

Modellierung von Hochwasser in alpinen Regionen



Prof. Dr. Günter Blöschl
bloeschl@hydro.tuwien.ac.at
DW 22315



Dr. Ralf Merz
merz@hydro.tuwien.ac.at
DW 22312



DI Christian Reszler
reszler@hydro.tuwien.ac.at
DW 22317



DI Jürgen Komma
komma@hydro.tuwien.ac.at
DW 22311



Dr. Juraj Parajka
parajka@hydro.tuwien.ac.at
DW 22311

Technische Universität Wien
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Karlsplatz 13/222
1040 Wien
Tel: +43-1-58801-DW: siehe oben; Fax: +43-1-58801-22399

Bei der hydrologischen Modellierung von Hochwässern stand bisher oft die Aneichung an beobachtete Abflussganglinien im Vordergrund. Während dies ein wichtiger Schritt in der Modellierung ist, ist es zusätzlich notwendig, Informationen über die beobachteten hydrologischen Prozesse im Gebiet in die Modellierung einfließen zu lassen, um die Extrapolation auf bisher nicht beobachtete Zustände (z. B. Extremhochwässer) gültig zu beschreiben. Dies ist besonders in alpinen Regionen notwendig, in denen das hydrographische Messnetz oft nicht so dicht ist wie im Flachland. Im vorliegenden Beitrag wird an Hand von drei Beispielen dargestellt, wie man derartige Prozessinformationen in die Modellierung einfließen lassen kann: Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten für 26000 km des österreichischen Flussnetzes; Abflussmodellierung für die operationelle Hochwasservorhersage am Kamp; Schneemodellierung im Hochschwabgebiet.

1 Einleitung

Die am Gebietsauslass beobachtete Abflussganglinie liefert eine integrale Information über die im Gebiet ablaufenden hydrologischen Prozesse. Nicht die gesamte Punktinformation (z. B. Bodeneigenschaften) wirkt sich auf der Gebietskala aus, da sich ein Teil dieser kleinräumigen Variabilität ausmittelt [1]. Umgekehrt ist das räumlich mittlere Verhalten für die Gebietskala essentiell und kann durch Punktmessungen nicht vollständig beschrieben werden. Deshalb ist die beobachtete Abflussganglinie die wichtigste Informationsquelle, um zutreffende Modelle des Abflussprozesses zu erstellen. Dementsprechend stand in der bisherigen Praxis der hydrologischen Modellierung von Hochwässern die Aneichung an beobachtete Abflüsse im Vordergrund. Bei statistischen Methoden besteht die Aneichung aus der Anpassung der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve an beobachtete Hochwasserscheitel. Bei der deterministischen Niederschlag-Abflussmodellierung besteht die Aneichung aus einer Parameteroptimierung durch Vergleich der beobachteten mit der simulierten Abflussganglinie. Während solche Optimierungsmethoden ohne Zweifel ein wichtiger Bestandteil der hydrologischen Modellierung von Hochwässern sind, ist damit zu rech-

nen, dass derartig bestimmte Parameter zwar den für die Optimierung herangezogenen Datensatz (in der definierten Weise) optimal beschreiben, Extrapolationen allerdings nur eingeschränkt zulassen. Die Extrapolation bei Hochwässern betrifft vor allem die Modellierung extremer Hochwässer, die größer als die bisher im Gebiet beobachteten sind. Die Extrapolation betrifft auch andere Prozessstypen (beispielsweise Regen-auf-Schnee-Ereignisse), wenn solche Hochwassertypen im betreffenden Gebiet noch nicht beobachtet worden sind. Für die Bestimmung des Hochwasserrisikos, für Bemessungszwecke und für Hochwasservorhersagen sind aber derartige Extrapolationen unerlässlich. Dies ist besonders in alpinen Regionen notwendig, in denen das hydrographische Messnetz oft nicht so dicht ist wie im Flachland, bzw. die hydrographischen Messreihen kürzer sind.

