

Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes

Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin

Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen

Erfahrungen aus den Rheinanliegerstaaten

M. Barben
H.-P. Hodel
H.-B. Kleberg
M. Spreafico
R. Weingartner



Bericht Nr. I-19 der KHR
Rapport no. I-19 de la CHR

Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes

Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin

Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen

Erfahrungen aus den Rheinanliegerstaaten

M. Barben
H.-P. Hodel
H.-B. Kleeberg
M. Spreafico
R. Weingartner



Bericht Nr. I-19 der KHR
Rapport no. I-19 de la CHR

Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen

Erfahrungen aus den Rheinanliegerstaaten

M. Barben, Universität Bern, Bern
H.-P. Hodel, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern
H.-B. Kleeberg, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
M. Spreafico, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern
R. Weingartner, Universität Bern, Bern

Mit weiteren Beiträgen von
G. Blöschl, Technische Universität Wien, Wien
H. Buiteveld, Rijkswaterstaat RIZA, Arnheim
F. Forster, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf
R. Godina, Hydrographisches Zentralbüro, Wien
C. Hegg, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf
R. Merz, Technische Universität Wien, Wien
R. Mück, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg



CHR/KHR
Sekretariat
Postbus 17
NL-8200 AA Lelystad
Niederlande



Bundesamt für Wasser
und Geologie
CH-3003 Bern
Schweiz



Geographisches Institut
der Universität Bern
Hallerstrasse 12
CH-3012 Bern
Schweiz



Bundesanstalt für
Gewässerkunde
Postfach 309
D-56003 Koblenz
Deutschland



Rijkswaterstaat
RIZA
Postbus 9072
NL-6800 ED Arnheim
Niederlande



Bundesministerium für
Land- und Forstwirtschaft,
Umwelt und Wasserwirtschaft
Stubenring 1
A-1012 Wien
Österreich

Vorwort

Für den optimalen Schutz von Mensch und Tier als auch der Landschaft und Infrastruktur ist die Kenntnis der Hochwasserabflüsse in kleinen und grossen Einzugsgebieten unabdingbar. Bekannt sein müssen die Hochwasserspitzenabflüsse und die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens sowie für viele Problemstellungen auch die Abflussganglinie und damit das Abflussvolumen.

An grossen Flüssen sind vielfach Messstationen mit langjährigen Beobachtungen vorhanden. Anhand dieser Messreihen können die benötigten Hochwasserabflusskennwerte und auch hochwasserstatistische Grössen bestimmt werden.

In kleinen und sehr kleinen Gewässern fehlen aber öfters Messstationen mit langen Messreihen oder Messstationen überhaupt, was die Bestimmung der notwendigen Hochwasserinformationen wesentlich erschwert. Entsprechend der unterschiedlichen hydro-meteorologischen Datenlage, Topographie, Geologie, Böden und den Zielsetzungen wurden unzählige Modellkonzepte für die Abflussbildung und -konzentration entwickelt.

Die vorliegende Publikation stellt eine Auswahl solcher Modelle vor, die im Einzugsgebiet des Rheins von Praktikern angewandt werden. Experten aus Holland, Deutschland, Österreich und der Schweiz haben in ihren Ländern Informationen zu diesen Modellen zusammengetragen und in Länderberichten zusammengestellt. Es geht dabei nicht darum, einzelne Modelle als besonders empfehlenswert vorzuschlagen, als vielmehr die Vielfalt der Modelle aufzuzeigen, welche im Rheingebiet in der Praxis angewendet werden.

Die KHR dankt allen Beteiligten in den vier Ländern recht herzlich für ihre Arbeit. Besonderen Dank geht an Dr. M. Barben und PD Dr. R. Weingartner, welche die einzelnen Beiträge zu einem Ganzen zusammengefasst haben.

Prof. Dr. M. Spreafico
Präsident der KHR

Avant-propos

Une connaissance des écoulements de crues dans les petits et grands bassins versants est absolument nécessaire pour la protection optimale de l'homme, des animaux, du paysage et des infrastructures. Pour un grand nombre de problématiques, il est important de disposer de l'hydrogramme de crue et de connaître le débit de pointe afin de déterminer le volume d'écoulement et leur probabilité d'apparition.

De nombreuses stations de jaugeage sont situées le long des grandes rivières et elles disposent de longues séries d'observations annuelles. Ces séries de mesures permettent de déterminer les caractéristiques des écoulements de crues et de leurs grandeurs statistiques.

Les stations de jaugeage situées le long des petits et très petits cours d'eau ne disposent souvent pas de longues séries de mesures ou ces dernières sont carrément absentes. Il est alors d'autant plus difficile d'obtenir les informations nécessaires concernant les crues. De nombreux modèles conceptuels sont développés pour la détermination de la formation de l'écoulement et du débit selon les objectifs et les différentes situations hydrométéorologiques, topographiques, géologiques et pédologiques.

Cette publication présente une sélection de tels modèles mis en pratique dans le bassin versant du Rhin. Des experts des Pays-Bas, de l'Allemagne, de l'Autriche et de la Suisse ont recueilli des informations concernant ces modèles dans leur propre pays et les ont incorporées dans des rapports nationaux. L'objectif n'est pas de recommander en particulier certains modèles mais de faire un inventaire de la grande variété des modèles utilisés dans le bassin versant du Rhin.

La CHR tient à remercier toutes les personnes des quatre pays ayant collaboré à la confection de ce document et en particulier le Dr. M. Barben et le Prof. Dr. R. Weingartner qui ont réuni les contributions individuelles en un seul rapport.

Prof. Dr. M. Spreafico
Président de la CHR

Voorwoord

Voor de optimale bescherming van mens en dier, het landschap en de infrastructuur is kennis over hoogwaterafvoeren in kleine en grote stroomgebieden een absolute noodzaak. De grootte van hoogwaterafvoeren met bijbehorende kans dat zo'n afvoer optreedt moet bekend zijn, en voor veel probleemstellingen ook het afvoerverloop bij hoogwater en daarmee het afgevoerde watervolume.

Aan veel grote rivieren zijn meetstations gevestigd die over jarenlange meetreeksen beschikken. Aan de hand van deze data kunnen de nodige hoogwaterafvoerparameters en ook statistische kenmerken worden bepaald.

Echter, niet alle meetstations in kleine en zeer kleine rivieren beschikken over lange meetreeksen en soms zijn er helemaal geen meetreeksen aanwezig. Dit maakt het moeilijker om de noodzakelijke hoogwatergegevens te bepalen. Afhankelijk van de beschikbaarheid van hydrologische gegevens, topografie, geologie, bodemgesteldheid en de doelstellingen zijn talloze modelconcepten ontwikkeld voor de simulatie van het ontstaan en het verloop van afvoer.

