Prozessbasierte Hochwasserabschätzung in ungemessenen mesoskaligen Einzugsgebieten der Schweiz : Langzeitsimulation unter Einsatz des hydrologischen Modellsystem PREVAH

Autor(en): **Viviroli, David / Weingartner, Rolf / Gurtz, Joachim**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **100 (2008)**

Heft 2

PDF erstellt am: **25.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-939696

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Prozessbasierte Hochwasserabschätzung in ungemessenen mesoskaligen Einzugsgebieten der Schweiz

Langzeitsimulation unter Einsatz des hydrologischen Modellsystems PREVAH

■ *Daniel Viviroli, Rolf Weingartner, Joachim Gurtz*

Zusammenfassung

Die Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in ungemessenen Einzugsgebieten stellt nach wie vor eine wichtige und herausfordernde Aufgabe in der Hydrologie dar. Bisher gelangten dafür in der Praxis vor allem empirische und stochastische Verfahren zum Einsatz.

Am Geographischen Institut der Universität Bern wurde nun der Ansatz der kontinuierlichen hydrologischen Simulation für eine Anwendung in ungemessenen Einzugsgebieten der Schweiz umgesetzt. Dazu wird das deterministische und prozessorientierte Modellsystem PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration Hydrotope Model) verwendet, um den Abfluss eines beliebigen mesoskaligen Gebietes in stündlicher Auflösung nachzubilden. Die resultierenden langjährigen Simulationen werden anschliessend mittels konventioneller Extremwertstatistik ausgewertet und führen zu einer Abschätzung der gewünschten Hochwasserabflüsse. Um die freien Modellparameter von PREVAH in Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen bestimmen zu können, musste ein Regionalisierungsverfahren entwickelt werden, welches auf einer Kombination von drei Parameterschätzmethoden basiert.

Eine Überprüfung in 49 repräsentativen Einzugsgebieten belegt die Eignung des hier vorgestellten Ansatzes. Während die Schätzqualität für 100-jährliche Spitzenabflüsse vergleichbar mit derjenigen empirischer und stochastischer Verfahren ist, wird durch die völlig andere Methodik ein wesentlicher Informationsgewinn für die Hochwasserabschätzung erreicht. Weiter liefert die Langzeitsimulation eine komplette mehrjährige Ganglinie des ungemessenen Gebietes, aus welcher zusätzliche relevante Informationen wie beispielsweise seltene Direktabflussvolumina abgeleitet werden können. Schliesslich bildet die Prozessorientierung des Modellsystems die Grundlage für Studien zum Hochwasserverhalten unter veränderten Rahmenbedingungen, womit unter anderem die Auswirkungen von Klima- oder Landnutzungsänderungen untersucht werden können. In einem bereits laufenden Folgeprojekt wird das erläuterte Schätzverfahren einem breiteren Anwenderkreis zugänglich gemacht.

1. Einleitung

Wesentlich ausgelöst durch die 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 stellte anstatt der bisher dominierenden wasserbaulichen «Gefahrenabwehr» einen Hochwasserschutz in den Vordergrund, bei welchem raumplanerische Massnahmen Vorrang haben und die Schutzziele differenziert nach Art der Raumnutzung festgelegt werden (BWG 2001). Die Ansprüche an die Bemessungsgrundlagen des Hochwasserschutzes sind damit wesentlich gestiegen; dabei sind Abschätzungen für Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Wiederkehrperiode an beliebigen Stellen entlang der Fliessgewässer eine unerlässliche Grundlage.

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, wenn es um die Hochwasserabschätzung in mesoskaligen Einzugsgebieten (ca. 10–1000 km^2) ging. Während die Abschätzung mittels Extremwertstatistik gut etabliert ist, kann sie nur in Gebieten mit langen Abflussmessreihen eingesetzt werden. Zudem vernachlässigt der Ansatz die von Ereignis zu Ereignis oftmals unterschiedlichen Entstehungsbedingungen (Diezig und Weingartner 2007). Für Gebiete ohne Abflussmessungen wurden bisher vor allem regionalhydrologische Ansätze wie Hüllkurven oder empirische Formeln eingesetzt (Barben 2003). Ihnen liegt die Idee zugrunde, hydrologische Grössen oder Parameter einfacher Modelle anhand von flächendeckend vorhandenen Gebietskennwerten zu bestimmen oder die vorhandenen Messungen auf ungemessene Räume zu übertragen. Eine Auswahl von gut untersuchten, für die Schweiz relevanten regionalhydrologischen Verfahren ist im Programmpaket HQx_meso_CH zusammengefasst und über eine sogenannte Praxishilfe (Spreafico et al. 2003) der praktischen Anwendung zugänglich. Damit können innert kurzer Zeit verschiedene Verfahren durchgerechnet werden, um das Resultat einzugrenzen. Man muss sich allerdings bewusst sein, dass Überlegungen zu hydrologischen Prozessen und zu den Vorbedingungen dabei nur stochastisch und nicht kausal berücksichtigt werden.

