

Ein „Mehr-Standbeine“-Ansatz zur Ermittlung von Bemessungshochwässern kleiner Auftretenswahrscheinlichkeit

A „Multi-Pillar“-Approach to the Estimation of Low Probability Design Floods

von D. GUTKNECHT, G. BLÖSCHL, CH. RESZLER und H. HEINDL

KURZFASSUNG/SUMMARY

Die Ermittlung des Bemessungswertes nach dem hier vorgestellten Ansatz erfolgt auf Basis einer Kombination der Ergebnisse nach verschiedenen Methoden, die einander ergänzende Informationen einbringen. Sie nutzen unterschiedliche Daten und unterscheiden sich in Hinblick auf Voraussetzungen, Annahmen und Einflussfaktoren. Es ist zu erwarten, dass dadurch die Gesamtunschärfe des Bemessungswertes im Vergleich zu den Einzelmethoden reduziert wird. Die Umsetzung des Konzepts wird für die Ermittlung des Bemessungshochwassers von Talsperren gezeigt. Zur Anwendung kommen dabei die folgenden Methoden: (1) Lokale Hochwasserstatistik; (2) Regionale Hochwasserstatistik; (3) Niederschlag-Abfluss-Modellierung; (4) Gradex-Verfahren; (5) Hüllkurven-Verfahren.

The design flood estimation methodology proposed in this paper combines the results from a number of methods that are based on complementary information. The methods use different types of data, and differ in terms of their assumptions and controls. One would therefore expect that the uncertainty resulting from the combined approach is smaller than that from each of the individual methods. The application of the proposed approach is illustrated for the case of estimating design floods of dams. The individual methods used are (1) at site (local) flood frequency analysis, (2) regional flood frequency analysis, (3) rainfall runoff modelling, (4) the Gradex method, and (5) an envelope curve analysis.

1. EINLEITUNG

Die Erfahrungen der letzten Hochwasserjahre haben gelehrt, dass mit extremen Hochwässern nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch zu rechnen ist. Für die Praxis ergibt sich damit die Frage nach der Einbeziehung solcher Ereignisse in die Hochwasserschutzplanungen. In den Maßnahmenkatalogen spiegelt sich dies in der Aufnahme von Konzepten zum Umgang mit dem Restrisiko wider. Grundlage für die Beurteilung der Restrisikosituation ist die Angabe der maßgeblichen Durchflüsse und Wasserstände bei einem solchen Extremereignis. Damit rückt die Frage nach der Ermittlung dieser Größen in den Vordergrund. Je nach Planungssituation bewegt sich das Wiederkehrintervall des zugrundegelegten Bemessungshochwassers zwischen 200 und 300 Jahren – etwa bei Schutzmaßnahmen in stark gefährdeten Siedlungsbereichen – bis zu 1250 Jahren – so etwa am Niederrhein (siehe den Beitrag von CHBAB et al., 2006, dieses Heft). Für Hochwasserentlastungsanlagen von Talsperren werden Bemessungshochwässer mit Wiederkehrintervallen von 5000 – so in Österreich – bzw. 1000 und 10000 Jahren (BHQ1 und BHQ2 nach DIN 19700) benötigt.

Hochwässer dieser Jährlichkeiten sind definitionsgemäß äußerst selten und daher kaum praktisch zu beobachten. Bei ihrer Bestimmung muss daher über den Bereich des bisher Beobachteten hinaus extrapoliert werden. Zu den üblicherweise mit Extrapolatio-

nen verbundenen Unsicherheiten tritt hinzu, dass sich die Abflussprozesse gegenüber dem üblicherweise Beobachtbarem unter den Gegebenheiten eines Extremereignisses stark verändern. Abflussprozesse werden beschleunigt bedingt durch die Nichtlinearität in der Dynamik der Vorgänge, es kommt zu einem „Umspringen“ zu schneller ablaufenden Vorgängen. Andererseits bewirken der Rückhalt in Überschwemmungsgebieten, in Rückhaltebecken und in Speichern

Veränderungen im Ablauf der Hochwasserwellen.

Die Vielfältigkeit der Einflüsse auf die Ausbildung von extremen Hochwässern legt es nahe, die Ermittlung von Bemessungshochwässern mit großen Jährlichkeiten nicht auf eine Methode allein zu beschränken, sondern mehrere Methoden zu verwenden, die es ermöglichen, auf die verschiedenen Aspekte gezielt einzugehen. Eine Möglichkeit dazu bietet der im Folgenden vorgestellte Ansatz.

