

HOWATI – HochWasser Tirol – Ein Beitrag zur Harmonisierung von Bemessungshochwässern in Österreich

1. Kurzfassung/Summary

Im Bereich des Flussbaus werden die Hochwasserdurchflüsse einer bestimmten Jährlichkeit in der Regel durch hochwasserstatistische Methoden ermittelt, im Bereich der Wildbach- und Lawinenverbauung hingegen durch Niederschlags- Abflussmodelle. Da die beiden Methoden oft stark unterschiedliche Ergebnisse liefern, ist eine Harmonisierung wünschenswert. Aus diesem Grund initiierten der Hydrographische Dienst Tirol und der Forsttechnische Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung Sektion Tirol das HOWATI Projekt mit dem Ziel, die Ursachen für die Unterschiede der Methoden zu verstehen. Zehn Leiteinzugsgebiete wurden ausgewählt und in Feldbegehungen das oberflächliche Abflussverhalten und die hydrogeologische Situation genau aufgenommen. Die Hochwasserdurchflüsse wurden sodann mit dem Niederschlags-Abflussmodell Zemokost und mit statistischer Langzeitsimulation (Monte Carlo) berechnet. Die Unterschiede der Methoden lassen sich vorwiegend damit erklären, dass die Wahl eines plausiblen Niederschlagsinputs entscheidend ist, um die Hochwasserwerte mit dem Abflussmodell nicht zu überschätzen und dass in Gebieten mit großer Speicherkapazität die statistische Verteilungsfunktion einen Knick haben kann, der zu wesentlich höheren Hochwasserwerten führt als die übliche Pegelstatistik. Die Erkenntnisse aus den Leiteinzugsgebieten wurden in eine flächendeckende Auswertung für ganz Tirol übernommen.

funktion einen Knick haben kann, der zu wesentlich höheren Hochwasserwerten führt als die übliche Pegelstatistik. Die Erkenntnisse aus den Leiteinzugsgebieten wurden in eine flächendeckende Auswertung für ganz Tirol übernommen.

HOWATI – HochWasser Tirol: Floods in Tyrol – A contribution to the harmonisation of design floods in Austria

Summary: Flood flows of a certain return period are normally determined by use of flood statistics when needed for the purposes of river engineering, but precipitation-runoff models are used for torrent and avalanche control. Since the two methods tend to yield significantly different results, harmonisation is desirable so as to reconcile the difference. This is the reason why the Hydrographic Service of Tyrol and the Forestry Service for Torrent and Avalanche control of Tyrol have launched the HOWATI project with the aim of understanding the reasons why the two methods differ. The project began with a detailed field reconnaissance in ten representative catchment areas to establish in detail the surface runoff patterns and hydro geological situations. The flood flows were then calculated using the Zemokost pre-

cipitation-runoff model and statistical long-term simulation (Monte Carlo). The differences between the two methods can mainly be explained by the significance of what plausible precipitation input is selected so as not to overestimate flood values in the use of the runoff model as well as by the fact that the statistical distribution function for regions of great storage capacity may show a knee, which results in much higher flood values than the usual gauge statistics do. The results obtained from the representative catchments have been used as a basis for a region-wide interpretation across the province of Tyrol.

2. Einleitung

Integriertes Hochwassermanagement baut wesentlich auf eine zuverlässige Bestimmung von Hochwasserdurchflüssen einer bestimmten Jährlichkeit auf. Sowohl im Flussbau als auch in der Wildbachverbauung sind sie eine wichtige Grundlage für die Bemessung von Schutzbauten und die Ausweisung von Gefahrenzonen. In der Praxis werden die Hochwasserdurchflüsse mit verschiedenen Methoden berechnet (Blöschl und Merz, 2008). Im Bereich des Flussbaus werden die Hochwasserdurchflüsse HQ_T in der Regel durch statistische Auswertungen langer Hochwasserbeobachtungsreihen ermittelt. Im Bereich der Wildbach- und Lawinenverbauung werden die HQ_T in der Regel durch Faustformeln, Geländebegehungen und Niederschlags-Abflussmodelle ermittelt. Der statistische Ansatz hat den Vorteil, dass die Jährlichkeit des berechneten Durchflusses klar angegeben werden kann und die Prozesse im Gebiet integrativ berücksichtigt werden. Die Niederschlags-Abflussmodellierung hat den Vorteil, dass auf die lokale hydrologische Situation im Detail eingegangen werden kann und keine Abflussdaten erforderlich sind. Dies ist insbesondere für kleine Gebiete wichtig.

Wendet man die verschiedenen Methoden auf ein und dasselbe Einzugsgebiet an, dann ergeben sich in vielen

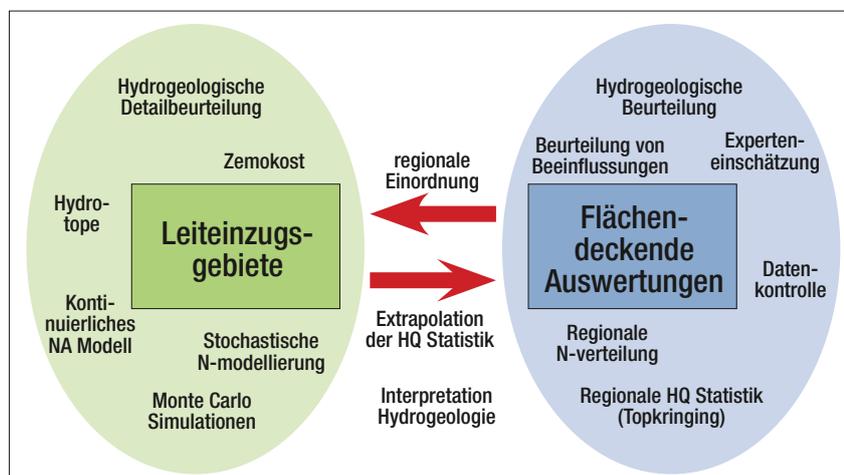


Abb. 1: HOWATI – Informationstransfer zwischen den Leiteinzugsgebieten und den flächendeckenden Auswertungen für Tirol.

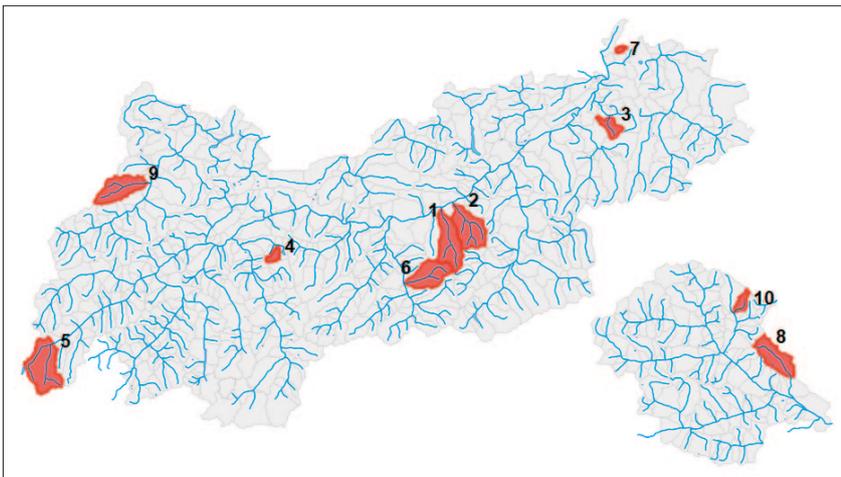


Abb. 2: Leiteinzugsgebiete im Projekt HOWATI

| | Name | Größe (km ²) |
|----|-------------------|--------------------------|
| 1 | Wattenbach | 73 |
| 2 | Weerbach | 72,8 |
| 3 | Stampfangerbach | 20,9 |
| 4 | Teischnitzbach | 14,2 |
| 5 | Trisanna | 97,6 |
| 6 | Navisbach | 61,5 |
| 7 | Walchentaler Bach | 3,9 |
| 8 | Debantbach | 56,8 |
| 9 | Hornbach | 64,0 |
| 10 | Längentalbach | 9,2 |



Abb. 3: Drei der Leiteinzugsgebiete des HOWATI Projektes.

