten geeignete angesehen werden. Rückschlüsse von der Standardeffizienz NSE auf das Hochwassergütemass PQT sind zudem offenbar statthaft.

Attribute set	$m(PQT_{rel,calHQ})$	$s(PQT_{rel,calHQ})$
V01*	-0.286	0.278
V02*	-0.257	0.262
V04*	-0.269	0.303
V05*	-0.266	0.308
V06*	-0.296	0.296
V09*	-0.281	0.299
V10*	-0.264	0.314
V14*	-0.263	0.309
V16*	-0.254	0.312
V17*	-0.266	0.303
V19*	-0.280	0.304
V20*	-0.276	0.322
V21*	-0.325	0.314

Table 9.4: Average (m) and standard deviation (s) of $PQT_{rel,calHQ}$ for 13 relevant attribute sets with distinction of altitude zones (V01*–V21*), based upon 49 priority A catchments with simulation period 1994–1997 (initialisation year: 1993).

Tabelle 9.4: Mittelwert (m) und Standardabweichung (s) des Hochwassergütemasses $PQT_{rel,calHQ}$ für 13 relevante Attributsätze mit Höhenzonierung (V01*–V21*), basierend auf 49 Einzugsgebieten der Priorität A mit der Simulationsperiode 1994–1997 (Initialisierungsjahr: 1993).

Einbezug von Hochwasser- und Klimaregionen

Da die Berücksichtigung von drei Zonen mittlerer Gebietshöhe erfolgreich war, stellt sich die Frage, ob mit den beiden anderen vorgeschlagenen Differenzierungen nach Hochwasser- respektive nach Klimaregionen weitere Verbesserungen der Resultate erzielt werden können.

Zur Berücksichtigung der Regionen wurden die beiden in den Methoden erläuterten Möglichkeiten verwendet, einerseits nämlich eine Beschränkung der Übertragung auf dieselbe Region und andererseits eine Gewichtung der Regionszugehörigkeit; der entsprechende Gewichtungsfaktor gR wurde auf 0.6 festgelegt. Die Beurteilung der Ähnlichkeit (Distanzberechnung) erfolgte auf Basis der beiden oben ermittelten besten Parametersätze V19° (mit Höhenzonierung) und V02* (ohne Höhenzonierung).

Abbildung 9.2 zeigt einerseits, dass die Einteilung nach 6 Klimaregionen etwas besser abschneidet als diejenige nach 11 Hochwasserregionen. Gleichzeitig ist eine gewichtete Berücksichtigung vorteilhafter als die Einschränkung auf eine Nachbarschaftsregion. Weiter wirkt sich der Einbezug von Zonen mittlerer Gebietshöhe hier nachteilig aus. Die besten Resultate der hier untersuchten Möglichkeiten erreicht eine gewichtete Berücksichtigung der Klimaregionen ohne Höhenzonierung (wCL°); deren Güte entspricht in etwa der Variante V19°, ist aber der noch etwas besseren Variante V02* unterlegen.

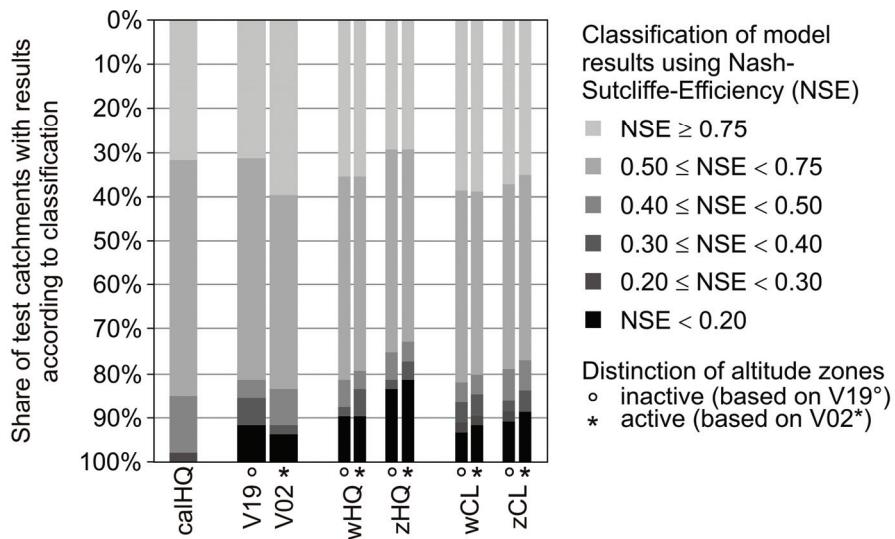


Figure 9.2: Results for Nearest Neighbours regionalisation with weighted (w) or forced (z) correspondence to flood regions (HQ) and climate regions (CL), with (*) and without (°) consideration of zones of mean catchment altitude. Results for flood calibration (calHQ) as well as best regionalisations without (V19°) and with (V02*) consideration of altitude zones are indicated for comparison.

Abbildung 9.2: Resultate für eine Nearest-Neighbours-Regionalisierung mit gewichteter (w) oder erzwungener Zugehörigkeit (z) zu Hochwasserzonen (HQ) und Klimaregionen (CL), mit (*) und ohne (°) Berücksichtigung der Zonen mittlerer Gebietshöhe. Die Werte für Hochwasserkalibrierung (calHQ) sowie für die beiden besten Regionalisierungen ohne (V19°) und mit (V02*) Berücksichtigung der Höhenzonen sind zum Vergleich angegeben.

Es kann gefolgt werden, dass sich die Resultate bei Einbezug der hier verwendeten Regionen etwa in dem Maße verschlechtern, wie die Auswahl an Spendergebieten eingeschränkt wird; dies in deutlichem Gegensatz zum erfolgreichen Einsatz von Zonen mittlerer Gebietshöhe. Der Pool potenzieller Spendergebiete wird offenbar so stark vermindert, dass dies nicht durch die damit verbundene Homogenisierung der Bedingungen aufgewogen werden kann. Am problematischsten sind die alpinen Regionen der Hochwasserzonen N1 (westliche Voralpen, östliche Alpen) und M1 (westliches Mittelland, Faltenjura) sowie die alpinen Regionen der Klimazonen Voralpen und östliche Alpen; hier ist die Abdeckung mit kalibrierten Gebieten relativ gering. Die Homogenisierung der Spendergebiete durch lediglich drei Zonen mittlerer Höhe scheint die beste Variante zu sein.

Modellgüte der einzelnen Nearest Neighbours

In den Methoden wurde eine Regionalisierung mit Hilfe der fünf Nearest Neighbours vorgeschlagen. Diese Variante stützt sich auf die Erfahrungen von MITTELBACH (2006), welche im Verlaufe ihrer Untersuchungen bestätigen konnte, dass die Verwendung von fünf Gebieten bessere Ergebnisse liefert als nur ein Gebiet und dass die Medianbildung gegenüber der Mittelwertbildung bei diesen fünf Gebieten vorteilhafter ist.

Abbildung 9.3 (links) zeigt anhand der Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE), dass grösste Ähnlichkeit nicht gleichbedeutend mit bester Güte der Regionalisierung zu sein braucht – eine Feststellung, die beispielsweise auch MCINTYRE ET AL. (2005) machten. Bezogen auf die 49 betrachteten Einzugsgebiete der Priorität A schneidet der Parametersatz des zweitähnlichsten Gebietes gemäss Variante V02* deutlich am besten ab (Median der NSE: 0.68), während das ähnlichste Gebiet die schlechtesten Resultate zeigt (Median von NSE: 0.57). Die besten Resultate liefert jedoch die Berechnung der medianen Ganglinie aus den 5 Nearest-Neighbour-Simulationen (Median von NSE: 0.69). Diese Regionalisierungsergebnisse sind auch bezüglich der Hochwasserkalibrierung als Referenz (Median von NSE: ebenfalls 0.69) als sehr gut einzustufen und weisen zudem eine im Vergleich noch etwas geringere Streuung der Resultate auf. Weiter können die bei den einzelnen Nearest Neighbours häufig auftretenden Ausreiser nach Unten durch die Medianbildung etwas vermindert werden.

Nicht sehr viel anders präsentieren sich die Verhältnisse beim hochwasserspezifischen $PQT_{rel,calHQ}$ (**Abbildung 9.3**, rechts): Auch hier weist das zweitähnlichste Gebiet die besten Resultate auf, zeigt

also den geringsten Verlust in der Modellgüte PQT gegenüber der Hochwasserkalibrierung (Median von $PQT_{rel,calHQ}$: -0.02). Die mediane Ganglinie vermag diesen sehr guten Wert nicht ganz zu egalisieren (Median von $PQT_{rel,calHQ}$: -0.07), liegt aber im Bereich der übrigen Nearest Neighbours.

Da bei der tatsächlichen Regionalisierung keine Vergleichswerte des Abflusses zur Verfügung stehen, kann dann natürlich nicht entschieden werden, welcher der Nearest Neighbours die besten Resultate liefert. Dies ist ein entscheidender Grund mehr, die mediane Ganglinie zu verwenden, welche wie gesehen sehr gute Ergebnisse zeigt.

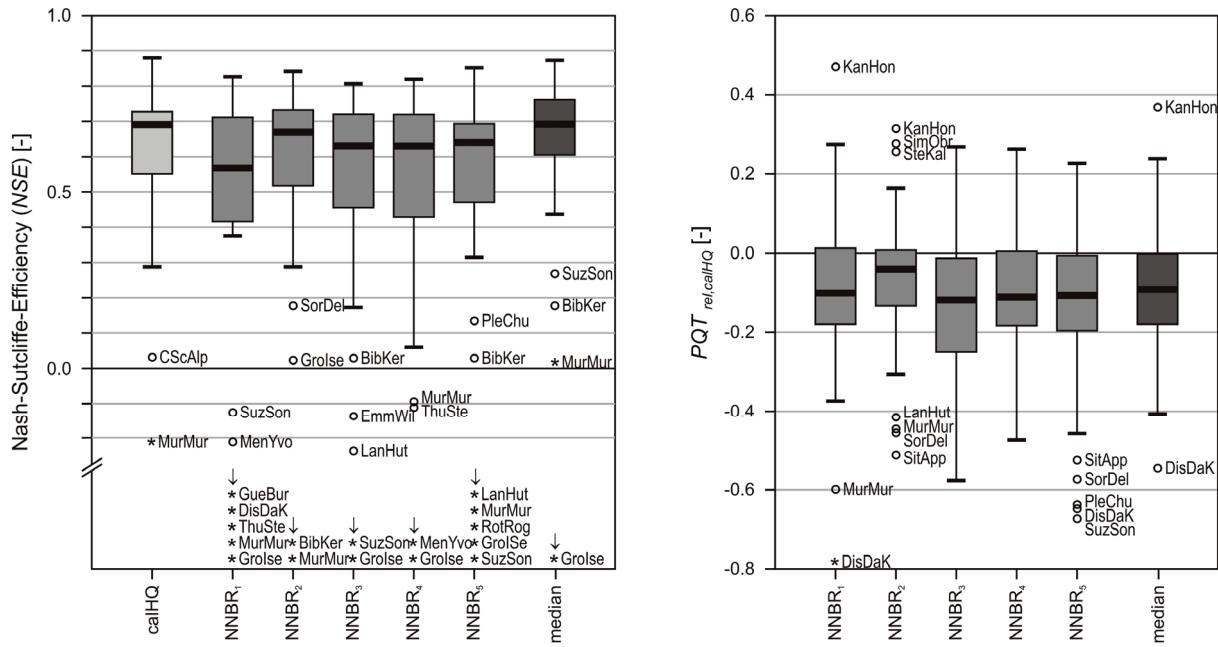


Figure 9.3: Box-plot of NSE and $PQT_{rel,calHQ}$ for simulation with respective flood calibrated parameter set from five most similar catchments ($NNBR_1$ – $NNBR_5$) as well as for median hydrograph derived from the latter (49 priority A catchments, flood calibrated). Results of flood calibration (calHQ, only NSE) are indicated as reference value.

Abbildung 9.3: Boxplot für NSE und $PQT_{rel,calHQ}$ der Simulation mit dem jeweils hochwasserkalibrierten Parametersatz für die fünf ähnlichsten Gebiete ($NNBR_1$ – $NNBR_5$) sowie die daraus berechnete mediane Ganglinie (49 Einzugsgebiete der Priorität A, Hochwasserkalibrierung). Die Resultate der Hochwasserkalibrierung (calHQ, nur für NSE) sind als Referenzwert angegeben.

Nachbarschaftsbeziehungen

Um die Methode der Nearest Neighbours auch in ihrer räumlichen Struktur zu plausibilisieren, sind in **Abbildung 9.4** für die 49 Gebiete der Priorität A die jeweiligen Nachbarschaftsbeziehungen zu den fünf ähnlichsten Gebieten dargestellt, und zwar sowohl ohne wie auch mit Berücksichtigung der Zonen mittlerer Gebietshöhe. Um die Auswirkungen der Höhenzonierung besser sichtbar zu machen, basieren beide Darstellungen auf dem Attributsatz V02 (also V02° resp. V02*), für die Variante ohne Höhenzonierung wurde also nicht die am besten geeignete Variante V19° verwendet. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass bereits ohne Höhenzonierung eine erkennbare Unterscheidung der topographischen Regionen Alpen, Voralpen und Mittelland stattfindet; relativ häufig sind allerdings Verbindungen zwischen voralpinen und alpinen Gebieten. Keine dominante Rolle spielt bei beiden Varianten die räumliche Nähe, in Übereinstimmung mit den methodischen Grundlagen und dem verwendeten Attributsatz V02. Die zu beobachtenden Beziehungen zwischen räumlich benachbarten Gebieten sind darauf zurückzuführen, dass in diesen Fällen tatsächlich auch die mit den Gebietsattributen erfassten Bedingungen ähnlich sind.

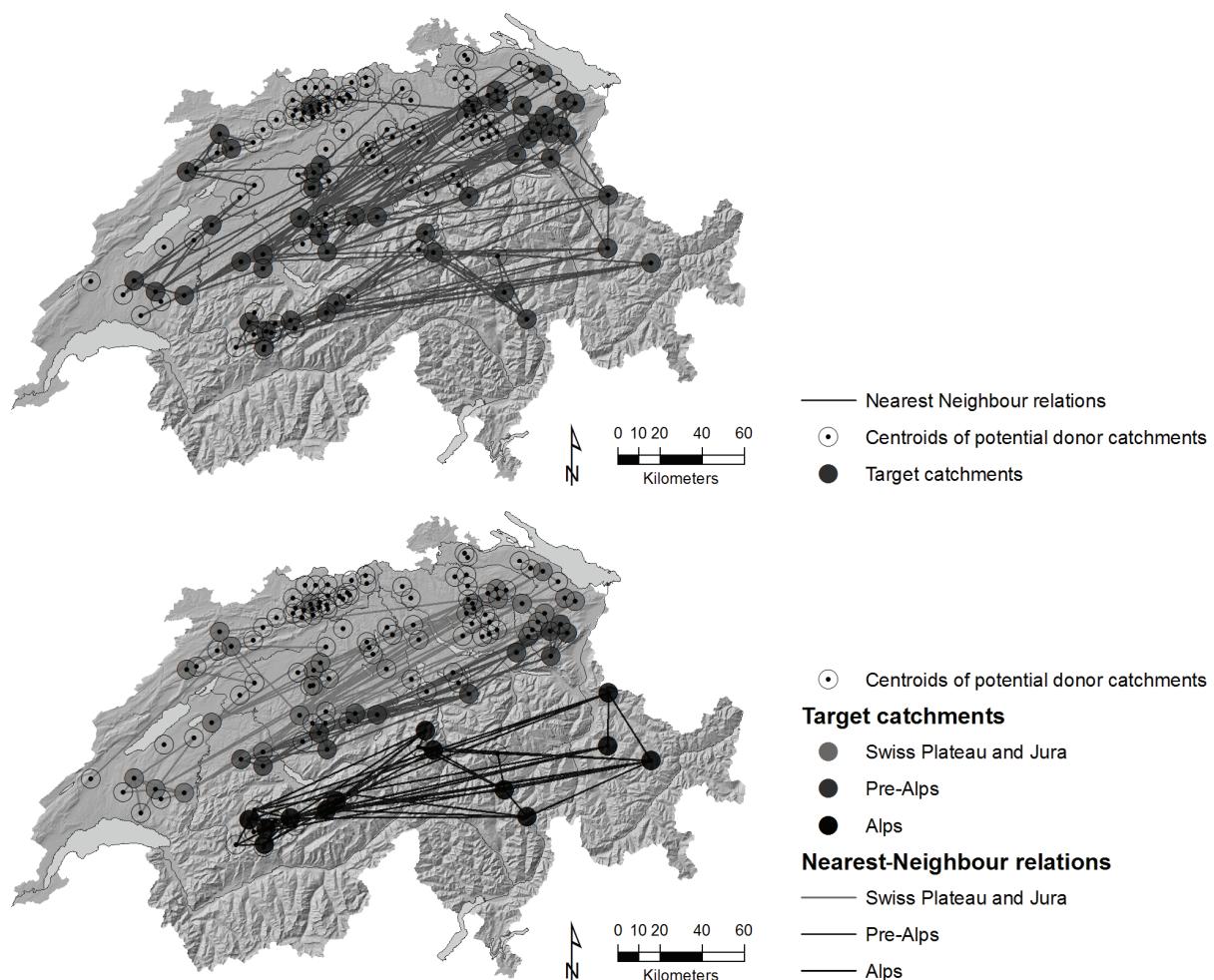


Figure 9.4: Neighbour relations for the five most similar catchments based upon of attribute set V02, without (V02°, top) and with (V02*, bottom) consideration of zones of mean catchment altitude. Reference: 49 priority A catchments used as targets and all 140 successfully calibrated catchments serving as potential donors.

Abbildung 9.4: Nachbarschaftsbeziehungen für die fünf ähnlichsten Gebiete auf Basis des Attributsatzes V02, ohne (V02°, oben) und mit (V02*, unten) Berücksichtigung der Zonen mittlerer Gebietshöhe. Zielgebiete sind die 49 Einzugsgebiete der Priorität A, potenzielle Spendergebiete sind alle 140 erfolgreich kalibrierten Gebiete.

Ergänzend führt **Tabelle 9.5** nach Zonen mittlerer Höhe differenziert diejenigen Gebiete auf, welche am häufigsten als Spendergebiete benutzt werden. Demnach sind Murg–Frauenfeld, Emme–Emmenmatt und Kleine Emme–Werthenstein (Chappelboden) sowie Kander–Hondrich typisch für ihre jeweilige Zone mittlerer Höhe. Insgesamt wird mit dem gewählten Verfahren V02* jedes potenzielle Spendergebiet mindestens einmal auch tatsächlich verwendet; der grosse Kalibrierungsaufwand hat sich also gelohnt.

Zu beachten ist dabei: Die Anzahl alpiner Spendergebiete ist in der Praxis nochmals geringer, wenn unvergletscherte Gebiete regionalisiert werden sollen. Dafür stehen dann noch 11 Spendergebiete mit einer Vergletscherung von weniger als 7.5% – dem in Kapitel 8.3.1 definierten Schwellenwert – zur Verfügung. Bei den 12 vergletscherten Gebieten können hingegen alle 23 alpinen Gebiete als Spender verwendet werden; die fehlenden Gletscherparameter werden dann wie beschrieben als Mittelwert der entsprechenden Kalibrierungen abgeschätzt.

Donor catchment	Use	Area [km ²]
<i>Plateau and Jura, 95 catchments</i>		
Murg–Frauenfeld	18	212
Wyna–Suhr	15	120
Wyna–Unterkulm	15	92
Sissle–Eiken	12	123
Bruggbach–Gipf / Oberfrick	11	45
<i>Pre-alpine, 22 catchments</i>		
Emme–Emmenmatt	12	443
Kleine Emme–Werthenstein, Chappelboden	12	311
Emme–Eggiwil	9	124
Ilfis–Langnau	9	188
Kleine Emme–Littau	8	477
<i>Alpine, 23 catchments</i>		
Kander–Hondrich	16	520
Weisse Lütschine–Zweilütschinen	13	164
Simme–Zweisimmen	12	203
Simme–Latterbach	11	564
Engelberger Aa–Engelberg	8	85

Table 9.5: Most frequently used donor catchments in Nearest Neighbours regionalisation (V02*), distinguished by zone of mean altitude.

Tabelle 9.5: Die in der Nearest-Neighbours-Methode (V02*) am häufigsten verwendeten Spendergebiete nach Zone mittlerer Höhe.

9.1.2 Korrelationsbereinigte Euklidische Distanz (NNBR_{ECRR}) und Mahalanobis-Distanz (NNBR_{MAHA})

Bei der Methodenauswahl für die Distanzberechnung in Kapitel 8.3 wurde bereits entschieden, dass nur wenige Varianten im Detail untersucht werden sollen, da insgesamt relativ ähnliche Ergebnisse zu erwarten sind. Die Experimente mit NNBR_{EUCL} im vorangehenden Abschnitt 9.1.1 haben gezeigt, dass vor allem die Auswahl der Attribute und die Gewichtung der verschiedenen Attributgruppen (vgl. Kapitel 8.2) wichtig ist. Durch eine individuelle Gewichtung der einzelnen Attribute konnten aber kaum grosse Unterschiede erreicht werden. Deshalb wird im Folgenden nicht auf die korrelationsbereinigte Euklidische Distanz (NNBR_{ECRR}) eingegangen, welche NNBR_{EUCL} methodisch relativ ähnlich ist und sich lediglich durch die automatische Gewichtung der Attribute unterscheidet. Die sehr guten Resultate, welche mit NNBR_{EUCL} erzielt wurden, lassen dies als vertretbar erscheinen.

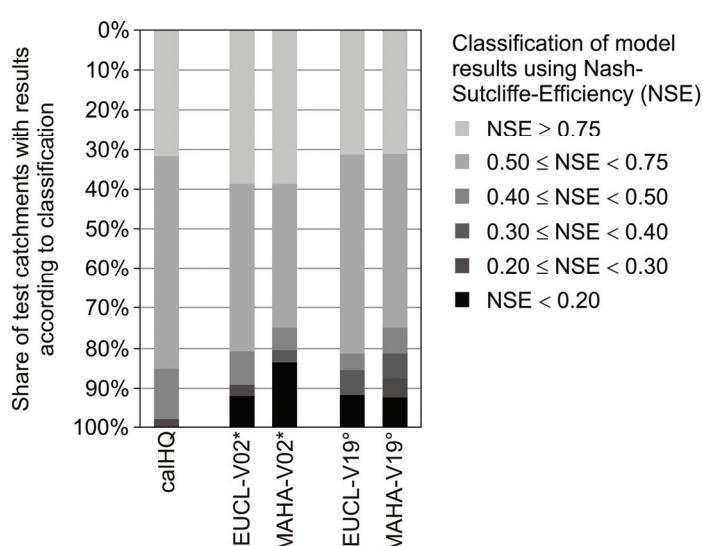


Figure 9.5: Results for Nearest Neighbours regionalisation with Mahalanobis-metrics (MAHA) and user-weighted Euclidean Distance (EUCL) using Attribute sets V02* and V19°. Based upon 36 catchments for V02* and 49 catchments for V19°; simulation period 1994–1997. Flood calibration results (calHQ) are indicated for comparison.

Abbildung 9.5: Ergebnisse der Nearest-Neighbours-Regionalisierung mit Mahalanobis-Metrik (MAHA) und mit benutzergewichteter Euklidischer Distanz (EUCL) unter Verwendung der Attributsätze V02* und V19°. Basierend auf 36 Einzugsgebieten für V02* und 49 Einzugsgebieten für V19°, Simulationszeitraum 1994–1997. Zum Vergleich sind die Resultate der Hochwasserkalibrierung (calHQ) angegeben.

Ergänzend sollen an dieser Stelle aber die Resultate der etwas anders aufgebauten Mahalanobis-Metrik ($NNBR_{MAHA}$) angesprochen werden, um zu prüfen, ob mit einem alternativen Ansatz zur Distanzberechnung allenfalls noch bessere Ergebnisse erzielt werden können. Als Attributsätze werden die bei $NNBR_{EUCL}$ identifizierten besten Varianten V02* und V19° verwendet, da von ihnen erwartet werden kann, dass sie unabhängig von der Distanzberechnungsmethode eine günstige Auswahl an Attributen enthalten. Es ist zwar nicht auszuschliessen, dass für $NNBR_{MAHA}$ noch geeignete Attributsätze existieren, die Unterschiede werden aber im Vergleich zur Methode als gering eingeschätzt. Zudem können die Resultate von $NNBR_{MAHA}$ dadurch direkt denjenigen von $NNBR_{EUCL}$ gegenübergestellt werden. Wie **Abbildung 9.5** nun zeigt, weist $NNBR_{MAHA}$ im Vergleich zu $NNBR_{EUCL}$ sowohl für V02* wie auch für V19° deutlich mehr schlechte Resultate auf. Da bei der Auswahl von Regionalisierungsmethoden wie oben gesehen von der Nash-Sutcliffe-Effizienz auf die Güte der Hochwasserabschätzung (Gütemass PQT) geschlossen werden kann, ist ein weiteres Verfolgen der Mahalanobis-Distanz nicht angezeigt.

In der Praxis hat sich die Anwendung der Mahalanobis-Distanz zudem als problematisch erwiesen, weil die darin enthaltene Kovarianzmatrix s_{kl} nicht zu s_{kl}^{-1} invertiert werden kann, wenn sie singulär ist. Dieses Problem tritt auf, wenn viele Attribute verwendet werden, gleichzeitig aber wenig Gebiete zur Verfügung stehen. Wendet man den Attributsatz V02* an, lassen sich die Distanzen für 13 von 49 Gebieten im Testdatensatz nicht berechnen; dies betrifft vor allem die voralpine Zone. Deshalb muss die an sich vorteilhafte Unterscheidung in Zonen mittlerer Gebietshöhe fallengelassen werden; die Distanzberechnung mit dem diesbezüglich besten Attributsatz V19° ist dann fehlerfrei durchführbar, zeigt dann aber wie beschrieben mehr schlechte Resultate als die entsprechende benutzergewichtete Nearest-Neighbour-Methode ($NNBR_{EUCL}$).

9.1.3 Fazit

Mit den obigen Analysen ist die Suche nach der besten Variante für die Nearest-Neighbours-Regionalisierung abgeschlossen: Optimale Ergebnisse werden mit der durch den Benutzer gewichteten Euklidischen Distanz ($NNBR_{EUCL}$) erzielt, unter Verwendung des statistisch erstellten Attributsatzes V02*. Dieser Attributsatz richtet sich nach den wichtigsten festgestellten Zusammenhängen zwischen Gebietsattributen und Modellparametern, ist nach drei Zonen mittlerer Höhe differenziert und beinhaltet je nach Zone zwischen 18 und 21 Attribute. Im Folgenden beziehen sich sämtliche Auswertungen zur Nearest-Neighbours-Regionalisierung ($NNBR$) stets auf diese Grundlagen.

9.1.4 Unsicherheitsanalysen mit der optimalen Variante

Parameterunsicherheit

Die Nearest-Neighbour-Methode kann nun nicht nur zur Regionalisierung, sondern auch zur Abschätzung der Parameterunsicherheit eingesetzt werden (angedeutet z. B. von BURN UND BOORMAN, 1992, und YOUNG, 2006). Auf diesen interessanten Zusatznutzen soll im Folgenden eingegangen werden, insbesondere als Vergleich zur bereits erfolgten Unsicherheitsabschätzung aus Monte-Carlo-Experimenten und mit zwei Kalibrierungsperioden (vgl. Kapitel 6).

Hier wird die Parameterunsicherheit dadurch bewertet, dass die Parameterwerte der fünf ähnlichsten Gebiete gemäss bester Nearest-Neighbour-Variante ($NNBR_{EUCL}$, V02*) mit den kalibrierten Werten verglichen werden. Als Datengrundlage dienen die 49 mesoskaligen Testeinzugsgebiete der Priorität A, die Anwendung des Jack-Knife-Verfahrens (vgl. Kapitel 8.7) stellt die Unabhängigkeit von kalibrierten und regionalisierten Parameterwerten sicher. Die Abweichung wird relativ zum beobachteten Wertebereich des jeweiligen Parameters betrachtet und kann direkt (positive oder negative Abweichung) oder über den Absolutwert (Abweichungsbetrag) interpretiert werden. Somit steht ein weiteres Mass für die Parameterunsicherheit zur Verfügung. Eine nicht zu unterschätzende Einschränkung muss bei dieser Bewertung allerdings gemacht werden: Die bereits in der Kalibrierung enthaltene Parameterunsicherheit geht natürlich in die Resultate dieser neuerlichen Unsicherheitsanalyse mit ein, da die Parameterwerte der Spendergebiete aus einer Kalibrierung stammen.

In **Abbildung 9.6** sind für jeweils alle 49 Einzugsgebiete der Priorität A die Parameterabweichungen der 5 Nearest Neighbours gegenüber dem kalibrierten Wert aufgetragen. Pro Parameter stehen also 245 Datenpunkte zur Verfügung. Die mediane absolute Abweichung vom kalibrierten Wert (**Abbildung 9.6**, links) beträgt zwischen 13 und 32%, was an sich schon ein relativ geringer Wert ist. Betrachtet man nicht die Absolutwerte, sondern die positiven und negativen Abweichungen (**Abbildung 9.6**, rechts), wird der kalibrierte Wert im Mittel sehr gut getroffen, womit sich systemati-

sche Abweichungen ausschliessen lassen. Die nicht übermässig grosse Ausdehnung der Quartilsbereiche unterstützt die Plausibilität der aus den Nearest Neighbours gewonnenen Parametersätze; dabei ist die Schwankungsbreite bei *SGR* und *PKOR* am geringsten, bei *K2H* und *T0* hingegen am grössten, was wiederum als Indikator für kleinere respektive grössere Parameterunsicherheit interpretiert werden kann. Diese Ergebnisse decken sich gut mit den Interpretationen, welche in Kapitel 6.4 anhand von zwei verschiedenen Kalibrierungsperioden abgeleitet wurden.

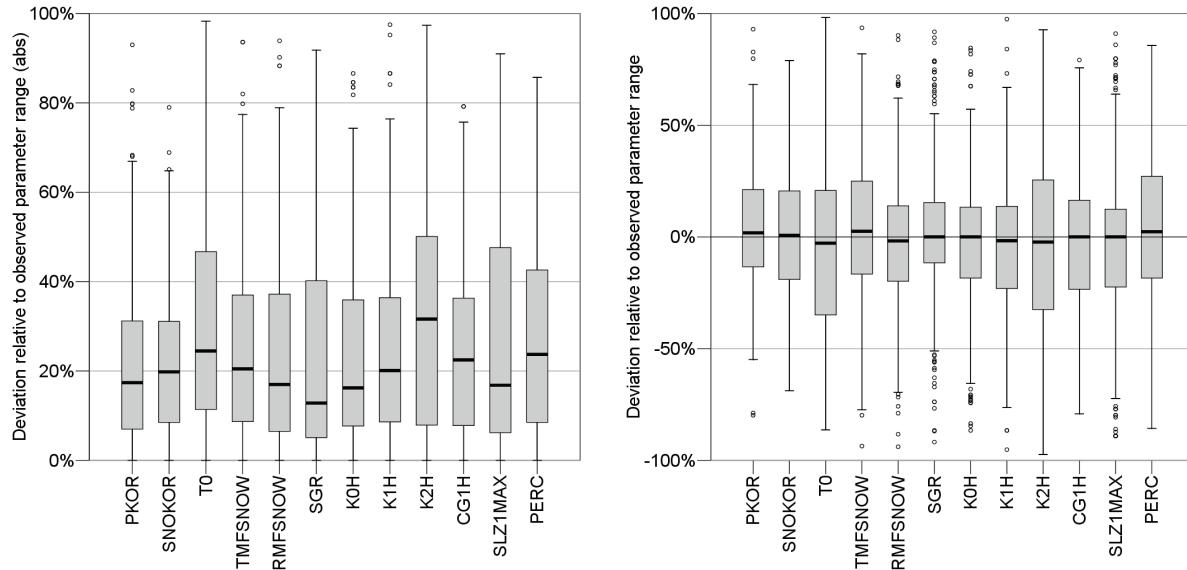


Figure 9.6: Absolute values of deviations (left) and actual deviations (right) of Nearest Neighbours regionalised parameter values from calibrated target catchment value, standardised to observed parameter range. The plot is based upon parameters of the 5 most similar donor catchments from 49 priority A catchments, resulting in a total of 245 data points per parameter.

Abbildung 9.6: Absolutwerte der Abweichungen (links) und tatsächliche Abweichungen (rechts) der mit Nearest Neighbours regionalisierten Parameterwerte von denjenigen des kalibrierten Zielgebietes, relativ zum beobachteten Parameterbereich. Datengrundlage sind die jeweils 5 ähnlichsten Spendergebiete von 49 Einzugsgebieten der Priorität A, insgesamt also 245 Datenpunkte pro Parameter.

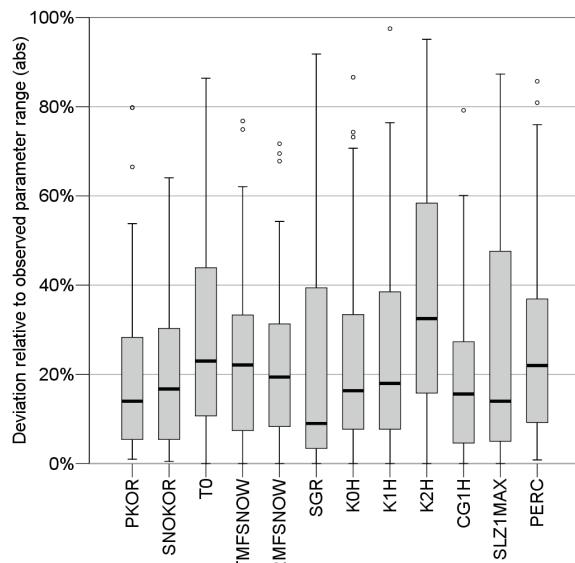


Figure 9.7: Deviations of first Nearest Neighbour regionalised parameter values from calibrated target catchment value (absolute values). The plot is based upon parameters of the most similar donor catchments from 49 priority A catchments.

Abbildung 9.7: Abweichungen der mit dem ersten Nearest Neighbour regionalisierten Parameterwerte von denjenigen des kalibrierten Zielgebietes (Absolutwerte). Datengrundlage ist jeweils das ähnlichste Spendergebiet von 49 Einzugsgebieten der Priorität A.

Für das Gesamtbild von **Abbildung 9.6** spielt es im Übrigen keine bedeutende Rolle, ob nun wie gehabt die 5 ähnlichsten Gebiete (Nearest Neighbours) betrachtet werden oder nur das jeweils ähnlichste Gebiet ausgewertet wird – dies belegt **Abbildung 9.7**. Während beispielsweise bei *K2H* die Abweichung für den ersten Nearest Neighbour (**Abbildung 9.7**) etwas grösser ist als für alle fünf Nearest Neighbours (**Abbildung 9.6**), vermindern sich Abweichungen bei *CGIH* leicht. Insgesamt wird die Parameterunsicherheit durch Verwendung von zusätzlichen 4 Nearest Neighbours also weder wesentlich vergrössert noch verkleinert.

Einen weiteren wichtigen Hinweis auf die Unsicherheit der ermittelten Parameterwerte gibt **Abbildung 9.8** – sie zeigt für 49 Einzugsgebiete der Priorität A die Streuung, welche bei den Parametern der fünf ähnlichsten Gebiete relativ zum jeweiligen Parametermittelwert auftritt. Auffällig ist, dass die Quartilsbereiche von *SGR*, *KOH*, *K1H*, *K2H* und *SLZ1MAX* – alle betreffen die Abflussbildung – deutlich grösser sind, diese Parameter also durch die Nearest-Neighbours-Regionalisierung weniger deutlich eingegrenzt werden. Vermutet werden kann dazu, dass diese Parameter stark durch gebietsspezifische Eigenschaften beeinflusst sind, welche durch die gefundenen ähnlichsten Gebiete nicht angemessen repräsentiert werden können. Dass *PKOR* hingegen vergleichsweise gut definiert ist, deckt sich wiederum mit Ergebnissen der Monte-Carlo-Experimente in Kapitel 6.

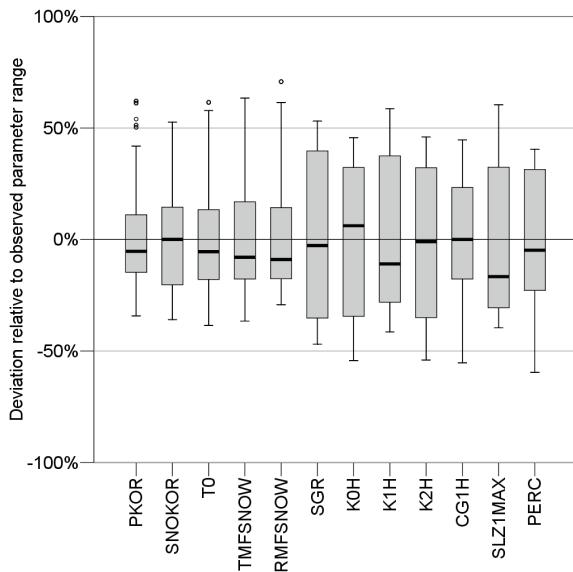


Figure 9.8: Relative deviation of Nearest Neighbours regionalised parameter values from respective average. The plot is based upon parameters of the 5 most similar donor catchments from 49 priority A catchments, resulting in a total of 245 data points per parameter.

Abbildung 9.8: Relative Abweichungen der mit Nearest Neighbours regionalisierten Parameterwerte vom jeweiligen Mittelwert. Datengrundlage sind die jeweils 5 ähnlichsten Spendergebiete von 49 Einzugsgebieten der Priorität A, insgesamt also 245 Datenpunkte pro Parameter.

Unsicherheit der Regionalisierungsresultate

Nebst den oben aufgezeigten summarischen Analysen kann für die einzelnen Gebiete auch in den Simulations- und Extrapolationsresultaten ein Indikator für die Unsicherheit der Nearest-Neighbours-Regionalisierung ausgewiesen werden. Dazu können beispielsweise die Simulationen der fünf ähnlichsten Gebiete als Konfidenzbereich aufgetragen werden; ebenso können die entsprechenden Jahresspitzen ein Vertrauensintervall für die Hochwasserabschätzung liefern (zu Terminologie und Anwendung siehe Kapitel 6.5.2).

Abbildung 9.9 zeigt das schon in Kapitel 6 verwendete Beispiel des Allenbach bei Adelboden im Jahr 1999 (vgl. **Abbildung 6.14**). Zwar sind die Konfidenzbereiche hier etwas breiter als bei den Sensitivitätsanalysen der Modellparameter, insgesamt kann aber von einem guten Simulationsresultat gesprochen werden. Berücksichtigt man, dass es sich hier um eine Regionalisierung handelt und keinerlei Informationen über den Abfluss des Zielgebietes verwendet wurden, erscheint das Ausmass des erhaltenen Unsicherheitsbereichs durchwegs akzeptabel.

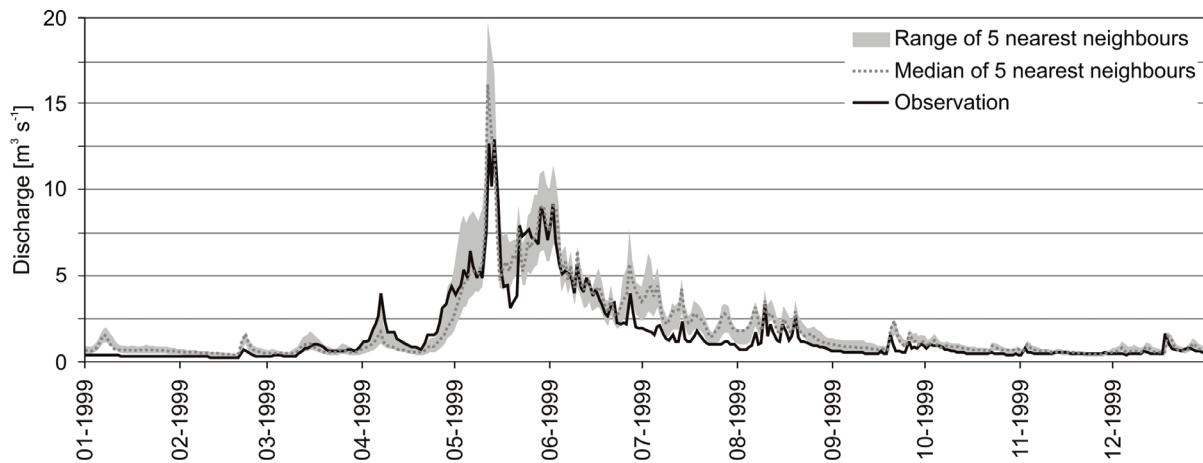


Figure 9.9: Discharge simulation for Allenbach–Adelboden in 1999 directly using unchanged parameter sets from the five most similar catchments (Nearest Neighbours).

Abbildung 9.9: Abflusssimulation des Jahres 1999 für Allenbach–Adelboden mit den unveränderten Parametersätzen der fünf ähnlichsten Gebiete (Nearest Neighbours).

9.2 Kriging

Wie in Kapitel 8.4 erläutert, können die meisten Einstellungsmöglichkeiten des Kriging-Verfahrens auf den für diese Anwendung geschätzten Standardwerten belassen werden, da eine Veränderung auf das Resultat nur geringen Einfluss hat und methodisch kaum zu begründen ist. Die von GOOVAERTS (1997) empfohlene minimale Anzahl von 10 Stützstellen wird beim gewählten Suchradius von 100 km im gesamten Anwendungsgebiet stets erreicht oder deutlich übertrffen. Die maximale Anzahl Stützstellen wurde auf 15 festgelegt. Ebenfalls vernachlässigt werden können unterschiedliche Zonierungen des Anwendungsgebietes (vgl. Kapitel 0 und 8.2.9), da beim Kriging ausschliesslich die Koordinaten der Gebietsschwerpunkte ausschlaggebend sind – somit besitzen die resultierenden Parameter bereits implizit einen lokalen räumlichen Bezug. Wichtig erscheint aber eine Untersuchung des Strukturgrößenparameters a_{KRIG} , welcher den Generalisierungsgrad der Interpolation bestimmt (siehe Kapitel 8.4).

9.2.1 Festlegen der Strukturgrösse

Als plausible Grössen für eine Parameterregionalisierung in der Schweiz wurden Strukturgrössen (a_{KRIG}) von 5, 10, 25 und 50 km getestet. **Abbildung 9.10** zeigt die entsprechenden Interpolationsresultate für den Parameter $CGIH$. Rein visuell erscheint ein a_{KRIG} von 5 km zu klein, da die Werte der Stützstellen einerseits lokal sehr stark betont werden, andererseits aber nur mit schwacher Ausprägung in den Raum übertragen werden. Am plausibelsten erscheinen die Resultate für Strukturgrössen von 10 und 25 km, während $a_{KRIG} = 50$ km sehr ähnliche Resultate zeigt wie $a_{KRIG} = 25$ km.

Abbildung 9.11 zeigt zwecks genauerer Beurteilung die Modelleffizienzen der verschiedenen Strukturgrössen, wobei $a_{KRIG} = 50$ km nicht mehr untersucht wurde. Die Resultate sind nicht völlig klar zu interpretieren, denn für $a_{KRIG} = 25$ km sind zwar etwas weniger gute Resultate ($NSE > 0.5$) zu verzeichnen als bei 5 und 10 km, gleichzeitig resultieren aber klar weniger schlechte Ergebnisse ($NSE \leq 0.3$). Dies dürfte auf die glättende Wirkung grösserer a_{KRIG} zurückzuführen sein, welche zwar lokale Gegebenheiten etwas verwischen, dafür aber homogener Muster erzeugen – damit führt ein kleineres a_{KRIG} durch die grössere lokale Genauigkeit zu etwas besseren Resultaten, ist aber gleichzeitig etwas instabiler bezüglich schlechterer Resultate. Da die Unterschiede aber insgesamt nicht gross sind, wird auf die stabilere Variante $a_{KRIG} = 25$ km gesetzt.

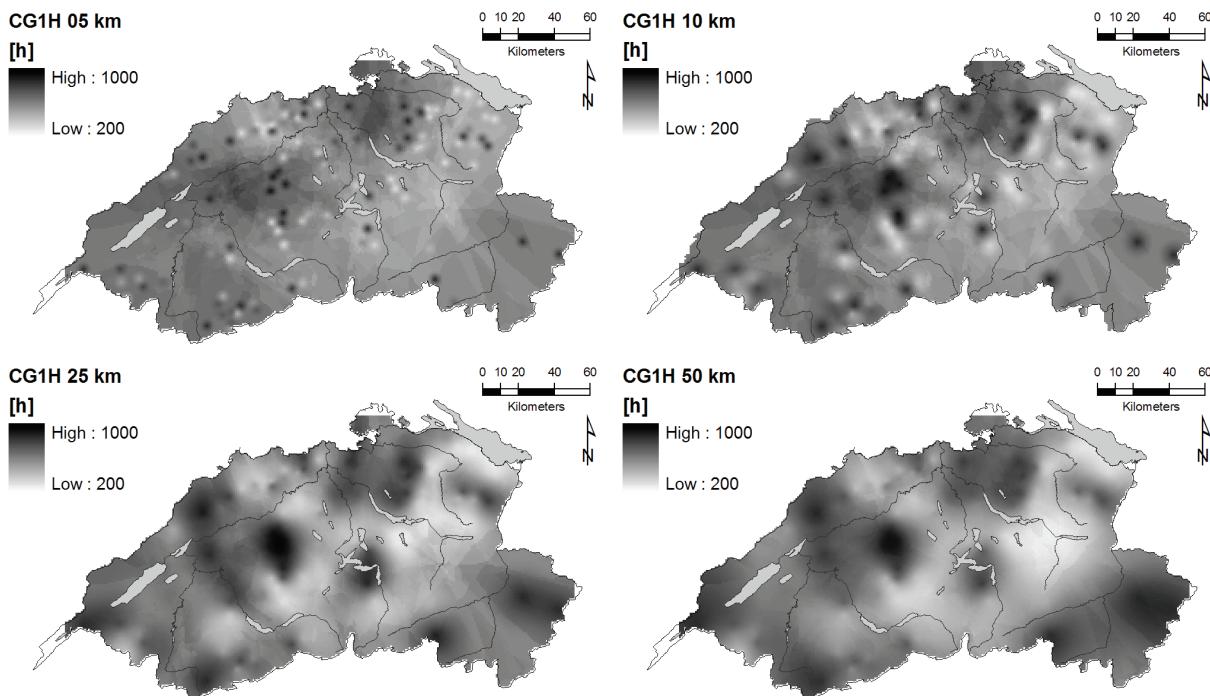


Figure 9.10: Spatial patterns of Kriging interpolated model parameter CG1H, using structure sizes (a_{KRIG}) of 5, 10, 25 and 50 km. Based upon 140 successfully calibrated catchments.

Abbildung 9.10: Räumliche Muster einer Kriging-Interpolation des Modellparameters CG1H mit Strukturgrößen (a_{KRIG}) von 5, 10, 25 und 50 km, auf Basis 140 erfolgreich kalibrierter Einzugsgebiete.

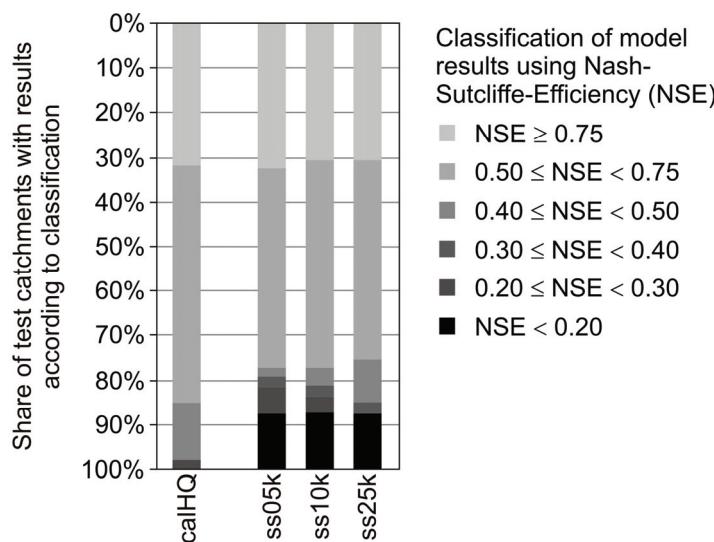


Figure 9.11: Nash-Sutcliffe-Efficiencies (NSE) for Kriging interpolation of model parameter CG1H using structure sizes of 5, 10 and 25 km (ss05k, ss10k, ss25k). Data from 49 priority A catchments, simulation period 1984–2003 (data: FLACH, 2007).

Abbildung 9.11: Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) für die Kriging-Interpolation von CG1H mit Strukturgrößen von 5, 10 und 25 km (ss05k, ss10k, ss25k). Datenbasis: 49 Einzugsgebiete der Priorität A, Simulationszeitraum 1984–2003 (Daten: FLACH, 2007).

9.2.2 Resultierende Parameterkarten

Mit der gewählten Einstellung für die Strukturgröße von $a_{\text{KRIG}} = 25 \text{ km}$ werden nun Parameterkarten für PREVAH erstellt (**Abbildung 9.12**). Diese dienen als Grundlage der Kriging-Regionalisierung, indem am Schwerpunkt des zu parametrisierenden Gebietes die Werte aus den interpolierten Karten herausgelesen werden. Die Interpolation erfolgt im Übrigen automatisch durch das Regionalisierungsprogramm und wird bei jeder Anwendung auf Basis der zur Verfügung stehenden kalibrierten Gebiete

neu berechnet; damit ist die grösstmögliche Flexibilität bezüglich Erweiterung der Datengrundlage gegeben.

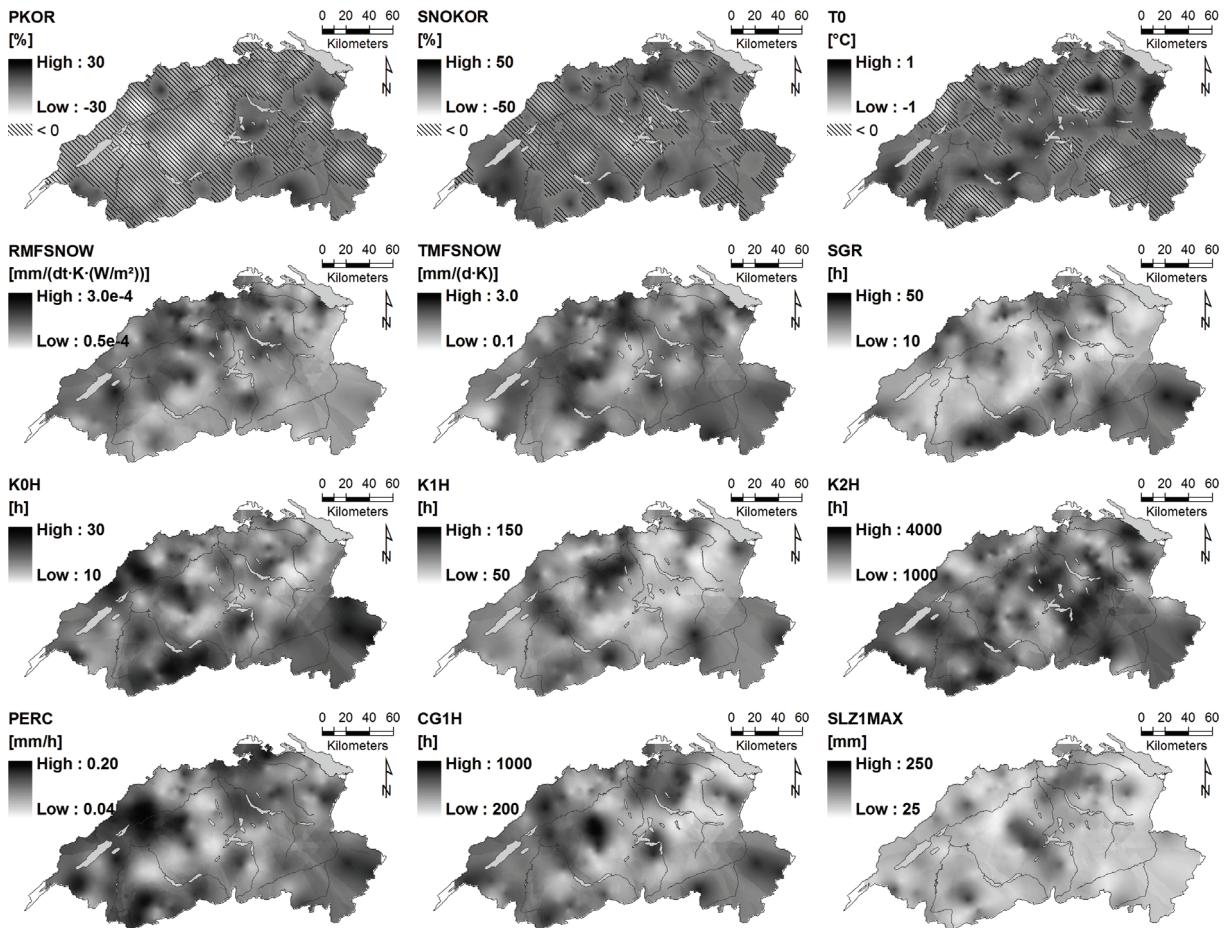


Figure 9.12: Kriging interpolated PREVAH parameter maps, based upon 140 successfully calibrated catchments. Maps for ice melt parameters are not shown due to lacking spatial representativity (cf. **Figure 5.6**).

Abbildung 9.12: Mit Kriging interpolierte Parameterkarten für PREVAH, basierend auf den 140 erfolgreich kalibrierten Einzugsgebieten. Die Parameter der Eisschmelze sind nicht dargestellt, da sie räumlich ungenügend abgestützt sind (vgl. **Abbildung 5.6**).

Eine Interpretation der Parameterkarten in **Abbildung 9.12** fällt schwer, da das Resultat nicht nur durch die verschiedentlich angesprochene Parameterunsicherheit (siehe v. a. Kapitel 6) beeinflusst wird, sondern auch durch die heterogenen physikalischen Eigenschaften, welche auf der Alpennordseite auftreten. Insgesamt handelt es sich darüber hinaus lediglich um Hilfskarten, welche der Regionalisierung dienen; punktgenaue Aussagen zu den durch die Parameter beschriebenen Prozesse (z. B. Perkolation für **PERC**) sind nicht zulässig. Im Folgenden soll deshalb nur erörtert werden, ob klare Verteilungsmuster erkennbar sind und ob sich diese physikalisch erklären lassen.

Ein relativ schlüssiges Muster tritt bei **PKOR** auf: Während negative Bilanzkorrekturfaktoren für Regen (**PKOR**) das Bild dominieren (vgl. Kapitel 5.3.1), treten positive Werte in etwas stärker flächendeckender Form nur in den Ostschweizer Voralpen sowie in den Zentral- und Ostalpen auf. Auf Grund einer gewissen Ähnlichkeit mit der Verteilung des Jahresniederschlags (KIRCHHOFER UND SEVRUK, 1992) und der von SEVRUK UND KIRCHHOFER (1992) ausgewiesenen Messfehlerkorrektur kann vermutet werden, dass die im PREVAH-Preprocessing vorgenommene Messfehlerkorrektur in Gebieten mit grossen Jahresniederschlägen zu gering ausfällt. Die Bilanzkorrektur für Schnee (**SNOKOR**) zeigt ein etwas ausgewogeneres Bild, wobei die Auftretensmuster der grössten positiven und negativen Korrekturen denjenigen von **PKOR** gleichen.

Die Verteilung des Strahlungsschmelzfaktors für Schnee *RMFSNOW* scheint bis zu einem gewissen Grad der Topographie zu folgen, mit tendenziell geringeren Werten in hohen Lagen. Da *RMFSNOW* via Strahlung die innertägliche Variation der Schneeschmelze bestimmt, weist die Parameterverteilung auf einen stärkeren Tagesgang in tiefen Lagen hin. Kaum mehr zu deuten ist die Verteilung von *TMFSNOW*, dem Temperaturschmelzfaktor für Schnee, welcher im Endeffekt die Grundintensität der Schneeschmelze steuert; auch *T0* lässt sich nicht schlüssig interpretieren.

Für die Parameter des Abflussbildungsmoduls (*SGR*, *K0H*, *K1H*, *K2H*, *PERC*, *CG1H* und *SLZIMAX*) wären Zusammenhänge mit Eigenschaften des Bodens und des Untergrundes zu erwarten. Der Vergleich der interpolierten Parameterkarten mit Karten von Bodeneigenschaften (FAP, 1980; BFS, 2003), Hydrogeologie (BITTERLI ET AL., 2004) und Geologie (BFS, 2003) liess jedoch kaum Ähnlichkeiten erkennen. Dies ist zu einem grossen Teil auf die bereits in Kapitel 6 ausführlich besprochene Parameterunsicherheit zurückzuführen. Hinzu kommt, dass die Funktion einer simulierten Abflusskomponente teilweise von einer anderen Komponente erfüllt werden kann: Beispielsweise kann der schnell ausfließende Grundwasserspeicher (*SLZI*) die Simulation des Zwischenabflusses (*K1H*) mehr oder weniger stark übernehmen – und umgekehrt. Beim Entwickeln der Kalibrierung wurde zwar auf eine sinnvolle Wiedergabe der einzelnen Abflusskomponenten geachtet, eine gewisse gegenseitige Ergänzung kann aber nicht ausgeschlossen werden; dies wird sich wiederum negativ auf die Plausibilität der entsprechenden Parameter auswirken. Erschwerend wirkt beim Vergleich die geringe Auflösung und Repräsentativität der Karten von Boden und Untergrund.

Trotz der geringen räumlichen Plausibilität der Parameterkarten wird sich im folgenden Kapitel zeigen, dass die Regionalisierung mit Kriging durchaus stabil ist und gute Simulationsergebnisse liefern kann.

9.3 Regression

Einen ersten Hinweis auf die konkrete Plausibilität einer Korrelation von Gebietsattributen und Modellparametern soll **Tabelle 9.6** geben. Sie zeigt für Daten aus allen 140 erfolgreich kalibrierten Einzugsgebieten die entsprechenden Korrelationskoeffizienten r_{xy} , wobei die Parameter der Eisschmelze wegen ungenügender Datenlage nicht aufgeführt sind. In den 20 höchstkorrelierenden Parameter-Attribut-Kombinationen sind durchaus sehr plausible Zusammenhänge auszumachen. Gut nachvollziehbar sind beispielsweise die Kombinationen von Starkniederschlagsattributen (*PXXA*, *PXXB*, *PXXC*, *PXXD*, *PXXG*) mit der Bilanzkorrektur für den flüssigen Niederschlag (*PKOR*) oder von bodenbezogenen Attributen (*TSM2*, *KWM1*, *KWM2*, *ROCK*) mit Parametern des Abflussbildungsmoduls (*SGR*, *K0H*, *CG1H*). Neigungs- (*IN15*) und Reliefattribute (*REL8*) scheinen ebenfalls einen Erklärungsgehalt für einzelne Abflussbildungsparameter zu besitzen. Der Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit (*WIND*) und *K0H* ist hingegen nicht direkt erklärbar; vermutet werden könnte dahinter ein Einfluss der windabhängigen Bilanzkorrektur für den Niederschlag auf die schnelle Abflussbildung. Von den total möglichen 960 Attribut-Parameter-Kombinationen (12 betrachtete Modellparameter, 80 Gebietsattribute) korrelieren 160 signifikant ($\alpha \leq 0.05$) und 51 hochsignifikant ($\alpha \leq 0.025$).

Attrib.-Param.	r_{xy}	Attrib.-Param.	r_{xy}
<i>TSM2–SGR</i>	0.41	<i>FBTR–PKOR</i>	0.33
<i>PXXD–PKOR</i>	0.40	<i>IAVG–SGR</i>	0.33
<i>PXXB–PKOR</i>	0.39	<i>KWM1–CG1H</i>	0.32
<i>PXXC–PKOR</i>	0.38	<i>REL8–K0H</i>	0.32
<i>IN15–SGR</i>	0.36	<i>WIND–K0H</i>	0.31
<i>ROCK–SGR</i>	0.35	<i>KWM1–K0H</i>	0.30
<i>PXXA–PKOR</i>	0.35	<i>IAVG–K0H</i>	0.30
<i>TSM2–K0H</i>	0.34	<i>REL8–SGR</i>	0.30
<i>IN15–K0H</i>	0.34	<i>HAVG–SGR</i>	0.29
<i>PXXG–PKOR</i>	0.33	<i>KWM2–CG1H</i>	0.29

Table 9.6: Twenty attribute-parameter-combinations with highest correlation and respective Pearson correlation coefficients (r_{xy}).

Tabelle 9.6: Die zwanzig am stärksten korrelierenden Attribut-Parameter-Kombinationen mit entsprechendem Pearson-Korrelationskoeffizienten (r_{xy}).

PARAJKA ET AL. (2005) merken allerdings an, dass die hohe Signifikanz einer Parameter-Attribut-Korrelation nicht unbedingt auf eine gute Vorhersagekraft des betreffenden Attributs schliessen lässt. Auch bezüglich der physikalischen Interpretierbarkeit von mit Regressionsbeziehungen gefundenen Parameter-Attribut-Beziehungen äussern die genannten Autoren Vorbehalte.

9.3.1 Untersuchte Varianten

Wie schon in Kapitel 8.5 beschrieben, konnte für die meisten Variationsmöglichkeiten der Regressions-Regionalisierung bereits aufgrund erster Experimente eine plausible Einstellung gefunden werden. Als wichtig erwies es sich jedoch, eine Vorauswahl derjenigen Attribute zu treffen, welche an das Regressionsmodul übergeben und von diesem dann untersucht werden. Die Regionalisierungssoftware entscheidet dann aufgrund von Benutzervorgaben selbstständig, welche dieser vorselektierten Parameter in das Regressionsmodell aufgenommen werden und welche nicht (siehe Kapitel 8.5). Die folgenden Varianten einer Attributvorauswahl werden im Folgenden betrachtet:

- Full set..... Alle 80 Gebietsattribute
- Expert set 1, 2..... Manuelle, auf Expertenwissen basierende Auswahl von 51 (set 1) respektive 9 (set 2) hydrologisch besonders relevanten Gebietsattributen
- V02*, V19° Die in der besten Variante der Nearest-Neighbours-Regionalisierung verwendeten Gebietsattribute (vgl. **Tabelle 9.2**), 20 für die Variante mit Höheneinteilung (V02*), 26 für derjenige ohne Höheneinteilung (V19°) (vgl. MITTELBACH, 2006).
- SFS1–SFS4 Schrittweise, vorwärtsgerichtete Auswahl (stepwise forward-oriented selection) der mit dem jeweils betrachteten Parameter höchstkorrelierenden Gebietsattribute. Nach Aufnahme des höchstkorrelierenden Attributs in das Regressionsmodell werden die Attribut-Parameter-Korrelationen für die verbleibenden Attribute jeweils neu berechnet und dienen als Grundlage für den nächsten Auswahlschritt. Auf diese Weise wurden Sätze mit einem Gesamtumfang von 24 (SFS1), 30 (SFS2), 36 (SFS3) und 60 (SFS4) Gebietsattributen erstellt (vgl. FLACH, 2007).

9.3.2 Resultate

Abbildung 9.13 fasst die Resultate der verschiedenen Varianten anhand der Nash-Sutcliffe-Effizienzen (*NSE*) zusammen. Erkennbar ist, dass die Übergabe aller 80 Parameter (full set) an das im Regressionsmodell eingebaute Auswahlverfahren am meisten schlechte Resultate ($NSE < 0.2$) sowie am wenigsten gute ($0.5 \leq NSE < 0.75$) und sehr gute Resultate ($NSE \geq 0.75$) erzielt. Ähnlich sieht die Situation auch bei der zweiten Expertenauswahl (expert set 2) aus, welche lediglich 9 Attribute umfasst; die erste Expertenauswahl (expert set 1) mit 51 Attributen schneidet demgegenüber wesentlich besser ab. Daraus kann gefolgert werden, dass eine ausgewogene Anzahl vorselektierter Attribute wichtig für gute Regionalisierungsresultate ist. Die mit schrittweiser Variablenelektion erstellten Varianten (SFS1–SFS4) erzielen vergleichbare Resultate, wobei SFS4 die wenigsten schlechten ($NSE < 0.2$) und SFS1 die meisten sehr guten Resultate ($NSE \geq 0.75$) aufweist. Setzt man die bei der Nearest-Neighbours-Regionalisierung verwendeten Attributsätzen ein, zeigt derjenige mit Differenzierung nach mittlerer Gebietshöhe (V02*) weniger schlechte Resultate ($NSE < 0.2$) und mehr sehr gute Resultate ($NSE \geq 0.75$) als derjenige ohne Differenzierung (V19°).

FLACH (2007) konnte nun zeigen, dass jeweils für jede der drei verwendeten Zonen mittlerer Gebietshöhe eine bestgeeignete Attributvorauswahl für das Regressionsmodell existiert: Für mittelländische und jurassische Gebiete (mittlere Höhe $mH < 1'000$ m ü. M.) ist dies SFS4, für voralpine Gebiete ($1'000 \leq mH < 1'550$ m ü. M.) V02* und für alpine Gebiete ($mH \geq 1'550$ m ü. M.) SFS3. Die Resultate dieser Kombination ("zonal best") sind wie in **Abbildung 9.13** ersichtlich noch besser als diejenigen der einzelnen Varianten; insbesondere konnte eine Reduktion der schlechten Resultate und somit eine Stabilisierung der Regionalisierung erreicht werden.

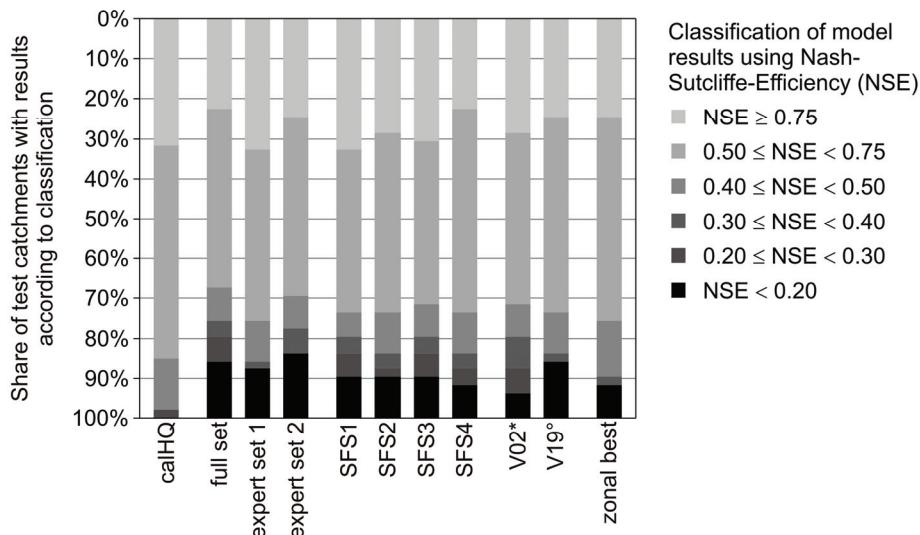


Figure 9.13: Results of regression regionalisation for various attribute sets (SFS1–SFS4: stepwise forward-oriented selection; V02*, V19°: best from Nearest Neighbour analysis; cf. section 9.3.1). "Zonal best" results refer to using the best available attribute set per zone of mean altitude. Based upon 49 priority A catchments with simulation period 1994–1997 (data: FLACH, 2007). Results for flood calibrated simulation are indicated for comparison (calHQ).

Abbildung 9.13: Ergebnisse einer Regressions-Regionalisierung mit verschiedenen Varianten von Attributzusammenstellungen (SFS1–SFS4: Schrittweise vorwärtsgerichtete Auswahl, V02*, V19°: beste Varianten der Nearest-Neighbour-Analyse; vgl. Abschnitt 9.3.1). "Zonal best" resultiert aus der Verwendung der jeweils am besten geeigneten Variante pro Zone mittlerer Höhe. Basierend auf 49 Einzugsgebieten der Priorität A, Zeitraum 1994–1997 (Daten: FLACH, 2007). Zum Vergleich angegeben ist das Resultat der Hochwasserkalibrierung (calHQ).

Welche Gebietsattribute bei dieser besten Variante konkret für die Regressionsmodelle der einzelnen Modellparameter verwendet werden, zeigt **Tabelle 9.7**. Dort ist das Ergebnis des in Kapitel 8.5 beschriebenen automatischen Auswahlverfahrens wiedergegeben, welches pro Parameter jeweils eine Anzahl möglichst hochkorrelierter Attribute bestimmt und in das entsprechende Regressionsmodell übernimmt. Für mittelländische und jurassische Gebiete werden dem Verfahren beispielsweise die 60 Attribute des Satzes SFS4 übergeben, woraus dann je nach Modellparameter ein Regressionsmodell auf Basis von 3 (*TMFSNOW*) bis 12 (*KOH*) Gebietsattributen erstellt wird. Welche Auswahl dabei getroffen wird, hängt natürlich vom zugrundeliegenden Datensatz an kalibrierten Gebieten ab; die hier aufgeführten Ergebnisse basieren auf der Verwendung aller zur Verfügung stehenden Gebieten pro Zone mittlerer Höhe (95 für die jurassische und mittelländische Zone, 22 für die voralpine Zone und 23 für die alpine Zone).

Über die Güte der Parameterwiedergabe durch das oben gefundene beste Regressionsmodell gibt **Abbildung 9.14** Auskunft. In der oberen Hälfte der Abbildung (a) sind die tatsächlichen kalibrierten und mit dem Regressionsmodell regionalisierten Parameterwerte aufgezeichnet. Zu beachten ist, dass die Schattierung der Datenpunkte deren jeweiliges Gewicht wiedergibt, als welches wie in Kapitel 8.5 beschrieben die Nash-Sutcliffe-Effizienz (*NSE*) der Kalibrierung verwendet wurde. Die zugehörigen Pearson-Korrelationskoeffizienten (r_{xy}) führt **Tabelle 9.8** auf. Von guten Resultaten kann beispielsweise bei *PKOR*, *SGR* und *KOH* gesprochen werden, welche alle ein r_{xy} von 0.66 erreichen. Das schlechteste Resultat zeigt *RMFSNOW*, wo der Parameterbereich in der Regionalisierung offensichtlich nicht korrekt wiedergegeben werden kann; das r_{xy} ist mit 0.44 aber immer noch recht hoch.

Table 9.7: Catchment attributes used for the best-performing regression model which is distinguished by zones of mean catchment altitude.

Tabelle 9.7: Gebietsattribute, welche für das beste, nach Zonen mittlerer Gebietshöhe differenzierten Regressionsmodell verwendet werden.

	Plateau and Jura: SFS4	Pre-Alps: V02*	Alps: SFS3
PKOR	FBTR HG0B KWM1 NFM2 NFM4 P_RR PAVG PDRR PSDV PSUM PXXA PXXC PXXD PXXG	ASPS CTRY P_RR PXXB TSM1	G_F1 PXXC PXXD TSM2 WIND
SNOKOR	AGRC BAGR P_MD PDRR	ASPS KWM1 PMRL PMXX T_SP TSM2	HG_2 P_RR PAVG PMXA RELI
T0	FBTR G_L2 KWM2 PMRL PXXA	G_L1 HG_2 KWM2 PMRL PMXX	ASPN KWM2 PSUM SHP1 TSM1
TMFSNOW	HG_2 NFM4 PMRL	KWM2 PXXB T_SP TSM2 TSM4	G_F1 G_L3 HG0B IAVG KWM2 PAVG PSKW PXXC PXXD TSM2
RMFSNOW	ASPS P_MD PXXA PXXG ROCK	AGRC FRST P_RR TSM1 TSM4	G_L3 P_RR PXXC SHP1 T_SP
SGR	FBTR G_L2 G_L3 KWM1 NFM1 PDRR PXXA PXXC PXXD PXXG TSM2	HMIN KWM1 KWM2 PMXX TSM1	ASPN BBLT G_L2 TSM1 TSM4
KOH	FBTR HG0B KWM1 KWM2 NFM1 NFM2 NFM4 PDMD PDRR PXXA TSM2 WIND	KWM1 P_RR PMXX TSM1 TSM4	ASPN BFST RELI TSM1 TSM4
KIH	FBTR G_F1 KWM1 NFM4 PDRR	KWM1 P_MD PMXX TSM1 TSM4	ASPN PAVG PCVA SHP1 T_SP
K2H	AGRC FRST G_L2 HG_3 NFM1 PKRT PMRL PSKW	ASPS KWM1 PMXX PXXB WIND	ASPE PCVA PDMD PSKW WIND
CG1H	G_L3 KWM1 KWM2 P_RR PDRR PMXA PSDV TSM1	KWM1 KWM2 P_MD TSM1 TSM4	FBTR G_L2 SHP1 TSM1 TSM4
SLZIMAX	AREA CRCL G_L1 HGFG HMAX PXXD TSM4	ASPS HMIN P_RR PMRL TSM2	ASPE ASPN HG_2 IAVG KWM2
PERC	ASPE KWM1 KWM3 NFM2 P_MD PDRR REL8 ROCK	G_L1 KWM1 KWM2 TSM4	BFST PDMD SHP1 T_SP TSM1
ICETMF			AGRC G_L2 KWM2 PMXA WIND
ICERMF			HG_2 KWM2 PXXD TSM2 WIND

Beim Betrachten der Grafiken in der oberen Hälfte von **Abbildung 9.14** (a) entsteht der Eindruck, dass das Regressionsmodell nicht optimal an die Daten angepasst ist oder dass kein gutes Modell gefunden werden konnte. Um dies zu widerlegen, zeigt die untere Hälfte von **Abbildung 9.14** (b) die mit dem jeweiligen Gewicht multiplizierten Parameterwerte, wie sie in der Optimierung des Modells von PEST behandelt werden. Die Abweichungen zwischen kalibrierten und regionalisierten Werten erscheinen in dieser Darstellungsart wesentlich geringer, **Tabelle 9.8** ist zudem zu entnehmen, dass die Korrelationskoeffizienten r_{xy} deutlich höher ausfallen. Zugunsten einer guten Wiedergabe der zuverlässig kalibrierten (stark gewichteten) Parameterwerte wird also in Kauf genommen, dass ein Regressionsmodell verwendet wird, welches für die als unzuverlässig eingestuften (schwach gewichteten) Werte nicht optimal ist.