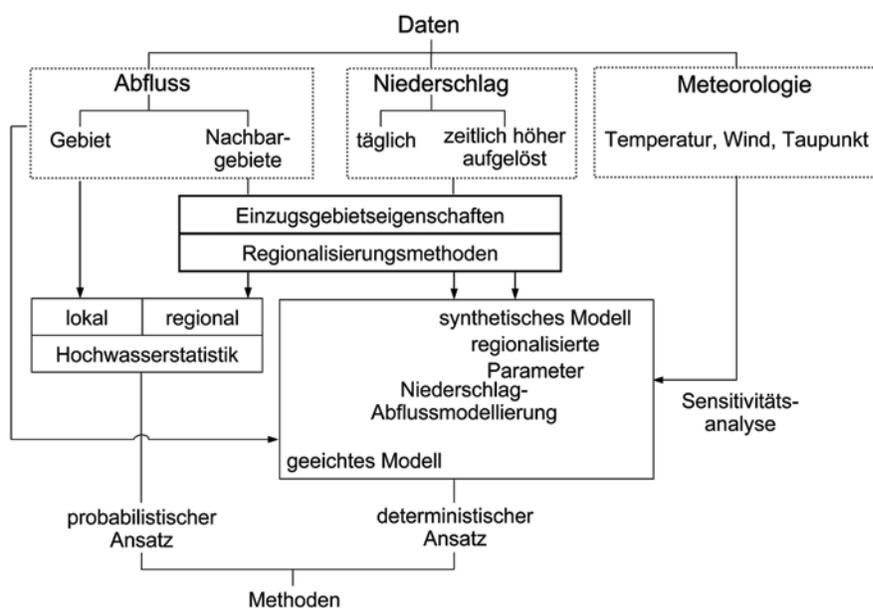


Abb. 1. Mehr-Standbeine-Ansatz: Daten/Konzepte/Methoden

2. MEHR-STANDBEINE-ANSATZ - GRUNDGEDANKEN, KONZEPTION

Der hier vorgestellte Ansatz ist dem Wesen nach ein „kombinierter“ Ansatz, bei dem mehrere Methoden gemeinsam in Kombination eingesetzt werden. Folgende Merkmale kennzeichnen ihn: Die Methoden unterscheiden sich voneinander; sie bringen einander ergänzende Information ein; sie nutzen unterschiedliche Daten; sie unterscheiden sich in Hinblick auf Voraussetzungen, Annahmen und Einflussfaktoren. Bezüglich der Daten gibt es Unterschiede nach dem Beobachtungselement (hier: Niederschlag, Abfluss, ...), nach der Beobachtungsdauer, dem Beobachtungsumfang und dem Beobachtungszeitraum sowie nach der zeitlichen und räumlichen Auflösung (Beobachtungsdichte). Abbildung 1 gibt einen Überblick über die bei der Bestimmung der Bemessungsabflüsse einsetzbaren Datenformen und die damit verbundenen Berechnungsmethoden.

Die Ermittlung des Bemessungswertes erfolgt auf Basis einer Kombination der Ergebnisse nach den verschiedenen Methoden. Je nach Aussagekraft der verfügbaren Daten kann dabei der methodische Rahmen der Kombination von einer einfachen Mittelbildung oder Plausibilitätsabschätzung bis zur Anwendung von Bayes'schen Methoden reichen, bei denen die mit den einzelnen Ergebnissen verbundenen Unsicherheiten in mathematischer Form gegenseitig abgewogen werden. Den Hintergrund

dafür bildet das Wissen, dass mit der Ermittlung eines Schätzwertes nach jeder der Methoden ein je eigener zugehöriger Vertrauensbereich oder „Unschärfe“-Bereich verbunden ist, dessen Größe von den Eigenschaften und der Güte der einbezogenen Datenreihe, aber auch von der Eignung und Güte des jeweiligen Modells abhängt. Vielfach wird es möglich sein, den zu erwartenden Unschärfbereich etwa über Sensitivitätsstudien unter Variation von Eingangsdaten, Annahmen, Modellparametern etc. abzuschätzen. Geht man davon aus, dass die ermittelten Schätzwerte und ihre Unsicherheiten unabhängig voneinander entstanden sind – was aufgrund ihrer Unterschiede in Eigenart und Konzeption berechtigt ist – ist zu erwarten, dass der durch Kombination der verschiedenen Ergebnisse abgeleitete Schätzwert zuverlässiger ist als jeder der einzelnen Schätzwerte. Das Ziel der Anwendung des Ansatzes liegt daher (a) einerseits in der Einengung des gesuchten Bemessungswertes im Vergleich zu dem durch die Einzelschätzungen aufgespannten Rahmen und (b) andererseits in der Reduktion der mit den einzelnen Schätzungen verbundenen Unsicherheit („Unschärfe“). Die zum Einsatz kommenden Methoden sind in diesem Sinne die verschiedenen „Standbeine“, auf denen die Ermittlung des gesuchten Bemessungswertes über die Kombination der Einzelschätzwerte aufbaut.

Im folgenden Abschnitt wird die Umsetzung des Konzepts anhand der

Vorgangsweise, die im Rahmen der Arbeiten am „Leitfaden zur Ermittlung des Bemessungshochwassers für Tal Sperren“ entwickelt wurde, beschrieben. Zur Anwendung kommen dabei die folgenden Methoden: (1) Lokale Hochwasserstatistik; (2) Regionale Hochwasserstatistik; (3) Niederschlag-Abfluss-Modellierung; (4) Gradex-Verfahren; (5) Hüllkurven-Verfahren. Eine Charakterisierung der verschiedenen Methoden nach ihrem Informationsgehalt gibt Tabelle 1.

3. REALISIERUNG DES KONZEPTS UNTER VERWENDUNG DER FÜNF METHODEN

3.1 Lokale Hochwasserstatistik

Liegen Hochwasserabflussdaten von einem Pegel im betrachteten Einzugsgebiet vor, so bildet die statistische Analyse der Hochwasserscheitel an dieser Pegelstelle den Ausgangspunkt der Untersuchungen. Dies steht im Einklang mit der üblichen Vorgangsweise zur Ermittlung des HQ_n. Die Durchführung kann wie üblich unter Verwendung verschiedener Verteilungsfunktionen erfolgen (z. B. DVWK 1999b; SCHREIBER, 1970).

Treten in der Datenreihe außerordentlich große Maximalwerte auf, so sind diese speziell zu behandeln. In statistischen Auswertungen vielfach als „Ausreißer“ negiert, kommt ihnen in Zusammenhang mit der Bestimmung extremer Bemessungshochwässer spezielle Bedeutung zu. Um Fehleinschätzungen zu vermeiden, sind die Durchflusswerte dieser Ausreißer gesondert zu prüfen, einerseits in Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Messwerte (z. B. NAEF, 2005) und andererseits auf die Einschätzung der Jährlichkeit des Ausreißers durch Vergleich mit benachbarten, womöglich längeren Reihen. Könnte ihnen eine Jährlichkeit zugeordnet werden, können die Werte nach den Methoden zur Einbeziehung von historischen Ereignissen in die Berechnung eingebunden werden (DVWK, 1999b, Anhang A3; GEES, 1997).

Bei der Beurteilung der Ergebnisse ist auf die Aussagekraft der verwendeten Stichprobe in Hinblick auf große Hochwasserwerte zu achten. Von der Auswertung langer Datenreihen her ist bekannt, dass sich die Schätzwerte bei Verwendung kürzerer Reihen sehr stark unterscheiden können, je nachdem, ob im betrachteten Zeitfenster große Ereignisse auftraten oder nicht.