Der im Folgenden vorgestellte Ansatz zur Hochwasserabschätzung (Viviroli 2007) beruht auf dem Einsatz von Niederschlag-Abfluss-Modellen, mit denen eine kontinuierliche hydrologische Simulation über eine längere Dauer – im vorliegenden Fall über 20 Jahre – durchgeführt wird (siehe *Bild 1*). Sowohl Vorgeschichte wie auch Ereignisverlauf ergeben sich jeweils aus dem Modellantrieb (meteorologische Variablen), welcher wiederum auf konkreten Messwerten basiert. Die simulierten langen Reihen werden anschliessend mit konventioneller Extremwertstatistik ausgewertet. Verwendet man als Grundlage ein geeignetes prozessorientiertes hydro-

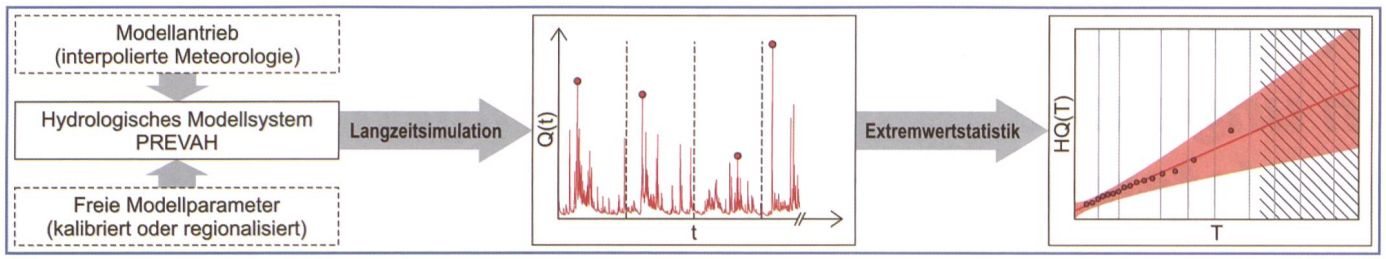

Bild 1. Prinzip der Hochwasserabschätzung mittels Langzeitsimulation.

logisches Modell, besteht gegenüber den erwähnten stochastischen Schätzverfahren eine Reihe von entscheidenden Vorteilen:

- Die problematische Verknüpfung von Extremniederschlägen mit Extremabflüssen gleicher Jährlichkeit ist nicht nötig; Intensitäten und Mengen 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 gesamte Abflussbildung durch das Modell simuliert wird.
- Die Randbedingungen (Vorfeuchte, Verlauf der Niederschlagsintensität) müssen nicht geschätzt werden; sie leiten sich in der Simulation jeweils vom meteorologischen Modellinput ab.
- Es resultiert nicht bloss ein Spitzenabflusswert, sondern eine komplette Ganglinie des Gebietsabflusses. Dadurch können weitere relevante Hochwasserkennwerte erhoben werden, wie etwa die Volumina des Direktabflusses oder die Überschreitungsdauer von Schwellenwerten. Die Wahl der Wiederkehrperiode ist grundsätzlich frei und lediglich gegen oben durch die dreifache Anzahl simulierter Jahre beschränkt (DVWK 1999).

Nachteilig ist vor allem der grosse Aufwand, welcher für die Modellierung nötig ist – dies betrifft sowohl die Aufbereitung der benötigten Daten wie auch das erforderliche Know-how. Zudem müssen im Normalfall Abflussmessungen zur Verfügung stehen, anhand welcher die freien Parameter des hydrologischen Modells kalibriert werden können. Ist dies nicht der Fall, muss versucht werden, diese Parameter über eine sogenannte Regionalisierung herzuleiten. Dieser Weg wurde in der Schweiz bisher noch nicht konsequent verfolgt, steht nun aber im Zentrum des hier vorgestellten Projektes.

Dies bedingt einen grossen Erfahrungsschatz aus der Kalibrierung gemessener Gebiete und gute Kenntnis des Anwendungsraumes. Genau dieser Weg der Langzeitsimulation mit Regionalisierung des Modells für ungemessene Gebiete wurde im hier vorgestellten Projekt nun aber verfolgt und zur erfolgreichen Anwendung gebracht.

2. Methodik

2.1 Das hydrologische Modellsystem

Als Grundlage für die Abflusssimulation wurde das deterministische hydrologische Modellsystem PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration Hydrotope Model) (Gurtz et al. 1997, Zappa 2002, Viviroli et al. 2007) verwendet. Es basiert auf einer Kaskade linearer Einzelspeicher (HBV-Typ, vgl. *Bild 2*) und besitzt spezifische Module für Schnee, Gletscher, Interzeption, Bodenfeuchte und Verdunstung, Abflussbildung sowie Abflusskonzentration. Für die Auswahl von Prevah im vorliegenden Projekt zur Hochwasserabschätzung sprechen vor allem auch die positiven Erfahrungen, die mit diesem Modellsystem in alpinen und voralpinen Gebieten gesammelt wurden (z.B. Gurtz et al. 1999 und 2003).

In der für diese Studie erstellten Version besitzt Prevah zwölf freie Modellparameter; zwei weitere kommen für vergletscherte Gebiete hinzu. Zur Kalibrierung dieser freien Parameter werden im Normalfall Abflussmessreihen benötigt. Weitere invariante Gebietsparameter werden von Prevah auf Grundlage des digitalen Höhenmodells (DHM) sowie weiterer digitaler Karten (u.a. Landnutzung und Bodeneigenschaften) festgelegt. Das Modellsystem wird im vorliegenden Anwendungsrahmen mit einer Rasterweite von 500 m × 500 m betrieben, wobei hydrologisch ähnliche Rasterzellen zu sogenannten Hydrotopen zusammengefasst werden.