Fällen sehr unterschiedliche Resultate. Oft liefert die Niederschlags-Abflussmodellierung wesentlich größere Durchflüsse als die Hochwasserstatistik. Aus diesem Grund ist eine Harmonisierung der Vorgangsweise als vorteilhaft anzusehen (Rudolf-Miklau und Sereinig, 2009). Im Zuge der Umsetzung der Hochwasserrichtlinie gewinnt diese Frage besonders an Dringlichkeit. Der Hydrographische Dienst Tirol und der Forsttechnische Dienst für Wildbach- und Lawinerverbauung Sektion Tirol initiierten deshalb das Projekt HOWATI. Ziel des Projektes

war es, die Unterschiede in den Methoden für Tirol zu erklären und damit einen Beitrag zur Harmonisierung der Bestimmung der Hochwasserdurchflüsse für Bemessungszwecke in Österreich zu leisten.

Die grundlegende Vorgangsweise des Projektes bestand darin, die zwei unterschiedlichen Ansätze (Pegelstatistik, Niederschlags-Abflussmodellierung) vom Prozessverständnis her zusammenzuführen. Es wurde nicht als sinnvoll angesehen, für alle kleinen Gebiete in Tirol Niederschlags-Abflussuntersuchungen durchzuführen, sondern sich vielmehr auf einige

Gebiete vertieft zu konzentrieren, um dadurch besser zu verstehen, worin die Unterschiede in den beiden Ansätzen liegen. Deshalb wurde eine zweigeteilte Vorgangsweise gewählt (Abb. 1). Zum einen wurden detaillierte Untersuchungen für eine kleine Anzahl von Leiteinzugsgebieten angestellt. Zum anderen wurden flächendeckende Auswertungen für das gesamte Gebiet von Tirol durchgeführt. Die Leiteinzugsgebiete dienen dazu als typische Fälle im Detail aufzuzeigen, wie die Abflussprozesse mit den beiden Methoden erfasst werden. Zehn alpine Einzugsgebiete wurden ausgewählt (Abb. 2, Abb. 3). In allen Gebieten wurden genaue hydrologische und hydrogeologische Geländeaufnahmen durchgeführt, um die Abflussprozesse im Hochwasserfall zu verstehen. Um die verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Hochwasserdurchflüsse (in diesem Fall HQ_{100} Werte) zu vergleichen, wurde einerseits das Ereignisabflussmodell Zemokost eingesetzt und andererseits ein Monte Carlo Ansatz gewählt, bei dem die Pegelstatistik mit Hilfe einer langfristigen Abflussmodellierung bestimmt wird. Beide Methoden wurden getrennt angewandt und die Ursachen der Unterschiede analysiert. Entscheidend war dabei herauszufinden, aus welchen Gründen die Niederschlags-Abflussmodellierung andere (meist größere) Hochwasserdurchflüsse als die Hochwasserstatistik ergibt. Damit werden Argumente für eine Entscheidung gefunden, wie die Bemessungswerte im Einzelfall anzunehmen sind.

Die Erkenntnisse über die Unterschiede in der Wahl der HQ_{100} Werte in den Leiteinzugsgebieten wurden in einem weiteren Schritt für die flächendeckenden Auswertungen für ganz Tirol verwendet. Als Grundlage für die flächendeckenden Auswertungen dienten die im HORA Projekt (Merz et al. 2008) bestimmten Werte.

Besonderes Augenmerk lag im HOWATI Projekt auf den unbeobachteten Einzugsgebieten und der regionalen hydrogeologischen und meteorologischen Interpretation.

3. Hydrogeologische Bewertung

3.1. Leiteinzugsgebiete

Ziel der hydrogeologischen Bewertung in den Leiteinzugsgebieten war eine Einschätzung der unterirdischen Abflussprozesse, die als Grundlage für die Abflussmodellierung diente. Wichtig dabei ist die Unterscheidung zwischen oberflächlichem, seichtgründigem und tiefgründigem Abfluss, da dadurch die Speicherfähigkeit des Gebietes in den Modellen besser erfasst werden kann. Um diese Abflussprozesse beschreiben zu können, wurde eine Methodenkombination aus Hydrogeologie und Geomorphologie entwickelt und in zahlreichen Klein-einzugsgebieten getestet und verbessert (Pirkl, 2000, Pirkl, 2003). Damit werden die Hauptabflussprozesstypen in Abhängigkeit von der Untergrundsituation beschrieben. Differenziert werden dabei:

- überwiegend Oberflächenabfluss (auf Fels, auf Firn/Eis, auf dichten Flächen)
- überwiegend seichtgründiger Zwischenabfluss
- überwiegend tiefergründiger Zwischenabfluss
- überwiegend tiefgründiger Abfluss

Diese Methode wurde bereits im Zuge der Nachbearbeitung des Hochwassereignisses 2005 im Paznaun (Kohl et al. 2008) für das gesamte Trisanna-Einzugsgebiet (>400 km²) angewandt.

Im HOWATI Projekt wurde zunächst eine gezielte Auswertung vorhandener

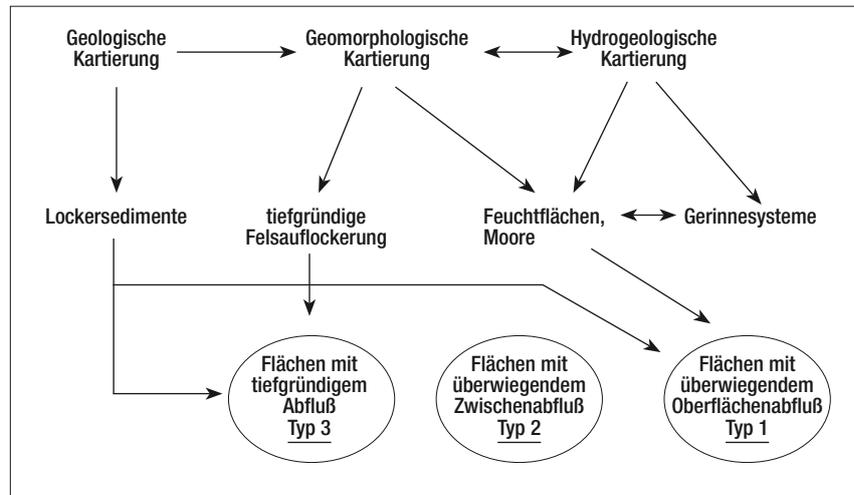


Abb. 4: Schema der Ableitung von Hauptabflussprozesstypen aus Geologie, Hydrogeologie und Geomorphologie

geologischer Karten, Orthofotos und des digitalen Höhenmodells durchgeführt. Die jeweiligen Informationen (Fest-/Lockergesteine, geomorphologische Phänomene, aktuelles Abflusssystem/hydrogeologische Situation) wurden zu den Hauptabflussprozesstypen zusammengeführt (Abb. 4). Eine wichtige Informationsschnittstelle bildete die Auswertung und Darstellung des aktuellen Gerinnennetzes (Bäche, Kleingerinne, Quellen). Die Kontrolle der Auswertungen erfolgte mit Übersichtsbegehungen. Zur Plausibilisierung wurden hierbei zusätzlich gezielte Abflussmessungen in den jeweiligen Einzugsgebieten herangezogen. Der Vergleich der Abflussspenden wurde dabei der Gebietscharakteristik, die aus der Karte der untergrundabhängigen Abflussprozesse abgeleitet wurde, gegenübergestellt.