Tabelle 1. Mehr-Standbeine-Ansatz: Informationsgehalt der einbezogenen Methoden

Methoden	Informationsgehalt
Lokale Hochwasserstatistik	Verhältnisse im betrachteten Gebiet; bester Aufschluss über Hochwassersituation im Gebiet; u. U. nur kurze Beobachtungsreihe ohne große bzw. extreme Ereignisse
Regionale Hochwasserstatistik	Datenkollektiv mit längeren Beobachtungsreihen; mehr Information über größere Ereignisse; Möglichkeit des Vergleichs zwischen HW-Simulation (Größe, Entstehung, Auftreten) unter den unterschiedlichen Bedingungen in den verschiedenen Gebieten
NA-Modellierung	Eingehen auf Niederschlagsverhältnisse und die Abflussentstehungsbedingungen im Gebiet; Möglichkeit der „Verschärfung“ der Inputs, der Parameter und der Entstehungsbedingungen
Gradex	Abschätzverfahren unter maximierenden Annahmen bezüglich der Abflussentstehungsbedingungen ...“ aller zusätzlicher Niederschlag geht in Abfluss über“ bei hohen Niederschlägen
Hüllkurven	Bisher beobachtete Extremwerte, sowohl aus näherer als auch weiterer Umgebung; Möglichkeit des Vergleichs; Abschätzung des extrem Möglichen unter verschiedenen Verhältnissen; Möglichkeit der Zuordnung zum betrachteten Gebiet

3.2 Regionale Hochwasserstatistik

In diesem Verfahrensschritt erfolgt die Schätzung des gesuchten Hochwasserwertes über eine Auswertung von Hochwasser-Durchfluss-Datenreihen von Stationen außerhalb des Gebietes unter Verwendung von Einzugsgebieteigenschaften und Ähnlichkeitsmaßen auf regionaler Basis.

Die für die verschiedenen Pegelstellen erhaltenen 5000-jährlichen Abflussspenden werden unter Einbeziehung verschiedener Gebietskenngrößen, die Aufschluss über die Ähnlichkeit im Abflussverhalten geben können, wie z. B. Einzugsgebietsgröße, Niederschlagsregime, Starkniederschläge, Saisonalität der Hochwässer, Böden, Geologie, Seenanteil, Gewässernetzdichte etc. miteinander verglichen und in Hinblick auf die im Untersuchungsgebiet vorherrschenden Gegebenheiten interpretiert. Die Abschätzung des gesuchten Wertes im Untersuchungsgebiet erfolgt über entsprechende Ausgleichslinien oder geeignet gewählte Hüllkurven im Hochwasserspenden-Diagramm. Daten von hydrologisch ähnlichen Gebieten erhalten stärkeres Gewicht. Bei der Beurteilung auf Ähnlichkeit hin ist die lokale Situation in Hinblick auf Abflusentstehung und Abflusskonzentration speziell zu bewerten.

Die Beurteilung der hydrologischen Ähnlichkeit in Hinblick auf Klimatologie und Meteorologie kann an Hand von Karten in einschlägigen Atlanten, in Österreich z. B. des Hydrologischen Atlas von Österreich (HAÖ), erfolgen. Neben Karten zum Niederschlag geben die in HAÖ enthaltenen Auswertungen zur Saisonalität der Hochwässer (Auftreten des Jahreshöchstwassers und der drei größten bisher beobachteten Hochwässer) wesentlichen Aufschluss über Einflussfaktoren auf die Hochwasserentstehung in den verschiedenen Gebieten (MERZ und BLÖSCHL, 2003). Geologie, Orographie und Topographie beeinflussen die Art der Abflussreaktion.

3.3 Niederschlag-Abfluss-(NA-)Modellierung

Die Einbeziehung der Abflusssimulation über eine NA-Modellierung soll es ermöglichen, Information über die Charakteristika und das Auftreten extremer Niederschlagsereignisse und über die Abflusentstehung im Einzugsgebiet in der Untersuchung zu berücksichtigen. Durch Variation der Annahmen über den Bemessungs-

erschlag, über die Abflussparameter und den Vorfeuchtezustand des Gebiets können Sensitivitätsstudien durchgeführt werden, die einen Einblick in die Veränderung der Bemessungswerte je nach Annahme geben und den möglichen Schwankungsbereich (inklusive oberer und unterer Grenzbereiche) ergeben. Als Basis für die Abflusssimulation wird ein „Ereignis“-Typ-Modell gewählt. Die Bearbeitungen umfassen die Wahl des Bemessungsniederschlags, die Erstellung eines geeigneten Niederschlag-abflussmodells und die Festlegung von Bereichsgrenzen für die Sensitivitätsstudien.

Bemessungsniederschlag

Die Wahl des Bemessungsniederschlags bildet den kritischen Punkt bei diesem Berechnungsansatz. Die Größe dieses Wertes entscheidet über die Größe des Bemessungshochwassers. Folgende Aspekte sind in diesem Zusammenhang wichtig: (a) die Wahl des Wiederkehrintervalls; (b) die Definition der maßgebenden meteorologischen Situation für das Auftreten von extremen Niederschlägen im betrachteten Gebiet und (c) die Einbeziehung aller zur Verfügung stehenden Datenquellen, um die Unsicherheiten in der Schätzung zu reduzieren und den Schätzwert nach Möglichkeit einzuengen.

Die Jährlichkeit des Niederschlags wird der in der Ingenieurpraxis häufig getroffenen Annahme folgend als gleich der Jährlichkeit des Abflusses angesetzt. Dies steht in Einklang mit den Vorgaben in mehreren Regelwerken, so zum Beispiel in DVWK (1999a) und im Flood Estimation Handbook (FEH, 1999), wo für seltene Ereignisse ebenfalls eine Korrespondenz zwischen den beiden Jährlichkeiten ausgewiesen ist (FEH Vol. 4, Fig. 3.2).

Die Definition des maßgebenden Niederschlags-Typs (konvektiv, advektiv, orographisch verstärkt/gedämpft (Luv-/Lee-Lagen)) liefert bereits wesentliche Anhaltspunkte zur Wahl der maßgebender Regendauer und die dabei möglicherweise zu erwartenden Intensitätsverteilung in Raum und Zeit.