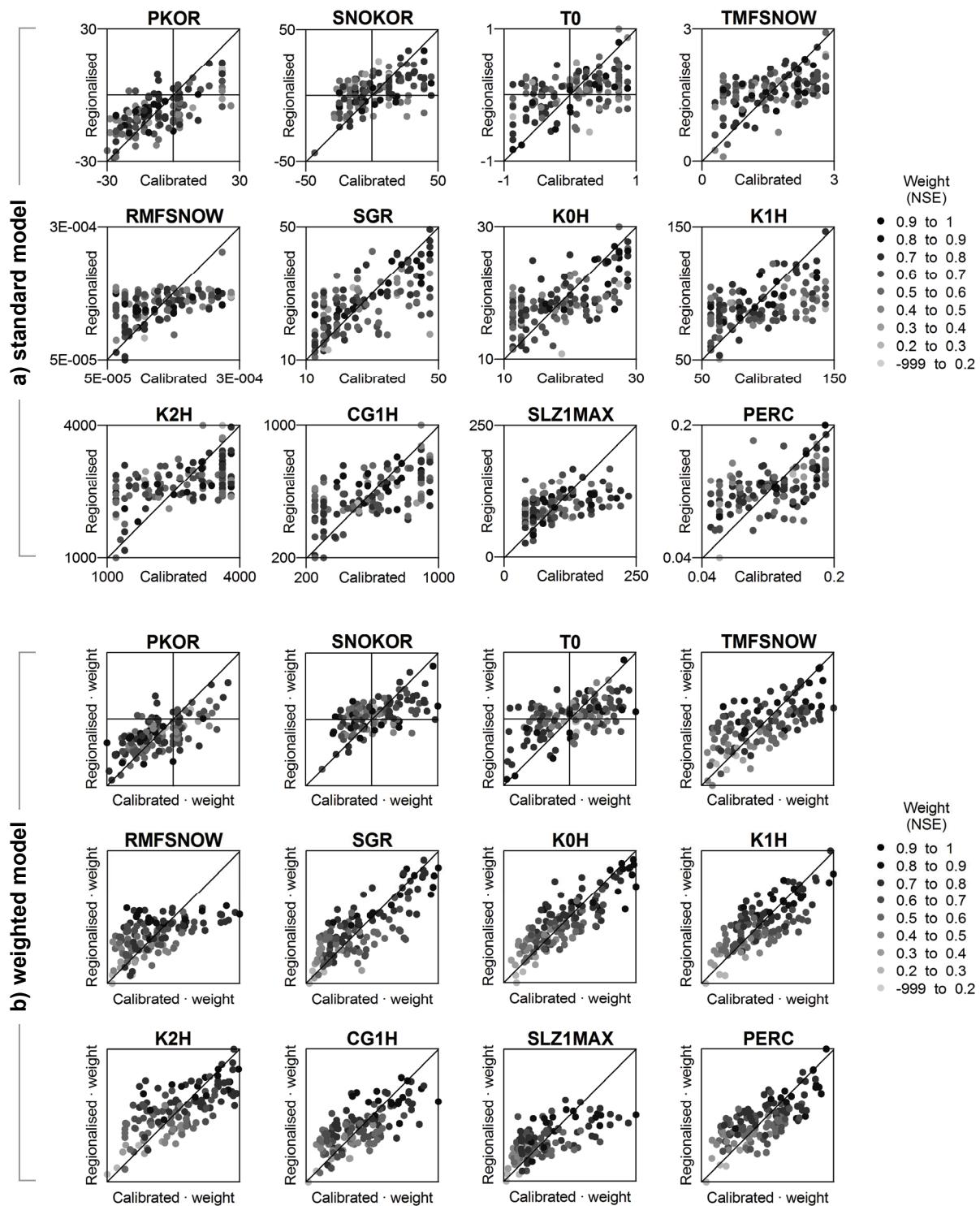


Figure 9.14: Comparison of calibrated and regression model regionalised parameter values; above (a) for the standard regression model using the actual parameter values, below (b) for the weighted values as used in regression model optimisation. Data from 140 successfully calibrated catchments, flood calibrated parameter set (calHQ). Corresponding correlation coefficients r_{xy} see Table 9.8.

Abbildung 9.14: Vergleich der kalibrierten und der mit dem Regressionsmodell regionalisierten Parameterwerte; oben (a) für das Standardmodell unter Verwendung der tatsächlichen Werte, unten (b) für das in der Optimierung der Regression eingesetzte Modell mit gewichteten Werten. Datengrundlage: 140 erfolgreich kalibrierte Einzugsgebiete, auf Hochwasser kalibrierter Parametersatz (calHQ). Für die zugehörigen Korrelationskoeffizienten r_{xy} siehe Tabelle 9.8.

Parameter	r_{xy} , standard model	r_{xy} , weighted model
PKOR	0.66	0.67
SNOKOR	0.52	0.59
T0	0.51	0.57
TMFSNOW	0.52	0.65
RMFSNOW	0.44	0.57
SGR	0.66	0.81
K0H	0.66	0.84
K1H	0.55	0.75
K2H	0.51	0.70
CG1H	0.59	0.71
SLZIMAX	0.48	0.63
PERC	0.56	0.74
Median	0.54	0.69

Table 9.8: Pearson correlation coefficients (r_{xy}) of calibrated and regression regionalised parameters values for the standard model (cf. **Figure 9.14, a)** and for the weighted model (cf. **Figure 9.14, b).**

Tabelle 9.8: Pearson-Korrelationskoeffizienten (r_{xy}) der kalibrierten und der mit dem Regressionsansatz regionalisierten Parameterwerte für das Standardmodell (vgl. **Abbildung 9.14, a)** und das gewichtete Modell (vgl. **Abbildung 9.14, b).**

9.4 Zusammenfassung

Die jeweils besten gefundenen Varianten für die in diesem Kapitel vorgenommene Feinabstimmung der drei betrachteten Regionalisierungsmethoden sind in **Tabelle 9.9** zusammengefasst. Grundlagen und nicht veränderte Einstellungen der einzelnen Methoden sind den Kapiteln 8.3 bis 8.5 zu entnehmen. Im Folgenden werden jeweils nur noch die Namen der Regressionsmethoden und deren entsprechenden Kürzel erwähnt; die Detaileinstellungen verstehen sich als die hier aufgeführten besten Varianten.

Table 9.9: Best set-up identified in regionalisation methods fine-tuning.

Tabelle 9.9: In der Feinabstimmung identifizierte beste Varianten der einzelnen Regionalisierungsmethoden.

Regionalisation	Set-up
Nearest Neighbours (NNBR).....	Method NNBR _{EUCL} (user-weighted Euclidean Distance), attribute set V02* (statistically selected and differentiated by zones of mean catchment altitude)
Kriging (KRIG)	Structure size 25 km, no differentiation by mean catchment altitude
Regression (REGR)	Attribute sets differentiated by zone of mean catchment altitude; lower zone: SFS4 (stepwise forward-oriented selection with a total of 60 attributes), middle zone: V02* (see NNBR), upper zone: SFS3 (stepwise forward-oriented selection with a total of 36 attributes)

Kapitel 10

Regionalisierung III: Resultate

Regionalisation results are discussed, on the one hand regarding standard efficiency scores, and on the other hand, in even greater detail, regarding flood estimation results. The estimation errors are examined for relations with catchment size and position, and possibilities for reducing the errors are explored. Further investigations deal with how well the calibrated parameters are reproduced through regionalisation and with the practical suitability of the presented regionalisation for normal flow conditions.

Die Ergebnisse der Regionalisierung werden diskutiert, einerseits bezüglich der Standardgütemasse, in vertiefter Form vor allem aber auch bezüglich der Hochwasserabschätzung. Die Schätzfehler werden auf Zusammenhänge mit Gebietsgrösse und räumlicher Lage der Gebiete hin untersucht, und Möglichkeiten zur Korrektur werden erörtert. Weitere Untersuchungen befassen sich mit der Wiedergabe der kalibrierten Parameter durch die Regionalisierung und der konkreten Eignung der Regionalisierung für Mittelwasserbedingungen.

10.1 Modellgüte

10.1.1 Standardgütemasse

Nash-Sutcliffe-Effizienz

Als erste Übersicht über die Resultate der verschiedenen Regionalisierungsansätze sind in **Abbildung 10.1** die Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) aus den 49 Einzugsgebieten der Priorität A dargestellt, und zwar für die Simulationsperiode 1984–2003 (Initialisierungsjahr: 1983). Von diesen Einzugsgebieten kann angenommen werden, dass sie repräsentativ sind (vgl. Kapitel 3.1.3), zudem stehen für sie lange und zuverlässige Messreihen des Abflusses zur Verfügung, was für einen fundierten Vergleich der verschiedenen Regionalisierungsansätze unerlässlich ist. Des weiteren können bei der später folgenden Betrachtung zur Hochwasserextrapolation (Abschnitt 10.2) nur diese Gebiete mit langen Reihen ausgewertet werden.

Angemerkt sei, dass bei der Feinabstimmung der Regionalisierungsverfahren im vorigen Kapitel 9 die Effizienzen zwar auch für dieselben 49 Einzugsgebiete, aus Rechenzeitgründen aber nur für den Kalibrierungszeitraum 1994–1997 (Initialisierungsjahr: 1993) betrachtet wurden; deshalb unterscheiden sich die jeweiligen Resultate minim. Als Vergleichswert zur Beurteilung der Regionalisierungen relevant ist der auf Hochwasser kalibrierte Parametersatz (calHQ), welcher ja auch als Ausgangsdatensatz der Regionalisierung verwendet wurde. Die Resultate der Mittelwasserkalibrierung (calMQ) sind zum Vergleich ebenfalls dargestellt und zeigen den schon in Kapitel 5 diskutierten Kompromiss, der bezüglich Nash-Sutcliffe-Effizienz eingegangen werden musste, um eine bessere Wiedergabe der Spitzenabflüsse zu erreichen.

Die Ergebnisse der drei fundamentalen Regionalisierungsmethoden Nearest Neighbours (regNNBR(HQ)), Kriging (regKRIG(HQ)) und Regression (regREGR(HQ)) sind in ihrer Güte vergleichbar mit der hochwasserkalibrierten Variante (**Abbildung 10.1**). Gute Effizienzen von $NSE \geq 0.5$ werden in 84% (regNNBR(HQ)), 82% (regKRIG(HQ)) resp. 84% (regREGR(HQ)) der untersuchten Einzugsgebiete erreicht (calHQ: 86%), sehr gute Effizienzen von $NSE \geq 0.75$ in 37% (regNNBR(HQ)), 27% (regKRIG(HQ)) resp. 24% (regREGR(HQ)) der Gebiete (calHQ: 24%). Sogar noch etwas besser werden die Resultate mit der kombinierten Regionalisierungsmethode (regCOMB(HQ): 88% mit $NSE \geq 0.5$, 37% mit $NSE \geq 0.75$). In Anbetracht dessen, dass eine Regionalisierung ein schwieriges Unterfangen ist, können diese Resultate als sehr gelungen bezeichnet werden.

Deutlich schlechter schneidet das Erste der beiden rudimentären Verfahren ab, die Verwendung der unkalibrierten Parameterstartwerte (regDEFA): Vor allem die Anzahl misslungener Gebiete (24%) ist deutlich höher als bei anderen Verfahren, und lediglich 61% der Gebiete erreichen Effizienzen von über 0.5. Erstaunlich gute Resultate zeigt hingegen die Verwendung der Parametermittelwerte der betreffenden Zone mittlerer Gebietshöhe; der Unterschied bei den guten Effizienzen (in 80% der Ge-

biete ist $NSE \geq 0.5$) ist im Vergleich zu Kalibrierung und den anderen Regionalisierungsverfahren nur gering, allerdings werden in lediglich 18% der Gebiete sehr gute Effizienzen ($NSE \geq 0.75$) erreicht. Diese Resultate lassen sich dahingehend interpretieren, dass PREVAH sehr gut für die Anwendung in der Schweiz geeignet ist, da bereits mit einer rudimentären, kaum gebietsspezifischen "Kalibrierung" – den Parametermittelwerten der jeweiligen Höhenzone – $\frac{4}{5}$ der untersuchten Gebiete eine Effizienz von mindestens 0.5 erreichen. Selbstverständlich ist aber einer Kalibrierung oder einer fundierten Regionalisierung weiterhin der Vorzug zu geben, da insbesondere im Einzelfall bessere Resultate zu erwarten sind.

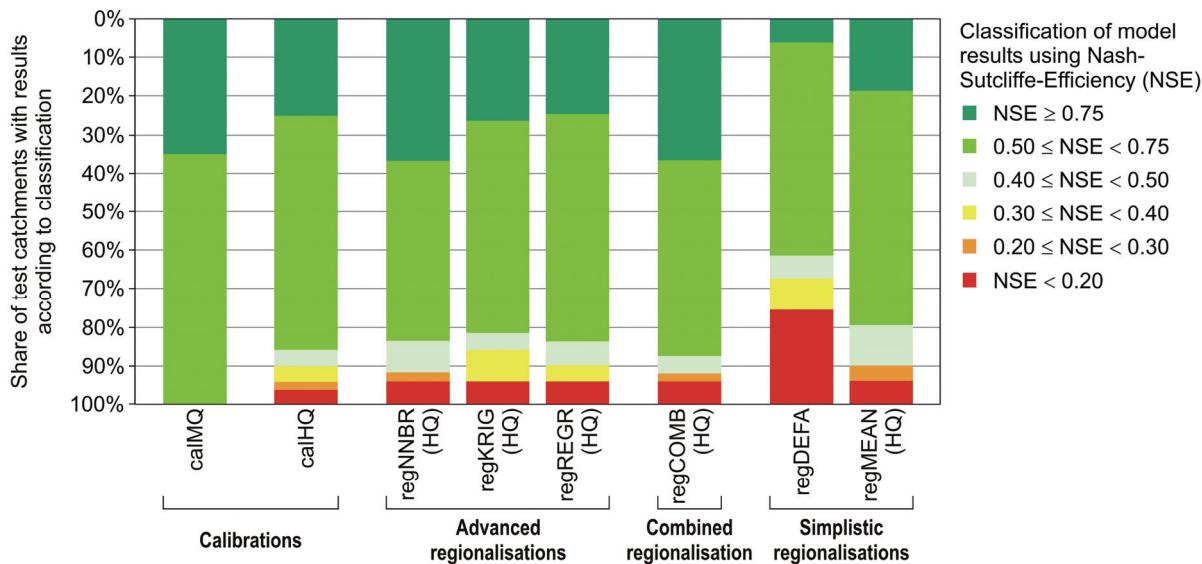


Figure 10.1: Classified Nash-Sutcliffe-Efficiencies (NSE) of various simulation results: calibrated on standard conditions (calMQ), flood peak adjusted (calHQ), regionalised with Nearest Neighbours (regNNBR(HQ)), Kriging (regKRIG(HQ)), Regression (regREGR(HQ)) and with combined approach (regCOMB(HQ)) as well as uncalibrated parameter set (regDEFA) and parameter mean of calibrated catchments (regMEAN(HQ)). Simulation period 1984–2003 (with initialisation year 1983), 49 priority A catchments (long-time, reliable gauge records).

Abbildung 10.1: Klassierte Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) verschiedener Simulationsresultate: kalibriert auf Mittelwasser (calMQ) sowie auf Hochwasser (calHQ), regionalisiert mit Nearest Neighbours (regNNBR(HQ)), Kriging (regKRIG(HQ)), Regression (regREGR(HQ)) und kombiniertem Verfahren (regCOMB(HQ)) sowie unkalibrierter Parametersatz (regDEFA) und Parametermittelwert der kalibrierten Gebiete (regMEAN(HQ)). Simulationszeitraum 1984–2003 (mit Initialisierungsjahr 1983), 49 Einzugsgebiete der Priorität A (langjährige, zuverlässige Messreihen).

Abbildung 10.2 bestätigt das gute Abschneiden der Regionalisierungen anhand einer noch detaillierteren Analyse der Nash-Sutcliffe-Effizienzen. Die mediane Effizienz der 49 Einzugsgebiete der Priorität A beträgt 0.70 für regNNBR(HQ), 0.67 für regKRIG(HQ), 0.65 für regREGR(HQ) und 0.69 für regCOMB(HQ). Alle genannten Werte befinden sich im Bereich der Referenz, der Hochwasserkalibrierung (calHQ, mediane Effizienz: 0.69), die Einbussen im Vergleich zur Mittelwasserkalibrierung halten sich in Grenzen (mediane Effizienz von calMQ: 0.73). Quartilsbereich und Spannweite der Werte sind bei calHQ zwar merklich grösser als bei calMQ, dehnen sich aber bei den Regionalisierungen erfreulicherweise nicht weiter aus. Sowohl zum Median wie auch zur Streuung kann festgehalten werden, dass die Güteverluste der Regionalisierung nicht übermässig gross ausfallen und zudem im Schritt von der Hochwasserkalibrierung auf die entsprechende Regionalisierung nicht zunehmen, also stabil sind. Bei den rudimentären Regionalisierungsverfahren zeigt der unkalibrierte Parameterstartwert (regDEFA) zwar noch einen akzeptablen Medianwert (0.62), Quartilsbereich und Spannweite sind aber übermässig stark gegen unten ausgedehnt; zudem sind zahlreiche Extremwerte mit $NSE < 0$ zu verzeichnen. Wiederum überraschend gut schneidet der Parametermittelwert pro Zone mittlerer Gebietshöhe ab (Median von NSE: 0.64).

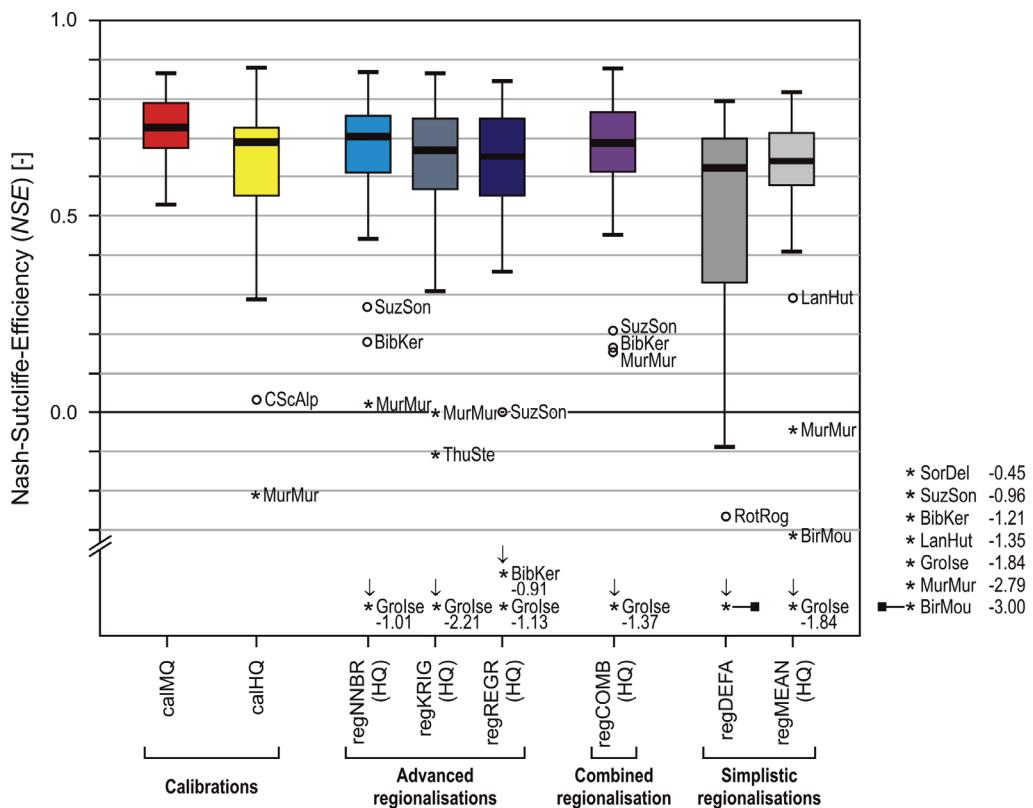


Figure 10.2: Nash-Sutcliffe-Efficiencies for various simulation results: calibrated on standard conditions (calMQ), flood peak adjusted (calHQ), regionalised with Nearest Neighbours (regNNBR(HQ)), Kriging (regKRIG(HQ)), Regression (regREGR(HQ)) and with combined approach (regCOMB(HQ)) as well as uncalibrated parameter set (regDEFA) and parameter mean of calibrated catchments (regMEAN(HQ)). Simulation period 1984–2003, 49 priority A catchments.

Abbildung 10.2: Nash-Sutcliffe-Effizienzen verschiedener Simulationsresultate: kalibriert auf Mittelwasser (calMQ), Hochwasser (calHQ), regionalisiert mit Nearest Neighbours (regNNBR(HQ)), Kriging (regKRIG(HQ)), Regression (regREGR(HQ)) und kombiniertem Verfahren (regCOMB(HQ)) sowie unkalibrierter Parametersatz (regDEFA) und Parametermittelwert der kalibrierten Gebiete (regMEAN(HQ)). Simulationszeitraum 1984–2003, 49 Einzugsgebiete der Priorität A.

Die bisher gewonnenen Erkenntnisse bestätigen sich schliesslich auch in der räumlichen Verteilung der Standardmodellgüte *NSE* (**Abbildung 10.3**), welche hier im Gegensatz zu Kapitel 5.2 (vgl. **Abbildung 5.7**) nur auf Basis von 49 Einzugsgebieten mit langen und zuverlässigen Messreihen hergeleitet wurde (Priorität A). Gute Resultate bei den komplexen Regionalisierungsverfahren (regNNBR, regKRIG und regREGR) zeigen die gesamte Ost- und Nordschweiz sowie die westlichen Alpen und Voralpen, während für Teile der Zentralschweiz, des Napfgebietes und der Dreiseenregion Probleme erkennbar sind. Betroffen sind vor allem die Einzugsgebiete von Bibere, Engelberger Aa, Grossstalbach, Rigiaa, Murg (AG) und Suze; für detailliertere räumliche Aussagen müsste eine höhere Abdeckung mit kalibrierten Gebieten verfügbar sein. Die rudimentäre Regionalisierung regDEFA liefert nur für das Thurgebiet und Teile der Alpen zufriedenstellende Modellgüten; dies bedeutet, dass die Startparameter für die Kalibrierung von PREVAH insbesondere auf diese Regionen zugeschnitten sind (vgl. GURTZ ET AL., 1997). Die zweite rudimentäre Regionalisierung regMEAN weist wiederum ein ähnlich gutes Muster auf wie die komplexen Regionalisierungen, übertrifft also die Erwartungen; KOKKONEN ET AL. (2003) merken diesbezüglich allerdings richtigerweise an, dass die Resultate einer solchen Mittelwertbildung tendenziell unzuverlässiger sind als diejenigen einer Regionalisierung, welche Gebietseigenschaften berücksichtigt. Da die beiden Verfahren regDEFA und regMEAN nur zu Vergleichszwecken herangezogen wurden und für eine methodisch fundierte Regionalisierung nicht in Frage kommen, werden sie im Folgenden nicht mehr berücksichtigt.

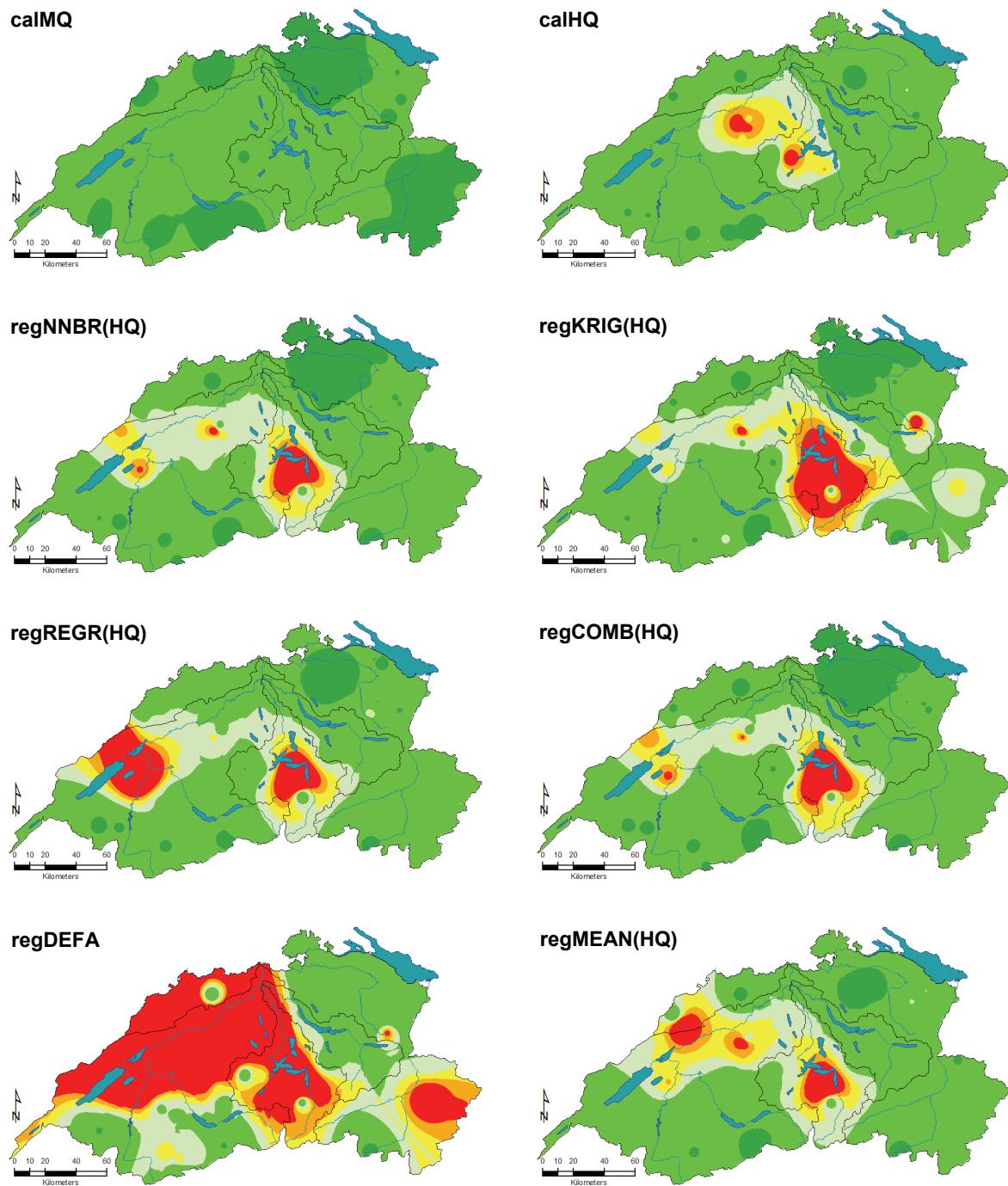


Figure 10.3: Spatial pattern of Nash-Sutcliffe-Efficiencies (NSE) for standard calibration (calMQ), flood calibration (calHQ), regionalisation with Nearest Neighbours (regNNBR(HQ)), Kriging (regKRIG(HQ)), Regression (regREGR(HQ)) and combined approach (regCOMB(HQ)) as well as uncalibrated parameter set (regDEFA) and parameter mean of calibrated catchments (regMEAN(HQ)). Data from 49 priority A catchments, 1984–2003.

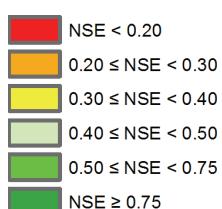


Abbildung 10.3: Räumliche Verteilung der Nash-Sutcliffe-Effizienzen (NSE) für Kalibrierung auf Mittelwasser (calMQ) und Hochwasser (calHQ), Regionalisierung mit Nearest Neighbours (regNNBR(HQ)), Kriging (regKRIG(HQ)), Regression (regREGR(HQ)) und kombiniertem Verfahren (regCOMB(HQ)) sowie für den unkalibrierten Parametersatz (regDEFA) und den Parametermittelwert der kalibrierten Gebiete (regMEAN(HQ)). Datenbasis: 49 Einzugsgebiete der Priorität A, 1984–2003.

Volumendifferenzen

Betrachtet man die mittleren jährlichen Volumenabweichungen ($DVOL'$) der verschiedenen Simulationen (**Abbildung 10.4**), so zeigen sich wiederum die Kompromisse, welche beim für Hochwasser erstellten Parametersatz eingegangen werden müssen (medianen Abweichungen: calMQ -19.3 mm a^{-1} , calHQ +84.2 mm a^{-1}). Für die regionalisierten Parametersätze bewegen sich die medianen Volumenfehler zwischen +68 mm a^{-1} (Nearest Neighbours, regNNBR) und +106 mm a^{-1} (Kriging, regKRIG), und sie zeigen dabei – wie auch die Hochwasserkalibrierung (calHQ) – eine eindeutige Tendenz zur Überschätzung des Jahresabflusses. In Anbetracht des anvisierten Ziels der Hochwasserabschätzung befinden sie sich allerdings in einem noch akzeptablen Bereich. Es ist weiter festzuhalten, dass Ausreisser und Extremwerte bei Hochwasserkalibrierung und Regionalisierung vergleichsweise oft vorkommen. Da dies aber Gebiete betrifft, welche auch bei der Kalibrierung auf Mittelwasser grösse Abweichungen aufweisen, kann davon ausgegangen werden, dass diese Probleme nicht in erster Linie durch die Regionalisierung verursacht werden. Als Ursache sind eher aussergewöhnliche Gebietseigenschaften oder allenfalls Ungenauigkeiten in den Messdaten zu vermuten (siehe Kapitel 5.1.2).

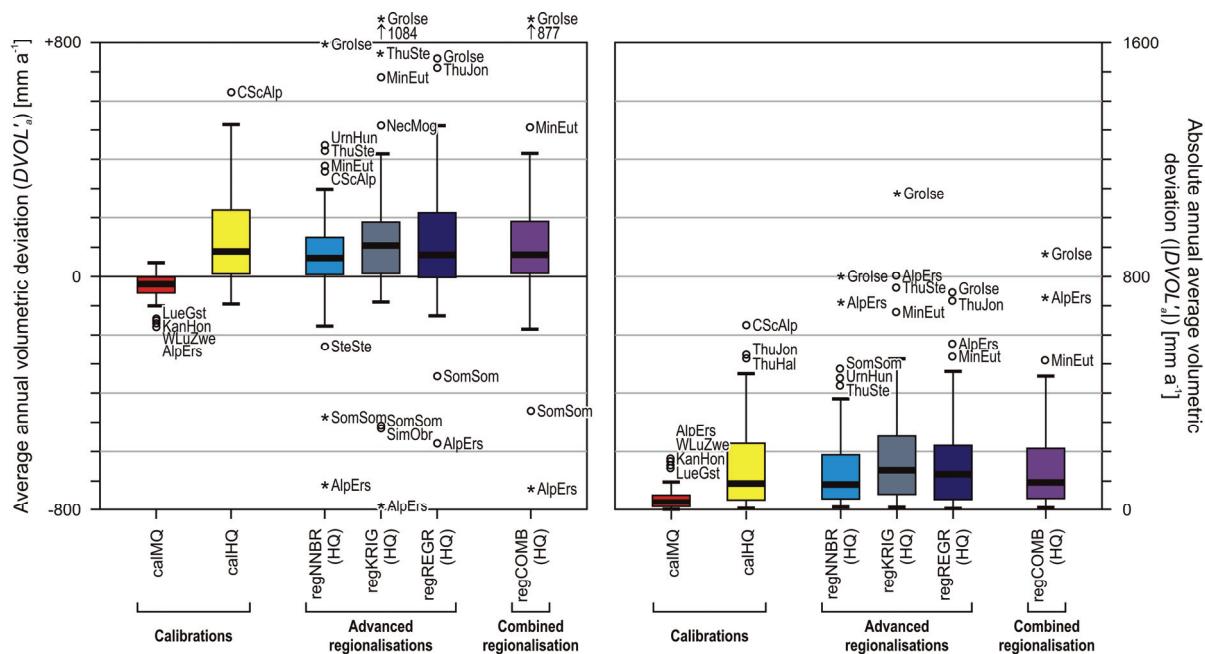


Figure 10.4: Average annual volumetric deviation for parameter sets derived from standard calibration (calMQ), flood calibration (calHQ) and the regionalisation methods Nearest Neighbours (regNNBR(HQ)), Kriging (regKRIG(HQ)), Regression (regREGR(HQ)) and combined approach (regCOMB(HQ)). Left graph shows actual deviations, right graph absolute values of deviations. Simulation period 1984–2003, 49 priority A catchments.

Abbildung 10.4: Mittlere jährliche Volumenabweichungen der Parametersätze aus Mittelwasser- (calMQ) und Hochwasserkalibrierung (calHQ) sowie der Regionalisierungsmethoden Nearest Neighbours (regNNBR(HQ)), Kriging (regKRIG(HQ)), Regression (regREGR(HQ)) und Kombinationsverfahren (regCOMB(HQ)). Links sind die tatsächlichen Abweichungen, rechts die Absolutwerte der Abweichungen dargestellt. Simulationszeitraum 1984–2003, 49 Einzugsgebiete der Priorität A.

Verluste in der Modellgüte durch die Regionalisierung

Mit den nun vorliegenden Resultaten können die im Rahmen der Kalibrierung vorgenommenen summarischen Betrachtungen zu Verlusten in der Modellgüte weitergeführt und auf die Regionalisierung ausgedehnt werden. Die schon in Kapitel 5.2.4 (vgl. **Abbildung 5.17**) festgestellten Güterverluste von Kalibrierung zu Validierung ("temporal loss", diesmal nur auf den Hochwasserparametersatz bezogen) und von Mittelwasser- zu Hochwasserkalibrierung ("flood loss") bilden die Vergleichsgrundlage.

Abbildung 10.5 stellt diesen Werten nun denjenigen Güteverlust gegenüber, welcher von der Hochwasserkalibrierung zur entsprechenden Regionalisierung (kombinierte Methode regCOMB(HQ)) auftritt ("spatial loss"). Es fällt auf, dass die Regionalisierung der Hochwasserparameter bezüglich Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) in etwa gleich gut oder sogar geringfügig besser abschneidet als die entsprechende Kalibrierung. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass bei der Regionalisierung die Kalibrierungsinformationen aus vielen (je nach Methode maximal 140) Gebieten zur Verfügung stehen, während bei der Kalibrierung selbst nur die Informationen des jeweils betrachteten Gebietes ausgewertet werden. Offenbar führt im vorliegenden Fall die Kombination vieler Kalibrierungen aus ähnlichen Gebieten im Mittel zu minimal besseren Resultaten als die Kalibrierung des eigentlich untersuchten Gebietes selbst. Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, dass der Informationsgehalt von Abflussmessreihen nicht ausreicht, um eine exakte Kalibrierung zu erhalten (vgl. Kapitel 3.1.4). Eine Verbesserung ist auch bei $DVOL'_a$ (+6 mm a⁻¹) zu beobachten, wenn auch nur in geringem Ausmass. Insgesamt bewegen sich alle zu verzeichnenden Veränderungen bezüglich Qualität der Simulationsresultate in einem akzeptablen Rahmen.

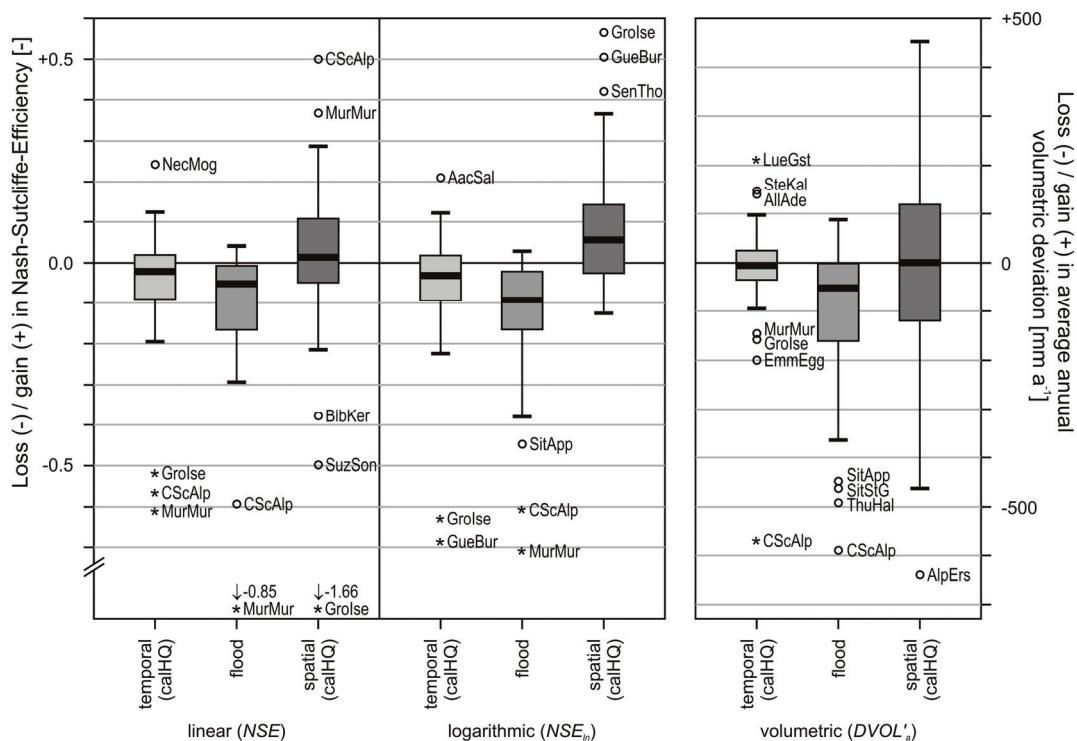


Figure 10.5: Losses in time (calibration period to validation period), through flood calibration (standard calibration to flood calibration) and in space (calibration to regionalisation), assessed with Nash-Sutcliffe-Efficiency (linear: NSE , logarithmic: NSE_{ln}) and average annual volumetric deviation ($DVOL'_a$). Calibration refers to flood-specific parameter sets (calHQ), regionalisation to combined method (regCOMB(HQ)), each for 49 priority A catchments. See also **Abbildung 5.17**.

Abbildung 10.5: Verluste bezüglich Zeitraum (temporal: Kalibrierungs- vs. Validierungsperiode), Hochwasserkalibrierung (flood: Mittelwasserkalibrierung vs. Hochwasserkalibrierung) und Anwendungsräum (spatial: Kalibrierung vs. Regionalisierung), bewertet anhand der Nash-Sutcliffe-Effizienz (linear: NSE , logarithmisch: NSE_{ln}) und der mittleren jährliche Volumenabweichungen ($DVOL'_a$). Die Kalibrierung bezieht sich auf die hochwasserspezifischen Parametersätze (calHQ), die Regionalisierung auf die kombinierte Methode (regCOMB(HQ)), jeweils für 49 Einzugsgebiete der Priorität A. Siehe auch **Abbildung 5.17**.

10.1.2 Exemplarische Ganglinien

Wie schon verschiedentlich angesprochen (siehe z. B. Kapitel 3.1.4), sollte neben der Interpretation der Gütemasse stets auch untersucht werden, ob die simulierten – und hier zudem auf einer Regionalisierung der Modellparameter basierenden – Ganglinien tatsächlich einen hydrologisch plausiblen Verlauf besitzen. Exemplarisch zeigt **Abbildung 10.6** für drei Einzugsgebiete mit unterschiedlichen Abflussregimes den beobachteten Abflussverlauf sowie die Simulationen auf Basis von Kalibrierung und Regionalisierung für das Jahr 1999:

- Für die *Emme bei Eggiwil* (nivo-pluvial préalpin, 124 km^2) wurde bei der kombinierten Regionalisierung (regCOMB(HQ)) im Jahre 1999 eine Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) von 0.79 erreicht. Wie erwartet fällt auch die visuelle Begutachtung dieser regionalisierten Ganglinie gut aus, wenngleich das Pfingsthochwasser von Mitte Mai 1999 überschätzt wird. Die drei grundlegenden Regionalisierungsverfahren Nearest Neighbours, Kriging und Regression spannen einen bemerkenswert schmalen Schwankungsbereich auf, was für die Plausibilität der Regionalisierung insgesamt spricht; dies umso mehr, als die Regionalisierungsverfahren zwar auf demselben Pool 140 kalibrierten Gebiete, jedoch auf recht unterschiedlichen Methoden beruhen.
- Der *Allenbach bei Adelboden* (nival alpin, 28.8 km^2) zeigt über weite Strecken eine gute Übereinstimmung von Regionalisierung und Beobachtung, allerdings sind in April, Mai und Juli 1999 merkliche Abweichungen zu verzeichnen; das Pfingsthochwasser wird überschätzt. Ein hoher NSE -Wert von 0.84 der kombinierten Regionalisierung für 1999 täuscht über diese Abweichungen hinweg, da die tiefen Abflusswerte zwischen Oktober und Dezember sehr gut wiedergegeben werden. Die Perioden mit vergrösserter Wertespanne der drei grundlegenden Regionalisierungen weisen jedoch auf grössere Unsicherheiten in der Regionalisierung hin.
- Auch die *Lütschine bei Gsteig* (a-glacio-nival, 379 km^2) weist bei grundsätzlich guter Wiedergabe Perioden mit grösseren Abweichungen auf, vor allem Ende Mai und Anfang Juli 1999, wobei das Pfingsthochwasser leicht unterschätzt wird. Wie schon beim Allenbach sind die ungenügenden Ganglinienabschnitte im hohen Wert von $NSE = 0.83$ für 1999 nicht zu erkennen; dies ist auch hier auf das Abflussregime (sehr geringe winterliche Abflüsse) zurückzuführen. Gleichzeitig bilden sich bezüglich Regionalisierung problematische Abschnitte auch hier in grösseren Wertespansen ab.

Nimmt man die im vorigen Abschnitt untersuchten Gütemasse und die hier exemplarisch betrachteten Ganglinien als Massstab, kann davon ausgegangen werden, dass die regionalisierten Parametersätze eine hydrologisch sinnvolle Simulation erlauben – auch wenn im Detail einige Abweichungen auftreten. Damit ist eine eminent wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung des Modellsystems zur Hochwasserabschätzung in ungemessenen Gebieten gesichert.

Es bietet sich an, den hier besprochenen Schwankungsbereich von Nearest-Neighbours-, Kriging- und Regressions-Regionalisierung in Darstellungen regionalisierter Abflussganglinien stets zu kennzeichnen; ist dieser Bereich gross, ist der entsprechende Ganglinienabschnitt mit besonderer Vorsicht zu interpretieren. Ob ein kleiner Schwankungsbereich automatisch auf eine zuverlässige Regionalisierung schliessen lässt, wäre im Detail noch zu untersuchen; die Daten der hier genauer betrachteten Gebiete lassen diesbezüglich keine eindeutige Aussage zu.

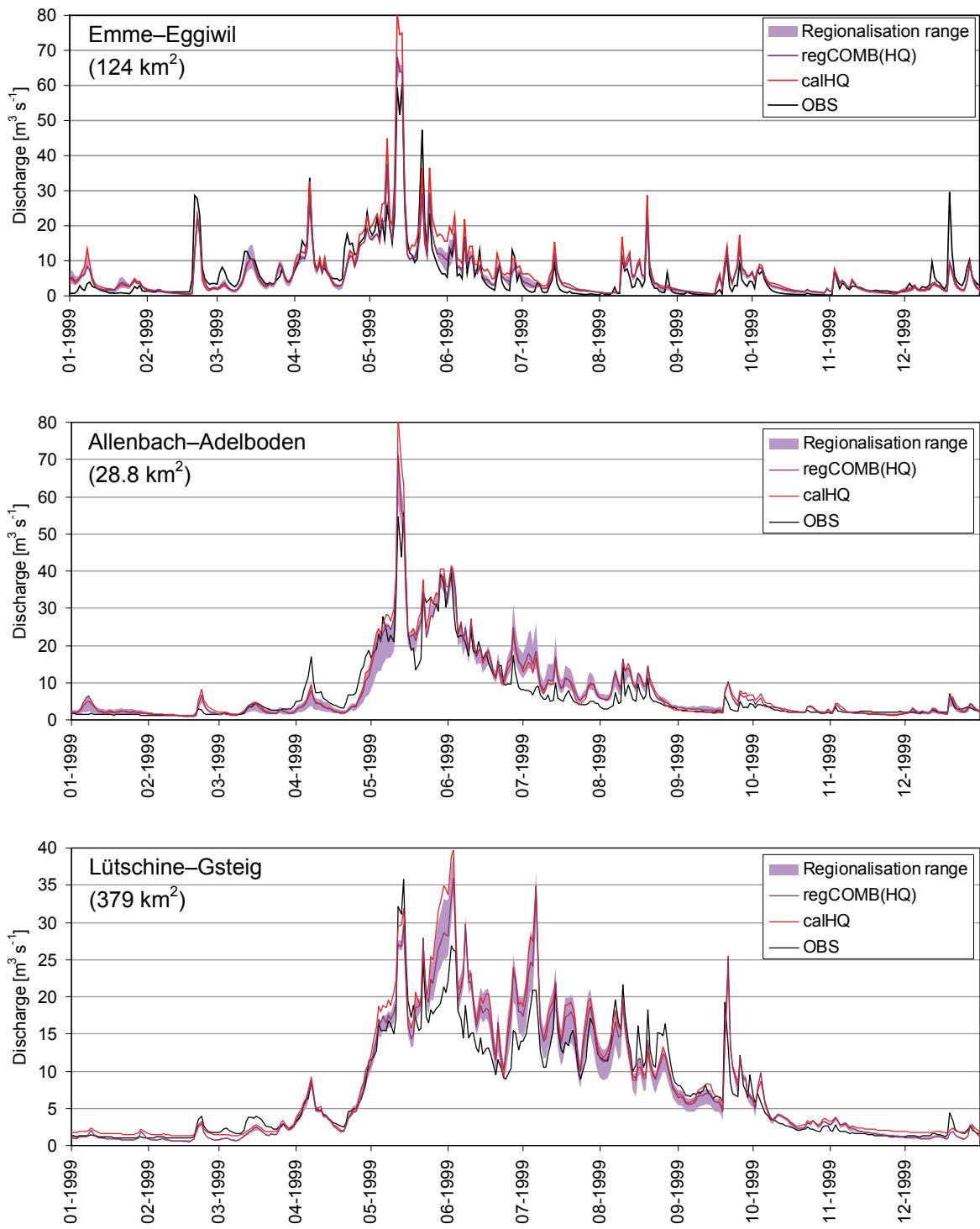


Figure 10.6: Comparison of combined regionalisation (regCOMB(HQ)) and range of regionalisations regNNBR(HQ), regKRIG(HQ) and regREGR(HQ) with observation (OBS) and flood calibration (calHQ) for regime types nivo-pluvial préalpin (Emme–Eggiwil), nival alpin (Allenbach–Adelboden) and a-glacio-nival (Lütschine–Gsteig).

Abbildung 10.6: Vergleich von kombinierter Regionalisierung (regCOMB(HQ)) und dem Schwankungsbereich der Regionalisierungen regNNBR(HQ), regKRIG(HQ) und regREGR(HQ) mit Beobachtung (OBS) und Hochwasserkalibrierung (calHQ) für Gebiete vom Regimetyp nivo-pluvial préalpin (Emme–Eggiwil), nival alpin (Allenbach–Adelboden) und a-glacio-nival (Lütschine–Gsteig).

10.1.3 Hochwassergütemasse

Nachdem die hydrologische Plausibilität der Simulationen für ungemessene Gebiete gesichert ist, soll nun überprüft werden, ob die in der Hochwasserkalibrierung erreichte Qualität in der Wiedergabe von Spitzenabflusswerten auch in der Regionalisierung erhalten werden kann. Da das hochwasserspezifische Gütemass PQT die grösste Aussagekraft besitzt und in der Hochwasserkalibrierung auch am stärksten gewichtet wurde, soll es hier als Beurteilungsgrösse dienen.

Wie schon in Kapitel 4.2.1 erläutert, ist PQT ein relatives Mass. Es kann nicht direkt zum Vergleich der Simulationen verschiedener Gebiete verwendet werden, sondern nur zur Beurteilung verschiedener Simulationsvarianten desselben Gebietes. Um trotzdem einen gebietsübergreifenden Vergleich vornehmen zu können, wird jeweils die relative Veränderung von PQT im Vergleich zur auf Mittelwasser kalibrierten Simulation (calMQ) verwendet, nämlich $PQT_{\text{rel},\text{calMQ}}$ (siehe Gleichung 4.3, S. 49).

Anhand dieses $PQT_{\text{rel},\text{calMQ}}$ zeigt **Abbildung 10.7**, dass die Wiedergabe von Hochwasserspitzen bei den Regionalisierungen etwas schlechter ausfällt als bei der Hochwasserkalibrierung (calHQ). Im Vergleich zur Mittelwasserkalibrierung (calMQ) schneiden die Regionalisierungsverfahren bezüglich PQT aber immer noch deutlich besser ab. Somit kann für die Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in ungemessenen Einzugsgebieten (folgender Abschnitt) auf gute Ergebnisse gehofft werden.

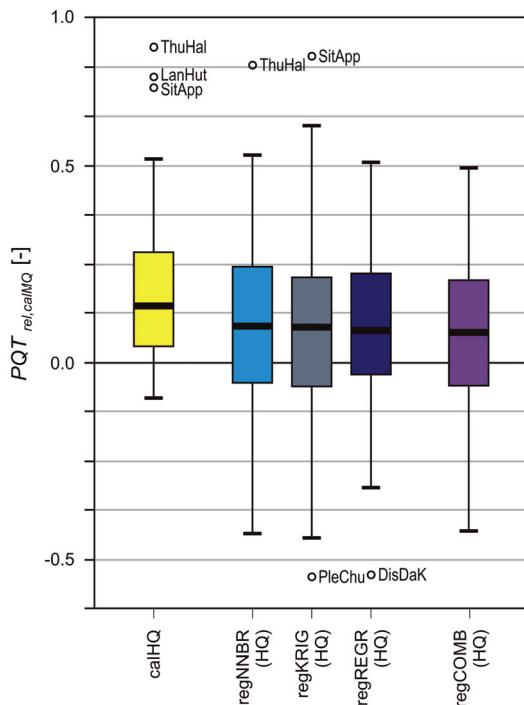


Figure 10.7: Relative change in flood-specific score PQT ($PQT_{\text{rel},\text{calMQ}}$) as compared to standard calibration for flood calibration (calHQ) and the regionalisations with Nearest Neighbours ($\text{regNNBR}(\text{HQ})$), Kriging ($\text{regKRIG}(\text{HQ})$), Regression ($\text{regREGR}(\text{HQ})$) and the combined approach ($\text{regCOMB}(\text{HQ})$) for 49 priority A catchments.

Abbildung 10.7: Relative Veränderung des Hochwassergütemasses PQT ($PQT_{\text{rel},\text{calMQ}}$) für die Hochwasserkalibrierung (calHQ) sowie die Regionalisierungen mit Nearest Neighbours ($\text{regNNBR}(\text{HQ})$), Kriging ($\text{regKRIG}(\text{HQ})$), Regression ($\text{regREGR}(\text{HQ})$) und kombiniertem Verfahren ($\text{regCOMB}(\text{HQ})$) im Vergleich zur auf Mittelwasser kalibrierten Simulation. Datenbasis: 49 Einzugsgebiete der Priorität A.

10.2 Resultate der Hochwasserabschätzung

Mit den Analysen zur Hochwasserabschätzung folgt der wichtigste Teil der Resultatbetrachtung, welcher sich nun direkt mit dem für diese Arbeit gesteckten Ziel befasst: der Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in ungemessenen Gebieten.

Grundlage für alle Auswertungen dieses Abschnittes sind die 49 Einzugsgebiete der Priorität A mit Simulationszeitraum 1984–2003 (Initialisierungsjahr: 1983). Es wurden also nur Gebiete einbezogen, für welche von der Landeshydrologie langjährige, den hier verwendeten Simulationszeitraum abdeckende Messreihen vorliegen. Aus diesen Reihen lassen sich gut abgestützte Hochwasserstatistiken erstellen, welche wiederum als Referenz zur Beurteilung der Schätzungen dienen; eine kritische Diskussion der verwendeten Extrapolationsmethodik und des betrachteten Wiederkehrintervalls erfolgte bereits in Kapitel 4.2.3. Die Regionalisierung wurde wiederum mit Hilfe des Jack-Knife-Prinzips beurteilt (vgl. Kapitel 8.7); ihre Grundlage sind weiterhin die 140 erfolgreich auf Hochwasser kalibrierten mesoskaligen Einzugsgebiete.

10.2.1 Vergleichende Betrachtung der Schätzungsqualität

Als erstes erfolgt eine vergleichende Betrachtung der Schätzresultate für alle wichtigen Simulationen auf Basis von Kalibrierung und Regionalisierung. **Abbildung 10.8** zeigt dazu die Resultate für die Schätzung eines HQ₁₀₀ aus den stündlichen Jahreshöchstwerten 1984–2003; für die Schätzung wurde die erste Extremalverteilung mit Parameterschätzung nach den wahrscheinlichkeitsgewichteten Momenten eingesetzt (E1-WGM, vgl. Kapitel 4.2.3). Dargestellt sind dabei die Abweichungen von der Extrapolation aus der gleich langen und ebenfalls ständig aufgelösten Reihe beobachteter Werte, Grundlage sind die Ergebnisse aus den 49 Einzugsgebieten der Priorität A. Als grober Indikator für die praktische Aussagekraft der Resultate sind im unteren Teil von **Abbildung 10.8** zudem die Anzahl getroffener ("hits") und knapp verfehlter Schätzungen ("near misses") aufgetragen. Von einem Treffer wird gesprochen, wenn der aus der Simulation geschätzte Wert im statistischen 90%-Konfidenzintervall des aus der Beobachtung extrapolierten Referenz-HQ₁₀₀ liegt; dies wird als sehr gutes Resultat betrachtet. Bei einer knappen Fehlschätzung überschneiden sich zumindest die Konfidenzintervalle des Referenz-HQ₁₀₀ und des aus der Simulation geschätzten HQ₁₀₀, was als immer noch befriedigend eingestuft wird.

Für alle 49 hier ausgewerteten Einzugsgebiete sind in Anhang D detaillierte graphische Extrapolationen zu finden; dort wurden neben den regionalisierten auch die kalibrierten Simulationen ausgewertet (vgl. Kapitel 5.2.2). Die Schätzungen mit jeweils allen in HQ_{x_meso_CH} (BARBEN, 2003; SPRAEFICO ET AL., 2003) verfügbaren Verfahren für die Kennwerte HQ₂₀, HQ₅₀, HQ₁₀₀ und Q_{max} sind zum Vergleich ebenfalls eingetragen.

Anhand des Medians ist in **Abbildung 10.8** (oben) bei allen Simulationen eine leichte Tendenz zur Unterschätzung des HQ₁₀₀ zu verzeichnen. Diese fällt aber moderat aus und ist für die grundlegenden Regionalisierungen Nearest Neighbours (regNNBR(HQ), -13.6%), Kriging (regKRIG(HQ), -9.9%) und Regression (regREGR(HQ), -9.7%) sogar noch etwas geringer als für die Hochwasserkalibrierung (calHQ, -15.8%). Erwartungsgemäss zeigt die Mittelwasserkalibrierung die deutlich schlechtesten Resultate (calMQ, -29.8%), am besten schneidet die kombinierte Regionalisierung ab (regCOMB(HQ), -7.2%). Dass eine Regionalisierung bessere Resultate erzielen kann als die zugrundeliegende Kalibrierung, wurde zumindest bezüglich Standardgütemassen schon von McINTYRE ET AL. (2005) beschrieben. Bei der kombinierten Regionalisierung kann die Medianbildung aus drei – notabene regionalisierten – Simulationen einen vorteilhaften Einfluss auf die Resultate haben. Dasselbe gilt für die Nearest-Neighbours-Methode, wo fünf regionalisierte Ganglinien mittels Medianberechnung kombiniert werden. Für die Regionalisierungen mit Kriging und Regression sind Erklärungen hingegen schwieriger zu finden. Möglicherweise übt hier die Kombination von Informationen aus verschiedenen kalibrierten Gebieten eine günstige Wirkung auf die Resultate der Hochwasserabschätzung aus.

Für alle Regionalisierungen ist das untere Quartil grösser oder gleich -35.2% und das obere Quartil kleiner oder gleich +15.5%. Die kombinierte Regionalisierung umfasst einen Quartilsbereich von -30.8% bis +7.5%, was bedeutet, dass sich die Schätzfehler eines HQ₁₀₀ für die Hälfte der 49 betrachteten Einzugsgebiete in diesem Bereich bewegen.

Es fällt auf, dass im beobachteten Datenkollektiv nur Ausreisser nach oben auftreten, dass also in einigen Gebieten eine deutliche Überschätzung gegenüber dem Referenzwert stattfindet. Ausreisser wurden zwar mit der Hochwasserkalibrierung erfolgreich unterbunden, diese vorteilhafte Eigenschaft liess sich aber nicht auf die Regionalisierungen übertragen. Andererseits ist zu verzeichnen, dass die Spannweite der Abweichungen bei den Regionalisierungen nicht wesentlich grösser ist als bei der Hochwasserkalibrierung (calHQ); für die kombinierte Regionalisierung und die Regionalisierung mit Kriging ist sie sogar ähnlich tief wie für calHQ. Insgesamt kann gefolgert werden, dass starke Überschätzungen kein systematisches Problem darstellen, sondern nur in einzelnen Gebieten auftreten. Als Beispiel für eine bekannte Überschätzungsproblematik sei die Gürbe angeführt: Oberhalb des Pegels Belp (Symbol GueBel) stellen sich bei grossen Abflussmengen Überflutungen ein, wodurch die tatsächlich beobachtete Ganglinie abgeflacht wird (NAEF UND THOMA, 2002). Derartige Effekte können von PREVAH nicht wiedergegeben werden und führen in diesem Fall zu einer Überschätzung der Spitzenwerte.

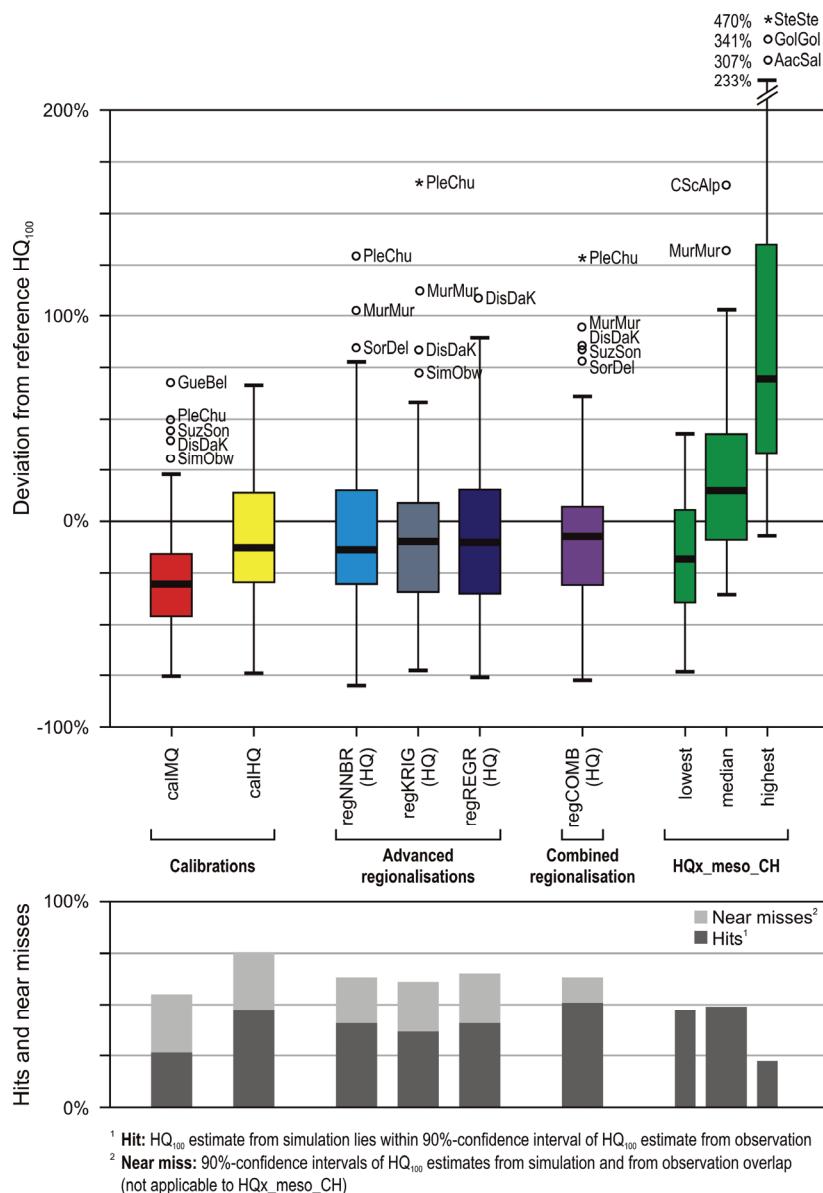


Figure 10.8: Error in HQ₁₀₀ estimates from standard (calMQ) and from flood calibration (calHQ) as well as from regionalisation with Nearest Neighbours (regNNBR(HQ)), Kriging (regKRIG(HQ)), Regression (regREGR(HQ)) and combined approach (regCOMB(HQ)); reference: HQ₁₀₀ estimated from observation. For comparison, respective values are given for the lowest, median and highest of the five HQx_meso_CH estimates for a HQ₁₀₀. The lower part of the figure shows the percentage of hits and near misses (see legend). Data from 49 priority A catchments, reference period 1984–2003.

Abbildung 10.8: Fehler im geschätzten HQ₁₀₀ für Mittelwasserkalibrierung (calMQ), Hochwasserkalibrierung (calHQ) sowie für die Regionalisierungen mit Nearest Neighbours (regNNBR(HQ)), Kriging (regKRIG(HQ)), Regression (regREGR(HQ)) und kombiniertem Ansatz (regCOMB(HQ)); Referenz: Aus der Beobachtung geschätztes HQ₁₀₀. Zum Vergleich sind entsprechende Werte von HQx_meso_CH angegeben, mit dem tiefsten, dem medianen und dem höchsten der fünf für ein HQ₁₀₀ zur Verfügung stehenden Schätzwerten. Der untere Teil der Grafik zeigt den Anteil getroffener und knapp verfehlter Schätzungen (hits resp. near misses, siehe Legende). Datengrundlage: 49 Einzugsgebiete der Priorität A, Referenzzeitraum 1984–2003.

Die etwas abstrakten Werte der Boxplots können nun durch die erwähnten Kennzahlen für Treffer und knappe Fehlschätzungen ergänzt werden (**Abbildung 10.8**, unten). Auch hier zeigt die kombinierte Regionalisierung (regCOMB(HQ)) mit 51% sehr gut getroffener Schätzungen die besten Resultate

aller Simulationen. Nimmt man die knappen Fehlschätzungen hinzu, zeigt die Hochwasserkalibrierung die besten Ergebnisse (calHQ, 47% Treffer + 27% knappe Fehlschätzungen).

Interessant ist nun der Vergleich mit den Schätzwerten, welche HQx_meso_CH (BARBEN, 2003; SPREAFICO ET AL., 2003) liefert. Anzumerken ist hierzu, dass sich diese Schätzwerte auf den instantanen Spitzenabfluss beziehen, während die in der vorliegenden Arbeit geschätzten Werte stündliche Maxima darstellen. Wie gross die bei einem solchen Vergleich zu erwartenden Unterschiede sind, wurde in Kapitel 4.1.2 bereits erläutert. Für die meisten der betrachteten Gebiete kann davon ausgegangen werden, dass eine Gegenüberstellung der erwähnten Schätzwerte sinnvoll ist und kaum mit einer Verfälschung des Vergleichs gerechnet werden muss.

Als erstes ist bei HQx_meso_CH eine Neigung zur Überschätzung des HQ₁₀₀ festzustellen: Betrachtet man von den fünf angewandten Verfahren jeweils dasjenige mit dem medianen Schätzwert, resultiert ein medianer Fehler von +15.1%. Würde man aus den Verfahren das 31.5%-Quantil verwenden – also in etwa den zweittiefsten der fünf Werte –, liesse sich der mediane Fehler für die betrachteten 49 Einzugsgebiete auf 0 trimmen, der Quartilsbereich wäre mit -20% bis +26% jedoch ähnlich gross wie bei den Regionalisierungen mit PREVAH. Augenfällig ist die Überschätzung beim jeweils höchsten HQ₁₀₀-Schätzwert von HQx_meso_CH, welcher eine stark nach oben ausgedehnte Spannweite besitzt (+233%) und in einem Extremfall das Referenz-HQ₁₀₀ um 470% überschätzt. Das Ausmass der Überschätzungen ist deutlich grösser als die Abweichungen, welche wie oben beschrieben aufgrund des Vergleiches von Stunden- und Instantanwerten erwartet werden müssen. Der Anteil getroffener Schätzungen von 47% beim medianen Schätzwert von HQx_meso_CH ist jedoch wiederum vergleichbar mit den Resultaten der verschiedenen Simulationen.

Eine etwas genauere Betrachtung der Schätzverfahren für ein HQ₁₀₀ in HQx_meso_CH (**Tabelle 10.1**) zeigt, dass die tiefste Schätzung am häufigsten von GIUB96(FN) stammt (mediane Unterschätzung: -3.1%), die mediane Schätzung am häufigsten von der Moment-Methode (mediane Überschätzung: +5.2%). Sehr deutlich fällt die Tendenz beim höchsten Schätzwert aus, der in mehr als der Hälfte der Fälle vom Verfahren Kölla stammt; 4 der 6 Abweichungen von über +200% stammen von dieser Schätzmethode. Die geringste mediane Abweichung hat eindeutig GIUB96(MQ) mit einem Wert von nur -0.1%. Das Verfahren tritt auch am häufigsten als zweittiefstes (25%-Quartil) auf und liegt damit sehr nahe bei der oben erwähnten idealen Schätzung über das 31.5%-Quantil der fünf HQ₁₀₀-Werte aus HQx_meso_CH.

Table 10.1: Occurrence of HQx_meso_CH procedures for estimation of a HQ₁₀₀ as lowest, median, highest and 25%-quantile estimate.

Tabelle 10.1: Auftreten der in HQx_meso_CH verfügbaren Schätzverfahren für ein HQ₁₀₀ als tiefster, medianer, höchster und 25%-Quantil-Wert.

Procedure	Median deviation	Occurrence as lowest	Occurrence as median	Occurrence as highest	Occurrence as 25% quantile
Kölla	+54.0%	5 (10%)	8 (16%)	26 (53%)	3 (6%)
GIUB96(FN)	-3.1%	15 (31%)	7 (14%)	8 (16%)	11 (22%)
GIUB96(MQ)	-0.1%	11 (22%)	10 (20%)	0 (0%)	23 (47%)
Momente	+5.2%	9 (18%)	15 (31%)	3 (6%)	9 (18%)
BaD7	+21.1%	9 (18%)	9 (18%)	12 (24%)	3 (6%)

Insgesamt schneiden die Schätzungen mit HQx_meso_CH bemerkenswert gut ab, es zeigen sich aber auch die in Kapitel 1.1.2 erwähnten Probleme, die den grossen Schwankungsbereich der Schätzungen betreffen. Angesichts der Resultate, welche mit der Regionalisierung via PREVAH nun erreicht wurden, darf vom hier entwickelten Modellsystem ein wichtiger Beitrag zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in ungemessenen Gebieten erwartet werden, zumal ein Ansatz zur Anwendung kommt, welcher im Vergleich zu den bisherigen Schätzverfahren auf völlig anderen Grundlagen beruht und somit ein grosses Mass an zusätzlicher Information in die Schätzung einbringt. Dies wird durch die dargelegten Unterschiede in den Fehlern einer HQ₁₀₀-Schätzung bestätigt.

Die Erkenntnisse dieses sehr wichtigen Abschnitts sind in **Abbildung 10.9** zusammengefasst, welche für ein HQ₁₀₀ die Anzahl getroffener Schätzungen dem medianen Schätzfehler gegenüberstellt; damit werden der obere und der untere Teil von **Abbildung 10.8** miteinander verknüpft. Die kombinierte Regionalisierung (regCOMB(HQ)) zeigt im Bezug auf beide Kriterien eindeutig die besten Resultate, besser noch als diejenigen der Hochwasserkalibrierung (calHQ). Am schlechtesten ist die Mittelwasserkalibrierung (calMQ) zu bewerten.

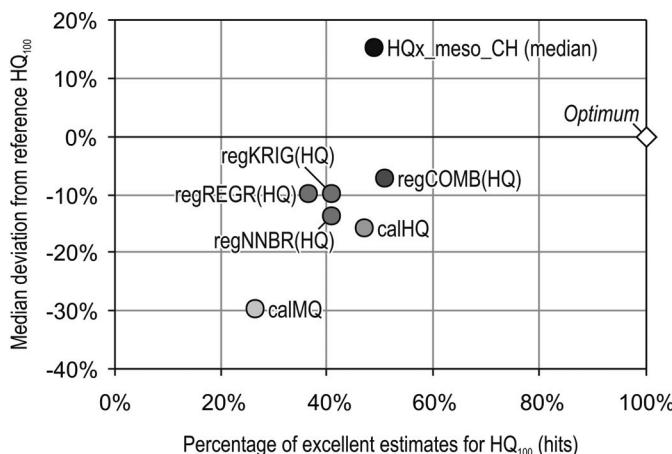


Figure 10.9: Median deviation from reference HQ_{100} and percentage of excellent estimates ("hits") for various simulations and for HQx_meso_CH (cf. **Figure 10.8**). The theoretical optimum is indicated with the white diamond.

Abbildung 10.9: Mediane Abweichung vom Referenz- HQ_{100} versus Anteil getroffener Schätzungen ("hits") für verschiedene Simulationen und für HQx_meso_CH (vgl. **Abbildung 10.8**). Das theoretische Optimum ist mit der weissen Raute gekennzeichnet.

10.2.2 Detaillierte Analyse der Schätzfehler

Im Folgenden werden vor allem die in der Regionalisierung auftretenden Fehler für die Schätzung eines HQ_{100} genauer untersucht, und zwar sowohl bezüglich ihrer räumlichen Verteilung wie auch bezüglich einer möglichen Abhängigkeit von der Gebietsgrösse. Weiter wird diskutiert, ob das in dieser Arbeit verwendete einheitliche Schätzverfahren tatsächlich zu geringeren Schätzfehlern führt als das aktuelle Verfahren nach DVWK (1999). Abgeschlossen werden die Fehleruntersuchungen mit dem Test einer Variation der kombinierten Regionalisierung – dabei interessiert, ob sich die Schätzfehler so noch vermindern lassen.

Räumliche Verteilung des Schätzfehlers

Mit Hilfe der oben hergeleiteten Informationen zu den 49 Einzugsgebieten der Priorität A kann nun versucht werden, Informationen über die räumliche Verteilung der Schätzfehler abzuleiten und allfällige Muster zu identifizieren. Die jeweiligen Gebietsschwerpunkte dienen dabei als Stützstellen für eine räumliche Interpolation auf das schweizerische Rheineinzugsgebiet bis Basel, wobei ein Inverse-Distance-Verfahren verwendet wurde (**Abbildung 10.10**). Diese Analysen sind vergleichbar mit denjenigen von BARBEN (2003), welcher so die gebräuchlichsten regionalhydrologischen Verfahren zur Hochwasserabschätzung verglich.

Zusätzlich zum Schätzfehler des HQ_{100} werden auch die entsprechenden Fehler in c und d – den zwei geschätzten Parameterwerten der ersten Extremalverteilung (E1) – betrachtet, da daraus weitere ausschlussreiche Informationen resultieren könnten.

Vorerst fällt auf, dass die Fehler für alle Regionalisierungsverfahren ähnlich verteilt sind; angesichts der unterschiedlichen methodischen Grundlagen ist dies bemerkenswert. Die beiden folgenden Interpretationen sind dazu denkbar, wobei vermutlich beide eine Rolle spielen:

- Die spezifischen Gebietseigenschaften sowie der meteorologische Input (und dabei insbesondere Niederschlag und Temperatur) spielen eine grosse Rolle und dominieren die räumliche Verteilung der Schätzfehler.
- Die der Regionalisierung zugrundeliegenden Parametersätze (Hochwasserkalibrierung) haben massgeblichen Einfluss auf den Schätzfehler. Dass die verschiedenen Regionalisierungen – welche auf unterschiedlichen Methoden, aber demselben Pool an Parametersätzen basieren – zu ähnlichen Fehlern führen, weist darauf hin, dass die Regionalisierung insgesamt stabil ist und der Schätzung keine grösseren Fehler hinzufügt.

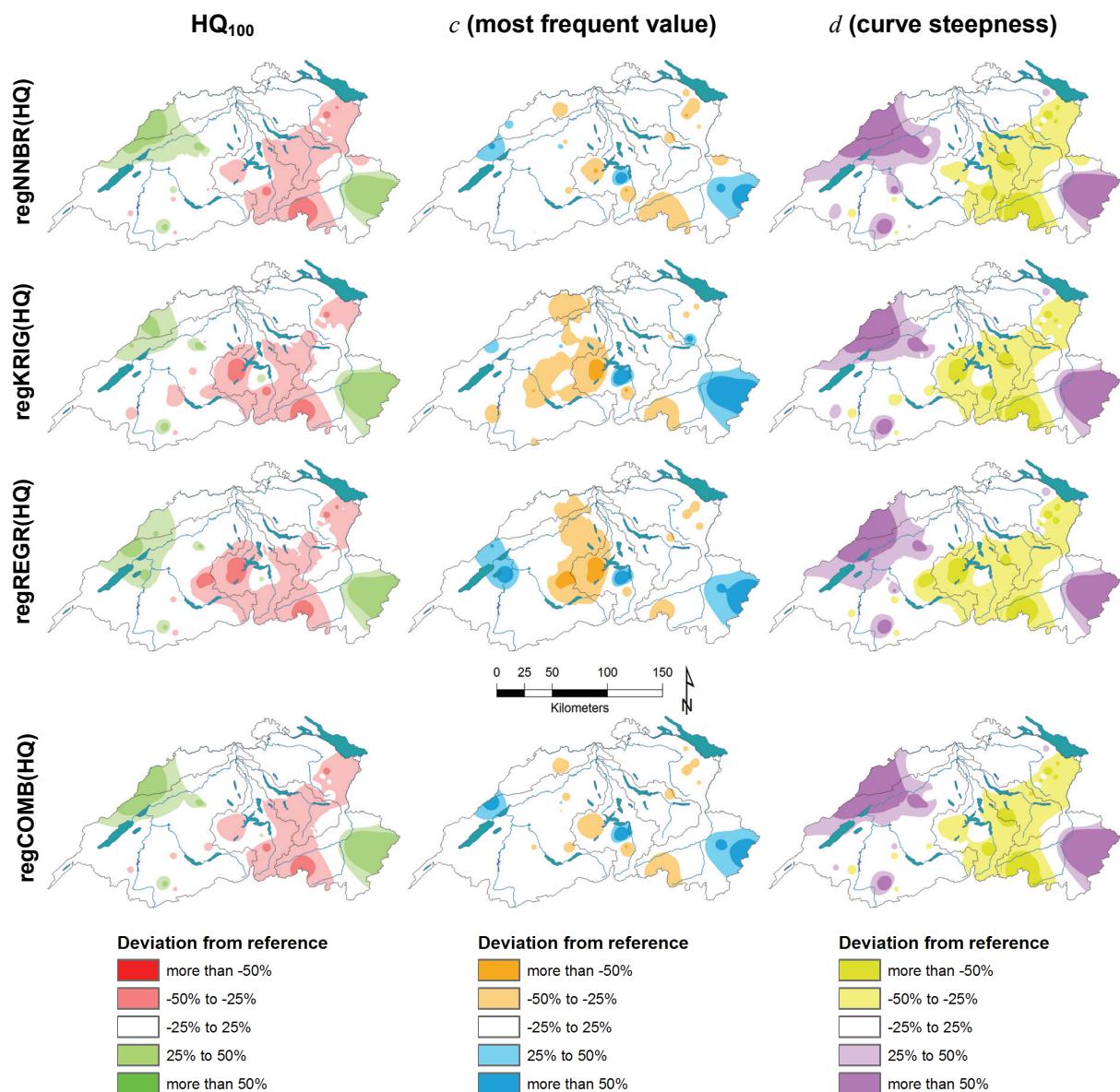


Figure 10.10: Spatial distribution of estimation error for a HQ_{100} as well as for extreme value one distribution parameters c and d , based upon interpolated results of 49 priority A catchments.

Abbildung 10.10: Räumliche Verteilung des Schätzfehlers für ein HQ_{100} sowie für die Parameter c und d der ersten Extremalverteilung, basierend auf den interpolierten Resultaten aus 49 Einzugsgebieten der Priorität A.

Die Fehler der einzelnen betrachteten Größen HQ_{100} , c und d können deshalb auch relativ unabhängig vom Regionalisierungsverfahren charakterisiert werden:

- Für das HQ_{100} (**Abbildung 10.10**, links) sind Regionen mit Überschätzungen im Jura und den Ostschweizer Alpen zu erkennen, Unterschätzungen treten in den Zentralschweizer Alpen und den Ostschweizer Voralpen auf.
- Beim Lageparameter c (**Abbildung 10.10**, Mitte) treten ähnliche räumliche Muster auf, wobei die Zone mit Unterschätzung etwas weiter westlich liegt und weniger deutlich abgrenzbar ist.
- Das räumliche Muster des Massstabsparameters d (**Abbildung 10.10**, rechts) ist demjenigen von HQ_{100} wiederum sehr ähnlich.

Ob sich diese anscheinend relativ stabilen Muster für eine Korrektur des Schätzfehlers verwenden lassen, wird in Abschnitt 10.2.3 noch untersucht werden.

Eine gewisse, wenn auch nicht sehr ausgeprägte Ähnlichkeit ist feststellbar, wenn man die beschriebenen Muster mit denjenigen der Standardmodellgüte NSE (**Abbildung 10.3**) vergleicht. Tendenziell sind grössere Schätzfehler (Unter- oder Überschätzung) in denjenigen Regionen zu beobachten, welche auch bezüglich Modellgüte der entsprechenden Regionalisierung schlecht abschneiden. Ein Zusammenhang mit den bei Mittelwasser- und Hochwasserkalibrierung beobachteten Mustern ist hingegen kaum zu erkennen. Zwischen dem Erfolg der Kalibrierung und dem Schätzfehler der Regionalisierung ist also bezüglich räumlicher Muster keine Ähnlichkeit auszumachen.

