

EIN BEITRAG ZUR HARMONISIERUNG VON DETERMINISTISCHEN UND STATISTISCHEN METHODEN ZUR BESTIMMUNG VON HOCHWASSERDURCHFLÜSSEN

HOWATI-HOCHWASSER TIROL

Magdalena Rogger¹, Bernhard Kohl², Herbert Pirkl³, Ralf Merz⁴, Alberto Viglione⁵,
Robert Kirnbauer⁶ and Günter Blöschl⁷

ZUSAMMENFASSUNG

Die Bestimmung von Hochwasserdurchflüssen einer bestimmten Jährlichkeit (z.B. HQ₁₀₀) ist die Grundlage für die Festlegung von Bemessungshochwässern für Hochwasserschutzmaßnahmen. Die Hochwasserdurchflüsse können in der Praxis mit statistischen und deterministischen Methoden berechnet werden, die allerdings für das gleiche Einzugsgebiet nicht immer konsistente Ergebnisse liefern. In dieser Studie wurden HQ₁₀₀-Werte für zehn alpine Piloteinzugsgebiete in Tirol mit verschiedenen Methoden bestimmt und verglichen. Einerseits wurde das ereignisbasierte Zemokost-Modell als deterministischer Ansatz gewählt, und andererseits wurden Monte-Carlo Simulationen mit einem kontinuierlichen Abflussmodell als probabilistischer Ansatz durchgeführt. Beim deterministischen Ansatz spielt vor allem die Wahl des Niederschlagsinputs eine entscheidende Rolle, wobei in Österreich die Bemessungsniederschläge mit Flächenabminderung meist zu plausiblen Ergebnissen führen. Die Ergebnisse der Monte-Carlo Simulationen zeigen andererseits, dass in bestimmten Fällen Schwellenwertprozesse einen Knick in der Hochwasser-Wahrscheinlichkeitsverteilung verursachen können, der durch einfache Hochwasserstatistik nicht erfasst wird. Die alleinige Anwendung der Hochwasserstatistik kann in diesen Fällen zu einer Unterschätzung des HQ₁₀₀ führen.

Keywords: Hochwasserschutz, Bemessungswert, Schwellenwertprozess

ABSTRACT

The estimation of floods with a given return period (i.e. 100-year-flood) is the basis for specifying design values of flood control measures. The flood estimates can be calculated with a variety of statistical and deterministic methods which however, may yield inconsistent results for the same catchment. In this study, 100-year-floods for ten alpine catchments in Tyrol were estimated with different methods. On the one hand, the event based Zemokost-model was applied as a deterministic approach. On the other hand probabilistic Monte-Carlo simulations with a continuous rainfall runoff model and stochastically generated precipitation were performed. For the deterministic approach, the choice of rainfall input plays a crucial role. For Austrian conditions, most plausible results were obtained by using the available design storms accounting for areal reduction. Furthermore the results of the Monte-Carlo simulations show that under certain conditions a step change in the flood frequency curve can occur which is generally not accounted for in flood frequency statistics. In these cases flood frequency statistics alone can significantly underestimate the 100-year-flood.

¹ DI Magdalena Rogger, Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, Vienna University of Technology, Karlsplatz 13/222, 1040 Vienna, Austria (e-mail: rogger@hydro.tuwien.ac.at)

² Dr. Bernhard Kohl, Federal Research and Training Centre for Forests, Natural Hazards and Landscape, Austria

³ Dr. Herbert Pirkl, Technical Office for Geology, Vienna, Austria

⁴ Prof. Ralf Merz, Inst. of Hydr. Engineering and Water Resources Management, Vienna Uni. of Technology, Austria

⁵ Dr. Alberto Viglione, Inst. of Hydr. Engineering and Water Resources Management, Vienna Uni. of Technology, Austria

⁶ Ass. Prof. Robert Kirnbauer, Inst. of Hydr. Engineering and Water Resources Management, Vienna Uni. of Technology, A.

⁷ Prof. Günter Blöschl, Inst. of Hydr. Engineering and Water Resources Management, Vienna Uni. of Technology, Austria

Keywords: flood control, design flood, step change

EINLEITUNG

Die Bestimmung von extremen Hochwasserdurchflüssen mit niedriger Auftretenswahrscheinlichkeit wie beispielsweise das HQ_{100} spielen eine wichtige Rolle bei der Bestimmung von Hochwasserbemessungswerten, die wiederum zur Auslegung von Hochwasserschutzmaßnahmen und zur Ausweisung von Gefahrenzonen dienen. Eine möglichst genaue Bestimmung der Werte ist wünschenswert, wobei die verschiedenen deterministischen und statistischen Methoden die zum Einsatz kommen (Blöschl und Merz, 2008), oft inkonsistente Ergebnisse für das gleiche Einzugsgebiet liefern.

Welche Methode in einem speziellen Fall gewählt wird, hängt meist von der Datenverfügbarkeit und der Praxis in der jeweiligen Dienststelle ab. Handelt es sich um ein Einzugsgebiet mit Pegelmessungen, dann wird in der Regel eine Hochwasser-Wahrscheinlichkeitsverteilung an die Messdaten angepasst und daraus der gesuchte Wert bestimmt. Diese Methode, die auch als „Standardmethode“ der Hochwasser-Wahrscheinlichkeitsanalyse bezeichnet wird (Klemeš, 1993), hat den Nachteil, dass bei kurzen Datenreihen ohne größere Hochwasserereignisse oft weit über den Beobachtungsbereich hinaus extrapoliert werden muss (Merz und Blöschl, 2008) und daher die bestimmten HQ_{100} Werte mit großen Unsicherheiten belegt sind.

