

Daniel Viviroli und Rolf Weingartner

# Umfassende hochwasserhydrologische Beurteilung ungemessener mesoskaliger Einzugsgebiete im schweizerischen Rheineinzugsgebiet durch prozessorientierte Modellierung

**Comprehensive flood-hydrological assessment of ungauged catchments in the Swiss part of the River Rhine basin by means of process-oriented modelling**

Zuverlässige Hochwasserabschätzungen für ungemessene Einzugsgebiete sind eine elementare Grundlage für einen modernen Hochwasserschutz. Bei den zur Zeit immer noch weit verbreiteten stochastischen und empirischen Schätzverfahren bestehen jedoch große Unsicherheiten, und neben dem ermittelten Spitzenabfluss sind keine weiteren Informationen verfügbar. Hier setzt die in diesem Artikel vorgestellte Schätzmethode an, welche auf die kontinuierliche Simulation von Abflussganglinien mit dem hydrologischen Modellsystem PREVAH aufbaut. Die so erhaltenen simulierten Abflussganglinien können mit konventioneller Extremwertstatistik ausgewertet werden und erlauben zudem eine umfassende hochwasserhydrologische Beurteilung, welche eine Einordnung der erhaltenen Schätzwerte ermöglicht. Es werden Resultate der Modellierung von 450 mesoskaligen und zumeist ungemessenen Einzugsgebieten des schweizerischen Rheineinzugsgebietes vorgestellt, was eine der räumlich bisher umfassendsten Anwendungen dieser Methodik darstellt. Die Resultate belegen, dass der neue Ansatz gute Ergebnisse liefert und die Palette der bestehenden Schätzverfahren wesentlich erweitern kann, wobei sich durch die Prozessorientierung interessante Möglichkeiten für Anwendungen eröffnen, etwa im Bereich von Klima- und Landnutzungsänderung oder für Worst-Case-Studien.

**Schlagwörter:** Hochwasserabschätzung, hydrologisches Modellsystem, kontinuierliche Langzeitsimulation, mesoskalige Einzugsgebiete, Schweiz

Reliable estimates of floods in ungauged catchments are indispensable prerequisites for modern flood protection. The stochastic and empiric estimation methods used today, however, exhibit considerable uncertainties and provide only peak-flow estimates. We introduce a procedure that aims at improving flood estimation through continuous simulations of long-term hydrographs with the hydrological modelling system PREVAH. The resulting simulated hydrographs are available for flood estimation by means of conventional extreme-value statistics and, moreover, they provide a basis for the comprehensive plausibility assessment of the results. We present results from 450 meso-scale and mostly ungauged catchments in the Swiss part of the River Rhine catchment. This is one of the first comprehensive applications of the continuous simulation approach at hourly time step. We show that the procedure achieves good results and is suitable for extending considerably the variability of the current estimation procedures. Thanks to the process orientation of the modelling system, additional promising applications become feasible, such as studies in climate and land-use changes or worst-case studies.

**Keywords:** Continuous long-term simulation, flood estimation, hydrological modelling system, meso-scale catchments, Switzerland

## 1 Einleitung

Hochwasser und Überschwemmungen haben bedeutende Auswirkungen auf Mensch und Gesellschaft: In der Schweiz entstanden in den Jahren 1972–2007 durch diese Prozesse Schäden von 13 Milliarden Franken; 46 Menschen kamen ums Leben (HILKER et al. 2008). Ein absoluter Schutz vor Hochwassergefahren ist aus ökonomischer Sicht nicht möglich und aus ökologischen Gründen nicht wünschenswert, und umso mehr wird zunehmend auf raumplanerische Maßnahmen, Differenzierung der Schutzziele und Begrenzung des verbleibenden Risikos gesetzt. Diese Strategie setzt hohe Ansprüche an die Bemessungsgrundlagen, denn sie verlangt nach zuverlässigen Abschätzungen von Hochwasserabflüssen unterschiedlicher Wiederkehrperiode auch an Stellen ohne Abflussbeobachtungen.

Wegen ihrer einfachen praktischen Durchführbarkeit kamen bisher vor allem Verfahren der Extremwertanalyse (gemessene Gebiete) und der regionalhydrologischen Analyse (ungemessene Gebiete) zum Einsatz (vgl. WEINGARTNER et al. 2003). Was die regionalhydrologischen Verfahren betrifft, stehen in der Schweiz

heute bereits breit abgestützte und für die Praxis relevante Ansätze zur Verfügung (BARBEN et al. 2001), welche im Programmpaket HQx\_meso\_CH (BARBEN 2003) zusammengefasst und über eine sogenannte Praxishilfe (SPREAFICO et al. 2003) gut zugänglich sind. Gemeinsam ist allen bisherigen Verfahren die alleinige Ausrichtung auf den Spitzenabfluss. Weitere wichtige Hochwasserkenngößen wie das Durchflussvolumen und die Anstiegszeit bleiben unberücksichtigt. Um zu umfassenderen Bemessungsgrundlagen zu gelangen, sind Ansätze mit stärkerer Prozessorientierung gefragt. Solche Ansätze liefern zudem Informationen, die weit über den Hochwasserbereich hinausgehen.

Im Folgenden werden die Resultate eines neuen Verfahrens vorgestellt, welches genau hier ansetzt. Es wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) am Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB) entwickelt. Das Verfahren basiert auf einem konzeptuellen, prozessorientierten deterministischen hydrologischen Modellsystem, mit dem langjährige kontinuierliche Abflussganglinien simuliert und anschließend aus Sicht der Hochwasser ausgewertet werden können. Das Modellsystem wurde auf mesoskalige Einzugsgebiete im schweizerischen Teil des Rhein-

Einzugsgebietes angewendet, welche in der Mehrheit der Fälle über keine Abflussmessungen verfügen. Die methodische Herausforderung lag deshalb insbesondere in der Schätzung der freien Modellparameter mittels Regionalisierung und einer umfassenden Gütebeurteilung der entsprechenden Resultate.

Die in diesem Artikel verwendete Methodik der kontinuierlichen Langzeitsimulation zur Hochwasserabschätzung wurde bereits in den 1970er Jahren beschrieben (z.B. EAGLESON 1972, FLEMING & FRANZ 1971), detaillierte Studien mit einer genaueren Beurteilung der Resultate konnten aber erst in den 1990er Jahren durchgeführt werden, als wesentliche Fortschritte bei Rechenkapazität und Datenverfügbarkeit erzielt wurden (z.B. BLAZKOVA & BEVEN 1997, 2002 und 2004; CAMERON et al. 1999, 2000A, 2000B; EBERLE et al. 2002, EBNER VON ESCHENBACH et al. 2008, KAY et al. 2006A und 2006B; MORETTI & MONTANARI 2008, ONOF et al. 1996, STEEL et al. 1999). Der Zeitschritt der genannten Studien ist wegen der Fokussierung auf Hochwasser wie auch in der vorliegenden Studie auf eine Stunde festgelegt, da die Spitzenwerte bei einer gröberen Zeitrasterung zu stark abgeflacht würden. Räumlich umfassende Arbeiten mit Berücksichtigung ungemessener Gebiete finden sich bisher lediglich in Großbritannien (allem voran CALVER et al. 2005; s. auch LAMB 1999 sowie LAMB & KAY 2004), die meisten der weiteren oben genannten Arbeiten beziehen sich zumeist nur auf eines oder einige wenige Einzugsgebiete. Die im vorliegenden Artikel präsentierte Anwendung geht insofern über die bisherigen Studien hinaus, als sie umfassende Resultate und Auswertungen der Langzeitsimulation für eine große Zahl von Einzugsgebieten bereitstellt und diese vergleichend in einem regionalen Kontext bewertet.

Im Folgenden wird die Methodik erläutert (Kapitel 2), worauf hin die hydrologische Plausibilität der Modellierungsergebnisse diskutiert wird (Kapitel 3). Auf Basis dieser Modellierungen können die Ergebnisse für die Hochwasserabschätzung untersucht werden (Kapitel 4), um dann eine Übersicht über die für alle behandelten Einzugsgebiete verfügbaren Ergebnisse zu geben (Kapitel 5). Eine Zusammenfassung mit Ausblick bildet den Abschluss (Kapitel 6).

## 2 Methodik

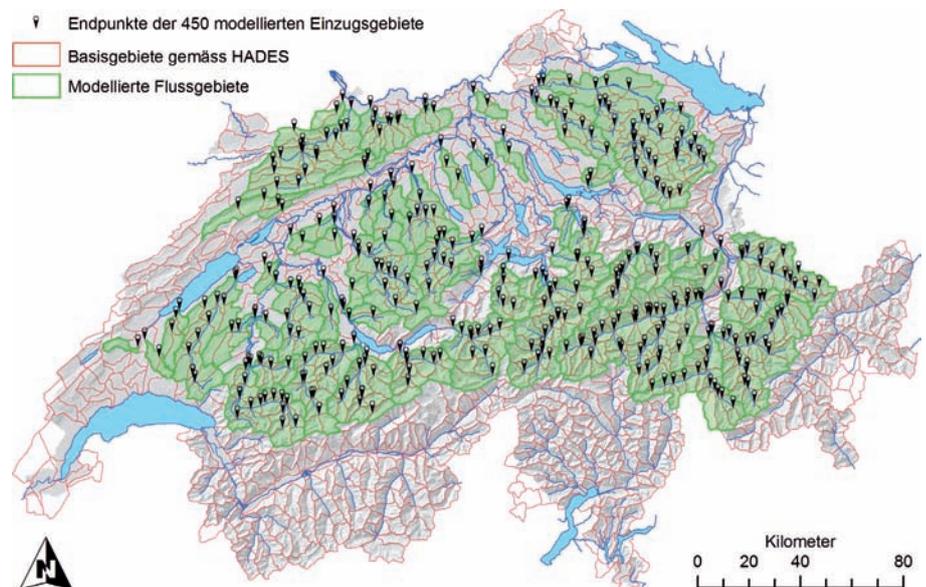
### 2.1 Kontinuierliche Langzeitsimulation und Hochwasserbeurteilung

Die in diesem Artikel angestrebte umfassende Hochwasserbeurteilung für ungemessene Einzugsgebiete basiert auf dem Ansatz der kontinuierlichen Langzeitsimulation. Dabei wird mit einem hydrologischen Modellsystem eine lückenlose Simulation über eine längere Dauer – im vorliegenden Fall über mindestens 20 Jahre und in stündlicher Auflösung – durchgeführt. Die simulierten langen Abflussreihen können anschließend unter anderem mit konventioneller Extremwertstatistik ausgewertet und für eine Hochwasserabschätzung verwendet werden.

Gegenüber den heute weit verbreiteten stochastischen Schätzverfahren besitzt das Vorgehen eine Reihe von Vorteilen:

- Die problematische Verknüpfung von Extremniederschlägen mit Extremabflüssen gleicher Jährlichkeit ist nicht nötig. Intensität und Menge der Niederschläge werden im Modell über die gesamte Simulationsdauer hinweg sowohl hydrologisch wie auch meteorologisch sinnvoll berücksichtigt.
- Die heikle Festlegung von Abflussbeiwerten zur Bestimmung des abflusswirksamen Niederschlags erübrigt sich, da die Abflussbildung durch das Modell simuliert wird (im vorliegenden Fall konzeptuell).
- Die Randbedingungen der individuellen Hochwasserereignisse (Vorfeuchte, Verlauf der Niederschlagsintensität) müssen nicht geschätzt werden, weil sie sich in der Simulation aus dem ebenfalls durchgehend vorliegenden meteorologischen Modellinput ergeben.
- Es resultiert nicht bloß ein geschätzter Spitzenabflusswert, sondern eine komplette Abflussganglinie des untersuchten Gebietes. Dadurch können weitere relevante Hochwasserkennwerte erhoben werden wie etwa die Volumina des Direktabflusses (vgl. VIVIROLI 2007) oder die Überschreitungsdauer von Schwellenwerten.
- Im Gegensatz zu anderen Verfahren, welche auf eine bestimmte Jährlichkeit beschränkt sind, ergeben sich bei der Wahl der Wiederkehrperiode dieselben Möglichkeiten – und auch Grenzen – wie bei der Auswertung gemessener Abflussreihen (DVWK 1999).

Nachteilig für die Anwendung in der Praxis ist vor allem der große Aufwand, welcher eine kontinuierliche Simulation normalerweise mit sich bringt, insbesondere was die Beschaffung und Aufbereitung der benötigten Daten betrifft. Zudem sind hydrologische Modelle oft nicht benutzerfreundlich und erfordern vom Anwender in jedem Fall vertiefte Kenntnisse von Modellstruktur und Prozessabbildung. Des Weiteren müssen im Normalfall Abflussmessungen zur Verfügung stehen, anhand wel-



**Abbildung 1**  
Übersichtskarte der 450 mit PREVAH modellierten Einzugsgebiete  
*Overview of the 450 catchments modelled with PREVAH*

cher die freien Parameter des hydrologischen Modells kalibriert werden können. Ist dies nicht der Fall, müssen diese Parameter über eine sogenannte Regionalisierung geschätzt werden. Aus diesen Gründen wurden hydrologische Modellsysteme bisher praktisch nur für Forschungszwecke eingesetzt.