Ein Vergleich mit den räumlichen Mustern von HQx_meso_CH zeigt, dass von den zehn dort untersuchten Schätzverfahren (vgl. Abbildung 3.24 in BARBEN, 2003) nur zwei ein räumliches Muster zeigen, welches dem hier festgestellten etwas ähnlich ist, nämlich GIUB96(FN) und in wesentlich gerinem Masse BaD7 (**Abbildung 10.11**) – dies sind gleichzeitig diejenigen Verfahren, welche gemäss BARBEN (2003) die besten Ergebnisse liefern und vom Autor zu einer idealen Schätzung kombiniert wurden. Insgesamt darf aber festgestellt werden, dass die Schätzungen des hier erarbeiteten Modellsystems einen deutlich komplementären Informationsgehalt besitzen – HQx_meso_CH und die PREVAH-Schätzung können sich also gegenseitig ergänzen.

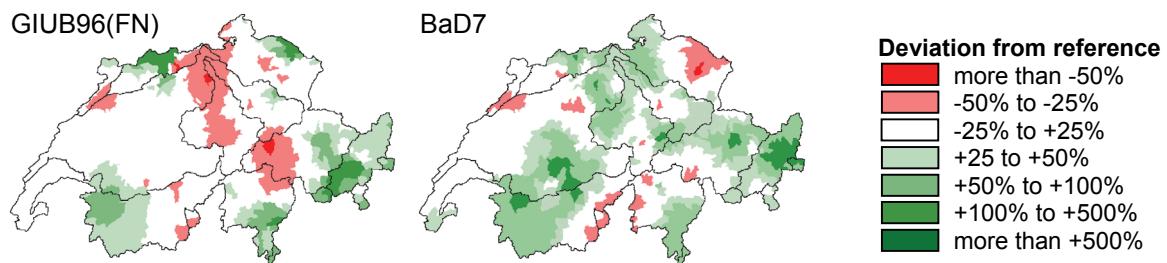


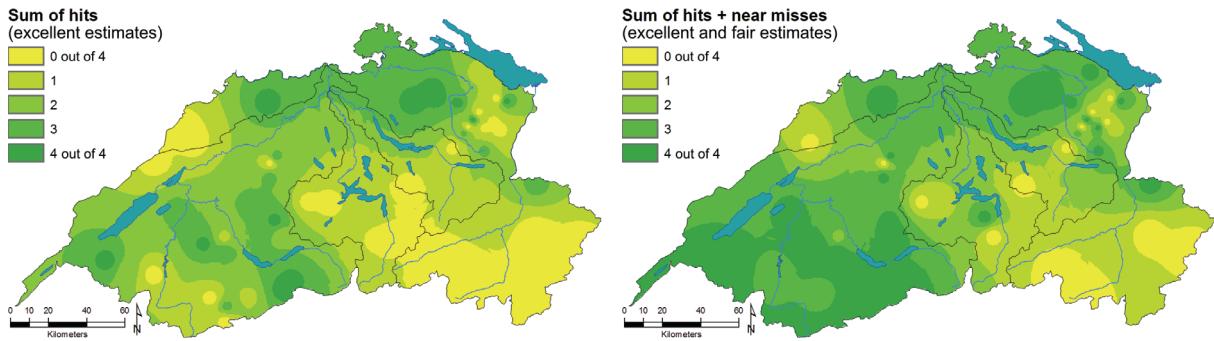
Figure 10.11: Spatial error distribution for a HQ_{100} estimated with GIUB96(FN) and BaD7 (from BARBEN, 2003).

Abbildung 10.11: Räumliche Fehlerverteilung für ein mit den Verfahren GIUB96(FN) und BaD7 geschätztes HQ_{100} (aus BARBEN, 2003).

Noch etwas genauer auf räumliche Muster der Hochwasserabschätzung mit PREVAH soll eingegangen werden, indem wiederum die Anzahl gut getroffener Schätzwerte untersucht wird (**Abbildung 10.12**, links). Dazu wird aufsummiert, wie viele der insgesamt vier verwendeten Regionalisierungen (drei elementare Regionalisierungen regNNBR(HQ), regKRIG(HQ), regREGR(HQ) sowie die kombinierte Regionalisierung regCOMB(HQ)) im 90%-Konfidenzintervall des aus der Beobachtung extrapolierten Referenz- HQ_{100} liegen ("Treffer"). Bei der maximalen Trefferzahl von 4 befinden sich die extrapolierten HQ_{100} aller erwähnten Regionalisierungen im Konfidenzbereich des gesuchten HQ_{100} , was auf eine sehr gute Schätzung hinweist. Bei einer Trefferzahl von 0 liefern alle Regionalisierungen unbefriedigende Schätzwerte.

Dieser notabene sehr strenge Test weist auf ausgezeichnete Resultate in der Nordschweiz sowie in Teilen der westlichen Voralpen und Alpen hin; grössere Probleme scheinen im östlichen Alpenraum und zum Teil auch im Jura sowie in den Zentralschweizer Alpen und Voralpen zu bestehen. Dieses Muster ist mit demjenigen der oben gefundenen Fehler vereinbar.

Etwas grosszügiger wird das Abschneiden der Hochwasserabschätzung bewertet, wenn nebst den Treffern (erfolgreiche Schätzung) auch noch die knappen Fehlschätzungen (befriedigende Schätzungen) betrachtet werden (**Abbildung 10.12**, rechts). Unter einer knappen Fehlschätzung wird hier wie schon im vorherigen Abschnitt verstanden, dass sich die Konfidenzintervalle des Referenz- HQ_{100} und des geschätzten HQ_{100} zumindest teilweise überlappen. Das so entstehende Muster ist dem zuvor diskutierten Muster der Treffersumme sehr ähnlich, bei generell etwas höheren Summen. Überproportional besser schneiden dabei die westlichen Alpen und Voralpen ab; hier ist also eine grosse Zahl von knappen Fehlschätzungen zu verzeichnen.



Hit: Simulation HQ_{100} estimate lies within 90%-confidence interval of observation HQ_{100} estimate
Near miss: 90%-confidence intervals of HQ_{100} estimates for simulation and for observation overlap

Figure 10.12: Sum of hits and sum of hits plus near misses for all four regionalisations (regNNBR(HQ), regKRIG(HQ), regREGR(HQ) and regCOMB(HQ)).

Abbildung 10.12: Summe der Treffer und Summe der Treffer plus knappen Fehlschätzungen für alle vier Regionalisierungen (regNNBR(HQ), regKRIG(HQ), regREGR(HQ) und regCOMB(HQ)).

Zu beachten ist, dass die betrachteten Indikatoren relativ heterogen verteilt sind. Im Gebiet der Thur (Ostschweizer Voralpen) ist dies besonders gut zu erkennen: Diese mit untersuchten Einzugsgebieten besonders dicht abgedeckte Region wies auch schon bezüglich der Schätzfehler (**Abbildung 10.10**) kein homogenes Muster auf. Insofern sind insgesamt grössere Vorbehalte anzubringen, was das Vorhandensein sinnvoller räumlicher Muster für die Schätzfehler betrifft.

Zusammenhang zwischen Schätzfehler und Gebietsgrösse

Eine wichtige Grösse im Zusammenhang mit dem Hochwasserverhalten von Einzugsgebieten ist sicherlich die Gebietsgrösse; sie soll hier bezüglich ihrer Eignung als Indikator für den Schätzfehler untersucht werden. Es ist zu vermuten, dass vor allem bei kleinen Gebieten grössere Fehler auftreten, insbesondere wenn kurze und intensive Niederschläge als Auslöser für ein Ereignis fungieren – einerseits, weil die korrekte Erfassung und Interpolation der Niederschläge in diesen Fällen schwierig ist, andererseits aber auch, weil sich Ungenauigkeiten in der Parameterwahl für den Oberflächenabfluss stark auf die Güte der simulierten Abflussspitzen auswirken. Bei grösseren Gebieten ist hingegen tendenziell mit einer Ausmittelung der Fehler im Niederschlagsgeschehen und in den Modellparametern zu rechnen. Zudem führen bei zunehmender Gebietsfläche eher langandauernde und grossflächige Niederschlagsereignisse zu Hochwassern, und die Simulation dieser Ereignisse ist etwas weniger problematisch.

Abbildung 10.13 zeigt nun das Verhalten des Schätzfehlers in Abhängigkeit von der Gebietsgrösse für die mit Kalibrierung und Regionalisierung erstellten Parametersätze. Es können die folgenden Skalenbereiche unterschieden werden, für welche in **Tabelle 10.2** der mittlere Schätzfehler aufgeführt ist:

- In kleinen Gebieten (ca. $< 25 \text{ km}^2$) ist mit Unterschätzungen zu rechnen; für das beobachtete Datenkollektiv betragen sie zwischen 25% und 75%. Dies dürfte einerseits auf Probleme im Zusammenhang mit Starkniederschlägen zurückzuführen sein, welche sich im Niederschlagsmessnetz nur schwer erfassen lassen. Andererseits ist auch zu vermuten, dass die schnellen Abflusskomponenten wie schon früher erwähnt schwieriger zu parametrisieren sind und im Stundenintervall gar nicht adäquat wiedergegeben werden können.
- In mittelgrossen Gebieten (ca. $25\text{--}750 \text{ km}^2$) sind sowohl positive wie auch negative Schätzfehler zu beobachten, wobei die Werte bei den verschiedenen Regionalisierungen stärker gegen oben streuen. Für die Regionalisierungen bewegt sich der mittlere Schätzfehler in diesem Skalenbereich zwischen +3.5% und +4.2%, für die Hochwasserkalibrierung beträgt er -5.6%; die Mittelwasserkalibrierung fällt mit -20.1% erwartungsgemäss ab. Im Mittel kann für Gebiete dieser Grösse also mit guten Resultaten gerechnet werden, für den Einzelfall sollte allenfalls geprüft werden, ob aufgrund der verfügbaren Gebietseigenschaften allenfalls mit einer Über- oder Unterschätzung zu rechnen ist.

- In grossen Gebieten (ca. $> 750 \text{ km}^2$) fallen die Fehler gering aus. Wie einleitend erläutert ist dies einerseits auf eine stärkere Ausmittlung des Niederschlagsgeschehens zurückzuführen, andererseits aber auch darauf, dass als auslösende Faktoren eher lange andauernde und dafür weniger intensive Niederschläge in Frage kommen, welche bezüglich Messung und Simulation etwas weniger problematisch sind.

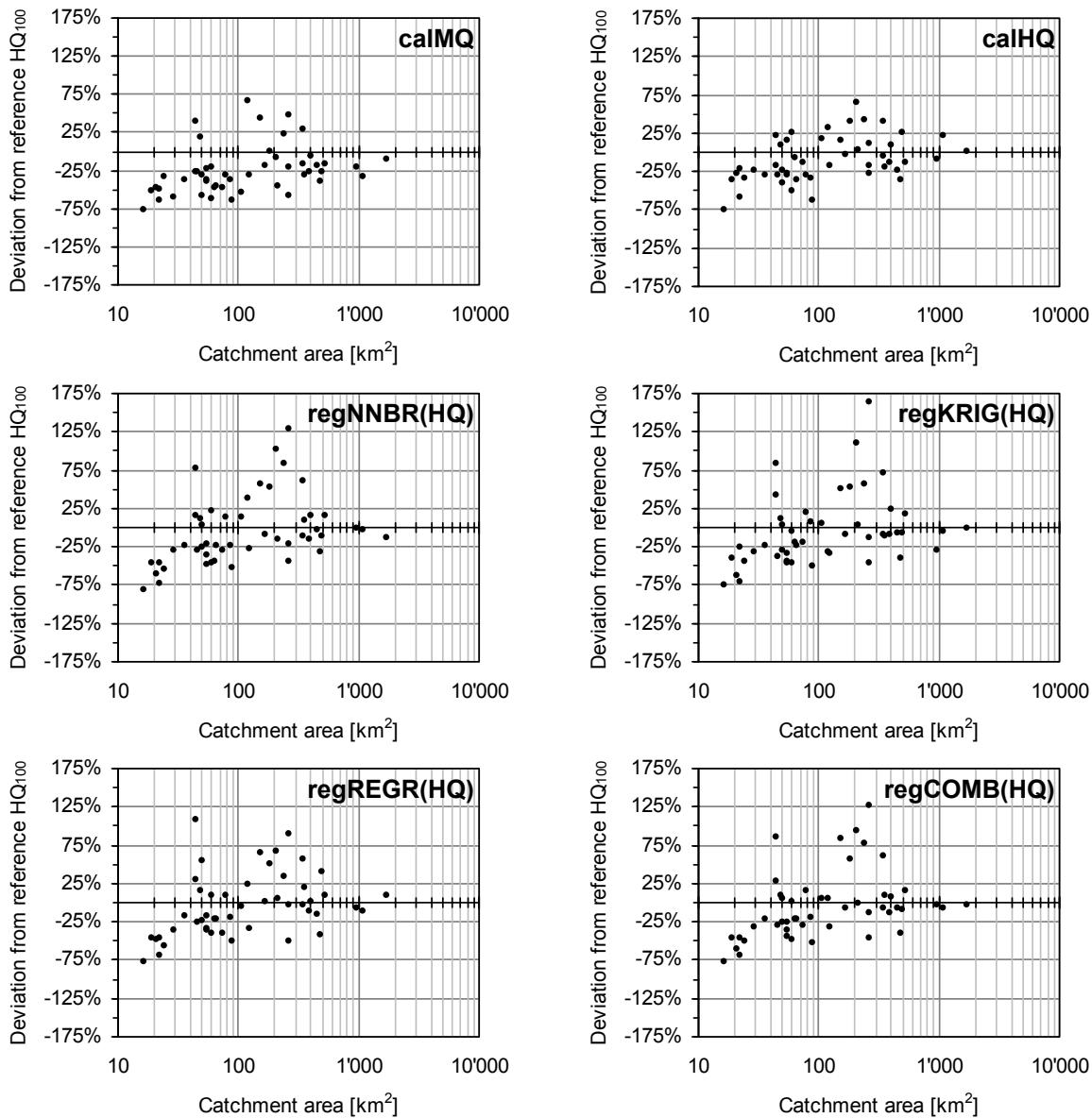


Figure 10.13: Estimation error for a HQ₁₀₀ from standard calibration (calMQ), flood calibration (calHQ) as well as from regionalisation with Nearest Neighbours (regNNBR(HQ)), Kriging (regKRIG(HQ)), Regression (regREGR(HQ)) and combined approach (regCOMB(HQ)) in relation to catchment area, derived from 49 priority A catchments.

Abbildung 10.13: Schätzfehler eines HQ₁₀₀ aus Mittelwasserkalibrierung (calMQ), Hochwasserkalibrierung (calHQ) sowie aus Regionalisierung mit Nearest Neighbours (regNNBR(HQ)), Kriging (regKRIG(HQ)), Regression (regREGR(HQ)) und kombiniertem Verfahren (regCOMB(HQ)) in Abhängigkeit von der Gebietsgrösse für 49 Einzugsgebiete der Priorität A.

Table 10.2: Average error for estimation of a HQ_{100} from standard calibration (calMQ), flood calibration (calHQ) as well as from regionalisation with Nearest Neighbours (regNNBR), Kriging (regKRIG), Regression (regREGR) and combined approach (regCOMB(HQ)) in relation to catchment scale range.

Tabelle 10.2: Mittlerer Schätzfehler für ein HQ_{100} aus Mittelwasserkalibrierung (calMQ), Hochwasserkalibrierung (calHQ) sowie aus Regionalisierungen mit Nearest Neighbours (regNNBR), Kriging (regKRIG), Regression (regREGR) und kombiniertem Verfahren (regCOMB(HQ)) in Abhängigkeit vom Skalenbereich.

Catchment size	calMQ	Average deviation from reference HQ_{100}				
		calHQ	regNNBR (HQ)	regKRIG (HQ)	regREGR (HQ)	regCOMB (HQ)
small ($<25 \text{ km}^2$)	-52.7%	-41.5%	-59.2%	-52.1%	-55.9%	-57.4%
medium ($25\text{--}750 \text{ km}^2$)	-20.1%	-5.6%	3.5%	3.2%	4.5%	3.6%
large ($>750 \text{ km}^2$)	-20.8%	5.6%	-4.9%	-11.6%	-1.7%	-4.1%

Bei den angegebenen Skalenbereichen und zugehörigen Mittelwerten ist zu beachten, dass diese aus dem zur Verfügung stehenden Datensatz von 49 Einzugsgebieten mit langen und zuverlässigen Messreihen (Priorität A) abgeleitet sind; Grundlage sind demnach 6 "kleine", 40 "mittelgrosse" und 3 "grosse" Gebiete, wobei der Bereich zwischen 500 und 1'000 km^2 ungenügend abgedeckt ist. Die Skalenangaben sind folglich als Orientierungshilfe und nicht als strikte Limiten aufzufassen.

Einfluss des Schätzverfahrens

Wie schon in Kapitel 4.2.3 angesprochen wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit immer eine einheitliche Extrapolationsmethodik mit derselben Verteilungsfunktion (erste Extremalverteilung) und derselben Parameterschätzmethode (wahrscheinlichkeitsgewichtete Momente) gewählt (E1-WGM). Es wurde vermutet, dass die nach DVWK (1999) empfohlene Auswahl der drei bestangepassten Extrapolationsmethoden zu unerwünschten Abweichungen im Vergleich verschiedener Datenreihen aus Beobachtung, Kalibrierung und Regionalisierung führen würde. Dies kann hier nun anhand der konkreten Daten untersucht werden.

Table 10.3: The five most frequently occurring distributions and parameter estimation methods (n: frequency) for extrapolation of observation (OBS), flood calibration (calHQ) and combined regionalisation (regCOMB(HQ)) when applying the DVWK (1999) procedure. Based upon data from 49 priority A catchments.

Tabelle 10.3: Die fünf am häufigsten auftretenden Verteilungen und Parameterschätzverfahren (n: Häufigkeit) für die Extrapolation von Beobachtung (OBS), Hochwasserkalibrierung (calHQ) und kombinierter Regionalisierung (regCOMB(HQ)) bei Anwendung des Verfahrens nach DVWK (1999). Datengrundlage: 49 Einzugsgebiete der Priorität A.

OBS	n	calHQ	n	regCOMB(HQ)	n
1. ME-MLM	23	1. WB3-WGM	27	1. WB3-WGM	28
2. AE-WGM	20	2. P3-WGM	21	2. AE-WGM	16
3. WB3-WGM	17	3. AE-WGM.....	16	2. ME-MLM.....	16
4. AE-MLM	11	4. LN3-WGM.....	14	4. P3-WGM	15
4. LN3-WGM	11	5. WB3-MM.....	12	5. WB3-MLM	11

Probability distribution	Parameter estimation method
E1 Extremal type 1	MM..... Moments
AE Generalised extremal	MLM.... Maximum likelihood
ME Mixed extremal	WGM... Probability weighted moments
LN3 Log-normal	
P3 Pearson type 3	
LP3 Log-Pearson type 3	
WB3 Weibull	

Probability distribution	Parameter estimation method
E1 Extremal type 1	MM..... Moments
AE Generalised extremal	MLM.... Maximum likelihood
ME Mixed extremal	WGM... Probability weighted moments
LN3 Log-normal	
P3 Pearson type 3	
LP3 Log-Pearson type 3	
WB3 Weibull	

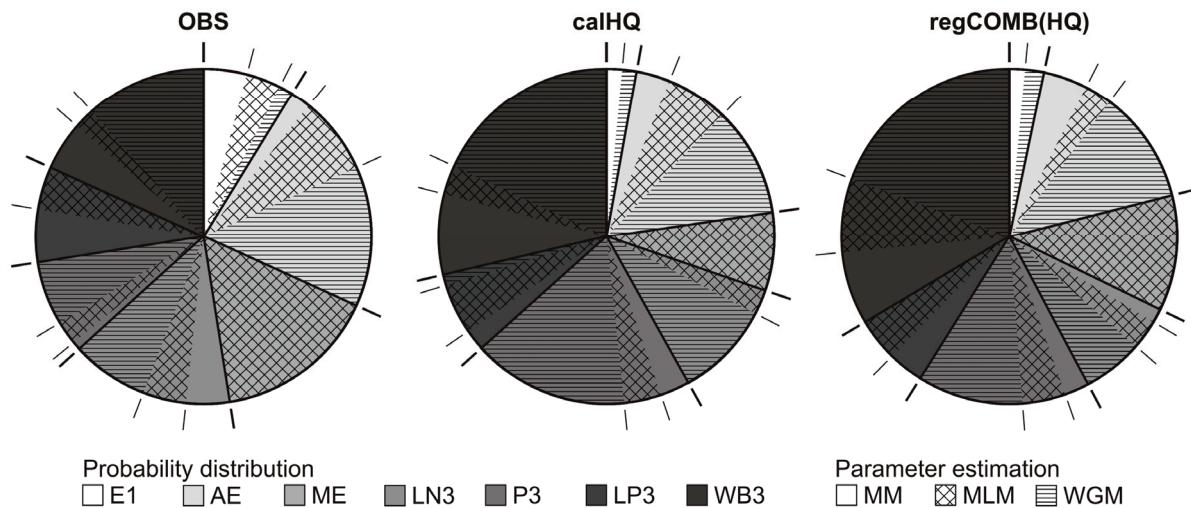


Figure 10.14: Frequency of distributions and parameter estimation methods for extrapolation of observation (OBS), flood calibration (calHQ) and combined regionalisation (regCOMB(HQ)) when applying the DVWK (1999) procedure. Based upon data from 49 priority A catchments. Abbreviations see **Table 10.3**.

Abbildung 10.14: Verwendungshäufigkeit der Verteilungen und Parameterschätzverfahren für die Extrapolation von Beobachtung (OBS), Hochwasserkalibrierung (calHQ) und kombinierter Regionalisierung (regCOMB(HQ)) bei Anwendung des Verfahrens nach DVWK (1999). Datengrundlage: 49 Einzugsgebiete der Priorität A. Abkürzungen siehe Tabelle 10.3.

Aus **Tabelle 10.3** und **Abbildung 10.14** ist ersichtlich, wie häufig die verschiedenen Verteilungsfunktionen und Parameterschätzverfahren zur Anwendung kommen, wenn die 49 Gebiete der Priorität A gemäss aktuellem DVWK-Verfahren extremwertstatistisch ausgewertet werden. Es zeigt sich, dass bei den verschiedenen Datenreihen (OBS, calHQ, regCOMB(HQ)) zwar häufig ähnliche Kombinationen von Verteilungen und Schätzungen vorgeschlagen werden, dass die Reihenfolge aber jeweils nicht dieselbe ist. Dies lässt Unterschiede in den entsprechenden Extrapolationsresultaten vermuten.

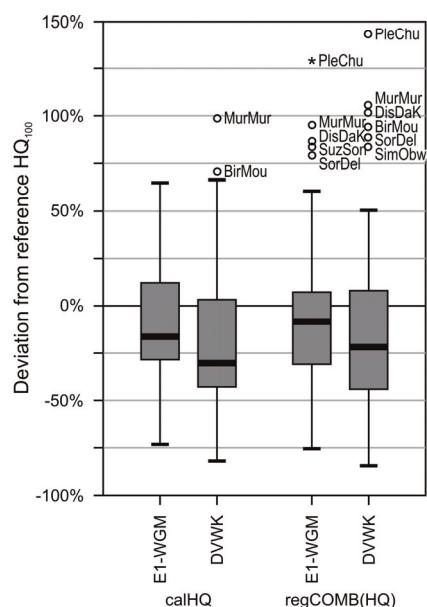


Figure 10.15: Estimation errors in a HQ₁₀₀ extrapolated from flood-calibrated (calHQ) and regionalised (regCOMB(HQ)) simulation, using on the one hand uniform distribution and parameter estimation for all catchments (E1-WGM), on the other hand the median value from the three procedures proposed by DVWK (1999) for each individual catchment.

Abbildung 10.15: Schätzfehler bei einem aus hochwasserkalibrierter (calHQ) und regionalisierter (regCOMB(HQ)) Simulation extrapolierten HQ₁₀₀, einerseits unter Verwendung von einheitlicher Verteilung und Parameterschätzung (E1-WGM), andererseits mit dem medianen Wert der drei jeweils nach DVWK (1999) vorgeschlagenen Verfahren.

Abbildung 10.15 zeigt nun die Extrapolationsresultate für ein HQ₁₀₀ mit der in dieser Arbeit konsequent verwendeten einheitlichen Methodik E1-WGM für die 49 Einzugsgebiete mit langen und zuverlässigen Datenreihen (vgl. **Abbildung 10.8**) und stellt diesen die Resultate der drei bestangepassten Extrapolationsmethoden gemäss DVWK (1999) gegenüber. Um beim DVWK-Verfahren einen einzigen Vergleichswert zur Verfügung zu haben, wurde jeweils die mediane Schätzung für ein HQ₁₀₀ ver-

wendet, also der mittlere der drei vorgeschlagenen Schätzwerte. Als Referenz dient wiederum das HQ_{100} , welches aus den stündlich beobachteten Daten mit dem jeweiligen Verfahren extrapoliert wurde. Sowohl für die auf Hochwasser kalibrierte (calHQ) wie auch für die mit dem kombinierten Verfahren regionalisierte (regCOMB(HQ)) Simulation ergeben sich deutlich grössere Abweichungen von der Referenz, wenn anstelle des einheitlichen E1-WGM der Median aus dem DVWK-Verfahren verwendet wird. Zu dieser Problematik muss angemerkt werden, dass die Reihen der jährlichen Spitzenabflüsse aus Beobachtung und Simulation in der Mehrzahl der Fälle nicht aus derselben Grundgesamtheit stammen, wie FLACH (2007) anhand eines Kolmogorov-Smirnov-Tests (siehe BAHRENBERG ET AL., 1990) zeigen konnte. Damit ist auch erklärbar, wieso die optimale Extrapolation der Spitzenwertreihen nicht immer mit demselben Verfahren erfolgt. Auch wenn das Vorgehen nach DVWK (1999) das gegenwärtig empfohlene ist – die Resultate sprechen hier deutlich für die Verwendung eines einzigen, einheitlichen Extrapolationsverfahrens. Die Anwendung der weitverbreiteten ersten Extremalverteilung mit Parameterschätzung nach den wahrscheinlichkeitsgewichteten Momenten hat sich dabei bewährt.

Variation des Kombinierungsverfahrens für die Regionalisierung

Abschliessend zu den Fehlerbetrachtungen bezüglich Hochwasserabschätzung soll erörtert werden, ob sich die Schätzung aus der als bestes Verfahren identifizierten kombinierten Regionalisierung (regCOMB) noch verbessern lässt, indem die Methodik leicht variiert wird. Dazu wird der Datensatz regCOMB_{peak}(HQ) eingeführt, welcher den Median der aus regNNBR(HQ), regKRIG(HQ) und regREGR(HQ) extrapolierten HQ_{100} darstellt. Anstatt also wie bei regCOMB(HQ) eine kombinierte Ganglinie zu erstellen und deren Jahresspitzen zu extrapolieren, werden bei regCOMB_{peak}(HQ) die Ganglinien der drei elementaren Regionalisierungen regNNBR, regKRIG und regREGR separat betrachtet. Die aus den jeweiligen Jahresspitzen extrapolierten HQ_{100} werden dann durch Bildung des Medians kombiniert. Die Extremwertschätzung erfolgt wiederum nach dem einheitlichen Verfahren E1-WGM.

Abbildung 10.16 zeigt, dass zwischen den beiden Varianten kaum Unterschiede bestehen; im Bereich kleiner Schätzfehler schneidet regCOMB(HQ) geringfügig besser ab (weisser Diagrammbereich) bei grossen Überschätzungen weist regCOMB_{peak}(HQ) vereinzelt geringere Fehler auf (grauer Diagrammbereich). In 25 von 49 Fällen ist der Fehler von regCOMB_{peak}(HQ) geringer als derjenige von regCOMB(HQ), in den restlichen 24 verhält es sich umgekehrt; keine der beiden Varianten scheint also besser geeignet. Nun ist für die Berechnung von regCOMB(HQ) zwar ein minimal grösserer Aufwand nötig (Bildung einer medianen Ganglinie und extremwertstatistische Auswertung derselben), der methodische Vorteil ist aber unübersehbar: Bei identischer Schätzgüte resultiert eine komplette Ganglinie und nicht bloss eine Spitzenwertschätzung. Im Hinblick auf weitere Auswertungen (z. B. Volumina des Direktabflusses, vgl. Kapitel 12) ist dies von grossem Nutzen und rechtfertigt die geringfügig kompliziertere Methodik.

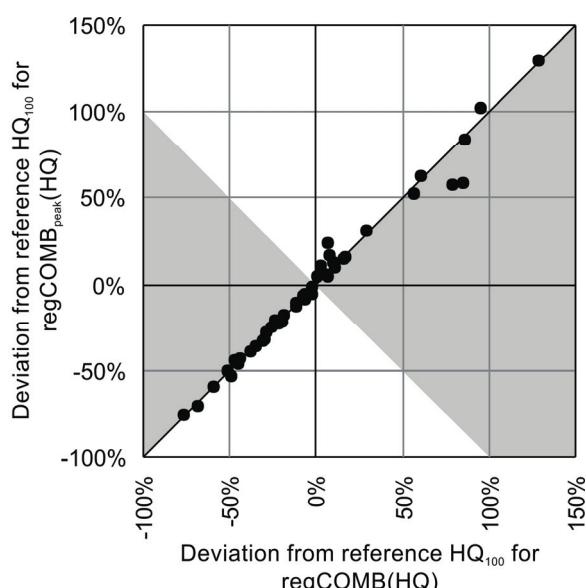


Figure 10.16: Comparison of HQ_{100} estimates from regCOMB(HQ) (combined regionalisation approach) and from regCOMB_{peak}(HQ) (median of HQ_{100} estimates from regionalisations regNNBR(HQ), regKRIG(HQ) and regREGR(HQ)).

Abbildung 10.16: Vergleich der Schätzresultate für ein HQ_{100} aus regCOMB(HQ) (kombinierte Regionalisierung) und aus regCOMB_{peak}(HQ) (Median der HQ_{100} -Schätzwerte aus den Regionalisierungen regNNBR(HQ), regKRIG(HQ) und regREGR(HQ)).

Performance:

- regCOMB(HQ) better than regCOMB_{peak}(HQ)
- regCOMB_{peak}(HQ) better than regCOMB(HQ)

10.2.3 Versuche zur Korrektur der Schätzfehler

Nachdem die Schätzfehler nun genauer untersucht wurden, soll im Folgenden versucht werden, eine Korrektur derselben zu erreichen. Auf Basis der erarbeiteten Daten bieten sich einerseits die Gebietsgrösse, andererseits die ermittelten räumlichen Fehlermuster als pragmatische Grundlagen für eine Korrektur an.

Bezüglich Gebietsgrösse als Korrekturfaktor zeigte **Abbildung 10.13** zwar ein generelles Muster mit Unterschätzungen in kleinen Gebieten (ca. $< 25 \text{ km}^2$) und guten Schätzungen in grossen Gebieten (ca. $> 750 \text{ km}^2$); im dazwischenliegenden Bereich der mittelgrossen Gebiete streuen die beobachteten Schätzfehler aber stark, auch wenn hier im Mittel ebenfalls gute Schätzungen resultieren. Wie aufgrund dieser uneinheitlichen Charakteristik zu befürchten war, konnte FLACH (2007) in seinen Untersuchungen denn auch keine geeignete Korrekturfunktion finden, welche auf der Gebietsgrösse basiert.

Als Alternative soll hier als zweites denkbares Verfahren geprüft werden, ob sich aus der räumlichen Verteilung der Schätzfehler eine Korrektur herleiten lässt. Grundlage dafür sind die in **Abbildung 10.10** dargestellten Fehlerkarten. Es werden die folgenden zwei Varianten untersucht:

- Korrekturvariante 1 (adj1):
Für ein ungemessenes Gebiet wird der interpolierte Fehler für ein HQ_{100} aus den entsprechenden Fehlerkarten herausgelesen und direkt als Korrekturfaktor verwendet.
- Korrekturvariante 2 (adj2):
Anstatt den Schätzwert direkt zu korrigieren, werden die in den Parametern der ersten Extremalverteilung (c und d) ermittelten Fehler räumlich interpoliert und dann entsprechend zur Korrektur der Verteilung verwendet. Aus dieser korrigierten Verteilung wird wiederum das HQ_{100} geschätzt.

Als Testdatensatz dienen für beide Ansätze die 49 Gebiete der Priorität A, für welche lange und zuverlässige Messreihen des Abflusses bereitstehen. Als räumliche Referenz werden die jeweiligen Gebietsschwerpunkte verwendet. Beide Verfahren wurden mit Hilfe des Jack-Knife-Prinzips (siehe Kapitel 8.7) getestet; die räumliche Verteilung der Schätzfehler in HQ_{100} resp. in c und d wurde also jeweils ohne das zu untersuchende Gebiet neu berechnet und dann wie oben beschrieben zur Korrektur eingesetzt.

In den Detailresultaten (**Abbildung 10.17**) ist ersichtlich, dass bei einigen Gebieten eine Verbesserung erreicht werden kann, bei anderen aber gleichzeitig eine Verschlechterung eintritt. Die zusammengefassten Ergebnisse (**Abbildung 10.18**) bestätigen diese Beobachtung und belegen, dass nur eine minime Verbesserung des medianen Schätzfehlers erreicht werden kann. Auf Kosten dieser geringfügigen Verbesserung nimmt die Spannweite der Abweichungen etwas zu. Weitere Korrekturversuche für die kombinierte Regionalisierung – beispielsweise durch Korrektur der zugrundeliegenden elementaren Regionalisierungen regNNBR, regKRIG und regREGR – brachten keine besseren Ergebnisse.

Aus diesen Analysen muss folgende Konsequenz gezogen werden: Die oben präsentierten Karten des Schätzfehlers (**Abbildung 10.10**) sollten nur als Orientierungshilfe verwendet werden, ein direktes Herauslesen von Korrekturfaktoren ist im Einzelfall nicht zulässig. Dies erstaunt auf den ersten Blick, da die räumlichen Muster der Fehler für verschiedene Regionalisierungsverfahren relativ ähnlich erscheinen und somit auf systematische – und damit eventuell korrigierbare – Abweichungen hinweisen. Denkbar ist, dass 49 Gebiete für einen Test mit dem Jack-Knife-Ansatz nicht ausreichen, da durch den Ausschluss eines Gebietes jeweils eine wichtige regionale Stützstelle entfällt, deren Informationsgehalt nicht durch die umliegenden Gebiete substituiert werden kann.

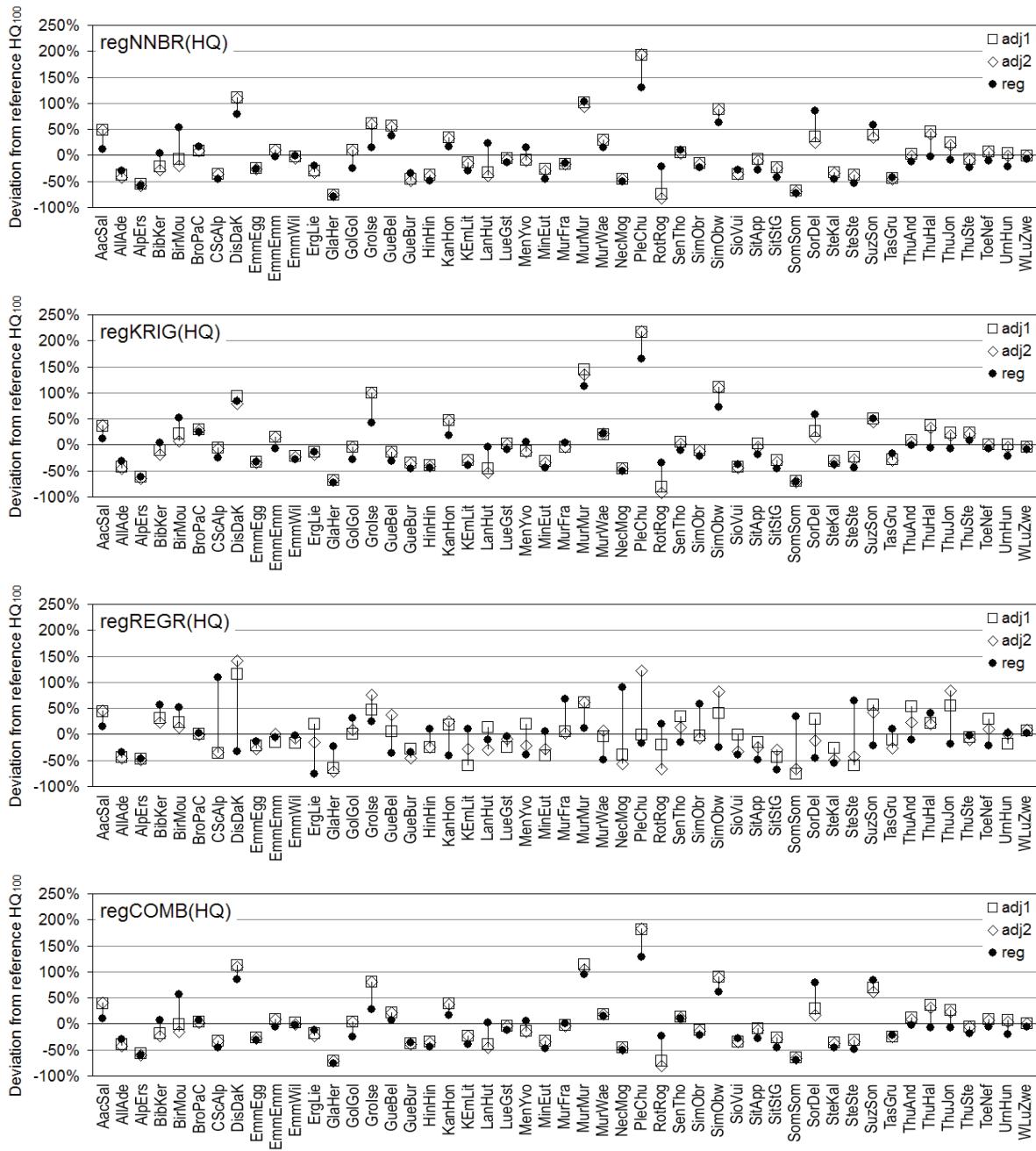


Figure 10.17: Detail results of error adjustment for a HQ₁₀₀ (adj1) as well as for the extreme value distribution parameters c and d (adj2) compared to unadjusted regionalisation (reg). Regionalisation approaches examined: Nearest Neighbours (regNNBR(HQ)), Kriging (regKRIG(HQ)), Regression (regREGR(HQ)) and combined approach (regCOMB(HQ)).

Abbildung 10.17: Detailresultate der Fehlerkorrektur für das HQ₁₀₀ (adj1) sowie für die Verteilungsparameter c und d (adj2) im Vergleich zur unkorrigierten Regionalisierung (reg). Untersuchte Regionalisierungsverfahren: Nearest Neighbours (regNNBR(HQ)), Kriging (regKRIG(HQ)), Regression (regREGR(HQ)) sowie kombiniertes Verfahren (regCOMB(HQ)).

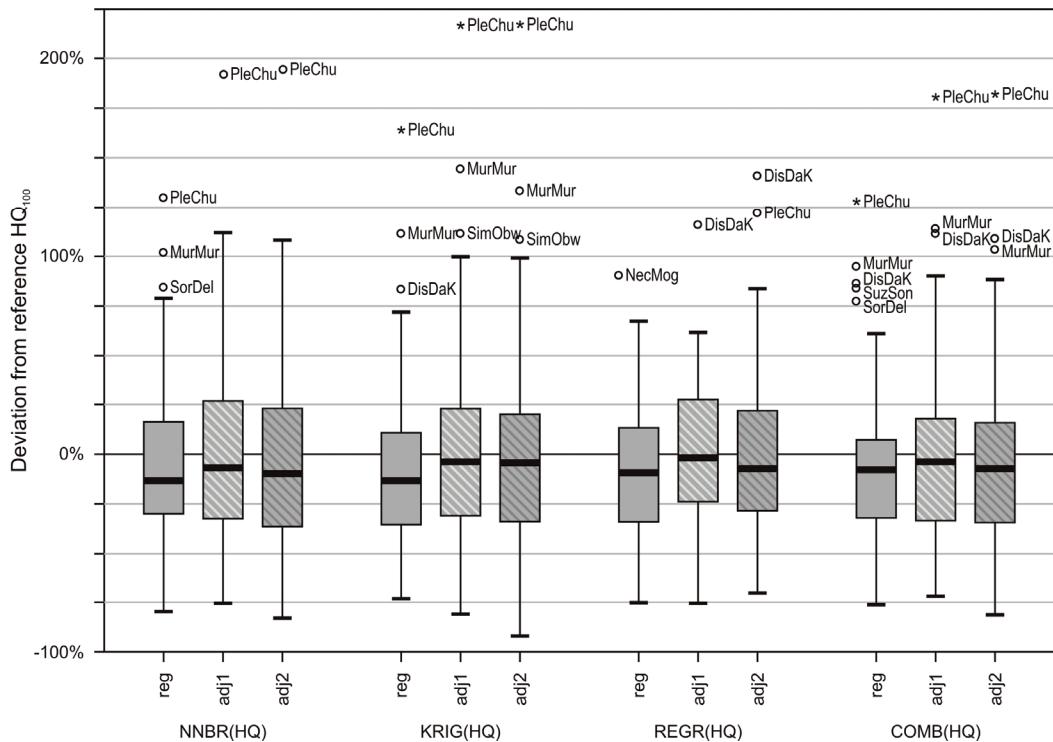


Figure 10.18: Summary results of error adjustment for HQ₁₀₀ (adj1) and for extreme value distribution parameters c and d (adj2), compared to unadjusted regionalisation (reg). Regionalisation approaches examined: Nearest Neighbours (NNBR(HQ)), Kriging (KRIG(HQ)), Regression (REGR(HQ)) as well as the combined approach (COMB(HQ)).

Abbildung 10.18: Zusammengefasste Resultate der Fehlerkorrektur für das HQ₁₀₀ (adj1) und für die Verteilungsparameter c und d (adj2) im Vergleich zur unkorrigierten Regionalisierung (reg). Untersuchte Regionalisierungsverfahren: Nearest Neighbours (NNBR(HQ)), Kriging (KRIG(HQ)), Regression (REGR(HQ)) sowie kombiniertes Verfahren (COMB(HQ)).

10.2.4 Indikatoren für den Schätzfehler

Wenn schon keine zuverlässige Korrektur der Schätzfehler für ein HQ₁₀₀ erreicht werden kann, sind dann wenigstens grobe Indikatoren für die Güte der Schätzung aufzufinden? Eine prüfenswerte Möglichkeit scheint, die Spannweite der aus den elementaren Regionalisierungen regNNBR(HQ), regKRIG(HQ) und regREGR(HQ) abgeleiteten Schätzresultate für ein HQ₁₀₀ zu untersuchen. Die Vermutung liegt nahe, dass das Schätzresultat der kombinierten Regionalisierung (regCOMB(HQ)) weniger zuverlässig ist, wenn Schätzwerte der elementaren Regionalisierungen stark voneinander abweichen. **Abbildung 10.19** zeigt aber, dass dem nicht so ist. Während mit zunehmender Spannweite der Schätzungen auch ein zunehmender Fehler zu erwarten wäre, ist ein solcher Zusammenhang in den Daten kaum zu erkennen; der zugehörige Korrelationskoeffizient r_{xy} ist mit -0.02 sehr gering.

Es muss angenommen werden, dass die aus den elementaren Regionalisierungen extrapolierten HQ₁₀₀ eine zu selektive Größe sind, als dass daraus Rückschlüsse auf die Plausibilität der Simulation und deren Güte im Bereich von Hochwasserabflüssen zulässig wären. Mehr Informationen könnten unter Umständen dadurch gewonnen werden, in dem die Regionalisierung zusätzlich auf Basis der mit verschiedenen Kalibrierungsperioden erstellten Parametersätze durchgeführt wird (z. B. 1983–1987). In Kapitel 6.5.2 wurden diesbezüglich bereits Resultate aufgezeigt.

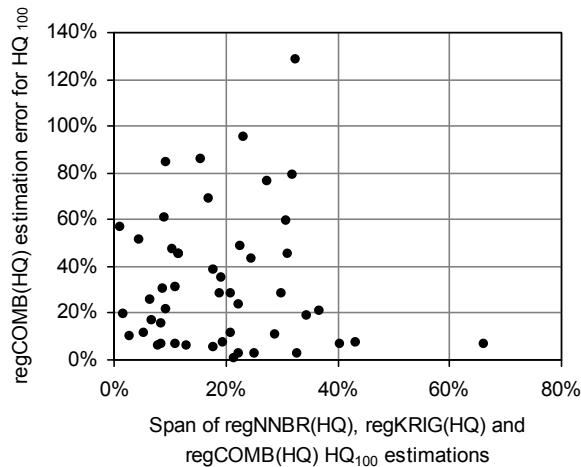


Figure 10.19: Error for a HQ_{100} estimation from combined regionalisation (regCOMB(HQ)) versus span of HQ_{100} estimations from regionalisations regNNBR(HQ), regKRIG(HQ) and regREGR(HQ).

Abbildung 10.19: Fehler für ein aus der kombinierten Regionalisierung (regCOMB(HQ)) geschätztes HQ_{100} versus Spannbreite der Resultate für ein aus den Regionalisierungen regNNBR(HQ), regKRIG(HQ) und regREGR(HQ) geschätztes HQ_{100} .

10.3 Wiedergabe der Parameter

Als eine stärker auf das Modellsystem ausgerichtete Prüfung der Regionalisierung soll im Folgenden untersucht werden, wie gut die einzelnen Modellparameter durch die verschiedenen Regionalisierungsansätze wiedergegeben werden. Dabei gilt es allerdings anzumerken, dass es nicht das Ziel dieser Regionalisierung ist, die kalibrierten Modellparameter möglichst genau wiederzugeben. Vielmehr sollen mit den regionalisierten Parametersätzen ansprechende Simulationsresultate erreicht werden, welche dann die Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse erlauben; anhand der Standardgütemasse und der Extrapolationsresultate konnte dazu bereits in den vorhergehenden Abschnitten 10.1 und 10.2 ein positives Fazit gezogen werden.

Abbildung 10.20 stellt nun die kalibrierten Parameterwerte den regionalisierten gegenüber, während **Tabelle 10.4** den mittleren Korrelationskoeffizienten von 12 PREVAH-Parametern pro Regionalisierungsmethode aufführt. Die zur Anwendung gekommenen Kombinationen von Verfahren über die Medianbildung (sowohl für Nearest Neighbours wie auch kombinierte Regionalisierung) können hier nicht bewertet werden, da für sie kein Parametersatz existiert; es wird ja dabei nicht der Median aus den Modellparametern gebildet, sondern der Median aus den entsprechenden simulierten Ganglinien (vgl. Kapitel 8.6).

Erwartungsgemäß zeigt der Regressionsansatz die höchste mittlere Korrelation zwischen kalibrierten und regionalisierten Parameterwerten, da diese Regionalisierungsmethode direkt und explizit darauf abzielt, die Modellparameter möglichst genau wiederzugeben – hier mit Hilfe von ausgewählten Gebietsattributen. Am zweithöchsten, wenn auch deutlich tiefer, fällt die mittlere Korrelation für die Kriging-Methode aus, mit welcher ebenfalls eine Wiedergabe der Modellparameter angestrebt wird, wobei die Koordinaten als einzige Gebietsattribute dienen. Am geringsten fällt die mittlere Korrelation jeweils für die einzelnen Nearest Neighbours aus. Auffällig ist dabei, dass der am nächsten gelegene (ähnlichste) Nachbar eine deutlich höhere mittlere Korrelation aufweist als die weiteren vier Nachbarn – was insofern überrascht, als dass in Kapitel 9.1.1 gezeigt wurde, dass der nächste Nachbar bezüglich Modelleffizienz nicht unbedingt die besten Resultate liefern muss (vgl. **Abbildung 9.3**, S. 166). Dies kann als Beleg dafür interpretiert werden, dass eine bessere Parameterwiedergabe nicht zwingend mit besseren Modellresultaten einhergehen muss.

Insgesamt kann aus den guten Simulationsresultaten für die Regionalisierung auf plausible Modellparametersätze geschlossen werden, auch wenn die kalibrierten Modellparameter in der Regionalisierung keineswegs exakt reproduziert werden. Die Wiedergabe der einzelnen Parameter ist insofern nicht relevant, als dass eine grosse Zahl funktioneller Parametersätze existiert und eine physikalisch völlig plausible Parameterwahl so oder so kaum zu erreichen ist – weder in der Kalibrierung noch in der Regionalisierung. Solange bei der Übertragung in ungemesse Gebiete eine geeignete Parameterkombination innerhalb des vorgegebenen Wertebereichs gefunden wird, ist den Parameterwerten im Detail keine vorrangige Bedeutung beizumessen.

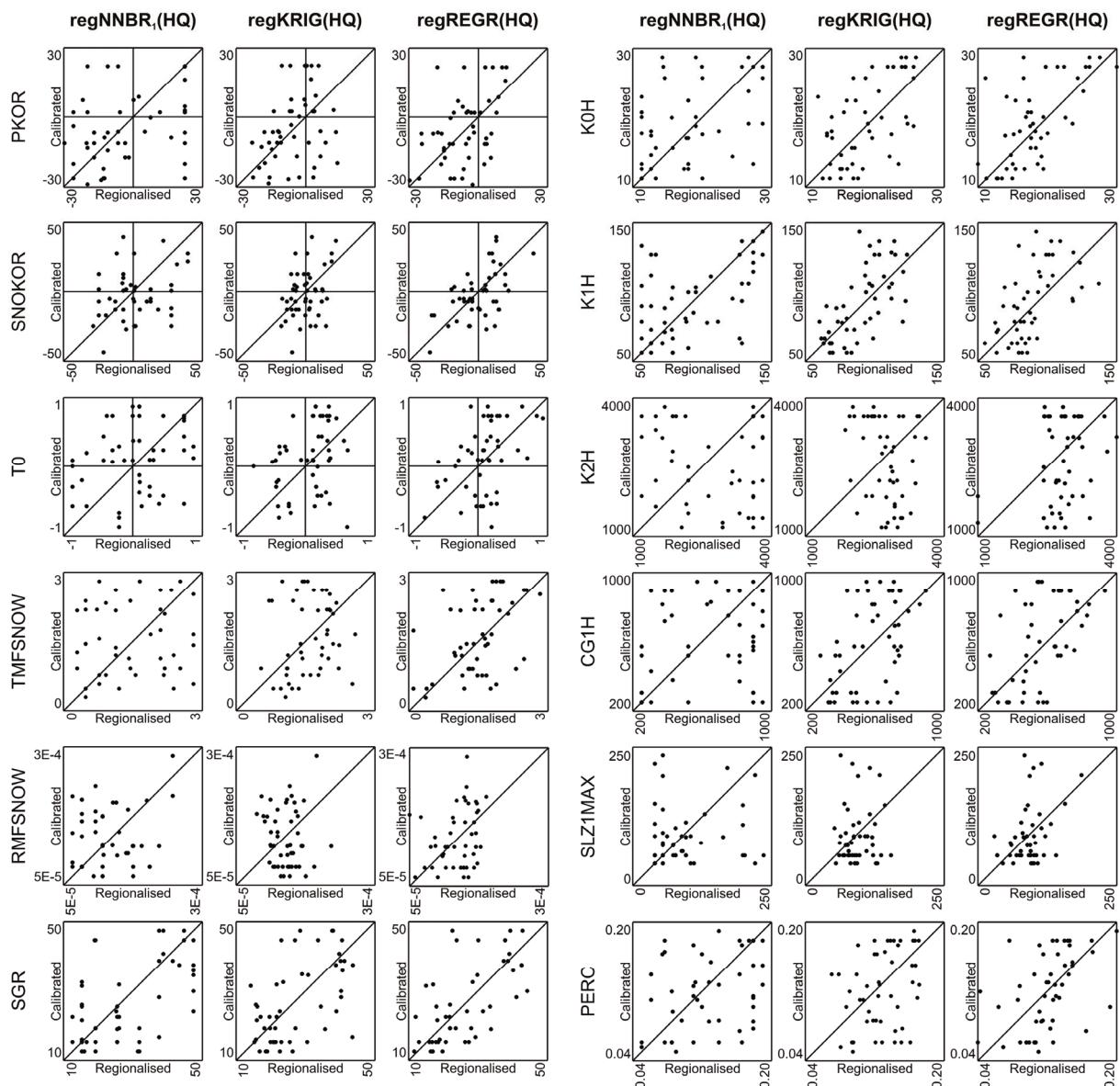


Figure 10.20: Flood calibrated model parameter values for calibration (ordinate) vs. corresponding regionalisation by means of various approaches (abscissa): First Nearest Neighbour (regNNBR₁(HQ)), Kriging (regKRIG(HQ)) and Regression (regREGR(HQ)).

Abbildung 10.20: Auf Hochwasser kalibrierte Modellparameter (Ordinate) und entsprechende nach verschiedenen Ansätzen regionalisierte Werte (Abszisse): Erster Nearest Neighbour (regNNBR₁(HQ)), Kriging (regKRIG(HQ)) und Regression (regREGR(HQ)).

Regionalisation	mean (r_{xy})	mean (sig _v)
regNNBR ₁ (HQ)	0.26	81%
regNNBR ₂ (HQ)	0.15	66%
regNNBR ₃ (HQ)	0.15	75%
regNNBR ₄ (HQ)	0.12	60%
regNNBR ₅ (HQ)	0.17	54%
regKRIG(HQ)	0.29	85%
regREGR(HQ)	0.47	99%

Table 10.4: Correlation coefficient (r_{xy}) and significance (sig_v) for correlation between flood calibrated and respective regionalised parameter set, each as average from 12 free PREVAH model parameters; regNNBR_n(HQ): nth Nearest Neighbour, regKRIG(HQ): Kriging, regREGR(HQ): Regression.

Tabelle 10.4: Korrelationskoeffizient (r_{xy}) und Signifikanz (sig_v) für die Korrelation zwischen den hochwasserkalibrierten und den entsprechenden regionalisierten Modellparametern, jeweils als Durchschnitt für 12 freie PREVAH-Modellparameter; regNNBR_n(HQ): n-ter Nearest Neighbour, regKRIG(HQ): Kriging, regREGR(HQ): Regression.

10.4 Eignung für Mittelwasserbedingungen

Die Resultate der Regionalisierung für die Mittelwasserparameter sind in **Abbildung 10.21** dargestellt. Mit medianen Nash-Sutcliffe-Effizienzen (*NSE*) von 0.70 (Nearest Neighbours, regNNBR), 0.69 (Kriging, regKRIG(MQ)), 0.71 (Regression, regREGR(MQ)) und 0.72 (kombiniertes Verfahren, regCOMB(MQ)) sind die Resultate nur geringfügig schlechter als diejenigen des auf Mittelwasser kalibrierten Parametersatzes (calMQ, 0.73). Im Vergleich zur Regionalisierung des Hochwasserparametersatzes (vgl. **Abbildung 10.2**) zeigt sich, dass die Quartilsbereiche von *NSE* hier etwas enger ausfallen und die Regionalisierungsresultate insgesamt geringfügig besser sind. Zudem sind kaum Ausreisser und Extremwerte festzustellen, wenngleich der Grosstalbach bei Isenthal (Grolse) auch hier konsequent als Extremwert klassiert wird. Die Spannbreite der Regionalisierungsresultate ist beim kombinierten Verfahren (regCOMB(MQ)) und beim Regressionsverfahren (regREGR(MQ)) am geringsten, wobei das Kombinationsverfahren einen geringfügig besseren Medianwert erreicht.

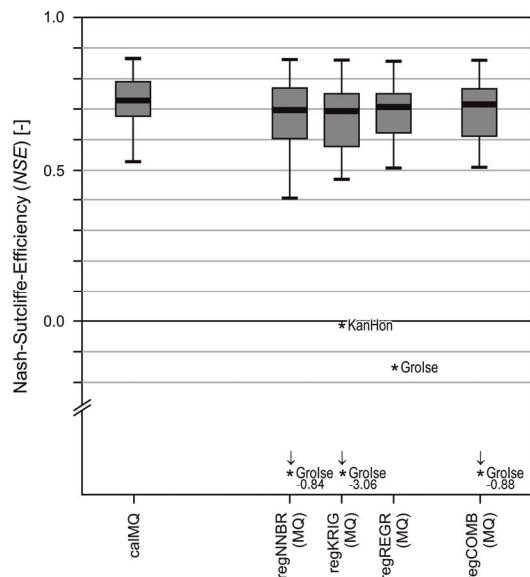


Figure 10.21: Nash-Sutcliffe-Efficiencies for standard calibration (calMQ) and regionalisation of standard parameter set with Nearest Neighbours (regNNBR(MQ)), Kriging (regKRIG(MQ)), Regression (regREGR(MQ)) and with combined approach (regCOMB(MQ)). Simulation period 1984–2003, 49 priority A catchments.

Abbildung 10.21: Nash-Sutcliffe-Effizienzen der Mittelwasserkalibrierung (calMQ) sowie des mit Nearest Neighbours (regNNBR(MQ)), Kriging (regKRIG(MQ)), Regression (regREGR(MQ)) und kombiniertem Verfahren (regCOMB(MQ)) regionalisierten Mittelwasserparametersatzes. Simulationszeitraum 1984–2003, 49 Einzugsgebiete der Priorität A.

Bei den volumetrischen Abweichungen (**Abbildung 10.22**) muss differenziert werden: Betrachtet man positive und negative Volumenabweichungen getrennt (links), so sind die medianen Abweichungen der Regionalisierung mit Werten zwischen -33 mm a^{-1} (regNNBR) und $+4 \text{ mm a}^{-1}$ (regREGR) erfreulich tief, wobei aber die Variation der Resultate (Quartilsbereich, Spannweite, Ausreisser, Extremwerte) im Vergleich zur Kalibrierung höher ist. Untersucht man hingegen die Absolutwerte der Abweichungen (rechts), liegen die Werte mit 69 mm a^{-1} (regKRIG) bis 97 mm a^{-1} (regREGR) merklich höher und steigen fast auf jenes Niveau, welches bei den hochwasserkalibrierten Parametersätzen festgestellt wurde (**Abbildung 10.4**). Zusammengefasst bedeutet dies, dass sich bei der Mittelwasseranwendung – im Gegensatz zum Hochwasserfall – die Abweichungen bei der Betrachtung mehrerer Gebiete gegenseitig ausgleichen.

Aus diesen Resultaten kann geschlossen werden, dass die ursprünglich für Hochwasserparametersätze erstellte Regionalisierung auch im Mittelwasserfall gute Resultate liefert. Im Vergleich der Nash-Sutcliffe-Effizienzen von Kalibrierung und Regionalisierung sind nur geringfügige Einbussen festzustellen. In Anbetracht dessen, dass eine Regionalisierung insgesamt kein einfaches Unterfangen ist, können die erreichten Effizienzen im Vergleich mit der Kalibrierung als sehr gut bis hervorragend bezeichnet werden. Bezüglich Wasserbilanz – welche bei der Mittelwasseranwendung durchaus von Interesse sein können – muss hingegen differenziert werden: Für die Anwendung in Studien mit mehreren Einzugsgebieten kann das bestehende Verfahren ohne Änderungen übernommen werden, da sich allfällige Abweichungen tendenziell ausgleichen. Ebenfalls nicht mit grösseren Einschränkungen zu rechnen ist bei Untersuchungen, in welchen die exakte Jahresabflussmenge keine Rolle spielt, beispielsweise bei Regimeuntersuchungen oder Untersuchungen zum aktuellen Gebietszustand (z. B. Bodenfeuchte). Wird hingegen der langjährige Wasserhaushalt eines Einzelgebietes betrachtet, muss zuvor allenfalls untersucht werden, ob die bestehende Genauigkeit bezüglich Wasserbilanz für die betreffende Fragestellung ausreicht. Gegebenenfalls könnten hier noch Verbesserungen erzielt werden, indem die in Kapitel 8 gefundenen optimalen Verfahren zur Attributauswahl beim Regressionsansatz und insbesondere beim Nearest-Neighbour-Ansatz nochmals durchgeführt werden, wobei dann anstatt des auf Hochwasser kalibrierten Parametersatzes der auf Mittelwasser kalibrierte eingesetzt

werden sollte. Beim Kriging-Ansatz ist keine Anpassung auf Mittelwasser erforderlich, da er wie schon erläutert keine Optionen aufweist, welche sich spezifisch auf den zu regionalisierenden Parametersatz beziehen.

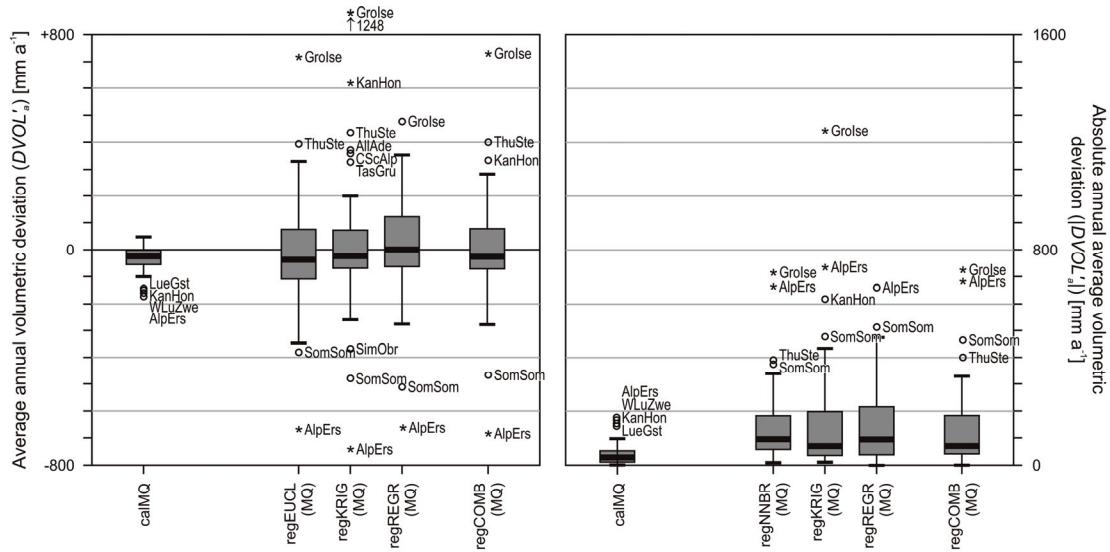


Figure 10.22: Average annual volumetric deviations for parameter sets derived from standard calibration (calMQ) and the regionalisation methods Nearest Neighbours (regNNBR(MQ)), Kriging (regKRIG(MQ)), Regression (regREGR(MQ)) and combined approach (regCOMB(MQ)), all applied to standard calibration parameter sets. Left graph is based upon actual deviations, right graph upon absolute values of deviations.

Abbildung 10.22: Mittlere jährliche Volumenabweichungen der Parametersätze aus Mittelwasserkalibrierung (cal MQ) sowie der auf Mittelwasser angewandten Regionalisierungsmethoden Nearest Neighbours (regNNBR(MQ)), Kriging (regKRIG(MQ)), Regression (regREGR(MQ)) und Kombinationsverfahren (regCOMB(MQ)). Grundlage sind links die tatsächlichen Abweichungen, rechts die Absolutwerte der Abweichungen.

10.5 Zusammenfassung

Die in den Kapiteln 8 und 9 entwickelten Regionalisierungsmethoden wurden erfolgreich getestet. Damit lässt sich eine prozessorientierte Langzeitsimulation des Abflusses auch in ungemessenen Gebieten durchführen und zeigt dort gute Schätzresultate für seltene Hochwasser. Am besten schnitt die kombinierte Regionalisierung ab, welche ihrerseits auf den Regionalisierungen mit Nearest Neighbours, Kriging und Regression basiert. Bezogen auf 49 repräsentative Testgebiete und die Vergleichsgrösse HQ₁₀₀ ist bei der kombinierten Regionalisierung eine mediane Unterschätzung von lediglich 7.2% zu verzeichnen; in 51% der Fälle trifft die Schätzung das statistische 90%-Konfidenzintervall der Referenz. Die Spannweite der Abweichungen vom Referenzwert beträgt -76% bis +61%, mit einigen wenigen Ausreissern gegen oben und einem Extremwert von +129%. Damit können die etablierten empirischen Schätzverfahren um einen prozessorientierten Ansatz erweitert werden, welcher substanziale zusätzliche Informationen einbringt. Zudem steht eine komplette simulierte Ganglinie des betrachteten Gebietes zur Verfügung, welche auf weitere Aspekte hin untersucht werden kann (vgl. Abschnitt 1.1.2), und die Prozessbasierung erlaubt zusätzliche Anwendungsmöglichkeiten (siehe Kapitel 13). Während die etablierten Verfahren ähnlich geringe mediane Fehler zeigen, ist insbesondere die vergleichsweise geringe Spannweite des neuen Verfahrens sehr vorteilhaft; sie weist deutlich auf eine grössere Robustheit der Schätzungen hin. Eine noch stärker auf die Anwendungspraxis bezogene Einschätzung der Resultate wird im nachfolgenden Kapitel 11 anhand eines Fallbeispiels vorgenommen werden. Als weiterer Vorteil steht mit dem neuen Verfahren zudem nicht bloss eine Spitzenwertschätzung zur Verfügung, sondern eine komplette mehrjährige Ganglinie; wie sich dies beispielsweise zur Abschätzung seltener Direktabflussvolumina ausnutzen lässt, wird in Kapitel 12 untersucht.

Nicht erfolgreich waren Versuche, die Schätzfehler des neuen Verfahrens über die Gebietsfläche oder räumliche über Fehlercharakteristiken weiter zu reduzieren. Hingegen konnte gezeigt werden, dass sich alle entwickelten Regionalisierungen problemlos auch auf die mittelwasserkalibrierten Parametersätze anwenden lassen.

Kapitel 11

Fallbeispiel: Ablauf einer Schätzung

A step-by-step case study shows how the present modelling system is used for flood estimation in an ungauged catchment. Furthermore, possibilities are demonstrated for assessing the plausibility of the flood estimations achieved. It becomes evident that despite the effort necessary for its application, the new estimation technique could be made available for a wider circle of users and provides a significant extension of the flood estimation procedures available today.

Anhand eines Fallbeispiels wird Schritt für Schritt demonstriert, wie das entwickelte Modellsystem zur Hochwasserabschätzung in einem ungemesenen Gebiet einzusetzen ist. Es wird zudem aufgezeigt, wie die Schätzresultate eingeordnet und auf ihre Plausibilität hin überprüft werden können. Es zeichnet sich ab, dass das neue Schätzverfahren trotz einigem Aufwand einem breiteren Anwenderkreis zugänglich gemacht werden kann und eine bedeutende Erweiterung der bisherigen Verfahren darstellt.

11.1 Einführung

Mit dem in dieser Arbeit aufgebauten Modellsystem können nun also Hochwasserabschätzungen für Einzugsgebiete vorgenommen werden, für welche keine Abflussmessungen vorliegen. Im Sinne einer Zusammenfassung und praktischen Anleitung werden die dazu notwendigen Schritte anhand eines Fallbeispiels rekapituliert und zusammengefasst. **Abbildung 11.1** zeigt das Vorgehen bei einer Schätzung; dieses Schema wird im Folgenden Schritt für Schritt vorgestellt. Die wissenschaftlichen Grundlagen dazu sind in den vorangehenden Kapiteln zu finden, ausführliche Informationen zu Modellsystem und Preprocessing können VIVIROLI ET AL. (2007) entnommen werden; auf die jeweils relevanten Quellen ist wird **Abbildung 11.1** hingewiesen.

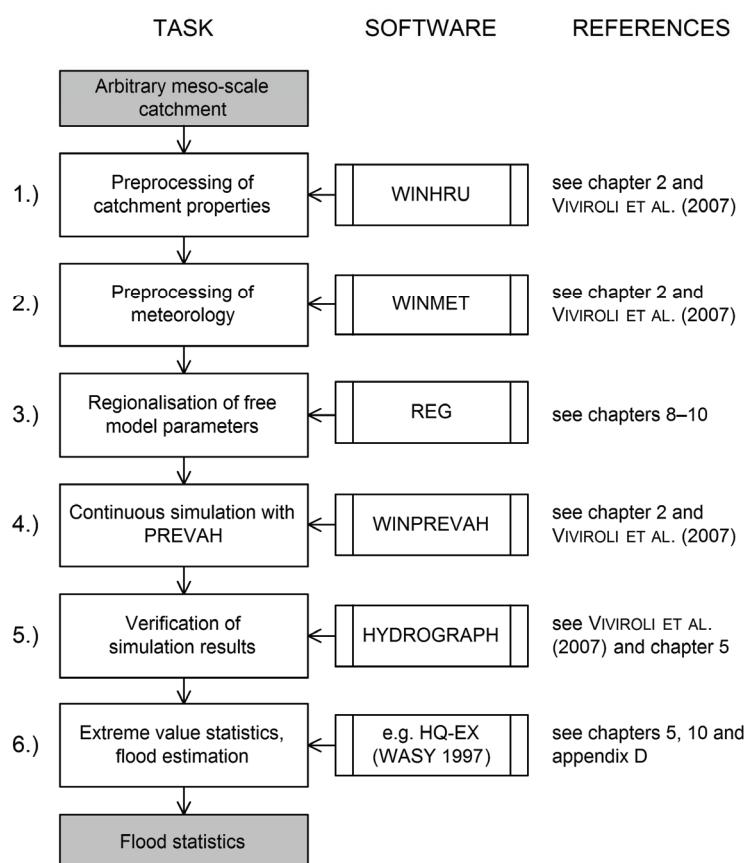


Figure 11.1: Flow chart for flood estimation in an ungauged catchment using PREVAH. The procedures and the respective software are described in the following section.

Abbildung 11.1: Ablauf einer Hochwasserabschätzung mit PREVAH für ein ungemesenes Einzugsgebiet. Das Vorgehen und die dazu zu verwendende Software werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

Ausgesprochen wichtig scheint die Einordnung der erhaltenen Hochwasserabschätzungen. Eine Plausibilitätskontrolle kann einerseits anhand von Vergleichswerten für kalibrierte Einzugsgebiete vorgenommen werden, andererseits können auch Resultate anderer Schätzverfahren hinzugezogen werden. Auf beide Varianten wird in Abschnitt 11.2.2 eingegangen.

11.2 Fallbeispiel Zulg–Steffisburg

Als Fallbeispiel dient die Zulg bei Steffisburg, ein mesoskaliges Gebiet vom Regimetyp nival de transition (Oberlauf) bis nivo-pluvial préalpin (Unterlauf); für dieses Gewässer sind keine Abflussmessungen verfügbar.

11.2.1 Durchführen der Schätzung

1.) Aufbereitung der Raumdaten

In einem ersten Schritt werden die physiographischen Daten des zu modellierenden Gebietes mit Hilfe des Hilfsprogramms WINHRU (**Abbildung 11.2**) aufbereitet. Die verschiedenen Optionen von WINHRU sind über das Profil "Swiss extended" bereits korrekt eingestellt, zur Definition der Hydrootope (HRU) werden die Standardkriterien Höhenzonen – Exposition – Landnutzung verwendet. Einzugeben sind nur noch Gebietsname und die erwartete Gebietsfläche.

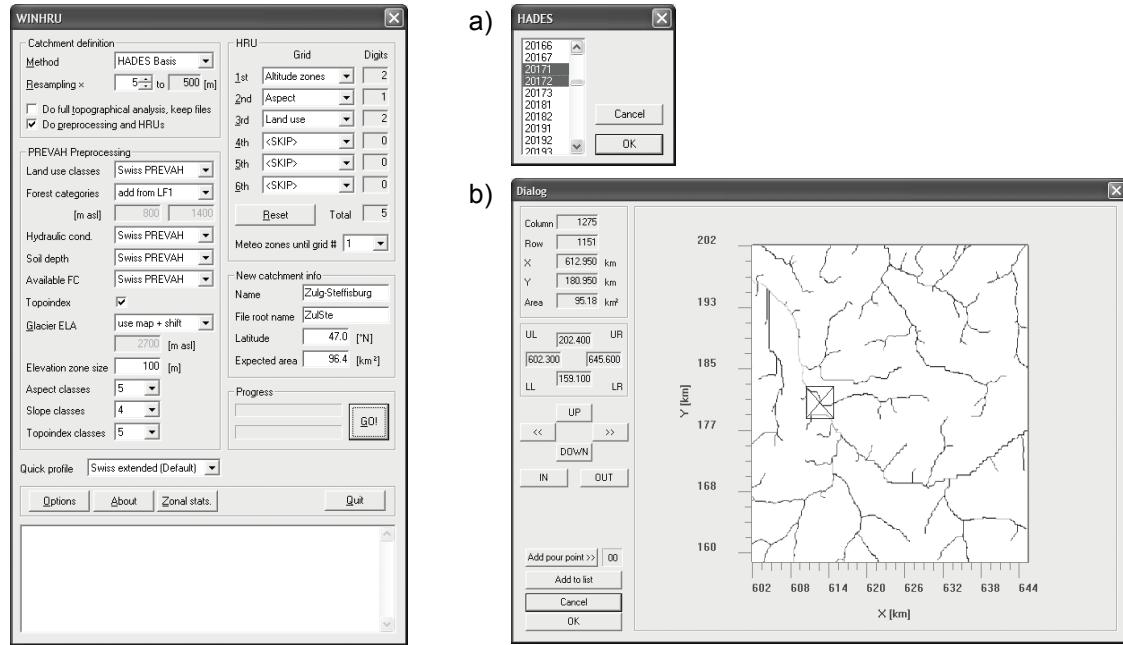
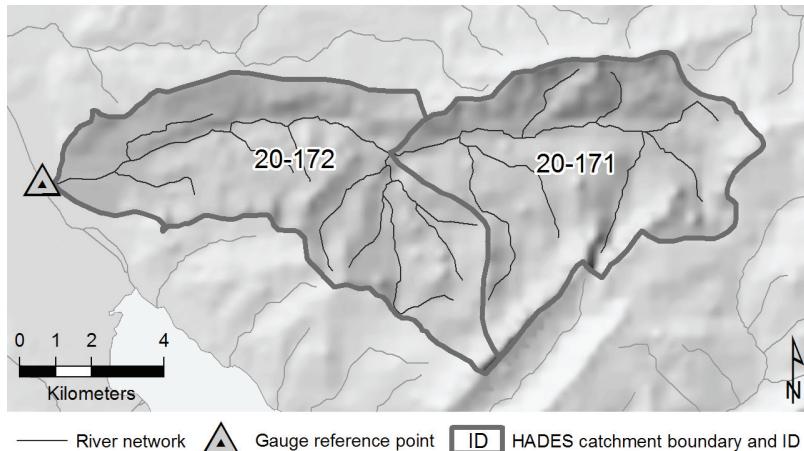


Figure 11.2: Dialog windows of preprocessing tool WINHRU. In example a), small catchments from the Hydrological Atlas of Switzerland (HADES) are selected for defining the investigation area, in example b), the virtual river network is used.

Abbildung 11.2: Dialogfenster des Dienstprogramms WINHRU. In Beispiel a) werden zur Definition des Untersuchungsraums Basisgebiete des Hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES) angewählt, in Beispiel b) wird das virtuelle Gewässernetz verwendet.

Zur Definition des Einzugsgebietes wird die Methode "HADES" gewählt: Da sich das zu untersuchende Gebiet Zulg–Steffisburg (**Abbildung 11.3**) mit den Basisgebieten 20-171 und 20-172 des Hydrologischen Atlas der Schweiz HADES (BREINLINGER ET AL., 1992) deckt, können die entsprechenden Karten verwendet werden, welche in WINHRU bereits implementiert sind. Die beiden HADES-Basisgebiete besitzen bei der gewählten Rasterung von 500 m × 500 m eine Fläche von 92.5 km². Nach Starten des Programms können die Nummern der Basiseinzugsgebiete gewählt werden (**Abbildung 11.2 a)**, woraufhin der restliche Programmablauf selbstständig vorstatten geht. Als Alternative zu dieser Definitionsart kann das Einzugsgebiet auch graphisch gewählt werden, indem im virtu-

ellen Gewässernetz – erzeugt aus dem digitalen Höhenmodell (DHM) mittels Fließrichtungsanalyse – ein Pegelpunkt gesetzt wird (**Abbildung 11.2 b**). Schliesslich ist es auch möglich, beliebige digitale Karten als Vorlage für die Einzugsgebietsabgrenzung zu verwenden; dazu müssen sie lediglich in das PREVAH-eigene GIS-Format transformiert werden (z. B. mit dem Hilfsprogramm GRIDMATH, siehe VIVIROLI ET AL., 2007). In WINHRU steht dann eine Option für den Import zur Verfügung.