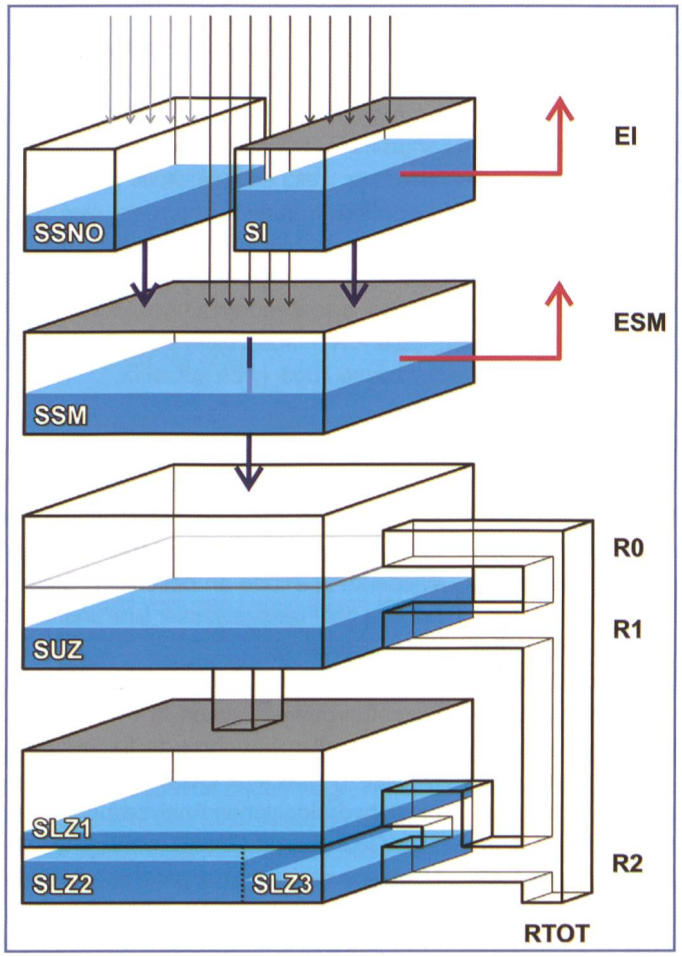

Bild 2. Struktur des hydrologischen Modellsystems PREVAH mit Speichermodulen (SSNO: Schneespeicher, SI: Interzeptionsspeicher, SSM: Bodenfeuchtespeicher, SUZ: Oberer Abflussspeicher, SLZ1–SLZ3: Basisabflussspeicher) und hydrologischen Flüssen (EI: Interzeptionsverdunstung, ESM: Bodenverdunstung, R0: Oberflächenabfluss, R1: Zwischenabfluss, R2: Basisabfluss, RTOT: Gesamtabfluss).

Als Basis für den Modellantrieb dienen stündlich gemessene Klimaparameter aus dem Messnetz der MeteoSchweiz, welche mit einem höhenabhängigen inversen Distanzgewichtungsverfahren interpoliert werden; der Anwendungszeitraum umfasst die Jahre 1984 bis 2003. Als Output 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^2. Für die Hochwasserextrapolation werden davon die Jahresspitzen der stündlichen simulierten Ganglinie verwendet.

2.2 Kalibrierung und Regionalisierung

Wie erwähnt besitzt Prevah freie Modellparameter, welche üblicherweise an gemessenen Abflussdaten kalibriert werden. Dies wurde als erster Schritt auch für die Entwicklung der vorliegenden Anwendung gemacht, und zwar für insgesamt 140 mesoskalige Einzugsgebiete der Alpennordseite *(Bild 3)*. Zu diesem Zweck wurde ein halbautomatisches Kalibrierungsverfahren implementiert, wobei mit dem Einbau von zusätzlichen auf Spitzenabflüsse sensitiven Gütemassen auch auf eine gute Wiedergabe der Hochwasserspitzen geachtet wurde (Viviroli 2007).

Für die Anwendung in ungemessenen Gebieten müssen die freien Modellparameter nun ohne Abstimmung auf Abflussmessungen geschätzt werden (Regionalisierung). Die Resultate der vorgängig durchgeführten Kalibrierungen dienen dabei als Datengrundlage. Ergänzt werden diese Informationen durch Angaben zu Physiographie, Landnutzung, Bodeneigenschaften, Geologie, Hydrogeologie und Klima der Gebiete; insgesamt wurden 80 solcher Gebietsattribute flächendeckend – also insbesondere auch für ungemessene Gebiete – erhoben. In der Folge sollen die Modellparameter mit Hilfe dieser Gebietsattribute geschätzt werden.

Konkret wird für die Regionalisierung eine Kombination von drei Verfahren eingesetzt *(Bild 4)*: Als Erstes werden die fünf Einzugsgebiete gesucht, welche dem zu regionalisierenden Zielgebiet am ähnlichsten sind. Die Modellparameter dieser Spendergebiete werden dann unverändert auf das Zielgebiet übertragen und jeweils für eine Abflusssimulation verwendet; der Median dieser fünf Simulationen bildet eine erste regionalisierte Ganglinie (Nearest-Neighbour-Verfahren). Als Zweites werden die Parameter 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). Als Drittes werden die Modellparameter aus Regressionsbeziehungen zu den flächendeckend verfügbaren Gebietsattributen hergeleitet und ebenfalls für eine kontinuierliche Simulation des Abflusses verwendet (Regressionsverfahren). Die Kombination dieser drei regionalisierten Simulationen geschieht, indem für jeden Zeitschritt der mediane Abfluss der drei simulieren Ganglinien ermittelt wird (kombiniertes Verfahren).