Die oben genannten Probleme für die Praxis werden umgangen, indem umfassende Modellierungen für den Großteil der nordalpinen Einzugsgebiete der Schweiz vorgenommen werden (s. Abb. 1) und dem Anwender unmittelbar die entsprechenden Resultate zur Verfügung gestellt werden. Somit entfallen die technisch und zeitlich sehr aufwändigen Vorarbeiten.

## 2.2 Das hydrologische Modellsystem

Für die Simulationen wurde das hydrologische Modellsystem PREVAH (Precipitation-Runoff-EVApotranspiration Hydrotope Model) (VIVIROLI et al. 2007 und 2009a) verwendet, welches eine Weiterentwicklung des weitverbreiteten HBV-Modells (BERGSTRÖM 1976) ist. PREVAH basiert auf einer Kaskade linearer Einzelspeicher und besitzt spezifische Module für Schnee, Gletscher, Interzeption, Bodenfeuchte und Verdunstung, Abflussbildung sowie Abflusskonzentration. Für die Verwendung von PREVAH im vorliegenden Fall sprechen vor allem die umfangreichen Erfahrungen, welche in alpinen und voralpinen Gebieten der Schweiz gesammelt wurden (für einen Überblick s. VIVIROLI et al. 2009a).

In der hier verwendeten Version besitzt PREVAH zwölf freie Modellparameter, zwei weitere kommen für vergletscherte Gebiete hinzu; alle freien Modellparameter beziehen sich auf das gesamte modellierte Gebiet. Zur Kalibrierung dieser freien Parameter werden im Normalfall Abflussmessreihen benötigt. Weitere räumlich invariante, aber monatlich differenzierte Gebietsparameter werden bei der Gebietsaufbereitung durch ein Dienstprogramm des Modellsystems PREVAH auf Grundlage des Digitalen Höhenmodells (DHM) sowie weiterer digitaler Karten (u.a. Landnutzung und Bodeneigenschaften) a priori festgelegt (VIVIROLI et al. 2007, VIVIROLI et al. 2009a). Das Modellsystem wird im vorliegenden Anwendungsrahmen mit einer Rasterweite von 500 m × 500 m betrieben, wobei hydrologisch ähnliche Rasterzellen zu sogenannten Hydrotopen zusammengefasst werden. Als Basis für den Modellantrieb dienen stündlich gemessene Werte für Niederschlag, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Dampfdruck, Globalstrahlung sowie relative Sonnenscheindauer aus dem Messnetz der MeteoSchweiz, welche mit einem höhenabhängigen inversen Distanzgewichtungsverfahren interpoliert werden (s. VIVIROLI et al. 2007; für Details zum hier verwendeten Messnetz s. VIVIROLI & WEINGARTNER 2011). Als Ausgabe liefert PREVAH Werte für sämtliche berücksichtigten Wasserhaushaltsgrößen im Stundenschritt und zwar sowohl als summarische Werte am Gebietsauslass wie auch in der hier gewählten Basisauflösung von 0,25 km<sup>2</sup>.

## 2.3 Parameterschätzung für ungemessene Gebiete (Regionalisierung)

Wie oben erwähnt besitzt PREVAH 12 bis 14 freie Modellparameter, welche üblicherweise an Messreihen des Abflusses kalibriert werden. Dies wurde als erster Schritt auch für die Entwicklung der vorliegenden Anwendung gemacht, und zwar in insgesamt 140 mesoskaligen Einzugsgebieten der Alpennordseite. Zu diesem Zweck wurde ein halb automatisches Kalibrierungsverfahren in PREVAH eingebaut, mit welchem in einem ersten Schritt

ein für normale Abflussverhältnisse geeigneter Parametersatz erstellt wurde (Mittelwasserparametersatz). In einem zweiten Schritt wurden hochwassersensitive Gütemaße verwendet, um diesen Mittelwasserparametersatz im Bereich der Spitzenabflüsse noch weiter zu verbessern und einen Hochwasserparametersatz zu erhalten (VIVIROLI et al. 2009B).

Für die Anwendung in ungemessenen Gebieten müssen die freien Modellparameter mittels Regionalisierung geschätzt werden. Die Resultate der vorgängig durchgeführten Kalibrierungen dienen dabei als Datengrundlage. Ergänzt werden diese Informationen durch insgesamt 80 Gebietsattribute zu Physiographie, Landnutzung, Bodeneigenschaften, Geologie, Hydrogeologie und Klima der Gebiete. Diese Gebietsattribute liegen flächendeckend – also insbesondere auch für die ungemessenen Gebiete – vor und dienen als Grundlage zur Schätzung der freien Modellparameter.

Konkret geschieht die Regionalisierung über die Kombination von drei Verfahren:

- In einem ersten Verfahren werden jene fünf gemessenen und kalibrierten Einzugsgebiete gesucht, welche dem Zielgebiet am ähnlichsten sind. Die Modellparameter dieser Spendergebiete werden dann jeweils als ganzer Satz unverändert auf das Zielgebiet übertragen, und mit jedem Parametersatz wird anschließend eine Abflusssimulation durchgeführt. Der Median dieser fünf Simulationen bildet eine erste regionalisierte Ganglinie (Nearest-Neighbour-Verfahren).
- In einem zweiten Verfahren werden die Modellparameter mittels Ordinary Kriging im Raum interpoliert, wobei die Gebietsschwerpunkte jeweils als Stützstellen dienen. Für ein unbekanntes Gebiet können die freien Modellparameter dann direkt aus den resultierenden Parameterkarten herausgelesen und für eine Simulation benutzt werden (Kriging-Verfahren).
- Schließlich werden in einem dritten Verfahren die Regressionsbeziehungen zwischen flächendeckend verfügbaren Gebietsattributen und den Modellparametern hergeleitet. Diese Regressionsbeziehungen werden in den kalibrierten Einzugsgebieten geeicht; die resultierenden Parametersätze werden ebenfalls für eine Simulation verwendet (Regressionsverfahren).

Die drei obengenannten Verfahren werden kombiniert, indem für jeden Zeitschritt der mediane Abfluss der drei simulierten Ganglinien ermittelt wird. Die Güte dieses Regionalisierungsansatzes wurde von VIVIROLI (2007) und VIVIROLI et al. (2009C) in 49 repräsentativen Testgebieten mit langjährigen Messreihen untersucht, wobei sowohl die hydrologische Plausibilität wie auch die gute Wiedergabe von Spitzenabflüssen belegt wurde. Mit der vorliegenden Studie wird nun der Stichprobenumfang wesentlich erweitert, was eine vertiefte räumliche Plausibilisierung der Ergebnisse ermöglicht. So können nun die aus der Modellierung abgeleiteten hydrologischen Kenngrößen innerhalb größerer Flussgebiete direkt miteinander verglichen und beurteilt werden.

## 2.4 Definition der untersuchten Einzugsgebiete

Als Grundlage für die Abgrenzung der zu untersuchenden Einzugsgebiete dienen die im Hydrologischen Atlas der Schweiz

(HADES) definierten Basisgebiete (BREINLINGER et al. 1992), welche die Schweiz in 1.050 Einzugsgebiete mit Flächen zwischen ca. 30 bis 50 km<sup>2</sup> unterteilen. Bei der Definition dieser Einzugsgebiete wird jeweils mit dem Basisgebiet an der obersten Wasserscheide begonnen (Kopfeinzugsgebiet) und dann entlang des Flussverlaufs fortgefahren, wobei die folgenden Einzugsgebiete jeweils inklusive aller oberliegenden Basisgebiete definiert werden. Die Einzugsgebiete sind somit immer hydrologisch vollständig und umfassen stets die gesamte Fläche von der Wasserscheide bis zum gedachten Pegelpunkt.

In den inneralpinen und südalpinen Regionen stehen nur wenige Einzugsgebiete mit unbeeinflussten Messreihen zur Verfügung, womit eine Regionalisierung in diesen Regionen schwierig ist. Deshalb steht hier das Rhein-Einzugsgebiet im Mittelpunkt; entsprechende Arbeiten für die inneralpinen und südalpinen Regionen sind aber im Gange (KÖPLIN et al. 2010).

Aus methodischen Gründen wurden Gebiete mit einer Gesamtfläche von deutlich mehr als 2.000 km<sup>2</sup> nicht berücksichtigt – ab dieser Gebietsgröße müssten die einzelnen Teileinzugsgebiete mit PREVAH individuell modelliert und dann über ein Routing zusammengeführt werden, was zusätzliche Unsicherheit in die Regionalisierung einführen würde. Da für Gebiete dieser Größe mit größerer Wahrscheinlichkeit lange Messreihen vorliegen, ist dies keine einschneidende Einschränkung. Ebenfalls nicht berücksichtigt werden Gebiete unterhalb größerer Seen, da hier noch ein Seemodell in das hydrologische Modellsystem eingebaut werden müsste, welches zusätzlich zu regionalisierende Parameter erfordern würde.

Abbildung 1 zeigt, welche Einzugsgebiete durch dieses Auswahlverfahren abgedeckt sind und für die Modellierung und Hochwasserabschätzung mit PREVAH berücksichtigt werden konnten. Das modellierte Gebiet deckt 17.325 km<sup>2</sup> ab, was ungefähr zwei Dritteln der Fläche des schweizerischen Rhein-Einzugsgebietes entspricht. Insgesamt wurden damit 450 Einzugsgebiete berücksichtigt. Gemäß Definition von BREINLINGER et al. (1992) können diese 450 Einzugsgebiete auch in 122 übergeordnete Bilanzierungsgebiete zusammengefasst werden, für welche ausführlichere Angaben zum Wasserhaushalt verfügbar sind und damit eine Validierung möglich ist.

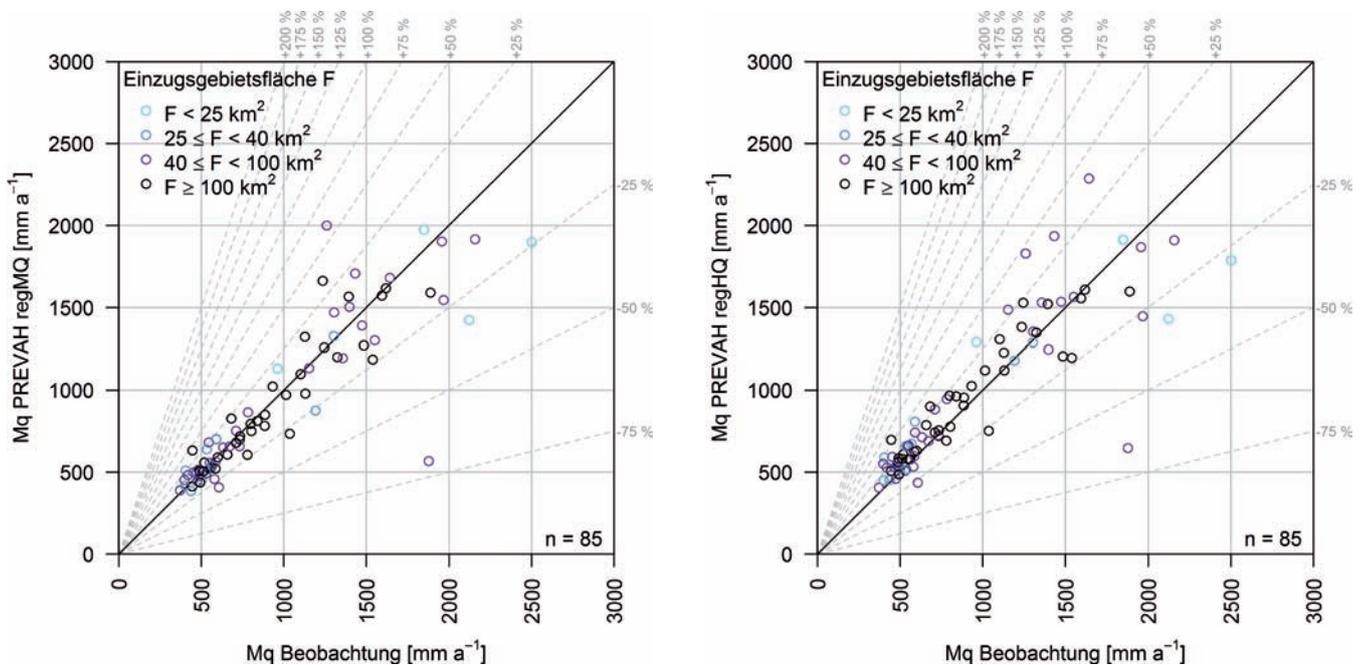
### 3 Beurteilung der hydrologischen Modellierung

#### 3.1 Beurteilung der Gesamtplausibilität

Durch die Analyse der mittleren Jahresabflüsse und des Gütemaßes nach NASH & SUTCLIFFE (1970) wird im Folgenden die Gesamtplausibilität der hydrologischen Modellierung überprüft. Bei den mittleren Jahresabflüssen werden dazu einerseits Beobachtungsdaten und andererseits wasserhaushaltlich plausibilisierte Abflusswerte verwendet.