Deze publicatie bevat een selectie van die modellen die in het stroomgebied van de Rijn worden gebruikt. Deskundigen uit Nederland, Duitsland, Oostenrijk en Zwitserland hebben in hun eigen land informatie over deze modellen verzameld en deze in landenrapportages opgenomen. Het gaat er daarbij niet om, afzonderlijke modellen als bijzonder aanbevelenswaardig aan te prijzen, maar meer om een beeld te geven van de grote verscheidenheid aan modellen die in het Rijngebied in de praktijk worden gebruikt.

De CHR wil hierbij alle betrokkenen in de vier landen heel hartelijk bedanken voor hun medewerking en in het bijzonder dr. M. Barben en prof. dr. R. Weingartner, die de afzonderlijke bijdragen in één rapport hebben samengevat.

Prof. dr. M. Spreafico
Voorzitter van de CHR

Foreword

Knowledge of high-water discharge levels in small and large basins is a prerequisite for the optimal protection of humans and animals, landscape and infrastructure. In order to deal with many formulated problems, it is important to have information about discharge volumes at peak waters, the risk of these high-waters, as well as the course and volumes of discharged water.

Along many large rivers, monitoring stations have been set up, which have observation records at their disposal that go back many years. Based on these sets of measurements, the required high-water discharge parameters, as well as statistical high-water values, can be assessed.

However, not all the monitoring stations on small rivers and rivulets have extensive sets of measurements at their disposal, while, in some cases, there are no sets of measurements at all. This makes it more difficult to retrieve the necessary high-water information. In accordance with the varying situations relating to hydrological data, topography, geology, soil conditions and the objectives, numerous models have been designed for the formation and concentration of discharge.

This publication contains a selection of these models, which are currently used in practice in the Rhine basin. Experts from the Netherlands, Germany, Austria and Switzerland have gathered information about these models in their own countries and included it in their country reports. Their intention is not to recommend individual models as particularly suitable, but rather to provide an idea of the great variety of models that are used in the Rhine basin.

The CHR would like to take this opportunity to sincerely thank all parties involved in the four countries for their co-operation, and in particular Dr. M. Barben and Prof Dr. R. Weingartner, who have summarised the individual contributions into a single report.

Prof. Dr. M. Spreafico
CHR Chairman

Inhalt

Vorwort	Avant-propos	iii
Voorwoord	Foreword	iv
Zusammenfassung		ix
Résumé		xiv
Samenvatting		xix
Summary		xxiv
1	Übersicht	1
1.1	Geschichte der Hochwasserabschätzung	1
1.2	Generelle Methodenübersicht	2
	1.2.1 Methoden für die Anwendung in ungemessenen Einzugsgebieten	3
	1.2.2 Methoden für die Anwendung in gemessenen Einzugsgebieten	5
	1.2.3 Niederschlag-Abfluss-Modellierung	7
	Literatur	8
2	Länderbericht Schweiz	11
2.1	Einleitung	11
	2.1.1 Problemstellung	11
	2.1.2 Vorgehen	12
2.2	Mesoskalige Einzugsgebiete	18
	2.2.1 Einleitung	18
	2.2.2 Die Modelle	20
	2.2.3 Modellvergleich	47
2.3	Kleine Einzugsgebiete	53
	2.3.1 Einleitung	53
	2.3.2 Die Modelle	54
	2.3.3 Beurteilung der Hochwasserschätzverfahren	68
2.4	Fazit	70
	Literatur	71

3	Länderbericht Österreich	75
3.1	Methoden zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten in Österreich	75
3.2	VUT-FLOOD – ein Modellsystem zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeit	79
	Literatur	84
4	Länderbericht Deutschland	87
4.1	Einleitung	87
4.2	Ergebnisse	88
4.3	Mögliche Methoden und Verfahren	91
	4.3.1 Allgemeines	91
	4.3.2 Methode: Empirische und regional gültige Formeln	92
	4.3.3 Methode: Statistische Verfahren auf der Basis von Abflussdaten	92
	4.3.4 Methode: Deterministische Niederschlag-Abfluss-Modelle	95
4.4	Angewandte empirische und regional gültige Formeln	98
	4.4.1 Hüllkurve nach Wundt	98
	4.4.2 Rationale Methode	100
4.5	Angewandte statistische Verfahren – Lokale Ansätze	104
	4.5.1 HQ-EX: Wahrscheinlichkeitsanalyse von Hochwasserabflüssen	104
	4.5.2 EXTREM (IHW/IWK-Paket: Hochwasseranalyse)	108
	4.5.3 IsHoT+W (Informationssystem Hochwasser – Trends und Wahrscheinlichkeiten)	111
	4.5.4 KLUDON	111
	4.5.5 HVERT	111
	4.5.6 Ableitung von Hochwasserabflüssen der Überschreitungswahrscheinlichkeit 10^{-4} an Binnengewässern	112
4.6	Angewandte statistische Verfahren – Regionalhydrologische Ansätze	114
	4.6.1 HQ-Längsschnitt: Hochwasserabfluss- und Hochwasserabflusspendenlängsschnitte	114
	4.6.2 HQ-REGIO	117
	4.6.3 Verfahren des LfU in Baden-Württemberg	121
	4.6.4 Reg-Ex	124
	4.6.5 IsHoT+W	127
4.7	Angewandte deterministische Modelle (N-A-Modelle) – Blockmodelle	132
	4.7.1 EGLSYN (synthetische Einheitsganglinien)	132

4.8	Angewandte deterministische Modelle (N-A-Modelle) – Flächen-	137
	detaillierte Modelle	
4.8.1	FGM (Flussgebietsmodell, IHW/IWK-Paket: Hochwasseranalyse)	137
4.8.2	NASIM (Niederschlag-Abfluss-SIMulation)	142
4.8.3	LARSIM / FGMOD	145
4.8.4	HYBNAT	149
4.8.5	ARC/EGMO	151
4.8.6	ASGi	155
4.9	Beurteilung und Vergleich der Verfahren	157
4.9.1	Allgemeines	157
4.9.2	Probleme bei der Anwendung	159
4.9.3	Konsequenzen	161
4.9.4	Hinweis	161
	Literatur	162
	Anlagen	
1	Glossar	165
2	Übersicht zu den befragten Institutionen	167
3	In den Fragebögen genannte Anwendungen	173
4	Anwendungsbereiche, Aufwand und Güte der Verfahren	175
5	Länderbericht Niederlande	177
5.1	Einleitung	177
5.2	Geschichte des Hochwasserschutzes in den Niederlanden	177
5.3	Hochwasserabschätzung $HQ_{1,250}$ in den Niederlanden	180
	Literatur	184
	KHR-Veröffentlichungen	185
	Informationen über die KHR	187
	(deutsch, französisch, niederländisch und englisch)	