Eine Möglichkeit, die Extrapolationsfähigkeit von Modellen zu verbessern, besteht darin, die Modellierung auf *die im jeweiligen Gebiet ablaufenden* hydrologischen Prozesse abzustellen [5]. Die Betonung liegt dabei auf der Formulierung „*im jeweiligen Gebiet ablaufend*“, da es bei der Hochwassermodellierung nicht darum geht, die überhaupt möglichen Prozesse wiederzugeben, sondern nur solche, die im jeweiligen Gebiet wirksam sind bzw. wirksam sein können [2]. Daraus ergibt sich ein gewisses Dilemma in der Hydrologie, das daraus besteht, dass physikalisch fundierte Modelle auf Basis von Laborgleichungen meist nicht genauer sind als Modelle auf Basis von empirischen Beziehungen [3]. Dies liegt eben daran, dass die Prozesse *im jeweiligen Gebiet* zu beschreiben sind, nicht solche, die in irgendeinem anderen Gebiet auftreten können. Ein Beispiel ist der schnelle Abfluss durch Makroporen und andere bevorzugte Wasserwegigkeiten, der im Labor i. A. nicht im gleichen Ausmaß wie in der Natur beobachtet werden kann [17]. Informationen über die hydrologischen Prozesse im Gebiet können vielgestaltig sein. Neben den konventionellen Informationen über Topographie, Landnutzung und Bodeneigenschaften sind

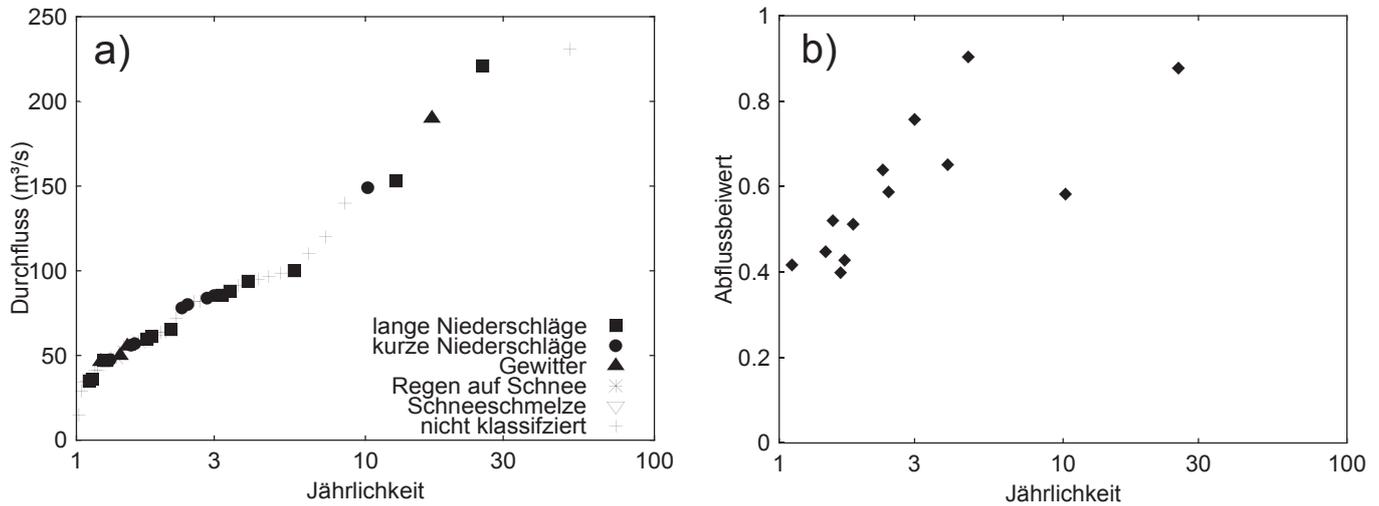


Bild 1 (a) Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve für den Pegel Almdorf an der Fieberbrunner Ache, Tirol (165,3 km² Einzugsgebietsfläche) mit Prozesstypen der Hochwässer. (b) Ereignisabflussbeiwerte eines Teiles der Hochwässer aus (a).

insbesondere *dynamische* Kenngrößen der Wasserbewegung von Interesse, die im Gebiet beobachtet werden. Im vorliegenden Beitrag wird an Hand von drei Beispielen dargestellt, wie man derartige Prozessinformationen in die Hochwassermodellierung einfließen lassen kann.