##### 3.1.1 Vergleich mit beobachteten mittleren Jahresabflüssen

Die erste Betrachtung zur Gesamtplausibilität gilt der Abweichung des mit regionalisierten Modellparametern simulierten mittleren Jahresabflusses 1984–2003 von der Beobachtung (Abb. 2). Dieser Vergleich kann für diejenigen 85 der 450 modellierten Einzugsgebiete vorgenommen werden, welche über Abflussmessungen verfügen. Die untersuchten Gebiete werden dabei jeweils als unbeobachtet und unkalibriert betrachtet, und es fließen keinerlei Informationen aus der Kalibrierung



**Abbildung 2**  
 Vergleich der mit PREVAH simulierten mittleren Jahresabflusshöhe 1984–2003 mit den entsprechenden Werten aus der Beobachtung. Links: Mittelwasser-variante, regMQ ( $r_{xy} = 0,89$ ); rechts: Hochwasservariante, regHQ ( $r_{xy} = 0,87$ ). Die Punktfarbe bezeichnet die Einzugsgebietsgrößenkategorie. Datengrundlage: 85 Einzugsgebiete mit Abflussmessungen.  
 Comparison of the mean annual runoff 1984–2003 as modelled with PREVAH with corresponding values from observations. Left: standard parameter set, regMQ ( $r_{xy} = 0,89$ ); right: flood-specific parameter set, regHQ ( $r_{xy} = 0,87$ ). The colour of the points denotes the category of drainage area. Based on data from 85 catchments with discharge measurement series.

in die Regionalisierung ein (Jackknife-Prinzip). Die jeweils größten Unterschätzungen des mittleren Jahresabflusses treten in Gebieten mit einer Einzugsgebietsfläche von weniger als 25 km<sup>2</sup> auf (hellblaue Signatur); die Streuung der Abweichungen ist – in absoluten Werten betrachtet – bei größeren Abflussmengen etwas größer. Die Differenzen bewegen sich aber in einem vertretbaren Rahmen, mit medianen Werten von -15 mm a<sup>-1</sup> (-2 %) für die auf der Mittelwasser- und +49 mm a<sup>-1</sup> (+ 7%) für die auf der Hochwasserkalibrierung basierenden Parameterschätzung. Dies entspricht der von VIVIROLI (2007) erreichten Güte der Regionalisierungsresultate in 49 repräsentativen Testgebieten mit langjährigen Messreihen. Es sollte beachtet werden, dass die hier betrachteten 85 Einzugsgebiete im Gegensatz zum Testdatensatz von VIVIROLI (2007) keine repräsentative Auswahl darstellen; vielmehr handelt es sich um alle Gebiete, welche aufgrund der Datenlage überhaupt für eine Betrachtung in Frage kommen.

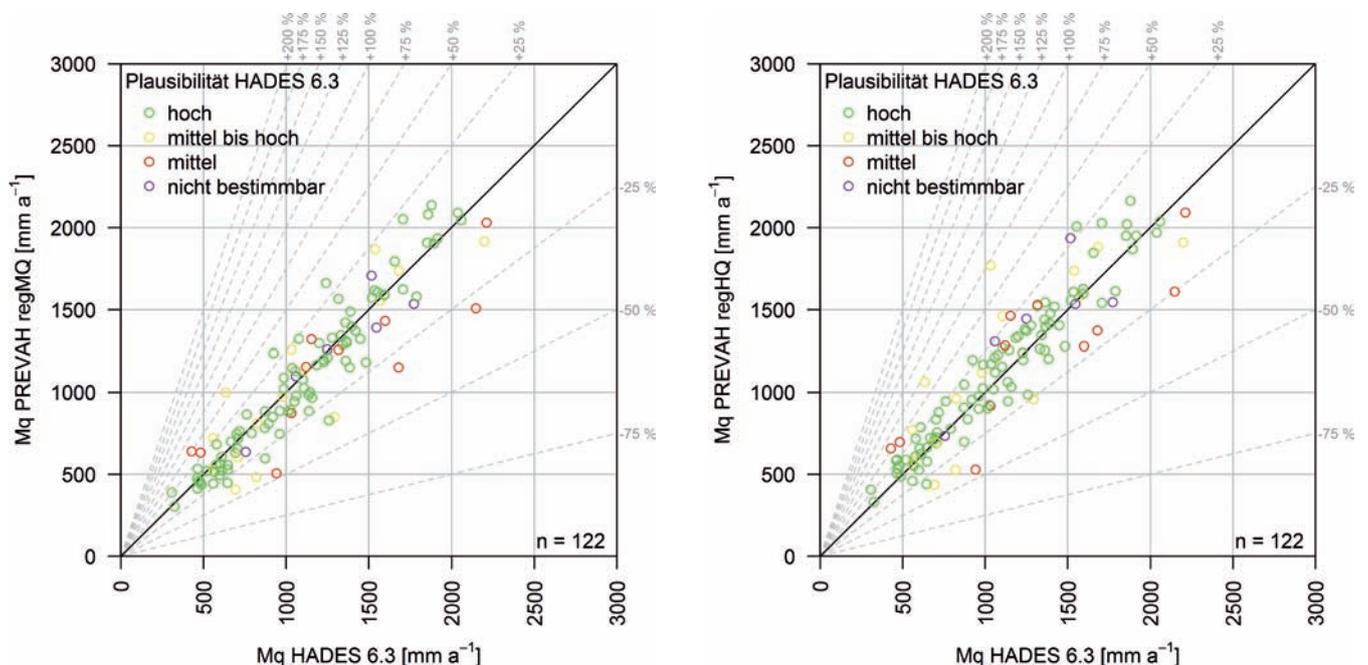
**3.1.2 Vergleich mit langjährigen Wasserhaushaltswerten**

Die zweite Betrachtung zur Gesamtplausibilität (Abb. 3) stellt die mittleren Jahresabflüsse 1984–2003 gemäß Simulation mit regionalisierten Modellparametern den wasserhaushaltlich plausibilisierten Abflusswerten der Periode 1961–1990 von SCHÄDLER & WEINGARTNER (2002) gegenüber. Dieser Vergleich ist für diejenigen 122 Einzugsgebiete möglich, welche sich mit den Bilanzierungsgebieten gemäß BREINLINGER et al. (1992) decken. Dies erlaubt einen repräsentativen Überblick über die vorgenommenen Simulationen. Größere Unterschiede sind zu relativieren,

wenn sie in Gebieten auftreten, für welche SCHÄDLER & WEINGARTNER (2002) ihren Werten eine eingeschränkte oder nicht bestimmbare Plausibilität zuweisen. Die im vorangehenden Kapitel 3.1.1 verzeichnete Güte kann bestätigt werden; die medianen Unterschiede betragen -26 mm a<sup>-1</sup> (-3 %) für die Mittelwasservariante (regMQ) und +36 mm a<sup>-1</sup> (+4 %) für die Hochwasservariante (regHQ) der Regionalisierung.

**3.1.3 Gütemaß nach NASH & SUTCLIFFE**

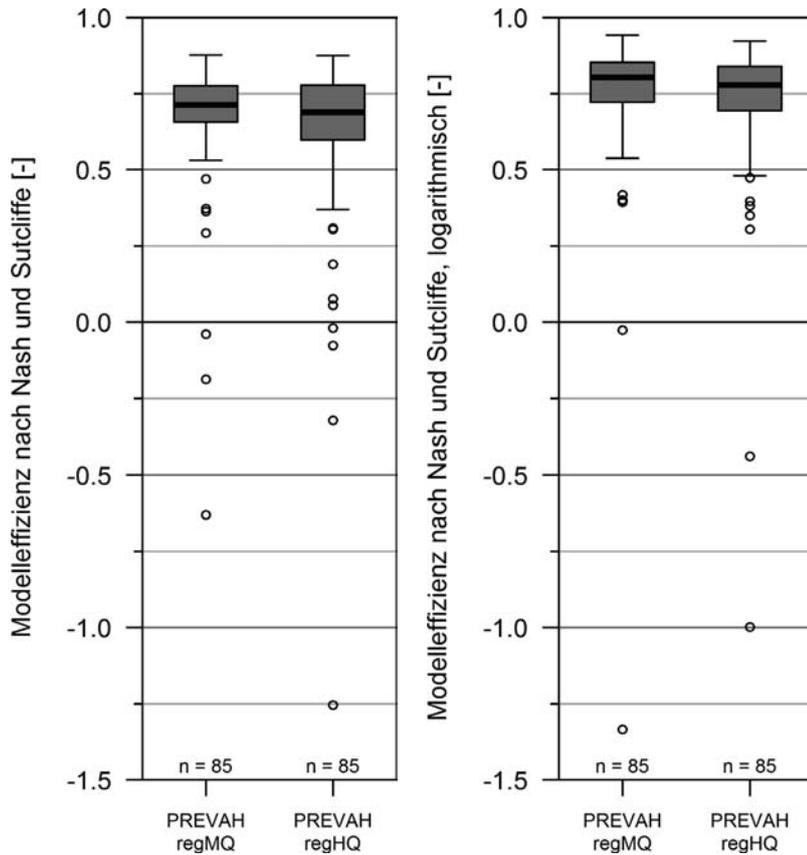
Vor dem Hintergrund der nun gut abgesicherten Plausibilität der mittleren Jahresabflüsse können die simulierten Ganglinien mit Hilfe der Modelleffizienz nach NASH & SUTCLIFFE (1970) (NSE) beurteilt werden. NSE weist einen Wertebereich von -∞ bis +1 auf, mit einer maximalen Güte bei NSE = 1. Eine Beurteilung ist wiederum für 85 der 450 bearbeiteten Einzugsgebiete möglich, für welche Beobachtungsdaten vorliegen (Abb. 4). Die medianen NSE betragen 0,71 für die Mittelwasservariante und 0,70 für die Hochwasservariante, was ungefähr den Resultaten der 49 repräsentativen Testgebiete von VIVIROLI (2007) entspricht (vgl. Kapitel 2.3). Die Anwendung von NSE auf logarithmierte Abflusswerte bestätigt mit medianen Werten von 0,82 (Mittelwasservariante) und 0,78 (Hochwasservariante) die Güte des Modells im Bereich mittlerer und tiefer Abflüsse. Die Ausreißer mit sehr tiefen NSE-Werten betreffen mehrheitlich Gebiete, welche bereits bei der Kalibrierung aufgefallen sind, etwa wegen großflächigem Karstvorkommen, Ausuferungen bei Hochwassern oder stellenweise unplausiblen Messwerten.



**Abbildung 3**

Vergleich der mit PREVAH simulierten mittleren Jahresabflusshöhe 1984–2003 mit Referenzwerten 1960–1991 gemäß SCHÄDLER & WEINGARTNER (2002) (HADES-Tafel 6.3). Links: Mittelwasservariante, regMQ ( $r_{xy} = 0,93$ ); rechts: Hochwasservariante, regHQ ( $r_{xy} = 0,92$ ). Die von den Autoren angegebene Plausibilität der Referenzwerte ist durch die Punktfarbe gekennzeichnet. Datengrundlage: 122 Einzugsgebiete, für welche SCHÄDLER & WEINGARTNER (2002) Werte des Wasserhaushalts angeben.

Comparison of the mean annual runoff 1984–2003 as modelled with PREVAH with corresponding reference values 1960–1991 from SCHÄDLER & WEINGARTNER (2002) (HADES Plate 6.3). Left: standard parameter set, regMQ ( $r_{xy} = 0,93$ ); right: flood-specific parameter set, regHQ ( $r_{xy} = 0,92$ ). The colour of the points denotes the category of plausibility indicated for the reference values by the authors. Based on data from 122 catchments for which SCHÄDLER & WEINGARTNER (2002) provide water-balance data.