Zusammenfassung

Die Hochwasserabschätzung besitzt in den KHR-Staaten angesichts der grossen Vielfalt von Fragestellungen nach wie vor einen sehr grossen Stellenwert. Das Anwendungsspektrum reicht von Dimensionierungsfragen über Grundlagenarbeit bei Gefahrenkartierungen bis hin zu komplexen wasserbaulichen und wasserwirtschaftlichen Problemstellungen. Dabei spielen die naturräumlichen Rahmenbedingungen eine massgebliche Rolle. Abschätzungsfragen in den Niederlanden unterscheiden sich beispielsweise deutlich von jenen in den Alpenländern. Im ersteren Fall stehen die grossen Flüsse, in denen der Abfluss gemessen wird, im Vordergrund. In den Alpenländern sind Einzugsgebiete charakteristisch, die über keine oder nur wenige Abflussmessungen verfügen. In dieser unterschiedlichen Ausgangslage liegt ein Grund für die breite Palette der Ansätze zur Abschätzung der Hochwasserabflüsse. Aber auch innerhalb eines ähnlichen Anwendungsbereiches besteht eine **Vielzahl von Modellen**, welche die Vitalität der Hochwasseraktivitäten in Forschung und Praxis verdeutlicht.

Die grosse Zahl der unterschiedlichsten Modelle, die mit dem vorliegenden Bericht eindrücklich belegt wird, lässt sich grundsätzlich in drei Verfahrensgruppen gliedern, die nachfolgend kurz beschrieben werden.

Extremwertanalyse

Liegen in einem Einzugsgebiet **Abflussmessungen** vor, können diese **statistisch bearbeitet** werden. So lassen sich aus den jährlichen Hochwasserspitzen beispielsweise mithilfe von empirischen und theoretischen Verteilungsfunktionen die Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeit eines bestimmten Hochwasserabflusses bestimmen.

Der gemessene Abfluss an einer Messstation ist eine Stichprobe der Grundgesamtheit aller Abflüsse. Dabei nimmt man als wichtige Voraussetzung an, dass in der Stichprobe alle Eigenschaften der Grundgesamtheit angenähert enthalten sind. Für die Extremwertanalyse müssen die Elemente der Stichprobe statistisch unabhängig sein. Deshalb stehen jährliche und partielle Serien im Mittelpunkt. Für die gewählte Stichprobe kann die empirische Häufigkeitsverteilung bestimmt werden. Will man nun Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Unterschreitens und des Überschreitens bestimmter Hochwasserabflusswerte treffen, muss man von der diskreten empirischen Verteilung zu einer theoretischen Wahrscheinlichkeitsverteilung übergehen. Es wird also versucht, von der Stichprobe auf die Grundgesamtheit der Hochwasser zu schliessen.

Prinzipiell gibt es **viele Verteilungsfunktionen**, welche sich für den Einsatz in der Hochwasserstatistik eignen. In der Anwendung stellt sich damit die Frage, welche Verteilungsfunktionen verwendet werden und mit welchen Verfahren die Parameter dieser Verteilungsfunktionen geschätzt werden sollen. Musste man sich früher vor allem auch aus Gründen des Berechnungsaufwandes auf wenige Verteilungsfunktionen beschränken, bestehen heute dank der EDV viele Auswahlmöglichkeiten. Dieser Gegensatz zwischen „früher“ und „heute“ zeigt sich u.a. auch in den DVWK-Empfehlungen, die in den Rheinanliegerstaaten weit verbreitet sind. Die alten Empfehlungen (1979) führten aufgrund statistischer Kennwerte der Messreihen zu einer einzigen Verteilungsfunktion. Der Nachteil dieser Vorgehensweise liegt sicherlich darin, dass die ganze Abschätzung nur auf eine Verteilungsfunktion abstellt und so Vergleichsmöglichkeiten weitgehend fehlen. Bei den neuen Empfehlungen des DVWK (1999a) und einer darauf basierenden Hochwasserabschätz-Software hat man das Vorgehen offener gestaltet und den Weg über eine Vielzahl möglicher Verteilungsfunktionen gewählt. Weil heute die Anpassung einer theoretischen Verteilungsfunktion an eine Messreihe dank **leistungsfähiger Software** nur einen **kleinen Berechnungsaufwand** bedeutet, wird eine ganze Palette von Verteilungsfunktionen vorgeschlagen. Die Anwenderin und der Anwender müssen u.a. anhand von Anpassungsmassen selber entscheiden, welche Verteilungsfunktionen sie auswählen. Diese Vorgehensweise beinhaltet allerdings eine subjektive Komponente, die problematisch ist, zumal das Auswahlproblem über eine Gütebeurteilung mit statistischen Kriterien nicht lösbar ist. Ein wesentlicher durch den Software-Einsatz begünstigter Vorteil liegt allerdings darin, dass sich die Anpassungen visuell überprüfen lassen und damit nicht nur auf die problematischen Gütemasse abgestellt werden muss.

Regionale Übertragung

Für den Einsatz eines einfachen Modells zur Abschätzung in Einzugsgebieten ohne Direktmessungen – also eines Modells aus der Verfahrensgruppe „Regionale Übertragung“ – sind die Ansprüche an die Datenlage gering und der **zeitliche und finanzielle Aufwand** bescheiden. Diese für die Praxis günstigen Bedingungen („Zeit ist Geld“), muss allerdings mit einer oftmals unbekanntenen Güte der Resultate „erkauft“ werden (vgl. Abb. i).

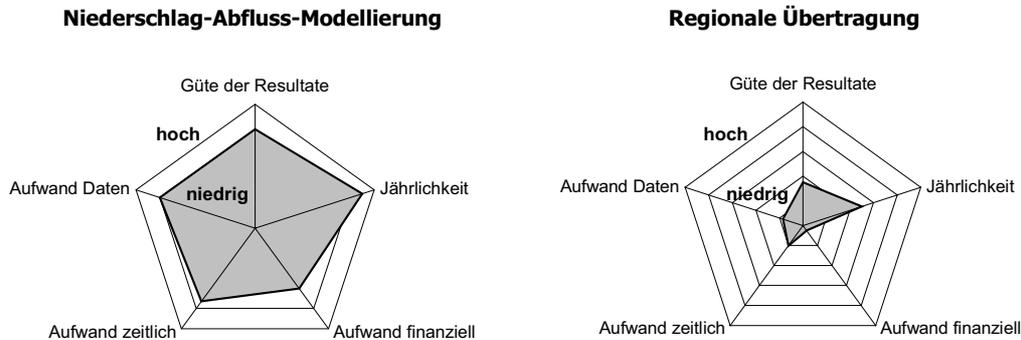


Abb. i Angaben zum Aufwand der Modellanwendung und zur Güte der Modellierung (aus Länderbericht Deutschland).