Diese Auswertungen wurden für die zehn Leiteinzugsgebiete (Abb. 2) durchge-

führt. Als Beispiel für die Karten der untergrundabhängigen Abflussprozesstypen ist in Abb. 5 ein Ausschnitt aus dem Weerachtal dargestellt. Die Flächendifferenzierung nach den untergrundabhängigen Abflussprozesstypen stellt auf dieser Arbeitsebene eine qualitative bis semiquantitative Aussage dar. Diese Informationen wurden als Basisinformationen in die Niederschlags-Abflussmodellierungen übernommen. Im ereignisbezogenen Modell Zemokost wurden Flächen-Prozent pro Einzugsgebiet von Flächen mit möglichem Rückhaltevermögen in die Berechnung einbezogen. Für die kontinuierliche Niederschlags-Abflussmodellierung in den Leiteinzugsgebieten wurden die Informationen der untergrundabhängigen Abflussprozesstypen sowohl für die naturräumliche Gliederung als auch für die Plausibilisierung der jeweiligen Speichercharakteristik im Modell eingesetzt.

3.2. Flächendeckende Auswertungen für Tirol

Auf der regionalen Ebene wurden im HOWATI Projekt flächendeckende Auswertungen für ganz Tirol durchgeführt in die ebenfalls geologisch-hydrogeologisches Fachwissen auf mehreren Ebenen eingebracht wurde:

- Umsetzung der Erfahrungen aus den Leiteinzugsgebieten - Leiteinzugsgebiet als Typus für eine größere Region
- Interpretation geologisch-hydrogeologischer Übersichtskarten und kompulatorischer Karten, wie z.B. der Darstellung der Lockersedimentverteilungen (nach Lithologie und Genese; Heinrich et al. 2008)

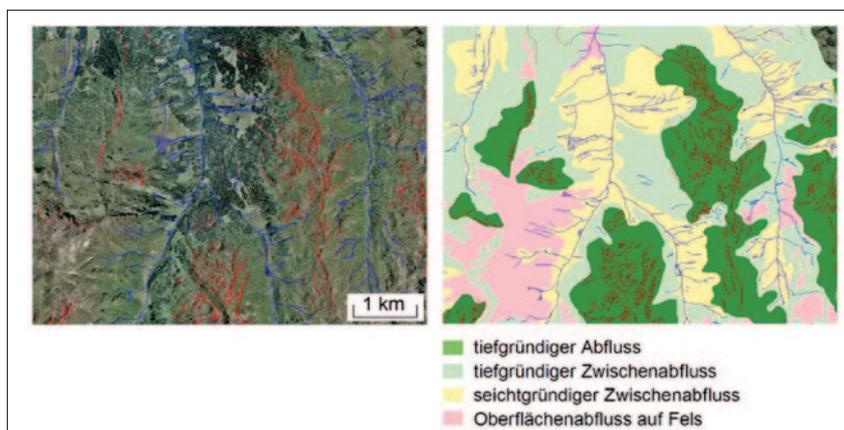


Abb. 5: Ausschnitt aus dem Weerachtal. Links: Orthofoto mit der Auswertung geomorphologischer Phänomene (rote Linien - Ausstriche von Hangbewegungszonen). Rechts: Ausschnitt aus der Karte der untergrundabhängigen Abflussprozesstypen.

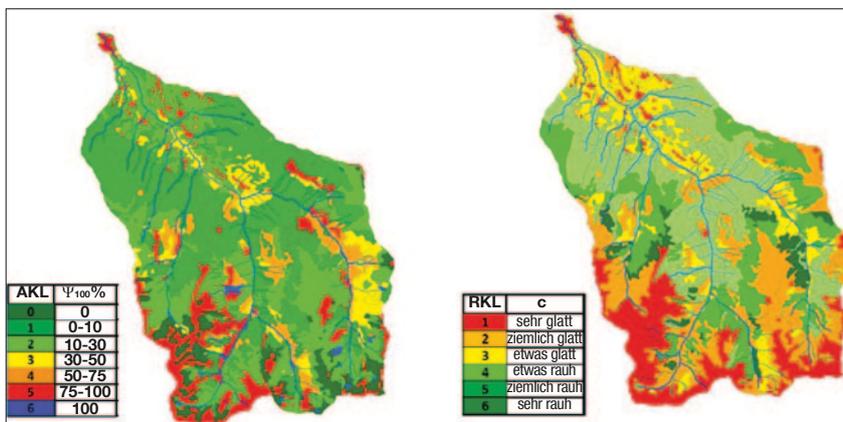


Abb. 6: Abflussbeiwerte (AKL) und Oberflächenrauigkeiten (RKL) Leiteinzugsgebiet Weerbach.

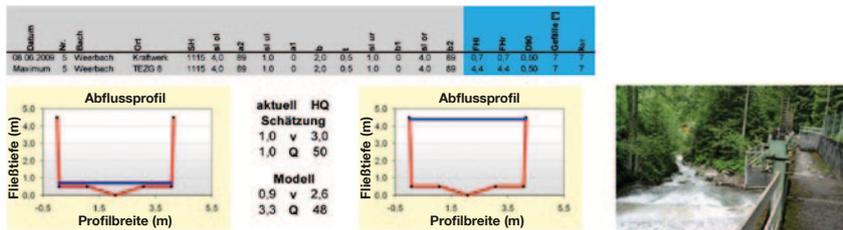


Abb. 7: Vergleich beobachteter aktueller Abflüsse und möglicher, maximaler Abflüsse mit den Modellergebnissen.

- Diskussion des Erfahrungswissens aus der regionalen Geologie

Hauptschnittstelle waren dabei die aus der Pegelstatistik abgeleiteten Abflussspenden-Diagramme, die für alle Einzugsgebiete bis in den Oberlauf berechnet wurden. Neben der Prüfung der rechnerischen Plausibilität dieser Abflussspenden wurde der Vergleich der geologischen Situation benachbarter Einzugsgebiete hinsichtlich ähnlicher oder unterschiedlicher Speicherfähigkeit des Untergrundes zur Diskussion herangezogen.

4. Ereignismodellierung mit Zemokost

Die erste Einschätzung der HQ_{100} Werte erfolgte mit dem deterministischen Ereignis-basierten Niederschlags-Abflussmodell Zemokost. Das Zemokost Modell ist ein vom Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) entwickeltes Modell zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten ohne Pegelmessung (Kohl, 2011). Eine der Annahmen des Modells besteht darin, dass die Jährlichkeit des Abflusses der Jährlichkeit des Niederschlags entspricht, und die Parameter werden entsprechend gewählt.

4.1. Niederschlags-Abflussmodellierung

Im Zemokost Modell wird die Abflussbildung und Abflusskonzentration neben topographischen Parametern durch Abflussbeiwerte und Oberflächenrauigkeiten beschrieben. Diese Parameter wurden mit Hilfe einer eigens entwickelten Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflusses (Markart et al. 2004) beruhend auf Vegetations- und Bodeneigenschaften für jedes Leiteinzugsgebiet in Feldbegehungen bestimmt. *Abbildung 6* zeigt die Karten des Abflussbeiwerts und der Oberflächenrauigkeit am Beispiel des Weerbachs.

Als Oberflächenabflussbeiwert versteht sich hierbei das Verhältnis Oberflächenabfluss zu einem Niederschlag der Intensität 100 mm/h, unter „realistisch ungünstigen Abflussbedingungen“ abgeleitet aus zahlreichen Berechnungsversuchen (Markart et al. 2004). Weiters berücksichtigt das Zemokost Modell den Anstieg des Oberflächenabflussbeiwertes mit zunehmender Niederschlagsintensität. Neben dem Oberflächenabfluss können Hochwasser maßgeblich von untergrundabhängigen Abflussprozessen gesteuert sein (*Abb. 5*). Die hydrogeologische Bewertung lieferte die Grundlagen zur Parametrisierung der Zwischenabflusspro-

zesse für alle Leiteinzugsgebiete. Als Input für die Modellierung eines HQ_{100} wurde ein Niederschlagswert mit einer Jährlichkeit von 100 verwendet. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden alle drei in Österreich verfügbaren Niederschlagsdatensätze eingesetzt. Zu diesen Daten gehören die ÖKOSTRA Daten, die maximierten Modellniederschläge (MaxModN) und die neu interpolierten Bemessungsniederschläge. Auf Basis dieser Niederschläge wurden für alle Leiteinzugsgebiete HQ_{100} Werte berechnet und verglichen.