**Abbildung 4**  
 Nash-Sutcliffe-Effizienzen (links: aus unveränderten Abflusswerten berechnet; rechts: aus logarithmierten Abflusswerten berechnet) der stündlich simulierten Abflüsse 1984–2003, jeweils für die 85 beurteilbaren Einzugsgebiete. Die Modellparameter wurden mittels Regionalisierung geschätzt (regMQ: Mittelwasservariante; regHQ: Hochwasservariante).  
*Nash-Sutcliffe-Efficiencies (left: calculated from unchanged discharge values; right: calculated from logarithmic discharge values) of discharge values 1984–2003 simulated in hourly resolution, each for the 85 catchments with observations. The model parameters were estimated from regionalisation (regMQ: standard parameter set; regHQ: flood-specific parameter set).*

Die obige Zusammenstellung belegt, dass die hydrologische Plausibilität für die vorgenommene Parameterregionalisierung gegeben ist, das Modell die Gebietshydrologie also sinnvoll wiedergibt. Dies ist mitunter eine der wichtigsten Voraussetzungen für die im Folgenden genauer betrachteten Hochwasserabschätzungen.

### 3.2 Hochwasserhydrologische Beurteilung

Zur Beurteilung der modellierten Hochwasserkennwerte werden sowohl Beobachtungen, extremwertstatistische Auswertungen als auch die Ergebnisse anderer (einfacherer) Modelle berücksichtigt. Tabelle 1 vermittelt eine Übersicht zu den im

Folgenden vorgenommenen Analysen und zeigt den jeweils zugrunde liegenden Stichprobenumfang.

#### 3.2.1 Beurteilung anhand beobachteter Daten

Bei der folgenden Betrachtung beziehen sich alle Werte – sowohl für die Simulation wie auch für die Beobachtung – auf die Jahresspitzenabflüsse der Periode 1984–2003, wobei nur diejenigen simulierten Einzugsgebiete berücksichtigt werden, für welche in der gesamten Periode Abflussbeobachtungen (20 Jahre) zur Verfügung stehen. Damit verringert sich die Zahl der bewertbaren Gebiete von 85 auf 61. Vorzuschicken gilt, dass das 100-jährliche Hochwasser ( $HQ_{100}$ ) sowohl für Beobachtung wie auch Simulation aus den 20 Jahresspitzenabflusswerten 1984–2003 extrapoliert wurde. Um die Vergleichbarkeit der Werte zu gewährleisten, wurde stets die Extremwertverteilung Typ 1 (E1) als Grundlage verwendet, und die Schätzung der Verteilungsparameter erfolgte jeweils mit den Wahrscheinlichkeitsgewichteten Momenten (WGM). Wohlgermerkt können andere Kombinationen von Verteilungsfunktionen und Schätzmethode je nach Fall besser angepasste Kurven liefern (s. z.B. DVWK 1999), allerdings wären dann die Schätzergebnisse nicht mehr direkt miteinander vergleichbar. VIVIROLI (2007) konnte aufzeigen, dass das  $HQ_{100}$  für eine Fehlerbewertung geeignet ist, obwohl es außerhalb des gemäß DVWK (1999) zulässigen Extrapolationsbereichs von  $3 \times n$  Jahren liegt, welcher im vorliegenden Fall 60 Jahre umfassen würde. Eine wichtige Begründung für die Betrachtung des  $HQ_{100}$  ist, dass die Resultate mit den Ergebnissen anderer Verfahren vergleichbar sind (s. folgende Kapitel 3.2.2 und 3.2.3).

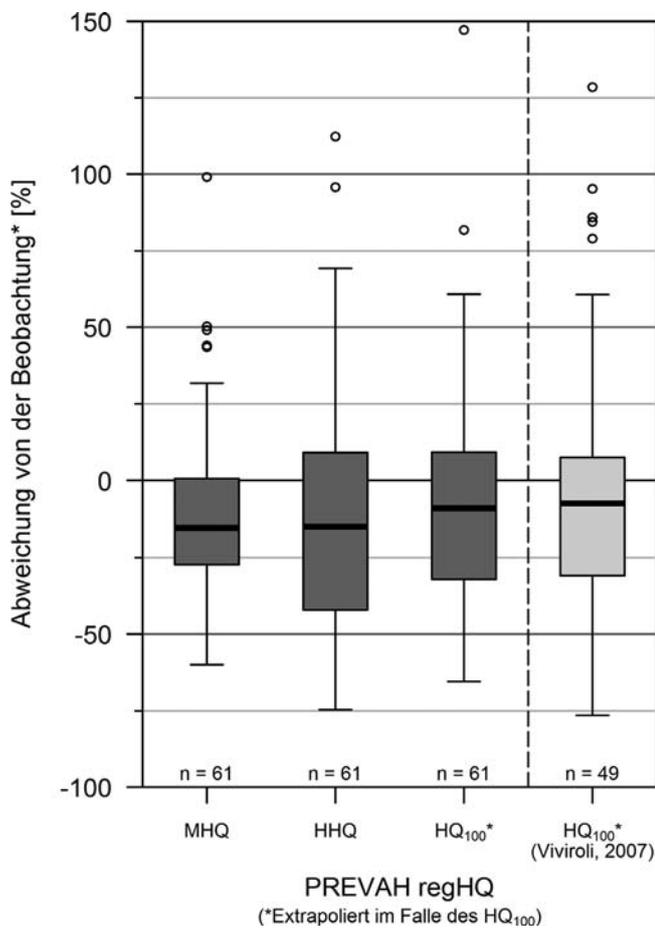
Auf Basis der oben erläuterten Abschätzung zeigt Abbildung 5 die Abweichungen der Simulation von

der Beobachtung. Die prozentualen Fehler für das mittlere jährliche Hochwasser (MHQ), das höchste aufgetretene Hochwasser (HHQ) und das extrapolierte 100-jährliche Hochwasser ( $HQ_{100}$ ) zeigen dabei ein sehr ähnliches Muster, wobei der mediane Fehler für das  $HQ_{100}$  – die Zielgröße, auf welche hin das Simulationsverfahren im Endeffekt entwickelt wurde – mit -9 % am geringsten ausfällt. Es gilt dabei natürlich zu beachten, dass auch Abflussmesswerte fehlerbehaftet sind: Bei Hochwasserabflüssen ist mit Fehlern in der Größenordnung von mindestens 10 bis 20 % zu rechnen, bei seltenen Hochwasserabflüssen fällt die Messunsicherheit noch wesentlich größer aus (BWG 2002A, MCMILLAN

<b>Tabelle 1</b> Übersicht zu den Analysen der hochwasserhydrologischen Beurteilung (n: Anzahl beurteilter Gebiete) <i>Overview of the analyses performed for the flood hydrological assessment (n: number of catchments assessed).</i>						
Referenzwert	Betrachtete Größe				n	Kapitel
	MHQ	HHQ	$HQ_{100}$	$Q_{max}$		
Beobachtete Werte	√	√			61	3.2.1
Extremwertstatistik aus beob. Werten			√		61	3.2.1
Modellierte Werte: $HQx\_meso\_CH$			√		442	3.2.2
Modellierte Werte: GIUB'96(FN)			√	√	450	3.2.3

et al. 2010). Eine umfassende und zuverlässige Quantifizierung dieser Messfehler gestaltet sich allerdings schwierig und wurde deshalb in der vorliegenden Studie nicht in Betracht gezogen.

Eine für die praktische Anwendung wichtige Angabe ist die Anzahl der Treffer und knappen Fehlschätzungen, welche aus der Modellanwendung in den 61 betrachteten Gebieten resultieren. Dabei liegt das aus der Simulation geschätzte  $HQ_{100}$  in 48 % der Fälle innerhalb des statistischen 90 %-Vertrauensintervalls des  $HQ_{100}$ , welches aus der Beobachtung geschätzt wurde (Treffer). In weiteren 10 % der Fälle überschneiden sich zumindest die Vertrauensintervalle von Simulation und Beobachtung (knappe Fehlschätzung).



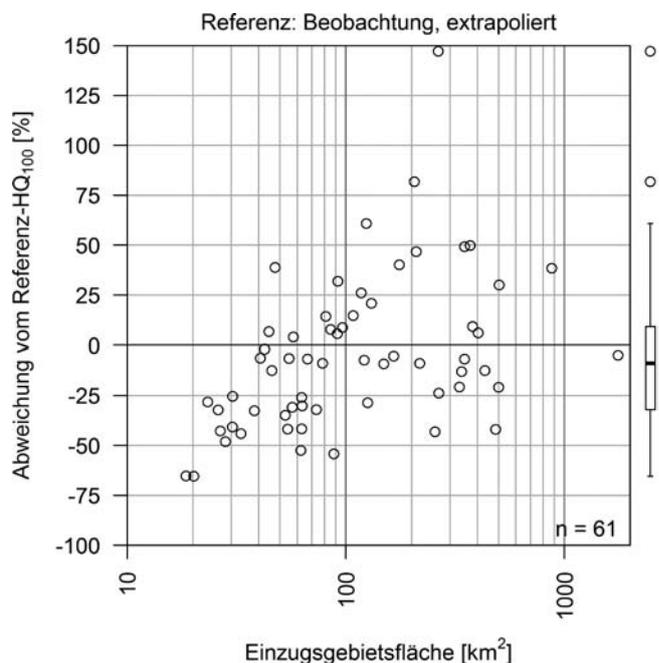
**Abbildung 5**

Abweichung der mit PREVAH simulierten Hochwasserkennzahlen 1984–2003 von der Beobachtung (MHQ: mittleres Jahreshochwasser; HHQ: größtes Hochwasser;  $HQ_{100}$ : extrapoliertes 100-jährliches Hochwasser). Die dunkelgrau ausgefüllten Boxplots beziehen sich auf die 61 der in diesem Artikel betrachteten 450 Einzugsgebiete, für welche eine beobachtete Abflussreihe mit einer Länge von mindestens 20 Jahren zur Verfügung steht. Der hellgrau ausgefüllte Boxplot zeigt zum Vergleich die von VIVIROLI et al. (2009c) erzielten Ergebnisse für 49 repräsentative mesoskalige Einzugsgebiete.

*Deviation of characteristic flood figures 1984–2003 as modelled with PREVAH from observations (MHQ: mean annual flood; HHQ: largest flood;  $HQ_{100}$ : extrapolated flood with recurrence interval of 100 years). The dark-grey boxes refer to 61 catchments for which a discharge record of at least 20 years is available. The light-grey box indicates the results from 49 representative catchments as reported by VIVIROLI et al. (2009c) for comparison.*

Die Detailbetrachtung der Fehler im  $HQ_{100}$  in Abhängigkeit der Fläche (Abb. 6) zeigt, dass in Gebieten mit einer Fläche von weniger als 40 km<sup>2</sup> ausnahmslos Unterschätzungen verzeichnet werden, welche umso größer werden, je kleiner das Gebiet ist. Es kann ergänzt werden, dass Unterschätzungen vor allem bei sehr großen spezifischen Abflusswerten, also eher in kleinen Einzugsgebieten, auftreten (Abb. 7, links). Das Modellsystem gelangt bei diesen hohen Spitzenabflussspenden an seine Grenzen, weil solche Extremabflüsse typischerweise durch kleinräumige Starkniederschlagszellen hervorgerufen werden, welche durch das meteorologische Messnetz meist nur ungenügend erfasst werden. Zudem ist die Fähigkeit von PREVAH zur Erzeugung sehr schneller Abflussreaktionen aufgrund der Modellstruktur limitiert. Abbildung 7 (rechts) belegt aber gleichzeitig, dass bei großen absoluten Durchflussmengen keine systematischen Probleme vorliegen.