Das Programm WINHRU verarbeitet während seiner Ausführung die Grundlagenkarten zu Boden-, Landnutzungs- und Höheninformationen und erstellt unter anderem

- eine Karte über die räumliche Verteilung der Hydrotope (Dateityp .idh),
- eine entsprechend referenzierte Tabelle, in welcher die relevanten Kennwerte der Hydrotope verzeichnet sind (.gkw) sowie
- eine Steuerdatei für PREVAH (.inp) mit einem initialen Parametersatz.

Mit diesen Informationen sind alle für PREVAH erforderlichen Raumdaten vollständig vorhanden. Die von WINHRU erstellten Karten zu Einzugsgebietsgrenzen (.ezg), Höhenmodell (.dgm) und meteorologischen Zonen (.mez, hier 100 m-Höhenstufen) dienen anschliessend zur Aufbereitung des meteorologischen Inputs, zahlreiche weitere Karten stehen für vertiefte hydrologische Gebietsanalysen zur Verfügung.

2.) Aufbereitung des meteorologischen Inputs

Als zweites muss der Modellantrieb bereitgestellt werden, welcher die sechs Eingangsgrössen Niederschlag, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Dampfdruck, Globalstrahlung und Sonnenscheindauer in stündlicher Auflösung umfasst. Dazu wird das Hilfsprogramm WINMET verwendet (**Abbildung 11.4**).

Für die Aufbereitung müssen die unter Punkt 1 erstellten Karten als räumliche Referenz gewählt werden, und der aufzubereitende Zeitraum (hier 01.01.1983–31.12.2005) ist zu spezifizieren. Es folgt die Auswahl der Messstationen, welche für die Interpolation verwendet werden sollen; dies geschieht getrennt nach den drei zur Verfügung stehenden Stationstypen ANETZ, Klima und Sammler. Dabei wird jeweils der zu berücksichtigende Suchradius angegeben (**Abbildung 11.4 a**), woraufhin WINMET die entsprechenden Stationen in einer Liste anwählt; diese Liste kann anschliessend manuell erweitert oder reduziert werden (**Abbildung 11.4 b**). Für das vorliegende Fallbeispiel wurden gemäss den in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Kriterien die folgenden Stationen gewählt:

- Automatisches Messnetz ANETZ (stündliche Werte):
Im Standardsuchradius von 35 km liegen die sechs Stationen Adelboden (Distanz zum Gebietszentrum: 32 km), Bern–Liebefeld (29 km), Interlaken (14 km), Jungfraujoch (30 km), Napf (31 km) und Plaffeien (35 km). Da dies eine ausreichende Anzahl ist und auch hochgelegene Standorte vertreten sind, ist eine manuelle Ergänzung nicht nötig.
- Klimastationen (2 bis 3 Werte täglich):
Innerhalb des empfohlenen Suchradius von 25 km liegen die vier Stationen Grindelwald (28 km), Langnau i. E. (20 km), Mürren (25 km) und Thun (8 km). Auch diese Auswahl wird unverändert beibehalten.

- Niederschlagssammler (täglich 1 Wert):

Im Gebiet selbst befinden sich keine Messstandorte. Deshalb wird in einem Umkreis von 10 km nach Stationen gesucht. Gewählt werden die sechs Stationen Beatenberg (8 km), Heiligen-schwendi (2 km), Hondrich (10 km), Schwarzenegg (3 km), Thun (8 km) und Wimmis (10 km).

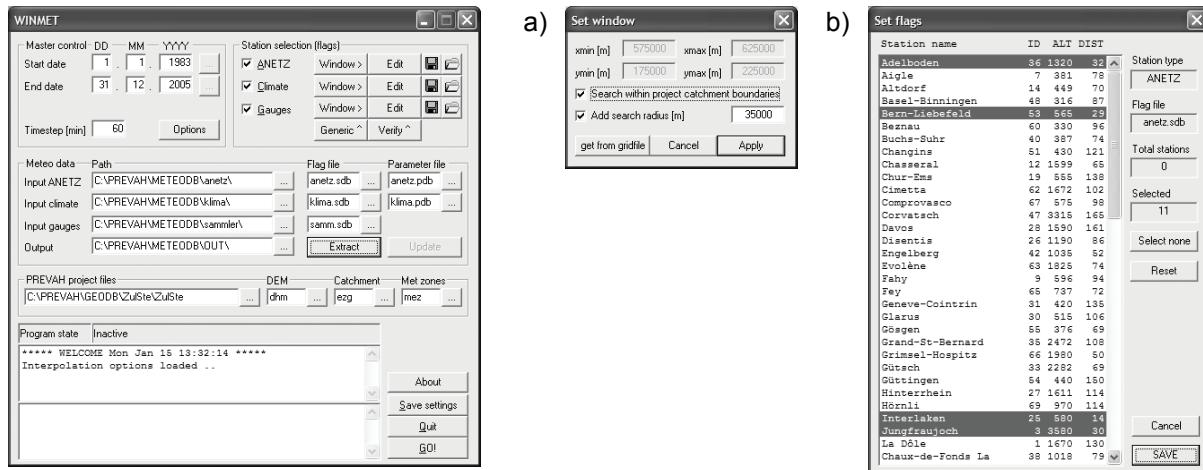


Figure 11.4: Dialog windows of preprocessing tool WINMET. a) shows the settings for automatic selection of stations, b) a respective station list.

Abbildung 11.4: Dialogfenster des Dienstprogramms WINMET. a) zeigt die Einstellungen zur Stationsauswahl, b) eine damit erstellte Stationsliste.

Die automatische Überprüfung nach mehrfach verwendeten Standorten ergibt, dass von der Station Thun sowohl Klima- wie auch Sammlermessung verwendet werden. Die Sammlermessung wird folglich entfernt, womit insgesamt noch fünf Niederschlagssammler berücksichtigt sind.

Für alle sechs meteorologischen Variablen wird gemäss Vorgabe eine Interpolation mit Detrended Inverse Distance Weighting (DTIDW) durchgeführt (vgl. Kapitel 2.1.1); bei Bedarf können über die Programmoptionen auch andere Interpolationsverfahren gewählt werden (Kriging, Deaktivierung des Detrending etc., siehe VIVIROLI ET AL., 2007).

Als Ergebnis liefert WINMET Tabellen aller für PREVAH erforderlichen Antriebsgrössen, und zwar jeweils in einer Datei pro Parameter und pro Jahr. Die Tabellen enthalten in stündlicher Auflösung die interpolierten Messwerte als Mittelwert pro Meteozone (100 m-Höhenstufe) und gemittelt für alle Meteozenen. Die entsprechenden Dateien sind

- für den Niederschlagprec.s1983 – prec.s2005
- für die Lufttemperatur.....temp.s1983 – temp.s2005
- für die Windgeschwindigkeitwind.s1983 – wind.s2005
- für den Dampfdruckvapo.s1983 – vapo.s2005
- für die Globalstrahlung.....glob.s1983 – glob.s2005
- für die Sonnenscheindauer.....ssd_.s1983 – ssd_.s2005

3.) Regionalisierung der freien Modellparameter

Normalerweise werden die freien Modellparameter durch Kalibrierung an einer Messgröße festgelegt, typischerweise mit Hilfe des Abflusses (vgl. Kapitel 3 und 4) – dies ist im Fall von ungemessenen Gebieten jedoch nicht möglich. Die Parameterbestimmung geschieht deshalb über eine Regionalisierung, welche das Hilfsprogramm REG vornimmt. Als erstes müssen mit Hilfe von REG die Gebietsattribute des ungemessenen Zielgebietes Zulg–Steffisburg erhoben und in die Regionalisierungsdatenbank übertragen werden. Anschliessend wendet REG zur Regionalisierung der Parametersätze gemäss den in den Kapiteln 8 und 9 gemachten Vorgaben drei verschiedene Methoden an:

a.) Nearest Neighbours (regNNBR):

Die gewichtete Euklidische Distanz wird verwendet, um eine Reihe ähnlicher Gebiete auszuwählen, welche als Spendergebiete für die Modellparameter dienen. Dies geschieht automatisch mit einem der drei nach Zonen mittlerer Gebietshöhe differenzierten Sätze von Gebietsattributen und zugehörigen Attributgewichten; bei einer mittleren Höhe von 1'100 m ü. M. liegt Zulg–Steffis-

burg in der voralpinen Zone (1'000–1'550 m ü. M.). Aus dem Basisdatensatz von 140 auf Hochwasser kalibrierten Gebieten werden die fünf ähnlichsten ermittelt, welche sich in derselben Zone mittlerer Gebietshöhe wie Zulg–Steffisburg befinden; dies sind in absteigender Reihenfolge Emme–Emmenmatt, Emme–Eggiwil, Kleine Emme–Werthenstein / Chappelboden, Ilfis–Langnau und Minster–Euthal. Die jeweiligen Parametersätze der ausgewählten Spendergebiete werden ohne Änderung in PREVAH-Steuerdateien für das Zielgebiet Zulg–Steffisburg übertragen.

b.) Kriging (regKRIG):

Auf Basis der Daten aus den 140 auf Hochwasser kalibrierten Einzugsgebieten wird für jeden Modellparameter eine räumliche Karte erstellt. Dazu wird eine Interpolation mittels Kriging durchgeführt, wobei die Gebietsschwerpunkte als Stützstellen dienen. Das Kriging erfolgt für jeden Parameter separat, und zwar mit den empfohlenen Einstellungen für Strukturgrösse (25 km), Suchradius (100 km), Minimal- und Maximalanzahl von Stützstellen (3 resp. 15), Nugget-Wert (2.0) und Formparameter (10). Um die freien Modellparameter für ein unbekanntes Gebiet zu bestimmen, werden an dessen Schwerpunkt die interpolierten Werte aus den Parameterkarten herausgelesen. Die so ermittelten Modellparametersätze werden wiederum als Steuerdatei im Modellordner abgelegt.

c.) Regression (regREGR):

Ausgehend von den Daten aller kalibrierten Gebiete in der relevanten Zone mittlerer Gebietshöhe werden diejenigen Gebietsattribute ermittelt, welche den stärksten Zusammenhang mit den auf Hochwasser kalibrierten Modellparametern zeigen. Dabei wird für jeden einzelnen Modellparameter automatisch ein spezifischer Attributsatz zusammengestellt und in ein Regressionsmodell eingefügt, welches dann optimiert wird. Mit Hilfe dieser Regressionen werden die Modellparameter des ungemessenen Gebietes anschliessend aus dessen Attributen ermittelt. Vor ihrer Übertragung in die Steuerdatei werden die Parametersätze geprüft und allenfalls korrigiert, falls der Bereich plausibler Werte verlassen wurde. Im vorliegenden Fall trifft dies auf die Parameter *T0* und *PERC* zu.

Mittels dieser drei Methoden wurden nun insgesamt sieben Parametersätze erstellt: Fünf für die Nearest-Neighbour-Methode und jeweils einer für die Methoden Kriging und Regression:

- runZulSte_RegEUCL_001EmmEmm.inp erster Nearest Neighbour (Emme–Emmenmatt)
- runZulSte_RegEUCL_002EmmEgg.inp zweiter Nearest Neighbour (Emme–Eggiwill)
- runZulSte_RegEUCL_003KEmWCh.inp dritter Nearest Neighbour (Kleine Emme–W'stein, C.)
- runZulSte_RegEUCL_004IlfLan.inp vierter Nearest Neighbour (Ilfis–Langnau)
- runZulSte_RegEUCL_005MinEut.inp fünfter Nearest Neighbour (Minster–Euthal)
- runZulSte_RegKRIG.inp Kriging
- runZulSte_RegREGR.inp..... Regression

Falls für das interessierende Gebiet kurze Abflussmessreihen im Umfang einiger Jahre vorliegen, ist es auch möglich, die freien Parameter des Modellsystem zu kalibrieren, anstatt dafür ein Regionalisierungsverfahren einzusetzen. Dazu würde die hier vorgestellte Regionalisierung durch das in den Kapiteln 3 und 4 vorgestellte Kalibrierungsverfahren ersetzt; erforderlich sind mindestens 5 Jahre Abflussmessdaten in stündlicher Auflösung für den Zeitraum ab 1983. Damit wäre es möglich, eine längere Datenreihe zu simulieren, welche dann wiederum die Bestimmung von Hochwasserabflüssen grösserer Jährlichkeit zulassen würde. Da der Fokus dieser Arbeit aber auf ungemessenen Gebieten liegt, wird die Möglichkeit der Kalibrierung hier nicht weiter vertieft.

4.) Kontinuierliche Simulation mit PREVAH

Mit den oben erstellten Parametersätzen wird nun mit PREVAH jeweils eine Simulation im Stundenschritt durchgeführt, der Simulationszeitraum 1983–2005 ist dabei durch die unter Punkt 2.) vorgenommene Interpolation der meteorologischen Variablen vorgegeben. Das Regionalisierungsprogramm REG erstellt direkt eine Stapelverarbeitungsdatei, welche die sieben Modellläufe startet; die jeweiligen Ergebnisse werden automatisch in entsprechend bezeichnete Ordner geschrieben. Als Alternative kann auch die Benutzeroberfläche von WINPREVAH verwendet werden, um die Modellläufe zu starten, wobei dann allenfalls die freien Modellparameter manuell überprüft oder verändert werden können (**Abbildung 11.5**).

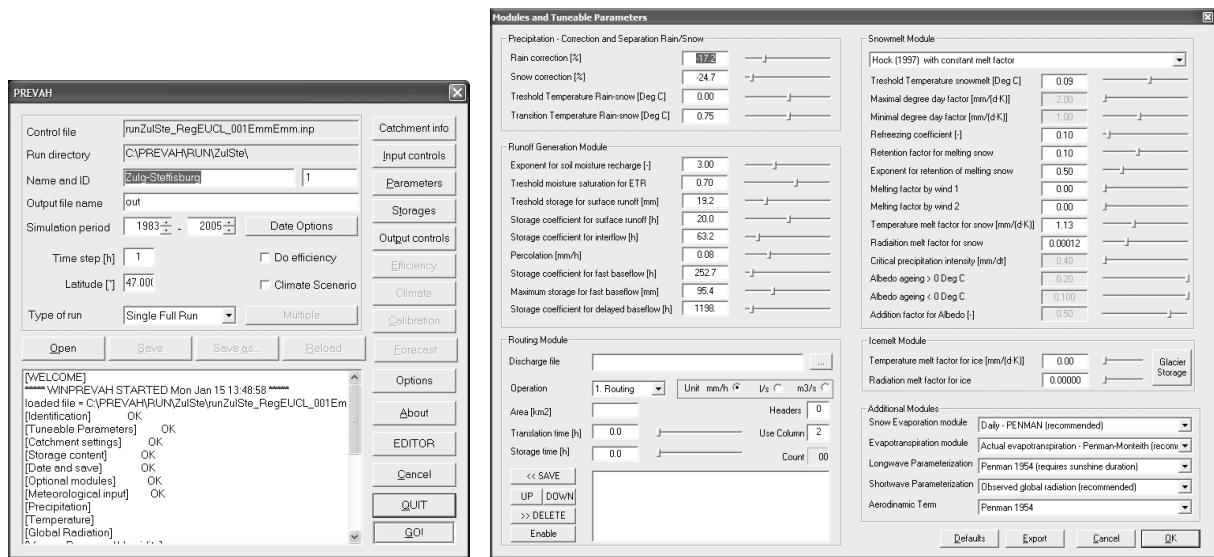


Figure 11.5: WINPREVAH main dialog (left) and parameter dialog window (right).

Abbildung 11.5: Haupt- (links) und Parameterdialogfenster (rechts) von WINPREVAH.

Die simulierten Ganglinien werden anschliessend in zwei Schritten kombiniert (vgl. **Abbildung 11.6**):

- 1.) Aus den fünf Nearest-Neighbour-Regionalisierungen wird die mediane Ganglinie bestimmt, d. h. für jeden Zeitpunkt wird der Median der fünf simulierten Abflusswerte verwendet.
- 2.) Aus medianer Nearest-Neighbours-Regionalisierung, Kriging- und Regressionsregionalisierung wird wiederum die mediane Ganglinie bestimmt.

Aus Schritt 2 resultiert die stündlich aufgelöste Ganglinie der "kombinierten Regionalisierung", welche als beste Variante empfohlen wird. Die jeweiligen Berechnungen werden über das Hilfsprogramm REG abgewickelt.

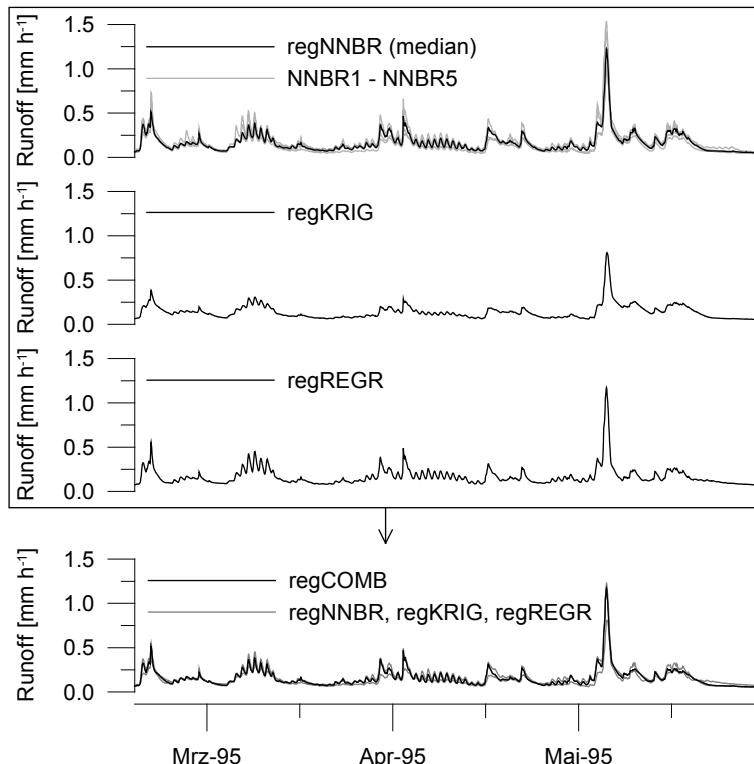


Figure 11.6: Combination of regionalisations Nearest Neighbours (regNNBR, with precursors NNBR₁–NNBR₅), Kriging (regKRIG) and Regression (regREGR) to combined regionalisation (regCOMB). All regionalisations are based upon the flood-calibrated parameter set.

Abbildung 11.6: Kombination der Regionalisierungen Nearest Neighbours (regNNBR, mit den Vorläufern NNBR₁–NNBR₅), Kriging (regKRIG) und Regression (regREGR) zur kombinierten Regionalisierung (regCOMB). Alle Regionalisierungen basieren auf dem hochwasser-kalibrierten Parametersatz.

5.) Überprüfung der Simulationsresultate

Nach erfolgter Simulation mit den regionalisierten Parametersätzen sollten die einzelnen Ergebnisse auf ihre Plausibilität hin überprüft werden. Für einen ersten Überblick wird dazu das Programm HYDROGRAPH verwendet (**Abbildung 11.7**), in welchem eine oder zwei simulierte Größen dargestellt werden können. Zur Auswahl stehen alle relevanten Eingangs-, Zustands- und Ausgabegrößen von PREVAH (**Abbildung 11.7**, rechts; vgl. Kapitel 2.1.4). Die Auswertung ist aber auch mit einer beliebigen anderen Software (z. B. Golden Software Grapher, Microsoft Excel) möglich. Die folgenden Punkte sollten geprüft werden:

- Reaktion des Modells auf Niederschlag (total runoff vs. adjusted-interpolated precipitation) in Bezug auf Reaktionsgeschwindigkeit und Reaktionsstärke; ergänzend können die schnelle und die verzögerte Abflusskomponente (surface runoff, interflow) eingesehen werden.
- Jahresverlauf des Grundwasserspeichers (total runoff vs. total baseflow).
- Jahresverlauf von aktueller Verdunstung und Bodenfeuchte (actual evapotranspiration vs. plant available soil moisture storage).
- Jahresverlauf von Schneedecke und Schneeschmelze (total runoff vs. snowmelt und snow water equivalent) sowie die Reaktion des Grundwasserspeichers auf die Schneeschmelzperiode (snowmelt vs. total baseflow).
- Bei Vergletscherung der Jahresverlauf der Eisschmelze (ice melt, z. B. vs. snowmelt).

Als Referenz für diese Beurteilungen kann das erwartete Verhalten eines Gebietes mit ähnlicher Fläche und Regimecharakteristik (vgl. WEINGARTNER UND ASCHWANDEN, 1992) herangezogen werden – im vorliegenden Fall also ein mittelgrosses Gebiet vom Typ nivo-pluvial préalpin, z. B. die Emme bei Eggiwil (124 km^2). Weitere Kenntnisse wie beispielsweise zur Hydrogeologie können ebenfalls hilfreich sein. Die vorgeschlagenen Analysen sind für die sieben regionalisierten Parametersätze regNNBR₁–regNNBR₅, regKRIG und regREGR sinnvoll, nicht jedoch für die kombinierte Regionalisierung, welche als Median gebildet wurde und keine eigenständige Simulation besitzt.

Table 11.1: Water balance of Zulg–Steffisburg according to SCHÄDLER AND WEINGARTNER (2002) (HADES) in comparison with regionalisations Nearest Neighbours (regNNBR_{1–5}), Kriging (regKRIG) and Regression (regREGR).

Tabelle 11.1: Wasserbilanz von Zulg–Steffisburg gemäss SCHÄDLER UND WEINGARTNER (2002) (HADES) im Vergleich mit den Regionalisierungen Nearest Neighbours (regNNBR_{1–5}), Kriging (regKRIG) und Regression (regREGR).

	P	R	E	dS	I	P	precipitation [mm a^{-1}]
HADES ^a	^b 1'601	^b 756	^b 496	-	^b -349	R	runoff [mm a^{-1}]
regNNBR ₁	1'217	745	465	^c +7	-	E	evapotranspiration [mm a^{-1}]
regNNBR ₂	1'439	965	464	^c +10	-	dS	storage change [mm a^{-1}]
regNNBR ₃	1'335	863	465	^c +7	-	I	underground inflow / outflow [mm a^{-1}]
regNNBR ₄	1'347	871	467	^c +9	-	^a refers to HADES medium scale catchment 20-170 which additionally includes the River Rotache (39 km^2)	
regNNBR ₅	1'340	871	462	^c +7	-	^b Plausibility of the water balance for this specific catchment cannot be assessed according to the authors	
regKRIG	1'236	765	464	^c +7	-	^c Artefact caused by initialisation of model storages	
regREGR	1'305	838	459	^c +8	-		

Anhand von Tafel 6.3 des Hydrologischen Atlas der Schweiz (SCHÄDLER UND WEINGARTNER, 2002) kann zudem kontrolliert werden, ob die Komponenten des simulierten Wasserhaushaltes eine plausible Größenordnung besitzen. Beachtet werden muss dabei allerdings, dass die verwendeten Hochwasserparametersätze nicht auf eine optimale Wiedergabe der Wasserbilanz ausgerichtet sind – die Spannbreite von noch akzeptablen Unterschieden zu den Referenzwerten ist demnach etwas grosszügiger anzusetzen. Wie **Tabelle 11.1** zeigt, kann im vorliegenden Fall aus der Ähnlichkeit der Bilanzgrößen für Abfluss und Verdunstung aber auf eine hohe Plausibilität der Simulation geschlossen werden. Da der Niederschlag von SCHÄDLER UND WEINGARTNER (2002) als Restglied berechnet wird, fällt der entsprechende Referenzwert ($1'601 \text{ mm a}^{-1}$) aufgrund der unterirdischen Abflüsse in den Thunersee (349 mm a^{-1}) um einiges grösser aus als der modellierte Term. Eliminiert man diesen Effekt – er wird in der vorliegenden Modellierung nicht berücksichtigt –, so erhält man für den Nieder-

schlag einen modifizierten Referenzwert von $1'252 \text{ mm a}^{-1}$ ($1'601 - 349 \text{ mm a}^{-1}$). Dieser Wert stimmt wiederum gut mit den im Modell ausgewiesenen Niederschlagsmengen überein, welche sich zwischen $1'207$ und $1'439 \text{ mm a}^{-1}$ bewegen.

Ein weiterer möglicher Indikator für hydrologische Plausibilität der Simulation ist schliesslich auch das Mass der Übereinstimmung zwischen den regionalisierten Ganglinien. Weichen die verschiedenen Simulationen stark voneinander ab, sollte die Vertrauenswürdigkeit der regionalisierten Parametersätze und die Plausibilität der einzelnen Regionalisierungsresultate genauer untersucht werden. Was die Extrapolationsresultate betrifft, muss gemäss Kapitel 10.2.4 festgehalten werden, dass aus der Schwankungsbreite, welche die Hochwasserabschätzungen der einzelnen Regionalisierungen einnehmen, nicht unmittelbar auf die Güte der Schätzung geschlossen werden kann.

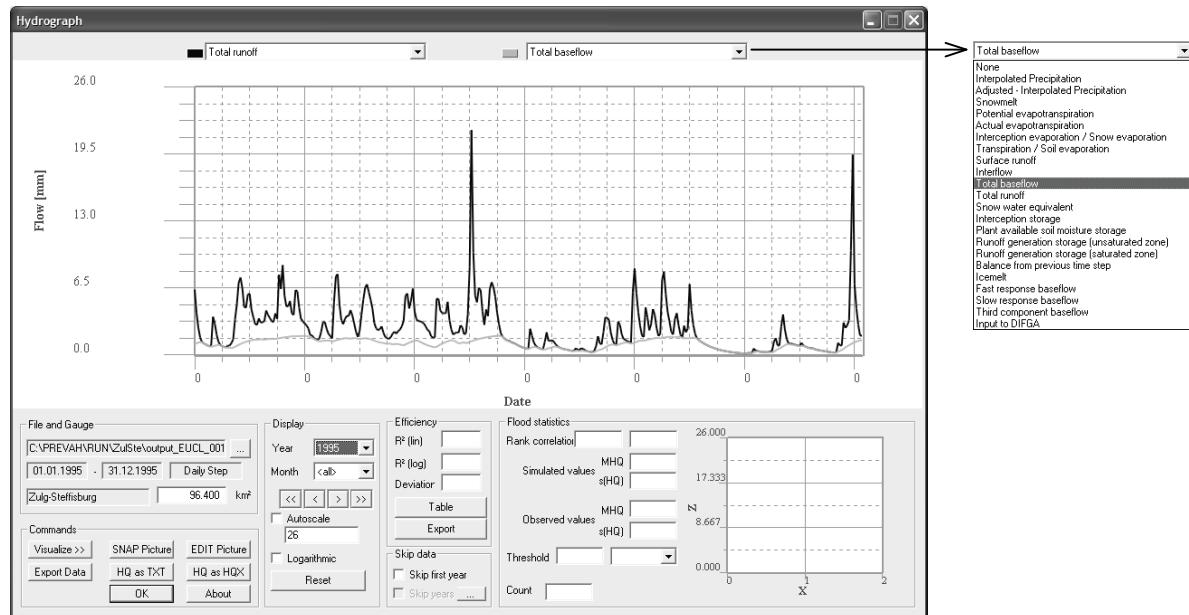


Figure 11.7: HYDROGRAPH dialog window for display of runoff and further modelled values (left) with drop-down menu for selection of display variables (right).

Abbildung 11.7: Dialogfenster des Dienstprogramms HYDROGRAPH zur Darstellung von Ganglinien des Abflusses und weiterer modellierter Größen (links) sowie Drop-Down-Menü zur Auswahl der darzustellenden Modellgrößen (rechts).

6.) Extremwertstatistische Auswertung

Ist die Plausibilität der regionalisierten Abflusssimulationen sichergestellt, kann zur eigentlichen Hochwasserabschätzung übergegangen werden; in der vorliegenden Arbeit wird dazu HQ-EX (WASY, 1997) verwendet (**Abbildung 11.8**). Das Hilfsprogramm REG rechnet dazu automatisch die Abflüsse von $[\text{mm h}^{-1}]$ in $[\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$ um und extrahiert die Jahreshochwasser. Diese Werte werden mit Angabe von Gebietsname und -größe in einem Dateiformat abgelegt, welches sich problemlos in HQ-EX importieren lässt (Dateityp .hqx).

Als Grundlage der Schätzung dient die kombinierte Regionalisierung, von welcher insgesamt die besten Resultate zu erwarten sind (vgl. Kapitel 10). Zu beachten ist, dass der zulässige Extrapolationsbereich aufgrund von 22 simulierten Abflussjahren (1984–2005, 1983 wird als Initialisierungsjahr verworfen) hier 66 Jahre beträgt (vgl. DVWK, 1999); wegen der grossen Verbreitung des HQ_{100} als Referenzwert wird hier aber bis auf 100 Jahre extrapoliert, um mehr Vergleichswerte zur Verfügung zu haben (vgl. Kapitel 4.2.3). Verwendet man die erste Extremwertverteilung mit wahrscheinlichkeitsgewichteten Momenten (E1-WGM), wie sie in dieser Arbeit zwecks besserer Vergleichbarkeit durchgehend eingesetzt wurde (siehe ebenfalls Kapitel 4.2.3), betragen die Schätzwerte für die Zulg bei Steffisburg $80 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ für ein HQ_{50} und $89 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ für ein HQ_{100} ; die nach DVWK (1999) vorgeschlagenen drei Extremwertverteilungen führen im vorliegenden Beispiel zu etwas tieferen Schätzwerten. Da das entwickelte Modellsystem methodisch nicht auf einem spezifischen Extrapolationsverfahren beruht, steht es dem Anwender frei, geeignete Extremalverteilungen und Parameterschätzverfahren entsprechend seiner Einschätzung auszuwählen.

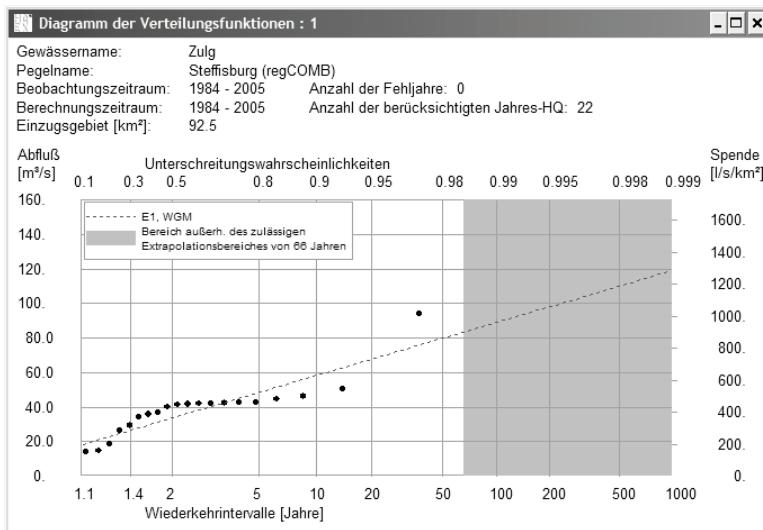


Figure 11.8: Extreme value statistics for Zulg–Steffisburg using HQ-EX (WASY, 1997). Data: annual peak discharges from regionalised simulation 1984–2005.

Abbildung 11.8: Extremwertstatistische Analyse für Zulg–Steffisburg mit HQ-EX (WASY, 1997). Datenbasis: Jahreshochwasser der regionalisierten Simulation 1984–2005.

11.2.2 Überprüfen und Einordnen der Schätzung

Nachdem in der oben durchgeführten Anwendung des Modellsystems bereits eine Plausibilisierung der Simulationsresultate vorgenommen wurde, sollen im Folgenden die Resultate der erhaltenen Hochwasserabschätzung überprüft und eingeordnet werden. Dabei interessiert insbesondere auch der Vergleich mit den bisher verwendeten Schätzverfahren für ungemessene Gebiete.

Betrachtung der einzelnen Regionalisierungen

Als erste Möglichkeit zur Einordnung der Schätzresultate können die Jahresspitzen der drei elementaren Regionalisierungen Nearest Neighbours (NNBR), Kriging (KRIG) und Regression (REGR) ebenfalls extrapoliert und dann als Vergleichswerte verwendet werden. Bei grossen Unterschieden ist eine vertiefte Analyse der Regionalisierungsresultate angezeigt, insbesondere der jeweiligen Spitzenabflussereignisse. Im vorliegenden Fall schwanken die Schätzresultate der Regionalisierungen regNNBR, regKRIG und regREGR zwischen 60 und 91 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ für ein HQ_{50} und zwischen 66 und 103 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ für ein HQ_{100} . Dies entspricht einem relativ grossen Schwankungsbereich von ca. $\pm 20\%$ um den jeweiligen mittleren Schätzwert und dürfte auf die schon angesprochenen Unsicherheiten bezüglich unterirdischer Wegflüsse zurückzuführen sein.

Es ist anzumerken, dass diese grobe Einordnung lediglich Hinweise auf Fehler liefern kann; es ist hingegen nicht möglich, aus der Schwankungsbreite der Schätzwerte von regNNBR, regKRIG und regREGR direkt auf die Güte der Hochwasserabschätzung zu schliessen (vgl. Kapitel 10.2.4).

Vergleichswerte aus kalibrierten Einzugsgebieten

Als zweites können die Informationen derjenigen Gebiete herangezogen werden, für welche PREVAH erfolgreich kalibriert wurde. Für all diese Gebiete existiert auch eine Hochwasserextrapolation auf Basis der regionalisierten Simulation (siehe Anhang D), welche dank Einsatz des Jack-Knife-Verfahrens eine unabhängige und aussagekräftige Vergleichsgröße darstellt. Da für die Extremwertstatistik lange Messreihen erforderlich sind, stehen allerdings nicht für alle in der Regionalisierung verwendeten 140 Spendergebiete derartige Extrapolationen zur Verfügung, sondern nur für deren 49.

Die vielversprechendste Möglichkeit zur Einschätzung besteht dabei nun darin, die Extrapolationsresultate derjenigen Gebiete zu betrachten, welche in der Nearest-Neighbours-Regionalisierung als ähnlichste gewählt wurden. Für das hier verwendete Beispiel der Zulg bei Steffisburg können die Gebiete Emme–Emmenmatt (erster Nearest Neighbour), Emme–Eggiwil (zweiter Nearest Neighbour), und Minster–Euthal (fünfter Nearest Neighbour) betrachtet werden, für welche lange Messreihen und somit detaillierte Extrapolationen vorliegen. Während bei Minster–Euthal sowohl bei der Kalibrierung wie auch bei der Regionalisierung relativ deutliche Unterschätzungen seltener Hochwasser festzustellen sind (Anhang D, S. 260), weisen die beiden ähnlichsten Gebiete Emme–Emmenmatt und Emme–Eggiwil gute Extrapolationsresultate auf, wenn auch mit einer leichten Tendenz zur Unterschätzung (Anhang D, S. 256 resp. 255). Wegen zu kurzer Datenreihen nicht verfügbar sind Informationen zu den Gebieten Kleine Emme–Werthenstein-Chappelboden und Ilfis–Langnau (dritter resp. vierter Nearest Neighbour).

Eine weitere Einordnungsmöglichkeit auf Basis der mit PREVAH kalibrierten Gebiete besteht in der Betrachtung von Fehlerkarten, welche aus den individuellen Schätzfehlern von 49 Gebieten mit langen Messreihen räumlich interpoliert wurden (vgl. Kapitel 10.2.2). Ein Blick auf die entsprechenden Karten zeigt, dass das Modellsystem in der Gegend von Zulg–Steffisburg generell gute Resultate erreicht. Diese Fehlerkarten sollten allerdings nur als Anhaltspunkt für regionale Tendenzen der Über- oder Unterschätzung interpretiert werden; wie in Kapitel 10.2.3 gezeigt wurde, sind exakte Informationen über die Fehler individueller Gebiete nicht abzuleiten.

Vergleich mit HQx_meso_CH

Eine dritte Einschätzung der Extrapolationsresultate kann schliesslich durch Vergleich mit den in HQx_meso_CH (BARBEN, 2003; SPREAFICO ET AL., 2003) zusammengestellten Schätzverfahren erreicht werden. Dabei können vorerst die Schätzungen von HQx_meso_CH für das unmittelbar interessierende Gebiet Zulg–Steffisburg betrachtet werden (**Abbildung 11.9**): Die fünf für ein HQ₁₀₀ verfügbaren Ansätze liefern Schätzwerte zwischen 108 und 252 m³ s⁻¹, was eine sehr grosse Spannweite darstellt und exemplarisch die Unsicherheiten aufzeigt, welche bei den heute etablierten Standardverfahren auftreten können. Zudem liegt einer der Schätzwerte für das Q_{max} unterhalb der zwei höchsten Schätzungen für ein HQ₁₀₀, was ebenfalls auf Probleme hinweist. Der Mediane Wert der fünf HQ₁₀₀-Schätzungen aus HQx_meso_CH beträgt 152 m³ s⁻¹, das Modellsystem lieferte eine demgegenüber deutlich tiefere Schätzung von lediglich 89 m³ s⁻¹.

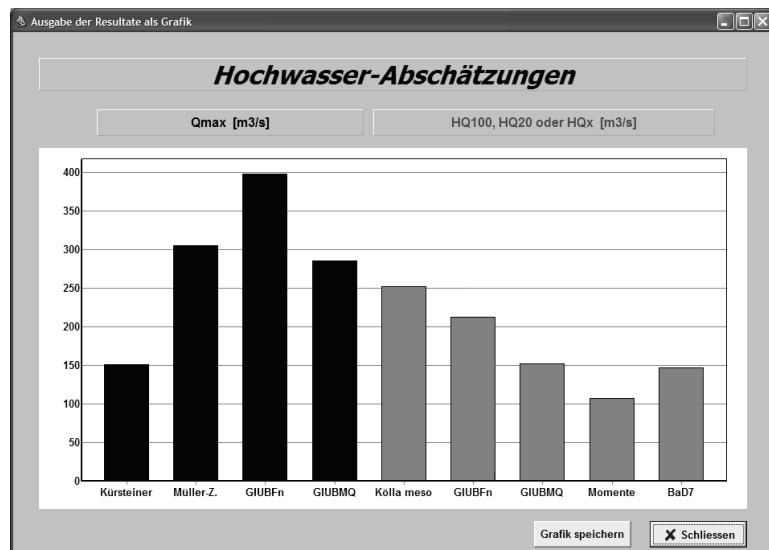


Figure 11.9: Flood estimation for Zulg–Steffisburg with HQx_meso_CH (BARBEN, 2003; SPREAFICO ET AL., 2003). The four estimates at the left refer to Q_{max}, the remaining five estimates to HQ₁₀₀.

Abbildung 11.9: Hochwasserabschätzung für Zulg–Steffisburg mit HQx_meso_CH (BARBEN, 2003; SPREAFICO ET AL., 2003). Die ersten vier Schätzungen (links) beziehen sich auf das Q_{max}, die restlichen fünf (rechts) auf ein HQ₁₀₀.

Aufschlussreich kann nun sein, das Abschneiden von HQx_meso_CH in Gebieten zu betrachten, welche dem in Frage stehenden Untersuchungsgebiet ähnlich sind und sowohl über lange Abflussmessreihen wie auch über PREVAH-Modellierungen verfügen. Vergleiche mit den Extrapolationen aus Beobachtung und Regionalisierung können Hinweise darauf geben, wie viel Vertrauen der Schätzung von HQx_meso_CH geschenkt werden soll. Da nun verschiedene Standardverfahren betrachtet werden, welche keinen Bezug zur Modellierung mit PREVAH haben, sollte bei der Suche ähnlicher Gebiete stärker auf einfache hochwasserrelevante Grössen wie Gebietsfläche, mittlere Gebietshöhe und Regimetyp geachtet werden; die Nearest-Neighbour-Analyse kann ergänzend dazu als Hilfe herangezogen werden. Als Vergleichsgebiet für die Zulg bei Steffisburg (ZulSte) bietet sich die Emme bei Eggiwil (EmmEgg) an; die beiden Einzugsgebiete sind sich bezüglich Gebietsfläche (ZulSte: 92.5 km², EmmEgg: 124 km²), mittlerer Höhe (ZulSte: 1'100 m ü. M., EmmEgg: 1'189 m ü. M.) und Regime (beide nivo-pluvial préalpin) sehr ähnlich. Zudem ist EmmEgg gemäss Nearest-Neighbour-Analyse das zweitähnlichste Gebiet zu ZulSte. Betrachtet man nun also die detaillierten Auswertungen für Emme-Eggiwil (Anhang D, S. 255), liegen die Schätzungen von HQx_meso_CH in allen Fällen über dem aus der Beobachtung abgeleiteten Referenzwert – zum Teil sogar sehr deutlich. Die Abschätzung mit PREVAH liegt zwar unter der Referenz, befindet sich aber noch im Konfidenzintervall der entsprechenden Extremwertstatistik.

Schliesslich können auch die in BARBEN (2003) enthaltenen Fehlerkarten Hinweise darauf geben, wie die Resultate von HQx_meso_CH einzurordnen sind. Dabei zeigt sich, dass einzelne Verfahren von HQx_meso_CH in der Region der Zulg zu Überschätzungen tendieren.

Fazit

Auf Grund der obigen Erwägungen sollte im vorliegenden Fall entweder der Schätzwert aus dem PREVAH-Modellsystem ($89 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) oder der tiefste Schätzwert von HQx_meso_CH ($108 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) verwendet werden. Es ist anzunehmen, dass erstere Schätzung eher zu tief liegt, letztere eher zu hoch. Als pragmatische Lösung kann das Mittel der beiden erwähnten Werte verwendet werden, was einen geschätzten hundertjährlichen Abfluss von $99 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ergibt.

11.3 Konsequenzen für die Praxis

Anhand des obigen Fallbeispiels konnte exemplarisch gezeigt werden, welche Arbeitsschritte für eine Schätzung mit dem erarbeiteten Modellsystem durchzuführen sind; die vielen zur Verfügung stehenden Hilfsprogramme erleichtern dabei die Arbeit wesentlich und halten den Aufwand in einem vernünftigen Rahmen. Es ist offensichtlich, dass eine hydrologische Langzeitsimulation mit Regionalisierung der Modellparameter und Auswertung der Resultate nicht derart direkt und unkompliziert erfolgen kann wie die Abschätzung mit Hilfe einfacherer statistischer oder regionalhydrologischer Ansätze. Zudem ist solides hydrologisches Fachwissen erforderlich, um beispielsweise die Plausibilität der Simulationen einzuschätzen. Somit scheint es vorderhand wenig realistisch, die Hochwasserabschätzung mit PREVAH als Standardverfahren für die breite Praxis etablieren zu wollen. Gut vorstellbar ist aber, dass Experten dieses System immer dann einsetzen, wenn einfach durchführbare regionalhydrologische Schätzmethoden (wie z. B. in HQx_meso_CH zusammengefasst) nicht zu eindeutigen und vertrauenswürdigen Resultaten führen.

Auf der anderen Seite ist es mit dem hier vorgestellten Ansatz möglich, prozessorientierte hydrologische Simulationen durchzuführen, ohne dass dafür Detailkenntnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung oder des verwendeten Modellsystems PREVAH nötig sind. Dadurch eröffnet sich der Zugang zu einer völlig anderen Herangehensweise an die Hochwasserabschätzung, welche die Gebietshydrologie in ihrer zeitlichen und räumlichen Differenzierung erfasst. Bei der Abschätzung in ungemessenen Gebieten ist dabei von besonderem Vorteil, dass die Vorgeschichte (Wetterverlauf) der einzelnen Hochwassereignisse explizit berücksichtigt wird. Zudem eröffnet sich dank Vorliegen der kompletten simulierten Ganglinie des ungemessenen Gebietes beispielsweise die Möglichkeit, Analysen zu seltenen Direktabflussmengen vorzunehmen; dieser Punkt wird im folgenden Kapitel 12 noch genauer untersucht werden. Stärker auf die Forschung ausgerichtete Anwendungs- und Weiterentwicklungsmöglichkeiten werden in Kapitel 13 vorgestellt.

Abschliessend muss mit Nachdruck festgehalten werden, dass die mit dem vorliegenden Modellsystem gemachten Schätzwerte für seltene Hochwasserabflüsse ebensowenig wie diejenigen anderer Verfahren ohne kritische Beurteilung verwendet werden dürfen. Auch diesbezüglich hat das obige Fallbeispiel gezeigt, dass mit Hilfe von Expertenwissen von Fall zu Fall abzuwagen ist, wie die Resultate eingeordnet und interpretiert werden müssen. Soll der Anwenderkreis ausgedehnt werden, wären dazu gegebenenfalls noch verbindliche Richtlinien oder Regeln auszuarbeiten. Es darf aber gehofft werden, dass die bisherigen Grundlagen zur Hochwasserabschätzung in ungemessenen Einzugsgebieten mit dem hier vorgestellten neuen Schätzverfahren eine wesentliche Erweiterung erfahren.

Kapitel 12

Anwendung auf Volumina des Direktabflusses

An existing procedure for separation of the direct runoff component is introduced and adjusted to the conditions of the application area. Direct discharge volumes of rare events are then analysed and compared for observation as well as for calibrated and regionalised simulation, followed by three practical applications: Firstly, enveloping curves are estimated for maximum direct discharge volumes, secondly, maximum volumes of 1-, 2-, 5- and 10-day-events are analysed, and thirdly, direct discharge volumes of the annual peak flow events are investigated.

Ein bestehendes Verfahren zur automatischen Abtrennung des Direktabflusses wird vorgestellt und auf die Bedingungen des Anwendungsbereiches angepasst. Es folgen Auswertungen seltener Direktabflussvolumina von Beobachtung sowie von kalibrierter und regionalisierter Simulation, welche in drei praktische Anwendungen umgesetzt werden: Erstens werden Hüllkurven für maximale Direktabflussvolumina geschätzt, zweitens werden maximale Direktabflussvolumina von 1, 2, 5 und 10 Tagen Dauer betrachtet, und drittens erfolgen Auswertungen bezüglich Direktabflussvolumina der jährlichen Spitzenabflussereignisse.

12.1 Ziel und Aufbau

Wie schon in der Einleitung erläutert, besteht ein wesentlicher Vorteil des hier ausgearbeiteten Modellsystems darin, dass nicht alleine die Spitzenabflusswerte, sondern alle Abflusswerte des Simulationszeitraums kontinuierlich in stündlicher Auflösung zur Verfügung stehen. Somit können nicht nur die simulierten Hochwasserabflüsse bestimmt und extrapoliert werden, sondern auch die Direktabflussvolumina der simulierten Hochwasserereignisse. Diese Größe ist beispielsweise für die Bemessung von Rückhalteräumen oder zur Abschätzung des Geschiebetransports von grosser praktischer Bedeutung (siehe z. B. VISCHER UND HUBER, 2002), kann aber durch bestehende Ansätze nur sehr ungenau geschätzt werden. Ob sich das entwickelte Modellsystem zur Abschätzung seltener Direktabflussvolumina eignet und eine genügende Genauigkeit besitzt, soll in diesem Kapitel abgeklärt werden.

Nach Erläuterung und Diskussion einer Methodik zur automatischen Abtrennung der Direktabflüsse (Abschnitt 12.2) werden die Resultate von drei Betrachtungsweisen diskutiert: Als erstes richtet sich der Fokus auf die grössten jährlichen Direktabflussvolumina, aus welchen unter anderem Hüllkurven abgeleitet werden können; weiter interessiert dabei, ob die Bereitschaft von Gebieten zur Bildung unter- oder überdurchschnittlich grosser Direktabflussvolumina ein räumliches Muster zeigt (Abschnitt 12.3.1). Als zweites werden die jährlich grössten 1-, 2-, 5- und 10-täglichen Direktabflussvolumina untersucht, welche in der Praxis oft als Grundlage einer Bemessung dienen; für sie werden ebenfalls Umhüllende hergeleitet (Abschnitt 12.3.2). Die dritte Auswertung befasst sich schliesslich mit den Direktabflussvolumina der jährlich grössten Spitzenabflussereignisse, was unter anderem Rückschlüsse auf die Plausibilität des Modells im Hochwasserbereich erlaubt (Abschnitt 12.3.3).

Die aus der Beobachtung abgeleiteten Direktabflusswerte dienen in allen Betrachtungen als Referenz. Sie werden anschliessend mit den Resultaten verglichen, welche mit kalibrierten und regionalisierten Parametersätzen simuliert wurden. Damit soll ermittelt werden, ob das Modellsystem für den Einsatz im Bereich seltener Direktabflussvolumina geeignet ist. Konkrete Empfehlungen für die Anwendung werden in einem abschliessenden Fazit abgegeben (Abschnitt 12.4).

12.2 Automatische Abtrennung des Direktabflusses

12.2.1 Methodik

Für die Anwendung im Rahmen dieser Arbeit war es notwendig, die Direktabflussvolumina automatisch zu bestimmen, da eine manuelle Auswertung (z. B. BARNES, 1939; siehe auch TALLAKSEN, 1995) von 49 Gebieten mit jeweils 20-jähriger Datenreihe vom Aufwand her nicht durchführbar ist. Deshalb wurde die schnelle Abflusskomponente gemäss NATHAN UND McMAHON (1990B) mit einem Hochpass-

filter vom Gesamtabfluss abgetrennt, wobei Hilfsprogramme von DOHERTY (2003) zur Anwendung kamen. Neben seiner Automatisierbarkeit besitzt das Verfahren den Vorteil, dass keine Niederschlagsdaten benötigt werden. Bezuglich Verwendung digitaler Filter zur Separation von Abflusskomponenten merken NATHAN UND McMAHON (1990B) an, dass dieses Vorgehen zwar nicht physikalisch basiert ist, dass andere Abtrennverfahren aber ebenfalls etwas willkürlich erscheinen (vgl. SZILAGYI, 1999) und im Prinzip immer durch Felduntersuchungen ergänzt werden müssten (ANDERSON UND BURT, 1980). Ohne solche zusätzlichen Beobachtungsdaten kann im Endeffekt also nur die visuelle Interpretation durch den Experten über die Eignung eines Verfahrens entscheiden, und diesbezüglich schneidet die angesprochene automatische Methode gut ab. Im Folgenden wird der mit dem Filter abgetrennte schnelle Abflussanteil als Direktabfluss bezeichnet. Das Betrachtungsintervall wurde unter Berücksichtigung der zu erwartenden Unsicherheiten und der erforderlichen Genauigkeit auf Tagesschritte festgelegt – und nicht auf Stundenschritte wie im Rest dieser Arbeit; um dies hervorzuheben, wird den Bezeichnungen von Beobachtung sowie kalibrierten und regionalisierten Simulationen jeweils der Index "d" hinzugefügt.

Entscheidend für eine plausible Abtrennung des Direktabflusses ist die Einstellung des Filterparameters α , welcher das Verhalten des Basisabflusses gegenüber dem Gesamtabfluss charakterisiert. DOHERTY (2003) empfiehlt für α Werte im Bereich von 0.900 bis 0.975; für die in dieser Arbeit betrachteten Einzugsgebiete zeigten bei Tagesabflüssen Werte von 0.950 bis 0.975 gute visuelle Ergebnisse (für Stundenabflüsse wären hingegen höhere Werte zwischen 0.995 und 0.999 zu empfehlen). Eine Schwierigkeit der Anwendung im nordalpinen Raum (schweizerisches Rheineinzugsgebiet bis Basel) besteht darin, dass sehr unterschiedliche Abflussregimes auftreten – denn der Einfluss von Schmelzwasser aus Schnee und Eis erschwert eine einheitliche Abtrennung des Direktabflusses (TALLAKSEN, 1995). Um die Methodik trotz der unterschiedlichen Regimes vergleichbar zu halten, wurde ein einheitlicher Wert $\alpha = 0.95$ gewählt, was am unteren Rand des plausiblen Bereichs liegt und zu eher geringen Direktabflusswerten führt. Damit ist aber eine Anwendung auf pluvial, nival und glazial geprägte Einzugsgebiete möglich; **Abbildung 12.1** illustriert die Ergebnisse der Abtrennung für drei Beispielgebiete.

Mit der abgetrennten schnellen Abflusskomponente wird dann folgendermassen verfahren: Zuerst werden die einzelnen Direktabflussereignisse abgegrenzt, und zwar jeweils als Abschnitt zwischen zwei Zeitpunkten ohne Direktabfluss. Anschliessend werden Volumen, Dauer und Schwerpunkt aller Direktabflussereignisse bestimmt. Zur Auswertung (siehe folgenden Abschnitt) werden dann zwei verschiedene Grössen betrachtet:

- *Maximale jährliche Volumina*: Pro Jahr wird das grösste Direktabflussvolumen (HV_a) ermittelt, wobei der Schwerpunkt die zeitliche Zuordnung bestimmt. Diese Werte können wie Spitzenabflusswerte in den Bereich seltener Wiederkehrperioden extrapoliert werden.
- *Volumen und Dauer der jährlich grössten Hochwasser*: Für die jährlich grössten Abflussspitzen (HQ_a) wird das dem jeweiligen Ereignis zugeordnete Direktabflussvolumen (HV_{HQ_a}) bestimmt. Damit lässt sich genauer untersuchen, wie gut das Modellsystem die grössten Hochwassereignisse in ihrer Gesamtheit wiedergibt.

Sowohl HV_a wie auch HV_{HQ_a} lassen sich mit Hilfe der Ereignisdauer auf mittlere Tagesvolumina normieren (HV'_a resp. HV'_{HQ_a}). Auf die Güte der extrapolierten Schätzresultate hat dies allerdings nur unerheblichen Einfluss.

Eine interessante Erweiterung der Volumenbetrachtung könnte sein, die von PREVAH ausgegebene Basisabflusskomponente zur Separation der simulierten Abflüsse zu verwenden. Die Basisabflusskomponente der beobachteten Abflussdaten mit könnte dann mit DIFGA (siehe z. B. KÖNIG ET AL., 1994; SCHWARZE ET AL., 1999) abgetrennt werden. Da sowohl PREVAH wie auch DIFGA auf derselben Speicherkonzeption für die langsame Abflusskomponente beruhen (vgl. Kapitel 2.1.4), könnten diese Werte verglichen werden, allerdings mit Einschränkungen, da die Speicherkoefizienten der Simulation automatisch von PREVAH kalibriert werden, für die Beobachtung aber manuell in DIFGA bestimmt werden müssen. Vor allem wegen des grossen Aufwandes wurde in dieser Arbeit auf diese Volumenberechnung verzichtet. Zudem stellt sich insbesondere in schneedominierten und vergletscherten Gebieten das Problem, dass im vorgegebenen Anwendungsgebiet oft keine genügend langen Rezessionsperioden vorhanden sind, anhand welcher die Speicherkoefizienten für die Beobachtung festgelegt werden können (siehe CORTI, 2003).

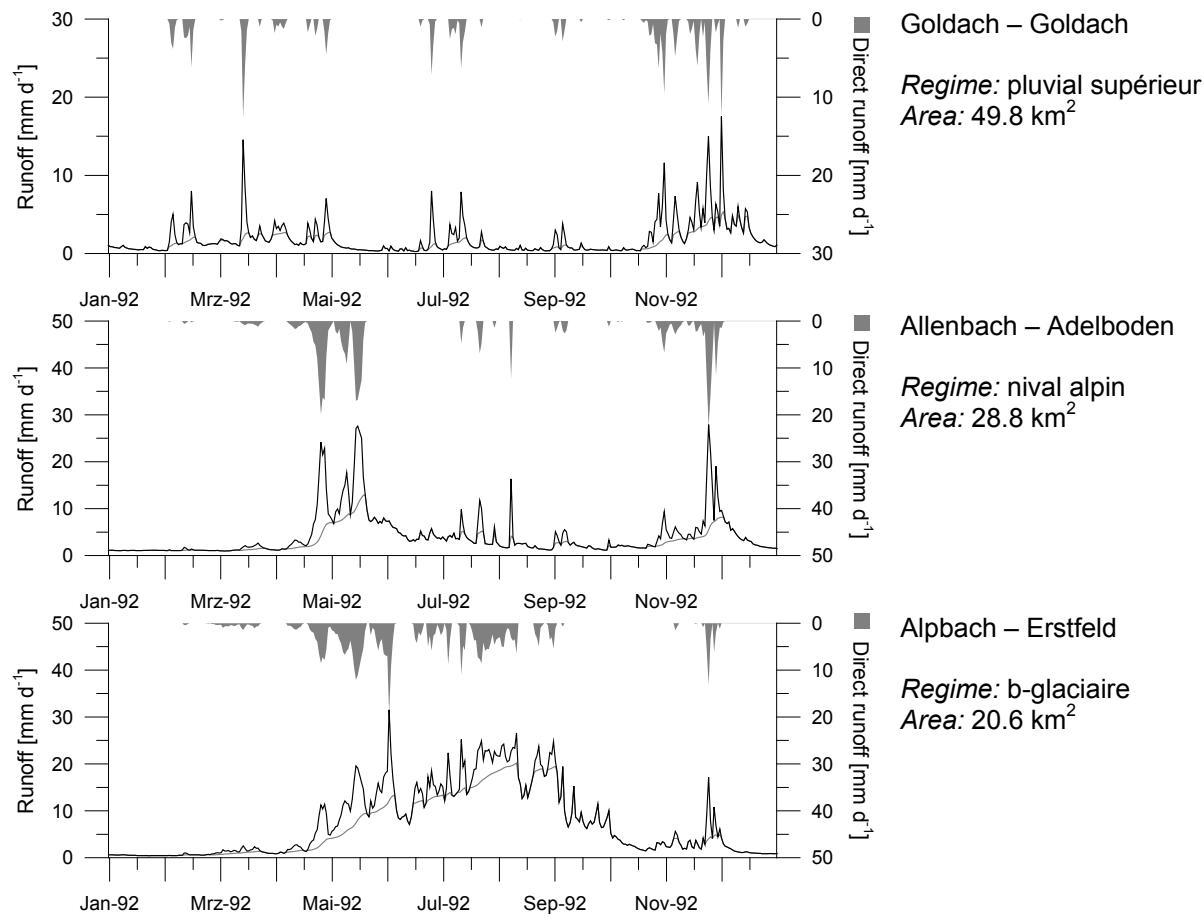


Figure 12.1: Examples for separation of direct flow volumes (grey, drawn from top abscissa) from daily resolved total observed runoff (black) in a pluvial, a nival and a glacial regime; filter value $\alpha = 0.95$.

Abbildung 12.1: Beispiele zur Abtrennung der Direktabflussvolumina (grau, aufgetragen von der oberen Abszisse) vom täglich aufgelösten beobachteten Gesamtabfluss (schwarz) bei pluvialem, nivalem und glazialem Regime; Filterwert $\alpha = 0.95$.

12.2.2 Plausibilität

Bevor die eigentlichen Auswertungen erfolgen können, muss die Plausibilität der Separation für den Vergleich beobachteter und simulierter (sowohl kalibrierter wie auch regionalisierter) Ganglinien aufgezeigt werden. Wie schon im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, kann diese Beurteilung praktisch nur visuell erfolgen. **Abbildung 12.2** zeigt dazu als Beispiel die Direktabflussvolumina für die Emme bei Emmenmatt in täglicher Auflösung. Es sind keine grundsätzlichen Probleme in der Anwendung der vorgestellten Methodik feststellbar, sowohl für die hier gezeigten Mittelwasser- wie auch für die Hochwasserparametersätze. Betrachtet man andere Gebiete, sind allenfalls etwas zu gering (z. B. Chli Schliere–Alpnach) oder zu hoch (z. B. Murg–Murgenthal, Sorne–Delémont) erscheinende Direktabflüsse zu verzeichnen; da Beobachtung und Simulation dabei aber gleich behandelt werden, stellt dies für Vergleiche keine gravierende Einschränkung dar.

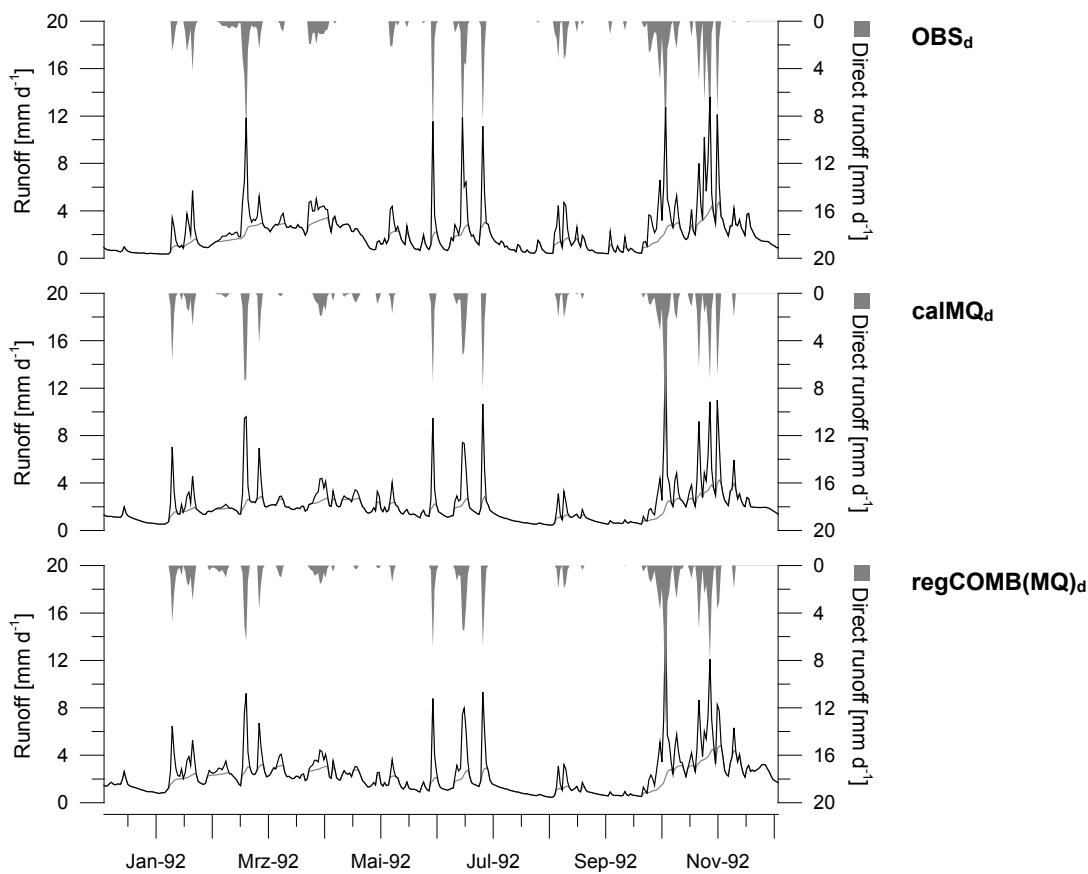


Figure 12.2: Separation of direct runoff (grey, drawn from top abscissa) from total runoff (black) according to NATHAN AND McMAHON (1990B) method for daily values of observation (OBS_d), standard calibrated simulation ($calMQ_d$) and simulation regionalised with corresponding combined approach ($regCOMB(MQ)_d$) for the Emme River at Emmenmatt (area: 443 km^2).

Abbildung 12.2: Abtrennung des Direktabflusses (grau, aufgetragen von der oberen Abszisse) vom Gesamtabfluss (schwarz) gemäss Methode von NATHAN UND McMAHON (1990B) für tägliche Werte von Beobachtung (OBS_d), mittelwasserkalibrierter Simulation ($calMQ_d$) und entsprechender mit kombiniertem Ansatz regionalisierter Simulation ($regCOMB(MQ)_d$) am Beispiel der Emme bei Emmenmatt (Fläche: 443 km^2).

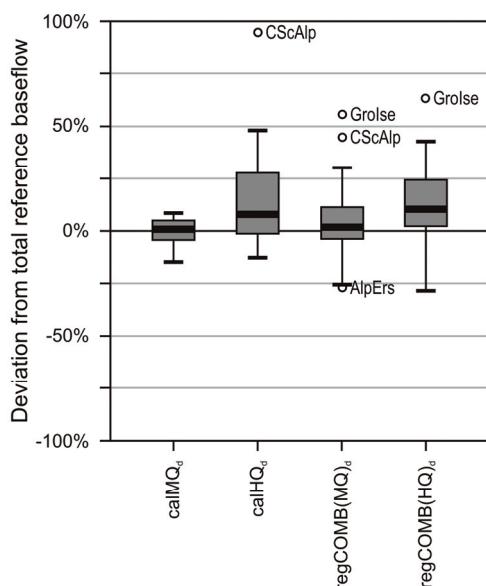


Figure 12.3: Mean annual deviation from reference (observation) baseflow volume when using separation according to NATHAN AND McMAHON (1990B) for standard calibration ($calMQ_d$), flood calibration ($calHQ_d$) as well as for combined regionalisation based on standard ($regCOMB(MQ)_d$) and flood calibrated ($regCOMB(HQ)_d$) parameter sets.

Abbildung 12.3: Mittlere jährliche Abweichung im Basisabflussvolumen von der Referenz (Beobachtung) bei Anwendung der Separation nach NATHAN UND McMAHON (1990B) für Mittelwasserkalibrierung ($calMQ_d$), Hochwasserkalibrierung ($calHQ_d$) sowie kombinierter Regionalisierung auf Basis des Mittelwasser- ($regCOMB(MQ)_d$) und des Hochwasserparametersatzes ($regCOMB(HQ)_d$).

Um das Abtrennungsverfahren dennoch grob quantitativ zu bewerten, können die Basisabflussvolumina der verschiedenen Ganglinientypen verglichen werden. Für die Emme bei Emmenmatt wird für die Beobachtung ein jährliches Basisabflussvolumen von 1'044 mm errechnet, für die auf Mittelwasser kalibrierte Simulation (calMQ_d) sind es praktisch übereinstimmend 1045 mm a^{-1} ; die regionalisierte Simulation (Mittelwasservariante, $\text{regCOMB}(MQ)_d$) erreicht etwas höhere 1'105 mm a^{-1} , was jedoch lediglich einer Abweichung von 6% entspricht. **Abbildung 12.3** fasst die Abweichungen gegenüber dem aus der Beobachtung abgetrennten Direktabflussvolumen für alle 49 Gebiete der Priorität A zusammen; die mediane Abweichung gegenüber der Referenz beträgt für calMQ_d dabei lediglich +4.2%. Für $\text{regCOMB}(MQ)_d$ sowie für die auf der Hochwasserkalibrierung basierenden Simulationen (kalibriert: calHQ_d , regionalisiert: $\text{regCOMB}(HQ)_d$) sind die medianen Abweichungen mit +7.8% bis +12.1% etwas grösser, aber durchaus noch akzeptabel. Die Hochwasservarianten weisen dabei eine merklich grössere Streuung der Fehler auf.

Für den hier angestrebten Überblick scheint die vorgeschlagene Methodik zur Ganglinienseparation ausreichend genau; zudem ist sie einheitlich und objektiv und somit besonders für Vergleiche zwischen verschiedenen Gebieten und zwischen Beobachtung und Simulationen geeignet. Es muss aber angemerkt werden, dass für die Betrachtung von einzelnen Gebieten unbedingt detailliertere Analysen erfolgen sollten, von welchen genauere Resultate zu erwarten sind (siehe z. B. FEDERER, 2004).

Ergänzend sei hier noch auf den Zusammenhang zwischen dem jährlich grösstem Direktabflussvolumen (HV_a) und dem Direktabflussvolumen des jährlich grössten Spitzenabflussereignisses (HV_{HQa}) hingewiesen: Für die Beobachtung (OBS_d) besteht diesbezüglich in 43% der Fälle eine Übereinstimmung, für Kalibrierungen und Regionalisierungen (sowohl Mittelwasser- wie auch Hochwasservarianten) in jeweils 48% bis 49% der Fälle. Dabei kann eine signifikante negative Korrelation mit der mittleren Gebietshöhe festgestellt werden, die HV_a entsprechen also bei zunehmender mittlerer Höhe seltener den HV_{HQa} ; für die Beobachtung wird ein entsprechender Korrelationskoeffizient von $r_{xy} = -0.67$ gefunden. Dies weist auf unterschiedliche Bedingungen bei der Hochwasserentstehung hin, kann zum Teil aber auch durch Unsicherheiten in der Ganglinienseparation bedingt sein. FEDERER (2004) stellte im Mittel eine etwas höhere Übereinstimmung zwischen den HV_a und den HV_{HQa} fest, wobei er bezüglich der Jahreshöchstabflüsse nicht nur Spitzenwerte, sondern auch Ereignisse mit dem grössten 1-, 2- und 3-Tagesabfluss betrachtete. Für Extremwertstatistiken der Direktabflussvolumina kann aber gezeigt werden, dass sich die Extrapolationsresultate für 100-jährliche Volumina der jährlichen Spitzenabflussereignisse ($HV_{HQa,100}$) nicht stark von denjenigen unterscheiden, welche für 100-jährliche Volumina ($HV_{a,100}$) berechnet werden. Dies liegt einerseits daran, dass die HV_{HQa} und HV_a wie beschrieben zum Teil übereinstimmen, andererseits spricht es für Anwendbarkeit und Aussagekraft der hier entwickelten Methodik.

12.3 Resultate

12.3.1 Grösste jährliche Direktabflussvolumina

Als erstes wird nun versucht, die maximalen jährlichen Direktabflussvolumina (HV_a) auszuwerten und damit Aussagen zu den grössten möglichen Volumina zu erreichen. Um auch Aussagen zu seltenen Direktabflussvolumina zu erhalten, werden die HV_a der 20-jährigen Periode 1984–2003 mit Hilfe von HQ-EX (WASY, 1997) auf eine 100-jährliche Wiederkehrperiode extrapoliert. Eine solche Schätzung liegt gemäss DVWK (1999) strenggenommen ausserhalb des zulässigen Bereiches von 60 Jahren (3 mal Anzahl Messjahre), die grosse Verbreitung der 100-jährlichen Wiederkehrperiode als Referenzwert rechtfertigt aber diese Überschreitung; eine kritische Betrachtung dazu erfolgte bereits in Kapitel 4.2.3. Wie schon bei der Spitzenwertbetrachtung kommt stets dieselbe einheitliche Schätzmethodik zum Zuge, nämlich die erste Extremalverteilung mit Parameterschätzung durch wahrscheinlichkeitsgewichtete Momente (E1-WGM); die Gründe dafür wurden bereits in Kapitel 4.2.3 erläutert.

Schätzfehler

Mit welcher Genauigkeit lässt sich nun ein 100-jährliches Direktabflussvolumen (HV_{100}) schätzen, wenn als Basis die mit Kalibrierung oder Regionalisierung simulierten Jahreshöchstwerte (HV_a) verwendet werden? **Abbildung 12.4** zeigt die entsprechenden Auswertungen anhand der 49 Einzugsgebiete der Priorität A, für welche die Referenzwerte aus langjährigen und zuverlässigen Messreihen bestimmt werden können. Die Bewertung der Regionalisierungsresultate erfolgte unter Anwendung des Jack-Knife-Verfahrens (vgl. Kapitel 8.7).

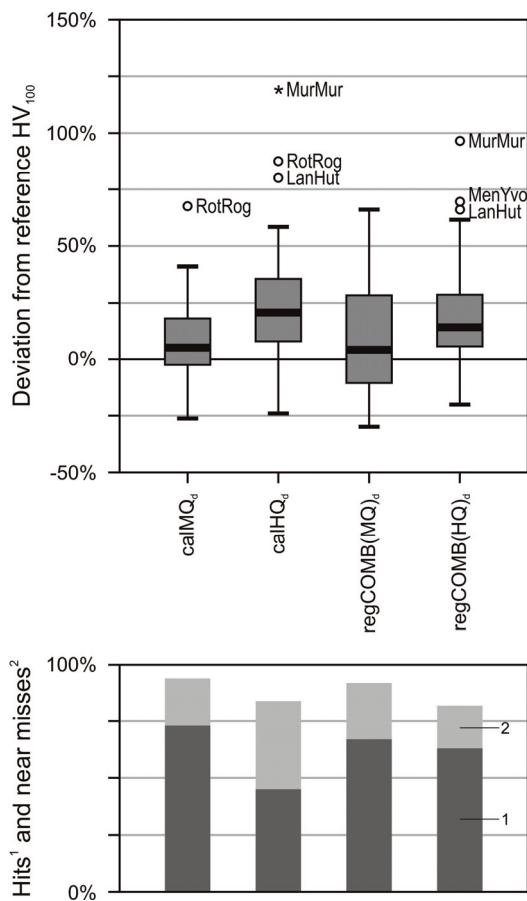


Figure 12.4: Top: Deviation of maximum direct discharge volume with return period 100 years (HV_{100}) from observation for standard calibration ($calMQ_d$), flood calibration ($calHQ_d$), combined regionalisation of standard calibrated parameters ($regCOMB(MQ)_d$) and combined regionalisation for flood calibrated parameters ($regCOMB(HQ)_d$), based upon 49 priority A catchments. Bottom: Percentage of hits and near misses for the respective estimations.

Abbildung 12.4: Oben: Abweichung der 100-jährlichen maximalen Abflussvolumina (HV_{100}) von der Beobachtung für Mittelwasserkalibrierung ($calMQ_d$), Hochwasserkalibrierung ($calHQ_d$), kombinierte Regionalisierung der Mittelwasserparameter ($regCOMB(MQ)_d$) und kombinierte Regionalisierung der Hochwasserparameter ($regCOMB(HQ)_d$) auf Grundlage von 49 Einzugsgebieten der Priorität A. Unten: Anteil Treffer und knapper Fehlschätzungen für die entsprechenden Schätzungen.

¹ Hit: HV_{100} extrapolated from simulation lies within 90%-confidence interval of reference (observation) HV_{100}

² Near miss: 90%-confidence intervals of HV_{100} extrapolated from simulation and from observation overlap

Vorerst kann festgehalten werden, dass die medianen Schätzfehler allesamt moderat sind und trotz einer leichten Tendenz zur Überschätzung insgesamt ein sehr gutes Resultat darstellen. Mit der Mittelwasserkalibrierung erfolgt eine leichte Überschätzung des HV_{100} ($calMQ_d$, +7.4%), bei der Hochwasserkalibrierung fällt die Überschätzung etwas deutlicher aus ($calHQ_d$, +22.8%). Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Hochwasserkalibrierung typischerweise die Spitzenwerte und somit auch die Rezessionsäste nach oben korrigiert werden, wodurch sich das Direktabflussvolumen vergrössert. Sehr gut schneidet die kombinierte Regionalisierung auf Basis des mittelwasserkalibrierten Parametersatzes ab ($regCOMB(MQ)_d$); mit +5% zeigt sie einen äusserst geringen medianen Fehler. Dabei hält sich auch der Streubereich der Fehler in vernünftigen Grenzen (-28.8% bis +67.2%), und es sind keine Ausreisser oder Extremwerte zu verzeichnen. Für die kombinierte Regionalisierung der Hochwasserparameter ist eine etwas höhere Überschätzung ($regCOMB(HQ)_d$, +14.6%) zu verzeichnen; sie fällt aber geringer aus als diejenige der zugrundeliegenden Hochwasserkalibrierung ($calHQ_d$).

Sehr gute Resultate können bezüglich der getroffenen Schätzungen ("hit", Schätzung liegt im statistischen 90%-Konfidenzintervall der extrapolierten Beobachtung) und der knappen Fehlschätzungen ("near miss", die statistischen 90%-Konfidenzintervalle der aus Beobachtung und aus Simulation extrapolierten Schätzungen überschneiden sich) festgestellt werden (**Abbildung 12.4**, unten). Die Mittelwasserkalibrierung ($calMQ_d$, 73% Treffer, 20% knappe Fehlschätzungen) und die darauf aufbauende kombinierte Regionalisierung ($regCOMB(MQ)_d$, 67% Treffer, 25% knappe Fehlschätzungen) erzielen auch hier die besten Resultate.

Insgesamt scheint es plausibel, dass die Abschätzung des Direktabflussvolumens besser gelingen kann, wenn das Modell eher auf den Verlauf der Ganglinie (Mittelwasser) denn auf die Spitzenwerte (Hochwasser) kalibriert ist. Die entsprechende Regionalisierungsvariante ($regCOMB(MQ)_d$) ist für die Schätzung grosser Direktabflussvolumina in ungemessenen Gebieten folglich als beste zu empfehlen.