2 Statistische Hochwassermodellierung – HORA

Im ersten Beispiel handelt es sich um die Bestimmung von Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeiten im Rahmen des HORA Projektes (HochwasserRisikozonierung Austria, [11]). Die Grundlage der Auswertungen bildeten die Beobachtungsdaten der maximalen jährlichen Abflüsse an den Pegeln in Österreich. Daraus wurden die statistischen Kenngrößen der Verteilungsfunktionen geschätzt. Während dies traditionell bereits das Endergebnis ist, ist es im vorliegenden Ansatz nur der erste Schritt einer viel umfangreicheren Vorgangsweise, bei der zahlreiche zusätzliche Informationen verwendet wurden.

Zur Beurteilung der Entstehungsmechanismen der Hochwässer wurden die Prozesstypen herangezogen, die [8] für etwa 12000 Hochwasserereignisse in Österreich klassifizierten. Für einen Pegel in Tirol ist in Bild 1a zu erkennen, dass die größten Hochwässer meist auf lange Niederschläge zurückzuführen sind und der Einfluss der Schneeschnmelze nur bei den kleineren Hochwässer wirksam wird. Ereignisabflussbeiwerte, die [9] für etwa 50000 Ereignisse in Österreich auswerten, wurden ebenfalls herangezogen. In Bild 1b ist zu erkennen, dass die Abflussbeiwerte mit der Größe des Ereignisses zunehmen. Eine Ausnahme ist das Ereignis mit einer Jährlichkeit von 10 Jahren, das einen Hochwasserscheitel von 150 m³/s und einen Abflussbeiwert von 0,6 besitzt, während die anderen Ereignisse dieser Größenordnung einen Abflussbeiwert von 0,9 besitzen. Dieser Unterschied ist durch den Prozesstyp zu erklären – kurze Niederschläge im Fall des zehnjährlichen Ereignisses und lange Niederschläge bei den anderen Ereignissen. Die Abflussbeiwerte werden zur besseren Einschätzung des Extrapolationsverhaltens herangezogen, da die Form der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve eng mit der Größe der Abflussbeiwerte zusammenhängt. Im konkreten Fall ist zu erwarten, dass die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve im Bereich von

Jährlichkeiten zwischen ca. 5 und 50 Jahren wegen des Anstieges der Abflussbeiwerte stark ansteigt, danach aber abflacht. Diese Abhängigkeiten können mit Methoden der abgeleiteten Hochwasserstatistik genauer quantifiziert werden, bei denen die Hochwasserstatistik aus der Niederschlagsstatistik berechnet wird [10, 15]. Auch die Gebietskenntnis, etwa aus Begehungen, kann zur Einschätzung des Extrapolationsverhaltens beitragen. Weitere Kenngrößen sind die Form der größten Hochwasserwelle und die Einschätzung der Jährlichkeit des größten beobachteten Hochwassers durch einen regionalen Vergleich. Im HORA Projekt wurden diese Informationen für jeden Pegel zusammengeführt und durch Abwägung der Aussagekraft der einzelnen Informationsquellen die n-jährlichen Hochwässer eingeschätzt.

Zur Bestimmung von Hochwasserabflüssen zwischen den Pegeln wurden die Hochwasserkennwerte der Pegel regionalisiert. Hierzu wurde das Kriging Verfahren dahingehend erweitert, Ober- und Unterliegergebiete topologisch korrekt einzubeziehen [16]. Auch lokale Effekte wie Seeinfluss wurden berücksichtigt. Ein Beispiel für die regionalen Auswertungen ist in Bild 2 gezeigt. Um die Hochwasserspenden unterschiedlicher Einzugsgebietsflächen vergleichbar zu machen, wurden in dieser Abbildung die Hochwasserspenden auf eine nominale Einzugsgebietsfläche von 100 km² normiert mit $Hq_N = (A \cdot 100^{-1})^\alpha Hq$ wobei Hq_N die normierte Hochwasserspende für eine Bezugsfläche von 100 km², die Hochwasserspende für die Gebietsfläche A und α der Exponent der Flächenreduktion ist, der zwischen 0,25 und 0,4 liegt. Der Exponent ist im Mittel für Österreich 0,33.