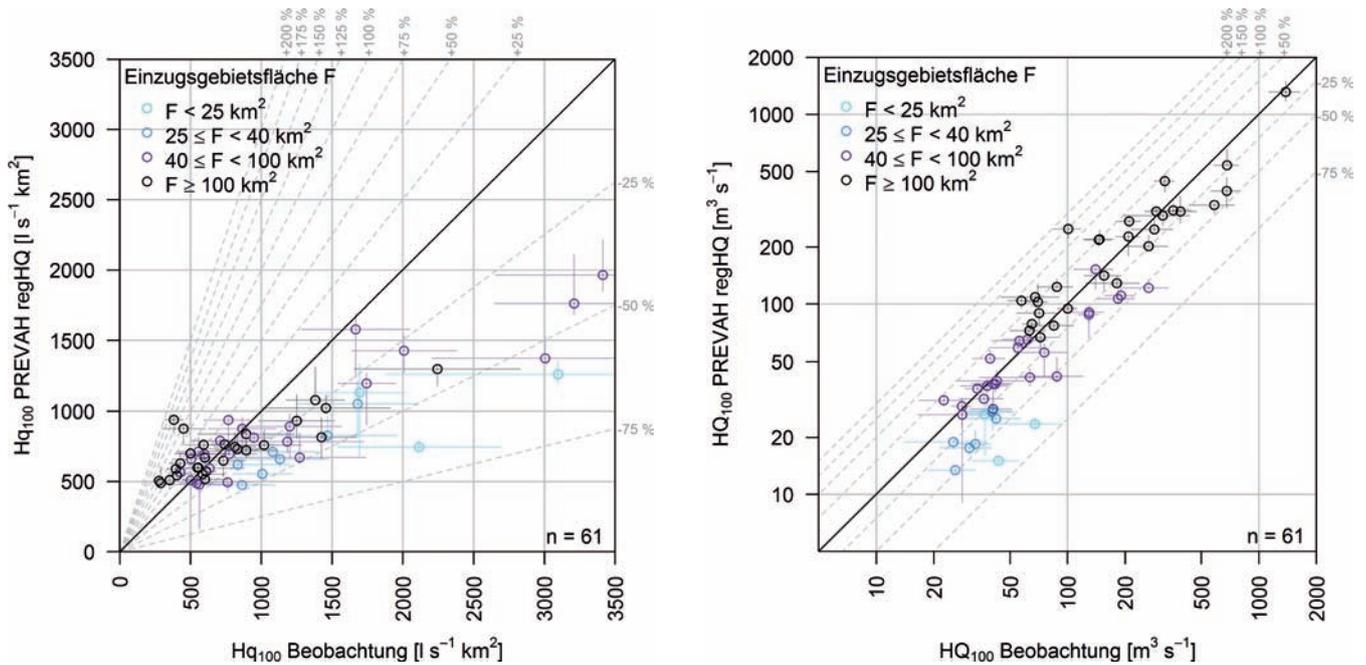
Eine relevante Einschränkung der Schätzgüte besteht in stark verkarsteten Gebieten: Für Gebiete, in welchen Karstgesteine gemäß BITTERLI et al. (2004) (HADES-Tafel 8.6) mehr als 50 % der Fläche einnehmen, neigt das Modellsystem zu Überschätzungen des  $HQ_{100}$ . Zwar verfügt PREVAH über ein einfaches Karstmodul; dieses wurde aber wegen der großen Unsicherheiten in der Regionalisierung nicht verwendet. Bei starker Verkarstung sollten die Resultate also mit besonderer Vorsicht interpretiert werden.



**Abbildung 6**

Abweichung des aus der PREVAH-Simulation abgeleiteten  $HQ_{100}$  von den aus der gleich langen Beobachtungsreihe extrapolierten  $HQ_{100}$ , aufgetragen gegen die Einzugsgebietsfläche. Datengrundlage: 61 Einzugsgebiete, für welche Abflussmessungen mit einer Länge von mindestens 20 Jahren vorliegen.

*Deviation of the 100-year flood ( $HQ_{100}$ ) extrapolated from simulations 1984–2003 with PREVAH from  $HQ_{100}$  extrapolated from observations of similar length, plotted against the size of the drainage area. Based on data of 61 catchments with discharge records over at least 20 years.*



**Abbildung 7**

Vergleich der aus der PREVAH-Simulation 1984–2003 abgeleiteten HQ<sub>100</sub> mit den aus der gleich langen Beobachtungsreihe extrapolierten HQ<sub>100</sub> für die 61 Einzugsgebiete des vorliegenden Artikels, für welche Abflussmessungen mit einer Länge von mindestens 20 Jahren vorliegen; links: Abflusssspenden; rechts: Absolute Abflussmengen. Die horizontalen und vertikalen Spannweitenlinien geben das statistische 90 %-Konfidenzintervall der Extrapolation an. *Comparison of the 100-year flood (HQ<sub>100</sub>) extrapolated from simulations 1984–2003 with PREVAH with HQ<sub>100</sub> extrapolated from observations of similar length of 61 catchments with discharge records over at least 20 years; left: specific discharge; right: absolute discharge. The horizontal and vertical lines indicate the spread covered by the extreme-value statistical 90 % confidence interval.*

### 3.2.2 Vergleich mit Werten aus HQ<sub>x\_meso\_CH</sub>

HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> ist ein in der schweizerischen Praxis weit verbreitetes Abschätzwerkzeug. Es beinhaltet fünf statistische und empirische Verfahren, welche die Schätzung einer 100-jährlichen Abflussspitze (HQ<sub>100</sub>) erlauben (BARBEN 2003, SPREAFICO et al. 2003). Zur Beurteilung der simulierten HQ<sub>100</sub>-Werte wird im Folgenden der Median der mit HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> vorgenommenen Schätzungen sowie deren Spannweite verwendet. Damit ist ein Vergleich in beinahe allen 450 Einzugsgebieten möglich, in welchen die Abflussganglinie simuliert wurde. Bei diesem Vergleich muss aber unbedingt berücksichtigt werden, dass HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> nicht eine Referenz im engeren Sinne darstellt, so dass ein Vergleich mit den hier erhaltenen Schätzungen also nur Hinweise auf allfällige Unterschiede oder unplausible Schätzungen geben kann und nicht als Fehlerbetrachtung verstanden werden darf.

Abbildung 8 zeigt den Vergleich der HQ<sub>100</sub>-Schätzwerte aus der vorliegenden Studie mit HQ<sub>x\_meso\_CH</sub>. Da 8 der 450 hier bearbeiteten Einzugsgebiete größere Flächenanteile im Ausland besitzen und somit eine Abschätzung mit HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> nicht möglich ist, ist der Vergleich nur für 442 Einzugsgebiete machbar. Erkennbar ist, dass die Schätzwerte von HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> bei großen spezifischen Spitzenabflüssen und in kleinen Gebieten deutlich über denjenigen von PREVAH liegen (Abb. 8, links). Gleichfalls muss beachtet werden, dass die fünf aus HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> verwendeten Verfahren eine beachtliche Spannweite abdecken, in welcher der mit PREVAH geschätzte Wert oft enthalten ist. In der Darstellung der spezifischen Abflüsse kommt zudem nur ungenügend zum Ausdruck, dass mehr als 50 % der Schätzwerte in beiden Verfahren unterhalb von ca. 1.250 l s<sup>-1</sup> km<sup>2</sup> lie-

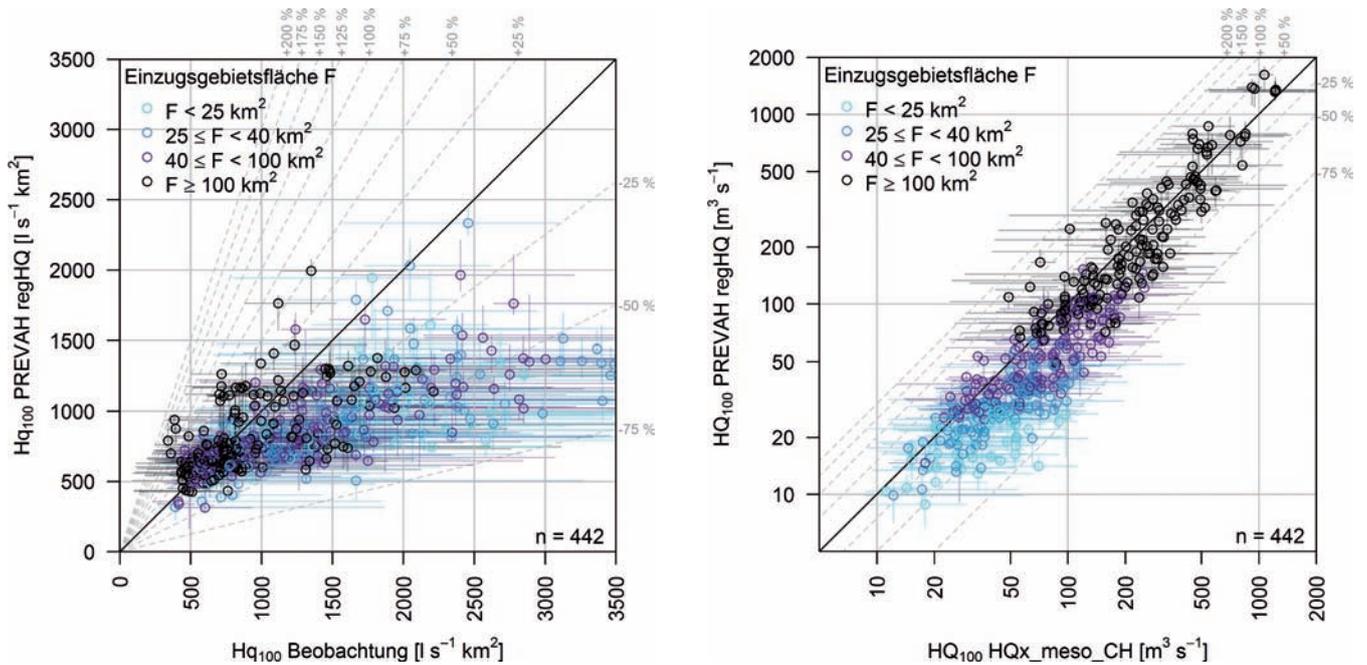
gen; in diesem Bereich treten sehr viel geringere Unterschiede auf. Diese starke Ballung von Werten wird in der Betrachtung der absoluten Spitzenabflussmengen (Abb. 8, rechts) aufgelöst, und es zeigt sich, dass die Unterschiede zwischen dem Median von HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> und der Schätzung von PREVAH bei großen Durchflüssen und großen Gebieten deutlich geringer sind. Die große Spannweite der einzelnen Schätzungen von HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> ist hier indes noch deutlicher erkennbar.

Der Vergleich der PREVAH-Schätzungen mit HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> bestätigt, dass die beiden Verfahren bei der Hochwasserabschätzung ergänzend verwendet werden können, weil jeweils voneinander unabhängige Informationen über das Hochwasserverhalten eines Gebietes resultieren.

### 3.2.3 Vergleich mit Hüllkurvenwerten (Verfahren GIUB'96)

Der folgende Vergleich bezieht sich auf die regional differenzierten Hüllkurven, welche über das Verfahren GIUB'96(FN) (KAN 1995, WEINGARTNER 1999) verfügbar sind. GIUB'96 basiert auf 717 Beobachtungen von maximalen Spitzenabflüssen (HHQ), welche vom Amt für Strassen- und Flussbau (ASF 1974) sowie von der Landeshydrologie und -geologie (SPREAFICO & ASCHWANDEN 1991, SPREAFICO & STADLER 1986) zwischen 1869 und 1991 gesammelt wurden. Aus diesem zeitlich und räumlich relativ heterogenen Datensatz wurden unter anderem zwei Größen abgeleitet, welche für 15 Regionen differenziert bereitstehen:

- Q<sub>max,90%</sub>: 90 %-Hüllkurve über das Datenkollektiv. Im Durchschnitt sind 10 % der Werte größer als dieser Wert, was den Einfluss von Ausreißern (auch durch Messfehler verursachte) vermindert.



**Abbildung 8**

Vergleich der aus der PREVAH-Simulation 1984–2003 abgeleiteten HQ<sub>100</sub> mit den entsprechenden Schätzwerten aus HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> für 442 Einzugsgebiete. Links: Abflusspenden; rechts: Durchflussmengen. Die vertikalen Spannbreitenlinien geben das statistische 90 %-Konfidenzintervall der Extrapolation an, die horizontalen Spannbreitenlinien bezeichnen den Bereich der mit HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> erhaltenen Schätzungen.

Comparison of the 100-year flood (HQ<sub>100</sub>) extrapolated from simulations 1984–2003 with PREVAH with estimates from HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> of 442 catchments; left: specific discharge; right: absolute discharge. The vertical lines indicate the spread covered by the extreme-value statistical 90 % confidence interval, the horizontal lines the spread covered by the estimates from HQ<sub>x\_meso\_CH</sub>.

- HQ<sub>100,regr</sub>: Regressionsgerade durch das Datenkollektiv. WEINGARTNER (1999) konnte zeigen, dass dieser Wert einen guten Schätzer für einen 100-jährlichen Spitzenabfluss (HQ<sub>100</sub>) darstellt.