Bei der Abschätzung des Bemessungsniederschlags werden in Anwendung des Mehr-Standbeine-Ansatzes auch hier mehrere Datenquellen eingesetzt, um die Unterschiede im Informationsgehalt zu nutzen. Die Daten können dabei wie folgt charakterisiert werden: (i) Niederschlagsbeobachtungen im Untersuchungsgebiet – „Was wurde im Gebiet schon beobachtet?“;

(ii) Beobachtungen an Niederschlagsstationen in Nachbargebieten – „Traten in der umgebenden Region ähnliche, größere Ereignisse auf?“; (iii) Starkniederschlagsangaben auf Regionalisierungsbasis – „Welche Werte ergeben sich für die lokale Situation bei gemeinsamer Auswertung über eine größere Region?“ (z. B. Regenreihen nach KREPS und SCHIMPF); (iv) Starkniederschlagswerte aus Berechnungen mit meteorologischen Modellen – „Mit welchen Niederschlägen ist zufolge theoretischer Ansätze zu rechnen?“ Als Beispiel seien hier die Karten über „Konvektive Starkniederschläge“ nach LORENZ und SKODA (2003) im HAÖ angeführt. (v) Hüllkurven auf Basis von beobachteten Extremwerten („Rekordwerte“) – „Wo liegen die oberen Grenzen bei Einbeziehung der unterschiedlichsten meteorologischen Bedingungen?“ (vi) PMP-Schätzungen als Basis für Begrenzungen „nach oben hin“. Die Festlegung des Bemessungsniederschlags kann dann in Analogie zum Mehr-Standbeine-Ansatz durch gegenseitiges Abwägen der nach den verschiedenen Auswertungen erhaltenen Werte erfolgen.

Als Beispiel sind in Abb. 2 die entsprechenden Auswertungen für ein kleines Einzugsgebiet wiedergegeben. Abb. 2 (a) enthält die Werte, die sich aus einer Auswertung der lokalen Daten ergaben. Abb. 2 (b) fasst die Ergebnisse der Unterlagen auf regionaler Basis zusammen, wobei die Werte nach SKODA und LORENZ auf maximierenden Modellberechnungen beruhen. Deutliche Unterschiede ergeben sich sowohl bei Vergleich der beobachteten Extremwerte auf der lokalen bzw. der regionalen Ebene als auch bei Vergleich der Beobachtungen mit den aus Modellrechnungen abgeleiteten maximierten Werten. Bei der Wahl des maßgebenden Wertes ist auf das Zustandekommen, die Datengrundlage und die Übertragbarkeit der einzelnen Ansätze zu achten. Im konkreten Fall wurde bei den kurzen Dauerstufen den maximierten regionalen Werten mehr Gewicht gegeben, bei den längeren Dauerstufen den lokal beobachteten Werten, da kurze Starkniederschläge im lokalen Messnetz wegen der geringen Stationsdichte nur unzureichend gemessen wurden, für Tagesniederschläge hingegen mehrere 100-jährige Reihen zur Verfügung standen.

Die zeitliche Verteilung wird in Abstimmung auf den maßgebenden Niederschlagstyp festgelegt. Liegen Starkregenbeobachtungen von großen Ereignissen vor, kann deren Vertei-

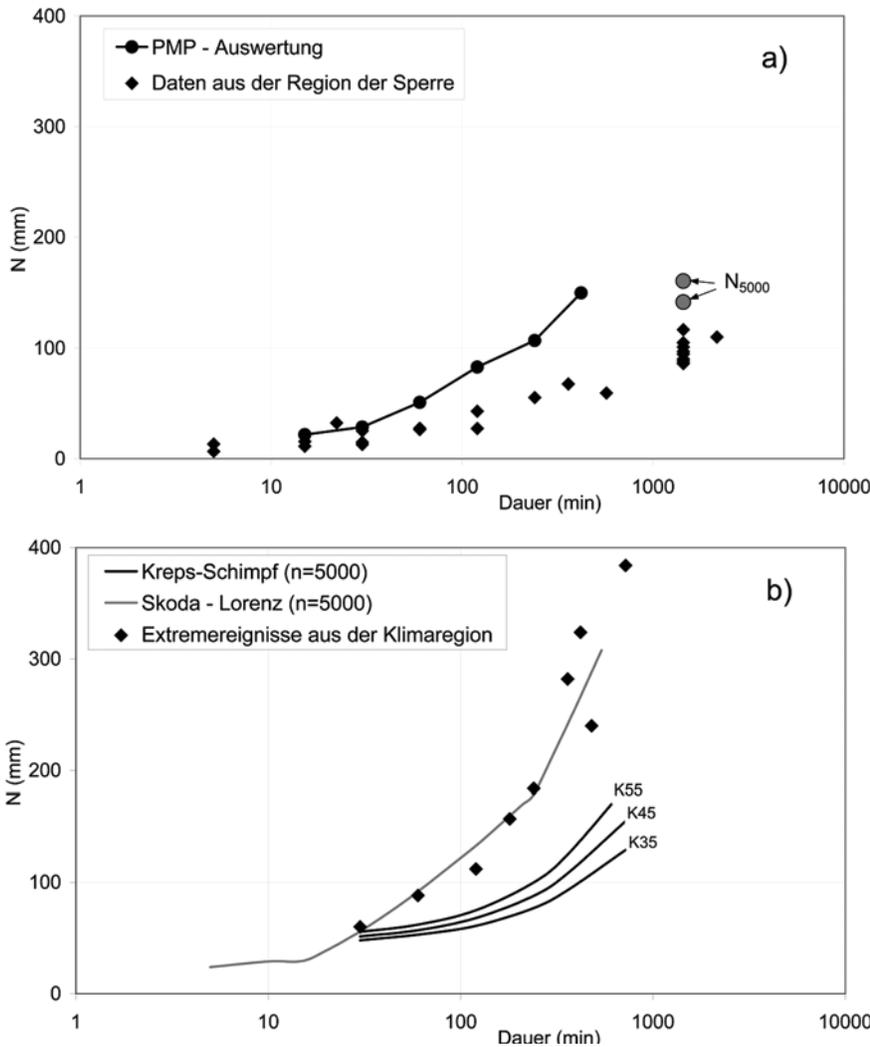


Abb. 2. Gegenüberstellung der Niederschlagswerte nach verschiedenen Datenquellen. a Auswertung auf lokaler Ebene, b Auswertung of regionaler Ebene

lung als Richtschnur genommen werden. Des weiteren können geeignete synthetische Regenganglinien angesetzt werden.