In unbeobachteten Einzugsgebieten wo keine Pegeldata vorhanden sind, werden oft deterministische Ansätze wie beispielsweise die ereignisbasierte Abflussmodellierung eingesetzt. Die Genauigkeit der Ergebnisse beruht hierbei stark auf den getroffenen Annahmen, die wiederum von den Einzugsgebietsinformationen abhängen. Meist sind allerdings notwendige Niederschlags-, Boden- und geologische Daten nicht im gewünschten Umfang vorhanden, was ebenfalls zu großen Unsicherheiten in den berechneten Ergebnissen führt.

Ziel dieser Studie war es, die Unterschiede zwischen den angewandten Methoden zu erklären, um besser zu verstehen, warum diese Methoden oft unterschiedliche Ergebnisse für dasselbe Einzugsgebiet liefern. Zu diesem Zweck wurde eine genaue Untersuchung der Abflussprozesse in zehn alpinen Pileinzugsgebieten in Tirol (Österreich) mit den unterschiedlichen Methoden durchgeführt und die Ergebnisse analysiert und verglichen (Fig.1).

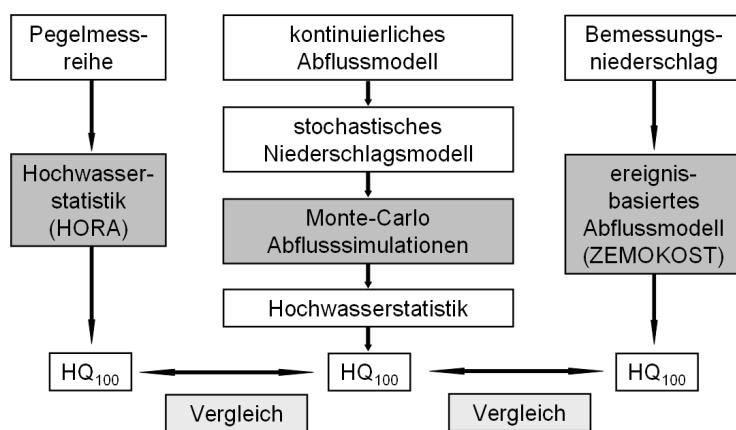


Fig. 1 Übersicht über die hier angewandte Methoden zur Berechnung von HQ_{100} Werten

Fig.1 Different methods for 100 year design flood estimation

Einerseits wurde als deterministischer Ansatz eine ereignisbasierte Abflussmodellierung mit dem Zemokost-Modell (Kohl, 2011) gewählt und andererseits wurden Monte-Carlo Simulationen mit einem kontinuierlichen Abflussmodell und generierten Niederschlägen durchgeführt. Als Vergleich standen die Ergebnisse des HORA Projektes (Merz et al., 2008) zur Verfügung, in dem für ganz Österreich HQ_T Werte durch Hochwasserstatistik abgeschätzt wurden. Als Grundlage für die

Simulationen wurden außerdem Detailstudien zur hydrogeologischen Situation der Piloteinzugsgebiete durchgeführt.

PILOTEINZUGSGEBIETE

Die für die Studie gewählten Piloteinzugsgebiete sind zehn alpine Einzugsgebiete mit einer Größe von 4 bis 98 km², die sich in der Region Tirol, in den Alpen Westösterreichs befinden. In allen Gebieten sind Messpegel vorhanden und daher standen jeweils Abflussdaten mit einer Länge von mindestens 20 Jahren für die Modellierung zur Verfügung. Eine Übersicht über die Einzugsgebiete, deren Höhererstreckung sowie Niederschlags- und Abflussverhalten ist in Tab. 1 gegeben.

Tab. 1 Übersicht Piloteinzugsgebiete

Tab. 1 Overview pilot catchments

Einzugsgebiet	Größe (km ²)	Höchster Punkt (m ü. A.)	Tiefster Punkt (m ü. A.)	Mittlerer Jahresniederschlag (mm)	Mittlerer Jahresabfluss (m ³ /s)
Wattenbach	73	2722	537	1150	2,05
Weerbach	73	2565	534	1240	2,25
Stampfangerbach	21	1679	633	1230	0,56
Teischnitzbach	14	3551	1650	1090	0,51
Trisanna	98	3295	1522	1280	1,45
Navisbach	62	2745	1101	1082	1,63
Walchentaler Bach	4	1238	692	1550	0,18
Debantbach	57	3065	1037	869	1,94
Hornbach	64	2480	971	1845	3,91
Längentalbach	9	1905	2954	1100	0,36

Fig. 2 soll einen Eindruck über die Beschaffenheit der Einzugsgebiete im hochalpinen Bereich vermitteln. Die Gebiete sind meist dünn besiedelt, und durch ausgedehnte Schutt- und Felsflächen im oberen Bereich, alpine Rasen mit Beeinflussung durch Almwirtschaft in den mittleren Lagen und Wald- und Wiesenflächen in den tieferen Lagen charakterisiert.