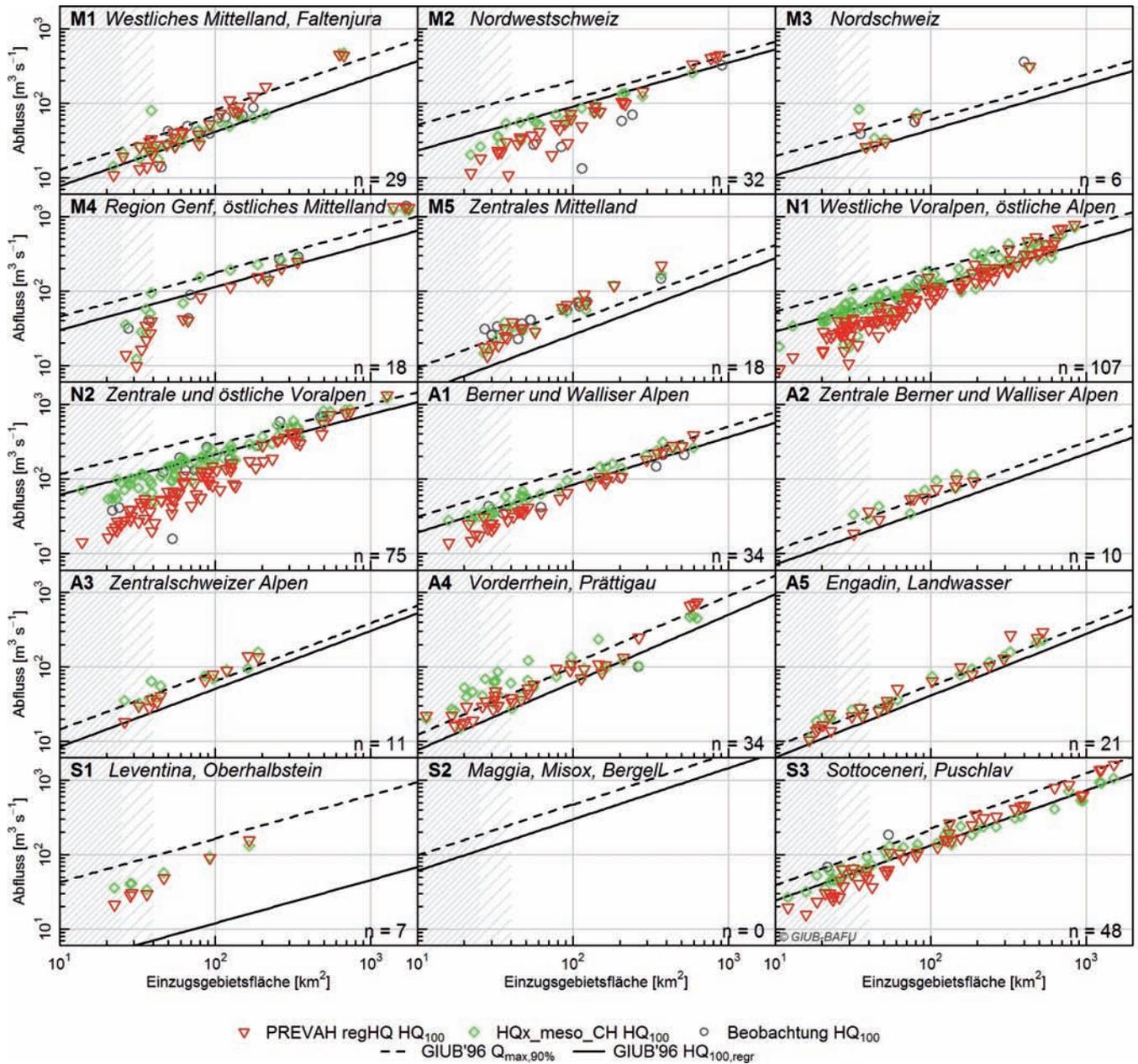
Ähnlich wie beim Vergleich mit HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> muss berücksichtigt werden, dass es sich bei Q<sub>max,90%</sub> und HQ<sub>100,regr</sub> um die Ergebnisse eines weiteren Schätzverfahrens und nicht um Referenzwerte im engeren Sinne handelt. WEINGARTNER (1999) konnte nachweisen, dass das Verfahren eine hohe Trefferquote aufweist. Er begründete dies mit dem relativ großen Stichprobenumfang, auf welchem das Verfahren basiert sowie mit der regionalen Differenzierung des Ansatzes. Es muss weiter beachtet werden, dass die Beobachtungszeiträume der für GIUB'96(FN) verwendeten Daten sehr heterogen sind und sich ausnahmslos auf die Zeit vor 1991 beziehen, wobei der Schwerpunkt in der Periode 1951 bis 1970 liegt (KAN 1995). Zudem ist die Jährlichkeit von HQ<sub>100,regr</sub> in GIUB'96(FN) nur näherungsweise festgelegt. Bei der Beurteilung der mit PREVAH simulierten Abflusswerte kann eine deutliche Überschreitung des Q<sub>max,90%</sub> ein Hinweis auf Plausibilitätsprobleme sein, während das HQ<sub>100,regr</sub> für einen Vergleich mit den mit PREVAH vorgenommenen Schätzungen des HQ<sub>100</sub> herangezogen werden kann.

Abbildung 9 zeigt den regional differenzierten Vergleich der aus PREVAH bestimmten Schätzungen des HQ<sub>100</sub> mit den GIUB'96(FN)-Werten für Q<sub>max,90%</sub> und HQ<sub>100,regr</sub>. Ebenfalls eingetragen ist der aus den Beobachtungsdaten 1984–2003 extrapolierte Schätzwert, welcher für 61 der 450 berücksichtigten Gebiete bestimmbar ist. Schließlich ist auch der mediane Schätzwert der fünf in HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> zusammengefassten Verfahren (vgl. Kapi-

tel 3.2.2) eingetragen, wobei beachtet werden sollte, dass das Verfahren GIUB'96(FN) in diesen fünf Verfahren enthalten ist und ein weiteres der fünf Verfahren auf demselben Datensatz basiert wie GIUB'96(FN). Eine gute Übereinstimmung von GIUB'96(FN) und HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> bedeutet also nicht a priori eine größere Sicherheit von Q<sub>max,90%</sub> und HQ<sub>100,regr</sub>.

In einigen Regionen ist über einen weiten Bereich von Einzugsgebietsgrößen eine große Übereinstimmung zwischen dem PREVAH-HQ<sub>100</sub> und dem GIUB'96(FN)-HQ<sub>100,regr</sub> festzustellen, so beispielsweise in N1 (westliche Voralpen und östliche Alpen), A1 (Berner und Walliser Alpen) und S3 (Sottoceneri, Puschlav). In weiteren Gebieten sind ebenfalls geringe Unterschiede zu beobachten, wobei PREVAH tendenziell etwas höhere Werte angibt, wie etwa in A2 (zentrale Berner und Walliser Alpen), A3 (Zentralschweizer Alpen), A4 (Vorderrhein, Prättigau) und A5 (Engadin, Landwasser). Deutlich höhere Werte werden mit PREVAH in M5 (zentrales Mittelland) und S1 (Leventina, Oberhalbstein) geschätzt, leicht bis deutlich tiefere in M2 (Nordwestschweiz) und N2 (zentrale und östliche Voralpen). Vor dem Hintergrund von Modellaufbau und -struktur lassen sich in diesen Mustern keine systematischen Probleme und Abweichungsmuster identifizieren, und auch die Vertretung der Regionen in der für die Regionalisierung benutzten Kalibrierung scheint keinen entscheidenden Einfluss auf die Unterschiede zu haben, da auch für schlecht vertretene Regionen (z.B. Sottoceneri und Puschlav) gute Übereinstimmungen gefunden werden können.

Für Gebiete mit einer Fläche von weniger als 50 bis 100 km<sup>2</sup> liefert PREVAH oft etwas tiefere Werte, was aufgrund der vorangegangenen Analysen tatsächlich durch eine Tendenz zur Unterschätzung des HQ<sub>100</sub> in kleinen Gebieten mitbedingt sein könnte.



**Abbildung 9**

Plausibilisierung der aus der PREVAH-Simulation extrapolierten  $HQ_{100}$  anhand der Werte des regionalhydrologischen Verfahrens GIUB'96(FN) für die 450 simulierten Einzugsgebiete. Zum Vergleich eingetragen sind die Schätzwerte aus  $HQx\_meso\_CH$  für 442 Einzugsgebiete sowie die aus der Beobachtung extrapolierten Werte für 61 Einzugsgebiete. Die Schraffur bezeichnet Einzugsgebietsflächen von weniger als  $40\text{ km}^2$ ; in diesem Skalenbereich muss mit einer deutlichen Unterschätzung des  $HQ_{100}$  gerechnet werden.

*Plausibilisation of the  $HQ_{100}$  extrapolated from simulations with values from the regional approach GIUB'96(FN) of 450 catchments modelled with PREVAH. Estimates with  $HQx\_meso\_CH$  of 442 catchments and extrapolated values from 61 catchments with observations are indicated for comparison. The drainage-area range below  $40\text{ km}^2$ , where clear underestimation of  $HQ_{100}$  is to be expected, is marked by hachures.*

Was die wenigen PREVAH-Werte betrifft, welche deutlich über dem  $Q_{max,90\%}$  liegen, muss darauf hingewiesen werden, dass die Zuordnung zur Hochwasserregion von GIUB'96 großen Einfluss auf dessen Schätzwert hat. Diese Zuordnung geschieht über die Koordinaten des Pegels, kann also innerhalb eines Flussgebietes wechseln und somit an nahegelegenen Pegeln zu sehr unterschiedlichen Schätzwerten führen. Die meisten Werte, welche deutlich über  $Q_{max,90\%}$  liegen, wären völlig plausibel, wenn sie derjenigen Zone zugeordnet würden, in welcher der Großteil des betreffenden Flussgebietes zu liegen kommt. Ein-

ge weitere fragwürdige Werte im Bereich von  $Q_{max,90\%}$  oder leicht darüber sind auf die oben besprochene Karstproblematik zurückzuführen. Eine weitere Erklärung für über  $Q_{max,90\%}$  liegende Werte ist schließlich, dass sich die PREVAH-Simulation auf die unbeeinflusste Situation bezieht, wohingegen im GIUB'96-Datensatz beeinflusste Reihen zu finden sind (KAN 1995). Dies dürfte in durch die Wasserkraft beeinflussten Regionen für einige Unterschiede zwischen PREVAH und GIUB'96 verantwortlich sein.

### 3.2.4 Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass sich der prozessorientierte Ansatz zur Hochwasserabschätzung grundsätzlich eignet, er aber in kleinen Einzugsgebieten (v.a. unterhalb von 40 km<sup>2</sup> Einzugsgebietsfläche) tendenziell zur Unterschätzung seltener Hochwasserspitzen neigt. Abbildung 8 kann als Hinweis verstanden werden, in welchen Regionen solche Unterschätzungen vor allem auftreten können.

Die hier bisher vorgenommene Beurteilung basierte auf dem Vergleich von Kennwerten innerhalb desselben Einzugsgebietes, der regionale Kontext wurde dabei noch nicht berücksichtigt. Wie im Folgenden ersichtlich, können die Schätzwerte dank der umfassenden Modellierungen und Interpretationshilfen nun aber auch innerhalb der übergeordneten Flussgebiete betrachtet und somit in ihrer regionalen Plausibilität beurteilt werden. Das nachfolgende Kapitel 4 zeigt, dass sich damit eine neue Dimension in der hochwasserhydrologischen Beurteilung eröffnet.

## 4 Beurteilung der Hochwasserabschätzung in einem regionalen Kontext

Wie schon in Kapitel 2.1 erläutert, liefert der Ansatz der prozessbasierten Modellierung umfangreiche hydrologische Informationen zum abzuschätzenden Einzugsgebiet und ermöglicht gleichzeitig eine Einordnung der Abschätzung in den regionalen Kontext. Am Beispiel des Einzugsgebietes der Töss wird dies im Folgenden näher erläutert. Für einen fiktiven Pegel an der Töss bei Kollbrunn (Gebietsfläche 188 km<sup>2</sup>) sollen verschiedene Hochwasserkennwerte abgeschätzt und beurteilt werden.

Abbildung 10a zeigt eine Übersicht über die Kennzahlen des Abflusses 1984–2003 für das gesamte Einzugsgebiet der Töss, der fiktive Pegel Kollbrunn ist mit einem Kreis gekennzeichnet. Der mittlere Jahresabfluss (mQ, oben links) wird auf 5,0 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> geschätzt und ordnet sich gut in das Bild der beobachteten Werte (grau ausgefüllte Kreise und graue Linie) sowie der Schätzungen von SCHÄDLER & WEINGARTNER (2002) (blaue Kreise und blaue Linie) ein. Die plausible Wiedergabe des mQ ist zentral für die Vertrauenswürdigkeit der Modellierung und der darauf basierenden Hochwasserschätzwerte. Die Schätzungen für das mittlere jährliche Hochwasser (mHQ, unten links) und das größte Hochwasser der Periode (HHQ, oben rechts) scheinen mit 71 resp. 142 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> gegenüber den in der Region beobachteten Werten leicht zu tief zu liegen. Beim 100-jährlichen Hochwasser (HQ<sub>100</sub>, unten rechts) liegt die modellbasierte Schätzung mit 154 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> etwa 33 % tiefer als der mediane Schätzwert von HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> (227 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, grüner Kreis); sie befindet sich aber immer noch im Wertebereich aller Schätzungen mit HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> (150–404 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>). Es ist ebenfalls ersichtlich, dass HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> im Gebiet der Töss das 100-jährliche Hochwasser im Vergleich zur Beobachtung überschätzt, wenn Einzugsgebiete mit einer Fläche von weniger als 260 km<sup>2</sup> betrachtet werden.