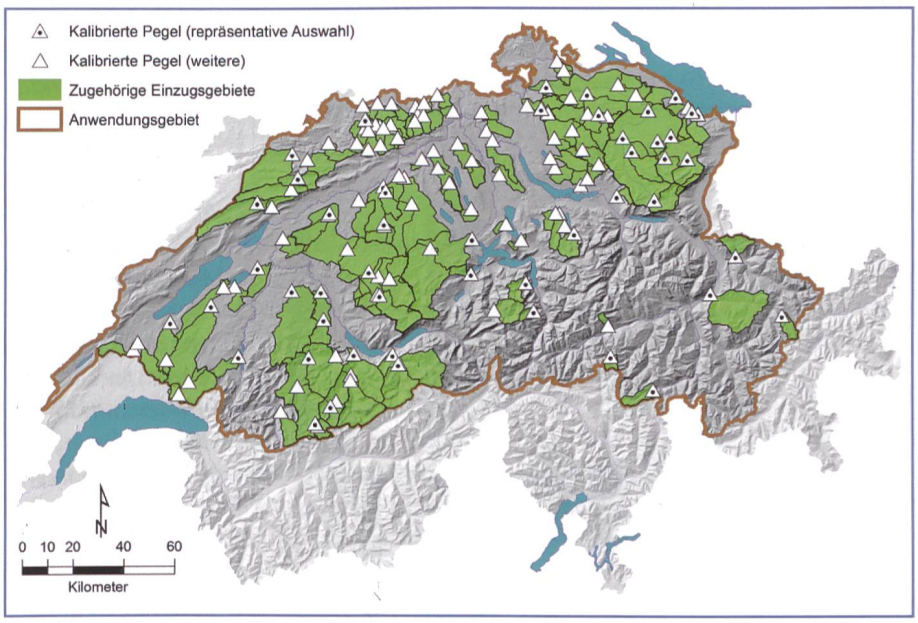

Bild 3. Für PREVAH kalibrierte mesoskalige Einzugsgebiete der Schweiz (n=140) als Grundlage für die Anwendung in ungemessenen Gebieten.

3. Resultate und Diskussion

Grundlage der nun folgenden Resultatbetrachtungen sind 49 repräsentative Einzugsgebiete mit langjährigen Messreihen (vgl. *Bild 3*); für diese Gebiete wurde auf Basis regionalisierter Modellparameter eine Langzeitsimulation im Stundenschritt (1984–2003) durchgeführt, um anschliessend die simulierten Jahreshochwasser extremwertstatistisch auszuwerten. Die Güte der Regionalisierung wird dabei mit Hilfe des sogenannten Jack-Knife-Prinzips beurteilt – dabei handelt es sich um eine Kreuzvalidierung mit Auslassen des jeweils gerade betrachteten Gebietes. Für das jeweils untersuchte Gebiet werden also weder Informationen aus der Kalibrierung noch aus Abflussmessungen verwendet.

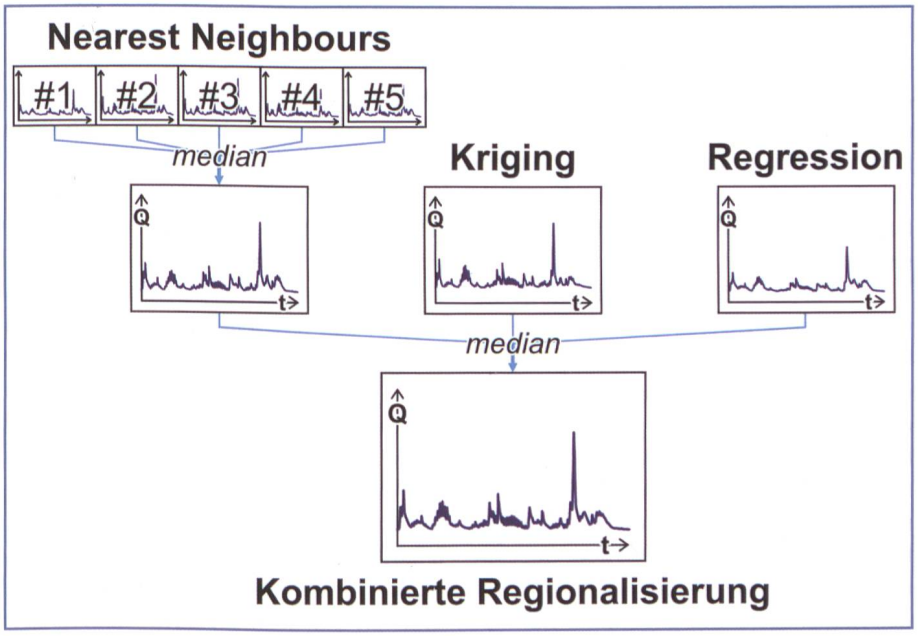

Bild 4. Kombination von drei Regionalisierungsverfahren zur Bestimmung der Abflussganglinie eines ungemessenen Einzugsgebietes.