4.2. Plausibilisierung der Abflusssimulationen

Zemokost ist für die Abschätzung der Hochwasserdurchflüsse in Einzugsgebieten ohne Abflussbeobachtungen konzipiert. Im Projekt HOWATI erfolgte daher die Bearbeitung mit Zemokost so, als ob keine Abflussmessungen vorhanden wären. In unbeobachteten Einzugsgebieten kann meist weder eine eindeutige Bestätigung der Modellergebnisse noch eine zweifelsfreie Falsifizierung erfolgen. Umso mehr muss einer Plausibilisierung der Ergebnisse eine hohe Bedeutung beigemessen werden. Zur Überprüfung der Zemokost - Modellergebnisse wurden daher im HOWATI Projekt folgende Wege eingeschlagen:

- Beurteilung der Bachcharakteristik, Bewertung von „stummen Zeugen“, Analyse, Einbeziehung der Ereignischronik und Aussagen der ortsansässigen Bevölkerung.
- Vergleich zwischen modelliertem Basisabfluss und beobachteten, geschätzten oder gemessenen Abflüssen zum Zeitpunkt der Geländeaufnahmen unter Beachtung unterschiedlicher Abflussregime.
- Vergleich von Fließgeschwindigkeiten des modellierten Basisabflusses mit beobachteten, geschätzten oder gemessenen Geschwindigkeiten an Abflussprofilen (*Abb. 7*).
- Gegenüberstellung der modellierten Spitzenabflüsse für die Bemessung mit geschätzten Hochwasserspitzen an Gerinneprofilen.
- Vergleich der simulierten Fließgeschwindigkeiten des Spitzenabflusses mit anderen Fließformelansätzen an Abflussprofilen.
- Gegenüberstellung der modellierten Spitzenabflüsse für die Bemessung mit empirischen Hochwasserformeln.
- Vergleich der modellierten Konzentra-

tionszeit mit empirischen Fließzeitan-sätzen.

- Vergleich der Modellrechnung mit Abflussspitzen (höchstes beobachtetes Hochwasser HHQ) benachbarter gemessener Einzugsgebiete (Hydrographisches Jahrbuch) und Hochwasserdurchflüsse aus Regionalisierungen (z.B. HORA, Merz et al. 2008).

Nach der Ermittlung der HQ_{100} Werte wurde für alle Leiteinzugsgebiete versucht die jeweils zwei größten Abflussereignisse mittels Blockniederschlägen und räumlicher Flächenabminderung nachzurechnen. Es wurde nach Blockniederschlägen gesucht, die bei gleicher beobachteter Regensumme eine ähnliche Abflussspitze im Modell erzeugen. Obwohl Regendauer und Intensität dabei Differenzen aufwiesen, konnten mit dem Zemokost Modell meist plausible Abflussganglinien simuliert werden (Abb. 8).

Die Abschätzungen mit dem Zemokost Modell zeigten vor allem, dass die Wahl eines plausiblen Niederschlagsinputs einen entscheidenden Einfluss auf das errechnete HQ_{100} hat. Für die meisten Gebiete führen die neuen Bemessungsniederschläge mit Flächenabminderung zu plausiblen HQ_{100} Werten. Nur in den sehr kleinen Gebieten können höhere Niederschläge plausibel sein, da konvektive Ereignisse mehr zum Tragen kommen.

5. Stochastische Modellierungen (Monte Carlo)

5.1. Vorgangsweise

Als zweiter Ansatz wurden als Gegenstück zum Zemokost Modell die Hochwasserwahrscheinlichkeiten mit Hilfe von Monte Carlo Simulationen berechnet. Dabei wurden lange Niederschlagsreihen generiert und mittels eines kontinuierlichen Niederschlags-Abflussmodells in Abflussreihen umgewandelt, die dann extremwertstatistisch ausgewertet wurden. Der Vergleich der Pegelstatistik (Abb. 9 links), des Zemokost Modells auf Ereignisbasis (Abb. 9 rechts), und der Monte Carlo Simulationen (Abb. 9 Mitte) erlaubte es auf die Gründe der Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Methoden zu schließen.

5.2. Kontinuierliches Niederschlags-Abflussmodell

Das verwendete Niederschlags-Abflussmodell ist ein flächendetailliertes, konzeptionelles, kontinuierlich rechnendes

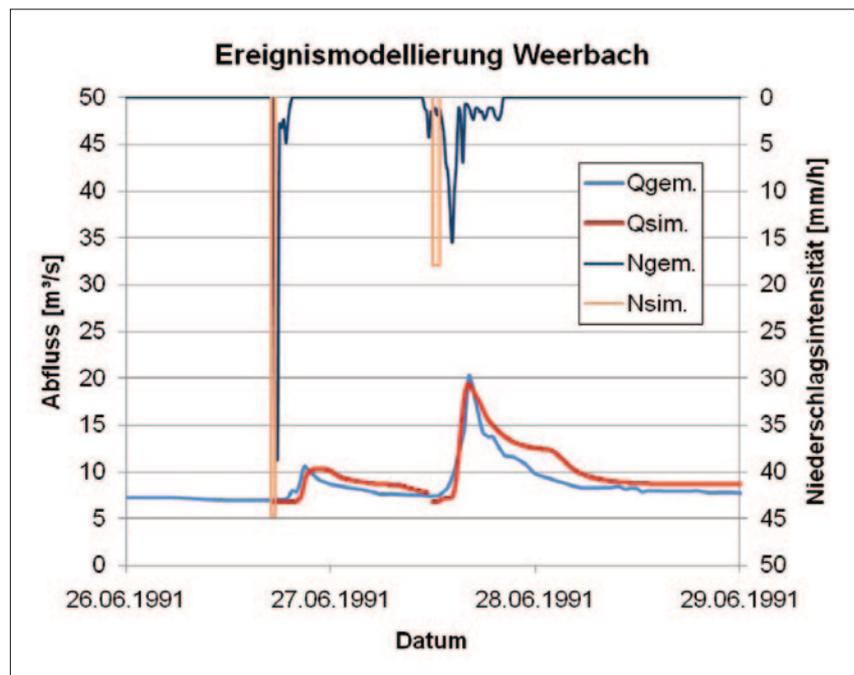


Abb. 8: Zemokost Modellierung für den Weerbach.

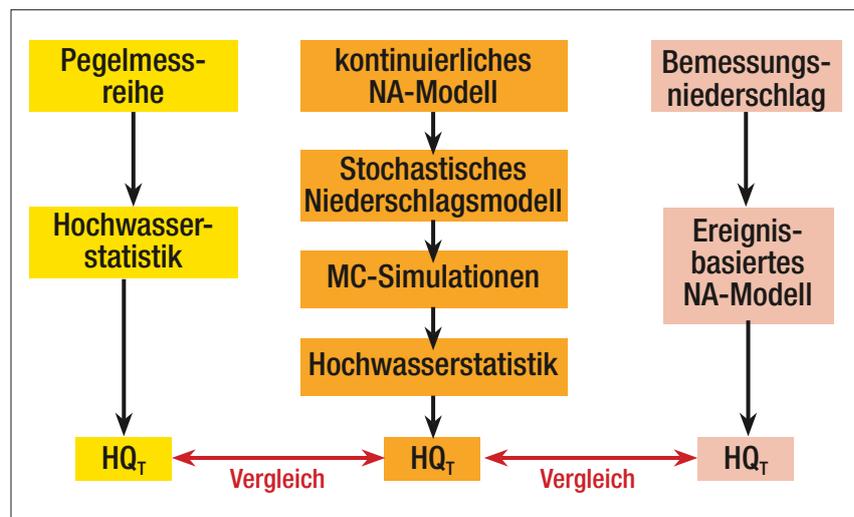


Abb. 9: Übersicht über die Methoden zur Berechnung der Hochwasserdurchflüsse einer bestimmten Jährlichkeit HQ_T für die Leiteinzugsgebiete.