Wegen der **beschränkt zur Verfügung stehenden Zeit** sind in der Praxis eher einfachere Modelle mit kleinerer Modellkomplexität gefragt. In diesem Fall stehen einem geringen Arbeitsaufwand (bei manueller Anwendung: Stunden, wenige Tage) eine grosse Unschärfe des Modells gegenüber (vgl. Abb. iii). Damit stellt sich die Frage der Genauigkeit der Ergebnisse, die bei den meisten Modellen nicht beziffert werden kann, da sie keine Konfidenzintervalle liefern. In dieser Form sind die Ergebnisse für die wasserwirtschaftliche und/oder wasserbauliche Praxis nur mit Vorbehalten brauchbar. Wie geht man mit dieser Situation um?

Im schweizerischen Länderbericht wird ein **möglicher Ansatz für die Auswahl** einfacher Modelle vorgestellt. Es wird vorgeschlagen, die Streuung der Werte, die sich aus der Anwendung vieler, in der Praxis anerkannter Verfahren ergibt, zu verwenden, um indirekt ein Vertrauensintervall zu erhalten. Dieses Vorgehen soll kurz mit den zwei in der Abbildung ii aufgeführten Beispielen erläutert werden.

Im Falle der Langeten und der Lonza wurden sechs voneinander unabhängige Ansätze, die alle der Verfahrensgruppe „Regionale Übertragung“ angehören, angewendet (helle Säulen). Bei der Langeten ergeben sich ähnliche Schätzwerte für den 100jährigen Spitzenabfluss. Letzterer lässt sich somit gut eingrenzen. Zusätzlich verdeutlicht der Vergleich mit geschätzten extremen Hochwassern (EHQ, dunkle Säulen) die Plausibilität der Resultate. Die extremen Hochwasser wurden aufgrund von Hüllkurven der höchsten beobachteten Hochwasserspitzen bestimmt. Bei der Lonza ist die Wertestreuung der Abschätzung um einiges grösser; ein Schätzwert für das HQ_{100} übertrifft sogar das EHQ. Damit lässt sich die Zielgrösse a priori nicht befriedigend eingrenzen. Die grosse Streuung der Ergebnisse kann ein Hinweis auf besondere naturräumliche Verhältnisse sein, denen einige Modelle nicht gerecht werden. Eventuell lassen sich in einem zweiten Schritt Gründe für das „Versagen“ einzelner Modelle finden wie z.B. Verletzung der Modellvoraussetzungen oder mangelhafte Niederschlagsdaten. Ist dies nicht der Fall, sind weitergehende Analysen notwendig, um zu zufriedenstellenden Ergebnissen zu gelangen, wie beispielsweise mit der Verwendung von Kurzzeitmessungen oder mit dem Einbezug von historischen Hochwassern.

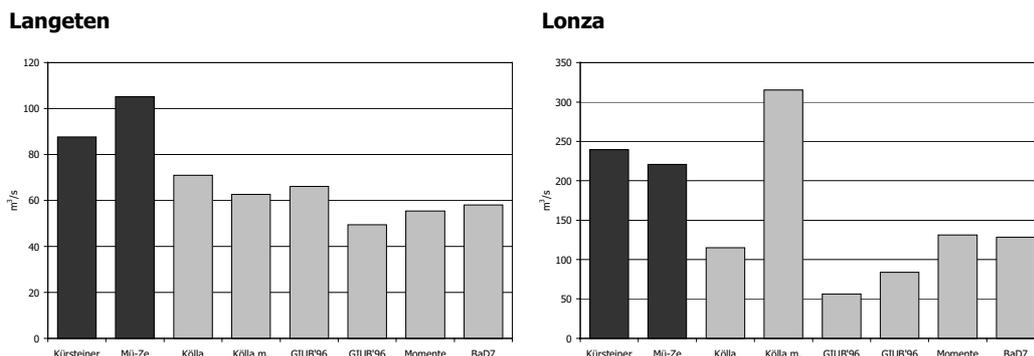


Abb. ii Streuung der Hochwasserabschätzungen bei der Langeten in Huttwil und der Lonza in Blatten.

Pfaundler (2001) hat in einer umfassenden Analyse die Index-Flood-Methode untersucht und dabei festgestellt, dass sich die Güte der Abschätzung verbessern lässt, wenn sich der Index Flood ($HQ_{2,33}$) mit **Kurzzeitmessungen** (> 3 Jahre!) abschätzen lässt. Diese Aussage bezüglich Kurzzeitmessungen ist ganz klar auf das Index-Flood-Verfahren ausgerichtet, das immer auch regionale Informationen (Growth curve) mitberücksichtigt. Sie belegt aber eindrücklich die Bedeutung solcher Direktmessungen.

In dieselbe Richtung wie die Kurzzeitmessungen zielt der **Einbezug von historischen Hochwassern**, also von Hochwassern, die vor den Messungen abgelaufen sind und Informationen zum Hochwassergeschehen der letzten rund 200 Jahre liefern. Hier liegen wertvolle Informationen vor, die bei allen Vorgehensweisen mitberücksichtigt werden sollten. Es muss allerdings sorgfältig geprüft werden, ob die historischen Informationen repräsentativ sind und für die Hochwasserabschätzung verwendet werden können. Der Aufwand, um zu diesen Informationen zu gelangen, ist allerdings nicht zu unterschätzen, vor allem wenn die historischen Hochwasser quantifiziert werden sollen.

Mit dem oben skizzierten Vorgehen – der Anwendung möglichst vieler anerkannter Verfahren – erhält die Praxis gute Grundlagen für die Eingrenzung der Bemessungsgrößen. Es muss aber erwähnt werden, dass bei der Festlegung des Bemessungsabflusses – neben der reinen Hochwasserabschätzung – auch Abklärungen zum Schadenpotential und Risikoüberlegungen eine sehr wichtige Rolle spielen.

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Auswahl eines Modells – neben Datenverfügbarkeit und zur Verfügung stehender Zeit – ist die **Grösse des Einzugsgebietes**. Im vorliegenden Bericht kommt deutlich zum Ausdruck, dass die Methoden, die in mesoskaligen Einzugsgebieten eingesetzt werden, nicht bedenkenlos auf Kleinstzugsgebiete (Fläche < 10 km²) übertragen werden können. Die Abflussbildung und die Abflusskonzentration werden in unterschiedlich grossen Einzugsgebieten nicht von den gleichen Prozessen dominiert. Die kleinräumig wechselnden Verhältnisse, die die Abflusscharakteristik eines kleinen Einzugsgebietes prägen (bei grossen Einzugsgebieten werden sie ausgemittelt oder gedämpft), können nur mit aufwändigen Kartierungen erfasst werden. Während bei der Datenerhebung in mesoskaligen Gebieten auf flächendeckende, kleinmasstäbliche Datensätze zurückgegriffen werden kann (Bodeneignungskarten, Bodennutzungskarten, etc.) und die Parameter zum Teil automatisch erhoben werden (wie im Programmpaket HQ_x _meso_CH, Barben 2001), spielt die Feldbegehung bei Kleinstzugsgebieten eine wichtige Rolle. Bei Analysen in Kleinstzugsgebieten kommt erschwerend dazu, dass nur für sehr wenige Gebiete aussagekräftige, lange Messreihen zur Verfügung stehen.