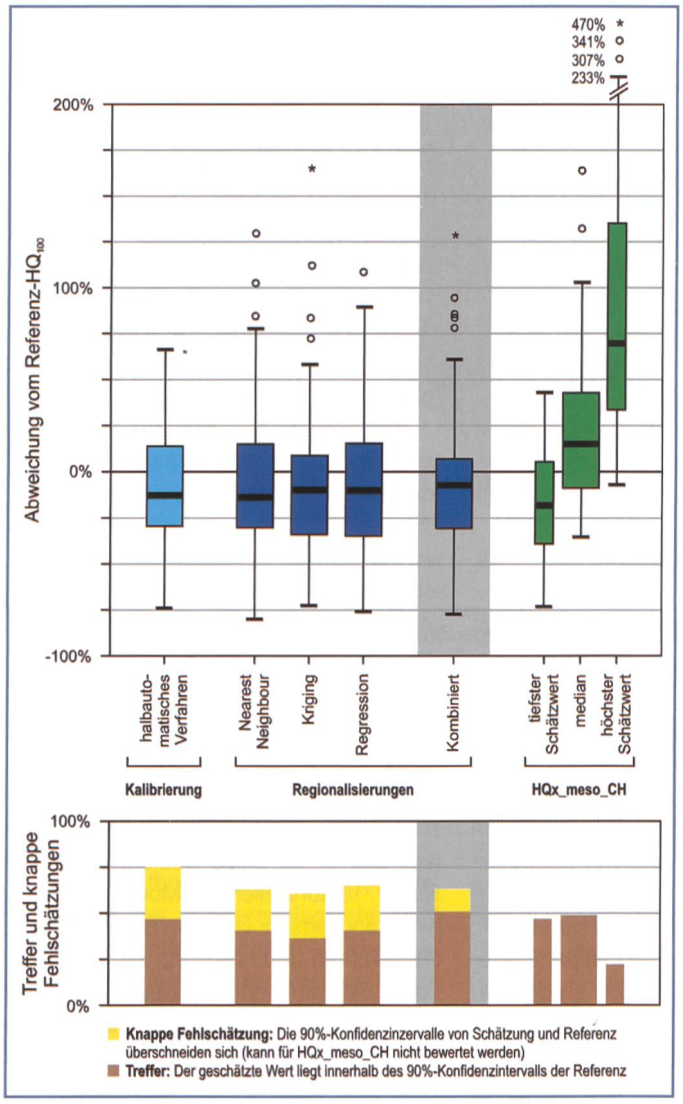

Bild 5. Schätzgüte für ein HQ_{100} bei Kalibrierung und Regionalisierung des Modells, bewertet auf Basis von 49 repräsentativen Einzugsgebieten. Oben: Abweichung von der Referenz, unten: Anteil Treffer und knappe Fehlschätzungen. Die für ungemessene Gebiete verwendete kombinierte Regionalisierung ist grau hinterlegt; zum Vergleich sind die entsprechenden Resultate von HQx_meso_CH angegeben.

3.1 Schätzgüte für ein HQ_{100}

Die Resultate der Hochwasserabschätzung werden im Folgenden anhand des Hochwassers mit einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren (HQ_{100}) aufgezeigt, da dieser Standardwert gut mit anderen Verfahren vergleichbar ist. Als Grundlage der Schätzung wurden stets die stündlichen Jahreshöchstwerte 1984–2003 verwendet, welche aus den simulierten Ganglinien herausgelesen wurden. Die Extrapolation aus der gleich langen und ebenfalls stündlich aufgelösten Reihe beobachteter Werte dient als Referenz.

Für jedes der 49 Gebiete wurde die prozentuale Abweichung von der Referenz bestimmt und daraus die mediane Abweichung berechnet. Anhand dieser Abweichung *(Bild 5, oben)* ist sowohl bei der kalibrierten Simulation wie auch bei den regionalisierten Simulationsvarianten eine moderate Tendenz zur Unterschätzung des HQ_{100} zu verzeichnen. Es ist aber deutlich erkennbar, dass sich die Schätzgüte bei der Regionalisierung gegenüber der Kalibrierung kaum verschlechtert. Die beste Variante für die Anwendung in ungemessenen Gebieten (kombinierte Regionalisierung, grau hinterlegt) weist einen medianen Schätzfehler von lediglich -7% auf. Der Schätzfehler eines HQ_{100} liegt dabei für die Hälfte der 49 betrachteten repräsentativen Einzugsgebiete zwischen -31% und +7% (Interquartilsbereich). Bemerkenswert ist, dass pro Regionalisierungsverfahren jeweils nur wenige Ausreisser gegen oben zu verzeichnen sind; damit zeigt sich, dass Ausreisser kein grundsätzliches Problem sind. Deutliche Überschätzungen können allenfalls auftreten, wenn aussergewöhnliche Bedingungen das Hochwassergeschehen prägen, beispielsweise Ausuferungen (Gürbe–Belp) oder Karsteinfluss (Suze–Sonceboz).