Fig. 2 Fotos der Piloteinzugsgebiete (links Trisanna, rechts Hornbach)

Fig. 2 Photos of pilot catchments (left Trisanna catchment, right Hornbach catchment)

HYDROGEOLOGISCHE DETAILSTUDIEN

Um eine bessere Einschätzung des Abflussverhaltens und des Speichervermögens der Piloteinzugsgebiete zu erhalten, wurden detaillierte Studien zur hydrogeologischen Situation der Gebiete mit Feldbegehungen durchgeführt. Es wurde dabei vor allem zwischen Flächen mit oberflächlichem, seichtgründigem und tiefgründigem Abflussverhalten unterschieden. Als Grundlage für die Untersuchungen dienten geologische Karten, Lockersedimentkarten, ein digitales Höhenmodell und Orthophotos. Die aus diesen Grundlagen gewonnenen Informationen wie

beispielsweise die Verteilung von Fest- und Lockergesteinen aus den geologischen Karten, das aktuelle Abflusssystem aus den Orthophotos und geomorphologische Phänomene aus dem digitalen Geländemodell wurden zu unterschiedlichen Hauptabflussprozessstypen zusammengeführt, die im wesentlichen folgende Klassen umfassen:

- überwiegend tiefgründiger Abfluss
- überwiegend tiefergründiger Zwischenabfluss
- überwiegend seichtgründiger Zwischenabfluss
- überwiegend Oberflächenabfluss auf Felsoberflächen
- überwiegend Oberflächenabfluss auf Feuchtfächen

Falls für das jeweilige Einzugsgebiet notwendig, wurden weitere Klassen wie beispielsweise Karstflächen oder Flächen mit Abfluss auf Fels in Klüften definiert. Auf Basis dieser Unterteilung wurde eine erste Übersichtskarte mit den Hauptabflussprozessstypen für jedes Einzugsgebiet erstellt. Die Kontrolle dieser Einschätzung erfolgte mit Feldbegehungen, bei welchen zur Plausibilisierung zusätzlich gezielte Abflussmessungen in den jeweiligen Einzugsgebieten durchgeführt wurden. Fig. 3 zeigt die für den Stampfangerbach erstellte Abflussprozesskarte.

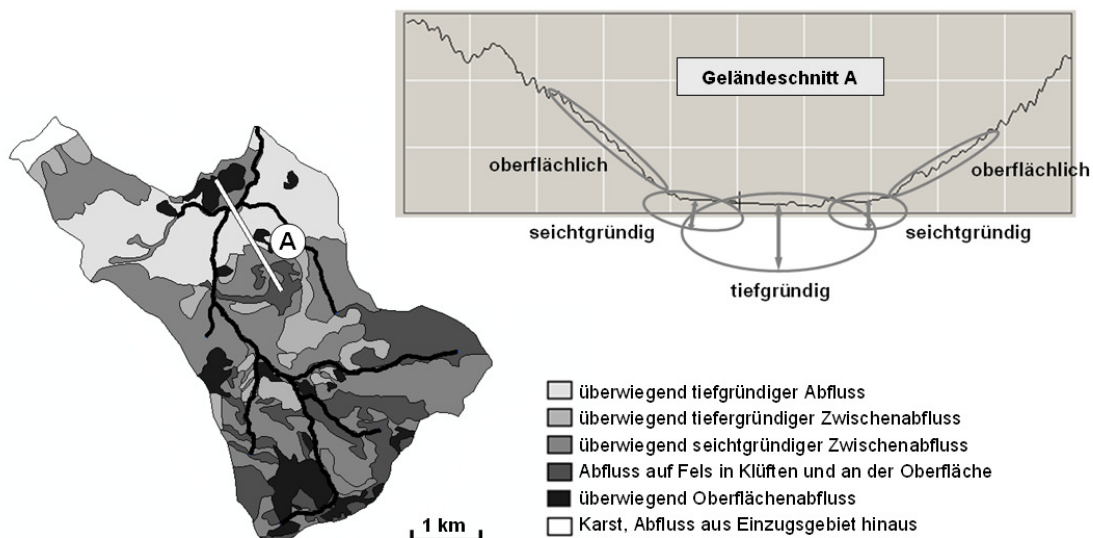


Fig. 3 Hydrogeologische Abflussprozesskarte des Stampfangerbaches (Rogger et al., 2011a)
Fig. 3 Hydrogeologic runoff process map of Stampfangerbach catchment (Rogger et al., 2011a)

Diese hydrogeologische Flächendifferenzierung stellt eine qualitative bis semiquantitative Aussage über das Abflussverhalten der Einzugsgebiete dar. Der Geländeschnitt A in Fig. 3 zeigt, welche Zusatzinformation durch die Abflussprozesskarte für die hydrologische Modellierung gewonnen werden kann. Die Abflussprozesskarte gibt Aufschluss über die Tiefe, in der die Abflussprozesse überwiegend stattfinden, und hilft somit dominante Prozesse in den verschiedenen Teilen des Einzugsgebietes zu identifizieren. Felsoberflächen müssen in den Modellen so definiert werden, dass hauptsächlich Oberflächenabfluss stattfindet, während sich auf Flächen mit tiefgründigem Abfluss die Abflussprozesse hauptsächlich im Untergrund abspielen. Somit kann das Speichervermögen der Einzugsgebiete besser eingeschätzt werden und damit auch der Zeitpunkt, zu dem das Speichervermögen einer Fläche erschöpft ist und sie beginnt zum Oberflächenabfluss beizutragen (Rogger et. al, 2011a).