Wasserhaushaltsmodell auf Pixelbasis („soil moisture accounting scheme“, Reszler et al, 2006; Blöschl et al. 2008). Es besteht aus einer Schneeroutine, einer Bodenfeuchteroutine und einer Abflussroutine. Die Schneeroutine beschreibt Schneeschmelze und -akkumulation mit Hilfe des Gradtagverfahrens. Abflussbildung und Änderungen in der Bodenfeuchte werden in der Bodenfeuchteroutine durch eine nicht lineare Funktion unter Berücksichtigung der maximalen Bodenfeuchte und Evapotranspiration

beschrieben. Die Abflussroutine stellt die Abflussbildung am Hang und im Gerinne durch eine lineare Speicherkaskade dar. Da es sich bei den modellierten Leiteinzugsgebieten um sehr kleine Gebiete handelt, wurde eine sehr hohe räumliche und zeitliche Auflösung von $0,04 \text{ km}^2$ pro Pixel und 15 min gewählt, damit die Hochwasserspitzen möglichst gut vom Modell erfasst werden können. Inputdaten für das Modell sind gemessene Niederschlags- und Temperaturdaten und berechnete potentielle Evapotranspirationsdaten.

Die Parameter des Modells wurden auf Basis aller Gebietsinformationen wie beispielsweise Orthofotos, Landnutzungskarten, Abflussbeiwertkarten und hydrogeologischen Abflussprozesskarten festgelegt. Bei der Wahl der Parameter der oberen Bodenspeicher kamen neben den Orthofotos und Landnutzungskarten vor allem die Abflussbeiwertkarten zum Einsatz, die für die Zemokost Modellierung in Feldbegehungen erhoben wurden (siehe Kap 3). die Wahl der Parameter der Grundwasserspeicher beruhte auf den eigens für das HOWATI Projekt erhobenen hydrogeologischen Abflussprozesskarten (siehe Kap 2). In *Abbildung 10* ist als Beispiel die hydrogeologische Abflussprozesskarte des Weerbachs dargestellt. Die Abflussprozesskarten geben Aufschluss über die zum Hochwasserabfluss beitragenden Flächen, sowie die Rückhalte- und Speicherpotentiale der Gebiete. Der Geländeschnitt in *Abbildung 10* stellt exemplarisch dar, in welcher Tiefe die Abflussprozesse prinzipiell stattfinden. Diese qualitative Einschätzung, stellt eine wertvolle Information über die dominanten Abflussprozesse in den unterschiedlichen Teilen des Einzugsgebiets dar. In der Modellierung führt diese Information zu einer besseren Einschätzung unter welchen Bedingungen das Speichervermögen des Gebietes erschöpft ist und es zu einer Beschleunigung des Abflusses kommt. Eine quantitative Festlegung der Parameterwerte der Hydrogeologie erfolgte in einer Zusammenarbeit zwischen Hydrologen und Geologen.

Da in allen Piloteneinzugsgebieten Pegelmessungen zur Verfügung standen, konnte das Modell durch den Vergleich der modellierten und beobachteten Daten plausibilisiert werden. *Abbildung 11* zeigt die Simulationsergebnisse und Pegelmessungen für den Zeitraum April bis Oktober 1991. Wie die Ergebnisse zeigen, kann das Modell die zeitliche Dynamik der Abflussprozesse im Gebiet sehr gut nachbilden. Die Abflussscheitel werden zu einem großen Teil gut erfasst, wobei Über- und Unterschätzungen der Scheitel hauptsächlich auf die Unsicherheiten in den gemessenen Niederschlägen zurückgeführt werden konnten.

5.3. Monte Carlo Simulationen

Das kalibrierte Abflussmodell wurde schließlich für Monte Carlo Simulationen über 10 000 Jahre eingesetzt. Zu diesem Zweck wurden zunächst 10 000 Jahre Niederschlag für jedes Leiteinzugsgebiet mit

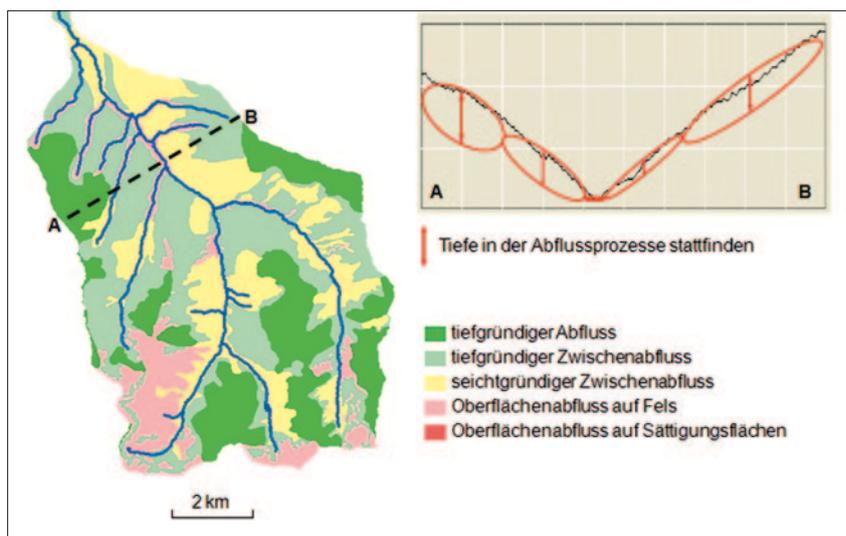


Abb. 10: Hydrogeologische Abflussprozesskarte und Geländeschnitt für das Weerbach Einzugsgebiet.

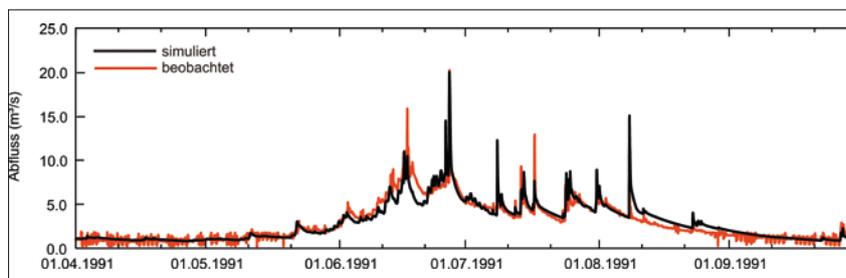


Abb. 11: Simulationsergebnisse und Beobachtungen Weerbach (April bis Oktober 1991).

Hilfe eines stochastischen Niederschlagsmodells erzeugt. Das verwendete Modell (Sivapalan et al., 2005) beschreibt das Niederschlagsgeschehen basierend auf Messwerten aus jedem Einzugsgebietes durch Parameter wie die Niederschlagsdauer, -intensität und die Pausen zwischen den Niederschlägen. Weiters wurden als Inputdaten für die Monte Carlo Simulationen die Temperaturdaten und die berechneten Werte für die potentielle Evapotranspiration über 10 000 Jahre fortlaufend wiederholt.

Abbildung 12 zeigt das Ergebnis der Monte Carlo Simulationen für den Weerbach in der die Jahresmaxima der generierten Abflussreihe statistisch ausgewertet wurden. Diese Auswertung stellt eine empirische Verteilungsfunktion dar, die über den Beobachtungsbereich hinaus extrapoliert. Für das Einzugsgebiet des Weerbaches ergibt sich ein besonders interessantes Ergebnis. In diesem Fall weist die empirische Verteilungsfunktion nämlich einen deutlichen Knick auf, da bei einer Jährlichkeit von ca. 30 Jahren die Steigung der Funktion stark zunimmt. Bei höheren Jährlichkeiten flacht die Funktion wieder leicht ab, es ergibt sich

also ein näherungsweise S-förmiger Verlauf der Verteilungsfunktion.