Anhand von Abbildung 10b kann zusätzlich eine Einordnung des geschätzten HQ<sub>100</sub> in den regionalen Kontext des Schätzverfahrens GIUB'96(FN) vorgenommen werden. Die meisten Teilgebiete der Töss liegen in der Region M4. Im hier relevanten Skalenbereich (ca. 100–500 km<sup>2</sup>) liegen die modellbasierten Schätzwerte im Bereich des HQ<sub>100,reggr</sub> während die medianen Schätzungen von HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> meist oberhalb des HQ<sub>100,reggr</sub>

angeordnet sind und eher im Bereich des Q<sub>max,90%</sub> zu finden sind. Die im Vergleich zu HQ<sub>100,reggr</sub> und Q<sub>max,90%</sub> scheinbar deutliche Überschätzung des HQ<sub>100</sub> im größten Teilgebiet in der Region M3 (Einzugsgebietsfläche: 439 km<sup>2</sup>) kommt dadurch zustande, dass dieses Teilgebiet hydrographisch gesehen zwar klar zur Region M4 gehört (in welcher der modellbasierte Schätzwert absolut plausibel wäre), aufgrund seiner Pegelkoordinaten aber der Region M4 zugeordnet wird.

Weitere Möglichkeiten zur Einordnung und Verifikation der Resultate bestehen bei der modellierten Niederschlagsmenge und deren Höhenverlauf sowie bei den freien Modellparametern. Aus Platzgründen kann hier nicht auf diese Möglichkeiten eingegangen werden, sie stehen aber ebenfalls in Form von bereits aufbereiteten Grafiken zur Verfügung (ausführlich besprochen in VIVIROLI & WEINGARTNER 2011).

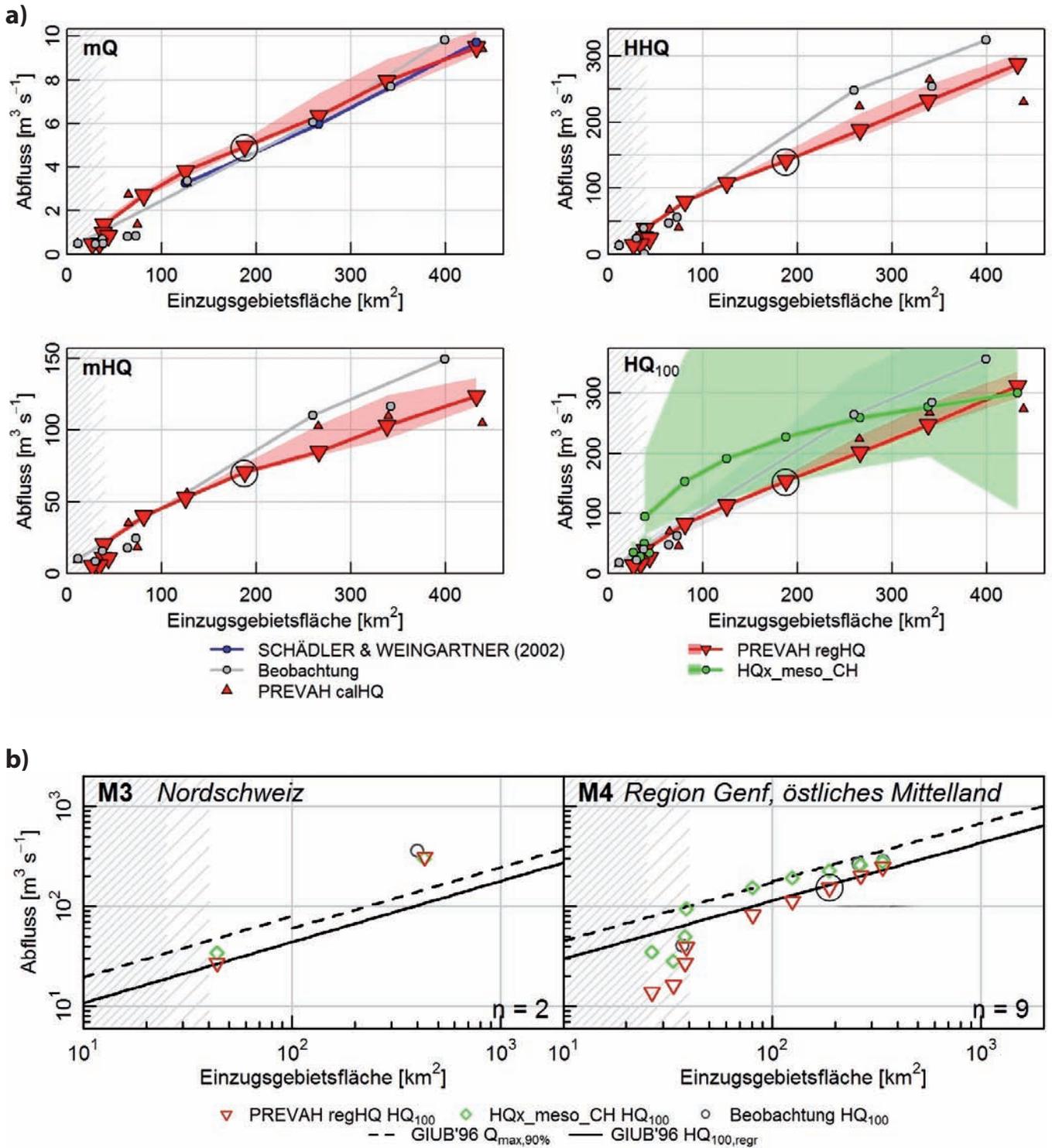
Aufgrund der obigen Einordnung in den regionalen hochwasserhydrologischen Kontext wird im Fall der Töss-Kollbrunn empfohlen, den modellbasierten Schätzwert zu verwenden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Resultate belegen, dass das vorgestellte Modellsystem hydrologisch solide Simulationen für mesoskalige Gebiete des schweizerischen Rhein-Einzugsgebietes liefert, welche über keine Abflussmessungen verfügen. Diese umfangreichen Simulationen können schließlich dazu dienen, seltene Hochwasserabflüsse in ungemessenen Einzugsgebieten der Schweiz zuverlässig abzuschätzen. Dabei stehen dem Anwender umfassende Interpretationshilfen zur Verfügung, welche eine Plausibilisierung der zugrunde liegenden Modellierung und eine Einordnung der Schätzwerte in den hochwasserhydrologischen Kontext der Region erlauben. Weitere wichtige Hochwasserkenngrößen wie Direktabflussvolumina oder die Überschreitungsdauer von Schwellenwerten können aus den durchgehend im Stundenschritt vorliegenden Ganglinien ebenfalls bestimmt werden.

Die ermittelten Schätzfehler bewegen sich im Bereich der etablierten empirischen und stochastischen Verfahren, die eingesetzte Schätzmethodik ist jedoch eine völlig andere. Für die Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in ungemessenen Gebieten kann folglich ein wesentlicher Informationsgewinn erwartet werden, wenn die etablierten und das neue Verfahren kombiniert angewendet werden und die entsprechenden Resultate vergleichend beurteilt werden. Eine Ablösung der bisherigen Verfahren ist weder erstrebenswert noch sinnvoll, da schon die Erfahrungen mit HQ<sub>x\_meso\_CH</sub> gezeigt haben, dass die vergleichende Anwendung verschiedener Verfahren dem Experten wertvolle Anhaltspunkte für eine Abschätzung liefert und insgesamt zu zuverlässigeren Ergebnissen führt als die Anwendung eines einzelnen Verfahrens.

Es muss gleichzeitig betont werden, dass jede Hochwasserabschätzung eine komplexe Aufgabe ist und stets Expertenwissen voraussetzt. Im Sinne der von BLÖSCHL & MERZ (2008) sowie MERZ & BLÖSCHL (2008) propagierten ‚Extremwerthydrologie‘ sollte dabei eine rein statistische Beurteilung vermieden werden. Vielmehr sollten zusätzliche Informationsquellen für eine hydrologische Argumentation herangezogen werden, um die Schätz-



**Abbildung 10**

Übersichtsdiagramme zum Flussgebiet der Töss: a) Kennzahlen des Abflusses (mQ: mittlerer jährlicher Abfluss; mHQ: mittleres jährliches Hochwasser; HHQ: größtes Hochwasser der betrachteten Periode 1984–2003; HQ<sub>100</sub>: Extrapoliertes 100-jährliches Hochwasser), die Linien verbinden fiktive Pegelpunkte des Hauptgewässers der Töss; b) Einordnung des geschätzten HQ<sub>100</sub> in das regionalhydrologische Schätzverfahren GIUB'96(FN) (vgl. Abb. 9). Der fiktive Pegel Kollbrunn ist jeweils mit einem Kreis gekennzeichnet. Die schraffierten Flächen markieren den Skalenbereich von 25–40 km<sup>2</sup> (lockere Schraffierung) und <25 km<sup>2</sup> (dichte Schraffierung), wo mit zunehmender Wahrscheinlichkeit mit Unterschätzungen des HQ<sub>100</sub> gerechnet werden muss (vgl. Abb. 6).  
*Summary graphs of the Töss River catchment: a) elementary hydrological figures (mQ: mean annual discharge; mHQ: mean annual flood; HHQ: largest flood of the period 1984–2003; HQ<sub>100</sub>: extrapolated 100-year flood), the lines connect virtual gauges along the main river course; b) Assessment of the estimated HQ<sub>100</sub> against results from the GIUB'96(FN) flood estimation procedure (cf. Figure 9). The virtual gauge Kollbrunn is marked with a circle. Hachures indicate catchment sizes of 25–40 km<sup>2</sup> (light hatch) and <25 km<sup>2</sup> (dense hatch), where underestimation of HQ<sub>100</sub> is increasingly likely (cf. Figure 6).*

basis zu erweitern. Diese Informationserweiterung kann verschiedene Dimensionen abdecken, namentlich die zeitliche (z.B. Wasserstandsbeobachtungen, historische Hochwasser, Vergleich mit Abflussreihen benachbarter Gebiete), die räumliche (z.B. Gruppierung von Abflussmessreihen ähnlicher Gebiete, Hüllkurven und Spendendiagramme, Geostatistik, Regression mit Gebietsattributen) sowie die kausale (z.B. GRADEX-Verfahren, Analyse ereignisbasierter Abflussbeiwerte, hydrologische Modellierung, saisonale Typisierung, Identifikation dominanter Abflussprozesse). Die in diesem Artikel vorgestellte Methode liefert einen wesentlichen Beitrag zur kausalen Dimension, wobei insbesondere die Berücksichtigung ungemessener Gebiete hervorzuheben ist.

Dank der Prozessbasierung des Verfahrens bieten sich auch für die Forschung interessante Möglichkeiten zu vertieften Untersuchungen im Bereich von Hochwassern. So kann beispielsweise unter veränderten Rahmenbedingungen und mit verändertem Modellantrieb gerechnet werden, um etwa Worst-Case-Untersuchungen (SCHWANBECK et al. 2008) durchzuführen oder die Auswirkungen von Klima- und Landnutzungsänderungsszenarien zu beurteilen (KAY et al. 2006B, KÖPLIN et al. 2010). Der Einsatz von Wettergeneratoren oder Niederschlagsmodellen ermöglicht es zudem, die Zuverlässigkeit der Ergebnisse im Bereich seltener Hochwasser zu erhöhen (s. z.B. BLAZKOVA & BEVEN 2002, CAMERON et al. 1999, 2000A und 2000B; EBERLE et al. 2002), Modellanwendungen für Regionen ohne lange Niederschlagsmessreihen vorzunehmen (z.B. EBNER VON ESCHENBACH et al. 2008) oder die Sensitivität der Extremwertstatistik auf Klima und Einzugsgebietscharakteristik zu untersuchen (HASHEMI et al. 2000).

Die Hochwasserabschätzungen und ausgewählte Resultate der beschriebenen Simulationen für 450 Einzugsgebiete werden via Bundesamt für Umwelt (BAFU) verfügbar gemacht (VIVIROLI & WEINGARTNER 2011).

## Summary

The results presented show that the modelling system introduced in this paper is able to provide hydrologically sound simulations of meso-scale catchments without records of observed runoff in the Swiss part of the River Rhine catchment. It is possible to derive from these comprehensive simulations reliable estimations of rare floodflows in ungauged Swiss catchments. The model user can benefit from a diversity of interpretation aids to assess the plausibility of the estimates and the underlying simulations and to set them into the flood-hydrological context of the relevant region. The hydrographs available in one-hour resolution can further be used to derive important flood characteristics such as direct-runoff volumes or durations of threshold exceedances.