Die Berücksichtigung der räumlichen Verteilung der Niederschläge kann über Flächenabminderungsfaktoren erfolgen, die nach dem Niederschlagstypus zu unterscheiden sind. Stehen geeignete Ereignisdaten zur Verfügung, können die Faktoren daraus abgeleitet werden. Zu Vergleichszwecken können in der Literatur veröffentlichte Flächenabminderungskurven herangezogen werden.

Niederschlag-Abfluss Modell (NA-Modell)

Die Berechnung des Bemessungsabflusses erfolgt über NA-Modelle auf Ereignisbasis („Ereignismodell“). Der Modelltyp ist frei wählbar. Modelle mit wenigen Parametern haben den Vorteil der einfacheren Modellbildung, der robusteren Schätzung der

Parameter und der leichteren Überprüfung der Modellanpassung an verschiedene Abflusszustände bei verschieden großen Ereignissen.

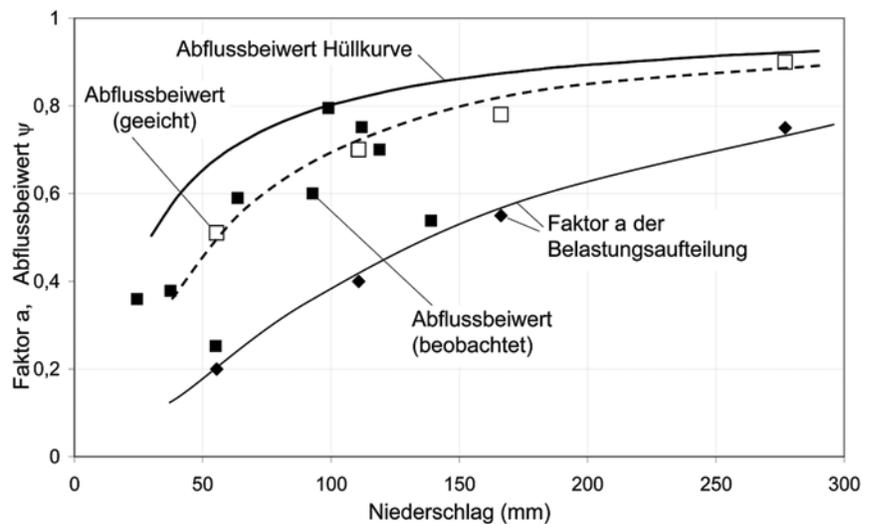
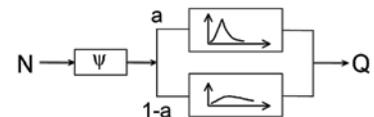


Abb. 3. Nachbildung der Nichtlinearität in den Abflussprozessen in einem einfachen Abflussmodell

Als Beispiel zeigt Abb. 3 die Struktur eines Konzeptmodells auf Speicherbasis und Abflussbeiwertansatz mit je einer raschen und einer langsamen Abflusskomponente zur Nachbildung der unterschiedlichen Abflussreaktionen des Einzugsgebiets. Zu den vier Parametern der beiden Speicherkaskaden tritt als fünfter Parameter der Faktor der Belastungsaufteilung zwischen den beiden Kaskaden. Wie dem Diagramm zu entnehmen ist, zeigt sich sowohl in den Abflussbeiwerten als auch in der Belastungsaufteilung deutlich die Nichtlinearität der Vorgänge.

Das Modell ist nach Möglichkeit an Daten aus dem zu untersuchenden Gebiet zu eichen. Sind solche Daten nicht vorhanden, ist das Modell an Abflussdaten aus Nachbargebieten zu eichen und die Modellparameter auf Basis von Analogieschlüssen aus Parameteruntersuchungen zu übertragen. Je nach Datenlage kommen dabei verschiedene Methoden zum Ansatz (BLÖSCHL, 2005).

Bei der Bestimmung der Modellparameter für das Bemessungshochwasser ist dem Umstand Rechnung zu tragen, dass sich das Gebietsverhalten bei Übergang von Normal- zu Extremereignissen in der Regel ändert (GUTKNECHT, 1994). Zu erwartende geänderte Bedingungen gegenüber dem Eichereignis - wie z.B. Veränderung der zum Abfluss beitragenden Flächen, Verschiebung der Anteile der diversen Abflusskomponenten etc.

– sind in geeigneter Weise zu berücksichtigen. Im Falle des Vorliegens entsprechender Niederschlags- und Abflussdaten sind unterschiedlich große Ereignisse in die Untersuchung einzubeziehen. Damit können die Veränderungen im Modellverhalten und in den Modellparametern bei Übergang zu großen und zu extremen Ereignissen dokumentiert werden.

Fehlen entsprechend aussagekräftige Beobachtungsdaten, so können die Ergebnisse von Regionalisierungsstudien über mehrere hundert Einzugsgebiete in Österreich (MERZ et al., 2006) als Grundlage für Abschätzungen des Abflussbeiwertes herangezogen werden. Die Auswertungen zeigen im regionalen Vergleich den großen Einfluss der Saisonalität der Wasserbilanz auf die Größe und Verteilung des Abflussbeiwertes in einem Gebiet auf.

In Sensitivitätsstudien werden die Parameter (Abflussbeiwert o. ä.) sowie der Bemessungsniederschlag (Dauer und zeitliche Verteilung) variiert, um deren Einflüsse „sichtbar“ zu machen. Daraus kann ein plausibler Wertebereich – bei zusätzlicher Berücksichtigung größerer Niederschlagshöhen auch eine obere Grenze – für das Bemessungshochwasser abgeleitet werden, der den Unschärfbereich der Schätzung des Bemessungshochwasserwertes wiedergibt.