3 Deterministische Hochwassermodellierung – Kamp

Im zweiten Beispiel war die Zielsetzung, die Abflussprozesse im Kampgebiet mit Hilfe eines flächendifferenziierten Abflussmodells möglichst genau zu beschreiben [14]. Entsprechend der Philosophie, möglichst umfangreiche Informationen über die Prozesse zu verwenden, wurde eine Vorgangsweise entwickelt, die daraus besteht, in detektivischer Arbeit alle zugänglichen Belege für das hydrologische Verhalten zu sammeln und daraus eine Modellvorstellung über die Funktion des hydrologischen Systems

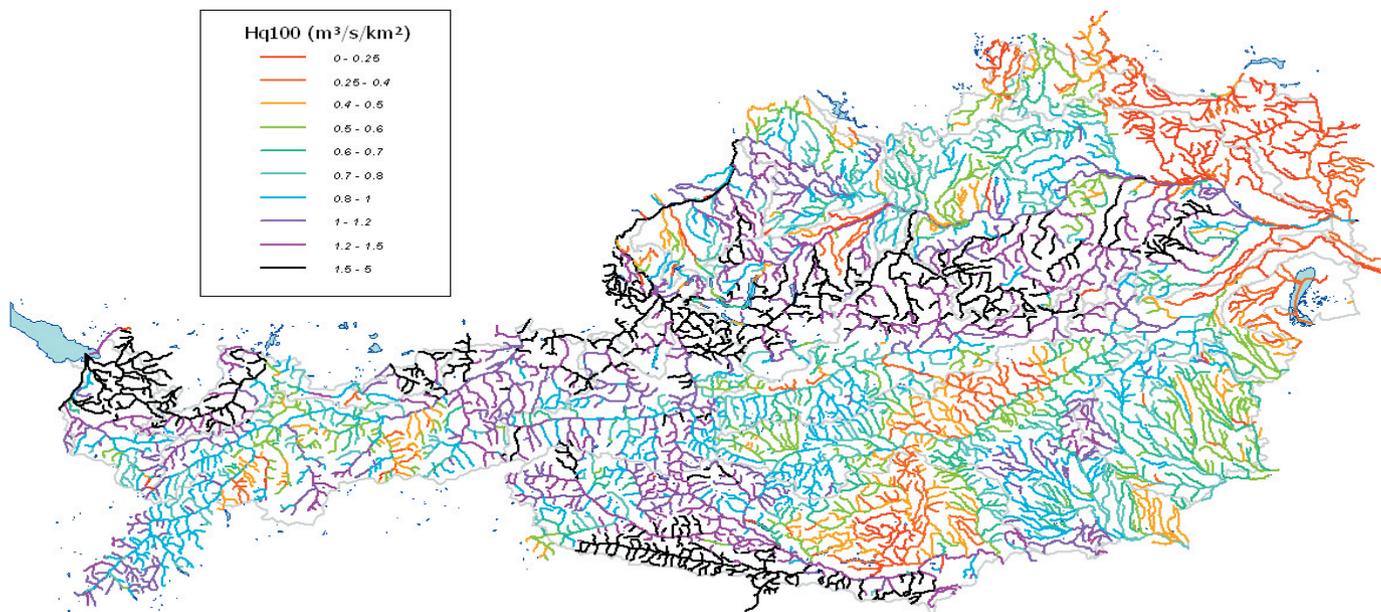


Bild 2 Normierte hundertjährige Hochwasserspende Hq_N ($m^3/s/km^2$). Aus [11].

für unterschiedliche Situationen abzuleiten. Diese Belege unterscheiden sich je nach dem zu beschreibenden Prozess.