Die Betrachtungen zum Schätzfehler lassen sich weiter konkretisieren und direkt in Bezug zur Praxis setzen, wenn die Anzahl getroffener und knapp verfehlter Schätzungen untersucht wird *(Bild 5, unten)*. Von einem Treffer wird gesprochen, wenn der aus der Simulation geschätzte Wert im statistischen 90%-Konfidenzintervall des aus der Beobachtung extrapolierten Referenz-HQ_{100} liegt; dies kann als sehr gutes Resultat bezeichnet werden, wenn es sich wie bei der Regionalisierung um eine Schätzung ohne Kalibrierung des Modells handelt. Bei einer knappen Fehlschätzung überschneiden sich zumindest die Konfidenzintervalle von Simulation und Referenz, was als immer noch befriedigend eingestuft wird. Betrachtet man die Treffer und die knappen Fehlschätzungen zusammen, kann der in der Kalibrierung erreichte Anteil von 76% befriedigender Resultate für die Regionalisierung nicht ganz erreicht werden; für ungemessene Gebiete beträgt der Anteil aber immer noch 65%. Beim Anteil Treffer (sehr gute Schätzungen) alleine zeigt die kombinierte Regionalisierung mit 51% allerdings vielversprechende Resultate.

3.2 Vergleich mit HQx_meso_CH

Interessant ist nun der Vergleich des hier vorgestellten Ansatzes mit den Schätzwerten von HQx_meso_CH (Spreafico et al. 2003). Dazu werden in HQx_meso_CH – wiederum für die 49 repräsentativen Gebiete – diejenigen fünf Verfahren angewendet, mit welchen ein HQ_{100} geschätzt werden kann. Dabei ergeben sich die folgenden Resultate:

Bezüglich Schätzfehlern ist hier eine Neigung zur Überschätzung festzustellen *(Bild 5, oben rechts)*: Betrachtet man von den fünf für die Schätzung eines HQ_{100} zur Verfügung stehenden Verfahren jeweils dasjenige mit dem medianen Schätzwert, resultiert für die 49 betrachteten Gebiete ein Fehler von +15,1% (Median der Abweichungen). Augenfällig ist die Überschätzung beim jeweils höchsten Schätzwert von HQx_meso_CH, welcher eine stark nach oben ausgedehnte Spannweite besitzt (+233%) und in einem Extremfall das Referenz-HQ_{100} um 470% überschätzt. Der Anteil getroffener Schätzungen *(Bild 5, unten rechts)* von 47% beim medianen Schätzwert von HQx_meso_CH ist jedoch wiederum vergleichbar mit den Resultaten der verschiedenen Simulationen. Die knappen Fehlschätzungen lassen sich nicht beurteilen, da bei HQx_meso_CH kein vergleichbares Konfidenzintervall zur Verfügung steht.

Insgesamt schneiden die Schätzungen mit HQx_meso_CH bemerkenswert gut ab; eine relevante Problematik besteht aber beim grossen Schwankungsbereich, welchen die im Programmpaket implementierten Schätzverfahren ergeben. Von daher erscheint es äusserst sinnvoll, die Werte von HQx_meso_CH gemeinsam mit der neuen prozessorientierten Methode für die Schätzung zu verwenden, da dadurch

robuste Informationen aus einer gänzlich anders aufgebauten Verfahrensfamilie eingebracht werden können. Zusätzlich bietet die prozessorientierte Schätzung eine komplette Ganglinie mit entsprechenden Auswertungsmöglichkeiten.

3.3 Anwendungsskala

Die Erfahrung zeigt, dass sich die Modellierung von Spitzenabflüssen – und damit auch die Hochwasserabschätzung – in kleinen Einzugsgebieten schwieriger gestaltet. Dies lässt sich für die vorliegende Modellanwendung anhand von *Bild 6* bestätigen, wo für die kombinierte Regionalisierung Schätzfehler und Gebietsgrösse gegenübergestellt sind. So sind in den untersuchten Gebieten mit einer Fläche von weniger als 40 km^2 ausschliesslich Unterschätzungen des HQ_{100} zu verzeichnen, bei weniger als 25 km^2 relativ deutliche. Bei mittelgrossen Gebieten (Skalenbereich zwischen 25 und 750 km^2) ist zwar eine recht grosse Spannweite der Schätzfehler zu verzeichnen, der Interquartilsbereich ist jedoch identisch mit der oben erfolgten Gesamtbetrachtung und beträgt ebenfalls -31% bis +7%; der mediane Schätzfehler für ein HQ_{100} vermindert sich jedoch auf +3,6%. Die drei grössten betrachteten Gebiete (das Grösste davon die Thur bei Andelfingen mit 1696 km^2) weisen sehr geringe Schätzfehler auf, was auf vorteilhafte Ausmittelungseffekte in diesem Skalenbereich zurückzuführen sein dürfte. Für Gebiete von mehr als 2000 km^2 sollten dann aber die einzelnen Teilgebiete gesondert betrachtet und allenfalls mittels eines Routings zusammengeführt werden.

3.4 Abschätzung seltener Direktabflussvolumina

Wie schon angedeutet, ist es mit dem hier vorgestellten Modellkonzept auch möglich, seltene Direktabflussvolumina für ungemessene Gebiete abzuschätzen – eine wichtige wasserbauliche Grösse, welche von den bestehenden Verfahren kaum berücksichtigt wird. Die Auswertung der Langzeitsimulation betrifft dann nicht die Spitzenabflüsse, sondern die Durchflussvolumina.