Dieses Phänomen kann auf die große Speicherfähigkeit des Einzugsgebietes zurückgeführt werden. Die Speicherfähigkeit eines Gebietes, nämlich der Anteil des Niederschlags den das Gebiet aufnehmen kann und der nicht direkt zum Abfluss beiträgt, hängt stark von der hydrogeologische Situation und der Landnutzung ab. Beide Faktoren wurden in dem Abflussmodell berücksichtigt. Auf Grund der großen Speicherfähigkeit des Gebietes entsteht bei größeren Ereignissen ein Schwellenwertprozess, d.h. bei größeren Niederschlagsereignissen kommt es gleichzeitig zu einem Überlaufen der großen Speicherflächen im Gebiet. Dadurch trägt plötzlich ein wesentlich größerer Teil des Einzugsgebietes zum Abfluss bei als bei kleinen Abflussereignissen. Sobald der größte Teil des Gebietes zum Abfluss beiträgt flacht die Verteilungsfunktion wieder etwas ab und ist nur mehr von der Zunahme des Niederschlages bestimmt. Durch diesen Prozess kann das HQ_{100} wesentlich größer sein als der mit der Pegelstatistik bestimmte Wert.

Ein derartiges Schwellenwertverhalten konnte bei drei von zehn Leiteinzugsgebieten festgestellt werden. Bei den anderen Leiteinzugsgebieten extrapoliert die generierte Verteilungsfunktion nahezu linear über die Beobachtungsdaten hinaus.

6. Regionalisierung der Ergebnisse

Ein weiterer Projektteil des HOWATI Projektes befasste sich mit der Regionalisierung der HQ_{100} Werte unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Leiteinzugsgebiete. Als Basis dafür dienten die HQ_{100} Werte die im HORA Projekt (Merz et al. 2008) bestimmt wurden.

Die HQ_{100} Werte der Pegel wurden mit dem Top-Kriging Verfahren (Sköien et al., 2007), einer geostatistischen Interpolationsmethode, regionalisiert. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass es die Lage der Pegelstellen im Gewässernetz berücksichtigt. Zusätzlich wurden die Gebietsfläche, der Jahresniederschlag, und die Retention durch Seen u. Speicher in die Analyse mit einbezogen. Die Erkenntnis über Schwellenwertprozesse in Gebieten mit großer Speicherfähigkeit die zu einem S-förmigen Verlauf der Verteilungsfunktion führen kann, wurde durch Experteneinschätzung ebenfalls mit berücksichtigt. Dazu wurde eine S-förmige Verteilungsfunktion definiert mit den Parametern bei welcher Jährlichkeit der Schwellenwertprozess auftritt und der Erhöhung der HQ_{100} Werte durch diesen Prozess. Diese Parameter wurden in Arbeitsgesprächen unter Einbezug der Geologie festgelegt. Es wurde dabei angenommen, dass die S-förmige Verteilungsfunktion unter folgenden Umständen auftritt:

- in Gebieten mit großem Speichervermögen des Untergrunds;
- eher in trockenen als in feuchten Gebieten (in feuchten Gebieten sind die Speicher öfter gefüllt);
- in Gebieten mit kleiner Abflusspende;
- in Gebieten kleiner 200 km^2 (in größeren Gebieten können sich verschiedene Prozesse ausgleichen)

Die mittels Regionalisierung errechneten Werte wurden durch Spendendiagramme verschiedener Regionen verglichen und mit dem Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinerverbauung Sektion Tirol und dem Hydrographischen Dienst Tirol abgestimmt. *Abbildung 13* zeigt die Veränderung der HQ_{100} Werte des

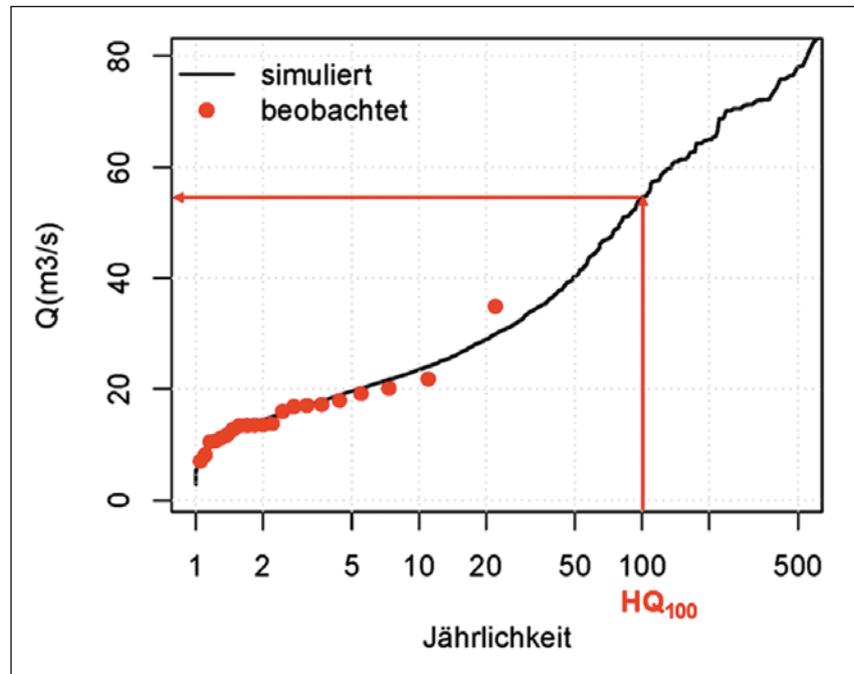


Abb. 12: Ergebnisse der Monte Carlo Simulationen im Vergleich mit Beobachtungsdaten.

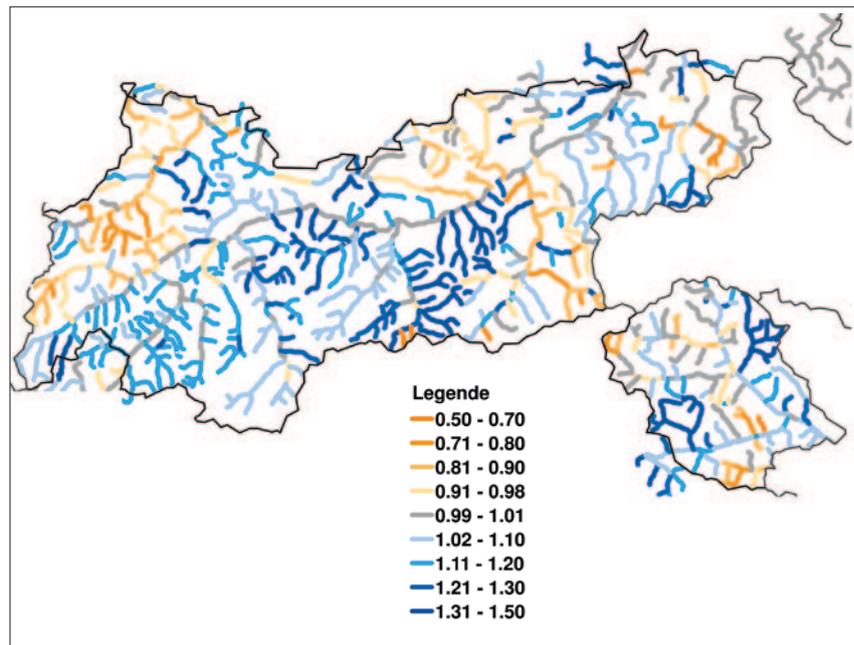


Abb. 13: Verhältnis der HQ_{100} Werte nach HOWATI und der HQ_{100} aus der HORA Studie.

HOWATI Projektes im Vergleich zum HORA Projekt. Diese Unterschiede ergeben sich aus der Einschätzung der hydrogeologischen und meteorologischen Situation mit umfassenderen Informationen als im HORA Projekt. Die regionale Einschätzung ersetzt allerdings nicht eine Detailstudie, die für die Bestimmung von HQ_{100} Werten notwendig sein kann.