EREIGNISBASIERTE NIEDERSCHLAGS-ABFLUSSMODELLIERUNG – ZEMOKOST

Erste Berechnungen des HQ_{100} wurden mit dem ereignisbasierten deterministischen Niederschlags-Abflussmodell Zemokost (Kohl, 2011) durchgeführt. Das Zemokost-Modell wurde zur Abschätzung

von Hochwasserabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten ohne Pegelmessung entwickelt. Zur Bestimmung der Modellparameter wurde eine spezielle Geländeanleitung (Markart et al., 2004) beruhend auf Vegetations-, Boden- und Landnutzungseigenschaften durch eine Reihe von Beregnungsversuchen entwickelt. Mit Hilfe dieser Geländeanleitung wurden wichtige Modellparameter wie der Abflussbeiwert und die Oberflächenrauigkeit im Feld für jedes Piloteinzugsgebiet erhoben. Diese Parameter beschreiben die Abflussbildung und Abflusskonzentration im Modell. Fig. 4 zeigt die Abflussbeiwert- und Oberflächenrauigkeitskarte des Stampfangerbaches.

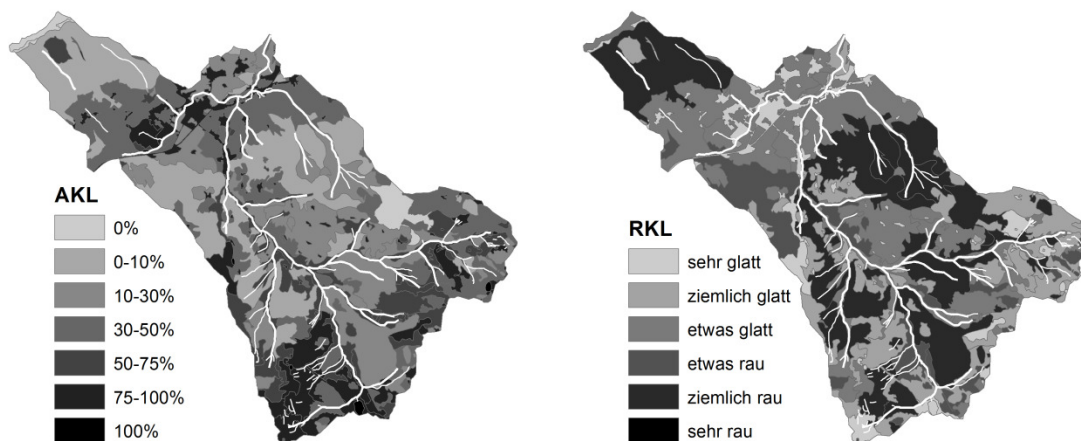


Fig. 4 Abflussbeiwert (AKL)- und Oberflächenrauigkeitskarte (RKL) des Stampfangerbaches aus Feldbegehungen (Kohl, 2011)

Fig. 4 Runoff coefficient (AKL) and roughness classes (RKL) of the Stampfangerbach catchment from field surveys (Kohl, 2011)

Weiters wurde für die Modellierung die hydrogeologische Information als Grundlage für die Parametrisierung der Zwischenabflussprozesse und die Bewertung von Flächen mit möglichem Rückhaltevermögen verwendet.

Als Input für die Modellierung des HQ_{100} wird im Zemokost-Modell ein Niederschlag mit der Jährlichkeit 100 verwendet. Das Modell beruht somit auf der Annahme, dass die Jährlichkeit des Niederschlags und des Abflusses gleich ist. In Österreich stehen drei unterschiedliche Niederschlagsdatensätze für diesen Zweck zur Verfügung:

- MaxModN-Niederschläge (Lorenz et al., 2000), die mit einem konvektiven Niederschlagsmodell berechnet wurden
- ÖKOSTRA-Niederschläge (Ökostra, 1992), die auf einer statistischen Auswertung der Niederschlagsmessreihen in Österreich beruhen
- geschätzte "Bemessungsniederschläge" (Weilguni, 2009) interpoliert aus den MaxModN und ÖKOSTRA Daten

In dieser Studie wurden alle drei Niederschlagsdatensätze für die Modellierung verwendet und die Ergebnisse verglichen, um festzustellen, welcher Datensatz zu plausible Abschätzungen führt.

Da das Zemokost-Modell für die Abschätzung der Hochwasserdurchflüsse in Einzugsgebieten ohne Pegelmessung konzipiert wurde, wurden die Berechnungen des HQ_{100} zunächst so durchgeführt, als wären keine Abflussmessungen vorhanden. Die Plausibilisierung der ersten Ergebnisse erfolgte durch eine Reihe von Informationen wie beispielsweise über Ereignischroniken, den Vergleich des modellierten Basisabflusses und dessen Geschwindigkeit mit dem zum Zeitpunkt der Geländebegehungen beobachteten Abfluss, den Vergleich der HQ_{100} Ergebnisse mit empirischen

Hochwasserformeln und mit den höchsten beobachteten Abflussspitzen der benachbarten Einzugsgebiete. Nach dieser ersten Einschätzung wurde für alle Leiteinzugsgebiete versucht, die zwei größten Abflussereignisse mittels Blockniederschlägen und räumlicher Flächenabminderung nachzurechnen, wodurch bestätigt werden konnte, dass mit dem Zemokost-Modell meist plausible Abflussganglinien simuliert werden (Kohl, 2011). Als Beispiel ist ein Ereignis des Stampfangerbachs in Fig. 5 dargestellt.