3.4 Gradex-Methode

Die Grundidee des Gradex-Verfahrens besteht in der Kombination einer Niederschlagsstatistik mit einem deterministischen Niederschlag-Abflussmodell und einer Hochwasserstatistik (MERZ et al., 1999). Als Eingangsgrößen dienen die Jahresreihe beobachteter Hochwasserscheitel für das gegebene Gebiet; eine Jahresreihe beobachteter maximaler jährlicher Niederschläge der Dauer H für eine für das Gebiet repräsentative Station; der Flächenabminderungsfaktor für den Niederschlag; ein die zeitliche Dynamik der Gebietsreaktion und die zeitliche Dynamik hochwasserauslösender Niederschläge beschreibender Parameter r ; und die Jährlichkeit T_g , ab der Sättigung des Gebietes angenommen werden kann. Die Bezugsdauer H ist womöglich in der gleichen Größenordnung wie die Konzentrationszeit des Gebietes zu wählen, doch kann auch näherungsweise eine Bezugsdauer von $H = 24$ Stunden gewählt werden, um Reihen maximaler Tagesniederschläge verwenden zu können. Der Parameter r ist durch Auswertung beobachteter Abflusswellen des Un-

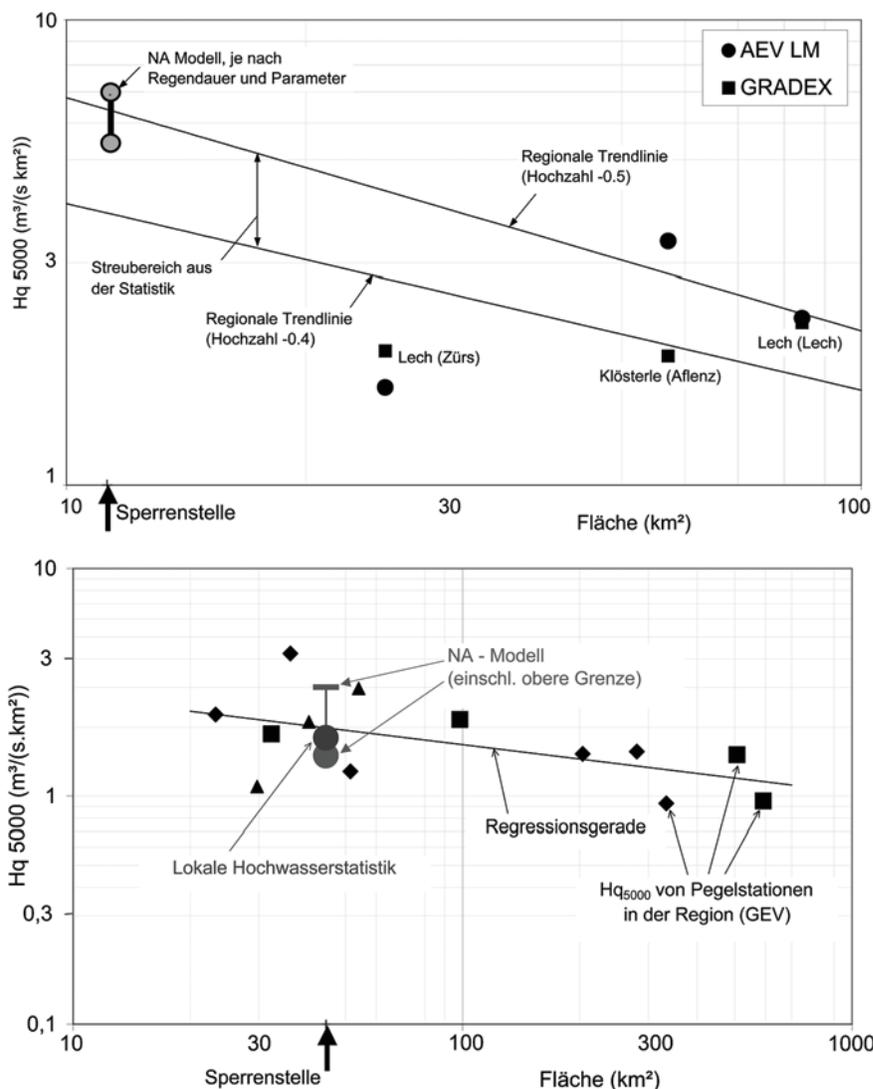


Abb. 4. Gegenüberstellung der Ergebnisse nach den verschiedenen Methoden („Standbeinen“) als Basis für die Wahl des Bemessungshochwassers für zwei Gebiete. In der unteren Grafik zeigt die Form der Symbole die Reihenlänge an

tersuchungsgebietes zu bestimmen, und zwar als das Verhältnis zwischen dem Scheitelabfluss und dem mittleren Abfluss über die Dauer H , wobei er besonders auf große Ereignisse abgestimmt wird. Die Jährlichkeit T_g wird auf Basis einer hydrologischen Einschätzung des Gebietes gewählt. Der Vorteil des Gradex-Verfahrens gegenüber der Hochwasserstatistik alleine besteht darin, dass für die kleinen Auftretenswahrscheinlichkeiten zusätzliche Information aus dem Niederschlag verwendet wird, für den oft längere Reihen als für den Abfluss zur Verfügung stehen.

3.5 Hüllkurven

Hüllkurven stellen ein schon früh verwendetes und bewährtes Instrument der Ingenieurpraxis dar. Sie begrenzen definitionsgemäß die bisher be-

obachteten höchsten Hochwasserscheitelabflüsse in der betrachteten Region und stellen nach VISCHER (1980) einen „empirischen Grenzwert“ dar. Die Aussagekraft einer solchen Hüllkurve hängt dabei sehr stark davon ab, ob in den die Grenzcurve bestimmenden Höchstwerten auch tatsächlich Werte von außerordentlichen, extremen Ereignissen enthalten sind. Dies kann umso eher erwartet werden, je länger die Datenreihen sind und je größer die betrachtete Region ist. Zu beachten ist dabei jedoch, dass außerordentlich große Ereignisse vielfach in Clustern von einigen wenigen „Extrem-Jahren“ auftreten und dann für lange Zeit nicht mehr. Beispiele sind dafür die Extremereignisse der letzten Jahre, aber auch Gruppen von Hochwasserjahren in der Vergangenheit wie etwa die Jahre 1965/66 mit außerordentlich großen Hochwässern

in Kärnten oder die Jahre 1954 bis 1959 und 1897 bis 1899 im österreichischen Donaeinzugsgebiet. Die Hüllkurve kann daher nur dann wirklich Information über extreme Ereignisse bieten, wenn Werte aus solchen Hochwasserjahren dafür die Basis sind. Eine Sichtung und Bewertung des Basismaterials ist daher ein notwendiger Bestandteil einer Anwendung der Methode. Eine Hilfestellung kann dabei der Vergleich mit den in der Literatur gegebenen Hüllkurven bieten. Neuere Entwicklungen versuchen, die im Hüllkurven-Verfahren steckende Information auch methodisch-statistisch zu erfassen (CASTELLARIN et al., 2005).

Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse und Festlegung des Bemessungshochwassers

Die Ergebnisse werden zum Vergleich in einem Diagramm dargestellt, wobei der Scheiteldurchfluss gegen die Jährlichkeit oder die Scheiteldurchflussspende gegen die Einzugsgebietsfläche aufgetragen wird. Als Maß für die Unschärfe der erhaltenen Schätzwerte werden die aus den Berechnungen nach den einzelnen Methoden erhaltenen Streubereiche in die Bewertung eingeführt

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse zweier Bearbeitungen nach diesem Ansatz. In beiden Fällen handelt es sich um die Ermittlung des HQ5000 als Bemessungshochwasser für eine Tal Sperren-Hochwasserentlastungsanlage. Je nach Datenlage zeigen sich Unterschiede in den Unsicherheitsbereichen der verschiedenen Schätzungen und auch in der gegenseitigen Lage der Einzel-Schätzwerte. Die relativ geringe Spannweite in den mittels Sensitivitätsanalyse berechneten Schwankungsbereichen der NA-Simulationen ist auf die Ausrichtung der Berechnung auf den ungünstigsten Fall unter Berücksichtigung der Seeretention des Stauraumes zurückzuführen. Die endgültige Festlegung des Bemessungshochwassers erfolgt unter Verwendung der aufbereiteten Information und unter Bedachtnahme auf die anderen Entscheidungsgrundlagen (Anlageverhältnisse, Stauraumbewirtschaftung etc.).

Im Beispiel der Abb. 4 oben waren, wegen der im Vergleich zu den Pegeln viel kleineren Einzugsgebietsfläche der

Sperre, die regionalen Verfahren nur ein grober Anhaltspunkt. Dies war einer der Aspekte, die dazu führten, dass bei der Zusammenschau der Methoden ein Bemessungswert gewählt wurde, der im oberen Bereich der regionalen Trendlinie, etwa um den wahrscheinlichsten Wert der Niederschlag-Abflusssimulationen, lag. Im Beispiel der Abb. 4 unten zeigten die Niederschlag-Abflusssimulationen, dass das Einzugsgebiet der Sperre im Vergleich zu den Nachbargebieten eine deutlich gedämpftere Abflussreaktion besitzt. Das ist eine Information, die sich nicht direkt aus den anderen Methoden ableiten lässt. Die gedämpftere Reaktion entspricht kleineren Scheiteldurchflüssen. Dies war einer der Aspekte, die dazu führten, dass im Zusammenschau der Methoden ein Bemessungswert gewählt wurde, der unter den regionalen Werten lag.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Grundidee des Mehr-Standbeine-Ansatzes, einen gewissen Schätzwert auf verschiedene Weise und nach verschiedenen Methoden herzuleiten, ist nicht neu. So zählt es zur langjährigen Praxis des Hydrographischen Dienstes in Österreich, „die Schwächen einer rein statistischen Berechnung durch Anwendung anderer Methoden zu mildern“ (GODINA, 1998), wozu u. a. der Einsatz der NA-Modellierung und die Plausibilitätsprüfung anhand von Hüllkurven im Hochwasserspenden-Diagramm zählen. Die Weiterentwicklung im Bereich der Modellierung sowie die Verbesserung und Verbreiterung der Datenbasis machen es darüber hinaus heute möglich, dieses Grundkonzept konsequent im Rahmen der Planung einzusetzen. Die Zielsetzung verlagert sich dabei schwerpunktmäßig von der reinen Plausibilitätsprüfung zur quantitativen Eingrenzung der Unsicherheiten bei der Ermittlung des gesuchten Extrembemessungsabflusses. Ansätze dazu sind z. B. bereits in den Arbeiten von WOOD and RODRIGUEZ-ITURBE (1974) und KIRNBAUER (1981) zu finden, wobei in letzterer Arbeit lokale Hochwasserstatistik und regionale Information bzw. Expertenwissen mittels des Bayes'schen Absatzes kombiniert werden.

Mit dieser Neuausrichtung wird

auch den gestiegenen Ansprüchen an das Sicherheitsbedürfnis, oder genauer formuliert, an die Ausweisung des Restrisikos entsprochen. Die Entwicklung in diese Richtung lässt sich durch eine ganze Reihe von Arbeiten aus jüngster Zeit belegen. So wenden CHBAB et al. (2006) eine Kombination von „normaler“ Hochwasserstatistik und von mittels Monte Carlo-Simulation abgeleiteter Hochwasserstatistik zur Bestimmung des HQ1250 für den Niederrhein an. Arbeiten zur Definition von Extremszenarien (MERZ und THIEKEN, 2005), zur Verbesserung der Hochwasserstatistik (NAEF, 2005) sowie zur Untersuchung des Einflusses der Nicht-Stationarität auf die Entwicklung der Hochwasser-Situation (BARDOSSY, 2005) streben das Ziel durch Kombination von Untersuchungsmethoden an. Ein verstärkter Einsatz dieses Konzeptes in der Zukunft zeichnet sich ab.

Für den wissenschaftlichen Bereich ergibt sich daraus die Forderung nach einer Weiterentwicklung und Verbesserung der Methoden. Möglichkeiten in dieser Richtung zeichnen sich im Bereich der Anwendung der Monte-Carlo-Simulation zur Entwicklung „abgeleiteter“ Verteilungsfunktionen ab (SIVAPALAN et al., 2005). Verbesserungsmöglichkeiten liegen hier u. a. in der zutreffenden Modellierung der komplexen Zusammenhänge zwischen Ereignis- und Vor-Ereignis-Bedingungen, aber auch in der Generierung der auslösenden Niederschläge, wobei die Untersuchungsrichtung auf die Erfassung der raum-zeitlichen Verhältnisse insbesondere in größeren Einzugsgebieten abzielt.