Die Parameter des Abflussmodells wurden für jedes Pixel manuell festgelegt auf Basis von Voranalysen von beobachteten Abfluss- und Grundwasserganglinien und Feldbegehungen. Als Beispiel zeigt Bild 3 den Vergleich der beobachteten Wasserstände der Taffa und der beobachteten Grundwasserstände in der Nähe der Taffa mit den simulierten Speicherständen des tiefen Bodenspeichers und des Grundwasserspeichers des Modells. Die Dynamik der simulierten Speicherstände ist ähnlich der beobachteten Grundwasserdynamik. Interessant in der Abbildung ist auch die Grundwasseranreicherung beim Hochwasserereignis 1996, dem eine starke Schneeschmelze vorangegangen ist. Für unterschiedliche Ereignisgrößen und Ereignistypen (z. B. advektiv, konvektiv, Schneeschmelze, Regen auf Schnee) wurde die Gebietsreaktion untersucht. Eine Analyse auf Basis der jahreszeitlichen Variabilität ergab Belege für die Größe der Verdunstungsparameter und der Perkolationsparameter, eine Analyse der Wellenform und des Wellenvolumens auf Ereignisbasis ergab Belege für das Verhalten der rascher reagierenden Systemkomponenten. Die Plausibilität des Modells wurde durch eine Beurteilung der simulierten räumlichen Muster getestet. So wurde etwa die Plausibilität der räumlichen Verteilung des Oberflächenabflusses für unterschiedliche Situationen beurteilt im Vergleich zur Auskunft von Ortskundigen und eigenen Begehungen. Bild 4 zeigt als Beispiel Karten des simulierten Oberflächenabflusses zu Beginn eines großen Ereignisses und während desselben Ereignisses (siehe [6]). Am Beginn des Ereignisses tragen vor allem die versiegelten Flächen und die gewässernahen Flächen im Nordwesten des Gebietes zum Oberflächenabfluss bei, während im restlichen Gebiet der Oberflächenabfluss sehr klein ist. Im Laufe des Ereignisses verschiebt sich die räumliche Verteilung. 18 Stunden später sind die Niederschlagsintensitäten etwas geringer. Dementsprechend ist der Oberflächenabfluss auf den versiegelten Flächen geringer. Zusätzliche

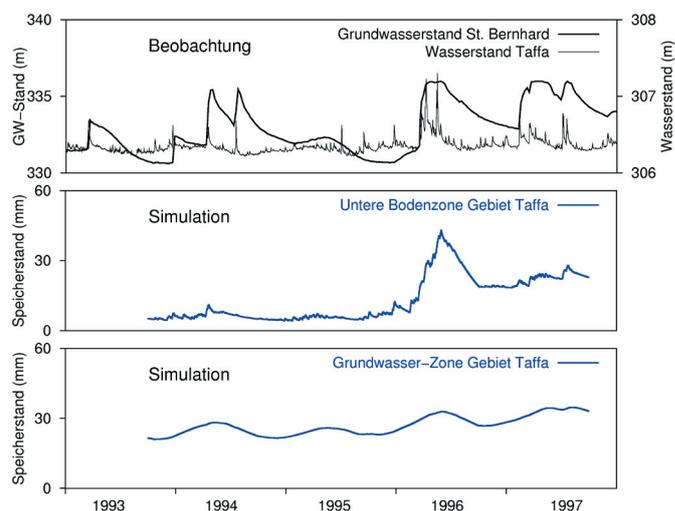


Bild 3 Vergleich beobachteter und simulierter Grundwasserstände im Gebiet der Taffa. Aus [14].

Flächen tragen aber jetzt zum Oberflächenabfluss bei, vor allem die Gräben und bei fortwährendem Ereignis auch das Hügelland im Westen. Das Verschieben der Abflussmuster während des Ereignisses entspricht der Vorstellung über das Abflussverhalten, das aus den Feldbegehungen gewonnen wurde.

Die Modellerstellung auf Basis von Belegen erfordert einen großen Arbeitsaufwand. Dieser Arbeitsaufwand besteht nicht in der Durchführung zahlreicher Simulationen und Minimierung einer Zielfunktion (wie etwa in [12]), sondern in einer detaillierten hydrologischen Interpretation und Argumentation der Konzeptionen. Vorwissen über die Eigenschaften hydrologischer Prozesse ist dafür Voraussetzung. Dieser Einsatz wird als notwendig erachtet, um die Modellstruktur und Modellparameter in einer plausiblen Weise zu bestimmen und damit ein für unterschiedliche Situationen zutreffendes Modell zu erhalten. Das Modell wird seit dem Frühjahr 2006 zur operationellen Hochwasservorhersage am Kamp verwendet.