Entsprechende Untersuchungen für das hier vorgestellte Modellsystem wurden auf Basis von täglichen Direktabflussvolumina durchgeführt, und zwar ebenfalls für die 49 repräsentativen Gebiete. Der mediane Schätzfehler für ein hundertjährliches Direktabflussvolumen (HV_{100}) beträgt beim kalibrierten Modell +7%, beim regionalisierten Modell (Anwendung in ungemessenen Gebieten) +5%, und es werden Trefferquoten (siehe oben) von 73% resp. 67% erreicht. Diese Ergebnisse belegen, dass sich mit dem Modellsystem auch seltene Direktabflussvolumina gut abschätzen lassen (vgl. *Bild 7*).

4. Fazit und Ausblick

Die Resultate belegen, dass es dank des hier vorgestellten Modellsystem möglich ist, seltene Hochwasserabflüsse in ungemessenen Einzugsgebieten der Schweiz mittels Langzeitsimulation abzuschätzen. Die Schätzfehler sind vertretbar und bewegen sich im Bereich der etablierten empirischen und stochastischen Verfahren. Somit darf vom hier entwickelten Modellsystem ein wichtiger Beitrag zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in ungemessenen Gebieten erwartet werden. Insbesondere weil die hier vorgestellte Methode auf völlig anderen Voraussetzungen basiert als alle bisherigen Verfahren, kann ein wesentlicher Informationsgewinn für die Hochwasserabschätzung in mesoskaligen Gebieten erreicht werden. Zudem sind nicht nur Schätzwerte für die Spitzenabflüsse verfügbar, sondern vollständige Ganglinien, wodurch beispielsweise auch seltene Direktabflussvolumina abgeschätzt werden können. Über eine Verlängerung des meteorologischen Antriebes (z. B. durch Einsatz eines Wettergenerators) besteht zudem die Möglichkeit, die Zuverlässigkeit der Schätzung zu vergrössern und noch seltenere Hochwasser abzuschätzen.

Ein weiterer Vorteil des beschriebenen Systems ist die Flexibilität von Mo-

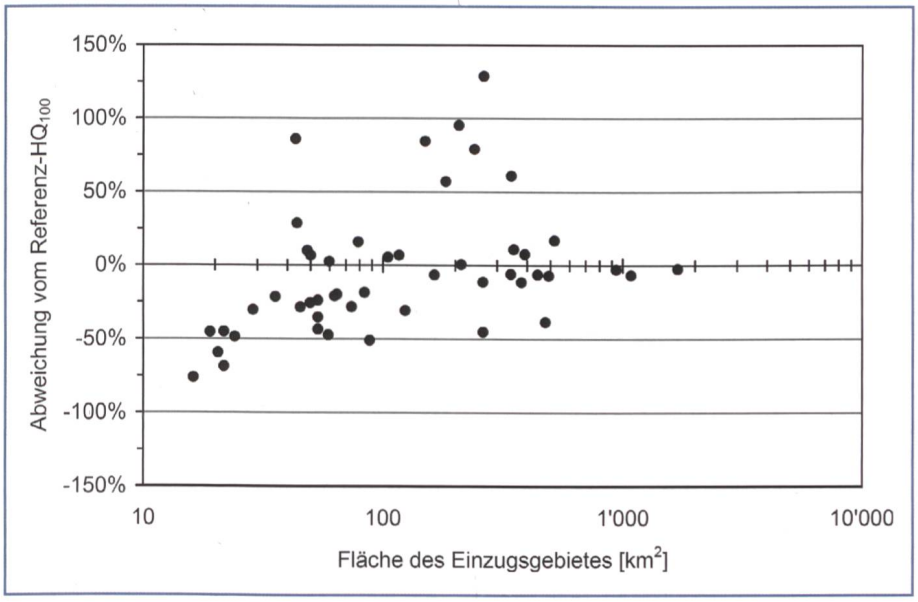

Bild 6. Gegenüberstellung des Schätzfehlers für ein HQ_{100} und der Gebietsgrösse.

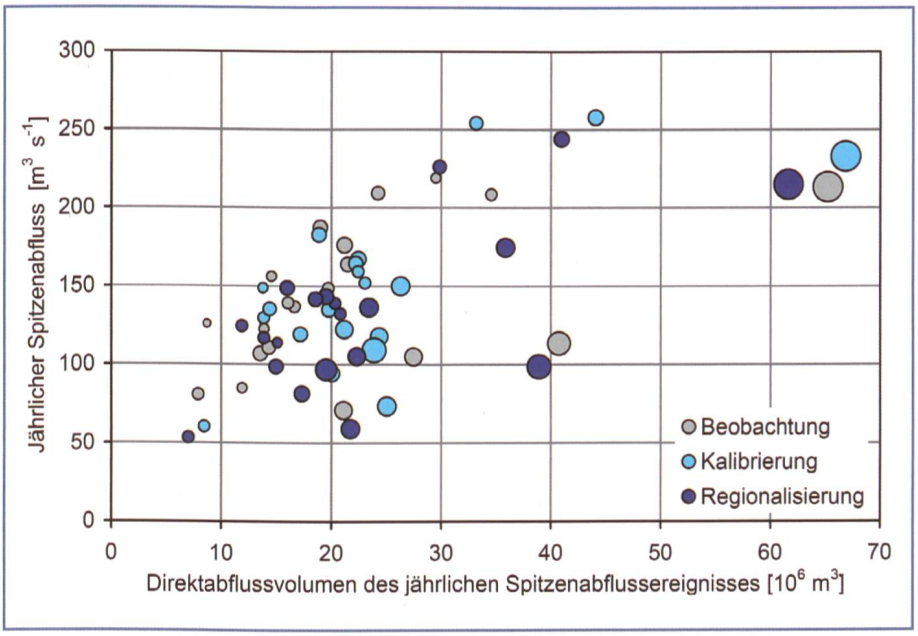

Bild 7. Jährliche Spitzenabflüsse und zugehörige Direktabflussvolumina für die Kleine Emme bei Littau auf Basis täglich aufgelöster Daten. Die Grösse der Signatur ist proportional zur Ereignisdauer.