7. Zusammenschau und Schlussfolgerungen

7.1. Leiteinzugsgebiete und Regionalisierung

Ziel der Untersuchungen in den Leiteinzugsgebieten war es, die Ursache für die Unterschiede in den unterschiedlichen

Methoden für die Berechnung von HQ_{100} Werten zu verstehen. In *Abbildung 14* sind die Ergebnisse der unterschiedlichen HQ_{100} Abschätzungen für alle 10 Leiteinzugsgebiete abgebildet. Als Vergleich zu den neu berechneten Werten sind die HQ_{100} Werte aus der Statistik (HORA Projekt) dargestellt, sowie Abschätzungen des HQ_{100} mit dem Zemokost Modell unter Verwendung der Bemessungsniederschläge und maximierten Modellniederschläge ohne Flächenabminderung. Wie sich in der Abbildung erkennen lässt, sind die in HOWATI mit den beiden Methoden berechneten Werte (Monte Carlo HOWATI, Zemokost HOWATI) deutlich ähnlicher als die Ergebnisse anderer Methoden. Diese Annäherung ergibt sich einerseits durch die Wahl eines plausibleren Niederschlagsinputs für die ereignisbasierte Modellierung und andererseits vor allem für die Gebiete Weerbach, Wattenbach und Navisbach durch den S-förmigen Verlauf der Verteilungsfunktion. Bei einigen Gebieten liegen die Abschätzungen der Monte Carlo Simulationen auch über jenen des HORA Projektes, da die Verteilungsfunktion linearer über den Beobachtungszeitraum extrapoliert. Das liegt, ebenso wie die S-förmige Form der Verteilungsfunktion, an der verbesserten Einschätzung der Speicherfähigkeit der Gebiete, die durch die genauen Informationen über die Hydrogeologie gut abgeschätzt werden konnte. Die zusätzlichen Informationen über die Hydrogeologie haben sich somit als besonders wertvoller Quelle für die hydrologische Modellierung herausgestellt und führten zu einer wesentlich vergrößerten Zuverlässigkeit der berechneten Hochwasserdurchflüsse.

Die wesentlichen Erkenntnisse für die Leiteinzugsgebiete können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- In Gebieten mit hoher Speicherfähigkeit ist eine S-förmige Verteilungsfunktion möglich, was im Vergleich zur Hochwasserstatistik zu einer Erhöhung des HQ_{100} führt.
- Die Ergebnisse der Ereignismodellierung reagieren auf den gewählten Niederschlagsinput sehr sensibel. Ein plausibler Niederschlagsinput ist in den meisten Fällen (außer sehr kleine Gebiete) der Bemessungsniederschlag mit Flächenabminderung.
- Hydrogeologische Informationen aus Feldbegehungen sind bei der Einschätzung der Speicherfähigkeit eines Gebietes besonders wichtig.

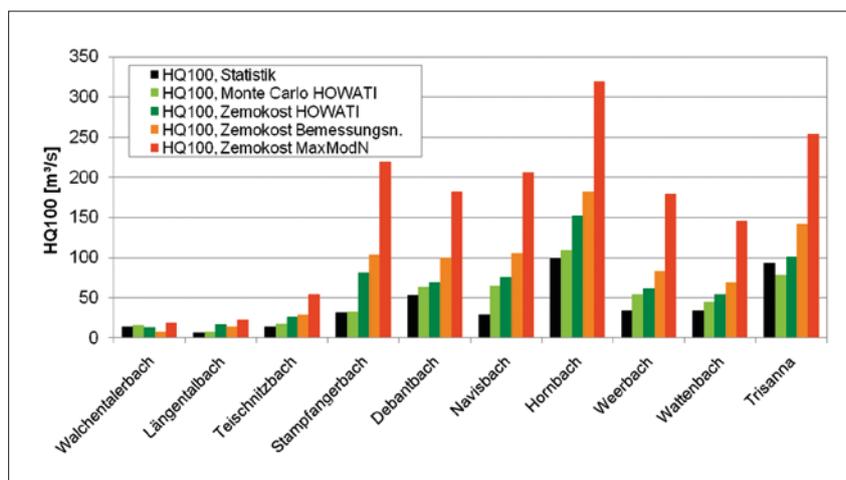


Abb. 14: Ergebnisse des HOWATI Projektes für die zehn Leiteinzugsgebiete (Monte Carlo HOWATI, Zemokost HOWATI). Im Vergleich dazu Ergebnisse aus der üblichen Pegelstatistik und Zemokost mit unterschiedlichen Niederschlägen.

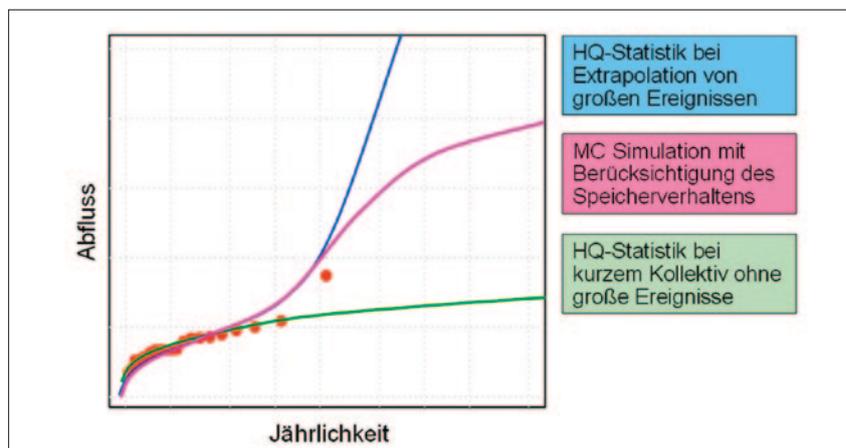


Abb. 15: Extrapolationsmöglichkeiten eines Hochwasserkollektivs

Im Grunde zeigen die Ergebnisse wie unterschiedlich das Extrapolationsverhalten der Verteilungsfunktion sein kann, sobald auch die Speicherfähigkeit der Gebiete berücksichtigt wird. *Abbildung 15* zeigt verschiedene Extrapolationsmöglichkeiten eines kurzen Datenkollektivs. Würde die Reihe mehrere große Ereignisse enthalten, dann wäre eine Extrapolation entsprechend der blauen Funktion denkbar. Enthält die Reihe keine großen Ereignisse, dann würde die Extrapolation der grünen Funktion entsprechen. Berücksichtigt man allerdings auch die Speicherfähigkeit des Gebietes, dann ist es möglich, dass die Verteilungsfunktion einen S-förmigen Verlauf wie die rosa dargestellte Funktion hat. Dies ist in Gebieten mit einem derartigen Speicherhalten der realistische Verlauf.

Die Erkenntnisse aus den Leiteinzugsgebieten konnten in der Regionalisierung durch die Einschätzung einer S-Kurve in

Gebieten mit großer Speicherfähigkeit berücksichtigt werden. Dadurch konnte ein realistischeres Extrapolationsverhalten der Beobachtungsdaten erzielt werden. Weiters wurden die Ergebnisse der Regionalisierung durch den Vergleich von Spendiagrammen benachbarter Gebiete plausibilisiert. *Abbildung 16* zeigt die verbesserte Abschätzung der HQ_{100} Werte für das gesamte Bundesland Tirol.

Grundsätzlich konnte im HOWATI Projekt zwanglos eine bessere Einschätzung der HQ_{100} Werte erzielt werden. Der Vergleich von verschiedenen Ansätzen zur Bestimmung von HQ_{100} Werten war dabei hilfreich und sollte wenn möglich bei der Festlegung solcher Werte immer angewandt werden. Die vielfältigen Informationsquellen wie im Merkblatt DWA-M 251 empfohlen erwiesen sich als besonders nützlich (siehe auch Informationsweiterung in Merz und Blöschl, 2008). Durch

die Erkenntnisse aus den Leiteinzugsgebieten konnte ein wesentlicher Schritt in Richtung Harmonisierung der Methoden zur Bestimmung von HQ_{100} Werten erzielt werden.