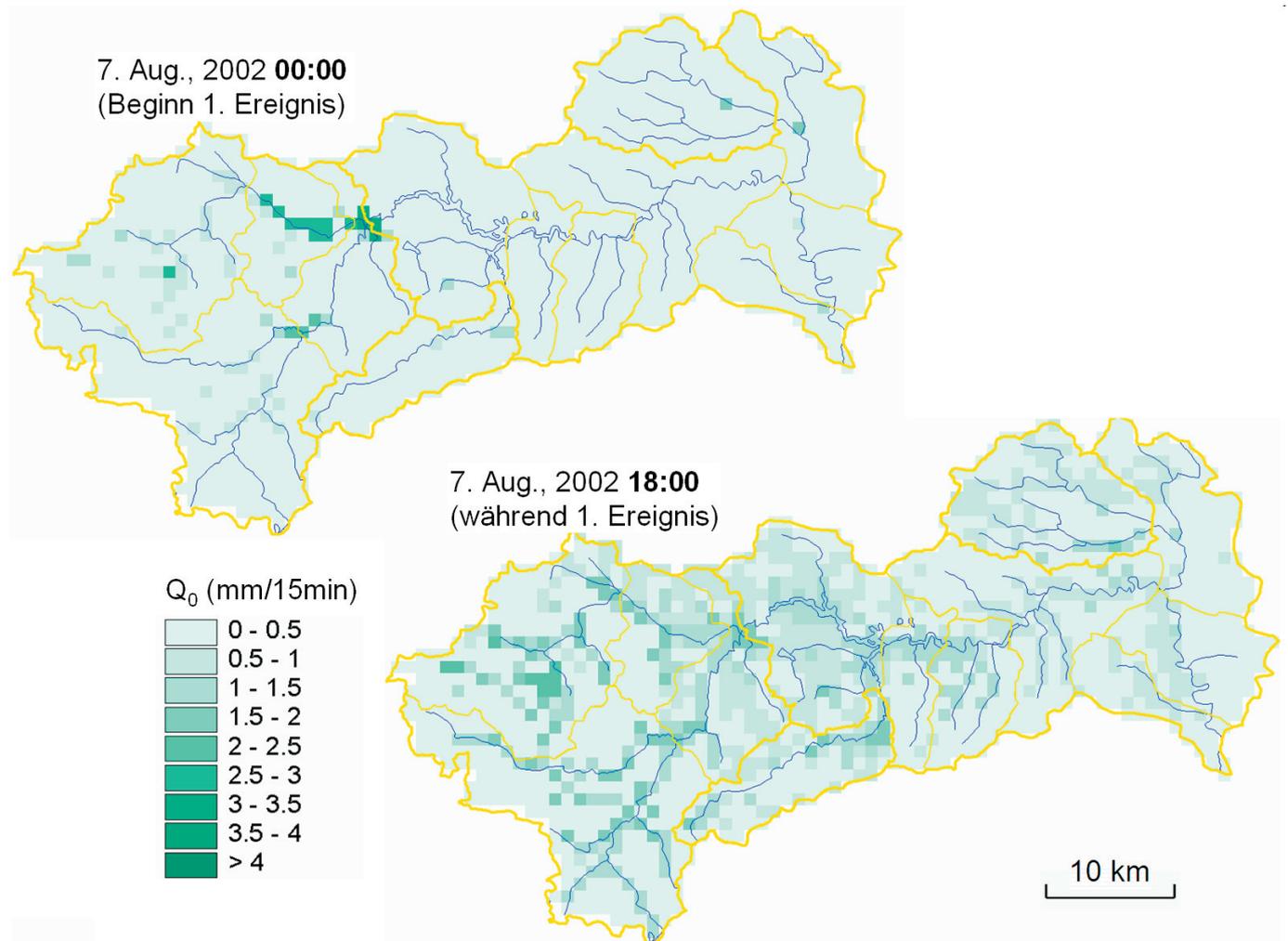


Bild 4 Plausibilitätskontrolle der simulierten Muster im Kampgebiet: Oberflächenabfluss an zwei Zeitpunkten für den Vergleich mit qualitativen Feldbeobachtungen. Aus [14].

4 Neue Methoden – Videokameras und Schneemuster

Neue Messmethoden können dazu beitragen, die hochwasserrelevanten hydrologischen Prozesse in Einzugsgebieten besser einzuschätzen, als dies unter alleiniger Verwendung von Abflussdaten möglich ist. Insbesondere bieten Fernerkundungsmethoden eine Vielzahl von attraktiven Möglichkeiten, die Schneeverhältnisse zu erfassen. In den alpinen Gebieten Österreichs sind Schneeprozesse für die Hochwasserentstehung wichtig – Schneeschmelze als direkter Auslöser kleiner Hochwässer bzw. Schneeschmelze als indirekter Auslöser großer Hochwässer durch Erhöhung der Bodenfeuchte vor Beginn eines Regenereignisses [8, 9]. Eine zutreffende Schneemodellierung ist deshalb auch im Zusammenhang mit Hochwässern wichtig.