dellantrieb und Modellparametrisierung. Es ist nun möglich, sowohl im Bereich der Meteorologie und Klimatologie wie auch im Bereich der Abflussbildung Szenarien und Sensitivitätsanalysen durchzuführen. Denkbar sind beispielsweise Studien zur Klimaänderung oder zur Landnutzungsänderung, wie auch Betrachtungen über hypothetische Niederschlagsverläufe (Worst-Case-Studien, z.B. Schwanbeck et al. 2007). Neben der eigentlichen Abflussantwort des Gebietes sind dabei wiederum zeitlich und räumlich differenzierte Werte der Wasserhaushaltsgrössen verfügbar. Grundlage für alle derartigen Studien ist die Prozessorientierung von PREVAH. Diese führt zwar zu einigem Aufwand in der Parameterbestimmung, lässt es dafür aber zu, hydrologisch sinnvolle Gebietsantworten auf vielfältige Modifikationen der Rahmenbedingungen zu simulieren.

Die Weiterentwicklung des hier vorgestellten Verfahrens bezieht sich vor allem auf die Praxistauglichkeit; als nächster Schritt wird das Schätzverfahren einem breiteren Kreis von Anwendern zugänglich gemacht. Parallel dazu entsteht in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) ein aufdatierter Bericht zur Hochwasserabschätzung in der Schweiz.

Dank

Das hier beschriebene Schätzverfahren wurde im Rahmen einer vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanzierten Dissertation ausgearbeitet; auf Seiten des BAFU wurde das Projekt von Manfred Spreafico begleitet. Massimiliano Zappa steuerte wichtige Grundlagen zur Erweiterung und Kalibrierung des Modellsystems PREVAH bei. Beiträge zu Kalibrierung, Regionalisierung und Anwendung lieferten Massimo Corti, Gion Decurtins, Daniel Gasser, Philipp Flach, Heidi Mittelbach, Jan Schwanbeck und Christof Sonderegger.

Literatur

Barben, M., 2003: Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in der Schweiz. Geographica Bernensia, G71, Bern

BWG [Bundesamt für Wasser und Geologie], 2001: Hochwasserschutz an Fliessgewässern. Wegleitungen des BWG, Biel.

Diezig, R. und *R. Weingartner*, 2007: Hochwasserprozesstypen – Schlüssel zur Hochwasserabschätzung. Wasser und Abfall, 4, 18–26.

DVWK [Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau], 1999: Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Nr. 251, Bonn.

Gurtz, J., Baltensweiler, A., Lang, H., Menzel, L. und *J. Schulla*, 1997: Auswirkungen von klimatischen Variationen auf den Wasserhaushalt und Abfluss im Flussgebiet des Rheins. Nationales Forschungsprogramm 31: Klimaänderungen und Naturkatastrophen, Abschlussbericht, Zürich.

Gurtz, J., Baltensweiler, A. und *H. Lang*, 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. und *T. Vitvar*, 2003: A comparative study in modelling runoff and its components in two mountainous catchments. Hydrological Processes, 17, 297–311.

Schwanbeck, J., Viviroli, D. und *R. Weingartner*, 2007: Das Hochwasser vom August 2005: Könnte es noch schlimmer kommen? Geosciences Actuel, 4/2007, 12–15.

Spreafico, M., Weingartner, R., Barben, M. und *A. Ryser*, 2003: Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten – Praxishilfe. Berichte des BWG, Serie Wasser, Nr. 4, Bern.

Viviroli, D., 2007: Ein prozessorientiertes Modellsystem zur Ermittlung seltener Hochwasserabflüsse für ungemessene Einzugsgebiete der Schweiz. Geographica Bernensia, Band G77, Bern, ISBN 978-3-905835-00-7.

Viviroli D., Gurtz J., und *M. Zappa*, 2007: The Hydrological Modelling System PREVAH. Geographica Bernensia, Band P40, Bern, ISBN 978-3-905835-01-0.

Zappa, M., 2002: Multiple-Response Verification of a Distributed Hydrological Model at Different Spatial Scales. Diss. Naturwiss. ETH Zürich, No. 14895.

Anschrift der Verfasser

Dr. *Daniel Viviroli*, Prof. Dr. *Rolf Weingartner*
Geographisches Institut der Universität Bern
Hallerstrasse 12, CH-3012 Bern
Doz. Dr. habil. *Joachim Gurtz*
Institut für Atmosphären- und Klimawissenschaft der ETH Zürich
Universitätsstrasse 16, CH-8092 Zürich.
viviroli@giub.unibe.ch