Für die festgestellten Schätzfehler eines aus einer Simulation extrapolierten HV_{100} ist weder mit der mittleren Gebietshöhe noch mit der Gebietsgrösse eine signifikante Korrelation auszumachen. Ein Muster wird aber erkennbar, wenn man HV'_{100} betrachtet (**Tabelle 12.1**); dieser Wert wurde wie in Abschnitt 12.2.1 erläutert aus den maximalen jährlichen Direktabflussvolumina extrapoliert, welche zuvor mit Hilfe der jeweiligen Ereignisdauer auf Tagesmittelwerte normiert wurden. In Gebieten mit glazialem und glazio-nivalem Regime treten für diese Grösse deutliche Überschätzungen auf, was ein

Hinweis auf die Unsicherheiten der Ganglinienseparation unter Einfluss von Gletscherschmelze ist. Bei nivalen und nivo-pluvialen Regimes hingegen kann keine eindeutige Tendenz beobachtet werden.

Table 12.1: Median error of extrapolated 100-year annual maximum direct discharge volumes (average daily volumes: HV'_{100}) for standard calibration ($calMQ_d$), flood calibration ($calHQ_d$), as well as combined regionalisation from standard ($regCOMB(MQ)_d$) and from flood calibration ($regCOMB(HQ)_d$), distinguished by regime type.

Tabelle 12.1: Mediane Fehler der extrapolierten 100-jährlichen grössten Abflussvolumina (mittlere Tagesvolumina: HV'_{100}) für Mittelwasserkalibrierung ($calMQ_d$), Hochwasserkalibrierung ($calHQ_d$), sowie kombinierte Regionalisierung auf Basis der Mittelwasserparameter ($regCOMB(MQ)_d$) und der Hochwasserparameter ($regCOMB(HQ)_d$), unterschieden nach Regimetyp.

	$calMQ_d$	$calHQ_d$	$regCOMB(MQ)_d$	$regCOMB(HQ)_d$
Pluvial regimes (17)	-3.8%	+22.7%	-12.0%	+10.6%
Nival and nivo-pluvial regimes (24)	-13.4%	+19.7%	-8.8%	+15.1%
Glacial and glacio-nival regimes (8)	+25.2%	+59.4%	+16.8%	+21.3%
All catchments (49)	-3.8%	+23.3%	+0.2%	+13.5%

Anwendung: Hüllkurven für seltene Direktabflussvolumina

Mit den extrapolierten 100-jährlichen Direktabflussmengen (HV_{100}) aus 49 Einzugsgebieten der Priorität A werden nun Hüllkurven der Abflussvolumina erstellt. Dazu wird die im Modell GIUB96 (WEINGARTNER, 1999) verwendete Methodik für Hochwasserabflüsse auf Direktabflussvolumina übertragen, wobei aber nicht die tatsächlichen Höchstwerte (HHV), sondern die extrapolierten 100-jährlichen Werte (HV_{100}) als Grundlage dienen. Diese Abweichung vom üblichen Vorgehen beim Erstellen von Hüllkurven ist dadurch bedingt, dass das hier verwendete Datenkollektiv nur für die 20 Jahre von 1984 bis 2003 betrachtet werden kann und zudem eine im Vergleich zu GIUB96 wesentlich geringere Anzahl von Messreihen umfasst. Um trotzdem Aussagen über seltene Extremwerte machen zu können, werden die extrapolierten Reihen ausgewertet; die Hüllkurven sind dementsprechend mit Vorsicht zu interpretieren.

Um zu vermeiden, dass Ausreisser das Resultat stark beeinflussen, wird dem Ansatz von KREPS (1952) folgend eine 90%-Hüllkurve hergeleitet. Als Grundlage dient eine von der Gebietsfläche F abhängige Regression für das gesamte Datenkollektiv:

$$HV_{max,regr} = a_{HVmax,regr} \cdot F^b \quad \text{Gleichung 12.1}$$

Nach Schätzung der Parameter $a_{HVmax,regr}$ und b (siehe BAHRENBERG ET AL., 1992) wird die resultierende Kurve durch Anpassung des ursprünglich geschätzten Achsenabschnitten $a_{HVmax,regr}$ zu $a_{HVmax,90\%}$ derart nach oben verschoben, dass sie 90% der Daten umfasst:

$$HV_{max,90\%} = a_{HVmax,90\%} \cdot F^b \quad \text{Gleichung 12.2}$$

In den Resultaten war zu erkennen, dass die höchsten Direktabflussvolumina bei zunehmender Gebietsgröße etwas geringer ausfielen, als dies das ermittelte $HV_{max,90\%}$ vorgab. Zwecks einer genaueren Schätzung der Hüllkurven wurde das Datenkollektiv mit einer Gebietsgröße von 100 km^2 als Schwellenwert zweigeteilt – dasselbe Vorgehen notabene, welches WEINGARTNER (1999) für Hüllkurven der Hochwasserabflüsse verwendete. Im vorliegenden Datensatz von 49 Einzugsgebieten weisen 25 eine Gebietsgröße von weniger als 100 km^2 auf, 24 eine von mehr als 100 km^2 ; diese Verteilung ist ideal zur Schätzung von zwei getrennten Werten für $a_{HVmax,90\%}$.

Die hohen Korrelationskoeffizienten von 0.89 bis 0.93 (Tabelle 12.2) sprechen für eine gut abgestützte Beziehung zwischen der Gebietsfläche und den auf 100 Jahre extrapolierte Direktabflussvolumina (HV_{100}). Vor allem aber ist für die Beobachtung und die verschiedenen Simulationen eine grosse Übereinstimmung zwischen den für a und b geschätzten Werten festzustellen. Beim nach Gebietsfläche differenzierten $a_{HVmax,90\%}$ fällt auf, dass die Werte für Gebiete $\leq 100 \text{ km}^2$ etwas stärker voneinander abweichen, für Gebiete $> 100 \text{ km}^2$ aber mit Ausnahme der Hochwasserkalibrierung ($calHQ_d$) nahezu identisch sind. Sowohl die kalibrierte wie auch die regionalisierte Modellvariante kann somit zur Schätzung von Hüllkurven verwendet werden, ohne dass mit grösseren Qualitätseinbussen gerechnet

werden muss; insbesondere für grosse Gebiete sind gute Resultate zu erwarten. Etwas überraschend ist, dass die Werte für die kombinierte Regionalisierung der Mittelwasserparameter ($\text{regCOMB}(\text{MQ})_d$) geringfügig stärker von denjenigen für die Beobachtung abweichen. Da diese Regionalisierungsvariante aber wie oben gesehen kleinere Extrapolationsfehler aufweist als die kombinierte Regionalisierung der Hochwasserparameter ($\text{regCOMB}(\text{HQ})_d$) (vgl. **Abbildung 12.4**), ist sie grundsätzlich vertrauenswürdiger. Weiter ist anzumerken, dass die Abweichungen in a und b (**Tabelle 12.2**) absolut betrachtet gering ausfallen. Bei den kalibrierten Modellvarianten ist hier in Übereinstimmung mit den vorher präsentierten Resultaten der Mittelwasserparametersatz (calMQ_d) zu bevorzugen.

Table 12.2: Parameters a and b for calculation of 90% envelope curve ($\text{HV}_{\max,90\%}$) and the regression curve ($\text{HV}_{\max,\text{regr}}$) of direct discharge volumes from catchment area F. The Pearson correlation coefficient r_{xy} refers to the respective regression model. Daily resolution hydrographs examined: observation (OBS_d), standard (calMQ_d) and flood calibration (calHQ_d), combined regionalisation from standard ($\text{regCOMB}(\text{MQ})_d$) and from flood calibration ($\text{regCOMB}(\text{HQ})_d$).

Tabelle 12.2: Parameter a und b zur Ermittlung der 90%-Hüllkurve ($\text{HV}_{\max,90\%}$) und der Regressionskurve ($\text{HV}_{\max,\text{regr}}$) für Direktabflussvolumina in Abhängigkeit der Einzugsgebietsfläche F. Der Korrelationskoeffizient r_{xy} bezieht sich auf das entsprechende Regressionsmodell. Betrachtete Ganglinien in täglicher Auflösung: Beobachtung (OBS_d), Mittelwasser- (calMQ_d) und Hochwasserkalibrierung (calHQ_d), kombinierte Regionalisierung für Mittelwasser ($\text{regCOMB}(\text{MQ})_d$) und Hochwasser ($\text{regCOMB}(\text{HQ})_d$).

	$a_{\text{HV}_{\max,90\%}}$		$a_{\text{HV}_{\max,\text{regr}}}$	b	r_{xy}
	$F \leq 100 \text{ km}^2$	$F > 100 \text{ km}^2$			
OBS_d	$0.58 \cdot 10^6$	$0.44 \cdot 10^6$	$0.29 \cdot 10^6$	0.84	0.89
calMQ_d	$0.55 \cdot 10^6$	$0.43 \cdot 10^6$	$0.30 \cdot 10^6$	0.85	0.91
calHQ_d	$0.54 \cdot 10^6$	$0.48 \cdot 10^6$	$0.30 \cdot 10^6$	0.87	0.93
$\text{regCOMB}(\text{MQ})_d$	$0.47 \cdot 10^6$	$0.43 \cdot 10^6$	$0.26 \cdot 10^6$	0.88	0.92
$\text{regCOMB}(\text{HQ})_d$	$0.51 \cdot 10^6$	$0.44 \cdot 10^6$	$0.30 \cdot 10^6$	0.87	0.93

Die resultierenden Hüllkurven zeigt **Abbildung 12.5**. Mit Ausnahme des etwas geringeren Unterschiedes zwischen kleinen ($F \leq 100 \text{ km}^2$) und grossen ($F > 100 \text{ km}^2$) Einzugsgebieten bei $\text{regCOMB}(\text{MQ})_d$ kann auch optisch eine gute Vergleichbarkeit von Beobachtung, Kalibrierung und Regionalisierung festgestellt werden.

Ausgehend von diesen Ergebnissen kann das bestehende Modellsystem nun dazu verwendet werden, um anhand aller 140 erfolgreich kalibrierten Einzugsgebiete eine besser abgestützte Umhüllende für die nordalpine Schweiz herzuleiten. Dazu werden von den 49 Gebieten mit langen und zuverlässigen Messreihen (Priorität A) die aus der Beobachtung abgeleiteten Direktabflusskennwerte verwendet. Für die verbleibenden 91 Gebiete (Priorität B) wird hingegen eine 20-jährige Abflussreihe 1984–2003 simuliert, um damit die zum Teil recht kurzen Messreihen zu erweitern; die Simulation wird dann ebenfalls bezüglich der jährlich grössten Direktabflussmengen ausgewertet. Die aus 49 beobachteten und 91 simulierten Gebieten extrapolierten 100-jährlichen Werte ergeben dann eine besser abgestützte Hüllkurve für maximal zu erwartende Direktabflussvolumina. Als Modellgrundlage werden die auf Mittelwasser kalibrierten Parametersätze verwendet.

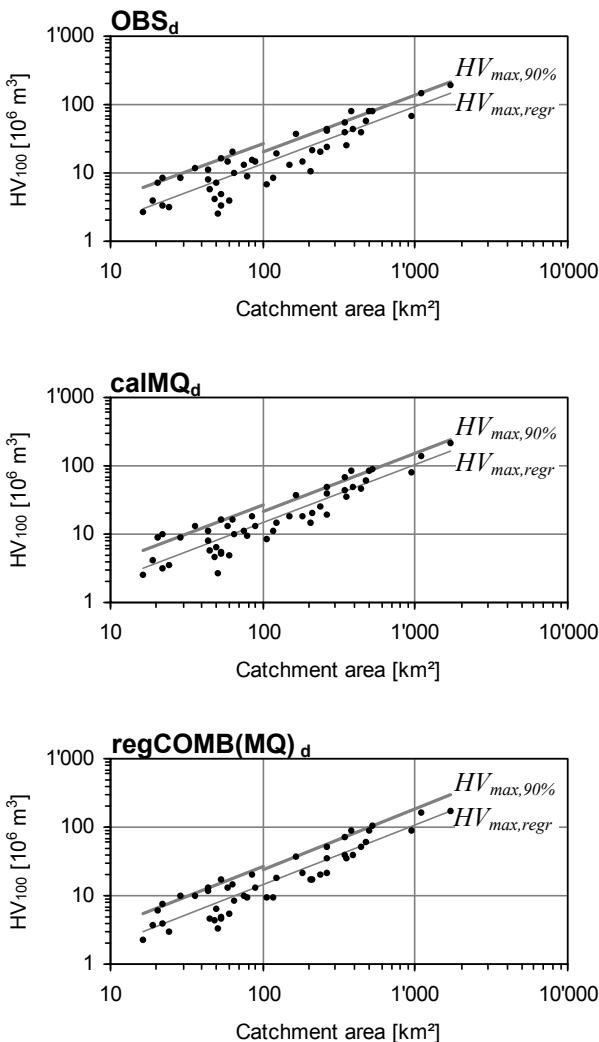


Figure 12.5: 90% envelope curves of 100-year return period direct discharge volumes ($HV_{\max,90\%}$) and corresponding regression lines ($HV_{\max,\text{regr}}$) for observation (OBS_d), standard calibration ($calMQ_d$) and combined regionalisation of standard model parameters ($regCOMB(MQ)_d$) for data from 49 priority A catchments. Respective parameter values are found in **Table 12.2**.

Abbildung 12.5: 90%-Hüllkurven für 100-jährliche Direktabflussvolumina ($HV_{\max,90\%}$) und entsprechende Regressionsgeraden ($HV_{\max,\text{regr}}$) für Beobachtung (OBS_d), Mittelwasserkalibrierung ($calMQ_d$) sowie für kombinierte Regionalisierung der Mittelwasserparameter ($regCOMB(MQ)_d$) auf Basis von 49 Einzugsgebieten der Priorität A. Die entsprechenden Parameterwerte sind in **Tabelle 12.2** aufgeführt.

Abbildung 12.6 stellt die simulierten Daten samt entsprechender Hüllkurve dar. Auf den ersten Blick scheint die mit einer Regression geschätzte Hüllkurve (**Abbildung 12.6**, oben) eine zu grosse Steigung aufzuweisen, da die Spitzenwerte im Verhältnis zur Regressionsgerade ($HV_{\max,\text{regr}}$) mit zunehmender Gebietsgrösse etwas abflachen. Diesem Umstand wird durch die Zweiteilung der Umhüllenden für Gebiete kleiner und grösser 100 km² aber adäquat Rechnung getragen. Dennoch wurde zusätzlich versucht, visuell eine Umhüllende (HV_{\max}) zu schätzen und $a_{HV_{\max},90\%}$ dann wiederum so zu wählen, dass 90% der Daten erfasst sind (**Abbildung 12.6**, unten). Das Resultat der visuellen Festlegung ist aber wenig befriedigend, da die Kurve stark von Extremwerten beeinflusst wird, welche deutlich über der Hauptpunktewolke liegen. Im Vergleich der beiden Hüllkurven erschien die auf dem Regressionsmodell basierende (**Abbildung 12.6**, oben) geeigneter, sofern sie nicht über den mit Daten belegten Bereich von Einzugsgebietsgrössen hinaus (ca. 2'000 km²) verlängert wird.

Verwendet man anstatt der gemischten Beobachtung und Simulation nur simulierte Werte aus allen 140 Gebieten, weichen die für a und b gefundenen Werte der Umhüllenden im Übrigen nur minim (höchstens +/- 0.01) von den hier gefundenen ab, was die gute Leistung der Simulation bestätigt. Entsprechend kann in der **Abbildung 12.6** auf eine graphische Unterscheidung der Datenpunkte nach Beobachtung und Simulation verzichtet werden.

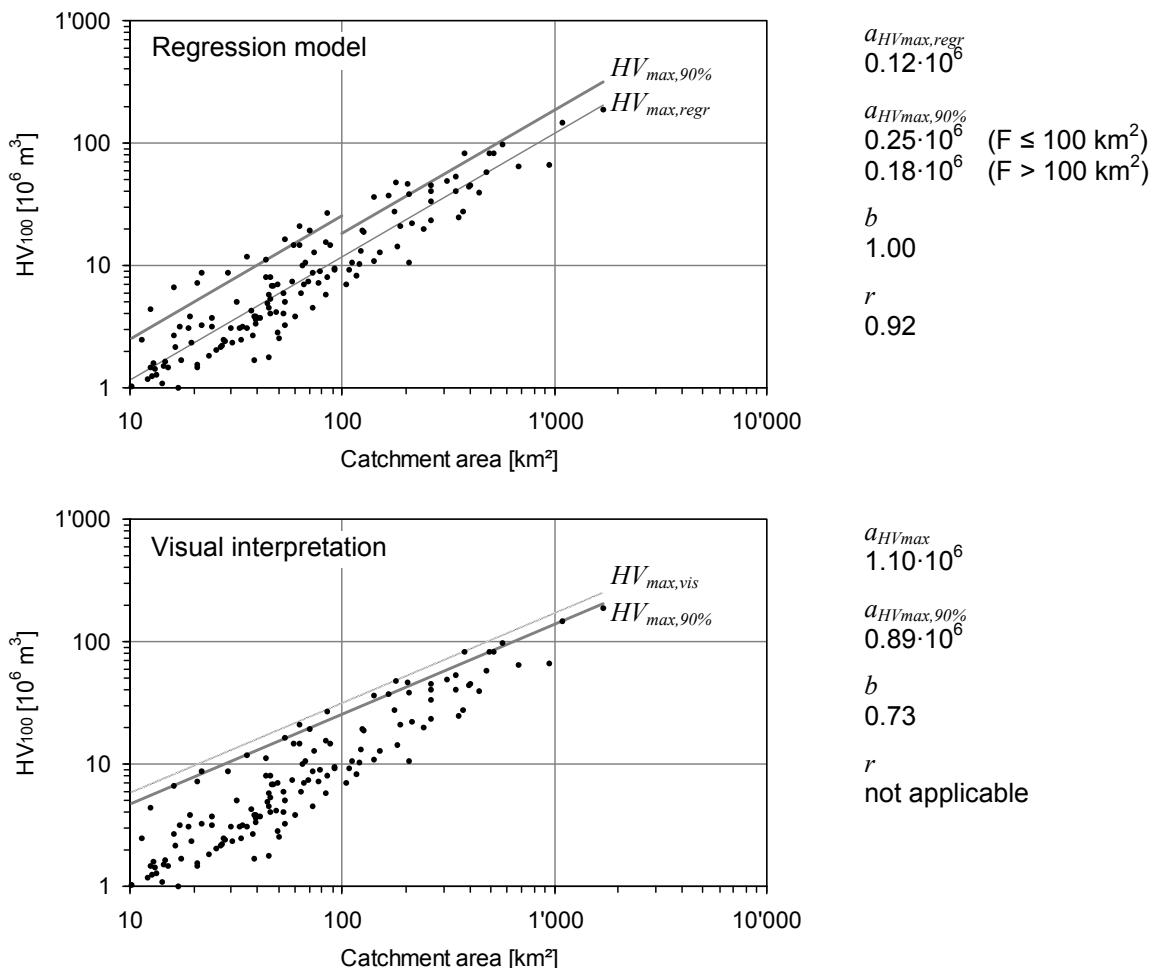


Figure 12.6: 90% envelope curve of 100-year return period direct discharge volumes ($HV_{\max,90\%}$) and corresponding regression curve ($HV_{\max,\text{regr}}$) for 91 simulated catchments (standard calibration, calMQ_d) and 49 observed catchments, each with reference period 1984–2003 (140 catchments in total). The upper diagram curve was derived from the regression model ($HV_{\max,\text{regr}}$), the lower diagram curve was adjusted from the visually set maximum line ($HV_{\max,\text{vis}}$).

Abbildung 12.6: 90%-Hüllkurve für 100-jährliche Direktabflussvolumina ($HV_{\max,90\%}$) und entsprechende Regressionsgerade ($HV_{\max,\text{regr}}$) für 91 simulierte (Mittelwasserkalibrierung, calMQ_d) und 49 beobachtete Gebiete, jeweils mit Referenzzeitraum 1984–2003 (insgesamt 140 Gebiete). Die Hüllkurve des oberen Diagramms wurde von der Regressionsgeraden ($HV_{\max,\text{regr}}$) abgeleitet, diejenige des unteren Diagramms mit Hilfe der visuell festgelegten Umhüllenden ($HV_{\max,\text{vis}}$) bestimmt.

Räumliche Differenzierung des Einzugsgebietsverhaltens

Mit Hilfe des oben erstellten Regressionsmodells kann versucht werden, das Verhalten der Einzugsgebiete bezüglich seltener Direktabflussvolumina räumlich zu differenzieren. Dazu werden analog zum Vorgehen von KAN (1995) die Residuen (ρ) der 140 betrachteten Einzugsgebiete im Vergleich zum Gesamtmodell berechnet; letzteres bezieht sich hier auf die gesamte nordalpine Schweiz. Ein positives Residuum ρ_i bedeutet, dass das i -te Gebiet ein höheres Direktabflussvolumen aufweist, als aufgrund seiner Einzugsgebietsfläche zu erwarten wäre. Mittels Division durch die Standardabweichung ($s(\rho)$) wird die Abhängigkeit von der Gebietsfläche aufgehoben, und die Residuen werden auf einen neutralen Wertebereich z umgerechnet (siehe auch WEINGARTNER, 1999):

$$z_i = \frac{\rho_i}{s(\rho)}$$

Gleichung 12.3

Mit diesen standardisierten Residuen können nun Gebiete mit ähnlichem Verhalten bezüglich seltener Direktabflussvolumina zu Regionen zusammengefasst werden. Dazu wurden die z_i mit Hilfe der zugehörigen Gebietsschwerpunkte räumlich interpoliert und in fünf Klassen eingeteilt; abweichend zu KAN (1995) wurde hier auch eine Klasse mit durchschnittlichem Verhalten bezüglich Volumina gebildet, welche den Bereich kleiner negativer und positiver standardisierter Residuen umfasst ($-0.25 \leq z \leq 0.25$). Die so klassierte Interpolation wurde mit einem Filter geglättet (für jeden Punkt den Mittelwert eines Umkreises von 5 km Radius) und anschliessend noch von Hand leicht generalisiert. In der resultierenden Karte (**Abbildung 12.7**) lässt sich ein deutliches Muster erkennen: Während der Voralpen- und vor allem der Alpenraum unterdurchschnittliche Direktabflussvolumina zeigen, liegen die entsprechenden Kennzahlen im westlichen und nördlichen Mittelland über dem Durchschnitt. Die zentralen und östlichen Teile von Mittelland und Voralpen zeigen durchschnittliche Volumina. Primär dürfte diese Verteilung dadurch zu erklären sein, dass die Niederschläge mit zunehmender Höhe vermehrt als Schnee fallen und somit nicht am Direktabfluss eines Ereignisses beteiligt sind. Dass ein Zusammenhang zwischen mittlerer Gebietsgröße und standardisiertem Residuum z besteht, belegt **Abbildung 12.8**: Je grösser also die mittlere Höhe eines Gebietes ist, desto geringer ist seine Bereitschaft zur Bildung grosser Hochwasservolumina; der entsprechende Korrelationskoeffizient r_{xy} beträgt -0.55. Die in den zentralen und östlichen Alpen sowie in den Voralpen beobachteten Abweichungen von diesem Muster können einerseits durch die Niederschlagsintensitäten erklärt werden, welche in diesen Regionen überdurchschnittlich stark ausfallen (siehe z. B. JENSEN ET AL., 1997 für Starkniederschläge mit Dauer 24 h), andererseits könnten auch die grösseren Niederschlagsmengen im Sommer eine Rolle spielen (vgl. SCHWARB ET AL., 2001b).

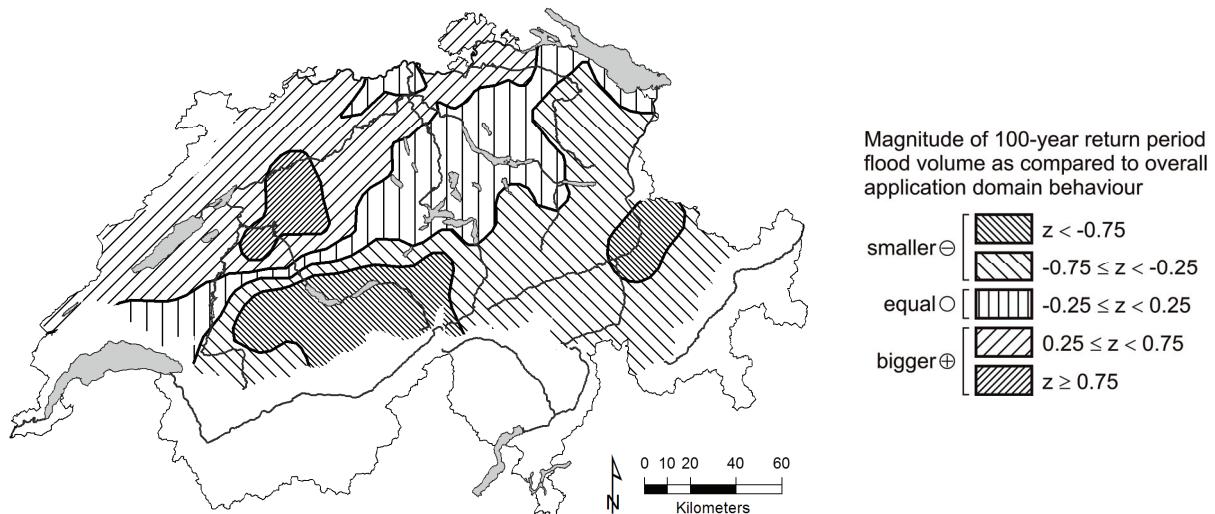


Figure 12.7: Map of standardised residuals z of 100-year return period direct runoff volumes (HV_{100}) from overall regression model. Data: 140 catchments, using observations in 49 of them and simulations in the remaining 90; reference period 1984–2003.

Abbildung 12.7: Karte über die standardisierten Residuen z der 100-jährigen Direktabflussvolumina (HV_{100}) gegenüber dem gesamthaften Regressionsmodell. Datengrundlage: 140 Einzugsgebiete, unter Verwendung von Beobachtungen für 49 davon und von Simulationen für die verbleibenden 90; Bezugszeitraum 1984–2003.

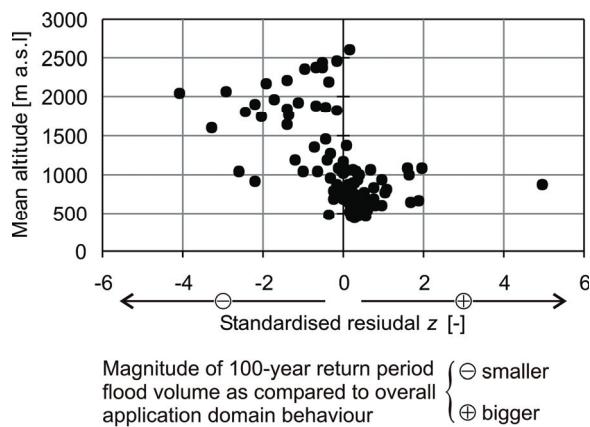


Figure 12.8: Comparison of mean catchment altitude and standardised residuals z of 100-year return period direct runoff volumes (HV_{100}) from overall regression model. Data: 140 catchments, reference period 1984–2003 (see **Figure 12.7**).

Abbildung 12.8: Vergleich der mittleren Gebietshöhen mit den standardisierten Residuen z der 100-jährigen Direktabflussvolumina (HV_{100}) gegenüber dem gesamthaften Regressionsmodell. Datengrundlage: 140 Einzugsgebiete, Bezugszeitraum 1984–2003 (siehe **Abbildung 12.7**).

12.3.2 Jährlich grösste Direktabflussvolumina von 1, 2, 5 und 10 Tagen Dauer

Anstatt wie im vorigen Abschnitt die absolut maximalen jährlichen Direktabflussvolumina zu verwenden, können auch die maximalen Volumina von Ereignissen mit definierter Dauer betrachtet werden. So werden beispielsweise Direktabflussmengen von 1-, 2-, 5- und 10-tägigen Ereignissen in der Praxis verbreitet als Grundlage von Bemessungsaufgaben verwendet. Im Folgenden soll untersucht werden, ob das Modellsystem auch bezüglich dieser Größen fähig ist, plausible Werte zu simulieren; damit wäre wiederum eine Anwendung in Gebieten möglich, für welche nur kurze oder gar keine Messreihen vorliegen.

Ausgehend von den im vorhergehenden Abschnitt gewonnenen Erkenntnissen werden die Simulationen auf Basis der Mittelwasserkalibrierung ($calMQ_d$) und der daraus abgeleiteten kombinierten Regionalisierung ($regCOMB(MQ)_d$) als beste Varianten betrachtet und mit der Beobachtung verglichen. Es wurden die jährlich grössten 1-, 2-, 5- und 10-tägigen Direktabflussvolumina der 20-jährigen Simulationsperiode 1984–2003 bestimmt und auf 100 Jahre Wiederkehrperiode extrapoliert (siehe Kapitel 4.2.3); die Herleitung der entsprechenden 90%-Hüllkurven geschah gemäss Gleichung 12.1 und Gleichung 12.2. Bei der Bestimmung der Hüllkurven erfolgten zwei geringfügige Modifikationen der Methodik: Erstens wurde keine Zweitteilung der Kurve in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche vorgenommen, da sich die Regressionsmodelle für Gebiete mit mehr und mit weniger als 100 km^2 Fläche kaum voneinander unterschieden. Zweitens wurde für die Regressionsmodelle von Beobachtung, Kalibrierung und Regionalisierung jeweils eine einheitliche mittlere Steigung b angenommen, da sich die entsprechenden Werte von 1-, 2-, 5- und 10-Tages-Modell sehr ähnlich waren.

Aus den Parametern der so erhaltenen Regressionsmodelle (**Tabelle 12.3**) ist ersichtlich, dass für die Simulationen stets etwas tiefere Achsenabschnitte (a) resultieren, dass dafür aber die Steigungen (b) etwas grösser sind. In doppelt-logarithmischer Darstellung (**Abbildung 12.9**) zeigen die 90%-Hüllkurven der Mittelwasservarianten von Kalibrierung und Regionalisierung aber einen ähnlichen Verlauf wie diejenigen der Beobachtung; die Modellierung ist also grundsätzlich geeignet, um seltene Volumina von Ereignissen einer definierten Dauer zu schätzen. Beachtet werden sollte, dass die 90%-Umhüllende der 1-Tages-Volumina durch die Simulationen etwas unterschätzt wird – hier dürften die Genauigkeitsgrenzen des ausgearbeiteten Modellsystems erreicht sein. Insofern scheint es vor allem für Schätzungen mehrtägiger und insbesondere absoluter jährlicher Maxima sinnvoll, die Direktabflussvolumina aus Simulationen zu bestimmen, wenn keine langen Messreihen vorliegen.

Table 12.3: Parameters a and b for calculation of 90% envelope curve ($HV_{90\%}$) and the regression curve (HV_{regr}) of 1-, 2-, 5- and 10-day direct discharge volumes from catchment area F. The Pearson correlation coefficient r_{xy} refers to the respective regression model. Daily resolution hydrographs examined: observation (OBS_d), standard calibration ($calMQ_d$) and combined regionalisation from standard calibration ($regCOMB(MQ)_d$).

Tabelle 12.3: Parameter a und b zur Ermittlung der 90%-Hüllkurve ($HV_{90\%}$) und der Regressionskurve (HV_{regr}) für 1-, 2-, 5- und 10-Tages-Direktabflussvolumina in Abhängigkeit der Einzugsgebietsfläche F. Der Pearson-Korrelationskoeffizient r_{xy} bezieht sich auf das entsprechende Regressionsmodell. Betrachtete Ganglinien in täglicher Auflösung: Beobachtung (OBS_d), Mittelwasserkalibrierung ($calMQ_d$) und kombinierte Regionalisierung der Mittelwasserparameter ($regCOMB(MQ)_d$).

Volume examined	Hydrograph type	$a_{90\%}$	a_{regr}	b	r_{xy}
1-day maximum	OBS_d	$0.15 \cdot 10^6$	$0.07 \cdot 10^6$	¹⁾ 0.86	0.88
	$calMQ_d$	$0.10 \cdot 10^6$	$0.06 \cdot 10^6$	²⁾ 0.89	0.92
	$regCOMB(MQ)_d$	$0.08 \cdot 10^6$	$0.05 \cdot 10^6$	³⁾ 0.93	0.95
2-day maximum	OBS_d	$0.21 \cdot 10^6$	$0.11 \cdot 10^6$	¹⁾ 0.86	0.90
	$calMQ_d$	$0.16 \cdot 10^6$	$0.10 \cdot 10^6$	²⁾ 0.89	0.93
	$regCOMB(MQ)_d$	$0.12 \cdot 10^6$	$0.08 \cdot 10^6$	³⁾ 0.93	0.95
5-day maximum	OBS_d	$0.26 \cdot 10^6$	$0.16 \cdot 10^6$	¹⁾ 0.86	0.92
	$calMQ_d$	$0.21 \cdot 10^6$	$0.15 \cdot 10^6$	²⁾ 0.89	0.95
	$regCOMB(MQ)_d$	$0.18 \cdot 10^6$	$0.11 \cdot 10^6$	³⁾ 0.93	0.95
10-day maximum	OBS_d	$0.31 \cdot 10^6$	$0.20 \cdot 10^6$	¹⁾ 0.86	0.93
	$calMQ_d$	$0.27 \cdot 10^6$	$0.19 \cdot 10^6$	²⁾ 0.89	0.95
	$regCOMB(MQ)_d$	$0.21 \cdot 10^6$	$0.15 \cdot 10^6$	³⁾ 0.93	0.96

^{1) – 3)} Since differences in the individual values for b were small, the respective average was used each for observation, calibration and regionalisation.

Ein Vergleich der hier ermittelten Umhüllenden für 10-tägige maximale Direktabflussmengen (**Abbildung 12.9**) mit denjenigen der absoluten jährlichen Maxima (**Abbildung 12.5**) zeigt, dass sich die beiden Kurven jeweils nur wenig unterschieden, dass also im Bereich 10-tägiger Direktabflussereignisse bereits eine Annäherung an eine obere Grenze stattfindet. Beachtet werden muss dabei aber, dass die doppelt-logarithmische Darstellung die absolut vorhandenen Unterschiede kleiner erscheinen lässt (vgl. dazu **Tabelle 12.2** und **Tabelle 12.3**).

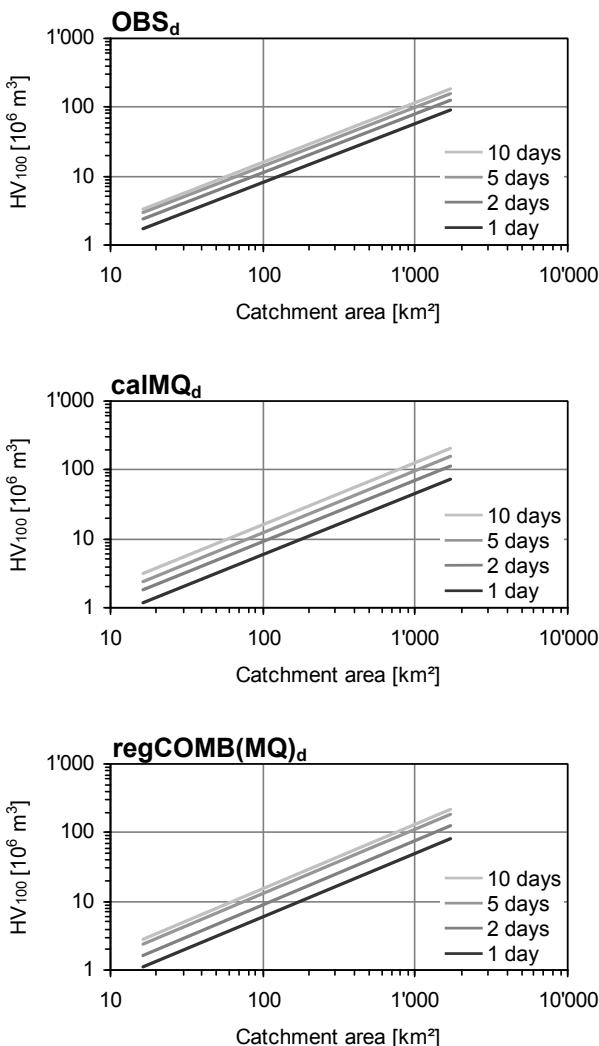


Figure 12.9: 90% envelope curves of 100-year return period 1-, 2-, 5- and 10-day direct discharge volumes for observation (OBS_d), standard calibration ($calMQ_d$) and combined regionalisation of standard model parameters ($regCOMB(MQ)_d$) for data from 49 priority A catchments. Respective parameter values are found in Table 12.3.

Abbildung 12.9: 90%-Hüllkurven für 100-jährliche 1-, 2-, 5- und 10-Tages-Direktabflussvolumina von Beobachtung (OBS_d), Mittelwasserkalibrierung ($calMQ_d$) und kombinierter Mittelwasserregionalisierung ($regCOMB(MQ)_d$) auf Basis von 49 Einzugsgebieten der Priorität A. Die entsprechenden Parameterwerte sind in Tabelle 12.3 aufgeführt.

12.3.3 Volumina der jährlich grössten Spitzenabflusseignisse

Diese dritte Auswertung bezieht sich auf die Direktabflussvolumina, welche bei den Ereignissen mit dem jährlich grössten Spitzenabfluss (HV_{HQa}) auftreten. Sie soll Rückschlüsse auf die Gesamtplausibilität der simulierten Hochwassereignisse erlauben. In den übrigen Kapiteln dieser Arbeit wurde bezüglich Hochwasser – in Übereinstimmung mit dem Anwendungsziel – vor allem die Fähigkeit des Modells diskutiert, die jährlichen Spitzenabflüsse akkurat wiederzugeben. Für eine gute Wiedergabe der zugehörigen Direktabflussvolumina wäre erforderlich, dass auch Ansteigen und Abfallen des Abflusses vor resp. nach dem Ereignis mit hoher Güte simuliert werden. Dies stellt hohe Ansprüche an die hydrologische Plausibilität der verwendeten kalibrierten und regionalisierten Parametersätze. Wegen der Unsicherheiten im meteorologischen Modellinput (vgl. Kapitel 7) ist allerdings nicht sicher, ob mit der Simulation überhaupt gleichzeitig eine gute Wiedergabe von Spitzenabflüssen und zugehörigen Direktabflussvolumina erreicht werden kann. Die Unsicherheiten bei der Parameterwahl (vgl. Kapitel 6) erschweren zudem das Auffinden eines solchen "optimalen" Parametersatzes.

Schätzfehler

Als erstes muss hier erneut ermittelt werden, welche der beiden Kalibrierungen (Mittelwasser- oder Hochwasserkalibrierung) und der darauf aufbauenden kombinierten Regionalisierungen bessere Schätzwerte ergibt. Dazu zeigt **Abbildung 12.10** die prozentualen Abweichungen in den jährlichen Spitzenabflüssen und den zugehörigen Direktabflussvolumina. Wie aus den obigen Betrachtungen zu erwarten war, schneiden die Mittelwasservarianten bezüglich Volumina (Abszisse) deutlich besser ab. Der mediane Schätzfehler für die 49 Einzugsgebiete der Priorität A beträgt bei Kalibrierung ($calMQ_d$) lediglich +6.2%, bei kombinierter Regionalisierung ($regCOMB(MQ)_d$) sogar nur +2.1% – dort allerdings mit einer sehr grossen Spannweite der Resultate.

Auf den ersten Blick sehr überraschend ist nun aber, dass die Mittelwasservariante hier bezüglich jährlicher Spitzentiefen (Ordinate) vergleichbar gut oder sogar besser abschneidet als die Hochwasservariante: Bei Mittelwasserkalibrierung werden die Spitzentiefen tendenziell leicht unterschätzt (medianer Schätzfehler für calMQ_d : -5.6%), bei Hochwasserkalibrierung hingegen etwas deutlicher über- schätzt (calHQ_d : +17.1%). Die entsprechenden Regionalisierungen weisen dem Betrag nach vergleichbare Resultate auf (regCOMB(MQ)_d -10.8%, regCOMB(HQ)_d : +9.2%). Dies scheint der in den Kapiteln 4 und 5 aufgezeigten Eignung der Hochwasserkalibrierung zu widersprechen. Der Grund dafür ist in der gewählten zeitlichen Auflösung zu suchen: Während sich sämtliche Kalibrierungen in dieser Arbeit auf stündliche Daten beziehen, werden im vorliegenden Kapitel Tageswerte betrachtet. Dabei überschätzt die auf Stundenwerte bezogene Hochwasserkalibrierung die jährlichen Tageshoch- stabflüsse. Für die hier ins Auge gefasste Auswertung auf Basis von Tagesmittelwerten ist sehr Vor- teilhaft, dass die Mittelwasservariante also neben den Direktabflussvolumina auch die Spitzentiefen genauer wiedergibt; für beide Größen können somit gute Schätzungen erwartet werden.

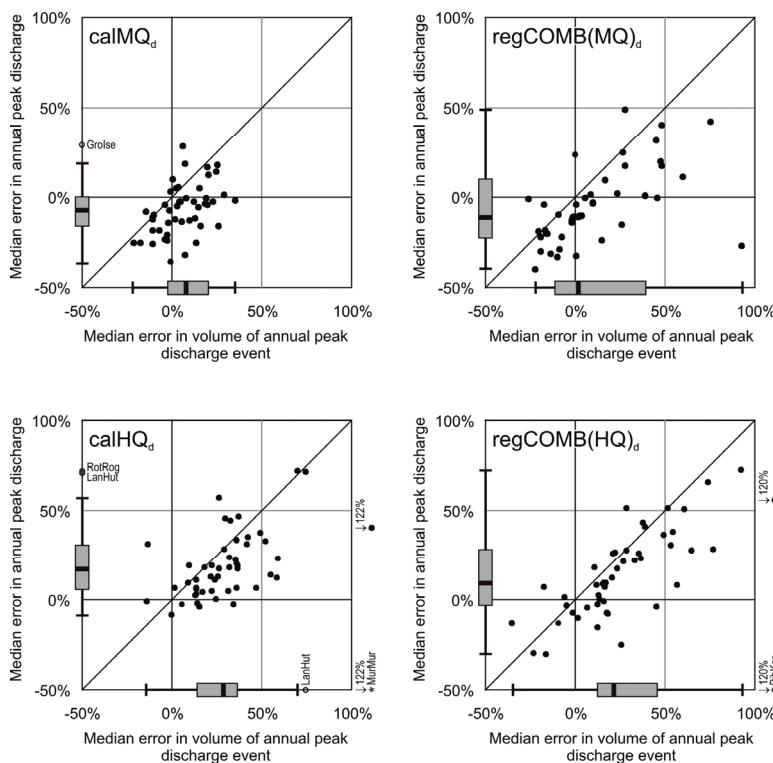


Figure 12.10: Deviation of annual peak discharge (HQ_a) and corresponding direct discharge volumes (HV_{HQa}) from observation for daily values of standard calibration (calMQ_d), flood calibration (calHQ_d) and respective combined regionalisations (regCOMB(MQ)_d , regCOMB(HQ)_d) for 49 priority A catchments.

Abbildung 12.10: Abweichung der Jahreshochwasser (HQ_a) und den zugehörigen Abflussvolumina (HV_{HQa}) von der Beobachtung für tägliche Werte der Mittelwasserkalibrierung (calMQ_d), Hochwasserkalibrierung (calHQ_d) und die darauf basierenden kombinierten Regionalisierungen (regCOMB(MQ)_d , regCOMB(HQ)_d) für 49 Einzugsgebiete der Priorität A.

Anwendung: Vergleich von Spitzentiefen und Volumina der Jahreshochwasser

Die Interpretation der Ergebnisse wird anhand der Kleinen Emme bei Littau (**Abbildung 12.11**) erläutert: Generell zeigt sich sowohl für die kalibrierte wie auch für die regionalisierte Modellvariante eine relativ gute Übereinstimmung mit der Beobachtung, auch wenn die einzelnen Ereignisse meist nicht exakt reproduziert werden. Bemerkenswert gut wird aber das grösste Direktabflussvolumenereignis wiedergegeben, auch was Spitzentiefewert und Ereignisdauer angeht. Weiter ist festzustellen, dass einerseits eine Korrelation zwischen Spitzentiefenmenge und dem entsprechenden Direktabflussvolumen besteht (für die Beobachtung (OBS): $r_{xy} = 0.52$), dass aber bei den grössten Volumina keine weitere Steigerung der Spitzentiefen stattfindet. Auch diese beobachtete Abflachung der Spitzentiefen bei grossen Volumina wird vom Modell erfasst.

Die entsprechenden Grafiken für alle 49 Gebiete der Priorität A sind in Anhang E zu finden. Insgesamt zeigen die simulierten Verteilungsmuster von Hochwasserspitzen, Direktabflussvolumina und Ereignislängen eine recht gute Übereinstimmung mit der Beobachtung. Für etwa die Hälfte der untersuchten Gebiete werden subjektiv betrachtet ähnlich gute Ergebnisse wie für die oben diskutierte Kleine Emme bei Littau erreicht, wobei Gebiete in Mittelland und Voralpen öfters mit guten Resultaten vertreten sind als solche in den Alpen. Probleme bei vergletscherten Gebieten treten in dieser Betrachtung jedoch kaum auf, und auch die schon angesprochene markante Abflachung der Spitzentiefen bei sehr grossen Volumina wird vom Modell in den meisten Gebieten gut reproduziert.

Die Korrelation zwischen Spitzenaufwurf (HQ_a) und dem zugeordneten Direktabflussvolumen (HV_{HQa}) ist für alle betrachteten Auswertungen auf dem Niveau $\alpha \leq 0.01$ signifikant und zudem gut vergleichbar: Die entsprechenden mittleren Korrelationskoeffizienten r_{xy} betragen 0.54 für Beobachtung, 0.57 für Mittelwasserkalibrierung (calMQ_d) und 0.55 für zugehörige kombinierte Regionalisierung (regCOMB(MQ)_d). Auch hier zeigen Gebiete mit grösserer Mittlerer Höhe eine schwächere Korrelation. Dies weist erneut auf methodische Unsicherheiten und unterschiedliche Bedingungen bei der Hochwasserentstehung hin.

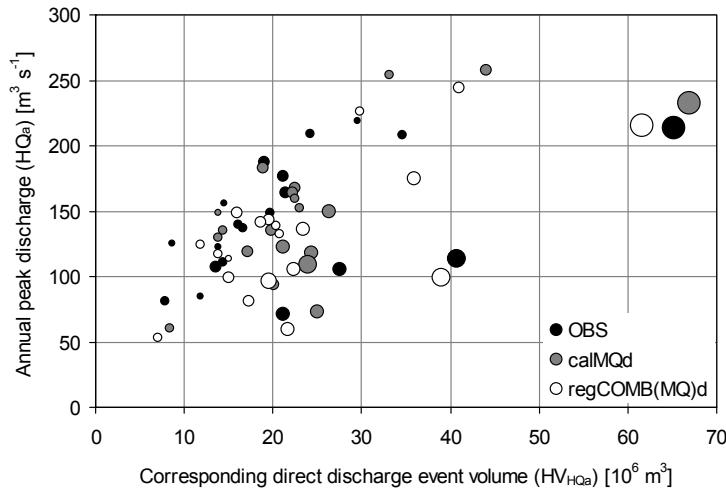


Figure 12.11: Annual peak discharges 1984–2003 and corresponding direct discharge volumes of the Kleine Emme River at Littau for observation (OBS_d), standard calibration (calMQ_d) and respective combined regionalisation (regCOMB(MQ)_d). Signature size is proportional to event duration. Similar figures for all 49 priority A catchments of are found in appendix E.

Abbildung 12.11: Jährliche Höchstabflüsse 1984–2003 und zugehörige Direktabflussvolumina der Kleinen Emme bei Littau für Beobachtung (OBS_d), Mittelwasserkalibrierung (calMQ_d) und entsprechende kombinierte Regionalisierung (regCOMB(MQ)_d). Die Signaturgröße ist proportional zur Ereignisdauer. Entsprechende Grafiken für alle 49 Einzugsgebiete der Priorität A befinden sich in Anhang E.

12.4 Fazit

Ausgehend von den präsentierten Ergebnissen steht der Verwendung von simulierten Direktabflussmengen als Grundlage für Bemessungsaufgaben nichts im Wege. Je nach Datenlage muss entschieden werden, ob Beobachtung, kalibrierte Simulation oder regionalisierte Simulation verwendet werden sollen. Für die Betrachtung eines einzelnen Gebietes werden dabei folgende Varianten empfohlen:

- 1.) Falls eine lange Reihe kontinuierlich beobachteter Abflüsse existiert, sollten diese Daten direkt ausgewertet werden. Eine Simulation ist nicht sinnvoll.
- 2.) Sind nur kurze Messreihen vorhanden (mindestens aber 5 Jahre) kann eine Kalibrierung des Modells auf Mittelwasser vorgenommen werden (calMQ). Durch Simulation kann dann eine kontinuierliche Abflussreihe ab 1984 erstellt werden, welche anschliessend bezüglich Direktabflussmengen ausgewertet wird.
- 3.) Verfügt ein Gebiet über keinerlei kontinuierliche Abflussmessungen, ermöglicht die kombinierte Regionalisierung für Mittelwasser (regCOMB(MQ)) das Ermitteln eines Parametersatzes ohne Kalibrierung. Mit diesem ist eine Simulation und deren Auswertung möglich.

Interessiert nicht ein einzelnes Gebiet, sondern eine Hüllkurve für ein grösseres Gebietskollektiv, können wie in Abschnitt 12.3.1 gesehen Beobachtung und Simulationen kombiniert werden: Für Gebiete mit langen Messreihen werden die beobachteten Abflussdaten ausgewertet, und für weitere kalibrierbare Gebiete mit kurzen Messreihen wird eine kontinuierliche Langzeitsimulation auf Basis des Mittel-

wasserparametersatzes (calMQ) analysiert. Sollen auch ausgewählte ungemessene Gebiete in die Hüllkurvenbestimmung eingehen, können entsprechende Werte allenfalls über die Regionalisierung der Mittelwasserparameter (regCOMB(MQ)) hergeleitet werden.

Zu überlegen wäre gegebenenfalls, ob die Simulation der Volumina noch verbessert werden kann, indem ein speziell dafür kalibrierter Parametersatz erstellt wird, wie dies ja schon im Falle der Hochwasserkalibrierung geschah; dabei müsste wiederum unbedingt auf eine hydrologisch plausible Gesamtsimulation geachtet werden. Da aber mit der hier vorgestellten Variante auf Basis von Tageswerten sowohl die Jahreshöchstvolumina wie auch die Volumina der Jahresspitzenabflüsse gut wiedergegeben werden können, drängt sich eine solche Zusatzkalibrierung nicht auf.

Kapitel 13

Ausblick: Weitere Anwendungsmöglichkeiten für das Modellsystem

Possibilities are discussed for extending the modelling system which was elaborated in this study. On the one hand, this involves especially an extension of the simulation period through longer series of input data (historical records, weather generator) which would essentially improve the foundations of flood estimation. On the other hand, it is possible to apply scenarios of climate and land use change. Furthermore, the estimation of hydrologically oriented confidence intervals is discussed with regards to flood estimation. Finally, possibilities for application under standard and low flow conditions are considered.

Das Erweiterungsmöglichkeiten des erarbeiteten Modellsystems werden diskutiert. Insbesondere umfasst dies einerseits die Ausdehnung des Anwendungszeitraums durch Verlängerung des Modellantriebs (historische Messreihen, Wettergenerator), wodurch die Schätzgrundlagen wesentlich verbessert werden könnten. Andererseits können dem Modell Klima- oder Landnutzungsszenarien aufgeprägt werden. Weiter wird besprochen, wie sich hydrologisch orientierte Konfidenzintervalle der ermittelten Hochwasserkennwerte schätzen lassen. Überlegungen zur Anwendung im Bereich von Mittel- und Niedrigwasser beschliessen das Kapitel.

13.1 Übersicht

Wie in dieser Arbeit aufgezeigt werden konnte, lässt sich die Methodik der Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit Erfolg auf Gebiete ohne Abflussmessungen anwenden, sofern eine angemessene Regionalisierung der freien Modellparameter verfügbar ist. Dies ist einer der wesentlichen Vorteile des hier erarbeiteten Modellsystems, doch damit sind dessen Möglichkeiten noch lange nicht erschöpft. Anhand von **Abbildung 1.5** wird das Konzept des Modellsystems im Folgenden nochmals aufgenommen, um die wichtigsten Erweiterungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Die Besprechung dieser Möglichkeiten beginnt mit demjenigen Thema, welches für die Hochwasserabschätzung am relevantesten ist: der Ausdehnung des Simulationszeitraums. Anschliessend werden Aufprägung von Szenarien, Schätzung hydrologisch basierter Konfidenzintervalle und Anwendungen im Mittel- und Niedrigwasserbereich diskutiert.

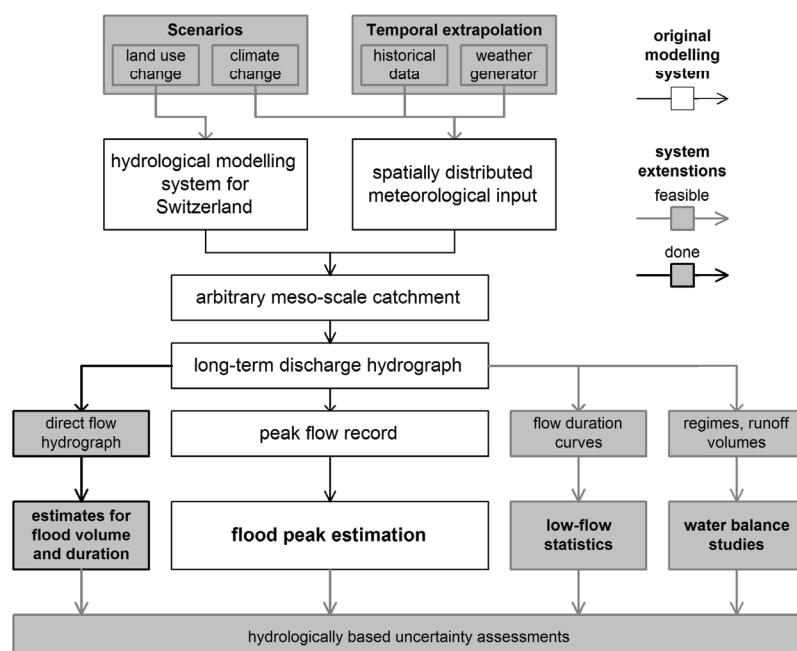


Figure 13.1: Possibilities for extending the modelling system elaborated in this study (cf. **Abbildung 1.5**, p. 6).

Abbildung 13.1: Möglichkeiten zum Ausbau des in dieser Studie erarbeiteten Modellsystems (vgl. **Abbildung 1.5**, S. 6)

13.2 Ausdehnung des Simulationszeitraums

Neben der räumlichen Erweiterung (Regionalisierung) birgt auch die zeitliche Erweiterung des Modells ein grosses Potenzial, was Erkenntnisse bezüglich seltener Hochwasserabflüsse betrifft. Wenn es gelingt, lange Reihen des Modellantriebes bereitzustellen, ist für seltene Extremereignisse eine weniger starke Extrapolation notwendig, gleichzeitig erweitert sich der Bereich der zulässigen Extrapolationsdauer wesentlich. All diese Aussagen treffen im Übrigen nicht nur auf seltene Spitzenabflüsse, sondern auch auf seltene Volumina des Direktabflusses (vgl. Kapitel 12) zu.

Wie in der Einleitung (Kapitel 1) gesehen, sind die Messreihen der meteorologischen Variablen zwar im Durchschnitt etwas länger als diejenigen des Abflusses, und sie lassen sich relativ einfach im Raum interpolieren. Die Modellanwendung in der hier vorgestellten Form wird jedoch durch die Verfügbarkeit stündlich aufgelöster meteorologischer Messdaten grob auf den Zeitraum nach 1983 beschränkt. Dies ist durch die zeitliche und räumliche Abdeckung des automatischen Messnetzes ANETZ bedingt. Um für die Entwicklung von Kalibrierung und Regionalisierung einen möglichst homogenen Modellantrieb zur Verfügung zu haben, wurde in der vorliegenden Arbeit auf eine zeitliche Erweiterung verzichtet. Wie die Forschungsliteratur aber zeigt, ist eine solche Erweiterung grundsätzlich machbar, und zwar auf zwei unterschiedliche Weisen: Durch die Verwendung historischer Messreihen oder durch den Einsatz stochastischer Wettergeneratoren.

Generell muss dazu festgehalten werden, dass die Qualität einer Hochwasserabschätzung aus langen Simulationsreihen wesentlich davon abhängt, wie zutreffend sehr seltene Niederschlagsspitzen und das Niederschlagsgeschehen generell nachgebildet werden können (FRANCHINI ET AL., 1996; NAEF ET AL., 1999). Dem Niederschlag muss also bei einer Ausdehnung des Simulationszeitraums grosse Beachtung geschenkt werden, da er entweder aus einem weniger hoch aufgelösten Messnetz interpoliert (historische Messreihen) oder völlig neu erzeugt (Wettergenerator) wird.

13.2.1 Historische Messreihen

Bezüglich historischer Messreihen verfügt die Schweiz über eine ausgezeichnete Ausgangslage: In den Anfangsjahren der langfristigen Messungen wurden zwar nur Einzelstationen betrieben (als erste Bern–Liebefeld, 1759), seit 1864 ist aber ein zunehmend dichter werdendes Netz von Temperatur- und Niederschlagsmessungen verfügbar (WEINGARTNER, 1992). Auf Basis der vorhandenen Daten konnten PERL ET AL. (2003) beispielsweise täglich aufgelöste Gebietsniederschläge für das in 13 Teilzugsgebiete aufgeteilte Rheingebiet bis Basel berechnen, welche den Zeitraum 1901–2001 abdecken.

Für eine Anwendung im vorliegenden Modellsystem sind drei Problembereiche erkennbar:

- Die verfügbaren historischen Messdaten decken nicht alle Variablen ab, welche PREVAH in der hier verwendeten Parametrisierung benötigt. Entweder müssten also einfache Verdunstungsmodelle eingesetzt werden, oder die erforderlichen Grössen müssen auf geeignete Weise (empirisch oder physikalisch) hergeleitet werden. Beides bedingt Kompromisse in der Simulationsgenauigkeit.
- Die täglich aufgelösten Werte müssen auf Stundenwerte disaggregiert werden. Besonders heikel ist diese Disaggregation für den Niederschlag; Ansätze dazu finden sich beispielsweise bei SEGOND ET AL. (2006) oder MOLNAR UND BURLANDO (2005).
- Die meteorologischen Messreihen müssten im Prinzip homogen und stationär sein, um als Grundlage für eine Hochwasserabschätzung dienen zu können. Diese Voraussetzung ist wegen standortspezifischen Faktoren (Stationsverschiebung, Messgerätefehler etc.) und sich verändernden Rahmenbedingungen (Klimavariabilität, Klimaänderung, Landnutzungsänderung) in der Praxis kaum gegeben, betrifft aber in geringerem Ausmass alle kontinuierlichen Simulationen. Eine Homogenisierung ist machbar, bedingt aber viel Aufwand und Fachwissen (vgl. BEGERT ET AL., 2005).

13.2.2 Wettergenerator

Ein stochastischer Wettergenerator erzeugt beliebig lange Datenreihen meteorologischer Variablen für einen Standort, indem er die statistischen Eigenschaften der beobachteten Meteorologie an dieser Messstelle analysiert. Dabei wird normalerweise zuerst der Niederschlag synthetisiert; in Abhängigkeit der so erzeugten Reihe werden dann weitere Variablen wie Temperatur, Strahlung, Luftfeuchte und

Windgeschwindigkeit erzeugt (HUTCHINSON, 1987). Für die Niederschlagserzeugung am häufigsten verwendet werden Markov-Ketten, welche die Verteilung von Regen- und Trockenägen definieren; im Detail bestehen hier allerdings noch häufig Probleme bei der adäquaten Reproduktion von längeren Trocken- oder Niederschlagsperioden. Bei der räumlichen Interpolation der synthetischen Stationsdaten müssen zudem einige methodische Unsicherheiten in Kauf genommen werden (HUTCHINSON, 1995).

Wettergeneratoren wurden bereits vereinzelt eingesetzt, um mittels kontinuierlicher hydrologischer Simulation Informationen über seltene Extremereignisse zu erhalten. Dazu wurden meist nur die Niederschlags- und allenfalls die Temperaturkomponente berücksichtigt: EBERLE ET AL. (2002) synthetisierten beispielsweise eine 1'000-jährige Niederschlagsreihe in täglicher Auflösung, um mit einem HBV-Modell Hochwasserkennwerte für grosse Teileinzugsgebiete des Rheins zu bestimmen; die Verdunstung wurde aus monatlichen Mittelwerten abgeleitet. Weitere interessante Ansätze bezüglich Niederschlagserzeugung für das Rheingebiet wurden von KRAHE UND HERPERTZ (2001) zusammengestellt. Für das Einzugsgebiet der Maas verglichen LEANDER ET AL. (2005) reale Ereignisverläufe mit solchen, welche von einem an einen Wettergenerator gekoppeltes HBV-Modell simuliert wurden. In Grossbritannien findet sich schliesslich eine weitere Anwendung von synthetisierten Niederschlägen zur Abschätzung seltener Spitzenabflüsse: CAMERON ET AL. (1999) betrieben TOPMODEL für das Einzugsgebiet des Wye River in Wales (10.6 km^2) mit einer stochastisch generierten 1'000-jährigen Niederschlagsreihe im Stundenschritt.

Für die Verwendung mit PREVAH geeignet scheint beispielsweise WeathGen (GYALISTRAS ET AL., 1997), weil es mit einer sehr ähnlichen Struktur der Wetterdaten arbeitet; bezüglich Wiedergabe von Starkniederschlägen wären allerdings noch einige Verbesserungen vorzunehmen. Weitere auf ihre Eignung genauer zu prüfende Ansätze haben etwa SEMENOV UND BROOKS (1999) sowie CAMERON ET AL. (2000B) (letztere nur für den Niederschlag) vorgestellt.

13.3 Modellierung von Szenarien

Im Gegensatz zu konventionellen Ansätzen der Hochwasserabschätzung erlaubt das hier erarbeitete Modellsystem den Einbezug verschiedenster Szenarien, denn dank der Prozessnähe können die Rahmenbedingungen des Modells verändert werden, um darauf eine hydrologisch sinnvolle Antwort zu erzeugen. Am relevantesten sind sicherlich Szenarien der Klimaänderung (Modifikation des Modellantriebs) und allenfalls der Landnutzungsänderung (Modifikation der Landnutzungs- und eventuell auch der Bodendaten). Ebenfalls sehr interessant ist die Möglichkeit, Szenarien extremer und/oder räumlich verschobener Niederschlagsfelder durchzurechnen. Modelltechnisch sind solche Änderungen ohne übermäßig grossen Aufwand vorzunehmen, wesentlich schwieriger gestaltet sich hingegen die Ausarbeitung plausibler Szenarien.

13.3.1 Klimaänderung

Fragen nach der Auswirkung von Klimaänderungen auf Spitzenabflüsse haben grosse Aktualität (siehe PETRASCHECK, 2003), genauso wie die Auswirkungen auf die Bereiche Wasserkraft (z. B. VISCHER UND BADER, 1999; SCHAEFLI, 2005) und Wasserressourcen (vgl. MIDDELKOOP ET AL., 2001). All diese Themenkomplexe können mit dem bestehenden Modellsystem angegangen werden.

Die einfachste Möglichkeit zur Berücksichtigung von Szenarien der Klimaänderung ist die Verwendung von mittleren monatlichen Änderungswerten für die meteorologischen Eingangsdaten; diese können in der graphischen Benutzeroberfläche von PREVAH für alle sechs Antriebsgrössen als Beitrag (Temperatur) oder als Faktor (Niederschlag, Strahlung, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit und Sonnenscheindauer) angegeben werden. Einschränkend ist, dass die Verteilungscharakteristik der Werte dabei unverändert bleibt; somit sind nur grobe Sensitivitätsanalysen möglich.

Für methodisch etwas fundiertere Szenarien ist der Einsatz eines stochastischen Wettergenerators (siehe oben) angebracht; dessen Rahmenbedingungen können entsprechend des gewünschten Szenarios verändert werden, was bei geeigneter Formulierung auch das Erzeugen von Spitzenwerten erlaubt, welche höher als diejenigen der beobachteten Reihen sind. Auf Basis der schon angesprochenen Arbeit von CAMERON ET AL. (1999) wurde in einer nachfolgenden Studie (CAMERON ET AL., 2000A) genau dies durchgeführt; als Grundlage für die veränderten Niederschlags- und Verdunstungsbedingungen wurde direkt die betreffende Rasterzelle eines globalen Klimamodells (HadCM2) verwendet.

Die beste physikalische Abstützung ist durch die Interpolation von Klimamodellen zu erreichen. Dabei muss allerdings das Herunterbrechen (Downscaling) der zeitlich und räumlich relativ grob aufgelösten globalen Modelle auf für die hydrologische Modellierung relevante Skalen bewältigt werden, was zur Zeit noch mit grösseren Problemen und Unsicherheiten verbunden ist (PRUDHOMME ET AL., 2002). Dennoch konnten KAY ET AL. (2006A, 2006B) einen genaueren Modellantrieb bereitstellen, indem sie das gewählte Klimaänderungsszenario mit Hilfe eines regionales Klimamodells (HadRM3H) auf 15 Gebiete in Grossbritannien aufprägten. Ziel war auch dort die Ermittlung von Veränderungen im Hochwasserverhalten, wobei dank des regionalen Klimamodells ebenfalls stündliche Niederschlagswerte zur Verfügung standen. Mit dem besonders herausfordernden Downscaling für die Alpen befassten sich KLEINN ET AL. (2005) im Rahmen von Studien für das Rheingebiet.

13.3.2 Landnutzungsänderung

Der Einfluss von Landnutzungsänderungen scheint im Rahmen der vorliegenden Arbeit vor allem im Bereich der Entstehung von Spitzentabflüssen interessant; dabei sollten insbesondere Versiegelung sowie Rodungen und Aufforstungen berücksichtigt werden (vgl. VISCHER, 1993; BRONSTERT ET AL., 2002).

Für das gesamte Rheingebiet befassen sich bereits einige umfassende Studien mit Landnutzungsänderungen, beispielsweise die Arbeiten von BRONSTERT ET AL. (2003) oder HUNDECHA UND BÁRDOSSY (2004). Bei der Interpretation von Resultaten ist allerdings stets der Detaillierungsgrad des zugrundeliegenden Modells und die Genauigkeit der verwendeten Boden- und Landnutzungsinformationen zu berücksichtigen. Zudem ist zu bedenken, dass die generell unsichere Beziehung zwischen freien Modellparametern und Gebietsattributen (vgl. Kapitel 8.5) auch die Kennwerte der Landnutzung und des Bodens betrifft, dass also nicht auf eine physikalisch uneingeschränkt plausible Kalibrierung der entsprechenden freien Modellparameter gezählt werden kann. Diese Unsicherheit betrifft folglich auch Aussagen zur Gebietsreaktion unter veränderten Bedingungen. HUNDECHA UND BÁRDOSSY (2004) gingen dieses Problem sehr elegant an, indem sie – anstelle der Modellparameter – Transferfunktionen zwischen den Modellparametern und Gebietsattributen kalibrierten; im Hinblick auf die Untersuchung von Landnutzungsänderungen ist dies ein wesentlicher Gewinn an Modellplausibilität.

Den obigen Ausführungen folgend ist für die Anwendung von PREVAH spezifisch anzumerken, dass die Parametrisierung des Bodens bezüglich Feuchteausschöpfung durch Evapotranspiration zwar als sehr gut angesehen werden kann, dass aber bei der Bildung von Oberflächenabfluss noch Verbesserungspotenzial besteht. Beim Vergleich unterschiedlicher Landnutzungsklassen (z. B. Siedlung vs. Landwirtschaft) können aber ohne weiteres zuverlässige Aussagen zur Sensitivität erwartet werden.

Es kann im Übrigen auch sinnvoll sein, Szenarien von Landnutzungs- und Klimaänderungen im Kombination zu untersuchen, wie dies etwa von REYNARD ET AL. (2001) durchgeführt wurde.

13.3.3 Ausprägung extremer Niederschlagsfelder

Die dritte Möglichkeit zur Szenarienbildung ist im Gegensatz zu den beiden vorher besprochenen Möglichkeiten weniger auf einen langen Zeitraum ausgerichtet, sondern eher auf einzelne Hochwasserereignisse. Dabei geht es darum, Steigerungsmöglichkeiten von Starkniederschlägen zu erwägen und die Auswirkungen auf die Spitzentabflüsse zu untersuchen. Für Untersuchungen in der Schweiz bietet der radargestützte Niederschlagsdatensatz CH02H (vgl. Kapitel 7.2.1) eine sehr gute Grundlage, da er eine hochauflösende und vertrauenswürdige räumliche Verteilung bereitstellt, mit welcher eine Vielzahl von Szenarien erarbeitet werden kann.

Folgende Szenarien sind denkbar:

- Verschieben von Niederschlagsfeldern, um beispielsweise ein Starkniederschlagszentrum über das interessierende Gebiet zu positionieren oder um die Sensitivität eines Gebietes auf die räumliche Verteilung der Niederschläge zu untersuchen.
- Skalieren von Niederschlagsfeldern auf seltene Wiederkehrperioden, indem einem tatsächlich beobachteten Ereignisverlauf Gebietsniederschlagsmengen aufgeprägt werden, welche aus einer Extremwertstatistik extrapoliert wurden. Es ist ebenfalls möglich, geschätzte Gebietsniederschläge historischer Hochwasserereignisse zur Skalierung zu verwenden (siehe auch Weingartner und Reist, 2004). In jedem Fall sollte aber die Ereignisdauer des zu skalierenden Ereignisses mit derjenigen des skalenbestimmenden Ereignisses übereinstimmen.
- Verlängerung von Niederschlagsereignissen, indem beispielsweise die letzten 24 Stunden des beobachteten Ereignisverlaufs dupliziert und dem Ereignis nachfolgend angekoppelt werden.

Genau diese Art von Szenarien konnte mit PREVAH bereits auf das Einzugsgebiet der Sihl angewendet werden, um realistische Steigerungsmöglichkeiten des Hochwasserereignisses vom August 2005 zu ermitteln (WEINGARTNER ET AL., 2007). Für das Berner Oberland gelangten ähnliche Ansätze im Rahmen von Sensitivitätsanalysen für das 2005er-Hochwasser zur Anwendung (SCHWANBECK ET AL., in Vorbereitung). In beiden Fällen wurde das hier erarbeitete Modellsystem verwendet, wobei die Parametersätze der ungemessenen Teilgebiete (inklusive kleiner Direkteinzugsgebiete der Seen) mittels der neu entwickelten Regionalisierung bestimmt werden konnten. Durch die Untersuchung verschiedenster Szenarien war es möglich, realistische Extreme von Abflusspitzen und Direktabflussmengen abzuschätzen und gleichzeitig die Plausibilität dieser Schätzungen einzuordnen. In Zusammenarbeit mit der TK Consult AG wurde PREVAH für das Sihlgebiet dabei als weitere interessante Anwendungsmöglichkeit mit dem hydraulischen Modell FLORIS²⁰⁰⁰ (FÄH ET AL., 2002) gekoppelt.

Beachtet werden sollte, dass derartige Niederschlagsszenarien unbedingt auf ihre meteorologische Plausibilität hin zu überprüfen sind – ansonsten können unrealistische oder unsinnige Modellinputs erzeugt werden, welche auch im Bereich der hydrologischen Gebietsantwort zu unplausiblen Aussagen führen.

13.4 Hydrologisch orientierte Schätzung von Konfidenzintervallen

Wie schon an verschiedenen Stellen der vorliegenden Arbeit gezeigt, ist es möglich, Unsicherheiten der simulierten Abflüsse auszuweisen, indem beispielsweise unterschiedliche Kalibrierungsperioden (Kapitel 6.4), Kalibrierungsmethoden (Kapitel 6.3), Niederschlagsinputs (Kapitel 7) oder Regionalisierungsansätze (Kapitel 8 bis 10) verwendet werden. Bei der Extrapolation seltener Hochwasser wurden in dieser Arbeit normalerweise aber lediglich die statistischen Konfidenzintervalle der Extremwertanalyse berücksichtigt. Gerade in diesem Bereich könnte eine wesentliche Verbesserung erreicht werden: Mit dem vorliegenden Modellsystem ist es nämlich möglich, hydrologisch besser abgestützte Vertrauensbereiche zu schätzen. Diese sind bezüglich ihrer Aussage wesentlich aussagekräftiger als die rein statistischen Vertrauensbereiche (vgl. BLAZKOVA UND BEVEN, 2002; LAMB ET AL., 2002; CAMERON ET AL., 1999 und 2000A).

Zur Realisierung solcher Analysen bestehen verschiedene Möglichkeiten: Beispielsweise könnten die oben angesprochenen Ansätze (verschiedene Kalibrierungsperioden und -methoden, Niederschlagsinputs und Regionalisierungen) auch im Bereich der Hochwasserabschätzung Anwendung finden, indem die entsprechenden Simulationen auf seltene Wiederkehrperioden extrapoliert werden. Aussichtsreich scheint auch eine gezielte Variation der freien Modellparameter innerhalb vorgegebener geschätzter Verteilungen mit einer grossen Anzahl von Modellrealisierungen – beispielsweise mit 1'000 unterschiedlichen Parametersätzen wie von LAMB ET AL. (2002) durchgeführt. Vorderhand wäre die extremwertstatistische Unsicherheit allerdings bei all diesen Untersuchungen weiterhin zu berücksichtigen. Diese könnte aber ausgeschaltet werden, wenn mit Hilfe eines Wettergenerators Abflussreihen generiert werden, welche ein Mehrfaches der interessierenden Wiederkehrperiode umfassen.

13.5 Anwendung in anderen Abflussbereichen

Zu guter Letzt ist festzuhalten, dass das bestehende Modellsystem nicht nur im Bereich grosser Abflüsse anwendbar ist, sondern auch für Mittel- und für Niedrigwasserbedingungen – letzteres aber vermutlich erst nach entsprechender Zusatzkalibrierung der freien Modellparameter.

13.5.1 Mittelwasser – Wasserhaushalt

Einer unmittelbaren Anwendung der vorhandenen Parametersätze für den Mittelwasserbereich steht nichts im Wege: Für alle 140 in dieser Arbeit erfolgreich kalibrierten Einzugsgebiete existieren auch auf Normalbedingungen geeichte Parametersätze (Mittelwasserkalibrierung). Sie wurden hier quasi nur als Zwischenschritt zur Hochwasserkalibrierung erstellt, weisen deswegen aber keinerlei Einschränkungen auf. Im Rahmen eines Projektes zur Abschätzung des Kleinwasserkraftpotenzials im Gebiet der Töss (BAUR ET AL., 2006) konnte bereits gezeigt werden, dass PREVAH mit den vorliegenden Parametersätzen sehr vielseitig einsetzbar ist. In der genannten Anwendung wurde vor allem die räumliche Verteilung der simulierten Abflüsse gewinnbringend eingesetzt.

Bezüglich der Anwendung in ungemessenen Gebieten wurde in Kapitel 10.4 der Nachweis erbracht, dass sich die erarbeitete Regionalisierung ohne Veränderungen auch für die Anwendung auf Mittel-

wasserparametersätze eignet. Somit können Gebiete ohne Kalibrierungsmöglichkeit untersucht werden, was im Bereich des Wasserhaushalts mesoskaliger Gebiete beispielsweise als Erweiterung der Arbeiten von ZAPPA (2002) (siehe auch PFAUNDLER UND ZAPPA, 2006) oder SCHÄDLER UND WEINGARTNER (2002) eingesetzt werden könnte.

13.5.2 Niedrigwasser

Die Bestimmung von Niedrigwasserabflüssen gewann in der Schweiz in den vergangenen Jahren zusehends an Bedeutung, weil die Ressource Wasser durch die wachsende Bevölkerung und deren steigenden Ansprüche noch stärker genutzt wird; dieser Bedarf ist aber gleichzeitig gegen ökologische Anliegen und gegen das Prinzip der Nachhaltigkeit abzuwägen (ASCHWANDEN UND KAN, 1999). Die drohenden Klimaveränderungen und die in den Jahren 2003 (vgl. BUWAL, 2004) und 2005 / 2006 (siehe WEINGARTNER, 2007) beobachteten Trockenperioden haben die Aktualität der Frage weiter gesteigert.