Satellitenbilder der Schneebedeckung können dafür herangezogen werden, die Schneekomponente von hydrologischen Modellen zu eichen bzw. zu verifizieren. [4] stellen eine Methode vor, wie diese Eichung und Verifikation räumlich differenziert erfolgen kann. Dabei wurden die mit dem Modell simulierten Schneebedeckungsmuster mit aus SPOT XS Satellitendaten abgeleiteten Schneemustern verglichen. Die Eichung zur Bestimmung optimaler Modellparameter erfolgte in drei Schritten: Parameterwahl auf Basis von Erfahrungswerten; globale Eichung räumlich konstant angesetzter Parameter auf Basis von Schneemustern; und zusätzlich eine flächendetaillierte Eichung auf Basis von Schneemustern. Die Verifikation erfolgte

wiederum mit Hilfe von Schneemustern für einen unabhängigen Datensatz. Für eine Fallstudie in einem 90 km² großen Gebiet in den Österreichischen Kalkalpen zeigten [4], dass sich die raum-zeitliche Verteilung des Schneerückhalts und der Schneeschmelze mit dem geeichten und verifizierten Modell zuverlässiger abschätzen lässt, als dies ohne Vergleiche mit beobachteten Schneemustern möglich ist. MODIS Satellitendaten sind neuerdings ein ebenfalls äußerst attraktiver Datensatz der Schneebedeckungsmuster für große Einzugsgebiete [13].

Für kleine Einzugsgebiete können Standvideokameras herangezogen werden, um in regelmäßigen Abständen Photos der Landschaft aufzunehmen, aus denen die Schneebedeckungsmuster abgelesen werden können. Diese können dann ebenfalls für Eich- bzw. Verifikationszwecke verwendet werden. Ein Beispiel aus dem Bereich des Hochschwabs ist in Bild 5 gezeigt. Im Rahmen des KATER II Projektes werden auf der Edelbodenalm in einem Intervall von einer Stunde digitale Aufnahmen gemacht. Vergleiche wie die in Bild 5 werden in diesem Projekt insbesondere dafür verwendet, die Güte der Modellierung der Schneeverfrachtung einzuschätzen. Da die Muster in einem Intervall von einer Stunde erfasst werden, ist es zusätzlich möglich, Zeitraffer-Filme der Schneesimulationen mit den Videos zu vergleichen, wodurch auch eine gute Beurteilung der zeitlichen Dynamik der Schneeprozesse möglich ist.

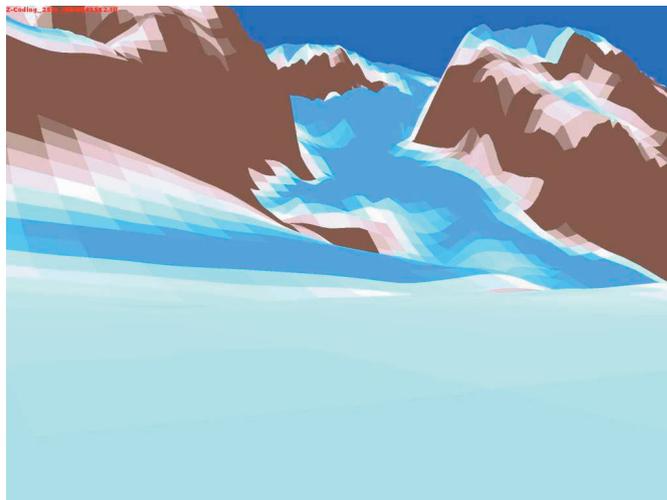


Bild 5 Vergleich von Videoaufnahmen am Hochschwab (Edelbodenalm) mit den Schneesimulationen eines hydrologischen Modells

5 Fazit

Dieser Beitrag zeigte, wie Informationen über die beobachteten hydrologischen Prozesse im Gebiet in die Modellierung von Hochwässern einfließen können, um die Extrapolation auf bisher nicht beobachtete Zustände (z. B. Extremhochwässer) gültig zu beschreiben.