7.2. Empfehlungen

Folgende Empfehlungen ergeben sich für die Wahl von HQ_{100} Werten in der Zukunft:

- Bei Gebieten mit großer Speicherfähigkeit sollte berücksichtigt werden, dass ein S-förmige Verteilungsfunktion auftreten kann.
- Die Festlegung von HQ_{100} Werten in unbeobachteten Gebieten sollte auf möglichst umfangreicher Information durch eine ereignisbasierte Niederschlags-Abflussmodellierung stattfinden.
- Bei der Wahl des Niederschlagsinputs sollte darauf geachtet werden, dass plausible (und nicht maximierte) Werte verwendet werden.
- Der Einbezug von hydrogeologischer Information aus Feldbegehungen kann zu einer wesentlichen Verbesserung der Abschätzung von HQ_{100} Werten beitragen.
- Der Vergleich von statistischen und deterministischen Methoden bei der Wahl eines HQ_{100} für ein bestimmtes Einzugsgebiet reduziert die Unsicherheiten.
- Die im HOWATI bestimmten HQ_T Werte sind statistisch gesehen Erwartungswerte, Bemessungswerte können darüber liegen.
- Das DWA-M 251 Merkblatt „Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten“ gibt den momentanen Stand der Technik bei der Wahl von HQ_T Werten vor und sollte als Empfehlung für die Ermittlung von Hochwasserdurchflüssen einer bestimmten Jährlichkeit herangezogen werden.

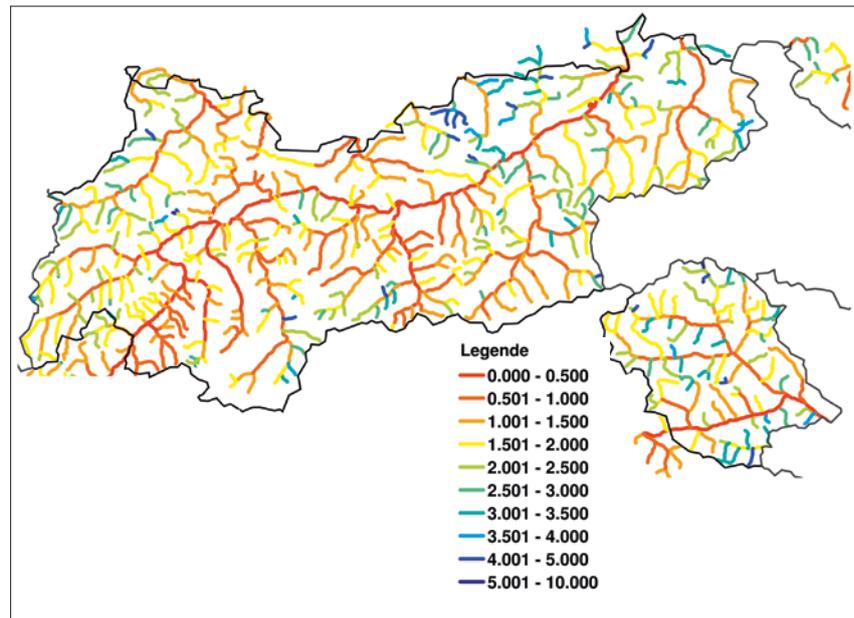


Abb. 16: HOWATI HQ_{100} Abflussspenden ($m^3/s/km^2$).

sen einer bestimmten Jährlichkeit herangezogen werden.

8. Danksagung

Diese Studie wurde im Auftrag des Hydrographische Dienstes Tirol und des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinerverbauung Sektion Tirol mit freundlicher Unterstützung durch das Adaptalp Projekt durchgeführt. Wir danken den Auftraggebern sowie allen am Projekt beteiligten Personen für die ausgezeichnete Zusammenarbeit.

Korrespondenz:

- M. Rogger**¹⁾, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, Email: rogger@hydro.tuwien.ac.at, Tel.: +43-1-58801-22327, Fax: +43-1-58801-22399
B. Kohl²⁾, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Innsbruck,
H. Pirkl³⁾, Technisches Büro für Geologie Dr. Pirkl, Wien,
M. Hofer⁴⁾, Ingenieurbüro Dipl.-Ing. Günter Humer GmbH, Geboltskirchen, Email: office@ib-humer.at, Tel.: 07732 4146, Fax: 07732 414622
R. Kirnbauer⁵⁾, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, Email: kirnbauer@hydro.tuwien.ac.at, Tel.: +43-1-58801-22320, Fax: +43-1-58801-22399
R. Merz⁶⁾, Department for Catchment Hydrology, UFZ Halle
J. Komma⁷⁾, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, Email: komma@hydro.tuwien.ac.at, Tel.: +43-1-58801-22316, Fax: +43-1-58801-22399
A. Viglione⁸⁾, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, Email: viglione@hydro.tuwien.ac.at, Tel.: +43-1-58801-22317, Fax: +43-1-58801-22399
G. Blöschl⁹⁾, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, Email: bloeschl@hydro.tuwien.ac.at, Tel.: +43-1-58801-22315, Fax: +43-1-58801-22399

LITERATUR

- Blöschl G, Reszler C, Komma J (2008)** A spatially distributed flash flood forecasting model. *Environmental Modelling & Software* 23, pp. 464–478
Blöschl, G. und R. Merz (2008) Bestimmung von Bemessungshochwassern gegebener Jährlichkeit - Aspekte einer zeitgemäßen Strategie. *Wasserwirtschaft*, 98 (11) 12–18.
Heinrich M, Untersweg T., Lipiarski P (Redakteure) unter Mitwirkung von Grösel K, Kreuss O, Lipiarska I, Moshammer B, Mostler H, Posch-Trözmüller G, Rabeder J (2008) Digitale Arbeitskarte zur Verbreitung von Lockergesteinen in Österreich 1:50.000 unter Verwendung publizierter und unpublizierter geologischer Karten. – Unveröff. digitaler Datensatz VLG-Proj. Bundesweite Vorsorge Lockergesteine, Geol. B.-A. / FA Rohstoffgeologie, Wien
Kohl B, Klebinder K, Markart G, Perzl F, Pirkl H, Riedl F, Stepanek L (2008) Analyse und Modellierung der Waldwirkung auf das Hochwasserereignis im Paznauntal vom August 2005 - Interpräsent 2008, Dornbirn, Conference Proceedings, 2

- Kohl, B. (2011)** Das Niederschlags-/Abflussmodell ZEMOKOST. Dissertation, Universität Innsbruck.
Markart G., Kohl B, Sotier B, Schauer T, Bunza G, Stern R (2004) Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0) Dokumentation, 3, BFW.
Merz R., G. Blöschl and G. Humer (2008) Hochwasserabflüsse in Österreich - das HORA Projekt. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 60, (9-10) 129 – 138.
Merz, R. und Blöschl, G. (2008) Informationserweiterung zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 52, (6) 300-309
Pirkl H (2000): Absicherung von Kartierungs- und Bewertungsindikatoren des spezifischen Flächenbeitrages zu Schutz- und Wasserhaushaltsregelungsfunktionen in Wildbacheinzugsgebieten typischer alpiner Kulturlandschaften als Basis einer Einzugsgebiets-Management-Planung. Abschlussbericht.- Unveröffentl. Bericht im Auftrag BMLF und BMWV

- Pirkl H (2003a)** Naturraumrisiko Glemmtal. GIS-Projekt. - Unveröffentl. Bericht im Auftrag BMLFUW
Pirkl H (2003b) Naturraumrisiko Glemmtal. Eine prozessorientierte Betrachtung.- Unveröffentl. Bericht im Auftrag BMLFUW
Reszler, Ch., J. Komma, G. Blöschl, D. Gutknecht (2006) Ein Ansatz zur Identifikation flächendetaillierter Abflussmodelle für die Hochwasservorhersage. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50 (5), pp. 220-232.
Rudolf-Miklauer, F. und N. Sereinig (2009) Festlegung des Bemessungshochwassers: Prozessorientierte Harmonisierung für Flüsse und Wildbäche. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft # 7-8/2009, a27-a32.
Sivapalan M, G Blöschl, R Merz and D Gutknecht (2005) Linking flood frequency to long-term water balance: incorporating effects of seasonality. *Water Resources Research* 41, Art. Id. W06012
Sköien J O, Blöschl G (2007) Spatiotemporal topological kriging of runoff time series. *Water Resources Research*, 43, Art. Id. W09419.