Auch in diesem Bereich könnte das vorliegende Modellsystem einen wichtigen Beitrag liefern: Einerseits ist es durch die erarbeitete Regionalisierung möglich, die Grundlagen zur Abschätzung von Niedrigwasserkenngrößen in ungemessenen Gebieten zu verbessern, andererseits können die Auswirkungen von Klimaänderungsszenarien prozessorientiert untersucht werden. PREVAH bietet dank seiner detaillierten Bodenfeuchteroutine sowie seiner Schnee- und Gletschermodule auch diesbezüglich eine ausgezeichnete Grundlage für die Anwendung in der Schweiz. Allerdings könnte es sich als nötig erweisen, für den Niedrigwasserbereich einen vom Mittelwasserfall abweichenden Parametersatz zu erstellen, wie dies schon im Hochwasserbereich nötig war. Dabei sollte bei der Kalibrierung wesentlich stärkeres Gewicht auf die logarithmisierte Nash-Sutcliffe-Effizienz gelegt werden, welche von den verwendeten Gütemassen am sensitivsten auf tiefe Abflüsse ist. Weitere niedrigwasserspezifische Gütemasse wären gegebenenfalls zu entwickeln und hinzuzufügen.

13.6 Fazit

In dieser Arbeit konnte auf Basis des hydrologischen Modellsystems PREVAH ein prozessorientiertes Verfahren entwickelt werden, welches die Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in ungemessenen Gebieten der nordalpinen Schweiz erlaubt. Da nach einer Simulation eine komplette Ganglinie vorliegt, können als Zusatznutzen zudem seltene Volumina des Direktabflusses abgeschätzt werden. Es wurde gezeigt, dass die resultierenden Abschätzungen eine gute Qualität aufweisen und geeignet sind, die Palette der bisher verwendeten Standardverfahren zu erweitern.

Dank der Flexibilität von Modellantrieb und Modellparametrisierung könnten in Zukunft sowohl im Bereich der Meteorologie und Klimatologie wie auch im Bereich der Abflussbildung Szenarien und Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden. Grundlage dafür ist die Prozessorientierung von PREVAH, welche zwar zu einem Aufwand in der Parameterbestimmung führt, es dafür aber zulässt, hydrologisch sinnvolle Gebietsantworten auf Modifikationen der Rahmenbedingungen zu simulieren. Die Abschätzung der freien Modellparameter für ungemessene Gebiete (Regionalisierung) schafft des weiteren auch im Bereich von Mittelwasser- und Niedrigwasserabflüssen sehr interessante Anwendungsmöglichkeiten.

Anhang A

Untersuchte Einzugsgebiete

Räumliche Verteilung

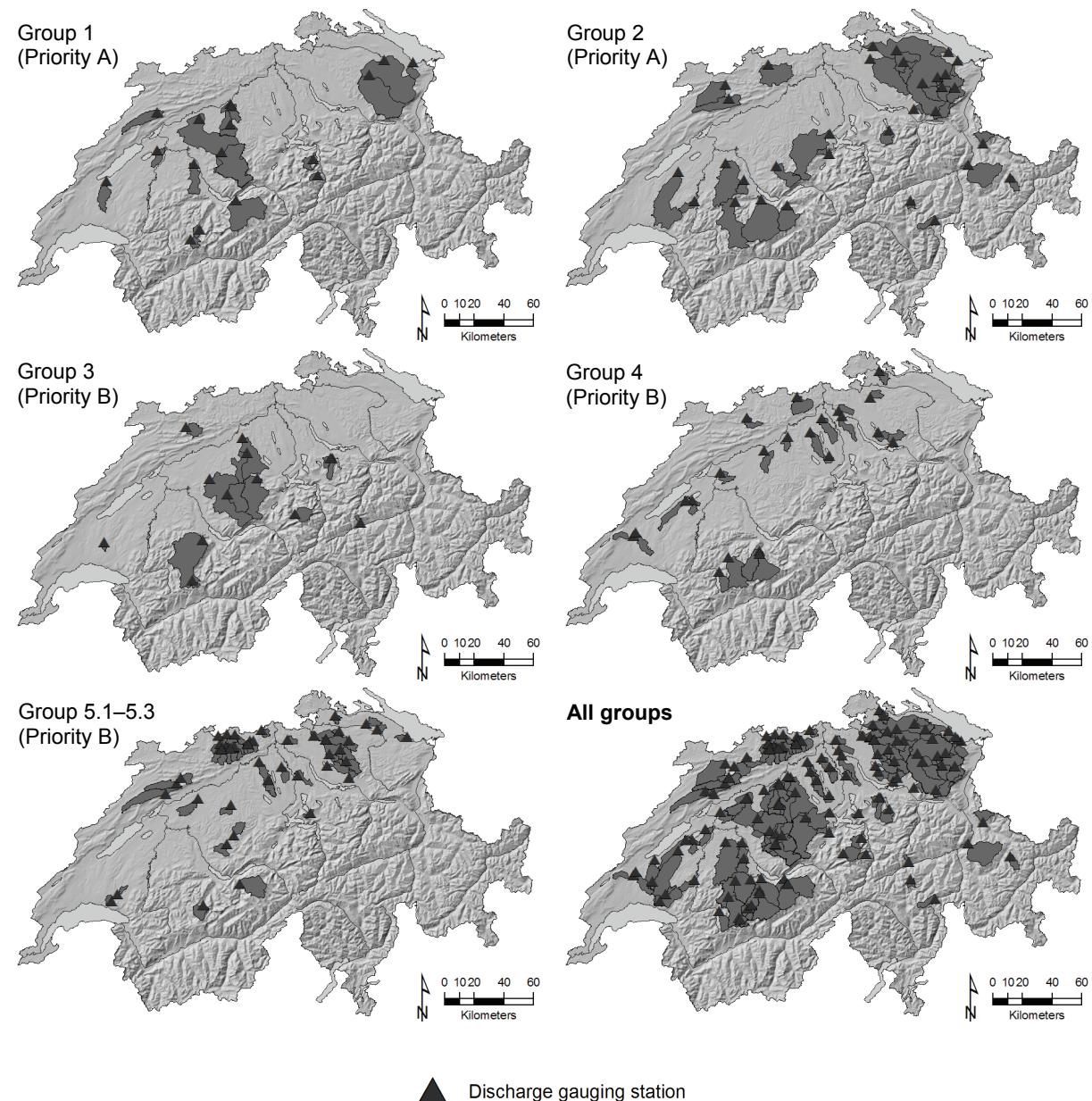


Figure A.1: Spatial distribution of 140 successfully calibrated catchments, distinguished by calibration group (cf. **Table 3.1**) and as overall view.

Abbildung A.1: Räumliche Verteilung der 140 erfolgreich kalibrierten Einzugsgebiete, differenziert nach Kalibrierungsgruppen (vgl. **Tabelle 3.1**) und als Gesamtübersicht.

Detailinformationen

Table A.1: Characteristics of 140 successfully calibrated and 19 failed catchments examined in this study. G: calibration group, A: area, H: gauge station altitude, mH: average catchment altitude, Glac: glaciation, A_{HRU} : average size of hydrological response units (HRU), AZ: number of altitude zones, Calib: calibration period. Data source explanations see p. 298, for further details see chapter 3.1.3.

Tabelle A.1: Kenngrößen der 140 erfolgreich kalibrierten und der 19 misslungenen Einzugsgebiete. G: Kalibrierungsgruppe, A: Fläche, H: Stationshöhe, mH: mittlere Gebietshöhe, Glac: Vergletscherung, A_{HRU} : Mittlere Grösse der Hydrotope (HRU), AZ: Anzahl Höhenzonen, Calib: Kalibrierungszeitraum. Erläuterung der Datenquellen siehe S. 298, für weitere Details siehe Kapitel 3.1.3.

Calibration successful

Symbol	River and station name	G	A [km ²]	H [m]	mH [m]	Glac [%]	Data series	Data source	A_{HRU} [km ²]	AZ	Calib
AabMoe	Aabach–Mönchaltorf	4	46.0	440	521		1970–	ZH	1.70	3	93–97
AabNie	Aabach–Niederuster	5.1	64.0	440	621		1979–	ZH	1.23	6	93–97
AabObe	Aabach–Oberrisch	5.3	14.3	420	547		1995–	ZG	0.89	5	98–02
AacArb	Aach–Arbon	5.2	16.2	400	484		1993–2000	TG	1.25	3	93–97
AacSal	Aach–Salmsach, Hungerbühl	2	48.5	406	480		1961–	BAFU	1.67	3	93–97
AllAde	Allenbach–Adelboden	1	28.8	1297	1856		1950–	BAFU	0.51	13	93–97
AlpEin	Alp–Einsiedeln	3	46.4	840	1155		1990–	BAFU	0.99	9	93–97
AlpErs	Alpbach–Erstfeld, Bodenberg	1	20.6	1019	2200	27.7	1960–	BAFU	0.36	19	93–97
BibBib	Biber–Biberbrugg	3	31.9	825	1009		1989–	BAFU	0.94	6	93–97
BibKer	Bibere–Kerzers	1	50.1	443	540		1955–	BAFU	1.73	4	93–97
BirCou	Birse–Court	5.1	92.2	663	925		1975–	BE	1.14	7	93–97
BirMou	Birse–Moutier, La Charrue	2	183	519	930		1911–	BAFU	1.41	10	93–97
BroPaC	Broye–Payerne, Caserne d'aviation	2	392	441	710		1920–	BAFU	3.60	12	93–97
BruGip	Bruggbach–Gipf/Oberfrick	5.1	44.6	356	575		1979–	AG	0.95	5	93–97
BueOth	Bünz–Othmarsingen	4	111	390	533		1957–	AG	1.91	6	93–97
BueWoh	Bünz–Wohlen	5.1	53.1	421	555		1980–	AG	1.44	6	93–97
ChaAve	Chandon–Avenches	4	38.6	432	571		1993–2002	VD	1.25	4	93–97
CheGru	Chemibach–Grubmühle	5.1	34.0	419	537		1993–	TG	1.42	4	93–97
CScAlp	Chli Schliere–Alpnach, Chilch–Erli	2	21.8	453	1370		1979–	BAFU	0.38	16	93–97
ChrStM	Chrebsbach–St. Margarethen	5.3	14.1	503	581		1993–	TG	0.56	3	93–97
DieDie	Diegterbach–Diegten	5.3	13.1	509	746		1983–	BL	0.50	5	93–97
DieSis	Diegterbach–Sissach	5.1	32.7	372	614		1975–	BL	0.63	7	93–97
DisDaK	Dischmabach–Davos, Kriegsmatte	2	43.3	1668	2372	2.1	1963–	BAFU	0.59	13	93–97
EibGel	Eibach–Gelterkinden	5.1	27.1	405	627		1975–	BL	0.60	6	93–97
EibZeg	Eibach–Zeglingen	5.3	12.9	517	725		1984–	BL	0.56	4	93–97
EmmBur	Emme–Burgdorf, Lochbach	3	673	550	990		1979–1990	BAFU	3.68	16	83–87
EmmEgg	Emme–Eggiwil, Heidbüel	2	124	745	1189		1975–	BAFU	0.98	14	93–97
EmmEmm	Emme–Emmenmatt	1	443	638	1070		1909–	BAFU	2.70	15	93–97
EmmWil	Emme–Wiler, Limpachmündung	1	939	458	860		1921–	BAFU	4.45	17	93–97
EBAEng	Engelberger Aa–Engelberg	3	85.4	995	1970	9.1	1954–1991	BAFU	0.62	22	83–87
EngAde	Engstligenbach–Adelboden	5.1	70.3	1158	1920	2.0	1994–	BE	0.65	20	93–97
EngFru	Engstligenbach–Frutigen, Schw.	4	142	762	1738	0.5	1995–	BE	0.78	23	98–02
ErgIlti	Ergolz–Ittingen	5.1	141	350	593		1981–	BL	1.60	7	93–97
ErgLie	Ergolz–Liestal	2	261	305	590		1934–	BAFU	1.99	9	93–97
ErgOrm	Ergolz–Ornadingen	5.1	29.9	410	585		1976–	BL	0.71	5	93–97
EtzEtz	Etzgerbach–Etzgen	5.1	25.3	308	478		1980–	AG	0.94	4	93–97
EulWue	Eulach–Wülfingen	5.1	73.0	410	532		1971–	ZH	1.43	5	93–97
FerTru	Ferrerabach–Trun	3	12.5	1220	2461	17.3	1962–1990	BAFU	0.32	18	83–87
FloOro	Flon–Oron-la-Ville	5.2	16.4	609	812		1993–	VD	1.64	3	93–97
FurWue	Furtbach–Würenlos	4	39.1	410	482		1977–	ZH	1.03	5	93–97
GeiFur	Geisslibach–Furtmühle, Schlattingen	5.1	20.1	415	474		1990–	ZH	1.01	3	93–97
GeiWil	Geisslibach–Willisdorf	4	45.2	398	457		1993–	TG	1.46	3	93–97
GieBue	Giessen–Bürglen	5.1	23.6	435	502		1993–	TG	1.31	3	93–97
GlaHer	Glatt–Herisau, Zellersmühle	2	16.2	679	840		1961–	BAFU	0.74	3	93–97

Symbol	River and station name	G	A	H	mH	Glac	Series	Source	A _{HRU}	AZ	Calib
GolGol	Goldach–Goldach, Bleiche	1	49.8	399	833		1921–	BAFU	0.83	9	93–97
GamPig	Grenet (amont)–Pigeon	5.2	18.9	680	748		1993–	VD	1.11	3	93–97
Grolse	Grosstalbach–Isenthal	1	43.9	767	1820	9.3	1956–	BAFU	0.40	21	83–87
GueBel	Gürbe–Belp	1	117	511	837		1922–	BAFU	1.26	16	93–97
GueBur	Gürbe–Burgistein, Pfandersmatt	2	53.7	568	1044		1981–	BAFU	0.84	15	93–97
HfrBub	Hintere Frenke–Bubendorf, M.	5.1	38.2	352	603		1984–	BL	0.63	8	93–97
HfrRei	Hintere Frenke–Reigoldswil	5.3	14.6	489	742		1982–	BL	0.47	6	93–97
HinHin	Hinterrhein–Hinterrhein	2	53.7	1584	2360	17.2	1945–	BAFU	0.47	17	93–97
HomThu	Homburgerbach–Thürmen	5.1	30.3	387	615		1975–	BL	0.64	6	93–97
IlfLan	Ilfis–Langnau	3	188	685	1051		1989–	BAFU	1.68	14	93–97
JonPil	Jona–Pilgersteg, Dürnten	5.1	24.1	560	818		1970–	ZH	0.78	6	93–97
JonRue	Jona–Rüti	4	57.8	450	669		1994–	ZH	1.13	7	93–97
JonZwi	Jonen–Zwillikon	5.1	39.1	460	605		1987–	ZH	1.00	5	93–97
KaiKai	Kaisterbach–Kaisten	5.3	12.1	321	464		1980–	AG	0.50	5	93–97
KanFru	Kander–Frutigen, Viadukt	4	207	778	2212	16.3	1991–	BE	0.93	28	93–97
KanHon	Kander–Hondrich	2	520	650	1900	7.9	1980–	BAFU	1.49	29	93–97
KemIll	Kempt–Illnau	5.1	37.3	500	612		1968–	ZH	1.29	5	93–97
KEmLit	Kleine Emme–Littau, Reussbühl	2	477	431	1050		1936–	BAFU	2.08	19	93–97
KEmWCh	Kleine Emme–Werthenstein, Chap.	3	311	540	1173		1984–	BAFU	1.65	17	93–97
KoeKoe	Köllikerbach–Kölliken	5.3	10.1	423	488		1984–	AG	0.63	3	93–97
LanHut	Langeten–Huttwil, Häberenbad	1	59.9	597	766		1966–	BAFU	1.87	6	93–97
LimBae	Limpach–Bätterkinden, Kräiligen	5.1	77.0	462	519		1986–	BE	3.21	2	93–97
LouSaa	Louibach–Saanen, Gstaad	4	62.4	1085	1875	5.9	1994–	BE	0.51	20	93–97
LueBre	Lüssel–Breitenbach	4	46.0	384	742		1979–	SO	0.62	8	98–02
LutNeb	Luthern–Nebikon	3	108	494	740		1987–	BAFU	1.61	9	93–97
LueGst	Lütschine–Gsteig	1	379	585	2050	17.4	1908–	BAFU	1.06	35	93–97
LtzAad	Lützelmurg–Aadorf	5.1	35.5	502	619		1993–	TG	0.99	4	93–97
LysLys	Lyssbach–Lyss, Herrengasse	4	49.9	444	574		1992–	BE	1.47	4	93–97
MagRhe	Magdenerbach–Rheinfelden	5.1	33.2	300	483		1982–	AG	0.85	5	93–97
MenDom	Mentue–Dommartin, La Scie	3	12.5	694	831		1974–1990	BAFU	0.69	3	83–87
MenYvo	Mentue–Yvonand, La Mauguettaz	1	105	449	679		1971–	BAFU	1.94	5	93–97
MinEut	Minster–Euthal, Rüti	2	59.2	894	1351		1960–	BAFU	0.69	13	93–97
MoeZei	Möhlinbach–Zeiningen	5.1	26.6	338	514		1982–	AG	0.78	4	93–97
MurFra	Murg–Frauenfeld (TG)	2	212	390	580		1974–	BAFU	2.68	7	93–97
MurMur	Murg–Murgenthal (AG)	1	207	419	637		1980–	BAFU	3.09	8	93–97
MurWae	Murg–Wängi (TG)	2	78.9	466	650		1954–	BAFU	1.41	6	93–97
NaeNef	Näfbach–Neftenbach	4	37.7	394	464		1992–	ZH	1.64	3	93–97
NecMog	Necker–Mogelsberg, Aachsäge	2	88.2	606	959		1972–	BAFU	1.00	9	93–97
NozPre	Nozon–Pré Chaillet	4	45.2	440	882		1993–	VD	0.72	9	93–97
OenHei	Önz–Heimenhusen	4	84.1	440	583		1987–	BE	1.91	4	93–97
OriLie	Orisbach–Liestal	5.1	20.8	315	515		1981–	BL	0.56	4	93–97
PGIVil	Petite Glâne–Villars-le-Grand	4	84.6	433	560		1986–1990	VD	2.17	5	93–97
PfaVor	Pfaffnern–Vordemwald	4	38.8	417	517		1980–	AG	1.34	4	93–97
PleChu	Plessur–Chur	2	263	573	1850		1930–	BAFU	1.16	24	93–97
RauMou	Raus–Moutier	5.1	40.8	528	895		1996–	BE	0.68	9	98–02
RepDie	Reppisch–Dietikon	4	69.1	380	594		1986–	ZH	1.13	5	93–97
RigObe	Rigiaa–Oberarth	5.2	17.1	435	1055		1995–	ZG	0.34	13	98–02
RonHoc	Ron–Hochdorf	4	27.8	468	571		1986–1990	LU	2.32	3	86–90
RotRog	Rot–Roggwil, Buechärgerten	1	53.6	436	586		1980–	BAFU	1.79	3	93–97
RotHut	Rotbach–Huttwil	5.1	39.8	613	755		1987–1994	BE	1.90	4	90–94
RoeEgg	Röttenbach–Eggiwil	5.1	52.6	823	991		1994–	BE	1.14	8	93–97
SchVic	Scheulte–Vicques	3	72.8	463	785		1992–	BAFU	0.90	8	93–97
SchRem	Schmittenbach–Remigen	5.3	13.2	385	523		1982–	AG	0.63	4	93–97
SLuGue	Schwarze Lütschine–Gündlischwand	5.1	179	653	2062	19.7	1992–	BE	0.72	33	93–97
SchRic	Schwarzenbach–Rickenbach	5.2	15.0	410	454		1992–	ZH	1.00	3	93–97
SenTho	Sense–Thörishaus, Sensematt	2	352	555	1068		1927–	BAFU	2.19	16	93–97
SimLat	Simme–Latterbach	3	564	665	1598	2.2	1984–	BAFU	1.87	25	93–97
SimObr	Simme–Oberried/Lenk	1	35.7	1096	2370	34.6	1944–	BAFU	0.48	19	93–97
SimObw	Simme–Oberwil	2	344	777	1640	3.7	1921–	BAFU	1.40	24	93–97
SimZwe	Simme–Zweisimmen	4	203	930	1801	6.2	1994–	BE	1.02	22	93–97
SioVui	Sionge–Vuippens	2	45.3	681	862		1975–	BAFU	1.08	6	93–97

Symbol	River and station name	G	A	H	mH	Glac	Series	Source	A _{HHRU}	AZ	Calib
SisEik	Sissle–Eiken	4	123	314	529		1959–	AG	1.58	6	93–97
SitApp	Sitter–Appenzell	2	74.2	769	1252	0.1	1911–	BAFU	0.75	17	93–97
SitStG	Sitter–St.Gallen, Bruggen/Au	2	261	576	1040		1980–	BAFU	1.78	18	93–97
SomSom	Somvixer Rhein–Somvix	2	21.8	1490	2450	6.7	1931–	BAFU	0.47	14	93–97
SorDel	Sorne–Delémont	2	241	406	808		1982–	BAFU	1.87	10	93–97
StaFri	Staffeleggbach–Frick	5.1	20.8	358	534		1979–	AG	0.65	5	93–97
SteSte	Steinach–Steinach	2	24.2	406	710		1961–	BAFU	0.86	7	93–97
SteKal	Steinenbach–Kaltbrunn	2	19.1	451	1112		1968–	BAFU	0.37	12	93–97
SurUnt	Surb–Unterehrendingen	5.1	27.6	424	541		1991–	AG	0.95	4	93–97
SuzPer	Suze–Péry, Fabrique de ciment	5.1	176	588	1029		1977–	BE	1.43	11	93–97
SuzSon	Suze–Sonceboz	1	150	642	1050		1961–	BAFU	1.47	10	93–97
TalCha	Talent–Chavornay	4	66.3	440	670		1993–	VD	1.89	5	93–97
TasGru	Taschinasbach–Grüschi	2	63.0	666	1768		1972–	BAFU	0.60	21	93–97
ThuAnd	Thur–Andelfingen	2	1696	356	770		1904–	BAFU	5.42	22	93–97
ThuHal	Thur–Halden	1	1085	456	910		1965–	BAFU	3.83	20	93–97
ThuJon	Thur–Jonschwil	1	493	534	1030		1966–	BAFU	2.36	18	93–97
ThuSte	Thur–Stein, Iltishag	2	84.0	850	1448		1963–	BAFU	0.78	15	93–97
ToeAlt	Töss–Altlandenberg, Bauma	5.1	66.7	621	871		1989–	ZH	0.95	7	93–97
ToeBei	Töss–Beicher	5.3	11.3	760	1031		1968–	ZH	0.49	5	93–97
ToeFre	Töss–Freienstein	5.1	399	360	626		1984–	ZH	2.96	9	93–97
ToeNef	Töss–Neftenbach	2	342	389	650		1921–	BAFU	2.63	9	93–97
ToeRae	Töss–Rämismühle, Zell	5.1	127	524	790		1988–	ZH	1.41	8	93–97
ToeWue	Töss–Wülflingen	5.1	260	430	688		1965–	ZH	2.10	9	93–97
TruRae	Trübbach–Räzliberg	3	19.5	1430	2610	53.7	1952–1995	BAFU	0.42	18	83–87
TruTru	Trueb–Trub, Schachenhusbrücke	5.1	53.2	751	1034		1990–	BE	0.87	6	93–97
UrnHun	Urnäsch–Hundwil	2	64.5	746	1085		1961–	BAFU	0.78	14	93–97
VioAug	Violenbach–Augst	5.2	16.9	268	425		1978–	BL	0.68	4	93–97
VFrBub	Vordere Frenke–Bubendorf	5.1	45.6	371	647		1975–	BL	0.69	7	93–97
VFrWal	Vordere Frenke–Waldenburg	5.3	12.6	524	826		1977–	BL	0.37	5	93–97
WLuzwe	Weisse Lütschine–Zweilütschinen	2	164	650	2170	17.6	1933–	BAFU	0.72	33	93–97
WigZof	Wigger–Zofingen	3	368	426	660		1981–	BAFU	3.91	10	93–97
WoeWit	Wölflinswiler Bach–Wittnau	5.2	17.4	395	600		1982–	AG	0.67	5	93–97
WynRei	Wyna–Reinach	5.1	47.1	514	682		1980–	AG	1.39	5	93–97
WynSuh	Wyna–Suhr	5.1	120	392	617		1980–	AG	1.71	6	93–97
WynUnt	Wyna–Unterkulm	4	92.1	455	649		1953–	AG	1.81	5	93–97

Calibration failed

Symbol	River and station name	G	A	H	mH	Glac	Series	Source	A _{HHRU}	AZ	Calib
ChaMou	Chalière–Moutier	5.2	18.1	572	907		1996–	BE	0.52	6	failed
ChiFre	Chiese–Freimettigen	5.1	44.9	645	835		1985–1995	BE	1.40	6	failed
DorSch	Dorfbach–Schwarzenburg	5.3	10.8	804	943		1996–	BE	0.83	5	failed
DueBal	Dünnergern–Balsthal	4	139	472	803		1996–2004	SO	1.26	9	failed
FisFis	Fisibach–Fisibach	5.3	14.9	379	516		1982–	AG	0.68	3	failed
GroSig	Grönbach–Sigristwil, Grönhütte	5.3	10.6	1121	1552		1994–	BE	0.35	7	failed
KraKra	Krauchtalbach–Krauchthal	5.2	16.2	585	698		1998–	BE	0.77	4	failed
LanLot	Langeten–Lotzwil	5.1	115	500	713		1994–	BE	2.74	6	failed
LutObe	Luterbach–Oberburg, Dorf	5.1	34.0	548	698		1984–	BE	1.17	4	failed
LysSch	Lyssbach–Schüpfen, Bundkofen	5.1	22.5	505	616		1991–	BE	0.94	4	failed
OesKop	Ösch–Koppigen, Weidmoos	4	38.0	468	561		1985–	BE	1.23	4	failed
RueSch	Ruederchen–Schöftland	5.2	19.0	463	614		1980–	AG	0.68	4	failed
SurDoe	Surb–Döttingen	4	67.2	335	511		1980–	AG	1.49	5	failed
SuzVil	Suze–Villeret, pont de la STEP	5.1	52.4	739	1089		1994–	BE	0.78	7	failed
TaeWis	Tägerbach–Wislikofen	5.3	13.7	390	551		1982–	AG	0.81	3	failed
TalSch	Talbach–Schinznach-Dorf	5.3	14.5	360	552		1980–	AG	0.63	4	failed
UerHol	Ürke–Holziken	4	25.1	438	577		1979–	AG	0.93	4	failed
UrtSch	Urtenen–Schalunen, Mühle	5.1	96.0	484	557		1985–	BE	2.74	4	failed
WorlItt	Worble–Ittigen	3	60.5	522	679		1988–	BAFU	1.23	5	failed

Anhang B

Gebietsattribute

Table B.1: Alphabetical list of catchment attributes used in this study with corresponding classification in groups (cf. chapter 8.2). Use of the attributes in Nearest Neighbours (NNBR), Kriging (KRIG) and Regression (REGR) regionalisations is indicated in the respective columns.

Tabelle B.1: Alphabetische Liste der in dieser Arbeit verwendeten Gebietsattribute mit Klassierung in Gruppen (vgl. Kapitel 8.2). Die Verwendung der Attribute in den Regionalisationsansätzen Nearest Neighbours (NNBR), Kriging (KRIG) und Regression (REGR) ist in den entsprechenden Spalten gekennzeichnet.

Symbol	Full attribute name	Unit	Group	NNBR	KRIG	REGR
AGR	share of pastures and arable land	[%]	land use	✓	✓	
AREA	area	[km ²]	physiography		✓	
ASPE	share of east-exposed surfaces	[%]	physiography		✓	
ASPN	share of north-exposed surfaces	[%]	physiography	✓	✓	
ASPS	share of south-exposed surfaces	[%]	physiography	✓	✓	
ASPW	share of west-exposed surfaces	[%]	physiography		✓	
BAGR	share of pasture and arable land in contributing areas	[%]	land use		✓	
BBLT	share of urban area in contributing areas	[%]	land use		✓	
BFST	share of forest area in contributing areas	[%]	land use	✓		✓
BRCK ⁽⁻⁾	share of hard-rock area in contributing areas	[%]	land use			
BSLS ⁽⁻⁾	share of soil-covered area in contributing areas	[%]	land use			
BULT ⁽⁻⁾	share of urban areas	[%]	land use			
CRCL	circularity index	[·]	physiography	✓		✓
CTRX	easting of catchment centroid in Swiss co-ordinate system	[km]	position in space		✓	
CTRY	northing of catchment centroid in Swiss co-ordinate system	[km]	position in space	✓	✓	✓
FBTR	share of contributing areas (avg. distance to channel 250 m)	[%]	land use	✓		✓
FRST	share of forest areas	[%]	land use	✓		
G_F1	geology: hard rock – pores, fissures or karst	[%]	geology		✓	
G_F2	geology: hard rock – variable permeability	[%]	geology		✓	
G_F3	geology: hard rock – impermeable	[%]	geology	✓		
G_L1	geology: unconsolidated, low permeability	[%]	geology	✓		✓
G_L2	geology: unconsolidated, variable permeability	[%]	geology	✓		✓
G_L3	geology: unconsolidated, high permeability	[%]	geology		✓	
GLBL ⁽⁻⁾	share of glaciated areas, ablation zone	[%]	glacier			
GLCC	share of glaciated areas, accumulation zone	[%]	glacier		✓	
GLCR ⁽⁺⁾	share of glaciated areas	[%]	glacier			
HAVG ⁽⁺⁾	average altitude	[m a.s.l.]	physiography			
HG_1	hydrogeology: unconsolidated 1	[%]	hydrogeology		✓	
HG_2	hydrogeology: unconsolidated 2	[%]	hydrogeology	✓	✓	
HG_3	hydrogeology: unconsolidated 3	[%]	hydrogeology		✓	
HG0A	hydrogeology: impermeable, unconsolidated	[%]	hydrogeology		✓	
HG0B	hydrogeology: impermeable hard rock	[%]	hydrogeology		✓	
HGFG	hydrogeology: hard rock	[%]	hydrogeology	✓		✓
HGKR	hydrogeology: karstic rock	[%]	hydrogeology		✓	
HMAX	maximum altitude	[m a.s.l.]	physiography		✓	
HMIN	minimum altitude	[m a.s.l.]	physiography	✓		✓
IAVG	average inclination	[°]	physiography		✓	
IN03	share of surfaces with inclination <3°	[%]	physiography		✓	
IN15	share of surfaces with inclination >15°	[%]	physiography	✓		✓
KWM1	hydraulic conductivity, average	[mm h ⁻¹]	soil physics	✓		✓
KWM2	hydraulic conductivity, standard deviation	[mm h ⁻¹]	soil physics	✓		✓
KWM3	hydraulic conductivity, skewness	[·]	soil physics	✓		✓
KWM4	hydraulic conductivity, kurtosis	[·]	soil physics		✓	

⁽⁻⁾ using the selection procedure described in chapter 9, these attributes are not used for any of the regionalisation approaches

⁽⁺⁾ the information of these attributes has been implemented in the regionalisation methods, therefore they were excluded from all attribute sets and have not been used in any of the attribute selection procedures

Symbol	Full attribute name	Unit	Group	NNBR	KRIG	REGR
NFM1	net field capacity, average	[%]	soil physics	✓	✓	
NFM2	net field capacity, standard deviation	[%]	soil physics	✓	✓	
NFM3	net field capacity, skewness	[‐]	soil physics		✓	
NFM4	net field capacity, kurtosis	[‐]	soil physics	✓	✓	
P_MD	hourly precipitation (≥ 0.02 mm), average Julian Date (MD)	[‐]	precipitation	✓	✓	
P_RR	hourly precipitation (≥ 0.02 mm), variability of Julian Date (r)	[‐]	precipitation	✓	✓	
PAVG	hourly precipitation (≥ 0.02 mm), average	[mm]	precipitation	✓	✓	
PCVA	hourly precipitation (≥ 0.02 mm), coefficient of variation	[‐]	precipitation		✓	
PDMD	maximum 24 h-precipitation, average Julian date (MD)	[‐]	precipitation	✓	✓	
PDRR	maximum 24 h-precipitation, variability of Julian Date (r)	[‐]	precipitation	✓	✓	
PERI	catchment perimeter	[m]	physiography		✓	
PKRT	hourly precipitation (≥ 0.02 mm), kurtosis	[‐]	precipitation		✓	
PMRL	relation of PMXX to PMXA	[‐]	precipitation	✓	✓	
PMXA	average of maximum annual precipitation intensities	[mm h ⁻¹]	precipitation		✓	
PMXX	maximum precipitation intensity	[mm h ⁻¹]	precipitation	✓	✓	
PSDV	hourly precipitation (≥ 0.02 mm), standard deviation	[mm]	precipitation		✓	
PSKW	hourly precipitation (≥ 0.02 mm), skewness	[‐]	precipitation		✓	
PSUM	average of annual precipitation sum	[mm]	precipitation	✓	✓	
PXXA	maximum 1h-precipitation intensity, return period 2.33 a	[mm]	precipitation		✓	
PXXB	maximum 1h-precipitation intensity, return period 100 a	[mm]	precipitation	✓		
PXXC	maximum 24h-precipitation intensity, return period 2.33 a	[mm]	precipitation	✓	✓	
PXXD	maximum 24h-precipitation intensity, return period 100 a	[mm]	precipitation	✓	✓	
PXXG	maximum 15min-precipitation intensity, return period 2.33 a	[mm]	precipitation		✓	
RELI	relief energy	[m]	physiography		✓	
ROCK	share of hard-rock areas	[‐]	land use		✓	
SHP1	shape parameter as to HUNDECHA AND BÁRDOSSY (2004)	[‐]	physiography	✓	✓	
SHP2 ^(‐)	shape parameter as to LUTZ (1984)	[‐]	physiography		✓	
SOLS	share of soil-covered areas	[‐]	land use		✓	
SSDR	average annual sunshine duration	[‐]	climate	✓	✓	
T_SP	range of monthly average temperatures	[°C]	climate	✓	✓	
TEMP ^(‐)	annual average temperature	[°C]	climate		✓	
TSM1	soil-topographic index, average	[‐]	soil physics	✓	✓	
TSM2	soil-topographic index, standard deviation	[‐]	soil physics	✓	✓	
TSM3	soil-topographic index, skewness	[‐]	soil physics	✓	✓	
TSM4	soil-topographic index, kurtosis	[‐]	soil physics	✓	✓	
VAPO	average vapour pressure	[hPa]	climate		✓	
WIND	average wind speed	[m s ⁻¹]	climate	✓	✓	

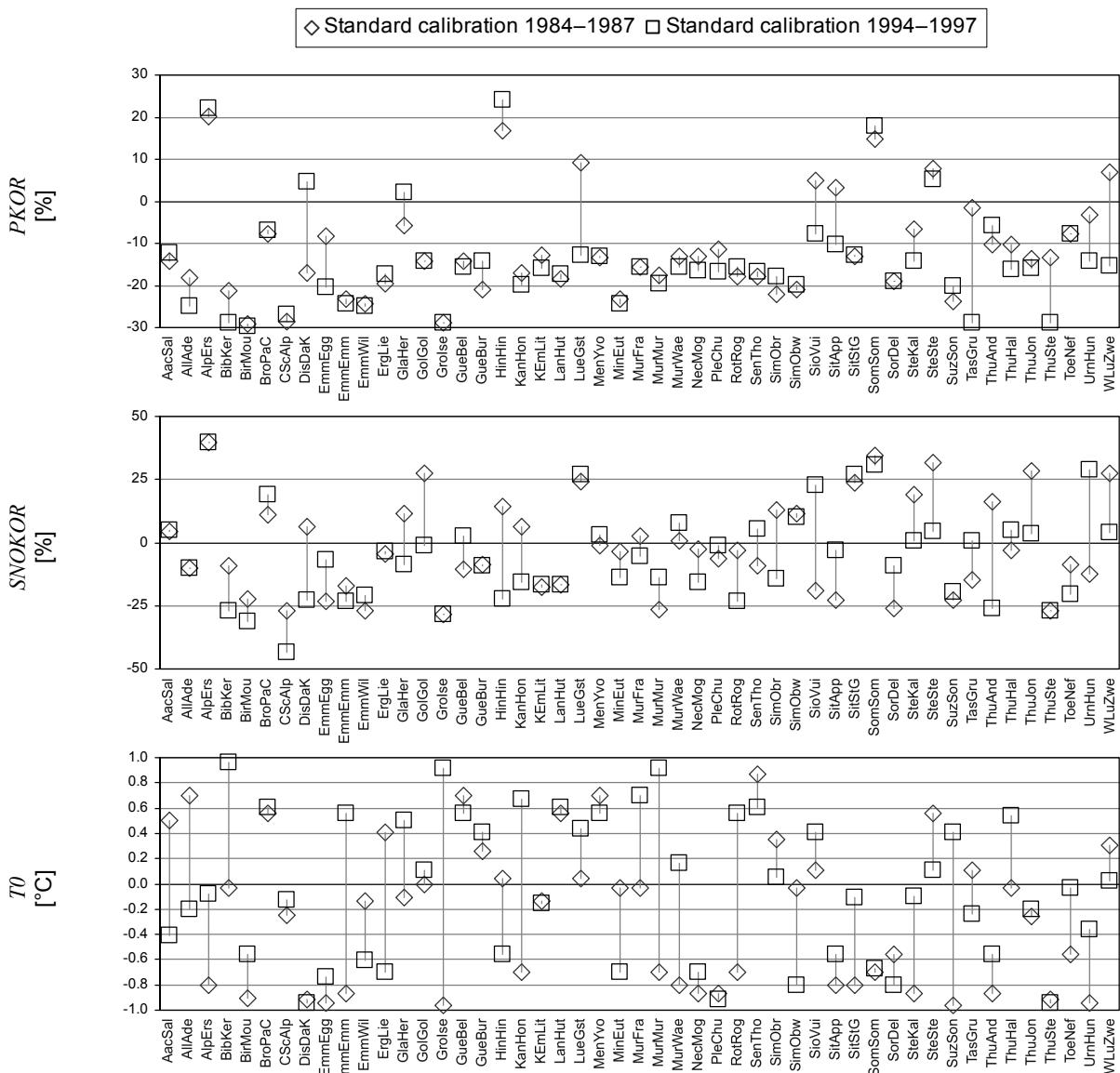
^(‐) using the selection procedure described in chapter 9, these attributes are not used for any of the regionalisation approaches

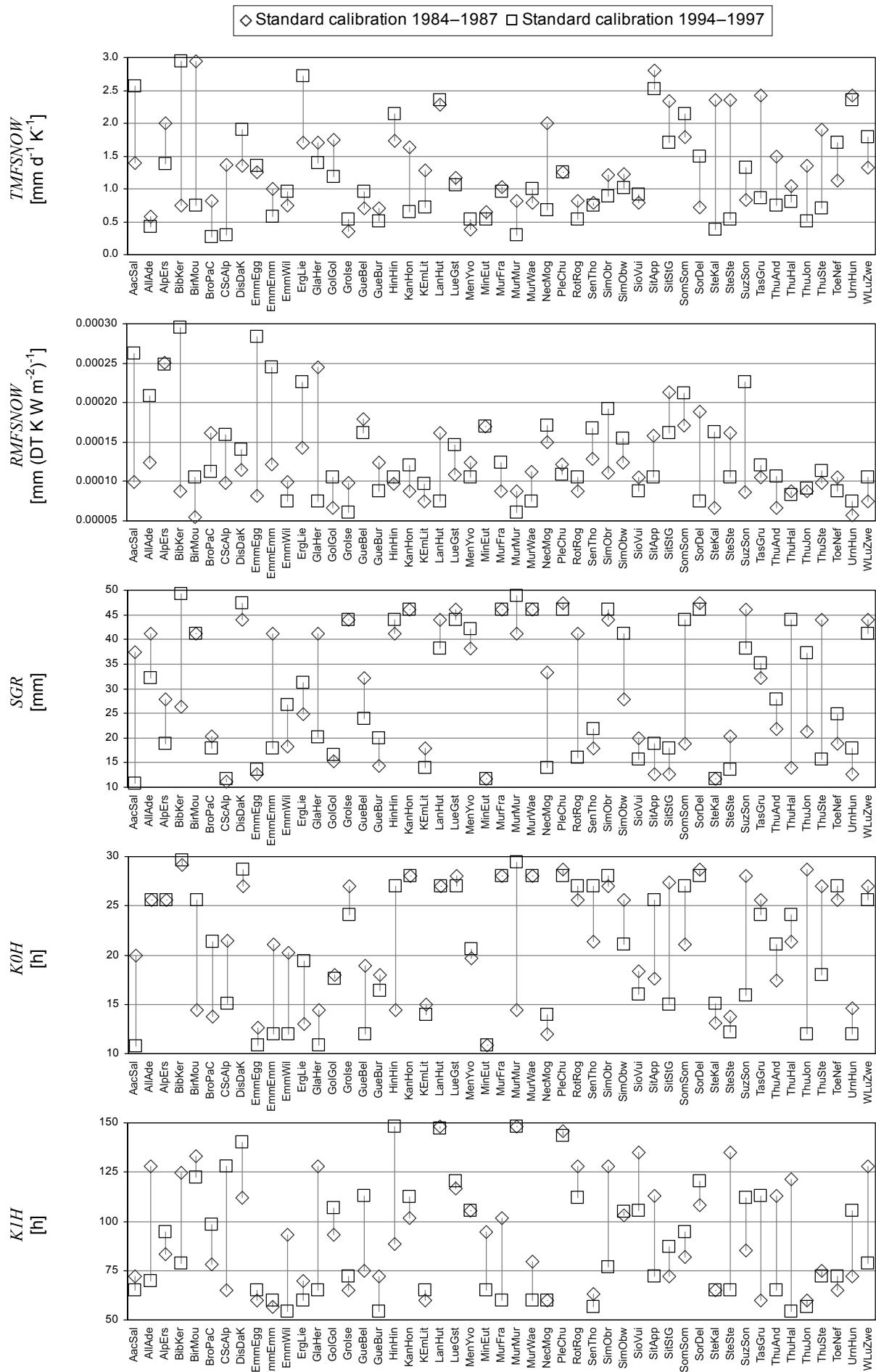
^(‐) the information of these attributes has been implemented in the regionalisation methods, therefore they were excluded from all attribute sets and have not been used in any of the attribute selection procedures

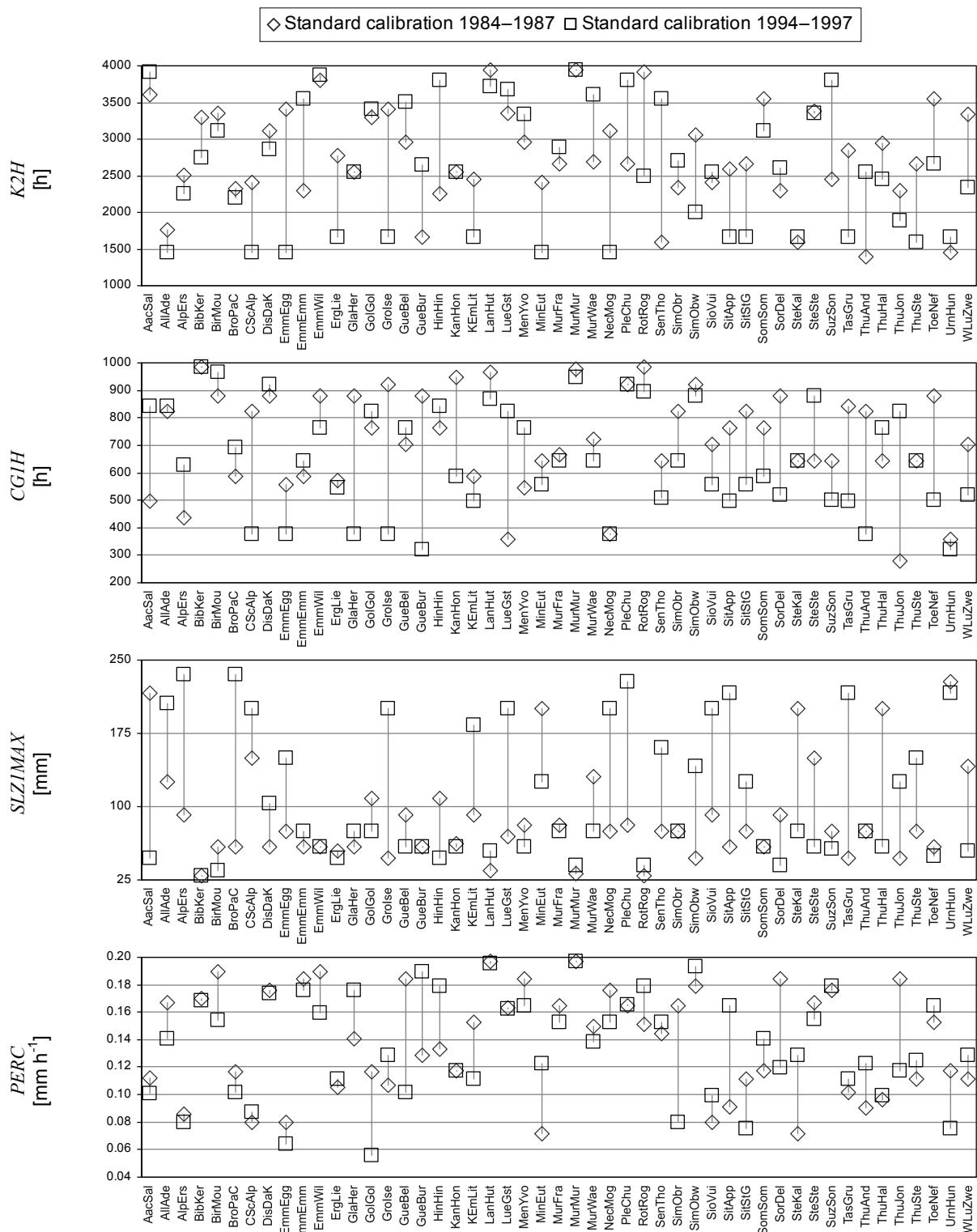
Anhang C

Kalibrierung auf zwei unabhängige Referenzzeiträume

Die folgenden Grafiken zeigen für alle 49 Einzugsgebiete der Priorität A die Parameterwerte, welche durch Kalibrierung auf unterschiedliche Referenzzeiträume gefunden wurden. Dazu erfolgte eine Mittelwasserkalibrierung (vgl. Kapitel 3) auf die Perioden 1984–1987 (Rauten) und 1994–1997 (Quadrate). Differenzen zwischen den für die beiden Perioden gefundenen Modellparameter weisen auf Unsicherheiten in der Parameterwahl hin. Zusammenfassende Grafiken und weitere Erläuterungen sind in Kapitel 6.4 zu finden.







Anhang D

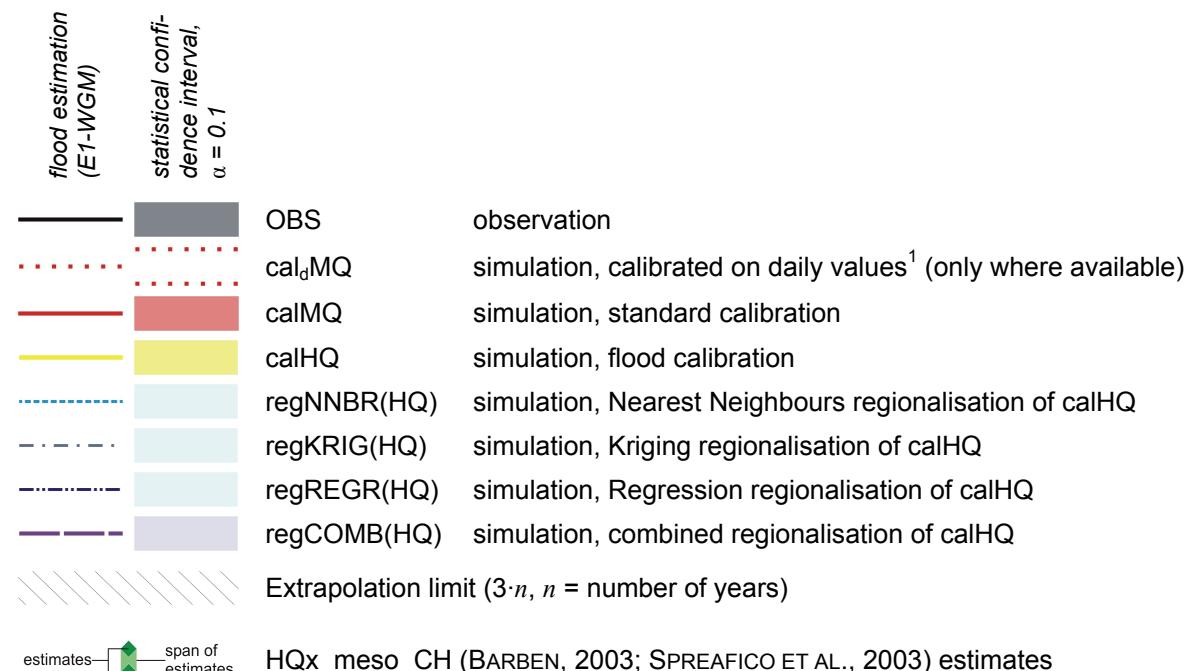
Grafiken der Hochwasserextrapolation

Die folgenden Seiten enthalten die graphischen Hochwasserextrapolationen für alle 49 Einzugsgebiete der Priorität A. Für diese Gebiete stehen lange und zuverlässige Messreihen des Abflusses zur Verfügung, welche eine fundierte Bewertung der extrapolierten Simulationsresultate erlauben. Basis aller Extrapolationen – sowohl bei der Beobachtung wie bei den Simulationen – sind die Jahreshochwasserspitzen der 20-jährigen Reihe 1984–2003 in stündlicher Auflösung. Die Extrapolation basiert aus Gründen der Vergleichbarkeit (vgl. Kapitel 4.2.3) durchgehend auf der ersten Extremalverteilung und den wahrscheinlichkeitsgewichteten Momenten (E1-WGM); die Datengrundlagen wurden mit HQ-EX (WASY, 1997) berechnet und grafisch stark überarbeitet.

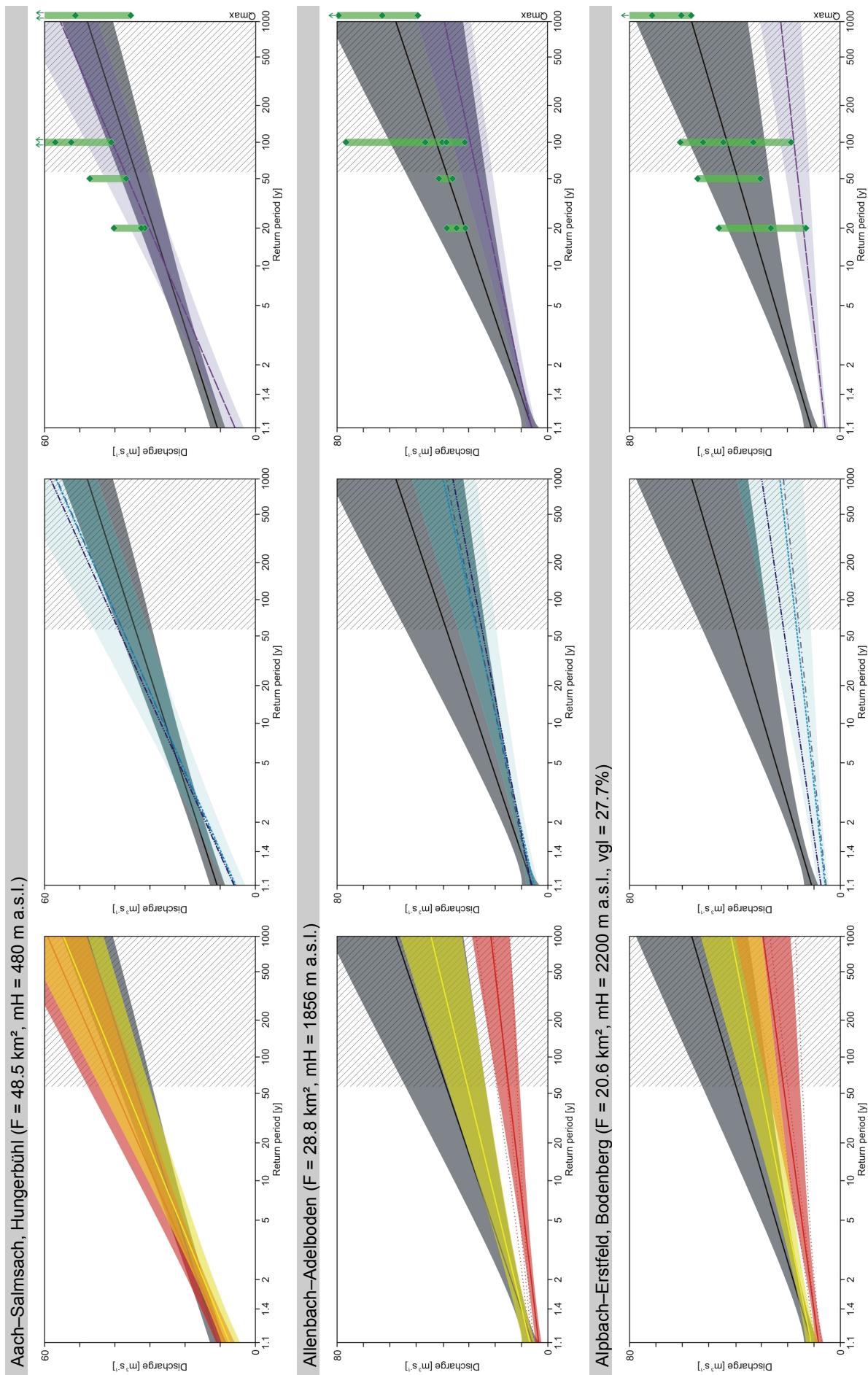
Der Übersichtlichkeit halber sind die verschiedenen Extrapolationen auf drei Grafiken aufgeteilt:

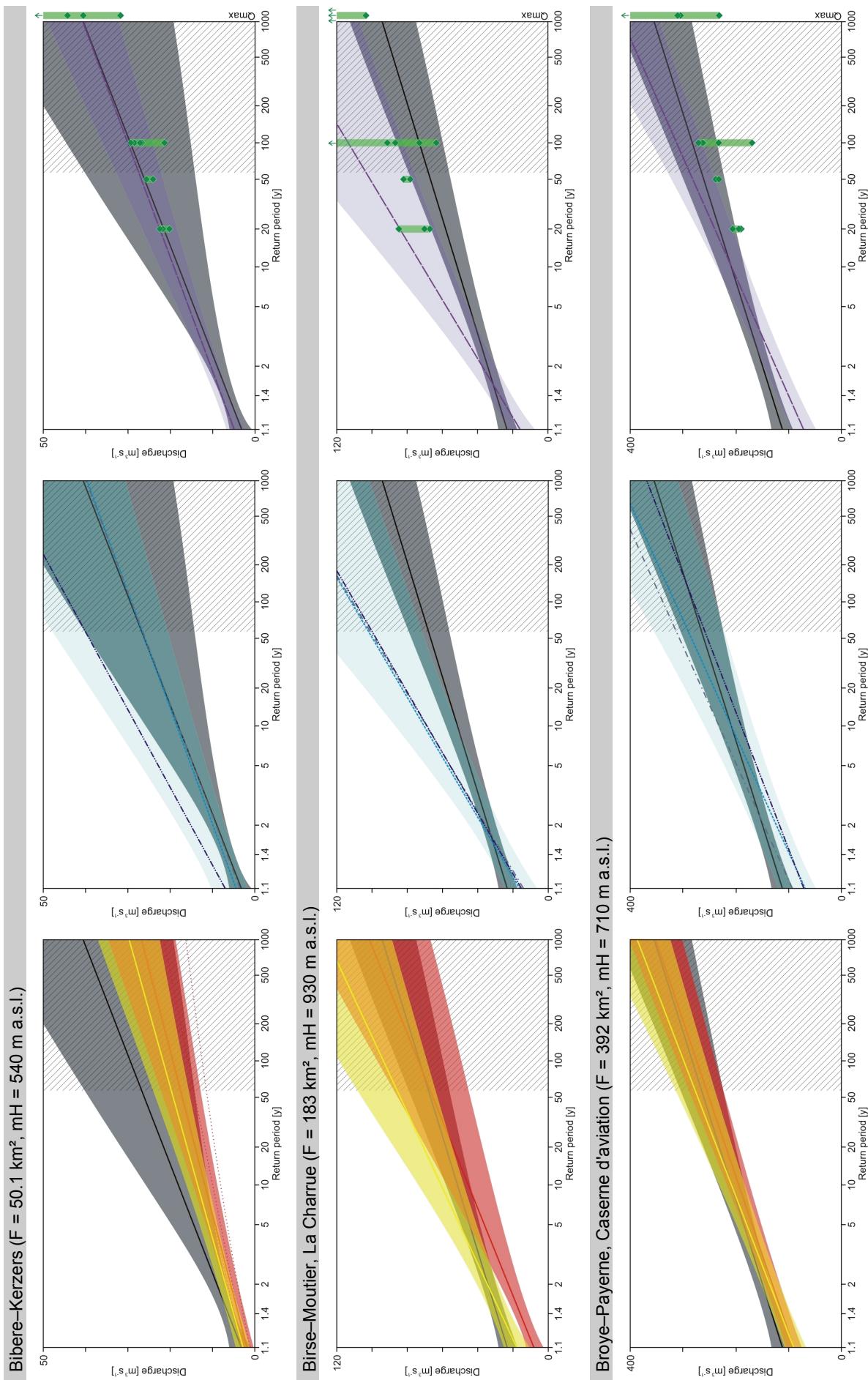
- Grafik 1 (jeweils links) zeigt die Resultate für Mittelwasserkalibrierung (calMQ) und Hochwasserkalibrierung (calHQ). Für die 17 Gebiete der Gruppe 1 (vgl. **Tabelle 3.1**) sind auch die Resultate der auf Tageswerte kalibrierten Simulation (cal_dMQ) eingezeichnet; diese weisen in der Extrapolation deutlich grössere Abweichungen von der Beobachtung auf und illustrieren die Bedeutung der ansonsten durchgehend angewendeten Kalibrierung auf stündliche Daten des Abflusses.
- Grafik 2 (jeweils Mitte) zeigt zusammengefasst die Resultate für die drei Regionalisierungen Nearest Neighbours (regNNBR(HQ)), Kriging (regKRIG(HQ)) und Regression (regREGR(HQ)).
- Grafik 3 (jeweils rechts) zeigt die Resultate der kombinierten Regionalisierung (regCOMB(HQ)). Grundlage ist die mediane Ganglinie, welche aus den drei Regionalisierungen regNNBR(HQ), regKRIG(HQ) und regREGR(HQ) berechnet wurde; aus dieser Ganglinie wurden wiederum die Jahreshöchstwerte extrapoliert. Zum Vergleich sind die wichtigsten aus HQx_meso_CH (BARBEN, 2003) verfügbaren Schätzwerte eingezeichnet. Es sind dies: BaD7 (HQ₂₀, HQ₅₀, HQ₁₀₀), GI-UB96FN (HQ₁₀₀, Q_{max}), GIUB96MQ (HQ₁₀₀, Q_{max}), Kölla meso (HQ₂₀, HQ₁₀₀), Kürsteiner (Q_{max}), Momente (HQ₂₀, HQ₅₀, HQ₁₀₀) und Müller-Zeller (Q_{max}); zu beachten ist, dass einige dieser Verfahren einen empfohlenen Skalenbereich besitzen (typischerweise 10 bis 500 km²) und hier in 3 von 49 Fällen oberhalb dieser Limiten angewendet werden.

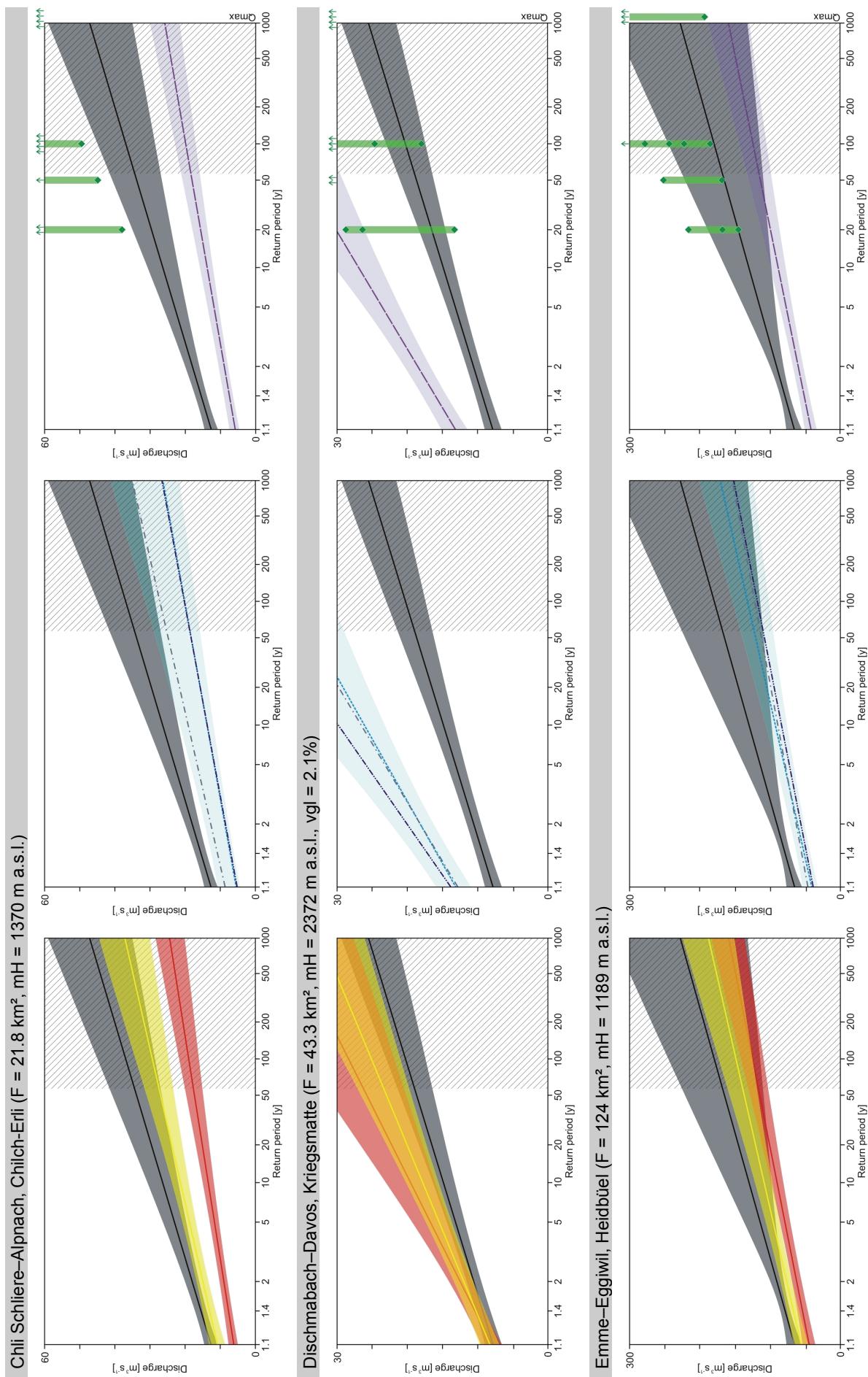
In allen Grafiken dient die Extrapolation aus den Jahreshöchstwerten der beobachteten Reihe (OBS) in stündlicher Auflösung 1984–2003 als Referenz. Ergänzend sind jeweils Gebietsfläche (F), mittlere Gebietshöhe (mH) und Vergletscherungsgrad (vgl. nur wo > 0) angegeben.

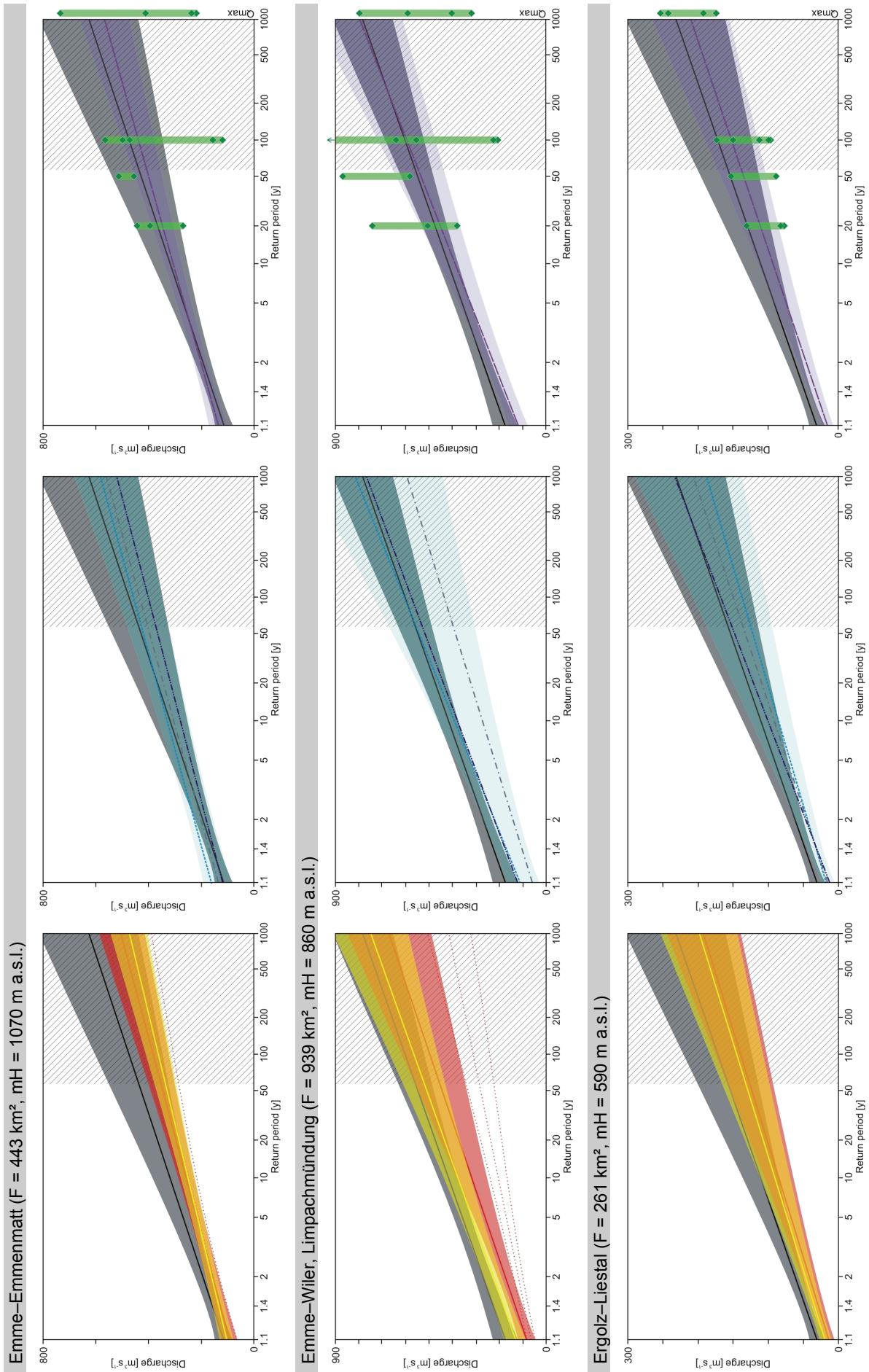


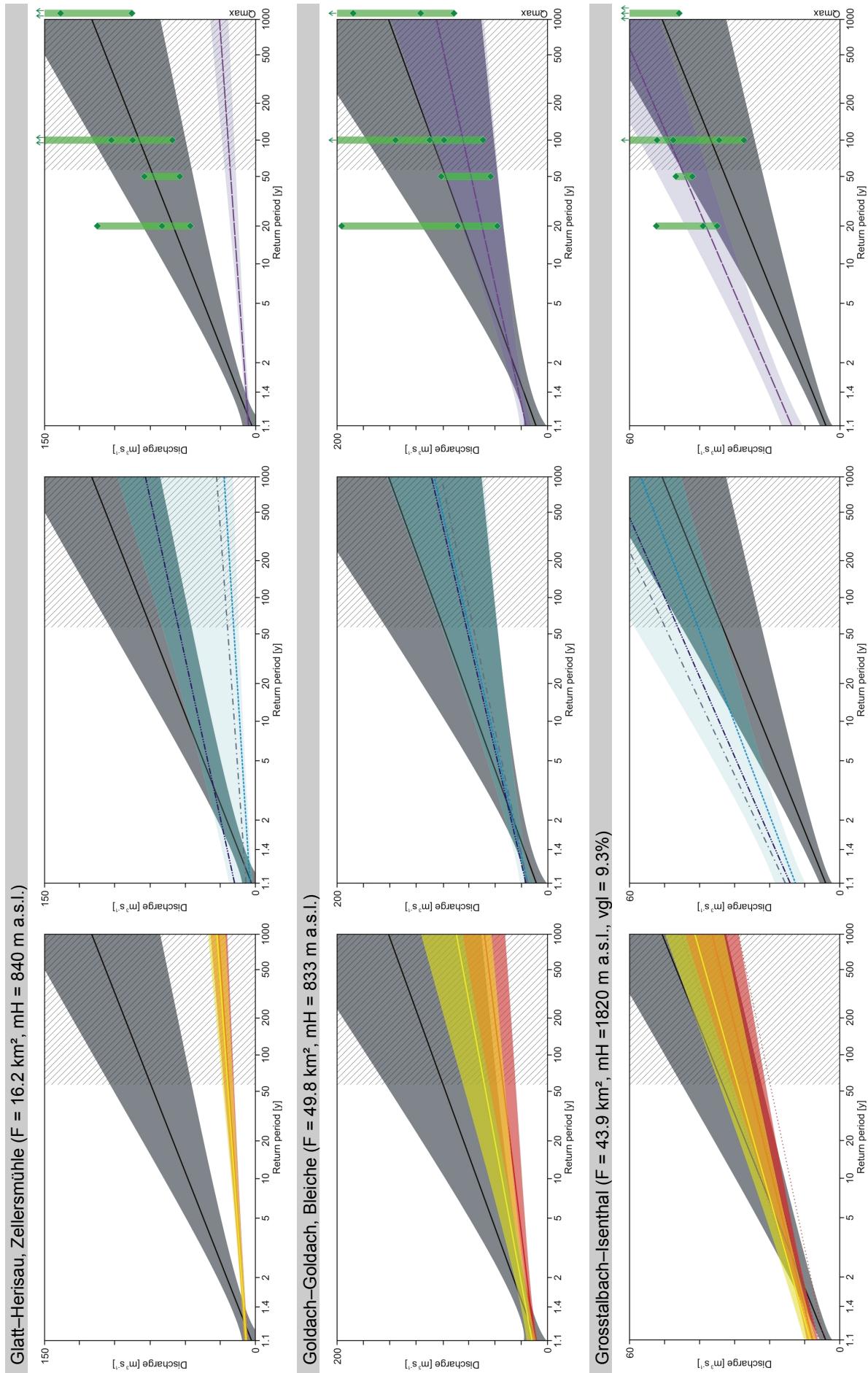
¹ all other simulations refer to calibration (or corresponding regionalisation) based on hourly values