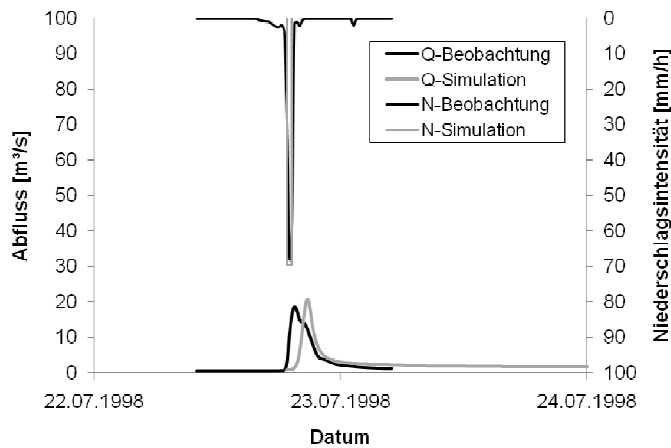


Fig. 5 Zemokost Modellergebnis für das Ereignis 1998 (Kohl, 2011)

Fig. 5 Zemokost simulation results for 1998 event (Kohl, 2011)

Bezüglich des Niederschlagsinputs zeigten die Berechnungen mit Zemokost, dass für die meisten Gebiete die „Bemessungsniederschläge“ mit Flächenabminderung zu plausiblen HQ_{100} Werten führen. Nur in den sehr kleinen Einzugsgebieten können höhere Niederschläge plausibel sein, da konvektive Ereignisse stärker zum Tragen kommen. Fig. 6 zeigt die unterschiedlichen HQ_T Abschätzungen bei der Verwendung der drei Niederschlagsdatensätze. Der mit Anpassung bezeichnete Punkt beschreibt den plausibilisierten HQ_{100} Wert (Kohl, 2011).

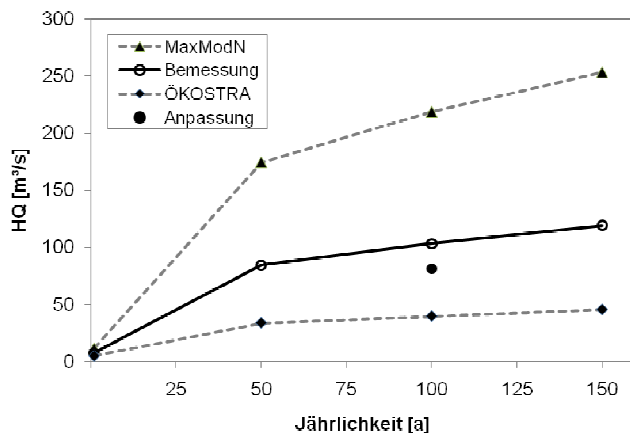


Fig. 6 Stampfangerbach: Bemessungsabflüsse berechnet mit verschiedenen Niederschlagsinputs (Kohl, 2011)

Fig. 6 Stampfangerbach catchment: design floods calculated with different rainfall inputs (Kohl, 2011)

MONTE-CARLO SIMULATIONEN

Die zweiten HQ_{100} Abschätzungen erfolgten durch einen probabilistischen Ansatz mit langjährigen Monte-Carlo Simulationen. Dabei wurde ein kontinuierliches, flächendetailliertes, konzeptionelles, Wasserhaushaltsmodell auf Pixelbasis eingesetzt („soil moisture accounting scheme“, Reszler et al., 2006; Blöschl et al. 2008), mit welchem die lokalen Abflussprozesse in jedem Einzugsgebiet detailliert beschrieben wurden. Da es sich bei den modellierten Leiteinzugsgebieten um eher kleine Gebiete handelt, wurde eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung von $0,04 \text{ km}^2$ pro Pixel und 15

Minuten gewählt, um die Hochwasserspitzen mit dem Modell möglichst gut zu erfassen. Als Inputdaten für die Modellierung wurden gemessene Niederschlags- und Temperaturdaten und berechnete potentielle Evapotranspirationswerte verwendet.

Die Parameter des Modells wurden auf Basis aller zur Verfügung stehenden Gebietsinformationen wie beispielsweise Orthophotos, Landnutzungskarten, Abflussbeiwertkarten und hydrogeologischen Abflussprozesskarten festgelegt. Bei der Wahl der Parameter der Bodenspeicher kamen vor allem die im Feld erhobenen Abflussbeiwertkarten des Zemokost-Modells zum Einsatz, während bei der Wahl der Parameter der Grundwasserspeicher die hydrogeologischen Abflussprozesskarten eine wichtige Rolle spielten. Es wurde darauf geachtet, entsprechend den Informationen aus Feldbegehungen die Speicherfähigkeit des Gebietes möglichst gut zu erfassen, d.h. auf Flächen mit überwiegend tiefgründigem Abfluss wurden z.B. hohe Perkulationsraten in den Untergrund angenommen, während auf Fels- oder Sättigungsflächen die Parameter so angesetzt wurden, dass hauptsächlich Oberflächenabfluss auftritt. Da für alle Gebiete Pegelmessungen zur Verfügung standen, konnten die Modellergebnisse mit den Beobachtungsdaten plausibilisiert werden. Fig. 7 zeigt als Beispiel die Simulationsergebnisse des Stampfangerbachs von April bis Oktober 1997.