Niederschlag-Abfluss-Modellierung

Bei bestimmten, meist **komplexeren Fragestellungen** – also wenn es beispielsweise nicht mehr genügt, allein die Hochwasserspitze zu schätzen – kommen die Niederschlag-Abfluss-Modelle zum Einsatz. Sie bedürfen eines grossen **zeitlichen Aufwandes** (mehrere Wochen bis wenige Monate) und führen in der Regel zu umfassenderen und vielfach auch besseren Ergebnissen als die weniger komplexen Modelle der Regionalen Übertragung (vgl. Abb. iii). Der Beweis für die bessere Güte dieser Ansätze ist allerdings auch mit dem vorliegenden Bericht noch nicht erbracht worden.

Die Niederschlag-Abfluss-Modelle unterscheiden sich in ihrer räumlichen und zeitlichen Diskretisierung und vor allem auch im Detaillierungsgrad der Abbildung der physikalischen Prozesse. Plate (1992) meint: „Es muss aber das Ziel aller ingenieurhydrologischen Modelle, das heisst für den praktischen Einsatz erdachten hydrologischen Modelle sein, bei ausreichender Genauigkeit so einfach wie möglich zu sein.“ Moore et al. (1992) weisen darauf hin, dass die verbreitete Annahme, die Zuverlässigkeit und Genauigkeit eines Niederschlag-Abfluss-Modells korreliere positiv mit dessen Komplexität, vielfach nicht zutrifft.

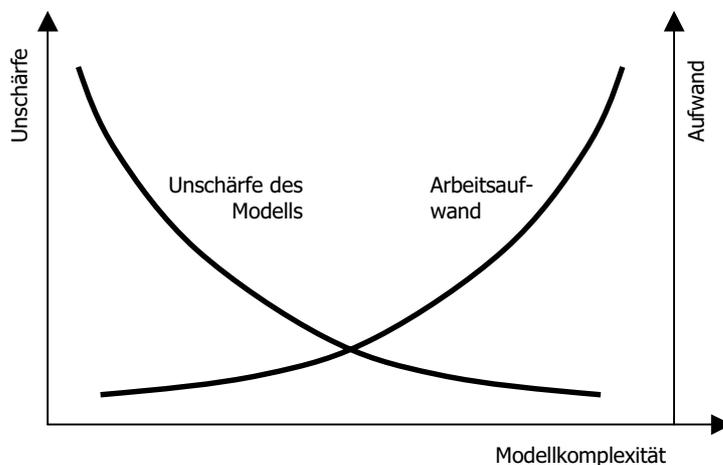


Abb. iii Skizze zum Zusammenhang zwischen Modellkomplexität, Modellierungsaufwand und Unschärfe des Modells (aus Weingartner 1999).

Ein Niederschlag-Abfluss-Modell kommt auf den ersten Blick der Forderung nach Prozessnähe der Abschätzung sicherlich am nächsten. Für deren Anwendung bestehen allerdings gewisse Einschränkungen:

- Der Einsatz solcher Modelle ist bei **fehlenden Abflussdaten** nicht möglich, da die Modelle **nicht geeicht** werden können. Sind kürzere Messreihen vorhanden, so ist es wichtig, dass in dieser Reihe auch grössere Hochwasser enthalten sind, um ein auch für den Extremfall möglichst plausibles Modell zu erhalten. Die Erfahrungen zeigen, dass Modelle oftmals kleine Hochwasser sehr gut simulieren, sich in diesen Fällen also gutmütig verhalten, dass dieselben Modelle aber bei seltenen und extremen Hochwassern wegen der Nicht-Linearität der Prozesse versagen können. Diese allgemeine Aussage ist natürlich von der Komplexität der eingesetzten Modelle (Inputparameter, Teilmodelle, räumliche Verteilung etc.) abhängig.
- Heutzutage stehen eine Fülle von Niederschlag-Abfluss-Modellen zur Verfügung, die dank nahezu unbeschränkter EDV-Kapazitäten eine hohe Komplexität aufweisen können. Allerdings **fehlen** für die Parametereichung oftmals die **notwendigen räumlichen Daten** (z.B. Bodenkennwerte), so dass Annahmen getroffen und Vereinfachungen vorgenommen werden müssen, welche die Vertrauenswürdigkeit der Modelle stark einschränken. Infolge der vielfach hohen räumlichen Auflösung der Modelle (distributed models) müssen die Input-Parameter interpoliert werden, obwohl die notwendigen Kenntnisse zur räumlichen Variabilität oftmals fehlen.

Für die Abschätzung seltener und extremer Hochwasserspitzen mit Niederschlag-Abfluss-Modellen bieten sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Die Erfahrungen zeigen, dass eine ereignisbezogene Modellierung sehr problematisch ist. Dabei berechnet man einzelne Hochwasserereignisse, indem ein Bemessungsniederschlag auf ein Einzugsgebiet appliziert wird. Die Wahl der Randbedingungen (Bodenfeuchte, Verlauf der Niederschlagsintensität) kann die Ergebnisse jedoch entscheidend beeinflussen. Deshalb sind Langzeitsimulationen vorzuziehen. Hier werden lange Reihen der Modellinput-Parameter verwendet und eine durchgehende lange Abflussreihe simuliert, die anschliessend extremwertstatistisch ausgewertet werden kann.

Weitere Aspekte

Die meisten Modelle der drei skizzierten Verfahrensgruppen sind auf die Hochwasserspitzen bestimmter Wahrscheinlichkeiten/Jährlichkeiten ausgerichtet. Weitere Parameter wie Anstiegszeiten, Abflussvolumen oder genereller die Abflussganglinie, die in der wasserwirtschaftlichen Anwendung ebenfalls von grosser Bedeutung sind, werden nur von den Niederschlag-Abfluss-Modellen systematisch angegangen.

Bei der Auswahl der Modelle zur Lösung einer bestimmten Problemstellung spielen – wie eben gezeigt wurde – einerseits die verfügbaren Daten und andererseits die vorhandenen Gebietskenntnisse die entscheidende Rolle:

Bei guter Datenlage, also wenn lange, homogene Abflussmessreihen vorhanden sind, stehen die Extremwertanalysen im Mittelpunkt. **Bei eingeschränkter Datenlage**, also wenn eher kürzere, unvollständige oder keine Abflussdaten zur Verfügung stehen, gelangen die beiden Verfahrensgruppen „Niederschlag-Abfluss-Modellierung“ und „Regionale Übertragung“ zur Anwendung.