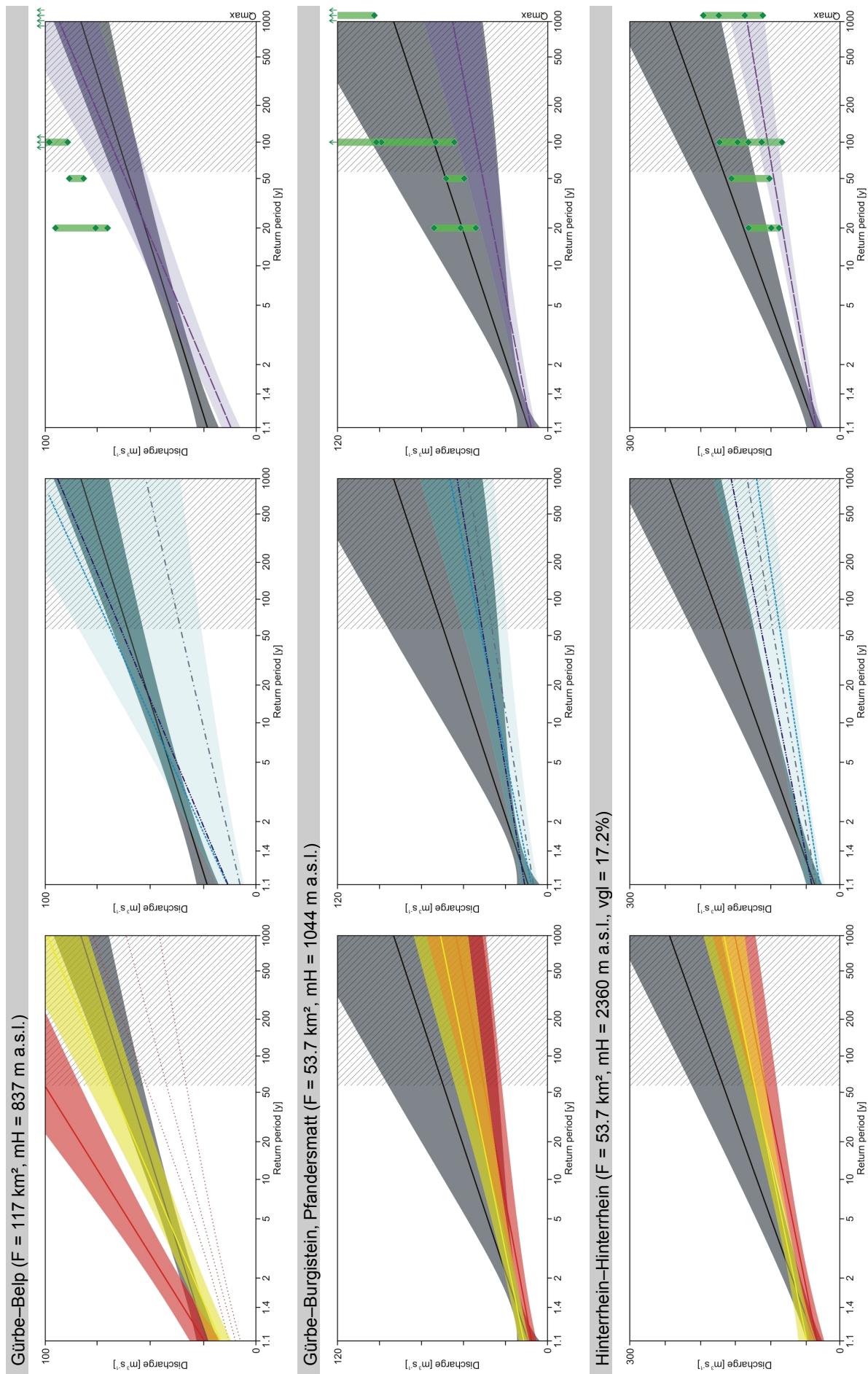


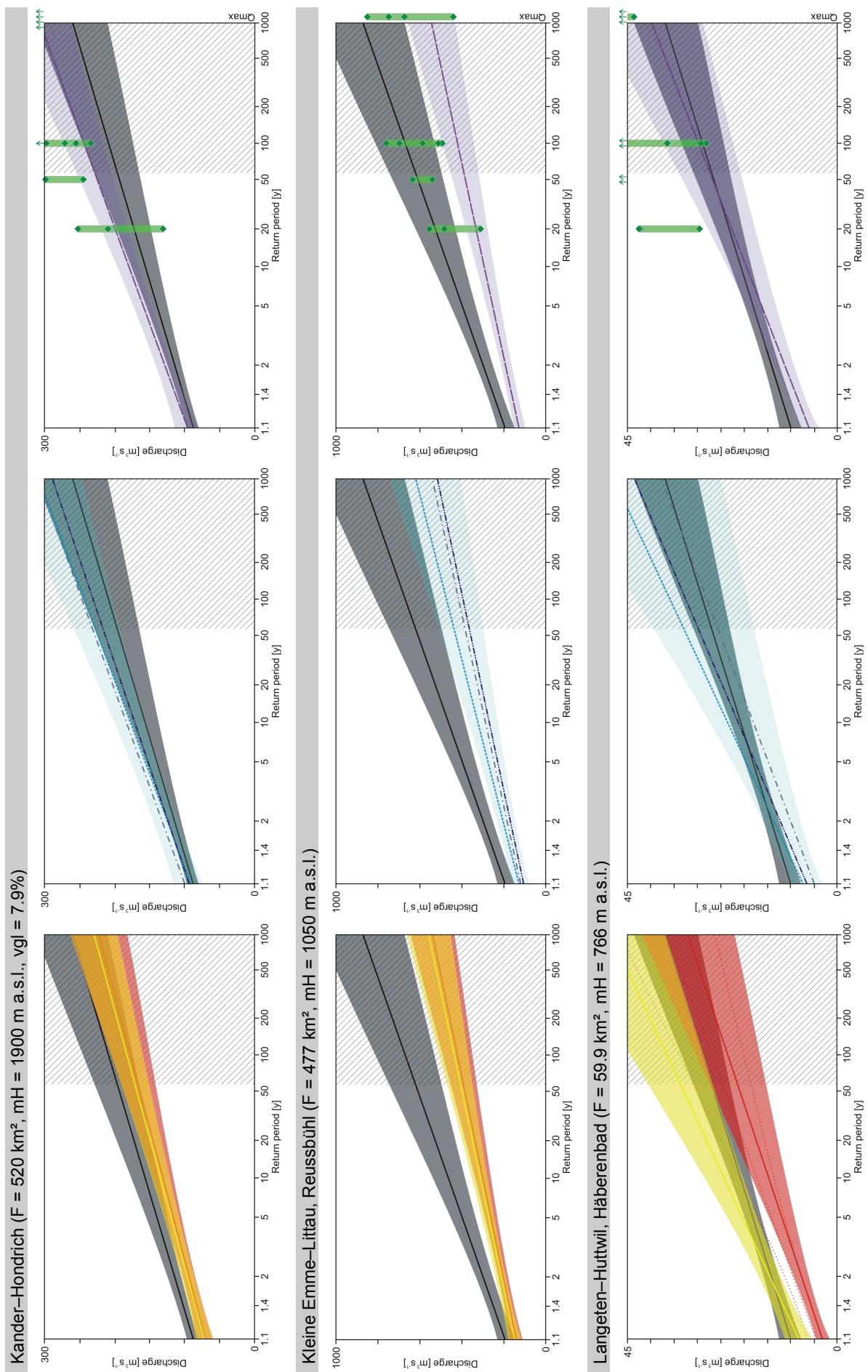


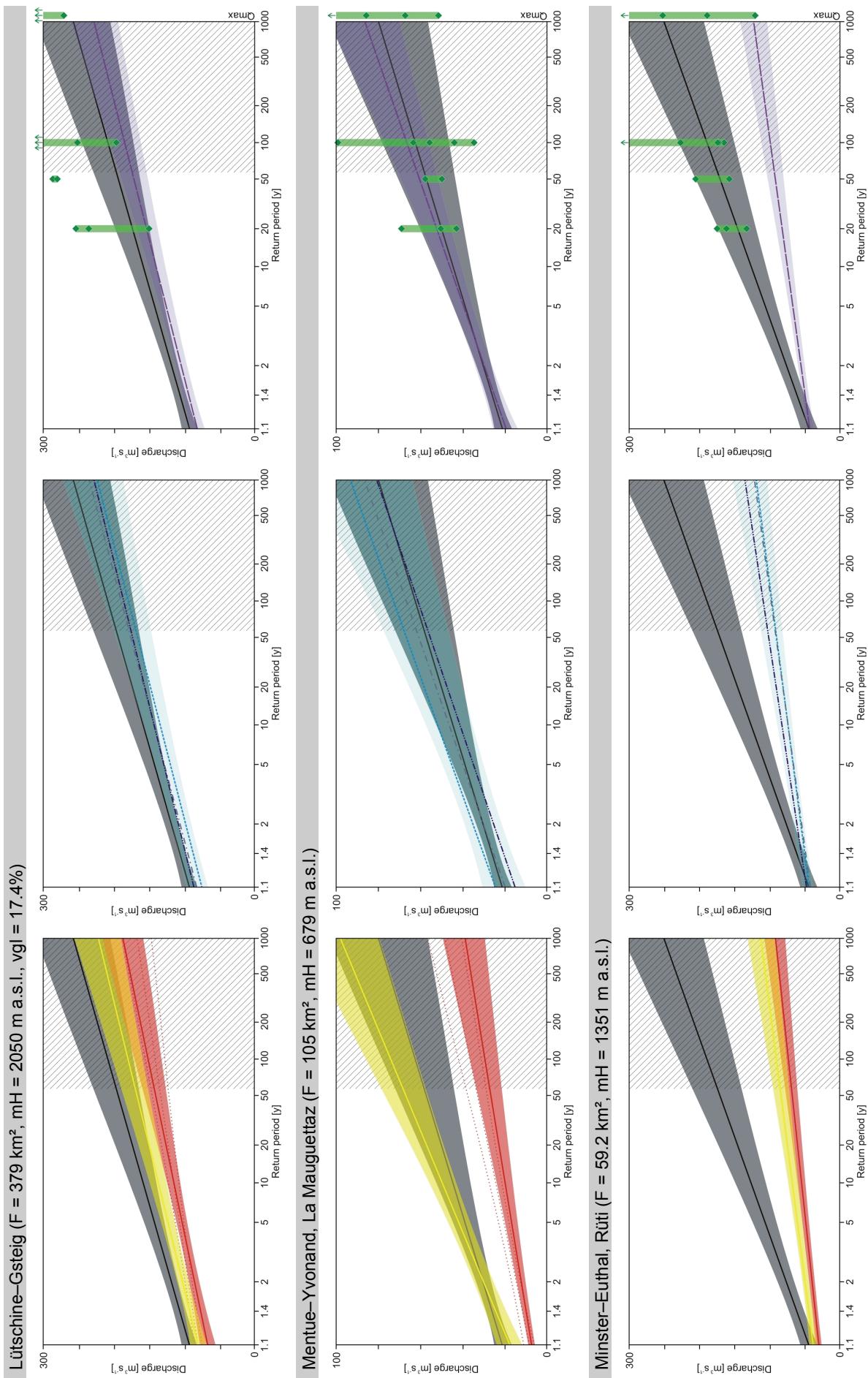


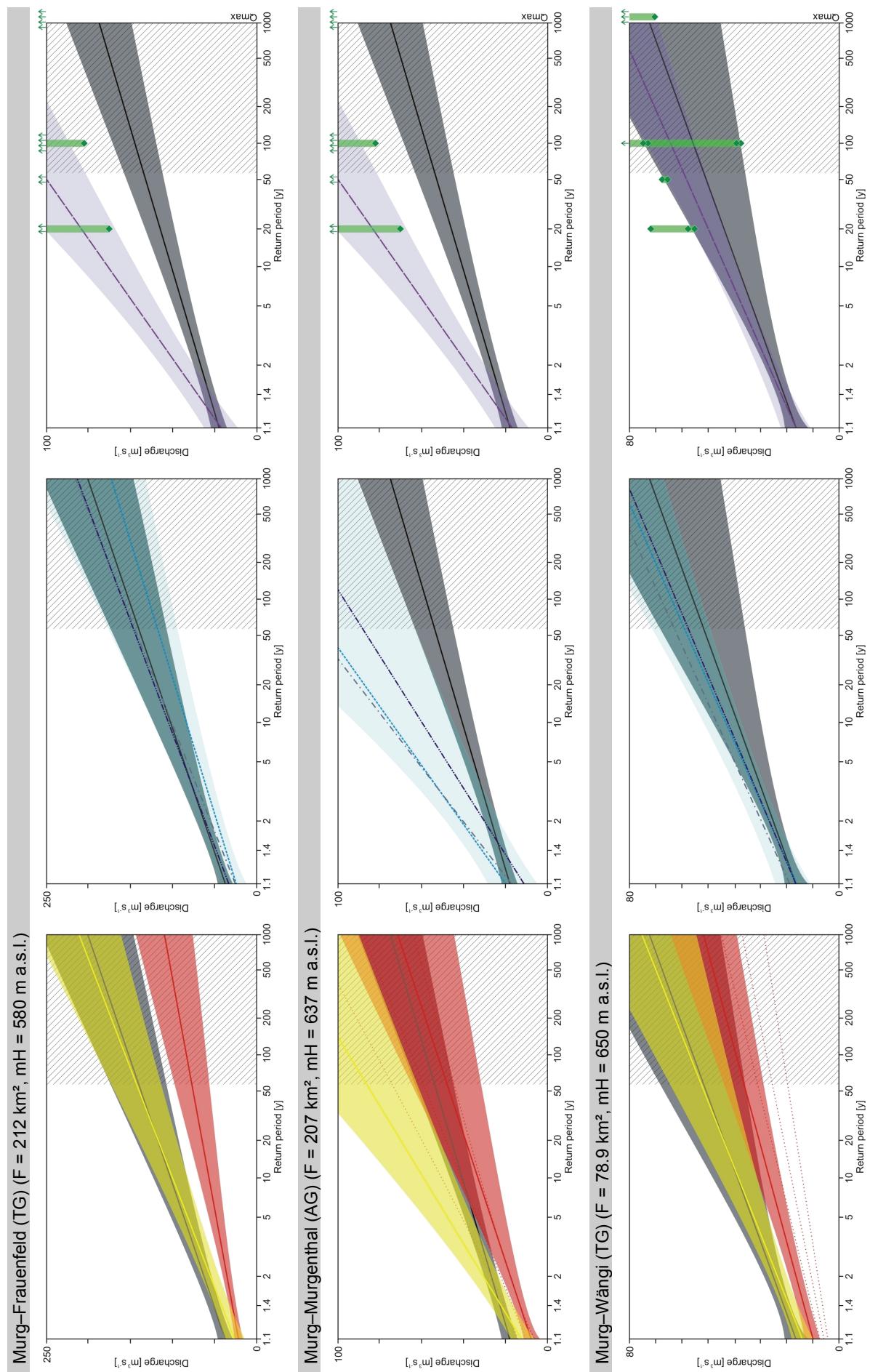


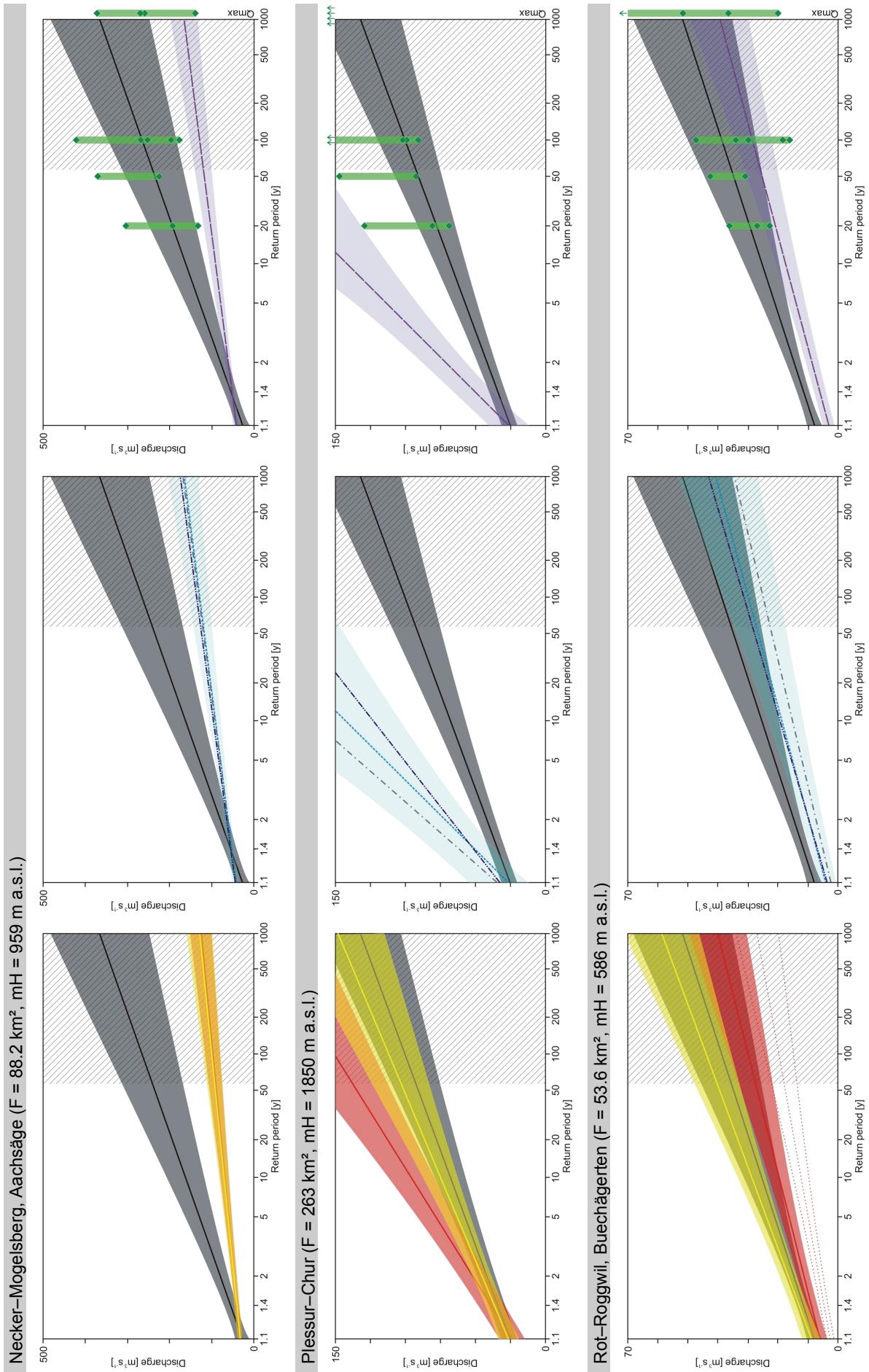


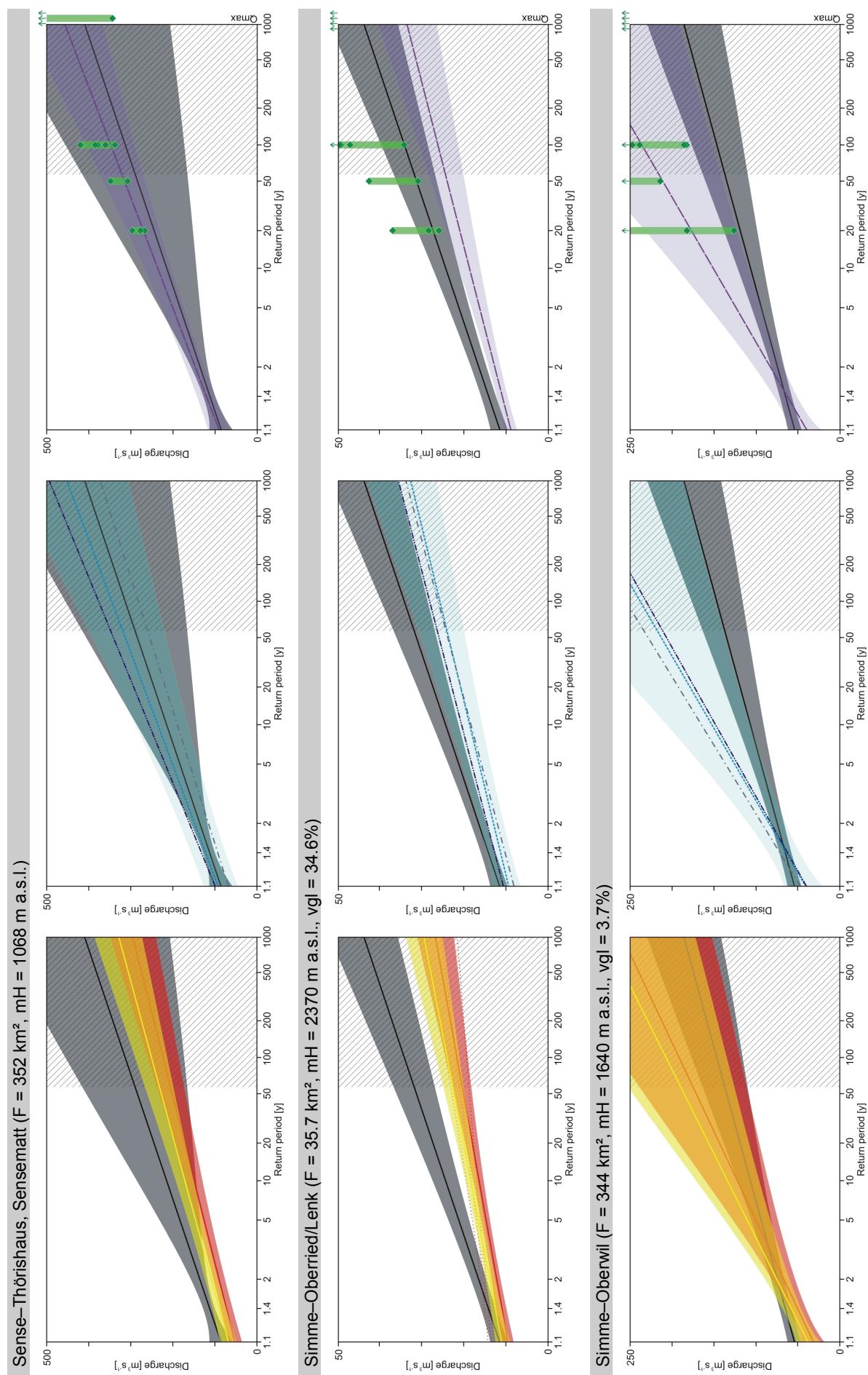


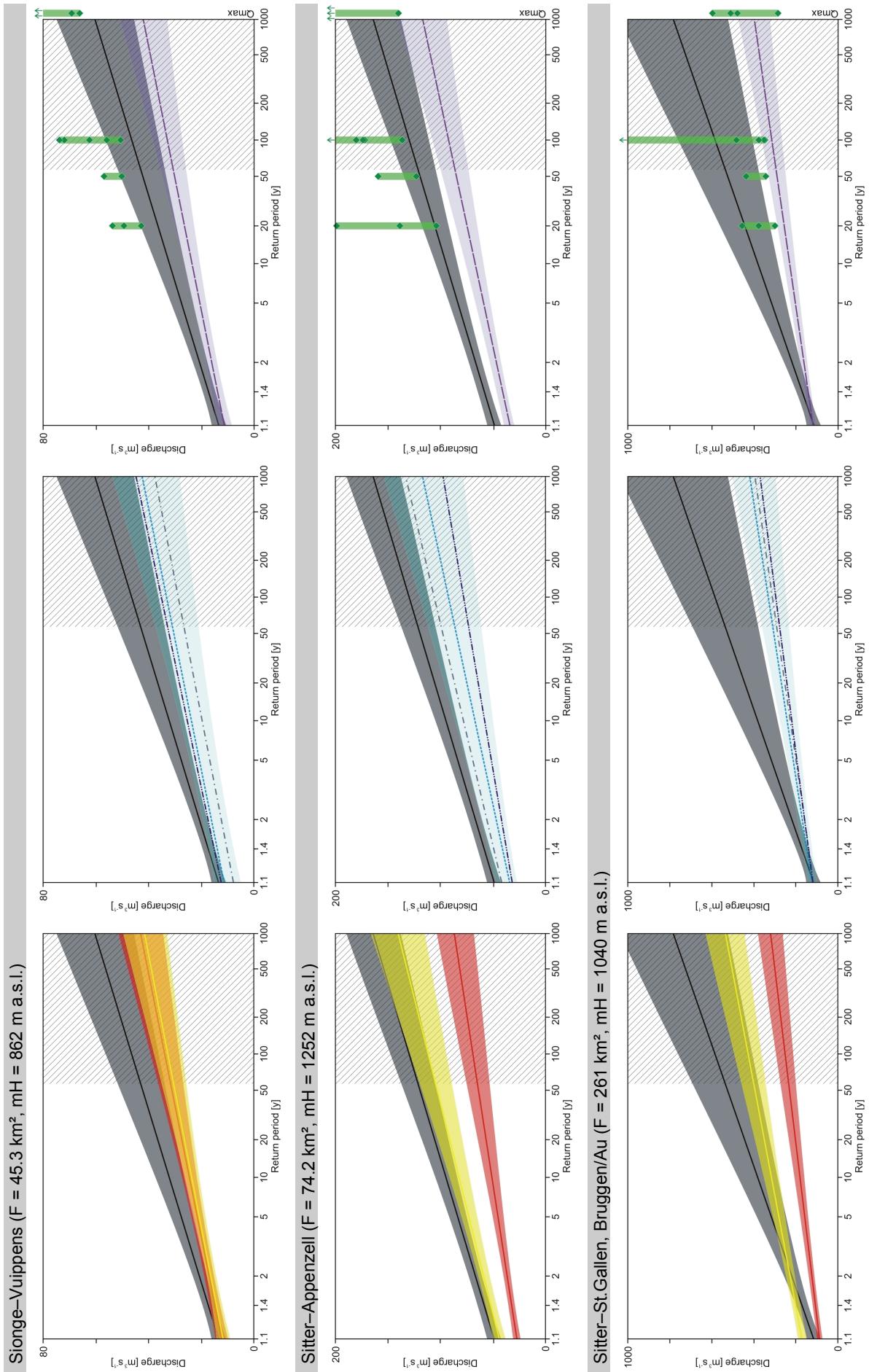


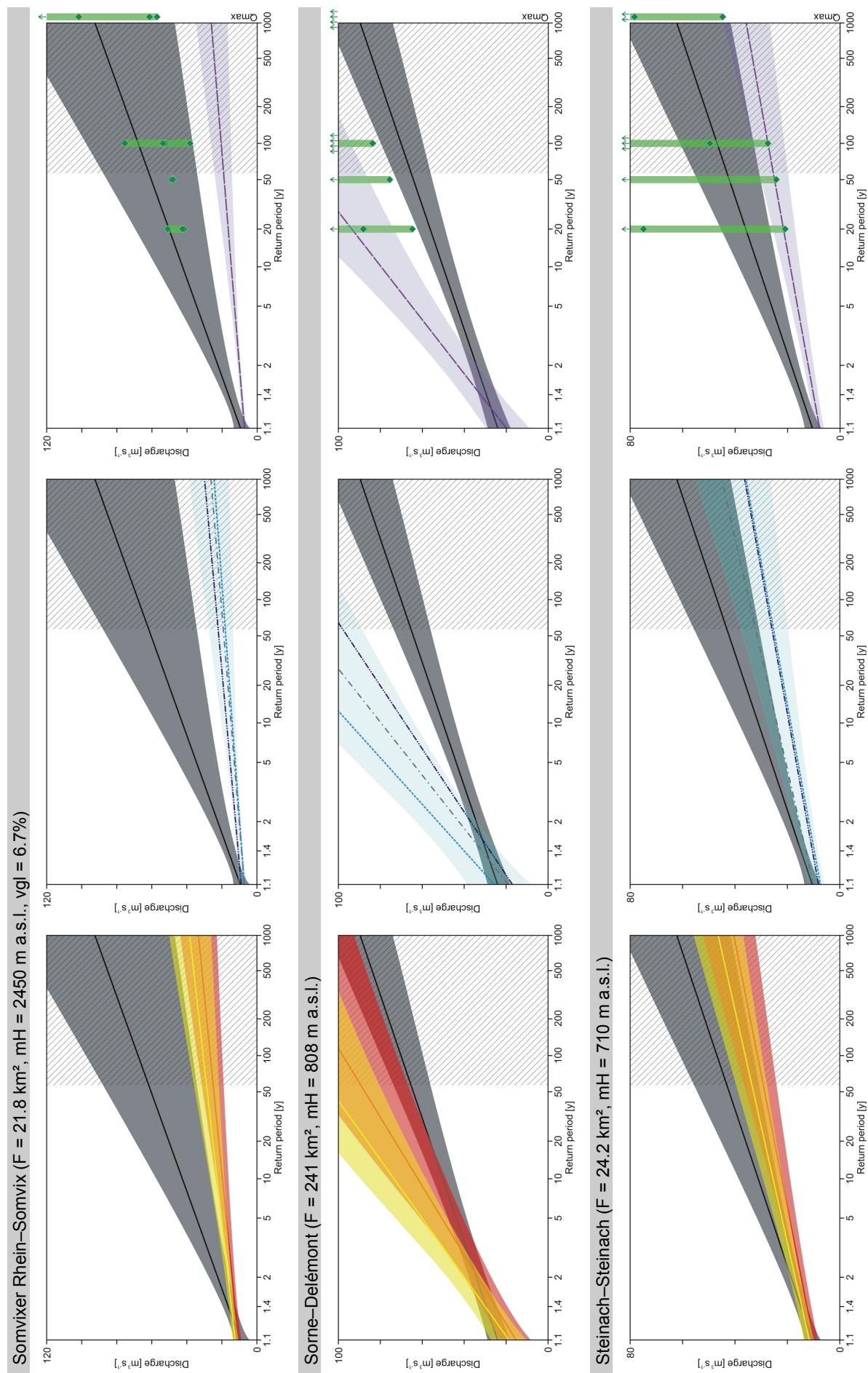


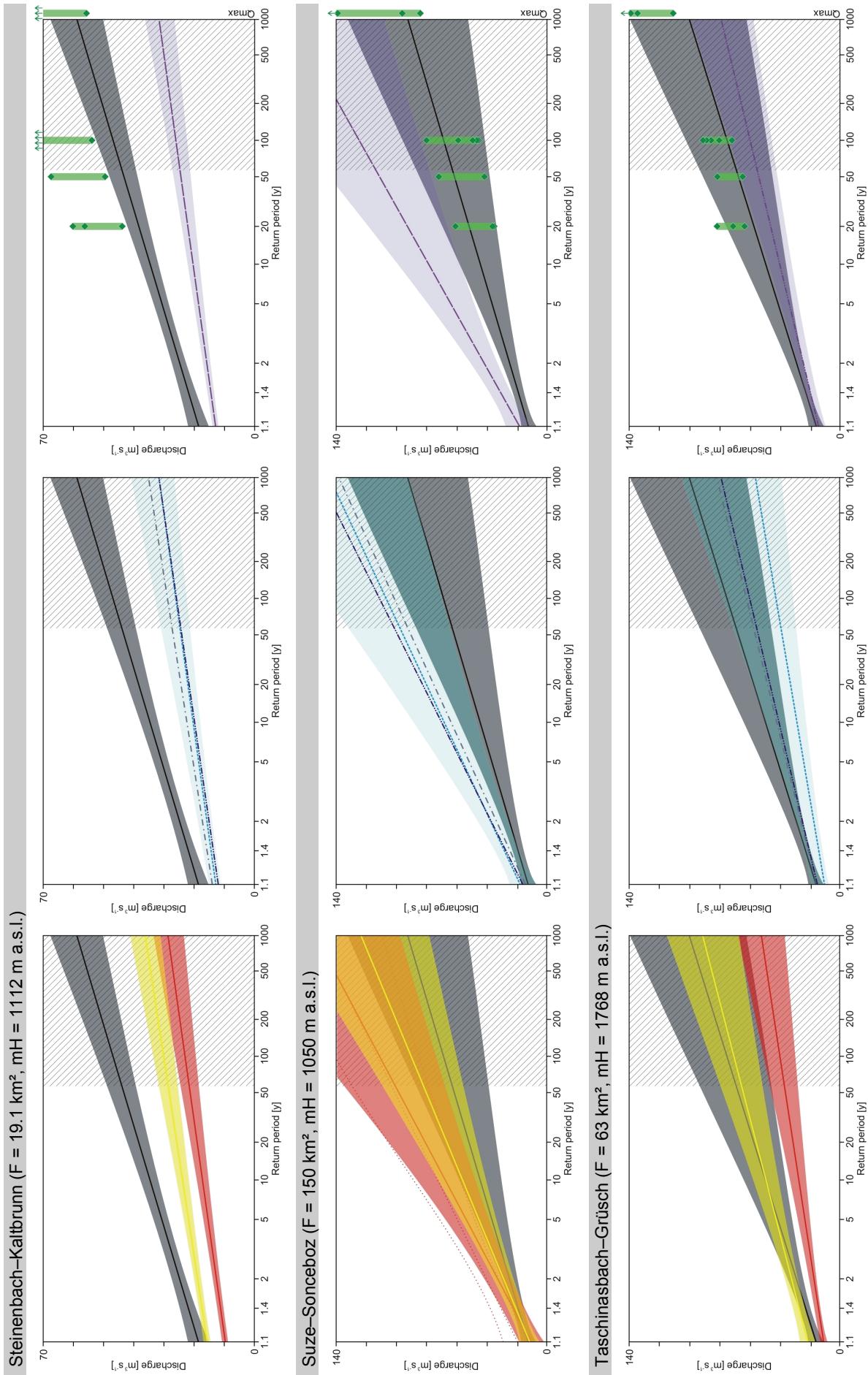


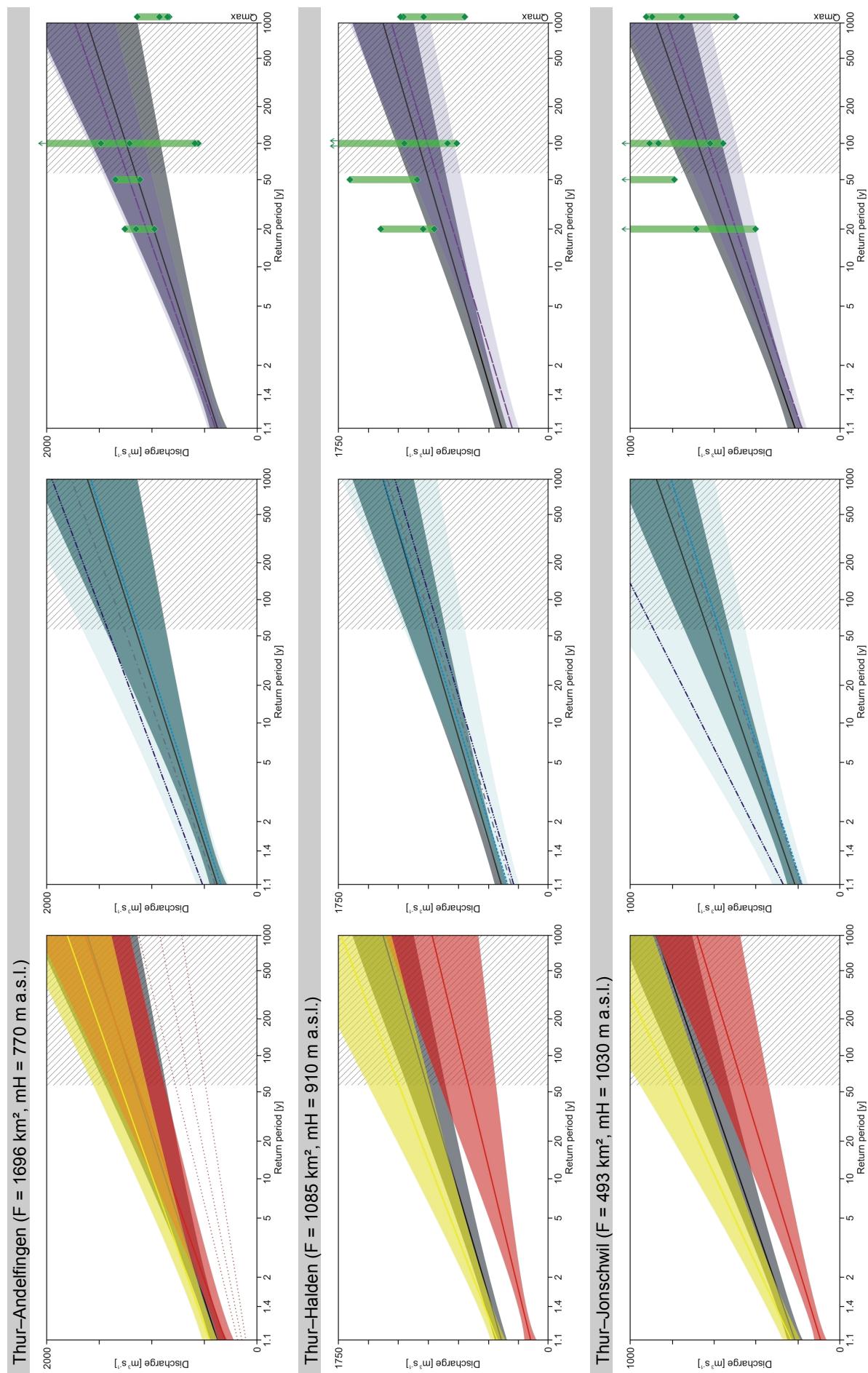


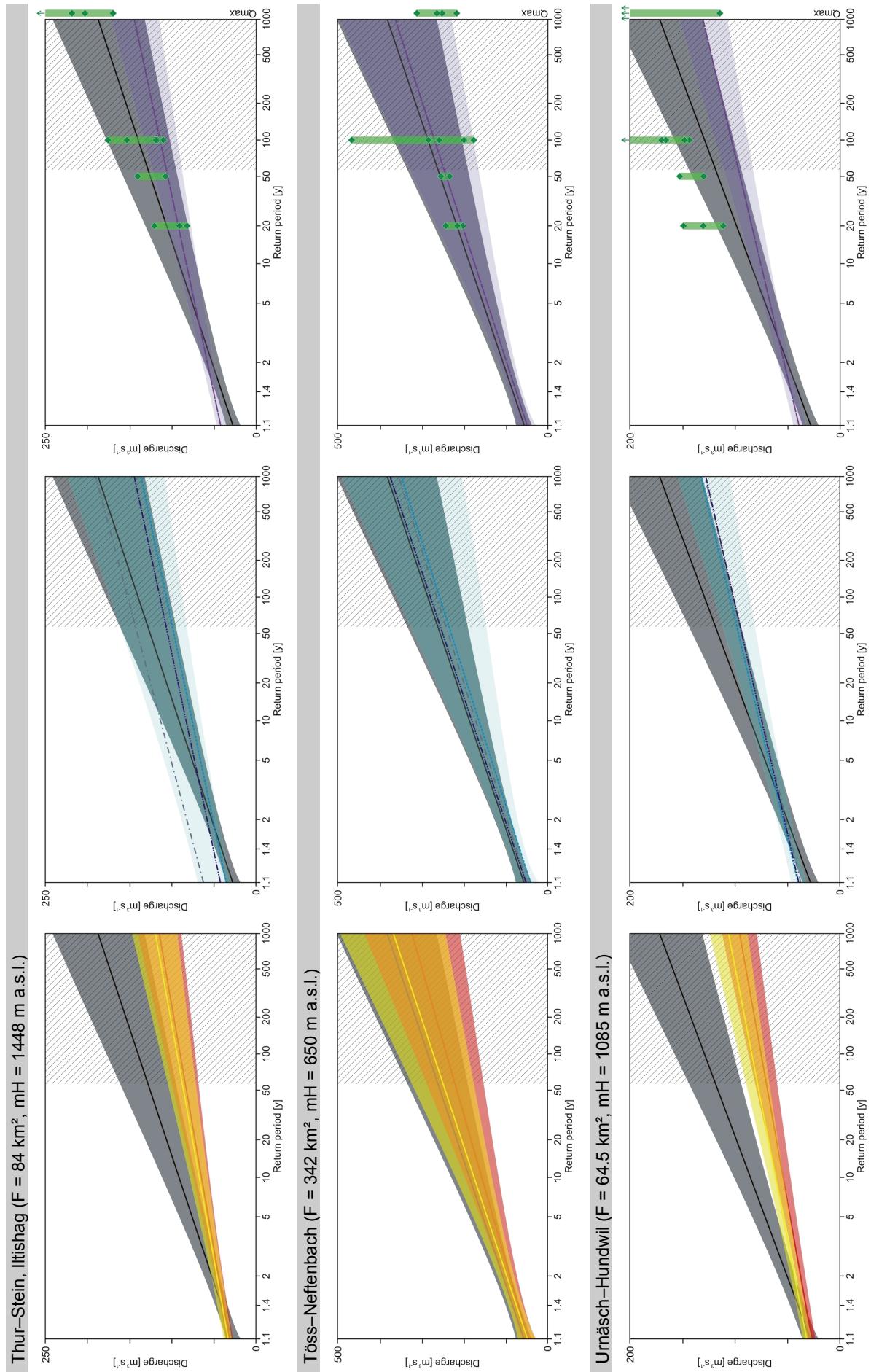


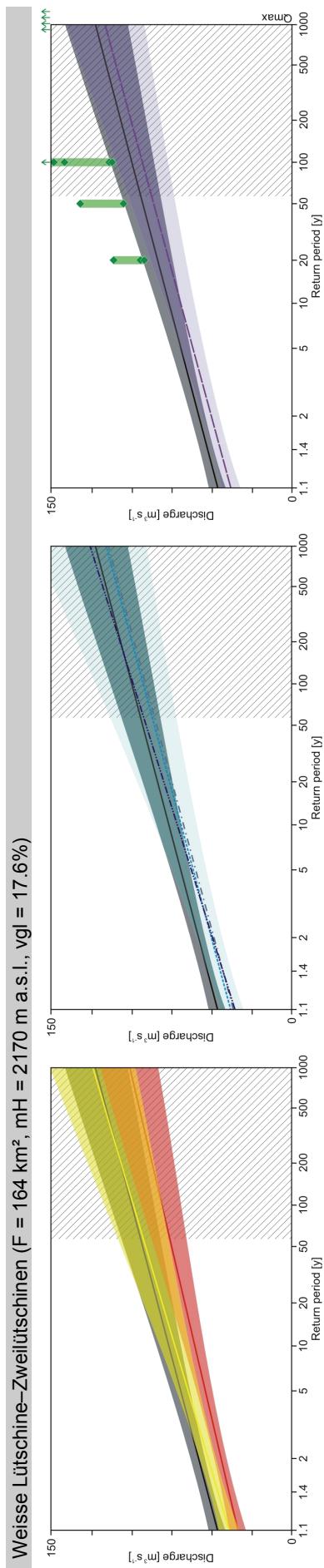








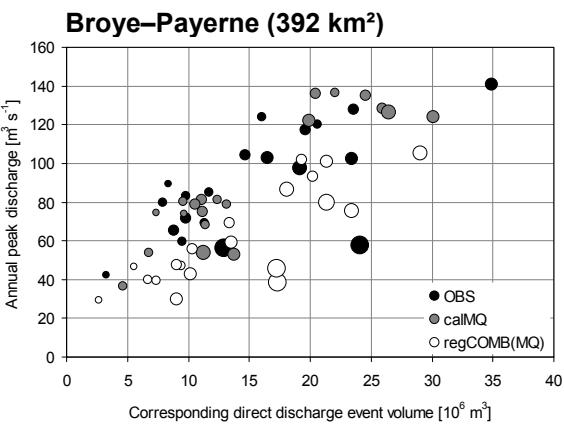
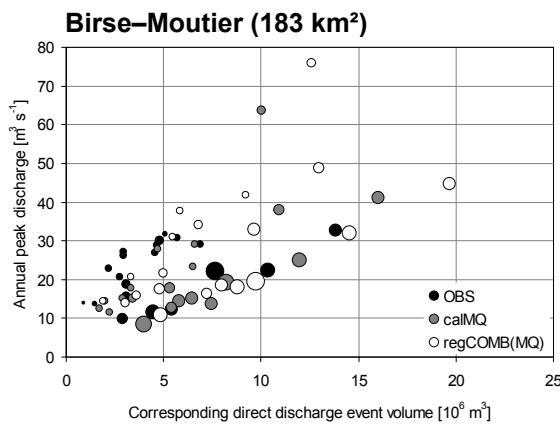
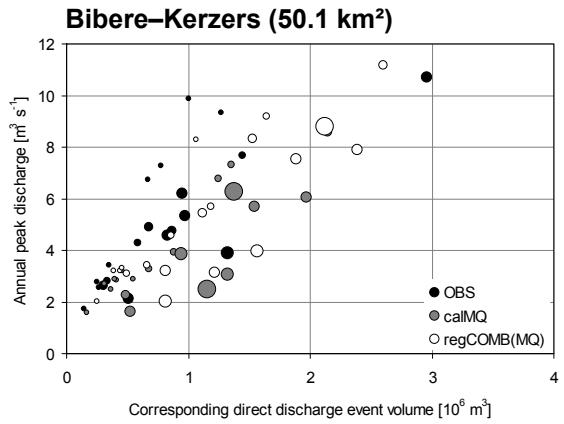
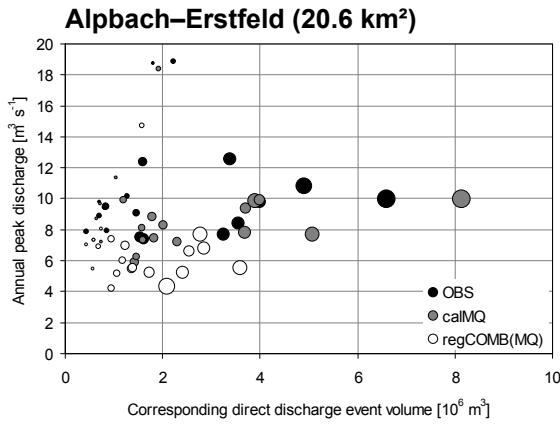
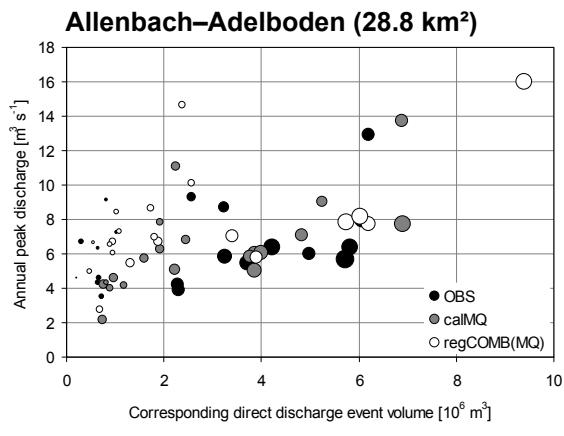
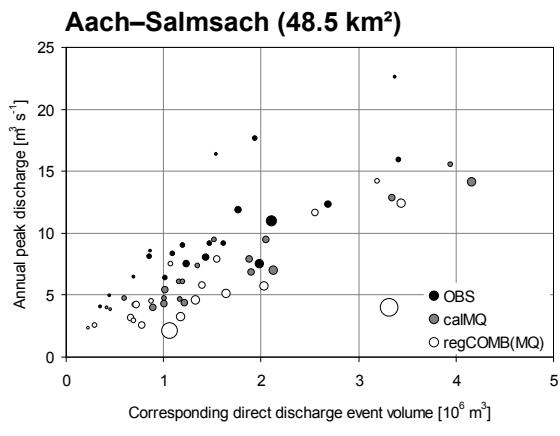


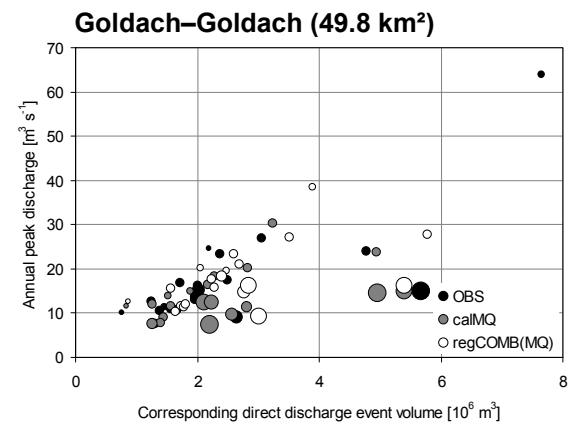
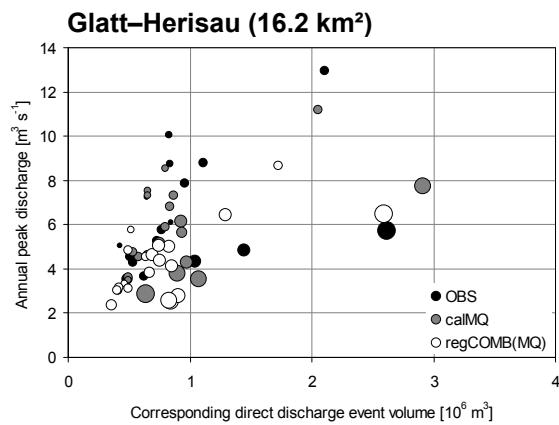
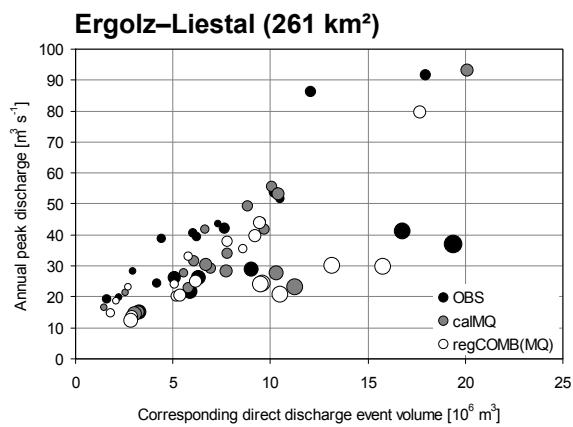
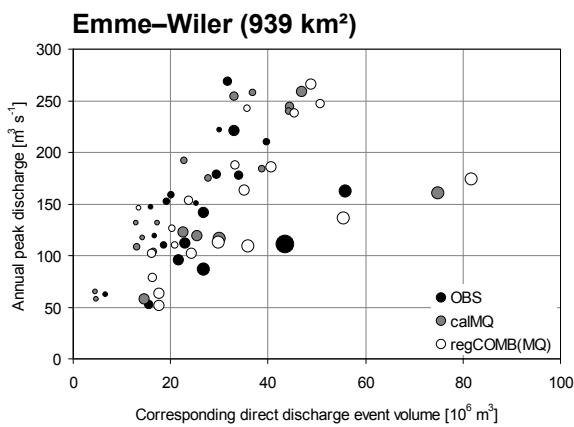
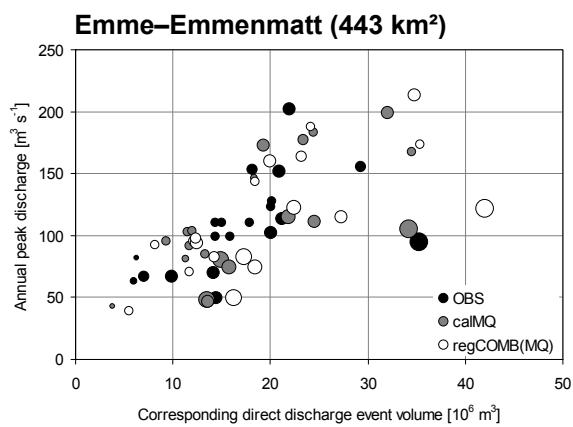
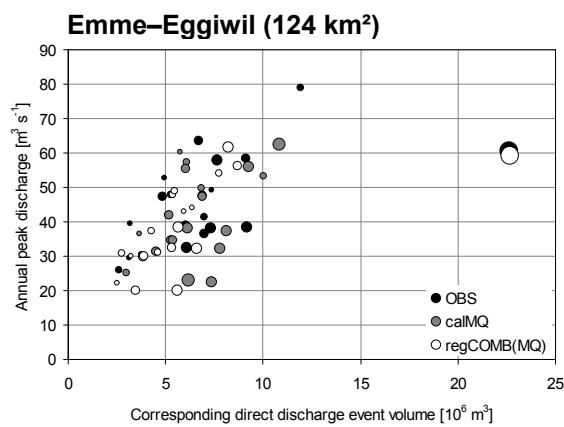
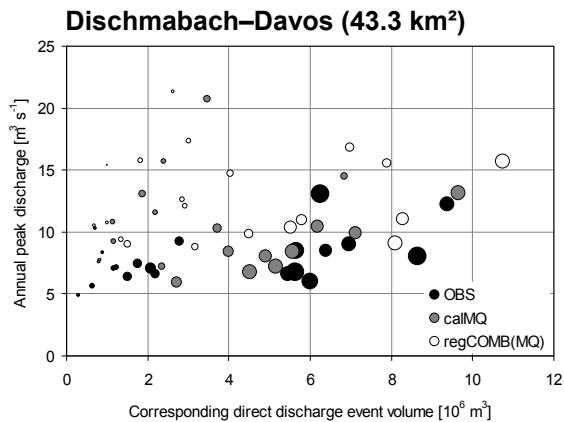
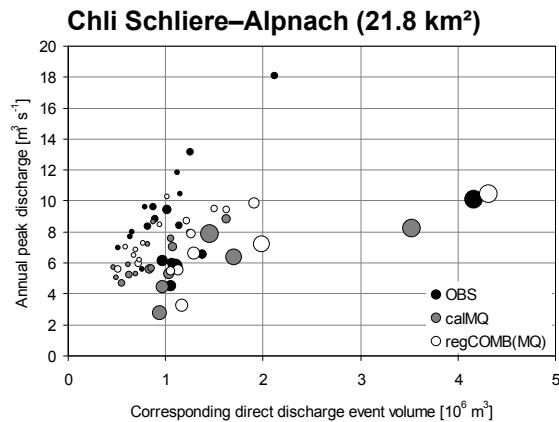


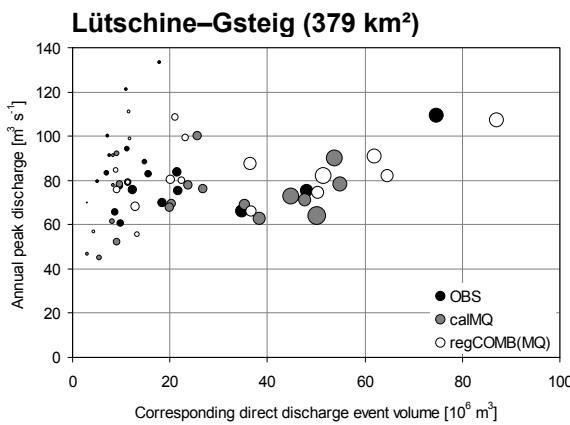
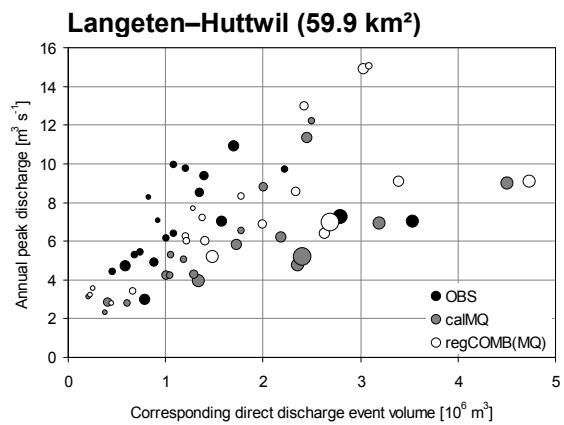
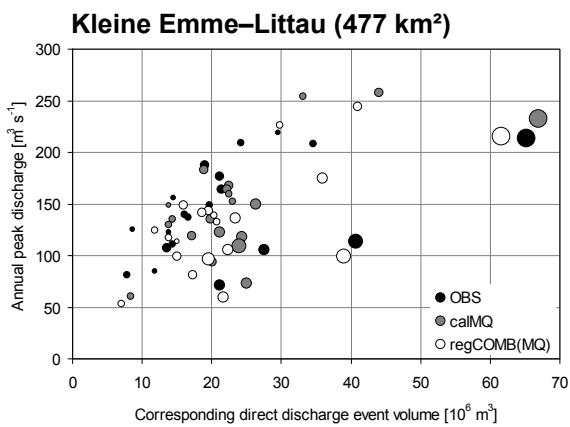
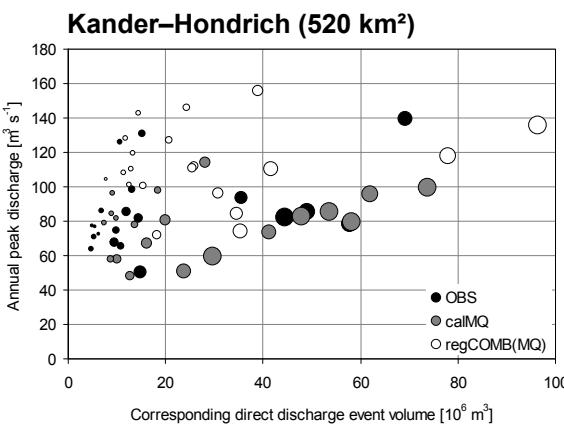
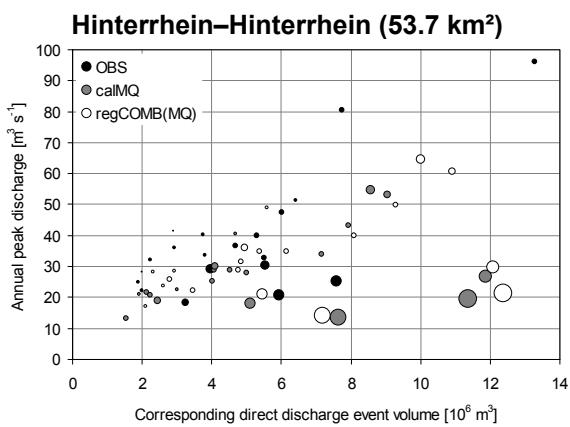
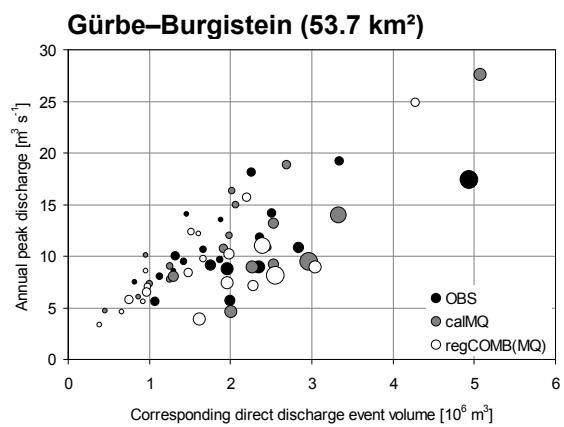
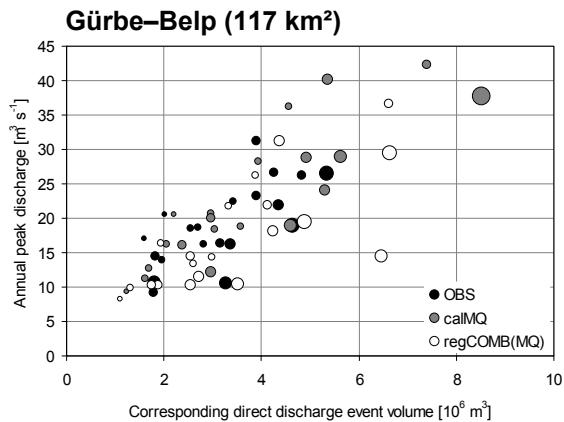
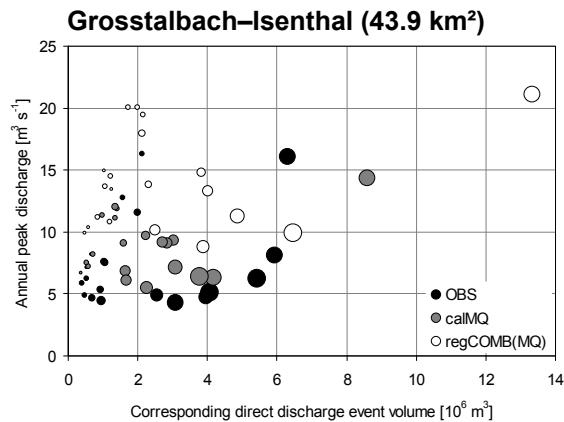
Anhang E

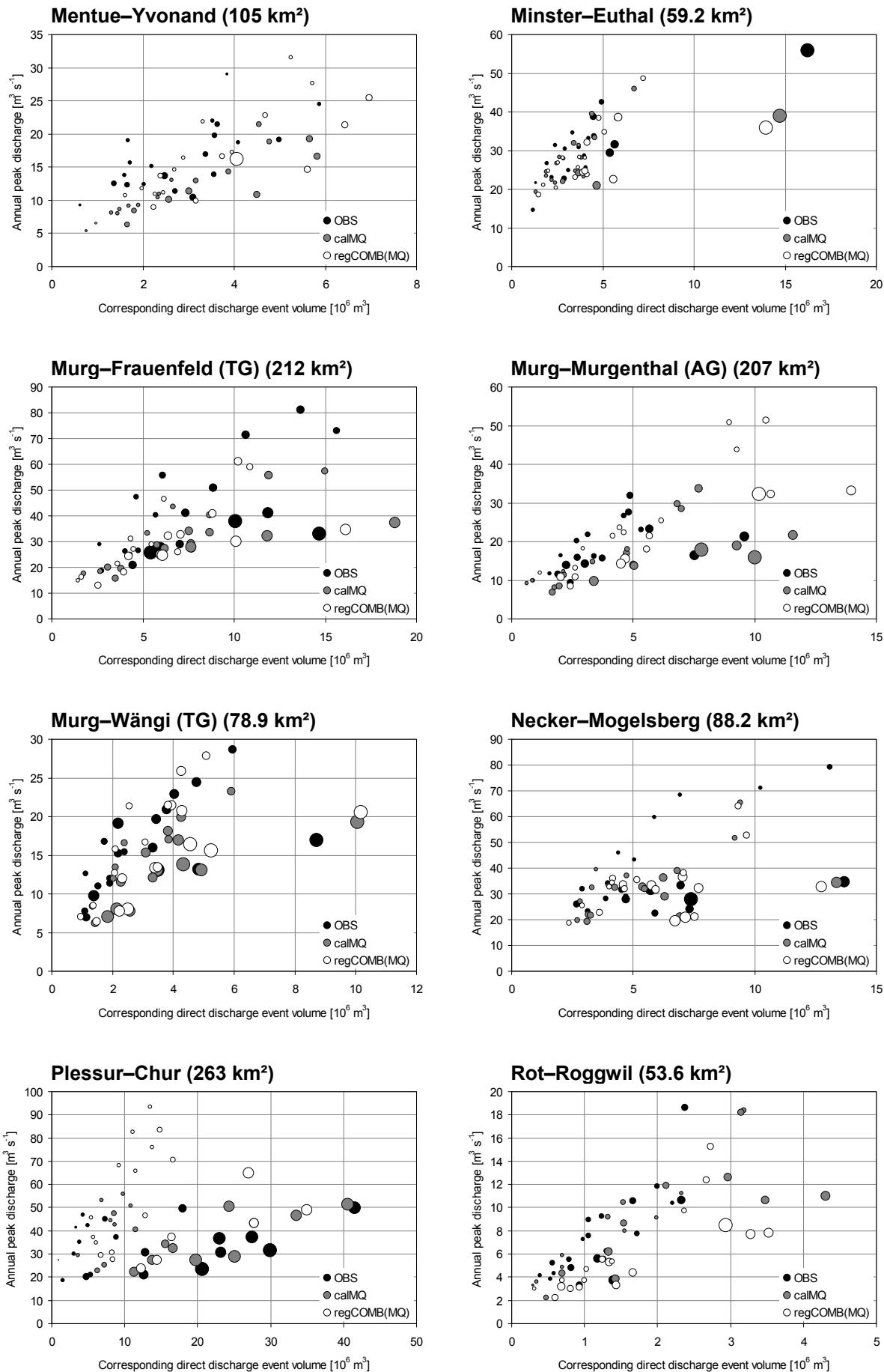
Direktabflussvolumina der jährlich grössten Hochwasser

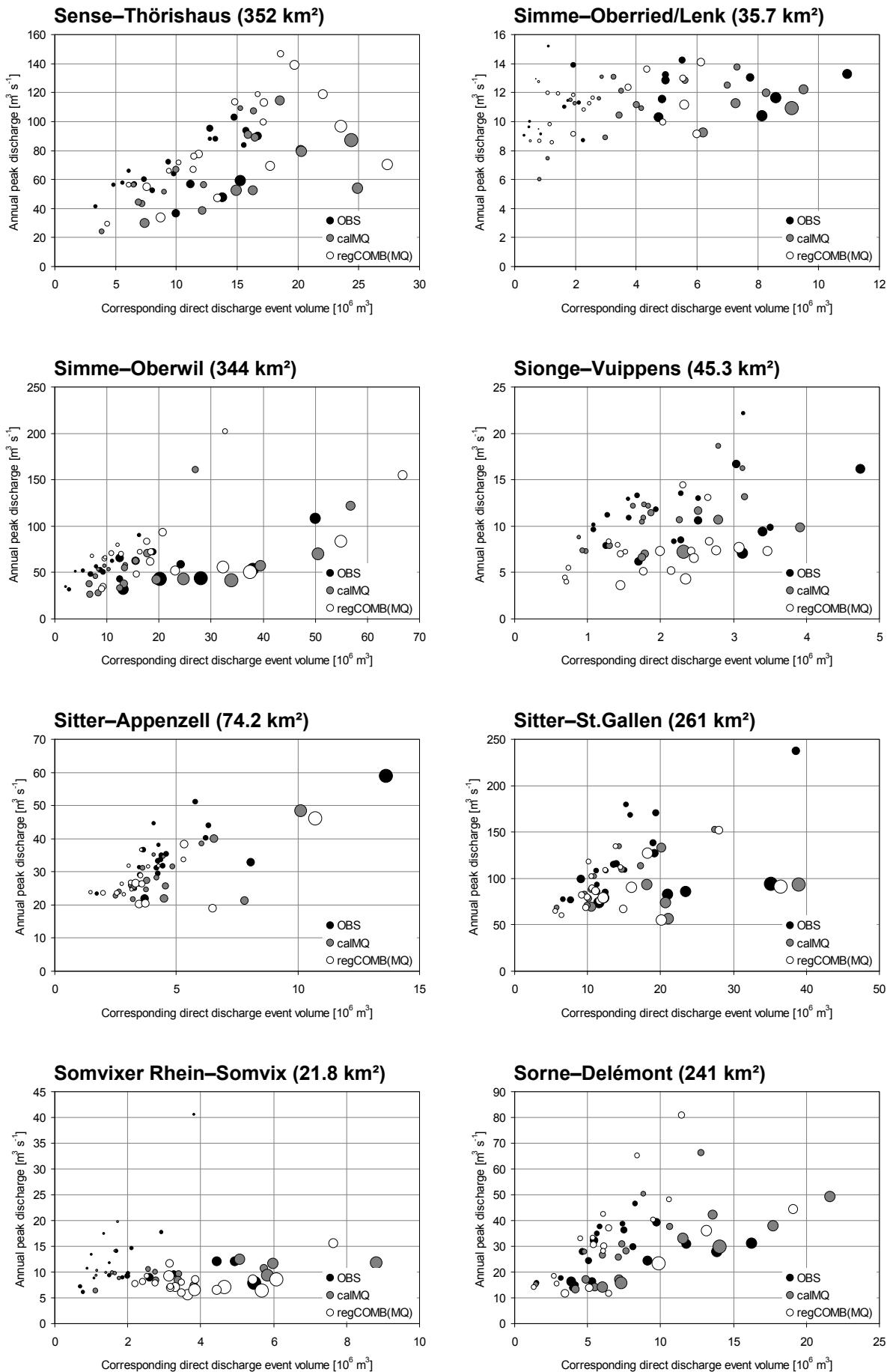
Untenstehend findet sich für alle 49 Einzugsgebiete der Priorität A eine Gegenüberstellung der jährlich grössten Abflüsse und der entsprechenden Direktabflussvolumina (vgl. Kapitel 12). Aufgetragen sind die Werte von Beobachtung (OBS), Mittelwasserkalibrierung (calMQ) und kombinierter Regionalisierung auf Mittelwasserbasis (regCOMB(MQ)). Datengrundlage bilden die Jahre 1984–2003 in täglicher Auflösung. Der Durchmesser der Kreise ist jeweils proportional zur Dauer des pro Gebiet grössten Direktabflusseignisses. Eine Tabelle mit den Korrelationskoeffizienten (r_{xy}) zwischen Spitzenabfluss und zugeordnetem Direktabflussvolumen findet sich in **Tabelle E.1** (Seite 277).

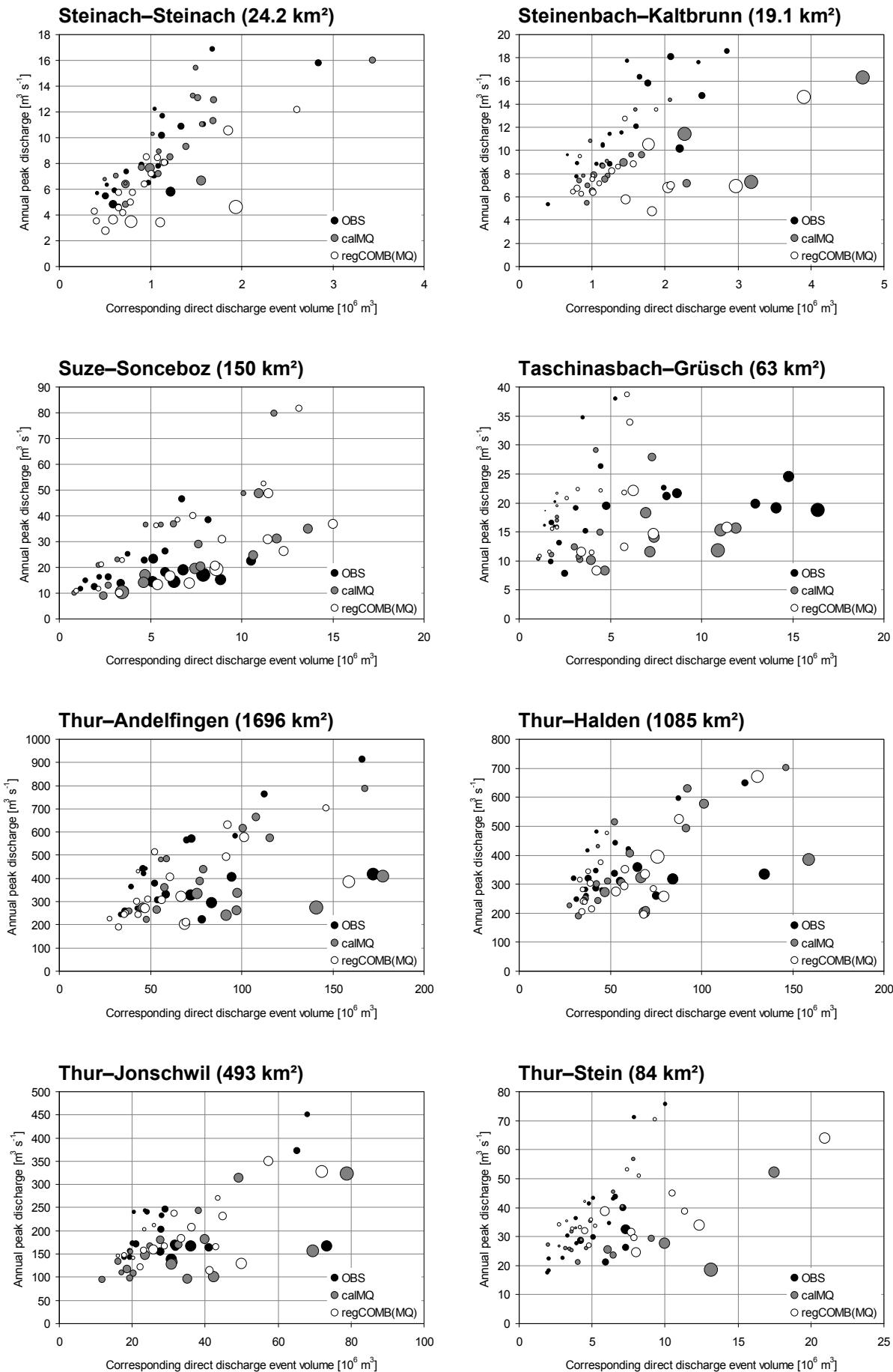












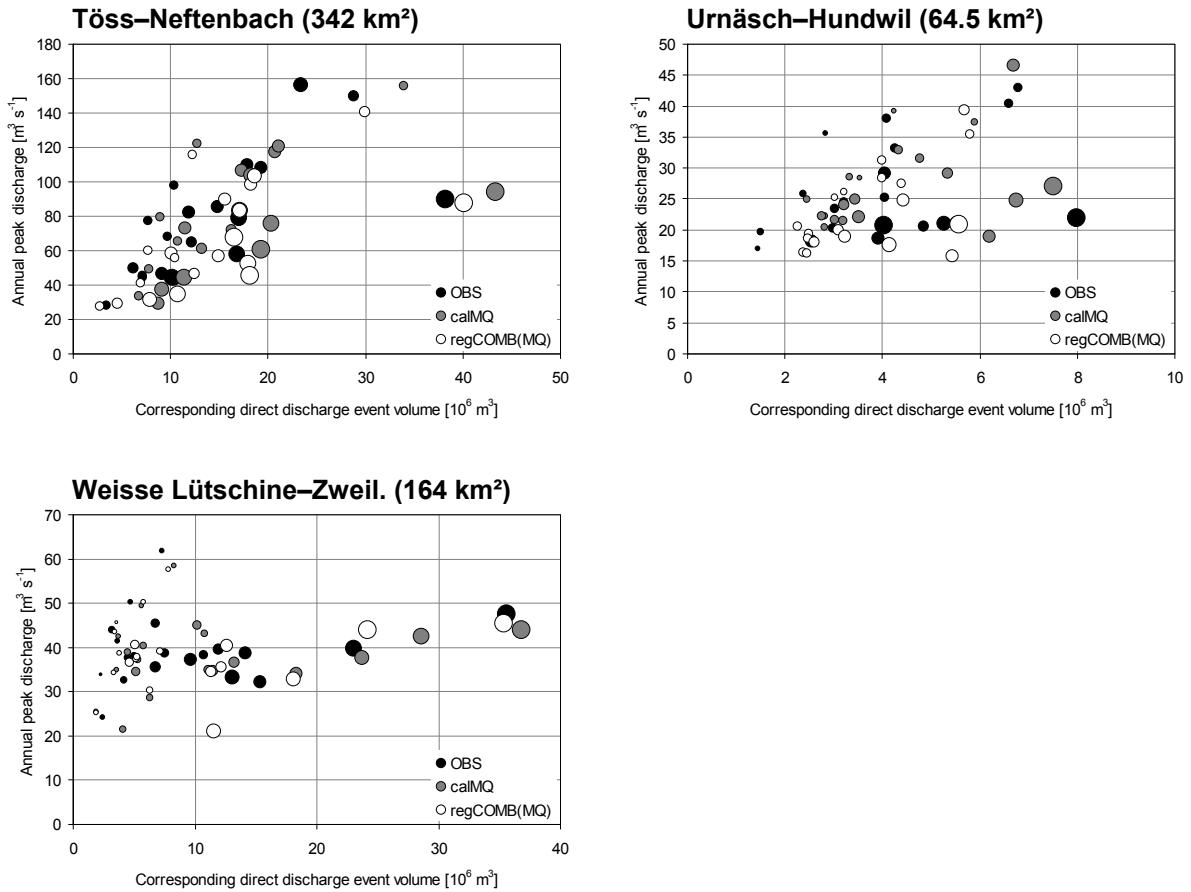


Table E.1: Correlation r_{xy} between annual peak discharge and corresponding direct discharge volume for observation (OBS), flood calibration (calHQ) and combined regionalisation of flood calibrated parameter set (regCOMB(HQ)).

Tabelle E.1: Korrelation r_{xy} zwischen dem jährlichen Spitzenabfluss und dem zugehörigen Direktabflussvolumen für Beobachtung (OBS), Hochwasserkalibrierung (calHQ) sowie kombinierte Regionalisierung des Hochwasserparametersatzes (regCOMB(HQ)).

Catchment	$r_{xy}(\text{OBS})$	$r_{xy}(\text{calHQ})$	$r_{xy}(\text{regCOMB(HQ)})$	Catchment	$r_{xy}(\text{OBS})$	$r_{xy}(\text{calHQ})$	$r_{xy}(\text{regCOMB(HQ)})$
AacSal	0.81	0.81	0.85	MurMur	0.57	0.71	0.82
AllAde	0.40	0.30	0.49	MurWae	0.61	0.55	0.50
AlpErs	0.13	-0.14	-0.02	NecMog	0.54	0.43	0.48
BibKer	0.78	0.76	0.79	PleChu	0.29	0.57	0.22
BirMou	0.46	0.65	0.63	RotRog	0.81	0.89	0.79
BroPaC	0.70	0.85	0.82	SenTho	0.65	0.61	0.65
CScAlp	0.37	0.14	0.69	SimObr	0.31	0.38	0.32
DisDaK	0.48	0.39	0.00	SimObw	0.58	0.53	0.54
EmmEgg	0.56	0.62	0.62	SioVui	0.38	0.76	0.56
EmmEmm	0.56	0.63	0.60	SitApp	0.75	0.66	0.66
EmmWil	0.49	0.47	0.50	SitStG	0.52	0.56	0.51
ErgLie	0.66	0.76	0.66	SomSom	0.25	0.05	0.10
GlaHer	0.48	0.53	0.67	SorDel	0.48	0.63	0.57
GolGol	0.79	0.65	0.67	SteKal	0.80	0.32	0.51
Grolse	0.26	0.29	0.17	SteSte	0.81	0.76	0.67
GueBel	0.71	0.74	0.75	SuzSon	0.44	0.65	0.61
GueBur	0.67	0.81	0.71	TasGru	0.22	0.80	0.18
HinHin	0.76	0.74	0.68	ThuAnd	0.62	0.66	0.61
KanHon	0.40	0.42	0.30	ThuHal	0.48	0.60	0.62
KEmlLit	0.52	0.67	0.63	ThuJon	0.57	0.46	0.67
LanHut	0.39	0.76	0.74	ThuSte	0.76	0.40	0.37
LueGst	0.13	0.37	0.24	ToeNef	0.70	0.64	0.61
MenYvo	0.68	0.76	0.80	UrnHun	0.44	0.42	0.61
MinEut	0.84	0.65	0.60	WLuzwe	0.16	0.17	0.24
MurFra	0.68	0.56	0.63				

Literaturverzeichnis

- ABBOTT M. B., BATHURST J. C., CUNGE J. A., O'CONNELL P. E., RASMUSSEN J. (1986A): An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology* **87**:45–59.
- ABBOTT M. B., BATHURST J. C., CUNGE J. A., O'CONNELL P. E., RASMUSSEN J. (1986B): An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology* **87**:61–77.
- ALTENHOFF A. (2004): *Niederschlagsanalyse der Schweiz. Disaggregation von Tagesniederschlagsfeldern mittels Niederschlagsradarbildern*. Semesterarbeit. Zürich: Institut für Atmosphäre und Klima der ETH Zürich.
- ANDERSON M. G., BURT T. P. (1980): Interpretation of recession flow. *Journal of Hydrology* **46**:89–101.
- ANDREWS D. F. (1972): Plots of high-dimensional data. *Biometrics* **28**(1):125–136.
- ANDRIEU H., CREUTIN J. D., DELRIEU G., FAURE D. (1997): Use of weather radar for the hydrology of a mountainous area. part I: Radar measurement interpretation. *Journal of Hydrology* **34**:225–239.
- ASCHWANDEN H. (1996): *Einzugsgebietskenngrößen der hydrologischen Untersuchungsgebiete der Schweiz*. Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie **23**. Bern: Landeshydrologie und -geologie.
- ASCHWANDEN H., KAN C. (1999): Niedrigwasserabflüsse – Grundlagen zur Bestimmung der Abflussmenge Q_{347} . *Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.8*. Bern: Landeshydrologie und -geologie.
- AYROS CHUMPITAZI E. N. (2000): *Regionalisierung extremer Abflüsse auf Grundlage statistischer Verfahren*. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart **101**. Stuttgart: Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- BADOUX A. (1999): *Untersuchung zur flächendifferenzierten Modellierung von Abfluss und Schmelze in teilvergletscherten Einzugsgebieten*. Diplomarbeit. Zürich: Geographischen Institut der ETH Zürich.
- BADOUX A. (2005): *The influence of wind storm deforestation on the runoff generation at various scales in a torrential catchment*. PhD thesis. Berne: Institute of Geography, University of Berne.
- BAFU [BUNDESAMT FÜR UMWELT] (2006): *Abflussdaten schweizerischer Fließgewässer*. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- BAHRENBERG G., GIESE E., NIPPER J. (1990): *Statistische Methoden in der Geographie. Band 1: Univariate und bivariate Statistik*. Stuttgart: Teubner.
- BAHRENBERG G., GIESE E., NIPPER J. (1992): *Statistische Methoden in der Geographie. Band 2: Multivariate Statistik*. Stuttgart: Teubner.
- BARBEN M. (2003): *Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in der Schweiz*. *Geographica Bernensia* **G71**. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- BARBEN M., HODEL H.-P., KLEEBERG H.-B., SPREAFICO M., WEINGARTNER R. (2001): *Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen – Erfahrungen aus den Rheinanliegerstaaten*. KHR-Bericht **I-19**. Lelystad, NL: Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebiets.
- BÁRDOSSY A. (1993): *Stochastische Modelle zur Beschreibung der raum-zeitlichen Variabilität des Niederschlages*. Mitteilungen des IHW **44**. Karlsruhe: Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe (TU).
- BÁRDOSSY A. (2007): Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences* **11**:703–710.
- BÁRDOSSY A., PEGRAM G. G. S., SAMANIEGO L. (2005): Modeling data relationships with a local variance reducing technique: Applications in hydrology. *Water Resources Research* **41**:W08404.
- BARNES B. S. (1939): The structure of discharge-recession curves. *Transactions of the American Geophysical Union* **20**:721–725.
- BATHURST J. C., O'CONNELL P. E. (1993): The future of distributed models: The Système Hydrologique Européen (SHE). BEVEN K. J., MOORE I. D., EDS. *Terrain analysis and distributed modelling in hydrology*. Advances in Hydrological Processes. Chichester, UK: Wiley, p. 212–225.