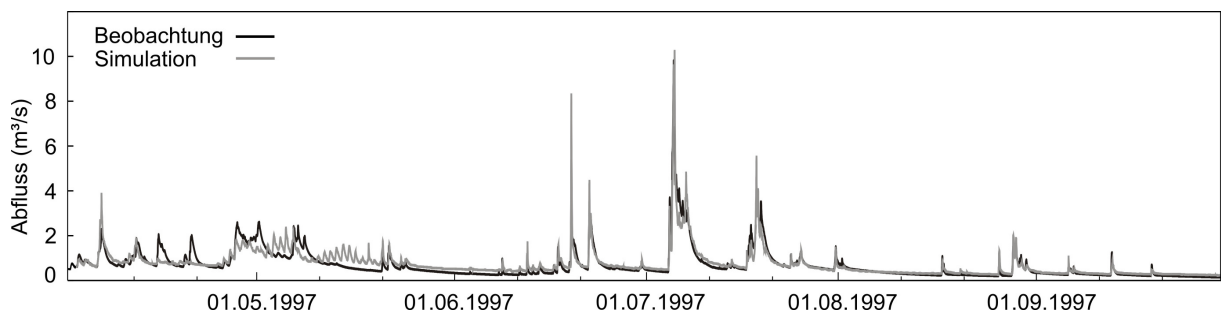


Fig. 7 Stampfangerbach: Simulationsergebnis April bis Oktober 1997

Fig. 7 Stampfangerbach catchment: simulation results April to October 1997

Die Abflussdynamik wird mit dem Modell sehr präzise erfasst. Einige Ungenauigkeiten treten lediglich in der Schneeschmelzphase auf, die auf Unsicherheiten in der Temperaturmessung zurückgeführt werden können.

Nach dem Aufsetzen und der Plausibilisierung der Abflussmodelle wurden für jedes Piloteinzugsgebiet mit dem jeweiligen Abflussmodell Monte-Carlo Simulationen über 10.000 Jahre durchgeführt. Als Inputdaten hierfür wurden 10.000 Jahre Niederschlagswerte mit einem stochastischen Niederschlagsmodell (Sivapalan et al., 2005) erzeugt. Die Kalibrierung und Validierung des stochastischen Niederschlagsmodells erfolgte durch hochaufgelöste Niederschlagsmessreihen von Stationen in oder in der Nähe der Einzugsgebiete. 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.

Mit Hilfe der Monte-Carlo Simulationen kann aus der generierten Abflussreihe eine abgeleitete Hochwasser-Wahrscheinlichkeitsverteilung ermittelt und somit der HQ_{100} Wert bestimmt werden. Ein besonders interessantes Ergebnis der Monte-Carlo Simulationen ist in Fig. 8 für den Weerbach dargestellt. In diesem Fall ist ein deutlicher Knick und eine Zunahme der Steigung in der Hochwasser-Wahrscheinlichkeitsverteilung bei einer Jährlichkeit von circa 30 Jahren zu beobachten. Dieser Knick entsteht durch einen Schwellenwertprozess, da bei der besagten Jährlichkeit die Speicherfähigkeit einer großer Anzahl von Flächen erschöpft ist, was zu einer deutlichen Zunahme der Flächen, die zum Hochwasserereignis beitragen, führt. Eine detaillierte Analyse dieses Schwellenwertverhaltens ist unter Rogger et al. (2011b) zu finden. Eine ähnliche Hochwasser-Wahrscheinlichkeitsverteilung konnte auch beim Wattenbach und Navisbach beobachtet werden. Durch diesen Prozess kann der HQ_{100} Wert um bis zu 40% höher sein als der mit der Hochwasserstatistik ermittelte Wert (Rogger et al, 2011b).

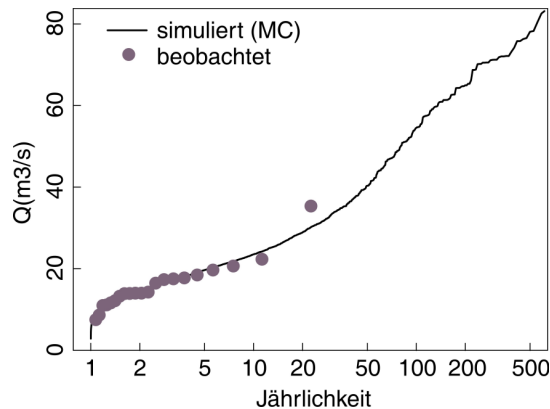


Fig. 8 Hochwasser-Wahrscheinlichkeitsverteilung aus Monte Carlo (MC) Simulation mit Schwellenwertprozess für das Einzugsgebiet Weerbach (Roger et al., 2011c)

Fig. 8 Flood frequency distribution of Weerbach catchment from Monte Carlo (MC) simulations showing a step change (Roger et al., 2011c)

ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Ziel dieser Studie war es die Unterschiede in den angewandten Methoden zur Bestimmung von HQ_T Werten für Bemessungszwecke zu verstehen und zu erklären. Zu diesem Zweck wurden neue HQ_{100} Abschätzungen für zehn Piloteinzugsgebiete mit einem deterministischen und einem probabilistischen Ansatz durchgeführt. Fig. 9 zeigt die Ergebnisse der Studie für alle zehn Piloteinzugsgebiete. Die mit HQ_{100} Monte-Carlo und HQ_{100} Zemokost bezeichneten Werte sind die Ergebnisse dieser Studie. Als Vergleich sind die HQ_{100} Werte, die mit statistischen Methoden im HORA Projekt bestimmt wurden, dargestellt (HQ_{100} , Statistik, HORA), sowie Abschätzungen des HQ_{100} aus dem Zemokost-Modell unter Verwendung der Bemessungsniederschläge ohne Flächenabminderung (HQ_{100} , Bemessungsn.) und der MaxModN-Niederschläge (HQ_{100} , MaxModN). Die letzten beiden Werte wurden dargestellt, um zu zeigen, wie stark die Ergebnisse des Zemokost-Modells bei der Verwendung unterschiedlicher Niederschlagsinputs variieren.