Der Modellentscheid sollte aber nicht nur von der Datenlage abgängig gemacht werden, sondern etwa wie folgt ablaufen:

1. Fragestellung formulieren
2. Ein auf die Fragestellung zugeschnittenes Modell wählen
3. Die zur Modellanwendung notwendigen Daten und Informationen beschaffen.

Die Analysen, beziehungsweise die Umfragen, die zu den folgenden Länderberichten führten haben deutlich gezeigt, dass es das **optimale Modell nicht gibt**. Die Anwenderinnen und Anwender von Modellen für die Bestimmung von Hochwasserabflüssen werden gezwungen, Kompromisse einzugehen. Sie bewegen sich bei der Modellwahl ständig im Spannungsfeld zwischen Datenlage, zur Verfügung stehender Zeit und der Zielgrösse.

Résumé

La prévision des crues dans les pays de la CHR occupe une place très importante, étant donné la grande diversité des problématiques. Le champ d'application va des questions de dimensionnement, du développement des fondements de la cartographie des dangers jusqu'aux problématiques complexes de l'aménagement des cours d'eau et de la gestion des eaux. Les conditions géographiques naturelles jouent un rôle primordial dans ce processus. Les questions concernant la prévision des crues aux Pays-Bas se distinguent clairement de celles des pays alpins. Dans le premier cas, l'accent est mis sur les grandes rivières dont l'écoulement est mesuré. Les bassins versants dont il n'existe aucune ou peu de mesures d'écoulement sont caractéristiques des pays alpins. Cette différence dans la situation de départ est responsable d'un large choix d'approches pour la prévision de l'écoulement des crues. Même dans un seul champ d'application, il existe **de nombreux modèles** qui manifestent le dynamisme des activités théoriques et pratiques portant sur la prévision des crues.

La très grande variété de modèles présentée dans ce rapport, peut être subdivisée en trois grandes catégories de procédures décrites brièvement ci-après.

Analyse de valeurs extrêmes

Lorsque des **mesures d'écoulement** sont disponibles pour un bassin versant, elles peuvent être **soumises à une analyse statistique**. Cette analyse permet de déterminer le dépassement et le non-dépassement d'un écoulement de crue à partir de la connaissance des crues maximales annuelles et en recourant aux fonctions de distribution empiriques et théoriques.

L'écoulement mesuré à une station de jaugeage est un échantillon de l'écoulement total. Une hypothèse importante est que l'échantillon contient quasiment toutes les caractéristiques de la population. Pour l'analyse des valeurs extrêmes, les éléments de l'échantillon doivent être statistiquement indépendants. L'analyse se porte alors sur les séries annuelles et partielles. Il est possible pour l'échantillon sélectionné de déterminer la distribution des fréquences empiriques. Afin d'obtenir ensuite des informations sur le dépassement ou non-dépassement de certaines valeurs d'écoulement de crue, il faut passer d'une distribution discrète empirique à une distribution théorique. Pour cela, on essaye de contenir dans l'échantillon toute la gamme des crues de la population.

Il existe en principe **de nombreuses fonctions de distribution** qui peuvent être utilisées pour les statistiques des crues. La question est donc de savoir laquelle de ces fonctions de distribution doit être utilisée et quelle procédure doit être adoptée pour déterminer ses paramètres. Dans le passé à cause des importants temps de calculs et de leur coût, on se limitait à un nombre restreint de fonctions de distribution, mais aujourd'hui grâce à l'informatique le choix est très grand. Cette différence entre les possibilités passées et actuelles se manifeste également dans les recommandations du DVWK (Association allemande pour la gestion et l'aménagement des eaux), qui sont largement répandues dans les états riverains du Rhin. Sur la base des caractéristiques statistiques des séries de mesures, les anciennes recommandations (1979) conduisaient à une seule fonction de distribution. Par conséquent le principal désavantage de cette procédure réside dans le fait qu'aucune comparaison de fonction de distribution n'est possible. Les nouvelles recommandations du DVWK (1999a) pour la prévision des crues et le logiciel qui leur est associé ont rendu la procédure plus flexible. Le choix des fonctions de distribution est très large. Aujourd'hui l'ajustement d'une fonction de distribution théorique aux séries de mesures **nécessite peu de temps de calcul** car il se fait au moyen **de logiciels efficaces**, ainsi une grande gamme de fonctions de distribution peut être explorée. Les utilisateurs sont alors appelés à choisir une fonction de distribution selon leur degré d'adéquation. Cette procédure contient néanmoins une composante subjective qui est problématique, car le jugement à l'origine du choix ne peut pas se baser sur des critères statistiques. Toutefois, l'utilisation des logiciels constitue un réel avantage car les ajustements peuvent être contrôlés visuellement de telle sorte qu'il n'est plus nécessaire de prendre en compte uniquement le degré d'adéquation.

Méthode régionale

L'utilisation d'un modèle simple, appartenant aux procédures régionales, pour les prévisions dans les bassins versants sans mesures directes demande peu de données et également peu de **temps et d'argent**. Ces conditions favorables pour la pratique („Le temps, c'est de l'argent“) se „paient“ cependant souvent par une qualité incertaine des résultats (voir figure i).

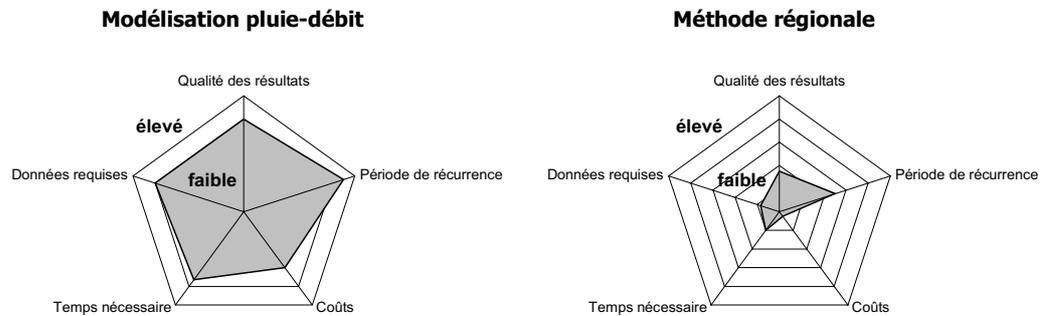


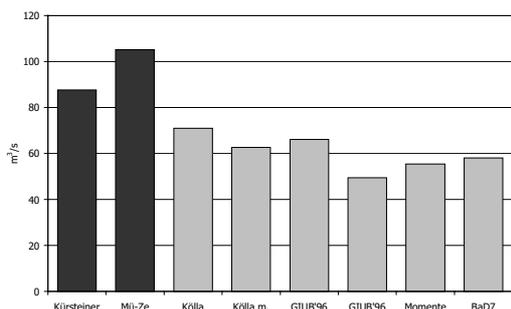
Fig. i Données relatives aux coûts et au temps nécessaires à l'application du modèle et à la qualité de la modélisation (tirées du rapport national de l'Allemagne).