The estimation errors remain in the range of the established empirical and stochastic procedures, although the underlying estimation procedure is a completely different one. Consequently, a significant gain in information may be expected by using established and new procedures in combination and comparing their outputs. The replacement of current procedures by the new one is neither desirable nor sensible, because experiences made with HQx\_meso\_CH show that the comparative application of several

procedures gives the expert valuable information for own estimates and yields on the whole more reliable results than the use of one method only.

It must be stressed here that flood estimation remains a complex task and will always require expert knowledge. Following the approach of 'extreme-value hydrology' proposed by BLÖSCHL & MERZ (2008) and MERZ & BLÖSCHL (2008), purely statistical assessments should be avoided. Rather, additional sources of information should be considered for a hydrologically based argumentation, aiming to widen the basis for flood estimates. This additional information may refer to different dimensions: the temporal one (e.g. water-stage observations, historical flood events, comparison with flow-observation series from neighbouring catchments), the spatial one (e.g. grouped flow observation series from similar catchments, enveloping curves and specific-discharge diagrams, geostatistics, regression with catchment attributes) as well as the causal one (e.g. the GRADEX-procedure, analysis of event-based flow coefficients, hydrological modelling, identification of seasonal flood-process types, and dominant runoff processes). The method introduced in this paper makes a significant contribution to the causal dimension. In doing so, the applicability to ungauged catchments is a particular asset.

Interesting possibilities for flood research are available thanks to the process-oriented set-up of the estimation procedure. For example, it is possible to run the model with altered boundary conditions and different model inputs in order to examine worst-case scenarios (SCHWANBECK et al. 2008) or to study effects of changes in climate and land uses (KAY et al. 2006B, KÖPLIN et al. 2010). By using weather generators or precipitation models, the reliability of the resulting estimates of floods with long recurrence intervals can be improved (see e.g. BLAZKOVA & BEVEN 2002, CAMERON et al. 1999, 2000A and 2000B; EBERLE et al. 2002); the model becomes applicable for regions without long precipitation records (e.g. EBNER VON ESCHENBACH et al. 2008) and the sensitivity of extreme-value statistical analyses for climate characteristics and catchment attributes can be examined (HASHEMI et al. 2000).

The described flood estimations and selected results of 450 catchments will be available from the Swiss Federal Office for the Environment (FOEN) (VIVIROLI & WEINGARTNER 2011).

## Danksagung

Das in diesem Artikel vorgestellte Projekt wurde vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziert. Für die Bereitstellung umfangreicher Messdaten danken wir dem BAFU, den zuständigen Ämtern der Kantone sowie dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz).

## Anschrift der Verfasser:

Dr. D. Viviroli  
Prof. Dr. R. Weingartner  
Gruppe für Hydrologie  
Geographisches Institut der Universität Bern  
Hallerstrasse 12, 3012 Bern, Schweiz  
viviroli@giub.unibe.ch

**Literaturverzeichnis**

- ASF (Eidgenössisches Amt für Strassen- und Flussbau) (1974): Die grössten bis zum Jahre 1969 beobachteten Abflussmengen von schweizerischen Gewässern. – ASF, Bern
- BARBEN, M. (2003): Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in der Schweiz. – *Geographica Bernensia*, G71. Geographisches Institut der Universität Bern, Bern
- BARBEN, M., H.-P. HODEL, H.-B. KLEEBERG, M. SPREAFICO & R. WEINGARTNER (Hrsg.) (2001): Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen – Erfahrungen aus den Rheinanliegerstaaten. – KHR-Bericht Nr. I-19, Lelystad, 191 S.
- BERGSTRÖM, S. (1976): Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments. – SMHI reports in hydrology and oceanography, Nr. 7. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping
- BITTERLI, T., P. AVIOLAT, R. BRÄNDLI, R. CHRISTE, S. FRACHEBOUD, D. FREY, M. GEORGE, F. MATOUSEK & J.-P. TRIPET (2004): Grundwasservorkommen. – *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 8.6. Bundesamt für Umwelt, Bern
- BLAZKOVA, S. & K.J. BEVEN (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. & K.J. BEVEN (2002): Flood frequency estimation by continuous simulation for a catchment treated as ungauged (with uncertainty). – *Water Resources Research* 38, 1139
- BLAZKOVA, S. & K.J. BEVEN (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. & R. MERZ (2008): Bestimmung von Bemessungshochwässern gegebener Jährlichkeit – Aspekte einer zeitgemäßen Strategie. – *Wasserwirtschaft* 11, 12–18
- BREINLINGER, R., P. GAMMA & R. WEINGARTNER (1992): Kenngrößen kleiner Einzugsgebiete. – *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Tafel 1.2. Bundesamt für Umwelt, Bern
- BWG (BUNDESAMT FÜR WASSER UND GEOLOGIE) (2002A): Hochwasser 2000 – Ergebnisanalyse und Fallbeispiele. – *Berichte des BWG*, Serie Wasser 2. BWG, Bern
- CALVER, A., S. CROOKS, D. JONES, A.L. KAY, T.R. KJELDSSEN & N.S. REYNARD (2005): National river catchment flood frequency method using continuous simulation. – R&D Technical Report FD2106/TR. Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA), London
- CAMERON, D., K.J. BEVEN & P. NADEN (2000A): Flood frequency estimation by continuous simulation under climate change (with uncertainty). – *Hydrology and Earth System Sciences* 4, 393–405
- CAMERON, D., K.J. BEVEN, J. TAWN, S. BLAZKOVA & P. NADEN (1999): Flood frequency estimation by continuous simulation for a gauged upland catchment (with uncertainty). – *Journal of Hydrology* 219, 169–187
- CAMERON, D., K.J. BEVEN, J. TAWN & P. NADEN (2000B): Flood frequency estimation by continuous simulation (with likelihood based uncertainty estimation). – *Hydrology and Earth System Sciences* 4, 23–34
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau) (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. – *DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft* 251. – Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser, Bonn
- EAGLESON, P.S. (1972): Dynamics of flood frequency. – *Water Resources Research* 8, 878–989
- EBERLE, M., P. KRAHE, H. BUITEVELD, K. WILKE & J. BEERSMA (2002): Estimation of extreme floods in the River Rhine basin by combining precipitation-runoff modelling and a rainfall generator. – In: Spreafico M., Weingartner R., Hrsg.: *Proceedings of International Conference on Flood Estimation (March 6–8, 2002 in Bern, Switzerland)*. – International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin (CHR) Report II 17, Lelystad, 459–467
- EBNER VON ESCHENBACH, A.-D., U. HABERLANDT, I. BUCHWALD & A. BELLI (2008): Ermittlung von Bemessungsabflüssen mit N-A-Modellierung und synthetischem Niederschlag. – *Wasserwirtschaft* 11, 19–23
- FLEMING, G. & D.D. FRANZ (1971): Flood frequency estimating techniques for small watersheds. – *Journal of the Hydraulics Division-ASCE* 97, 1441–1460
- HASHEMI, A.M., M. FRANCHINI & P.E. O'CONNELL (2000): Climatic and basin factors affecting the flood frequency curve: PART I – A simple sensitivity analysis based on the continuous simulation approach. – *Hydrology and Earth System Sciences* 4, 463–482
- HILKER, N., C. HEGG & M. ZAPPA (2008): Unwetterschäden in der Schweiz 1972–2007 mit besonderer Betrachtung des August-Hochwassers 2005. – In: Mikos, M., Hübl J., Koboltschnig G, Hrsg.: *Interpraevent 2008 Conference Proceedings*. – 1. Interpraevent, Klagenfurt, 99–110
- KAN, C. (1995): Die höchsten in der Schweiz beobachteten Abflussmengen bis 1990. – *Publikationen Gewässerkunde* 169. Geographisches Institut der Universität Bern, Bern
- KAY, A.L., N.S. REYNARD & R.G. JONES (2006A): RCM rainfall for UK flood frequency estimation. I. Method and validation. – *Journal of Hydrology* 318, 151–162
- KAY, A.L., N.S. REYNARD & R.G. JONES (2006B): RCM rainfall for UK flood frequency estimation. II. Climate change results. – *Journal of Hydrology* 318, 163–172

- KÖPLIN, N., D. VIVIROLI, B. SCHÄDLER & R. WEINGARTNER (2010): How does climate change affect mesoscale catchments in Switzerland? – A framework for a comprehensive assessment. – *Advances in Geosciences* 27, 111–119
- LAMB, R. (1999): Calibration of a conceptual rainfall-runoff model for flood frequency estimation by continuous simulation. – *Water Resources Research* 35, 3103–3114
- LAMB, R. & A.L. KAY (2004): Confidence intervals for a spatially generalized, continuous simulation flood frequency model for Great Britain. – *Water Resources Research* 40, W07501
- MCMILLAN, H., J. FREER, F. PAPPENBERGER, T. KRUEGER & M. CLARK (2010): Impacts of uncertain river flow data on rainfall-runoff model calibration and discharge predictions. – *Hydrological Processes* 24, 1270–1284
- MERZ, R. & G. BLÖSCHL (2008): Informationserweiterung zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 52, 300–309
- MORETTI, G. & A. MONTANARI (2008): Inferring the flood frequency distribution for an ungauged basin using a spatially distributed rainfall-runoff model. – *Hydrology and Earth System Sciences* 12, 1141–1152
- NASH, J.E. & J.V. SUTCLIFFE (1970): River flow forecasting through conceptual models: Part I – a discussion of principles. – *Journal of Hydrology* 10, 282–290
- ONOF, C., D.A. FAULKNER & H.S. WHEATER (1996): Design rainfall modelling in the Thames catchment. – *Hydrological Sciences Journal* 41, 715–733
- SCHÄDLER, B. & R. WEINGARTNER (2002): Komponenten des natürlichen Wasserhaushaltes 1961–1990. – *Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 6.3.* Bundesamt für Umwelt, Bern
- SCHWANBECK, J., D. VIVIROLI, R. WEINGARTNER, I. RÖSER & J. TRÖSCH (2008): Modellbasierte Sensitivitätsanalysen für das Berner Oberland. – In: Bezzola, G.-R., Hegg, C., Hrsg.: Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. – *Umwelt-Wissen* 08-25. Bundesamt für Umwelt, Bern, 48–58
- SPREAFICO, M. & H. ASCHWANDEN (1991): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. – *Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie* 16 und 17. – Schweizerische Landeshydrologie und -geologie, Bern
- SPREAFICO, M. & K. STADLER (1986): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. – *Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie* 7 und 8. – Schweizerische Landeshydrologie und -geologie, Bern
- SPREAFICO, M., R. WEINGARTNER, M. BARBEN & A. RYSER (Hrsg.) (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten – Praxishilfe. – *Berichte des BWG, Serie Wasser 4.* – Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern
- STEEL, M.E., A.R. BLACK, A. WERRITY & I.G. LITTLEWOOD (1999): Reassessment of flood risk for Scottish rivers using synthetic runoff data. – In: Gottschalk, L., Olivry, J.-C., Reed, D., Rosbjerg, D., Hrsg.: *Hydrological Extremes: Understanding, Predicting, Mitigating.* Proceedings of Symposium HS1 held during IUGG 1999 at Birmingham, July 1999. – International Association of Hydrological Sciences (IAHS) publication 255. – Wallingford, 209–215
- VIVIROLI, D. (2007): Ein prozessorientiertes Modellsystem zur Ermittlung seltener Hochwasserabflüsse für unbeobachtete Einzugsgebiete der Schweiz. – *Geographica Bernensia* G77. Geographisches Institut der Universität Bern, Bern
- VIVIROLI, D., J. GURTZ & M. ZAPPA (2007): The Hydrological Modelling System PREVAH. – *Geographica Bernensia* P40. Institute of Geography, University of Berne, Bern
- VIVIROLI, D., H. MITTELBACH, J. GURTZ & R. WEINGARTNER (2009C): Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results. – *Journal of Hydrology* 377, 208–225
- VIVIROLI, D. & R. WEINGARTNER (2011): Prozessbasierte Hochwasserabschätzungen für 450 mesoskalige Einzugsgebiete des schweizerischen Rheineinzugsgebietes. Grundlagen und Interpretationshilfe zum Verfahren PREVAH-regHQ. – Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern
- VIVIROLI, D., M. ZAPPA, J. GURTZ & R. WEINGARTNER (2009A): An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing tools. – *Environmental Modelling & Software* 24, 1209–1222
- VIVIROLI, D., M. ZAPPA, J. SCHWANBECK, J. GURTZ & R. WEINGARTNER (2009B): Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part I: Modelling framework and calibration results. – *Journal of Hydrology* 377, 191–207
- WEINGARTNER, R. (1999): Regionalhydrologische Analysen – Grundlagen und Anwendungen. – *Beiträge zur Hydrologie der Schweiz* 37. – Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie, Bern
- WEINGARTNER, R., M. BARBEN & M. SPREAFICO (2003): Floods in mountain areas – an overview based on examples from Switzerland. – *Journal of Hydrology* 282, 10–24