In Fig. 9 ist deutlich zu erkennen, dass sich die Ergebnisse dieser Studie (HQ_{100} Monte-Carlo und HQ_{100} Zemokost) ähnlicher sind als die anderen Vergleichswerte (z.B. HQ_{100} , Statistik, HORA und HQ_{100} , Bemessungsn.). Die Annäherung lässt sich einerseits auf die Wahl eines plausibleren Niederschlagsinput zurückführen, andererseits entsteht sie in den Gebieten Weerbach, Wattenbach und Navisbach durch die Berücksichtigung des Schwellenwertprozesses, der zu einem Knick in der Hochwasser-Wahrscheinlichkeitsverteilung führt und damit zu wesentlich höheren HQ_{100} Werten im Vergleich zur Hochwasserstatistik (Roger et al, 2011b). Der Schwellenwertprozess hängt von der Speicherfähigkeit des Einzugsgebietes ab, die besonders gut durch die detaillierten hydrogeologischen Abflussprozesskarten eingeschätzt werden konnte. Auch in den anderen Piloteinzugsgebieten, in denen kein Schwellenwertprozess auftritt, liegen die Ergebnisse der Monte-Carlo Simulationen teilweise über den statistischen Werten, da das Ergebnis der Monte Carlo Simulationen gerader über den Beobachtungsbereich hinaus extrapoliert als die statistischen Verteilungsfunktionen, was ebenfalls auf die besseren Einschätzung der Speicherfähigkeit der Gebiete zurückgeführt werden kann.

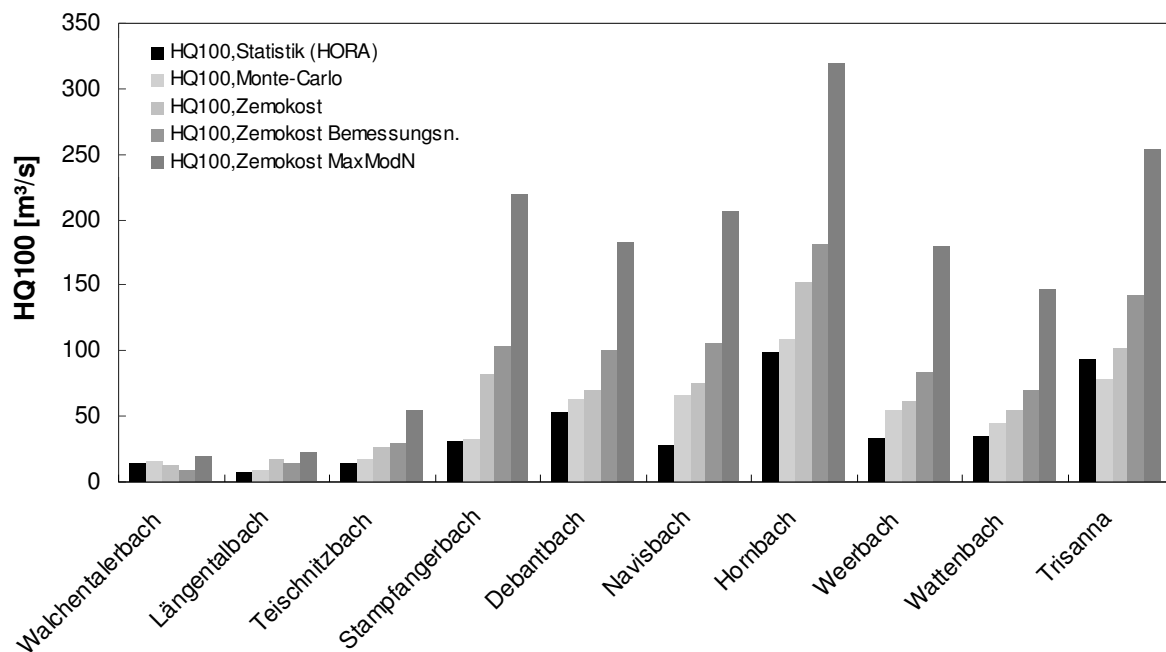


Fig. 9 HQ₁₀₀ Ergebnisse der Studie für die zehn Piloteinzugsgebiete (HQ₁₀₀ Monte-Carlo und HQ₁₀₀ Zemokost). Im Vergleich dazu Ergebnisse aus der üblichen Pegelstatistik und Zemokost mit unterschiedlichen Niederschlägen. (Rogger et al. 2011c)

Fig. 9 100 year design floods obtained in study (HQ₁₀₀ Monte-Carlo and HQ₁₀₀ Zemokost) and for comparison results from ordinary flood frequency statistics (HQ₁₀₀, Statistik) and from simulations with Zemokost model and different rainfall inputs (Rogger et al. 2011c).

Generell liegen die Ergebnisse des Zemokost-Modells über den Ergebnissen der Monte-Carlo Simulationen. Dies liegt höchstwahrscheinlich an der Annahme, dass der berechnete Abfluss die gleiche Jährlichkeit wie der gewählte Niederschlag besitzt. Tatsächlich ist die Beziehung zwischen der Jährlichkeit des Niederschlags und des dazugehörigen Abflusses aber unklar (Pilgrim and Cordery, 1975) und wird stark von der Bodenfeuchte im Einzugsgebiet beeinflusst (Viglione et al., 2009).

Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Studie beziehen sich auf die Stärken und Schwächen der derzeit angewandten Methoden zur Abschätzung von Hochwasserdurchflüssen einer bestimmten Jährlichkeit. Für die deterministische ereignisbasierte Modellierung konnte eindeutig gezeigt werden, dass die Wahl des Niederschlagsinputs eine entscheidende Rolle bei der Berechnung eines plausiblen Ergebnisses spielt. Unter den in Österreich zur Verfügung stehenden Datensätzen führen meist die „Bemessungsniederschläge“ mit Flächenabminderung zu einem plausiblen Ergebnis. Nur in sehr kleinen Gebieten, wo konvektive Ereignisse das Hochwassergeschehen dominieren, können auch höhere Niederschlagsinputs plausibel sein. Ein wichtiges Ergebnis der probabilistischen Modellierung ist der Einfluss von Schwellenwertprozessen auf die Hochwasser-Wahrscheinlichkeitsverteilung, der zu einem größeren HQ₁₀₀ führt, als der durch die Statistik abgeschätzte Wert. Zur Einschätzung solcher Schwellenwertprozesse ist eine genaue Kenntnis der hydrogeologischen Verhältnisse des betrachteten Einzugsgebietes notwendig, damit die Speicherfähigkeit des Gebietes in dem verwendeten Modell gut beschrieben werden kann.

Die neuen Erkenntnisse leisten einen Beitrag zum besseren Verständnis der Unterschiede der mit verschiedenen Methoden bestimmten HQ₁₀₀ Werte. Grundsätzlich ist die Anwendung und der Vergleich mehrerer Methoden gemäß dem „Mehr-Standbeine“-Ansatz von Gutknecht et al. (2006) zur Verringerung der Unsicherheiten in den Ergebnissen sinnvoll. Empfehlungen zur Bestimmung von Bemessungswerten nach dem aktuellen Stand der Technik sind im DWA Merkblatt- M251 (2011) zu finden.

DANKSAGUNG

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

REFERENZEN:

- Blöschl G., Reszler C., Komma J. (2008). A spatially distributed flash flood forecasting model. *Environmental Modelling & Software* 23: 464–478.
- Blöschl G., Merz R. (2008). Bestimmung von Bemessungshochwässern gegebener Jährlichkeit - Aspekte einer zeitgemäßen Strategie. *Wasserwirtschaft* 98(11): 12-18.
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2011). Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. DWA Merkblatt- M251. Hennef, Germany, in Druck.
- Gutknecht D., Blöschl G., Reszler Ch., Heindl H. (2006). Ein "Mehr-Standbeine"-Ansatz zur Ermittlung von Bemessungshochwässern kleiner Auftretenswahrscheinlichkeit (A "multi-pillar"-approach to the estimation of low probability design floods). *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 58(3/4): 44-50.
- Klemeš, V. (1993). Probability of extreme hydrometeorological events – a different approach. *Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts (Proc. Yokohama Symp., July 1993)*, IAHS Publ. no. 213: 167-176.
- Kohl, B. (2011). Das Niederschlags-/Abflussmodell ZEMOKOST. Dissertation, Universität Innsbruck.
- Lorenz P., Skoda G. (2000). Bemessungsniederschläge kurzer Dauerstufen ($D \leq 12$ Stunden) mit inadäquaten Daten. *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich* 80: 1-24.
- 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. BMLFUW. BFW-Dokumentation: 3/2004.
- Merz R., Blöschl G. (2008). Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and causal expansion of information. *Water Resources Research* 44 (8): article number W08432.
- Merz R., Blöschl G. and Humer G. (2008). Hochwasserabflüsse in Österreich - das HORA Projekt. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 60(9-10): 129 - 138.
- ÖKOSTRA - 93 (1992). Österreichische koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung. Heft 3 (Ed. G. SKODA): Eine optimierte Starkniederschlagsauswertung. Forschungsbericht, BMLFUW, Wien.
- Reszler Ch., Komma J., Blöschl G., Gutknecht D. (2006). Ein Ansatz zur Identifikation flächendetaillierter Abflussmodelle für die Hochwasservorhersage. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50 (5), pp. 220-232.
- Pilgrim D. H., Cordery I.(1975). Rainfall temporal patterns for design floods. *Journal of the Hydraulics Division* 101(1): 81-95.
- Rogger M., Viglione A., Merz R., Kirnbauer R., Pirkl H., Blöschl G. (2011a). Towards understanding the differences between deterministic and probabilistic flood hazard estimation methods, *Risk in Water Resources Management (Proceedings of Symposium H03 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011)*. IAHS Publ. 347: 16-21.
- Rogger M., Pirkl H., Viglione A., Komma J., Kohl B., Kirnbauer R., Merz R., Blöschl G. (2011b). Step changes in the flood frequency curve – process controls. *Water Resources Research*. In review.
- Rogger M., Kohl B., Pirkl H., Hofer M., Kirnbauer R., Merz R., Komma J., Viglione A., Blöschl G. (2011c). HOWATI - HochWasser Tirol, Ein Beitrag zur Harmonisierung von Bemessungshochwässern in Österreich. *ÖWAW – Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 7-8/11: 153-161.
- Sivapalan M., Blöschl G., Merz R., Gutknecht D. (2005). Linking flood frequency to long-term water balance: incorporating effects of seasonality. *Water Resources Research* 41: W06012.

- Viglione A., Merz R. and Blöschl G. (2009). On the role of the runoff coefficient in the mapping of rainfall to flood return periods. *Hydrology and Earth System Sciences* 13(5): 577 - 593.
- Weilguni V. (2009). Bemessungsniederschläge in Österreich. *Wiener Mitteilungen: Hochwasser, Bemessung, Risikoanalyse und Vorhersage*. Band 216: 71-84.