Vu la **limitation du temps disponible**, il existe une préférence dans la pratique pour les modèles moins complexes. Dans ce cas, l'économie de temps (lors d'une utilisation manuelle: heures, quelques jours) conduit à une faible fiabilité du modèle (cf. figure iii). La fiabilité des résultats soulève quelques questions qui ne peuvent généralement pas être déterminées à partir des modèles puisque la majorité d'entre eux ne fournit pas d'intervalles de confiance. Les résultats sous cette forme ne peuvent être utilisés qu'avec réserve pour la gestion des eaux et la construction hydraulique. Comment résoudre cette situation?

Le rapport national suisse présente un éventuel **point de départ pour le choix** de modèles simples. Afin d'obtenir un intervalle de confiance, il propose d'utiliser la dispersion des valeurs résultant de l'application de plusieurs méthodes reconnues dans la pratique. Cette procédure est présentée brièvement dans la figure ii par deux exemples.

Dans le cas de la Langeten et de la Lonza, six estimations indépendantes ont été appliquées faisant toutes recours à des procédures du type „Méthode régionale“ (colonnes claires). Dans le cas de la Langeten, toutes les prévisions du débit de pointe centenaire sont comparables. Sur la base des résultats obtenus, cette grandeur est facile à délimiter. D'autre part, la comparaison avec les crues extrêmes prédéterminées (EHQ, colonnes foncées) démontre la plausibilité des résultats. Les crues extrêmes sont déterminées à l'aide des lignes enveloppantes des crues maximales observées. Dans le cas de la Lonza, la dispersion des prévisions est légèrement plus grande; une prévision du HQ₁₀₀ dépasse même l'EHQ. Par conséquent, il est a priori impossible de limiter de façon satisfaisante la valeur de consigne. La grande dispersion des résultats est peut-être due au fait que les particularités des conditions naturelles ne sont pas prises en compte par certains modèles. Dans un second temps, il est possible d'identifier les causes de „l'échec“ de ces modèles. Ceci est peut-être dû au non respect des exigences d'application des modèles ou à des données pluviométriques incomplètes. Si cela n'est pas le cas, il faut alors effectuer des analyses complémentaires afin d'obtenir finalement des résultats satisfaisants, dans ce cas des mesures à court terme ou des crues historiques peuvent par exemple être considérées.

Langeten



Lonza

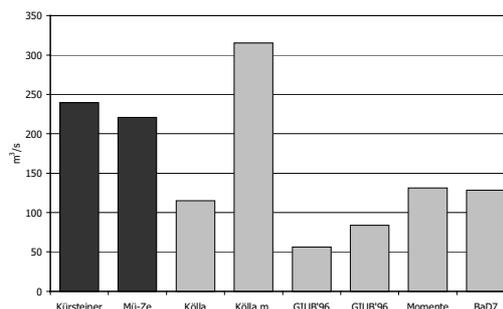


Fig. ii Dispersion des prévisions des crues dans la Langeten à Huttwil et dans la Lonza à Blatten.

Au cours d'une analyse approfondie, Pfaundler (2001) a examiné la méthode Index-flood. Il a ainsi constaté que la qualité de la prévision peut être améliorée lorsque l'Index Flood ($HQ_{2.33}$) est estimé à partir de **mesures à court terme** (> 3 ans!). Il faut remarquer que la méthode Index-Flood prend en compte également les données régionales (courbe de croissance). Par ailleurs, cette constatation souligne l'importance des mesures directes.

La considération des crues historiques tirées soit des mesures soit des informations concernant les crues récoltées lors de ces 200 dernières années sont également intéressantes tout comme celles des mesures à court terme. Ces données sont précieuses, elles doivent donc être si possible prises en compte dans toutes les procédures. Néanmoins il faut examiner soigneusement les données historiques afin de vérifier si elles sont représentatives et si elles peuvent être utilisées pour la prévision des crues. Il ne faut pas sous-estimer les efforts nécessaires pour obtenir ces informations, notamment quand les crues historiques doivent être quantifiées.

Grâce à la méthode énoncée ci-dessus et à l'utilisation possible d'un grand nombre de procédures, la pratique dispose ainsi d'une bonne base pour déterminer et délimiter les valeurs de dimensionnement. Il faut relever le fait que lors de la détermination de la crue de projet avec en plus la simple estimation du débit, l'analyse des risques et des dommages potentiels joue également un rôle important.

Un autre critère important pour le choix d'un modèle, mis à part les données et le temps disponibles, est la **dimension du bassin versant**. Le présent rapport montre clairement que les méthodes utilisées dans des bassins versants à méso-échelle, ne peuvent être appliquées sans autre à de très petits bassins versants (superficie < 10 km²). Le régime et les écoulements sont contrôlés par des processus différents suivant la dimension des bassins versants. Le changement des conditions à l'échelle locale, qui est typique des caractéristiques d'écoulement des petits bassins versants (dans les grands bassins versants, elles sont détectées ou atténuées), ne peut être saisi seulement à partir d'importants relevés cartographiques. Les relevés sur le terrain jouent dans ce cas un rôle important, ce qui n'est pas le cas pour les bassins à méso-échelle, où les données peuvent être obtenues à partir des informations globales (cartes pédologiques, cartes de l'occupation des sols etc.) et où une partie des paramètres peut être saisie automatiquement (comme dans le logiciel HQx_meso_CH, Barben 2001). L'analyse dans les petits bassins versants est d'autant plus difficile car il manque de longues séries d'observations pour la majorité d'entre eux.

Modélisation pluie-débit

Les modèles pluie-débit sont utilisés pour des **problématiques plus complexes**, par exemple lorsque la prévision des crues maximales ne suffit plus. Ces modèles consomment beaucoup de temps (de quelques semaines à quelques mois) mais par contre ils mènent en général à des résultats fiables et souvent meilleurs que ceux obtenus par les modèles plus simples de la méthode régionale (cf. figure iii). Toutefois la preuve de la validité de cette hypothèse de départ n'a pas encore été fournie même après à la publication du présent rapport.