Literatur

- [1] Blöschl, G.: Statistical upscaling and downscaling in hydrology. Article 9 in: Encyclopedia of Hydrological Sciences, M. G. Anderson (Managing Editor), J. Wiley & Sons, Chichester (2005), S. 135–154.
- [2] Blöschl, G.: Rainfall-runoff modeling of ungauged catchments. Article 133 in: Encyclopedia of Hydrological Sciences, M. G. Anderson (Managing Editor), J. Wiley & Sons, Chichester (2005), S. 2061–2080.
- [3] Blöschl, G.: On the fundamentals of hydrological sciences. Article 1 in: Encyclopedia of Hydrological Sciences, M. G. Anderson (Managing Editor), J. Wiley & Sons, Chichester (2005), S.3–12.
- [4] Blöschl, G., R. Kirnbauer, J. Jansa, K. Kraus, G. Kuschnig, D. Gutknecht und Ch. Reszler: Einsatz von Fernerkundungsmethoden zur Eichung und Verifikation eines flächendetaillierten Schneemodells. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 54, Heft 1/2 (2002), S. 1–16.
- [5] Grayson, R. B. and G. Blöschl (Eds): Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling. Cambridge University Press, Cambridge, UK (2000), 404 S.
- [6] Gutknecht, D., Ch. Reszler und G. Blöschl: Das Katastrophenhochwasser vom 7. August 2002 am Kamp – eine erste Einschätzung. Elektrotechnik und Informationstechnik, 119, Heft 12 (2002), S. 411–413
- [7] Jansa, J., A. Bartsch, H. Lehner, J. Parajka, G. Blöschl und R. Kirnbauer: Bestimmung des Wasseräquivalents der Schneedecke im Einzugsgebiet von Rax, Schneeberg und Hochschwab, Endbericht KATER II, Inst. f. Photogrammetrie u. Fernerkundung und Inst. f. Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien (2007).
- [8] Merz R. and G. Blöschl: A process typology of regional floods. Water Resources Research, 39, 12, 1340 (2003), doi:10.1029/2002WR001952.
- [9] Merz, R., G. Blöschl and J. Parajka, D.: Raum-zeitliche Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 50, Heft 1 (2006), S. 2–11.
- [10] Merz, R., G. Blöschl und U. Piock-Ellena: Zur Anwendbarkeit des Gradex-Verfahrens in Österreich. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 51, Heft 11/12 (1999), S. 291–305.
- [11] Merz, R., G. Blöschl, M. Hofer und G. Humer: Hydrologische Regionalisierung im HORA-Projekt (HOchwasser-RisikozonierungAustria). In: Disse et al. (Hrsg). Tag der Hydrologie, München, 22–23.3.2006, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 15.06, Bd. 2 (2006), S. 279–289.
- [12] Parajka J., R. Merz and G. Blöschl: Regionale Wasserbilanzkomponenten für Österreich auf Tagesbasis. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 57, H 3/4 (2005), S. 43–56
- [13] Parajka, J. and G. Blöschl: Validation of MODIS snow cover images over Austria. Hydrology and Earth System Sciences, 10 (2006), S. 679–689.
- [14] Reszler, Ch., J. Komma, G. Blöschl und D. Gutknecht: Ein Ansatz zur Identifikation flächendetaillierter Abflussmodelle für die Hochwasservorhersage. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 50 Heft 5 (2006), S. 220–232.
- [15] Sivapalan, M., G. Blöschl, R. Merz and D. Gutknecht: Linking flood frequency to long-term water balance: incorporating effects of seasonality. Water Resources Research, 41, W06012 (2005), doi:10.1029/2004WR003439.
- [16] Skoien, J., R. Merz and G. Blöschl: Top-kriging – geostatistics on stream networks, Hydrology and Earth System Sciences 10 (2006), S. 277–287.
- [17] Zehe, E. and G. Blöschl: Predictability of hydrologic response at the plot and catchment scales: Role of initial conditions. Water Resources Research, 40, W10202 (2004), doi:10.1029/2003WR002869, 21pp.