- BAUR M., DETTLI R., WEINGARTNER R., VIVIROLI D., IMHOF P., FÄSSLER M., GERHARDINGER H. (2006): *Potenzialanalyse Kleinwasserkraftwerke*. Schlussbericht zu einer Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BfE), Programm Kleinwasserkraft. Zürich und Bern: econcept und Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern.
- BECKER A., BRAUN P. (1999): Disaggregation, aggregation and spatial scaling in hydrological modeling. *Journal of Hydrology* **217**:239–252.
- BEGERT M., SCHLEGEL T., KIRCHHOFER W. (2005): Homogeneous Temperature and Precipitation Series of Switzerland from 1864 to 2000. *International Journal of Climatology* **25**:65–80.
- BELL V. A., MOORE R. J. (1998): A grid-based distributed flood forecasting model for use with weather radar data: Part 2. Case studies. *Hydrology and Earth System Sciences* **2**(3):283–298.
- BERAN M. A. (1990): New Challenges for the Regional Approach. BERAN M. A., BRILLY M., BECKER A., BONACCI O., EDs. *Regionalization in Hydrology*. Proceedings of an international symposium held at Ljubljana, April 1990. IAHS publication **191**. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences.
- BERGSTRÖM S. (1976): *Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments*. SMHI reports in hydrology and oceanography **7**. Norrköping, SWE: Swedish Meteorological and Hydrological Institute.
- BERGSTRÖM S. (1995): The HBV model. SINGH V. P., ED. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Highlands Ranch, CO, US: Water Resources Publications, p. 443–476.
- BERNDTSSON R., NIEMCZYNOWICZ J. (1988): Spatial and temporal scales in rainfall analysis – some aspects and future perspectives. *Journal of Hydrology* **100**:293–313.
- BEVEN K. J. (1993): Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in Water Resources* **16**:41–51.
- BEVEN K. J. (2000): Uniqueness of place and process representation in hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences* **4**(2):203–213.
- BEVEN K. J. (2001A): How far can we go in hydrological modelling? *Hydrology and Earth Systems Sciences* **5**(1):1–12.
- BEVEN K. J. (2001B): *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. Chichester, UK: Wiley.
- BEVEN K. J. (2002): Towards a coherent philosophy for modeling the environment. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A – Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **458**:2465–2484.
- BEVEN K. J. (2006A): A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology* **320**:18–36.
- BEVEN K. J. (2006B): On undermining the science. *Hydrological Processes* **20**:3141–3146.
- BEVEN K. J. (2007): Towards integrated environmental models of everywhere: uncertainty, data and modelling as a learning process. *Hydrology and Earth System Sciences* **11**(1):460–467.
- BEVEN K. J., BINLEY A. M. (1992): The future of distributed models: model calibration and uncertainty in prediction. *Hydrological Processes* **6**:279–298.
- BEVEN K. J., FEYEN J. (2002): The Future of Distributed Modelling. *Hydrological Processes* **16**:169–172.
- BEVEN K. J., KIRKBY M. J. (1979): A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* **24**(1):43–69.
- BEVEN K. J., LAMB R., QUINN P., ROMANOWICZ R., FREER J. (1995): TOPMODEL. SINGH V. P., ED. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Highlands Ranch, CO, US: Water Resources Publications, p. 627–668.
- BFS [BUNDESAMT FÜR STATISTIK] (2001): *GEOSTAT Benutzerhandbuch*. Bern: Bundesamt für Statistik.
- BFS [BUNDESAMT FÜR STATISTIK] (2003): *GEOSTAT-Produkte*. Lizenznummer G158000315. ©BfS, CH-2010 Neuchâtel und weitere Rechtsinhaber. Neuchâtel: Bundesamt für Statistik.
- BITTERLI T., AVIOLAT P., BRÄNDLI R., CHRISTE R., FRACHEBOUD S., FREY D., GEORGE M., MATOUSEK F., TRIPET J.-P. (2004): Grundwasservorkommen. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel **8.6**. Bern: Bundesamt für Wasser und Geologie.

- BLAZKOVA S., BEVEN K. J. (1997): Flood frequency prediction for data limited catchments in the Czech Republic using a stochastic rainfall model and TOPMODEL. *Journal of Hydrology* **195**:256–278.
- BLAZKOVA S., BEVEN K. J. (2002): Flood frequency estimation by continuous simulation for a catchment treated as ungauged (with uncertainty). *Water Resources Research* **38**(8):1139.
- BLAZKOVA S., BEVEN K. J. (2004): Flood frequency estimation by continuous simulation of subcatchment rainfalls and discharges with the aim of improving dam safety assessment in a large basin in the Czech Republic. *Journal of Hydrology* **292**:153–172.
- BLÖSCHL G. (2001): Scaling in Hydrology. *Hydrological Processes* **15**:709–711.
- BLÖSCHL G., GRAYSON R. (2000): Spatial observations and interpolation. GRAYSON R., BLÖSCHL G., EDS. *Spatial Patterns in Catchment Hydrology. Observations and Modelling*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, p. 17–50.
- BLÖSCHL G., GRAYSON R. (2002): Flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss-Modellierung. GUTKNECHT D., ED. *Niederschlag-Abfluss-Modellierung. Simulation und Prognose*. Wiener Mitteilungen Wasser · Abwasser · Gewässer **164**. Wien: TU Wien, p. 33–55.
- BLÖSCHL G., MERZ R. (2002): Methoden der hydrologischen Regionalisierung im Zusammenhang mit der Niederschlag-Abflussmodellierung. GUTKNECHT D., ED. *Niederschlag-Abfluss Modellierung. Simulation und Prognose*. Wiener Mitteilungen Wasser · Abwasser · Gewässer **164**. Wien: TU Wien, p. 149–178.
- BLUMER F. P. (1994): *Höhenabhängigkeit des Niederschlages im Alpenraum*. Dissertation ETH **10784**. Zürich: Geographisches Institut der ETH Zürich.
- BORGA M., ANAGNOSTOU E. T., FRANK E. (2000): On the use of real-time radar rainfall estimates for flood prediction in mountainous basins. *Journal of Geophysical Research–Atmospheres* **105**(D2):2269–2280.
- BOTTERWEG P. (1995): The user's influence on model calibration results: an example of the model SOIL, independently calibrated by two users. *Ecological Modelling* **81**(1–3):71–80.
- BOUGHTON W., DROOP O. (2003): Continuous simulation for design flood estimation – a review. *Environmental Modelling & Software* **18**(4):309–318.
- BOYLE D. P., GUPTA H. V., SOROOSHIAN S. (2000): Towards improved calibration in hydrologic models: combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research* **36**(12):3663–3674.
- BRAUN L. (1985): *Simulation of Snowmelt-Runoff in Lowland and Lower Alpine Regions of Switzerland*. Zürcher Geographische Schriften **21**. Zürich: Geographisches Institut der ETH Zürich.
- BREINLINGER R. (1996): *Hydrogeographische Raumgliederung der Schweiz und ihre Bedeutung für die Hydrologie*. Dissertation. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- BREINLINGER R., GAMMA P., WEINGARTNER R. (1992): Kenngrößen kleiner Einzugsgebiete. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel **1.2**. Bern: Landeshydrologie und -geologie.
- BRIGGS P. R., COGLEY J. G. (1996): Topographic bias in mesoscale precipitation networks. *Journal of Climate* **9**:205–218.
- BRONSTERT A., NIEHOFF D., BÜRGER G. (2002): Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities. *Hydrological Processes* **16**(2):509–529.
- BRONSTERT A., BÁRDOSSY A., BISMUTH C., BUITEVELD H., BUSCH N., DISSE M., ENGEL H., FRITSCH U., HUNDECHA Y., LAMMERSEN R., NIEHOFF D., RITTER N. (2003): *LAHoR – Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumassnahmen auf die Hochwasserbedingungen im Rhein-gebiet*. KHR-Bericht **II-18**. Lelystad, NL: Internationale Kommission für die Hydrologie des Rhein-gebiets.
- BROSIUS F. (1999): *SPSS 8. Professionelle Statistik unter Windows*. Bonn: International Thomson Publishing.
- BÜRGI T. (2002): Operational flood forecasting in mountainous areas – an interdisciplinary challenge. SPREAFICO M., WEINGARTNER R., EDS. *International Conference on Flood Estimation (March 6–8, 2002 in Berne, Switzerland): Proceedings*. CHR-Report **II-17**. Lelystad, NL: International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, p. 397–406.

- BURLANDO P., PFAUNDLER M., SALVETTI A., WEILER M., KIPFER A., RUF W. (2001): *Grundlagen für die Erfassung von Schadenrisiken bei Hochwasser und Bewertung von Massnahmen zur Verminde- rung dieser Risiken*. Koblenz: Internationale Kommission zum Schutz des Rheins.
- BURN D. H. (1997): Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *Journal of Hydrology* **202**:212–230.
- BURN D. H., BOORMAN D. B. (1992): Estimation of hydrological parameters at ungauged catchments. *Journal of Hydrology* **143**:429–454.
- BUTTS M. B., JEFFREY T., PAYNE J. T., KRISTENSEN M., MADSEN H. (2004): An evaluation of the impact of model structure on hydrological modelling uncertainty for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* **298**:242–266.
- BWG [BUNDESAMT FÜR WASSER UND GEOLOGIE] (2000): *Hochwasser 1999 – Analyse der Messdaten und statistische Einordnung*. Hydrologische Mitteilungen **28**. Bern: Bundesamt für Wasser und Geologie.
- BWG [BUNDESAMT FÜR WASSER UND GEOLOGIE] (2001): *Hochwasserschutz an Fließgewässern. Wegleitungen des BWG*. Biel: Bundesamt für Wasser und Geologie.
- BWG [BUNDESAMT FÜR WASSER UND GEOLOGIE] (2002A): *Hochwasser 2000 – Ergebnisanalyse und Fallbeispiele*. Berichte des BWG, Serie Wasser **2**. Bern: Bundesamt für Wasser und Geologie.
- BWG [BUNDESAMT FÜR WASSER UND GEOLOGIE] (2002B): *Schweizer Stauanlagen unter Oberaufsicht des Bundes (Karte)*. Bern: Bundesamt für Wasser und Geologie.
- BWG [BUNDESAMT FÜR WASSER UND GEOLOGIE] (2005): *Zentralen von Wasserkraftanlagen der Schweiz mit einer maximal möglichen Leistung ab Generator von mindestens 10 MW (Karte)*. Bern: Bundesamt für Wasser und Geologie.
- BWW [BUNDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT] (1998): *Anforderungen an den Hochwasserschutz*. Biel: Bundesamt für Wasserwirtschaft.
- BWW [BUNDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT], BRP [BUNDESAMT FÜR RAUMLANUNG], BUWAL [BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT] (1997): *Berücksichtigung der Hochwassergefah- ren bei raumwirksamen Tätigkeiten*. Biel: Bundesamt für Wasserwirtschaft.
- CALLOW J. N., VAN NIEL K. P., BOGGS G. S. (2007): How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis? *Journal of Hydrology* **332**:30–39.
- CALVER A., LAMB R. (1996): Flood frequency estimation using continuous rainfall-runoff modelling. *Physics and Chemistry of the Earth* **20**:479–483.
- CALVER A., KAY A. L., JONES D. A., KJELDSSEN T. R., REYNARD N. S., CROOKS S. (2004): Flood frequency quantification for ungauged sites using continuous simulation: a UK approach. PAHL-WOSTL C., SCHMIDT S., RIZZOLI A. E., JAKEMAN A. J., EDS. *Complexity and Integrated Resources Management. Transactions of the 2nd Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs)*. Manno: iEMSs.
- CAMERON D., BEVEN K. J., TAWN J., BLAZKOVA S., NADEN P. (1999): Flood frequency estimation by continuous simulation for a gauged upland catchment (with uncertainty). *Journal of Hydrology* **219**:169–187.
- CAMERON D., BEVEN K. J., NADEN P. (2000A): Flood frequency estimation by continuous simulation under climate change (with uncertainty). *Hydrology and Earth System Sciences* **4**(3):393–405.
- CAMERON D., BEVEN K. J., TAWN J. (2000B): An evaluation of three stochastic rainfall models. *Journal of Hydrology* **228**:130–149.
- CAMERON D., BEVEN K. J., TAWN J., NADEN P. (2000c): Flood frequency estimation by continuous simulation (with likelihood based uncertainty estimation). *Hydrology and Earth System Sciences* **4**(1):23–34.
- CASTELLARIN A., BURN D. H., BRATH A. (2001): Assessing the effectiveness of hydrological similarity measures for flood frequency analysis. *Journal of Hydrology* **241**:270–285.
- COOPER V. A., NGUYEN V.-T.-V., NICELL J. A. (2007): Calibration of conceptual rainfall runoff models using global optimisation methods with hydrologic process-based parameter constraints. *Journal of Hydrology* **334**:455–466.

- CORTI M. (2003): *Untersuchungen zur flächendifferenzierten hydrologischen Modellierung des Einzugsgebietes der Aare unter Verwendung des PREVAH und zu seiner effizienten Kalibrierung*. Diplomarbeit. Zürich: Institut für Atmosphäre und Klima der ETH Zürich.
- CRAWFORD N. H., LINSLEY R. S. (1966): *Digital simulation in hydrology: The Stanford Watershed Model IV*. Technical Report **39**. Paolo Alto, CA, US: Department of Civil Engineering, Stanford University.
- DAHM T. (2001): *Nichtlineare Inversionsprobleme*. Universität Hamburg: Institut für Geophysik.
- DALY C., NEILSON P. R., PHILLIPS D. L. (1994): A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology* **33**(2):140–158.
- DAWDY D. R., O'DONNELL T. (1965): Mathematical models of catchment behavior. *Journal of the Hydraulic Division, Proceedings ASCE* **91**(HY4):123–127.
- DAWSON C. W., ABRAHARTB R. J., SHAMSELDINC A. Y., WILBY R. L. (2006): Flood estimation at ungauged sites using artificial neural networks. *Journal of Hydrology* **319**:391–409.
- DECURTINS G. (2006): *Kalibration von Einzugsgebieten und Sensitivitätsanalysen bezüglich Niederschlag in der hydrologischen Modellierung mit PREVAH*. Diplomarbeit. Publikationen Gewässerkunde **363**. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- DEMATTÉIS A., HESSKE S., PARRIAUX A., TACHER L. (1997): Haupttypen der Grundwasserleiter. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel **8.4**. Bern: Landeshydrologie und -geologie.
- DEUTSCH C. V., JOURNEL A. G. (1997): *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. New York: Oxford University Press.
- DIEZIG R. (2006): *Hochwasserprozesstypen der Schweiz. Eine prozessorientierte Typisierung grosser Hochwasserereignisse in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten*. Diplomarbeit. Publikationen Gewässerkunde **361**. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- DMK [DEUTSCHSCHWEIZERISCHE MATHEMATIKKOMMISSION] UND DPK [DEUTSCHSCHWEIZERISCHE PHYSIK-KOMMISSION] (1988): *Formeln und Tafeln Mathematik – Physik*. Zürich: Orell Füssli.
- DOBMANN J. (2002): *Untersuchung der Abflussbildungsprozesse mittels Beregnungsversuchen im Baachli und Fulwasser, Spissibach, Leissigen – Eine Einschätzung zur Beurteilung von Reaktionsweisen von Wildbacheinzugsgebieten*. Diplomarbeit. Publikationen Gewässerkunde **279**. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- DOBMANN J.: *Hochwasser, Verbauungen und Feststofflieferung in einem Wildbach – Praxishilfe zur Gesamtbeurteilung des Gefahrenpotenzials von Wildbacheinzugsgebieten*. Dissertation. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern (in Vorbereitung).
- DOHERTY J. (2002): *PEST – Model-Independent Parameter Estimation*. User manual, fourth edition. Brisbane, AUS: Watermark Numerical Computing.
- DOHERTY J. (2003): *PEST Surface Water Utilities*. User manual. Brisbane, AUS: Watermark Numerical Computing.
- DOOGE J. C. I. (2005): Bringing it all together. *Hydrology and Earth System Sciences* **9**:3–14.
- DRACOS T. (1980): *Hydrologie. Eine Einführung für Ingenieure*. Wien und New York: Springer.
- DUAN Q., SOROOSHIAN S., GUPTA V. K. (1992): Effective and efficient global optimisation for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research* **28**(4):1015–1031.
- DÜSTER H. (1994): *Modellierung der räumlichen Variabilität seltener Hochwasser in der Schweiz*. Dissertation. Geographica Bernensia **G44**. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- DVWK [DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU] (1999): *Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen*. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft **251**. Bonn: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser.
- EAGLESON P. S. (1972): Dynamics of flood frequency. *Water Resources Research* **8**:878–989.
- EBERLE M., KRAHE P., BUITEVELD H., WILKE K., BEERSMA J. (2002): Estimation of extreme floods in the River Rhine basin by combining precipitation-runoff modelling and a rainfall generator. SPREAFICO M., WEINGARTNER R., eds. *International Conference on Flood Estimation (March 6–8, 2002 in Berne, Switzerland)*: Proceedings. CHR-Report **II-17**. Lelystad, NL: International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, p. 459–467.

- ECKHARDT K. (2002): Vergleich zweier Verfahren zur automatischen Modellkalibrierung. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* **46**(2):69–73.
- ECKHARDT K., FOHRER N., FREDE H.-G. (2005): Automatic model calibration. *Hydrological Processes* **19**:651–658.
- EGLI T., PETRASCHECK A. (1994): Schadenempfindlichkeit als Grundlage angepasster Hochwasserschutzmassnahmen. *wasser, energie, luft* **86**(1/2):9–13.
- ELSASSER A. (1996): *Ein Beitrag zur zeitlichen Extrapolation von Hochwasserabflüssen – Möglichkeiten und Grenzen des Modells AGREGEE in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten*. Diplomarbeit. Publikationen Gewässerkunde **177**. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- ENGEL B. A. (1996): Methodologies for development of response units based on terrain, land cover and soils data. GOODCHILD M. F., ED. *GIS and environmental modeling: progress and research issues*. Fort Collins, CO, US: GIS World Books, p. 123–128.
- FAH R., KUHLMANN U., REICHEL G. (2002): FLUX/FLORIS²⁰⁰⁰ Benutzerhandbuch. Linz: SCIETEC GmbH.
- FAP [EIDGENÖSSISCHE FORSCHUNGSANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFTLICHEN PFLANZENBAU] (1980): *Bodenigneungskarte der Schweiz. Grundlagen der Raumplanung*. Bern: Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale.
- FEDERER G. (2004): *Hochwasserfrachten in ausgewählten mesoskaligen Einzugsgebieten der Schweiz*. Diplomarbeit. Publikationen Gewässerkunde **306**. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- FISCHER M. M. (1982): *Eine Methodologie der Regionaltaxonomie: Probleme und Verfahren der Klassifikation und Regionalisierung in der Geographie und Regionalforschung*. Bremer Beiträge zur Geographie und Raumplanung **3**. Bremen: Universität Bremen.
- FLACH P. (2007): *Grundlagen zur Regionalisierung von Modellparametern des hydrologischen Modellsystems PREVAH*. Diplomarbeit. Publikationen Gewässerkunde **385**. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- FLEMING G., FRANZ D. D. (1971): Flood frequency estimating techniques. *Journal of the Hydraulics Division–ASCE* **97**(HY9):1441–1460.
- FLÜGEL W.-A. (1997): Combining GIS with regional hydrological modelling using hydrologic response units (HRUs): An application from Germany. *Mathematics and Computers in Simulation* **43**:297–304.
- FONTAINE T. A. (1995): Rainfall-runoff model accuracy for an extreme flood. *Journal of Hydraulic Engineering–ASCE* **121**(4):365–374.
- FRANCHINI M., PACCANI M. (1991): Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology* **122**:161–219.
- FRANCHINI M., HELMLINGER K. R., FOUFOULA-GEORGIOU E., TODINI E. (1996): Stochastic storm transposition coupled with rainfall-runoff modeling for estimation of exceedance probabilities of design floods. *Journal of Hydrology* **175**:511–532.
- FRANKS S. W., SIVAPALAN M., TAKEUCHI K., TACHIKAWA Y., EDS. (2005): *Predictions in Ungauged Basins: International Perspectives on the State of the Art and Pathways Forward*. IAHS publication **301**. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences.
- FREI C., SCHÄR C. (1998): A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *International Journal of Climatology* **18**:873–900.
- FREI C., BADER S., GERMANN U., ZBINDEN P., APPENZELLER C. (2006): Verteilung, Verlauf und klimatologische Einordnung des Starkniederschlags. ROTACH M., APPENZELLER C., ALBISSE P., EDS. *Starkniederschlagsereignis August 2005*. Arbeitsbericht MeteoSchweiz **211**. Zürich: MeteoSchweiz, p. 15–31.
- FÜRST J. (2004): *GIS in Hydrologie und Wasserwirtschaft*. Heidelberg: Wichmann.
- GAMMA P. (1992): *Beitrag zu einer hydrologischen Gliederung der Schweiz. GIS-Basierte Gewinnung von Einzugsgebetsparametern und deren multivariate Klassifikation mit TWINSPLAN*. Diplomarbeit. Publikationen Gewässerkunde **131**. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.

- GAREN D. C., MARKS D. (2001): Spatial fields of meteorological input data including forest canopy corrections for an energy budget snow simulation model. DOLMAN A. J., HALL A. J., KAVVAS M. L., OKI T., POMEROY J. W., EDS. *Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Schemes and Large Scale Hydrological Models*. IAHS publication **270**. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences, p. 349–353.
- GASSER D. (2004): *Untersuchungen zur effektiven Kalibrierung und Regionalisierung der Parameter des hydrologischen Einzugsgebietsmodells PREVAH in Teileinzugsgebieten des Rheins*. Diplomarbeit. Zürich: Institut für Atmosphäre und Klima der ETH Zürich.
- GAUME E. (2006): On the asymptotic behavior of flood peak distributions. *Hydrology and Earth System Sciences* **10**:233–243.
- GEES A. (1997): *Analyse historischer und seltener Hochwasser in der Schweiz: Bedeutung für das Bemessungshochwasser*. Dissertation. Geographica Bernensia **G53**. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- GEIGER H., RÖTHLISBERGER G., STEHLI A., ZELLER J. (1992): Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901–1970. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel **2.4**. Bern: Landeshydrologie und -geologie.
- GERMANN U., JOSS J. (2000): Spatial continuity of alpine precipitation. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere* **25**(10–12):903–908.
- GERMANN U., JOSS J. (2004): Operational measurement of precipitation in mountainous terrain. MEISCHNER P., ED. *Weather Radar: Principles and Advanced Applications*. Berlin: Springer, p. 52–77.
- GERMANN U., GALLI G., BOSCACCI M., BOLLIGER M., GABELLA M. (2004): Quantitative precipitation estimation in the Alps: where do we stand? *Proceedings of ERAD 2004*. Katlenburg-Lindau: Copernicus, p. 2–6.
- GERMANN U., GALLI G., BOSCACCI M., BOLLIGER M. (2006): Radar precipitation measurement in a mountainous region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **132**:1669–1692.
- GIANNONI G., SMITH J. A., ZHANG Y., ROTH G. (2003): Hydrologic modeling of extreme floods using radar rainfall estimates. *Advances in Water Resources* **26**(2):195–203.
- GOODRICH D. C., FAURÈS J.-M., WOOLHISER D. A., LANE L. J., SOROOSHIAN S. (1995): Measurement and analysis of small-scale convective storm rainfall variability. *Journal of Hydrology* **173**:283–308.
- GOOVAERTS P. (1997): *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. New York: Oxford University Press.
- GOOVAERTS P. (2000): Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology* **228**:113–129.
- GRAYSON R., BLÖSCHL G. (2000): Spatial modelling of catchment dynamics. GRAYSON R., BLÖSCHL G., EDS. *Spatial Patterns in Catchment Hydrology. Observations and Modelling*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, p. 51–81.
- GREBNER D. (2001): Spatial and temporal patterns of precipitation fields of extreme events in Switzerland and concepts for precipitation scenarios. KRAHE P., HERPERTZ D., EDS. *Generation of Hydro-meteorological Reference Conditions for the Assessment of Flood Hazard in large River Basins*. Papers presented at the international workshop held on March 6 and 7, 2001 in Koblenz. CHR-Report **I-20**. Lelystad, NL: International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, p. 21–29.
- GREBNER D., GRUBINGER H. (2004): Charakteristiken alpiner Niederschlagssysteme. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* **56**(3–4):51–58.
- GREIS N. P., WOOD E. F. (1981): Regional flood frequency estimation and network design. *Water Resources Research* **17**(4):1167–1177.
- GREIS N. P., WOOD E. F. (1983): Correction to regional flood frequency estimation and network design. *Water Resources Research* **19**(2):589–590.
- GUPTA H. V., SOROOSHIAN S., YAPO P. O. (1998): Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resources Research* **34**(4):751–763.

- GURTZ J. (1988): *Beitrag zu den hydrologischen Grundlagen für die Gewährleistung der gesellschaftlichen notwendigen Mehrfachnutzung der Wasserressourcen*. Dresden: TU Dresden.
- GURTZ J., BALTENSWEILER A., LANG H., MENZEL L., SCHULLA J. (1997): *Auswirkungen von klimatischen Variationen auf Wasserhaushalt und Abfluss im Flussgebiet des Rheins*. Projektschlussbericht im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes "Klimaänderungen und Naturkatastrophen", NFP 31. Zürich: vdf Hochschulverlag.
- GURTZ J., BALTENSWEILER A., LANG H. (1999): Spatially distributed hydrotope-based modeling of evapotranspiration and runoff in mountainous basins. *Hydrological Processes* **13**:2751–2768.
- GURTZ J., ZAPPA M., JASPER K., LANG H., VERBUNT M., BADOUX A., VITVAR T. (2003): A Comparative Study in Modeling Runoff and its Components in Two Mountainous Catchments. *Hydrological Processes* **17**(2):297–311.
- GYALISTRAS D., FISCHLIN A., RIEDO M. (1997): Herleitung stündlicher Wetterszenarien unter zukünftigen Klimabedingungen. FUHRER J., ED. *Klimaänderung und Grünland – eine Modellstudie über die Auswirkungen zukünftiger Klimaveränderungen auf das Dauergrünland in der Schweiz*. Zürich: vdf Hochschulverlag, p. 207–276.
- HABERLANDT U. (2007): Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event. *Journal of Hydrology* **332**:144–157.
- HARLIN J. M., KUNG C.-S. (1992): Parameter uncertainty and simulation of design floods in Sweden. *Journal of Hydrology* **137**:209–230.
- HARTUNG J., ELEPELT B., KLÖSENER K.-H. (2002): *Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. München und Wien: Oldenbourg.
- HEBLING A., KAN C., VOGT S. (2006): Dauerregen, Schauer oder Schmelze – welche Ereignisse lösen in der Schweiz die Jahreshochwasser aus? *wasser, energie, luft* **98**(3):249–254.
- HELLWEGER F., MAIDMENT D. R. (1997): *AGREE – DEM Surface Reconditioning System*. Austin: University of Texas.
- HEUVELMANS G., MUYS B., FEYEN J. (2006): Regionalisation of the parameters of a hydrological model: Comparison of linear regression models with artificial neural nets. *Journal of Hydrology* **319**:245–265.
- HILKER N., ALLER D., HEGG C. (2007): Schäden. BEZZOLA G. R., HEGG C., EDS. *Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung*. Umweltwissen **0707**. Bern und Birmensdorf: BAFU und WSL, p. 127–148.
- HOCK R. (1998): *Modeling of Glacier Melt and Discharge*. Zürcher geographische Schriften **70**. Zürich: Geographisches Institut der ETH Zürich.
- HOCK R. (1999): A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation. *Journal of Glaciology* **45**(149):101–111.
- 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* **20**:2091–2109.
- HOSSAIN F., ANAGNOSTOU E. N., DINKU T., BORGIA M. (2004): Hydrological model sensitivity to parameter and radar rainfall estimation uncertainty. *Hydrological Processes* **18**:3277–3291.
- HUNDECHA Y., BÁRDOSSY A. (2004): Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of Hydrology* **292**:281–295.
- HUNZIKER S. (2002): *Hydrologische Raumgliederung aufgrund vegetationsgeografischer und bodenkundlicher Befunde in den Teileinzugsgebieten Baachli und Fulwasser, Spissibach, Leissigen – Eine Einschätzung der Reaktionsweisen von Wildbacheinzugsgebieten*. Diplomarbeit. Publikationen Gewässerkunde **280**. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- HUTCHINSON M. F. (1987): Methods of generation of weather sequences. BUNTING A. H., ED. *Agricultural Environments: Characterisation, Classification and Mapping*. Wallingford: CAB International, p. 149–157.
- HUTCHINSON M. F. (1995): Stochastic space-time weather models from ground based data. *Agricultural and Forest Meteorology* **73**(3–4):237–264.

- IH [INSTITUTE OF HYDROLOGY] (1999): *Flood Estimation Handbook*. Wallingford, UK: Institute of Hydrology.
- JAKEMAN A. J., HORNBERGER G. M. (1993): How much complexity is warranted in a rainfall-runoff-model? *Water Resources Research* **29**(8):2637–2649.
- JAMES W. P., ROBINSON C. G., JOHN F. BELL J. F. (1993): Radar-assisted real-time flood forecasting. *Journal of Water Resources Planning and Management* **119**(1):32–44.
- JASPER K., GURTZ J., LANG H. (2002): Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology* **267**:40–52.
- JAUN, S.: *Hydrological modelling for short-range probabilistic forecasting and climate change scenarios*. Dissertation. Zürich: Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zürich (in preparation).
- JENSEN H. (1982): *Modell HBV für die Tagesmittel des Abflusses. Kurz- und langfristige Abflussprognosen für den Rhein bei Rheinfelden*. Bericht der VAW **100.30**. Zürich: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.
- JENSEN H., LANG H., RINDERKNECHT J. (1997): Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901–1970. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel **2.4²**. Bern: Landeshydrologie und -geologie.
- JOHANSSON B. (1994): The relationship between catchment characteristics and the parameters of a conceptual runoff model: a study in the south of Sweden. SEUNA P., GUSTARD A., ARNELL N. W., COLE G. A., EDS. *FRIEND: Flow Regimes from International Experimental and Network Data*. Proceedings of the second FRIEND conference held at Braunschweig, October 1993. IAHS publication **221**. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences, p. 475–482.
- JOHANSSON B. (2000): Areal precipitation and temperature in the Swedish mountains – An evaluation from a hydrological perspective. *Nordic Hydrology* **31**(3):207–228.
- Joss J., GERMANN U. (2000): Solutions and problems when applying qualitative and quantitative information from weather radar. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere* **25**(10–12):837–841.
- KAN C. (1995): *Die höchsten in der Schweiz beobachteten Abflussmengen bis 1990*. Diplomarbeit. Publikationen Gewässerkunde **169**. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- KAN C. (2002): Hydrometrische Netze. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel **5.1²**. Bern: Bundesamt für Wasser und Geologie.
- KAY A. L., REYNARD N. S., JONES R. G. (2006A): RCM rainfall for UK flood frequency estimation. I. Method and validation. *Journal of Hydrology* **318**:151–162.
- KAY A. L., REYNARD N. S., JONES R. G. (2006B): RCM rainfall for UK flood frequency estimation. II. Climate change results. *Journal of Hydrology* **318**:163–172.
- KILSBY C. G., FALLOWS C. S., O'CONNELL P. E. (1998): Generating rainfall scenarios for hydrologic impact modelling. WHEATER H. S., KIRBY C., EDS. *Hydrology in a Changing Environment*. Chichester (UK): John Wiley, p. 33–42.
- KIRCHHOFER W., SEVRUK B. (1992): Mittlere jährliche korrigierte Niederschlagshöhen 1951–1980. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel **2.2**. Bern: Landeshydrologie und -geologie.
- KIRCHNER J. W. (2006): Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resources Research* **42**:W03S04.
- KIRKBY M. J. (1975): Hydrograph modelling strategies. PEEL R., CHISHOLM M., HAGGETT P., EDS. *Processes in Physical and Human Geography*. London, UK: Heinemann, p. 69–90.
- KLAUSER H. (2004): *Hochwasserrelevante Darstellung von mesoskaligen Einzugsgebieten in der Schweiz*. Diplomarbeit. Publikationen Gewässerkunde **307**. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- KLEINN J. (2002): *Climate Change and Runoff Statistics in the Rhine Basin: A Process Study with a Coupled Climate-Runoff Model*. Dissertation ETH **14663**. Zürich: Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH 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* **110**:D04102.
- KLEMEŠ V. (2000): Tall tales about tails of hydrological distributions. Parts I and II. *Journal of Hydrologic Engineering* **5**(3):227–239.
- KLOK E. J., JASPER K., ROELOFSMA K. P., GURTZ J., BADOUX A. (2001): Distributed hydrological modeling of a heavily glaciated Alpine river basin. *Hydrological Sciences Journal* **46**(4):553–570.
- KLUGE C. (1996): *Statistische Analyse von Hochwasserdurchflüssen*. Dresden: Institut für Siedlungs- und Industriewasserwirtschaft und Institut für Hydrologie und Meteorologie.
- KOKKONEN T. S., JAKEMAN A. J., YOUNG P. C., KOIVUSALO H. J. (2003): Predicting daily flows in un-gauged catchments: model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina. *Hydrological Processes* **17**(11):2219–2238.
- KÖLLA E. (1986): *Zur Abschätzung von Hochwassern in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessungen*. Mitteilungen der VAW **87**. Zürich: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glazialologie der ETH Zürich.
- KÖLLA E. (1989): Vom Regen in den Bach – künstliche Simulation natürlicher Abflussvorgänge. *Geowissenschaften* **7**(2):38–43.
- KÖNIG P., LANG H., SCHWARZE R. (1994): On the runoff formation in the small pre-alpine research basin Rietholzbach. SEUNA P., GUSTARD A., ARNELL N. W., COLE G. A., EDS. *FRIEND: Flow Regimes from International Experimental and Network Data*. Proceedings of the second FRIEND conference held at Braunschweig, October 1993. IAHS publication **221**. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences, p. 391–398.
- KOUTSOYIANNIS D. (2004A): Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation. *Hydrological Sciences Journal* **49**(4):575–590.
- KOUTSOYIANNIS D. (2004B): Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: II. Empirical investigation of long rainfall records. *Hydrological Sciences Journal* **49**(4):591–610.
- KRAHE P., HERPERTZ D., EDS. (2001): *Generation of Hydrometeorological Reference Conditions for the Assessment of Flood Hazard in large River Basins*. Papers presented at the international workshop held on March 6 and 7, 2001 in Koblenz. CHR-Report **I-20**. Lelystad, NL: International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin.
- KREPS H. (1952): Die näherungsweise Ermittlung grosser Hochwasserabflussspenden im Lichte neuerer Betrachtungen. *Wasser- und Energiewirtschaft* **44**(1):55–57.
- KUCZERA G., MROCKOWSKI M. (1998): Assessment of hydrological parameter uncertainty and the worth of multiresponse data. *Water Resources Research* **34**(6):1481–1489.
- KUNSTMANN H., KRAUSE J., MAYR S. (2005): Inverse distributed hydrological modelling of alpine catchments. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* **2**:2581–2623.
- LAMB R. (1999): Calibration of a conceptual rainfall-runoff model for flood frequency estimation by continuous simulation. *Water Resources Research* **35**(10):3103–3114.
- LAMB R., KAY A. L. (2004): Confidence intervals for a spatially generalized, continuous simulation flood frequency model for Great Britain. *Water Resources Research* **40**(7):W07501.
- LAMB R., CALVER A., KAY A. L. (2002): A national system for flood frequency estimation in Great Britain using continuous catchment simulation: confidence and uncertainties. SPREAFICO M., WEINGARTNER R., EDS. *International Conference on Flood Estimation (March 6–8, 2002 in Berne, Switzerland): Proceedings*. CHR-Report **II-17**. Lelystad, NL: International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, p. 559–566.
- LANG H. (1985): Höhenabhängigkeit der Niederschläge. SEVRUK B., ED. *Der Niederschlag in der Schweiz. Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie* **31**. Bern: Kümmerli und Frey, p. 149–157.
- LEANDER R., BUISHAND A., AALDERS P., DE WIT M. (2005): Estimation of extreme floods of the River Meuse using a stochastic weather generator and a rainfall-runoff model. *Hydrological Sciences Journal* **50**(6):1089–1103.
- LEGATES D. R., McCABE G. J. (1999): Evaluating the use of goodness-of-fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* **35**(1):233–241.

- LEUENBERGER D. (2005): *High-Resolution Radar Rainfall Assimilation: Exploratory Studies with Latent Heat Nudging*. Dissertation ETH **15884**. Zürich: Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zürich.
- LH [SCHWEIZERISCHE LANDESHYDROLOGIE] (1982): *Handbuch für die Abflussmengenmessung*. Hydrologische Mitteilungen **4**. Bern: Landeshydrologie und -geologie.
- LHG [SCHWEIZERISCHE LANDESHYDROLOGIE UND -GEOLOGIE] (1998): *Handbuch der Pegelmessung*. Hydrologische Mitteilungen **26**. Bern: Landeshydrologie und -geologie.
- LINDSTRÖM G., JOHANSSON B., PERSSON M., GARDELIN M., BERGSTRÖM S. (1997): Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology* **201**:272–288.
- LITSCHI M. (2005): *Kombination von Radar- und Pluviometerdaten zu stündlichen Niederschlagsfeldern für die Schweiz. Validierung und klimatologische Auswertung*. Diplomarbeit. Zürich: Institut für Atmosphäre und Klima der ETH Zürich.
- LÖHMANNSRÖBEN R. (2002): Bedeutung des Bodens im Zusammenhang mit der hydrologischen Regionalisierung. GUTKNECHT D., ED. *Niederschlag-Abfluss-Modellierung. Simulation und Prognose*. Wiener Mitteilungen Wasser · Abwasser · Gewässer **164**, p. 201–213.
- LUTZ W. (1984): *Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen*. Dissertation. Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Heft **24**. Karlsruhe: Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe.
- MADSEN H. (2000): Automatic calibration of a conceptual rainfall runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology* **235**:276–288.
- MADSEN H. (2003): Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives. *Advances in Water Resources* **26**:205–216.
- MADSEN H., WILSON G., AMMENTORP H. C. (2002): Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology* **261**:48–59.
- MAISCH M., WIPF A., DENNELER B., BATTAGLIA J., BENZ C. (1999): *Die Gletscher der Schweizer Alpen. Gletscherhochstand 1850, aktuelle Vergletscherung, Gletscherschwund-Szenarien*. Projekt-schlussbericht im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes "Klimaänderungen und Naturkatastrophen", NFP-31. Zürich: vdf Hochschulverlag.
- MANIAK U. (2005): *Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure*. Berlin: Springer.
- MARGOT A., SIGG R., SCHÄDLER B., WEINGARTNER R. (1992): Beeinflussung der Fließgewässer durch Kraftwerke (≥ 300 kW) und Seeregulierungen. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel **5.3**. Bern: Landeshydrologie und -geologie.
- MCCUEN R. H. (1998): *Hydrologic Analysis and Design*. Upper Saddle River, NJ, US: Prentice Hall.
- MCINTYRE N., LEE H., WHEATER H., YOUNG A. R., WAGENER T. (2005): Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments. *Water Resources Research* **41**:W12434.
- MENZEL L. (1997): *Modellierung der Evapotranspiration im System Boden-Pflanze-Atmosphäre*. Zürcher geographische Schriften **67**. Zürich: Geographisches Institut der ETH Zürich.
- MERZ R. (2002): *Understanding and Estimating Flood Probabilities at the Regional Scale*. Dissertation. Wiener Mitteilungen Wasser · Abwasser · Gewässer **181**. Wien: Technische Universität Wien.
- MERZ R., BLÖSCHL G. (2002): Marktüberblick und Beispiele – Software für die NA-Modellierung. GUTKNECHT D., ED. *Niederschlag-Abfluss-Modellierung. Simulation und Prognose*. Wiener Mitteilungen Wasser · Abwasser · Gewässer **164**. Wien: TU Wien, p. 223–242.
- MERZ R., BLÖSCHL G. (2004): Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology* **287**:95–123.
- MERZ R., BLÖSCHL G. (2005): Flood frequency regionalisation spatial proximity vs. catchment attributes. *Journal of Hydrology* **302**:283–306.
- MERZ R., BLÖSCHL G., PIOCK-ELLENA U. (1999): Zur Anwendbarkeit des Grdex-Verfahrens in Österreich. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* **51**(11–12):291–305.
- METEOSCHWEIZ (2003A): *On-Line-Datenbank der MeteoSchweiz*, Serverzugriff via ETH Zürich.

- METEOSCHWEIZ (2003B): *Wetteradar-Daten der Stationen Albis, Dole und Lema*. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie / MeteoSvizzera, CH-6605 Locarno-Monti (Vereinbarung vom 19.12.2003).
- MICHELSON D. B. (2004): Systematic correction of precipitation gauge observations using analyzed meteorological variables. *Journal of Hydrology* **290**:161–177.
- MIDDLEKOOP H., DAAMEN K., GELLENS D., GRABS W., KWADIJK J. C. J., LANG H., PARMET B., SCHÄDLER B., SCHULLA J., WILKE K. (2001): Impact of Climate Change on Hydrological Regimes and Water Resources Management in the Rhine Basin. *Climatic Change* **49**(1–2):105–128.
- MIEGEL K., BÜTTNER U. (2003): Zum Einfluss der Datenverfügbarkeit und von extremen Ereignissen auf das Ergebnis hochwasserstatistischer Analysen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* **47**(4):94–102.
- MITTELBACH H. (2006): *Kalibrierung und Regionalisierung des flächendifferenzierten hydrologischen Modellsystems PREVAH in ausgewählten Einzugsgebieten der Schweiz*. Diplomarbeit. Dresden: Institut für Hydrologie und Meteorologie der TU Dresden.
- MOLNAR P., BURLANDO P. (2005): Preservation of rainfall properties in stochastic disaggregation by a simple random cascade model. *Atmospheric Research* **77**:137–151.
- MONTANARI A. (2007): What do we mean by uncertainty? The need for a consistent wording about uncertainty assessment in hydrology. *Hydrological Processes* **21**:841–845.
- MONTEITH J. L. (1965): *Evaporation and the environment. The state and movement of water in living organisms*. Symposium of the Society of Experimental Biologists **19**:205–234.
- MONTEITH J. L. (1975): *Vegetation and the atmosphere*, Volume 1: Principles. London, UK: Academic Press.
- MONTEITH J. L. (1981): Evaporation and surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **107**, 1–27.
- MOORE I. D., TURNER A. K., WILSON J. P., JENSON S. K., BAND E. B. (1993): GIS and land-surface-subsurface process modelling. GOODCHILD M. F., PARKS B. O., STEYAERT L. T., EDs. *Environmental modelling with GIS*. New York: Oxford University Press, p. 196–230.
- MOSLEY M. P. (1981): Delimitation of New Zealand hydrologic regions. *Journal of Hydrology* **49**(1):173–192.
- MUDELSEE M., DEUTSCH M., BÖRNGEN M., TETZLAFF G. (2006): Trends in flood risk of the River Werra (Germany) over the past 500 years. *Hydrological Sciences Journal* **51**(5):818–863.
- MULVANEY T. J. (1851): On the use of self-registering rain and flood gages in making observations of the relation of rainfall and flood discharges in a given catchment. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers of Ireland* **4**:18–31.
- NADEN P. S. (1992): Analysis and use of peaks-over-threshold data in flood estimation. SAUL A. J., ED. *Floods and Flood Management*. Dordrecht: Kluwer, p. 131–143.
- NAEF F. (2007): Extreme Hochwasser Verstehen – Beispiele aus der Schweiz. GUTKNECHT D., ED. *Extreme Abflussereignisse : Dokumentation - Bedeutung - Bestimmungsmethoden*. Wiener Mitteilungen Wasser · Abwasser · Gewässer **206**. Wien: TU Wien, p. 59–68.
- NAEF F., THOMA C. (2002): Dämpfung von Hochwasserspitzen in Fließgewässern. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel **5.9**. Bern: Bundesamt für Wasser und Geologie.
- NAEF F., ZUIDEMA P., KÖLLA E. (1986): Abschätzung von Hochwassern in kleinen Einzugsgebieten. SPREAFICO M., ED. *Abschätzung der Abflüsse in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessung. Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie* **33**. Bern: Kümmerli und Frey, p. 195–233.
- NAEF F., SCHERRER S., ZURBRÜGG CH. (1999): Grosse Hochwasser – unterschiedliche Reaktionen von Einzugsgebieten auf Starkregen. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel **5.7**. Bern: Landeshydrologie und -geologie.
- NASH J. E., SUTCLIFFE J. V. (1970): River flow forecasting through conceptual models: Part I – a discussion of principles. *Journal of Hydrology* **10**:282–290.
- NATHAN R. J., McMAHON T. A. (1990A): Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation. *Journal of Hydrology* **121**:217–238.

- NATHAN R. J., McMAHON T. A. (1990B): Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis. *Water Resources Research* **26**(7):1465–1473.
- 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*. CHR-Report II-7. Lelystad, NL: International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin.
- NIGGLI M. (2000): *Schadenpotential entlang von Fließgewässern*. Diplomarbeit. Publikationen Gewässerkunde **236**. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- NIGGLI M. (2004): *Combination bayésienne des estimations régionales des crues: concept, développement et validation*. Thèse EPFL **2895**. Lausanne: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- ONO F., FAULKNER D. A., WHEATER H. S. (1996): Design rainfall modelling in the Thames catchment. *Hydrological Sciences Journal* **41**:715–733.
- OOSENBURG E. (2003): *Einzugsgebiets- und Seeretentionsmodellierung im Berner Oberland: Hochwassersimulation durch Koppelung zweier Modelle*. Diplomarbeit. Zürich: Geographisches Institut der Universität Zürich.
- OUDIN L., ANDRÉASSIAN V., PERRIN C., MICHEL C., LE MOINE N.: Spatial proximity, physical similarity and ungauged catchments: a comparison based on 913 French catchments. *Water Resources Research* (submitted).
- PAPPENBERGER F. (2006): Cascading uncertainty in flood forecasting. *CHR expert consultation on Ensemble Prediction and Uncertainties in Flood Forecasting, Berne, 30.–31.03.2006*. Lelystad, NL: International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin.
- PAPPENBERGER F., BEVEN K. J. (2006): Ignorance is bliss: Or seven reasons not to use uncertainty analysis. *Water Resources Research* **42**:W05302.
- PAPPENBERGER F., BEVEN K. J., HUNTER N. M., BATES P. D., GOUWELEEUW B. T., THIELEN J., DE ROO A. P. J. (2005): Cascading model uncertainty from medium range weather forecasts (10 days) through a rainfall-runoff model to flood inundation predictions within the European Flood Forecasting System (EFFS). *Hydrology and Earth System Sciences* **9**(4):381–393.
- PARAJKA J., MERZ R., BLÖSCHL G. (2005): A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrology and Earth System Sciences* **9**:157–171.
- PARAJKA J., MERZ R., BLÖSCHL G. (2007): Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modelling: case study in 320 Austrian catchments. *Hydrological Processes* **21**:435–446.
- PEARSON C. P. (1991): New Zealand Regional Flood Frequency Analysis Using L-Moments – 2. Flood Frequency Groups. *Journal of Hydrology (NZ)* **30**(2):77–92.
- PEEL M. C., CHIEW F. H. S., WESTERN A. W., McMAHON T. A. (2000): *Extension of Unimpaired Monthly Streamflow Data and Regionalisation of Parameter Values to Estimate Streamflow in Ungauged Catchments*. National Land and Water Resources Audit, Theme 1 – Water Availability. Canberra, AUS: Natural Heritage Trust.
- PELLARIN T., DELRIEU G., CREUTIN J. D., ANDRIEU H. (2000): Hydrologic visibility of weather radars operating in high-mountainous regions: A case study for the Toce catchment (Italy) during the Mesoscale Alpine Programme. *Physics and Chemistry of the Earth Part B – Hydrology, Oceans and Atmosphere* **25**(10–12):953–957.
- PENMAN H. L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Meteorological Society A* **193**:120–145.
- PENMAN H. L. (1956): Estimating evaporation. *Transactions of the American Geophysical Union* **37**:43–46.
- PERL M. (2002): *Verdunstungsmodellierung für die Schweiz. Regionale Auswertung und Validierung*. Diplomarbeit. Zürich: Institut für Atmosphäre und Klima der ETH Zürich.
- PERL M., ZAPPA M., GURTZ J. (2003): *Berechnung und Bereitstellung von Gebietsniederschlägen für das gesamte Rhein-Einzugsgebiet bis Basel und ausgewählte Teileinzugsgebiete für die Jahre 1901 bis 2001 mit Daten aus Deutschland, Liechtenstein, Österreich und der Schweiz*. Arbeitsbericht. Zürich: Institut für Atmosphäre und Klima der ETH Zürich.

- PERRIN C., MICHEL C., ANDRÉASSIAN V. (2001): Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology* **242**:275–301.
- PETRASCHEK A. (2003): Hochwasser. In: OcCC [BERATENDES ORGAN FÜR FRAGEN DER KLIMAÄNDERUNG]: *Extremereignisse und Klimaänderung*. Bern: OcCC, p. 69–72.
- PFAUNDLER M. (2001): *Adapting, Analysing and Evaluating a Flexible Index Flood Regionalisation Approach for Heterogeneous Geographical Environments*. Schriftenreihe des Instituts für Hydromechanik und Wasserwirtschaft **8**. Zürich: Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETH Zürich.
- PFAUNDLER M., ZAPPA M. (2006): Die mittleren Abflüsse über die ganze Schweiz – Ein optimierter Datensatz im 500×500 m Raster. *wasser, energie, luft* **98**(4):291–298.
- PHILLIPS D. L., DOLPH J., MARKS D. (1992): A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agricultural and Forest Meteorology* **58**(1–2):119–141.
- PRUDHOMME C., REYNARD N., CROOKS S. (2002): Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now? *Hydrological Processes* **16**(6):1137–1150.
- REBER L. (2005): *Variabilität konvektiver Niederschläge – Untersuchungen im Emmental (Wasen)*. Diplomarbeit. Publikationen Gewässerkunde **338**. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- REED D. W., JACOBSON D., ROBINSON A. J., FAULKNER D. A., STEWART E. J. (1999): Regional frequency analysis: a new vocabulary. GOTTSCHALK L., OLIVRY J.-C., REED D., ROSBJERG D., EDS. *Hydrological Extremes: Understanding, Predicting, Mitigating*. Proceedings of Symposium HS1 held during IUGG 1999 at Birmingham, July 1999. IAHS publication **255**. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences, p. 237–243.
- REEVES C. P. (1987): *STSPAC Statistical Subroutines for FORTRAN*. Gaithersburg, MD, US: National Bureau of Standards.
- REFSGAARD J. C. (1997): Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* **198**:69–97.
- RENNER C. B., BRAUN L. (1990): *Die Anwendung des Niederschlag-Abfluss-Modells HBV3-ETH (V3.0) auf verschiedene Einzugsgebiete der Schweiz*. Berichte und Skripten der ETH Zürich **40**. Zürich: Geographisches Institut der ETH Zürich.
- RESZLER C., KOMMA J., BLÖSCHL G., GUTKNECHT D. (2006): Ein Ansatz zur Identifikation flächendetailierter Abflussmodelle für die Hochwasservorhersage. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* **50**(5):220–232.
- REYNARD N. S., PRUDHOMME C., CROOKS S. M. (2001): The flood characteristics of large UK Rivers: Potential effects of changing climate and land use. *Climatic Change* **48**(2–3):343–359.
- RICHARDS J. A. (1994): *Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction*. Berlin, Heidelberg and New York: Springer.
- RICHTER K.-G., EBEL M., LUDWIG K. (2001): Application of a water balance model for calculating the impact of extreme rainfall events. KRAHE P., HERPERTZ D., EDS. *Generation of Hydrometeorological Reference Conditions for the Assessment of Flood Hazard in large River Basins*. Papers presented at the international workshop held on March 6 and 7, 2001 in Koblenz. CHR-Report **I-20**. Lelystad, NL: International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, p. 97–106.
- RICKLI C., FORSTER F. (1997): Einfluss verschiedener Standorteigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen* **148**(5):367–385.
- RODDA J. C. (1994): Mountains – a hydrological paradox or paradise? *Hydrologie kleiner Einzugsgebiete*. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz **35**. Zürich: Geographisches Institut der ETH Zürich, p. 41–51.
- ROSS B. B., CONTRACTOR D. N., SHANHOLTZ V. O. (1979): A finite element model of overland and channel flow for assessing the hydrologic impact of landuse change. *Journal of Hydrology* **41**:1–30.
- RÖTHLISBERGER G. (1991): *Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz*. Berichte der WSL **330**. Birmensdorf: Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.

- RÖTHLISBERGER G. (1998): *Unwetterschäden in der Schweiz*. Berichte der WSL **346**. Birmensdorf: Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.
- RUSS R., PINCUS R. (2002): *NetCDF User's Guide for Fortran 90. An Access Interface for Self-Describing, Portable Data*. Version 3.5, March 2002. Boulder, CO, US: University Corporation for Atmospheric Research.
- SÄGESSER M. (2004): *Development and Application of a Hydrological Model for River Aare until Hagnegg using WaSiM-ETH coupled with PEST*. Diplomarbeit. Publikationen Gewässerkunde **310**. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- SALTELLI A. (2006): *The critique of modelling and sensitivity analysis in the scientific discourse. An overview of good practices*. Ispra, IT: Joint Research Centre of the European Commission.
- SALTELLI A., TARANTOLA S., CAMPOLONGO F., RATTO M. (2004): *Sensitivity Analysis in Practice. A guide to assessing scientific models*. Chichester: Wiley.
- SAMANIEGO L., BÁRDOSSY A. (2005): Robust parametric models of runoff characteristics at the meso-scale. *Journal of Hydrology* **303**:136–151.
- SCHÄDLER B. (1995): *Wasserhaushalt der hydrologischen Untersuchungsgebiete der Schweiz*. Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie **21**. Bern: Landeshydrologie und -geologie.
- SCHÄDLER B., WEINGARTNER R. (1992): Natürliche Abflüsse 1961–1980. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel **5.4**. Bern: Landeshydrologie und -geologie.
- SCHÄDLER B., WEINGARTNER R. (2002): Komponenten des natürlichen Wasserhaushaltes 1961–1990. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel **6.3**. Bern: Bundesamt für Wasser und Geologie.
- SCHAEFELI B. (2005): *Quantification of modelling uncertainties in climate change impact studies on water resources : application to a glacier-fed hydropower production system in the Swiss Alps*. Thèse sciences EPFL **3225**. Lausanne: Institut des sciences et technologies de l'environnement, EPFL.
- SCHAEFELI B., GUPTA H. V. (2007): Do Nash values have value? *Hydrological Processes* **21**(15):2075–2080.
- SCHERRER S., NAEF F. (2003): A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland. *Hydrological Processes* **17**(2):391–401.
- SCHMID F., FRAEFEL M., HEGG C. (2004): Unwetterschäden in der Schweiz 1972–2002: Verteilung, Ursachen und Entwicklung. *wasser, energie, luft* **96**(1/2):21–28.
- SCHNITTER N. (1992): *Die Geschichte des Wasserbaus in der Schweiz*. Oberbözberg: Olynthus.
- SCHÖNWIESE C.-D. (2000): *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. Berlin und Stuttgart: Bornträger.
- SCHÜEPP M., BOUËT M., BIDER M., URFER C. (1978): *Regionale Klimabeschreibungen*. 1. Teil: Geamtübersicht, Westschweiz, Wallis, Jura und Juranordfuss sowie Mittelland. Klimatologie der Schweiz, Band **II**. Zürich: Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt.
- SCHULLA J. (1997): *Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen*. Zürcher Geographische Schriften **69**. Zürich: Geographisches Institut der ETH Zürich.
- SCHULLA J., JASPER K. (2000): *Model Description WaSiM-ETH*. Zürich: Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zürich.
- SCHWANBECK J. (2004): *Dynamische und flächendifferenzierte Modellierung des Wasserhaushalts von Teilgebieten der Aare mit PREVAH*. Diplomarbeit. Zürich: Institut für Atmosphäre und Klima der ETH Zürich.
- SCHWANBECK J., VIVIROLI D., WEINGARTNER R.: Modellgestützte Sensitivitätsanalysen. HEGG C., BEZZOLA G. R., eds. Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bern: Bundesamt für Umwelt (in Vorbereitung).
- SCHWARB M., DALY C., FREI C., SCHÄR C. (2001A): Mittlere jährliche Niederschlagshöhen im europäischen Alpenraum 1971–1990. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel **2.6**. Bern: Landeshydrologie.

- SCHWARB M., DALY C., FREI C., SCHÄR C. (2001b): Mittlere saisonale Niederschlagshöhen im europäischen Alpenraum 1971–1990. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 2.7. Bern: Landeshydrologie.
- SCHWARZ R., HERRMANN A., MENDEL O. (1994): Regionalization of runoff components for Central European basins. SEUNA P., GUSTARD A., ARNELL N. W., COLE G. A., EDS. *FRIEND: Flow Regimes from International Experimental and Network Data*. Proceedings of the second FRIEND conference held at Braunschweig, October 1993. IAHS publication 221. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences, p. 493–502.
- SCHWARZ R., DROEGE W., OPHERDEN K. (1999): Regional analysis and modelling of groundwater runoff components from catchments in hard rock areas. DIEKKRÜGER B., KIRKBY M. J., SCHRÖDER U., EDS. *Regionalisation in Hydrology*. Proceedings of a conference held at Braunschweig. IAHS publication 254. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences, p. 221–232.
- SCHWEIZERISCHE Eidgenossenschaft (1991): *Bundesgesetz über den Wasserbau vom 21. Juni 1991 (WBG)*. Inkrafttreten: 1. Januar 1993. SR 721.100.
- SEFTON C. E. M., HOWARTH S. M. (1998): Relationships between dynamic response characteristics and physical descriptors of catchments in England and Wales. *Journal of Hydrology* 211(1):1–16.
- SEGOND M.-L., ONOF C., WHEATER H. S. (2006): Spatial-temporal disaggregation of daily rainfall from a generalized linear model. *Journal of Hydrology* 331:674–689.
- SEIBERT J. (1997): Estimation of parameter uncertainty in the HBV model. *Nordic Hydrology* 28:247–262.
- SEIBERT J. (1999): Regionalisation of parameters for a conceptual rainfall-runoff-model. *Agricultural and Forest Meteorology* 98–99:279–293.
- SEIBERT J. (2002): Does improved model calibration lead to more accurate flood estimation? SPREAFICO M., WEINGARTNER R., EDS. *International Conference on Flood Estimation (March 6–8, 2002 in Berne, Switzerland): Proceedings*. CHR-Report II–17. Lelystad, NL: International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, p. 237–246.
- SEIBERT J., McDONNELL J. J. (2002): On the dialog between experimentalist and modeler in the catchment hydrology: Use of soft data for multi-criteria model calibration. *Water Resources Research* 38(11):1241.
- SEMENOV M. A., BROOKS R. J. (1999): Spatial interpolation of the LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain. *Climate Research* 11(2):137–148.
- SEN M., STOFFA P. L. (1995): *Global Optimization Methods in Geophysical Inversion*. Amsterdam, NL: Elsevier.
- SEVRUK B. (1985): Systematischer Niederschlagsmessfehler in der Schweiz. SEVRUK B., ED. *Der Niederschlag in der Schweiz. Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie* 31. Bern: Kümmerly und Frey, p. 65–75.
- SEVRUK B., KIRCHHOFER W. (1992): Mittlere jährliche Korrekturen der gemessenen Niederschlags- höhen 1951–1980. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 2.3. Bern: Landeshydrologie und -geologie.
- SHEPARD D. S. (1968): A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of 23rd National Conference, Association for Computing Machinery (ACM)*. Princeton, NJ, US: Brandon / Systems Press, p. 517–524.
- SHEPARD D. S. (1984): Computer mapping: The SYMAP interpolation algorithm. GAILE G. L., WILLMOTT C. J., EDS. *Spatial Statistics and Models*. Dordrecht, NL: D. Reidel Publishing, p. 133–145.
- SHERMAN L. K. (1932): Stream-flow from rainfall by the unit-graph method. *Engineering News Record* 108:501–505.
- SINGH V. P., ED. (1995): *Computer Models of Watershed Hydrology*. Highlands Ranch, CO, US: Water Resources Publications.
- SINGH V. P., WOOLHISER D. A. (2002): Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering* 7 (4):270–292.

- SIVAPALAN M., TAKEUCHI K., FRANKS S. W., GUPTA V. K., McDONNELL J. J., MENDIONDO E. M., O'CONNELL P. E., OKI T., POMEROY J. W., SCHERTZER D., UHLENBROOK S., ZEHE E. (2003): IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal* **48**(6):867–880.
- SONDEREGGER C. (2005): *Untersuchungen zur Kalibrierung von PREVAH im Bereich von Hochwasserabflüssen*. Geographisches Institut der Universität Bern, interner Bericht.
- SOROOSHIAN S., GUPTA V. K. (1995): Model calibration. SINGH V. P., ED. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications, p. 23–68.
- SPEAR R. C., HORNBERGER G. M. (1980): Eutrophication in Peel Inlet, II, Identification of critical uncertainties via Generalised Sensitivity Analysis. *Water Research* **14**:43–49.
- SPREAFICO M., WEINGARTNER R. (2005): *Hydrologie der Schweiz. Ausgewählte Aspekte und Resultate*. Berichte des BWG, Serie Wasser **7**. Bern: Bundesamt für Wasser und Geologie.
- SPREAFICO M., WEINGARTNER R., BARBEN M., RYSER A. (2003): *Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten – Praxishilfe*. Berichte des BWG, Serie Wasser **4**. Bern: Bundesamt für Wasser und Geologie.
- STEEL M. E., BLACK A. R., WERRITY A., LITTLEWOOD I. G. (1999): Reassessment of flood risk for Scottish rivers using synthetic runoff data. GOTTSCHALK L., OLIVRY J.-C., REED D., ROSBJERG D., EDS. *Hydrological Extremes: Understanding, Predicting, Mitigating*. Proceedings of Symposium HS1 held during IUGG 1999 at Birmingham, July 1999. IAHS publication **255**. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences, p. 209–215.
- STEINHAUSEN D., LANGER K. (1977): *Clusteranalyse. Einführung in Methoden und Verfahren der automatischen Klassifikation*. Berlin und New York: Walter de Gruyter.
- 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* **13**:2003–2021.
- SWISS RE (2003): Natur- und Man-made-Katastrophen im Jahr 2002: Belastung durch hohe Flutschäden. *Sigma* **2**/2003. Zürich: Schweizerische Rückversicherungsgesellschaft.
- SWISSTOPO [BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAPHIE] (2001): *Formeln und Konstanten für die Berechnung der schweizerischen schieffachigen Zylinderprojektion und der Transformation zwischen Koordinatensystemen*. Bern: Bundesamt für Landestopographie.
- SWV [SCHWEIZERISCHER WASSERWIRTSCHAFTSVERBAND] (2004): *Qualitätssicherung bei der Planung von Hochwasserschutzmassnahmen; Leitfaden für Auftraggeber und -nehmer von Hochwasserschutzprojekten*. Verbandsschrift des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes **65**. Baden: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband.
- SZILAGYI J. (1999): On the use of semi-logarithmic plots for baseflow separation. *Ground Water* **37**(5):660–662.
- TALLAKSEN L. M. (1995): A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology* **165**:349–370.
- TARBOTON D. G., BRAS R. L., RODRÍGUEZ-ITURBE I. (1993): On the extraction of channel networks from digital elevation data. BEVEN K. J., MOORE I. D., EDS. *Terrain Analysis and Distributed Modelling in Hydrology*. Chichester, UK: Wiley, p. 85–104.
- TODINI E. (2007): Hydrological catchment modelling: past, present and future. *Hydrology and Earth System Sciences* **11**:468–482.
- UHLENBROOK S. (1999): *Untersuchung und Modellierung der Abflussbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet*. Freiburger Schriften zur Hydrologie **10**. Freiburg i. B.: Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i. Br.
- UHLENBROOK S. (2005): Von der Abflussbildungsprozessforschung zur prozessorientierten Modellierung – ein Review. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* **49**(1):13–24.
- UHLENBROOK S., LEIBUNDGUT C. (2002): Process-oriented catchment modelling and multiple-response validation. *Hydrological Processes* **16**:423–440.
- UHLENBROOK S., STEINBRICH A. (2002): Einflussgrößen auf die Hochwasserbildung im regionalen Massstab. *Wasser & Boden* **54**(10):8–15.

- UHLENBROOK S., SEIBERT J., LEIBUNDGUT C., RODHE A. (1999): Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure. *Hydrological Sciences Journal* **44**(5):779–797.
- UHLENBROOK S., ROSER S., TILCH N. (2004): Hydrological process representation at the meso-scale: the potential of a distributed, conceptual catchment model. *Journal of Hydrology* **291**:278–296.
- UIJLENHOET E., VAN DER WIELEN S. H., BERNE A. (2006): Uncertainties in rainfall retrievals from ground-based weather radar: overview, case study, and simulation experiment. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* **3**:2385–2436.
- VAN GRIENSVEN A., MEIXNER T., GRUNWALD S., BISHOP T., DILUZIO M., SRINIVASAN R. (2006): A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology* **324**:10–23.
- VANDEWIELE G. L., ELIAS A. (1995): Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalization. *Journal of Hydrology* **170**:277–291.
- VERBUNT M. (2005): *From small-scale modelling of alpine catchments towards probabilistic flood forecasting in the Rhine basin*. Dissertation ETH **16115**. Zürich: Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zürich.
- 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* **282**(1):36–55.
- VERBUNT M., ZAPPA M., GURTZ J., KAUFMANN P. (2006): Verification of a coupled hydrometeorological modelling approach for alpine tributaries in the Rhine basin. *Journal of Hydrology* **324**:224–238.
- VISCHER D. (1993): Versiegelung der Landschaft – grössere Hochwasser? *Gas – Wasser – Abwasser* **73**(4):280–283.
- VISCHER D., BADER S. (1999): Einfluss der Klimaänderung auf die Wasserkraft. *wasser, energie, luft* **91**(7/8):149–152.
- VISCHER D., HUBER A. (2002): *Wasserbau. Hydrologische Grundlagen, Elemente des Wasserbaus, Nutz- und Schutzbauten an Binnengewässern*. Berlin: Springer.
- VIVIROLI D., WEINGARTNER R. (2004A): Die hydrologische Bedeutung der Alpen. *Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 6.4*. Bern: Bundesamt für Wasser und Geologie.
- VIVIROLI D., WEINGARTNER R. (2004B): The hydrological significance of mountains – from regional to global scale. *Hydrology and Earth System Sciences* **8**(6):1016–1029.
- VIVIROLI D., GURTZ J., ZAPPA M. (2007): *The Hydrological Modelling System PREVAH*. Geographica Bernensia **P40**. Berne: Institute of Geography, University of Berne (GIUB), ISBN 978-3905835-01-0.
- VOGEL R. M., THOMAS W. O., McMAHON T. A. (1993): Flood-Flow Frequency Model Selection in Southwestern United States. *Journal of Water Resources Planning and Management* **119**(3):353–366.
- VOGT S. (2001): *Zur Abschätzung von Hochwasser in kleinen Wildbacheinzugsgebieten*. Diplomarbeit. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
- VOGT S., FORSTER F., HEGG. C. (2002): Clark-WSL – a method for the estimation of flood hydrographs in small torrential catchments. SPREAFICO M., WEINGARTNER R., EDS. *International Conference on Flood Estimation (March 6–8, 2002 in Berne, Switzerland): Proceedings*. CHR-Report **II-17**. Lelystad, NL: International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, p. 739–747.
- VOß W. (2004): *Taschenbuch der Statistik*. München und Wien: Carl Hanser.
- 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* **41**:W01017.
- WAGENER T., WHEATER H. S. (2006): Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. *Journal of Hydrology* **320**:132–154.
- WAGENER T., BOYLE D. P., LEES M. J., WHEATER H. S., GUPTA H. V., SOROOSHIAN S. (2001): A framework for development and application of hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences* **5**(1):13–26.

- WALTER C. (2003): *Wasserhaushaltsmodellierung mit BATS und PREVAH im Rietholzbachgebiet und Parameteroptimierung mit der Software PEST*. Diplomarbeit. Zürich: Institut für Klima und Atmosphäre der ETH Zürich.
- WASY [GESELLSCHAFT FÜR WASSERWIRTSCHAFTLICHE PLANUNG UND SYSTEMFORSCHUNG MBH] (1997): *HQ-EX – Wahrscheinlichkeitsanalyse von Jahreshöchstabflüssen*. Version 2.02, September 1997. Berlin: Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH.
- WEBER D., ENGLUND E. (1992): Evaluation and comparison of spatial interpolators. *Mathematical Geology* **24**(4):381–391.
- WEHREN B. (2005): *Entwicklung und Anwendung eines hydrologischen Modells des Spissibaches (Leissigen, Berner Oberland) unter Verwendung des Modellsystems PREVAH*. Diplomarbeit. Publikationen Gewässerkunde **331**. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- WEINGARTNER R. (1992): Niederschlagsmessnetze. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel **2.1**. Bern: Landeshydrologie und -geologie.
- WEINGARTNER R. (1999): *Regionalhydrologische Analysen – Grundlagen und Anwendungen*. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz **37**. Bern: Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie.
- WEINGARTNER R. (2007): Der trockene Winter vor einem Jahr – atypisch für ein warmes Klima. *Neue Zürcher Zeitung*, 31.01.2007:61.
- WEINGARTNER R., ASCHWANDEN H. (1992): Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel **5.2**. Bern: Landeshydrologie und -geologie.
- WEINGARTNER R., REIST T. (2004): Gotthelfs Wassernot im Emmental. Hydrologische Simulation des Extremhochwassers vom 13. August 1837. PFISTER C., SUMMERMATTER S., EDs. *Katastrophen und ihre Bewältigung. Perspektiven und Positionen*. Bern, Stuttgart und Wien: Haupt, p. 21–43.
- WEINGARTNER R., BARBEN M., SPREAFICO M. (2003): Floods in mountain areas – an overview based on examples from Switzerland. *Journal of Hydrology* **282**:10–24.
- WEINGARTNER R., VIVIROLI D., SCHWANBECK J., TRÖSCH J., RÖSER I. (2007): *Hochwasserszenarien für die Sihlseezuflüsse sowie die Einzugsgebiete von Biber und Alp*. Projekt im Auftrag des Amtes für Wasser, Energie und Umwelt des Kt. Zürich (AWEL), Schlussbericht. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- WESTERN A. W., GRAYSON R. B., BLÖSCHL G., WILLGOOSE G. E., McMAHON T. A. (1999): Observed spatial organisation of soil moisture and its relation to terrain indices. *Water Resources Research* **35**(3):797–810.
- WILKS D. S., WILBY R. L. (1999): The weather generation game: a review of stochastic weather models. *Progress in Physical Geography* **23**(3):329–357.
- WILLEMS P. (2001): Stochastic description of the rainfall input errors in lumped hydrological models. *Statistic Environmental Research and Risk Assessment* **15**:132–152.
- WILSON C. B., VALDES J. B., RODRIQUEZ-ITURBE I. (1979): On the influence of the spatial distribution of rainfall on storm runoff. *Water Resources Research* **15**(2):321–328.
- WOOD E. F., SIVAPALAN M., BEVEN K. J. (1990): Similarity and scale in catchment storm response. *Reviews of Geophysics* **28**(1):1–18.
- WSL [EIDGENÖSSISCHE FORSCHUNGSANSTALT FÜR WALD, SCHNEE UND LANDSCHAFT] (1988): *Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Erstaufnahme 1982–86*. Berichte der WSL **305**. Birnensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.
- WÜTHRICH T. (2004): *Räumlich-zeitliche Niederschlagsvariabilität im westlichen Napfgebiet – Fallstudien 2003*. Diplomarbeit. Publikationen Gewässerkunde **315**. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.
- YANG D. Q., ELOMAA E., TUOMINEN A., AALTONEN B., GOODISON B., GUNTHER T., GOLUBEV B., SEVRUK B., MADSEN H., MILKOVIC J. (1999): Wind-induced precipitation undercatch of the Hellman gauges. *Nordic Hydrology* **30**:57–80.
- YOUNG A. R. (2006): Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology* **320**:155–172.

- ZAPPA M. (1999): *Untersuchungen zur Aufbereitung unterschiedlicher Rauminformationen für die flächendiffizierte Einzugsgebietsmodellierung*. Diplomarbeit. Zürich: Geographisches Institut der ETH Zürich.
- ZAPPA M. (2002): *Multiple-Response Verification of a Distributed Hydrological Model at Different Spatial Scales*. Dissertation ETH **14895**. Zürich: Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH 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* **7**(6):903–919.
- 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* **34**(3):179–202.
- ZAUGG M. (2006): *Philosophiewandel im schweizerischen Wasserbau. Zur Vollzugspraxis des nachhaltigen Hochwasserschutzes*. Schriftenreihe Humangeographie **20**. Zürich: Abteilung Humangeographie, Geographisches Institut der Universität Zürich.
- ZHANG Z. Y., KOREN V., SMITH M., REED S., WANG D. (2004): Use of next generation weather radar data and basin disaggregation to improve continuous hydrograph simulations. *Journal of Hydrologic Engineering* **9**(2):103–115.
- ZHIJIA L., WENZHONG G., JINTAO L., KUN Z. (2004): Coupling between weather radar rainfall data and a distributed hydrological model for real-time flood forecasting. *Hydrological Sciences Journal* **49**(6):945–958.

Datenquellen

Abfluss

Von der Landeshydrologie betriebene Stationen

Bundesamt für Umwelt, Bern (Daniel Streit) (BAFU, 2006)

Von den Kantonen betriebene Stationen

- AG Baudepartement, Aarau (Hermann Kunz)
- BE Wasser- und Energiewirtschaftsamt, Bern (Bernhard Schudel, Jean-Claude Bader)
- BL Tiefbauamt Basel-Landschaft, Liestal (Martin Altermatt)
- LU Amt für Umwelt und Energie, Luzern (Philipp Arnold)
- SG Amt für Umweltschutz, St. Gallen (Andreas Gees)
- SO Amt für Umwelt, Solothurn (Willi Danz)
- TG Amt für Umwelt, Frauenfeld (Romeo Favero)
- ZG Amt für Umweltschutz, Zug (Peter Keller)
- ZH Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Zürich (Hans-Rudolf Lang)

Meteorologie

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz), Zürich (METEOSCHWEIZ, 2003)

Physiographie

Bundesamt für Statistik, Neuchâtel, und weitere Dateneigner (BFS, 2003)