Eine wesentliche Voraussetzung für eine künftige Weiterentwicklung ist aber auch eine Verbesserung der Informationsbasis über Extremereignisse, um die theoretischen Arbeiten durch Beobachtungen entsprechend absichern zu können. Die derzeitigen Kenntnisse über Entstehungsbedingungen, Abläufe und Phänomene bei Extremereignissen gehen auf vereinzelte Analysen zurück. Ein Forschungsprogramm zur systematischen Sammlung, Aufbereitung und Auswertung von Beobachtungen bei Extremereignissen könnte hier eine verbesserte Grundlage für künftige Bemessungs- und Risikomanagementaufgaben liefern.

LITERATUR

- BARDOSSY, A. (2005): Extreme value statistics under non-stationary conditions: possibilities to quantify the effects of climate change. Presentation KHR-CHR Workshop „Extreme Discharge“, Bregenz, Austria, 2005. [www.chr-khr.org \(Veranstaltungen/Extreme Hochwasser/Details/Downloads\)](http://www.chr-khr.org/Veranstaltungen/Extreme_Hochwasser/Details/Downloads).
- BLÖSCHL, G. (2005): Rainfall-runoff modelling of ungauged catchments. Article 133 in: ANDERSON, M. G. (Man. ed.), *Encyclopedia of hydrological sciences*. J. Wiley & Sons, Chichester, pp. 2061–2080.
- CASTELLARIN, A., VOGEL, R. M., MATALAS, N. C. (2005): Probabilistic behavior of a regional envelope curve. *Water Resour. Res.* 41, W06018, doi:10.1029/2004WR003042, 2005.
- CHBAB, E. H., BUIVEVELD, H., DIERMANSE, F. (2006): Estimating exceedance frequencies of extreme river discharges using statistical methods and physically based approach. *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft* 58 (3–4), 35–43.
- DIERMANSE, F., OGINK, H., BUIVEVELD, H. (2005): Uncertainty in flood quantiles from basin and river models. Presentation KHR-CHR Workshop „Extreme discharge“, Bregenz, Austria, 2005. [www.chr-khr.org \(Veranstaltungen/Extreme Hochwasser/Details/Downloads\)](http://www.chr-khr.org/Veranstaltungen/Extreme_Hochwasser/Details/Downloads).
- DVWK (1999a): Einsatz von Niederschlag-Abfluss-Modellen zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen. In: *Hochwasserabflüsse*, DVWK Schriften 124, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. Bonn, Verlag Paul Parey, Hamburg.
- DVWK (1999b): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. DVWK-Merkblatt 251. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. Bonn, Verlag Paul Parey, Hamburg.
- FEH (1999): *Flood estimation handbook*. Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- GEES, A. (1997) Analyse historischer und seltener Hochwasser in der Schweiz – Bedeutung für das Bemessungshochwasser. Dissertation der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, Bern. *Geographica Bernensia*.
- GODINA, R. (1998): Berechnung des Bemessungshochwassers. Kursunterlagen. ÖWAV-TU Wien – Kurs Berechnung des Bemessungshochwassers. Technische Universität Wien.
- GUTKNECHT, D. (1994): Extremhochwässer in kleinen Einzugsgebieten. *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft* 46 (3–4), 50–57.
- HINTERLEITNER, G. (2002): Restrisikobetrachtungen bei bestehenden Hochwasserschutzsystemen. *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft* 54 (7–8), 99–103.
- KIRNBAUER, R. (1981): Zur Ermittlung von Bemessungshochwässern im Wasserbau. *Wiener Mitt. Wasser, Abwasser, Gewässer*, Bd.42.
- LORENZ, P., SKODA, G. (2003): Konvektive Starkniederschläge – Niederschlag in 15, 60 und 180 Minuten. *Hydrol. Atlas Österreichs (HAÖ)*, Blätter 2.5–2.7.
- MERZ, B., THIEKEN, A. (2005): Extreme scenarios and flood risk management. Presentation KHR-CHR Workshop „Extreme discharge“, Bregenz, Austria, 2005. [www.chr-khr.org \(Veranstaltungen/Extreme Hochwasser/Details/Downloads\)](http://www.chr-khr.org/Veranstaltungen/Extreme_Hochwasser/Details/Downloads).
- MERZ, R., BLÖSCHL, G. (2003): Saisonalität von Niederschlag und Abfluss. Karte 5.3, *Hydrologischer Atlas Österreich*. Österreichischer Kunst und Kulturverlag und Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- MERZ, R., BLÖSCHL, G., PARAJKA, J. (2006): Raum-zeitliche Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich. *Hydrol. und Wasserwirtschaft* 50 (H1), 2–11.
- MERZ, R., BLÖSCHL, G., PIOCK-ELLENA, U. (1999): Zur Anwendbarkeit des Gradex-Verfahrens in Österreich. *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft* 51 (11–12), 291–305.
- NAEF, F. (2005): Improving extrapolation of floods with high return periods by considering dominant runoff processes and historical floods. Presentation KHR-CHR Workshop „Extreme discharge“, Bregenz, Austria, 2005. [www.chr-khr.org \(Veranstaltungen/Extreme Hochwasser/Details/Downloads\)](http://www.chr-khr.org/Veranstaltungen/Extreme_Hochwasser/Details/Downloads).
- SCHREIBER, H. (1970): Über Möglichkeiten zur Berechnung der n-Jährlichkeit von Hochwässern. *Österr. Wasserwirtschaft* 22 (H.5–6), 138–153.
- SIVAPALAN, M., BLÖSCHL, G., MERZ, R., GUTKNECHT, D. (2005): Linking flood frequency to long-term water balance: Incorporating effects of seasonality. *Water Resour. Res.* 41, W06012, doi:10.1029/2004WR003439.
- VISCHER, D. (1980): Das höchstmögliche Hochwasser und der empirische Grenzabfluss. *Schweizer Ingenieur und Architekt* 40.
- WOOD, E. F., RODRIGUEZ-ITURBE, I. (1974): Bayesian inference and decision making for extreme hydrologic events. *Water Resour. Res.* 10 (4), 696–704.

Anschrift der Verfasser: O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Dieter GUTKNECHT, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, Karlsplatz 13/222, 1040 Wien, E-Mail: Sekr223@hydro.tuwien.ac.at, <http://www.hydro.tuwien.ac.at>