Les modèles pluie-débit se distinguent par leur discrétisation temporelle et spatiale mais avant tout par le niveau de détail de la représentation des processus physiques. Plate (1992) est d'avis que tous les modèles hydrologiques pour ingénieurs, c'est-à-dire les modèles qui ont été conçus pour une application pratique, doivent être le plus simple possible tout en étant suffisamment précis. Moore et al. (1992) observent que l'opinion générale, qui persiste à croire que la fiabilité et la précision des modèles pluie-débit sont corrélées positivement à sa complexité, a souvent été démentie.

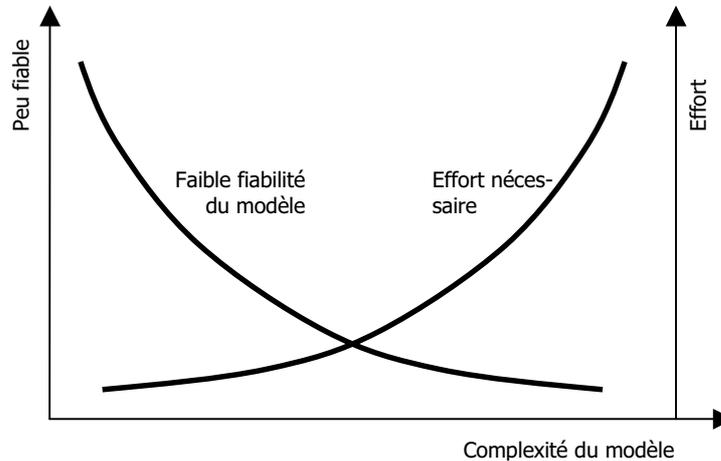


Fig. iii Schéma de la relation entre la complexité du modèle, les travaux de modélisation et la faible fiabilité du modèle (tiré de Weingartner 1999).

Un modèle pluie-débit satisfait à première vue le mieux aux exigences d'une prévision axée sur les processus. L'utilisation de ces modèles est cependant soumise à certaines restrictions:

- L'utilisation de ces modèles n'est pas possible dans le cas de données d'écoulement manquantes puisque les modèles ne peuvent pas être calibrés. Lorsque de courtes séries de mesures sont disponibles, il est important qu'elles incluent des crues extrêmes afin d'obtenir un modèle également plausible dans les situations extrêmes. L'expérience montre que les modèles simulent souvent très bien les petites crues, toutefois ces mêmes modèles peuvent échouer dans le cas de crues exceptionnelles et extrêmes en raison de la non-linéarité des processus. Ceci dépend naturellement de la complexité des modèles utilisés (paramètre d'entrée, modèles partiels, répartition spatiale etc.).
- Aujourd'hui grâce à la capacité informatique quasi illimitée, il y a un très grand choix de modèles pluie-débit pouvant être très complexes. Les données spatiales nécessaires (par exemple les données pédologiques) manquent souvent pour le calage des paramètres de telle sorte qu'il faut poser des hypothèses et procéder à des simplifications, ce qui peut fortement réduire la fiabilité des modèles. En raison de la haute résolution spatiale des modèles (modèles distribués) il faut interpoler les paramètres d'entrée malgré que le manque de connaissance concernant la variabilité spatiale.

Il y a deux possibilités pour estimer les pointes des crues exceptionnelles et extrêmes à partir des modèles pluie-débit. L'expérience montre que la modélisation basée sur des événements réels présente beaucoup de problèmes. Les crues individuelles sont déterminées au moyen des mesures de précipitations dans le bassin versant. Le choix des conditions initiales (humidité du sol, régime de l'intensité des précipitations) peut avoir une influence décisive sur les résultats. C'est pourquoi les simulations à long terme sont préférables. De longues séries de paramètres d'entrée du modèle sont utilisées afin de simuler une longue série chronologique de débits, cette dernière peut être finalement utilisée pour l'analyse statistique des valeurs extrêmes.

Autres considérations

La plupart des modèles des trois groupes de procédures décrits précédemment visent à déterminer la probabilité / le temps de retour des crues extrêmes. Les paramètres tels que le temps de montée, le volume d'écoulement ou la courbe générale du débit, qui ont une grande signification dans les applications liées à l'économie des eaux, ne sont fournis que par les modèles pluie-débit.

Comme cela a été démontré ci-dessus, lors du choix d'un modèle pour la résolution d'une problématique spécifique, les données disponibles ainsi que la connaissance du bassin jouent un rôle primordial.

Dans le cas où les données sont suffisantes, c'est-à-dire lorsque les séries de mesures des écoulements sont longues et homogènes, les analyses des valeurs extrêmes sont centrales. **Dans le cas de données limitées**, c'est-à-dire lorsque les données sont réduites, incomplètes ou carrément absentes, les deux types d'approches suivantes sont utilisés „Modélisation pluie-débit“ et „Méthode régionale“.

Cependant le choix d'un modèle ne doit pas seulement dépendre du type de données mais devrait suivre à peu près les étapes suivantes:

1. Formuler la problématique
2. Choisir un modèle adapté à la problématique
3. Recueillir les données nécessaires à l'application du modèle.

Les analyses ou enquêtes qui sont à la base des rapports nationaux suivants ont clairement démontré que: **le modèle parfait n'existe pas**. Les utilisatrices et utilisateurs des modèles de prévision de crues sont obligés de faire des compromis. Le choix des modèles est basé sur une évaluation permanente en considérant les données à disposition, le temps disponible et l'objectif à atteindre.

Samenvatting

Het bepalen van de bij een bepaalde herhalingstijd behorende hoogwaterafvoer neemt in de lidstaten van de CHR, gezien het grote aantal uiteenlopende vragen, nog steeds een uiterst belangrijke plaats in. Het toepassingspectrum strekt zich uit van vragen omtrent dimensionering, via fundamenteel onderzoek bij risicokartering, tot complexe probleemstellingen op het gebied van waterbouwkunde en waterhuishouding. Daarbij speelt de ruimte die de rivier van nature heeft een toonaangevende rol. Vragen met betrekking tot hoogwaterfrequenties onderscheiden zich bijvoorbeeld in Nederland duidelijk van die in de Alpenlanden. In het eerste geval ligt het accent op de grote rivieren, waarin de afvoer wordt gemeten. In de Alpenlanden zijn stroomgebieden, die over geen of slechts enkele afvoermetingen beschikken, karakteristiek. Dit verschil in uitgangssituatie leidt tot een breed scala aan invalshoeken voor het bepalen van hoogwaterfrequenties. Maar ook binnen hetzelfde toepassingsgebied bestaan **tal van modellen**, die de ontwikkelingen op het gebied van de hoogwaterproblematiek in onderzoek en praktijk aantonen.

Het grote aantal zeer uiteenlopende modellen, die met name in dit rapport worden behandeld kan in principe in drie methodische groepen worden onderverdeeld, die hierna kort worden beschreven.

Analyse van extreme waarden

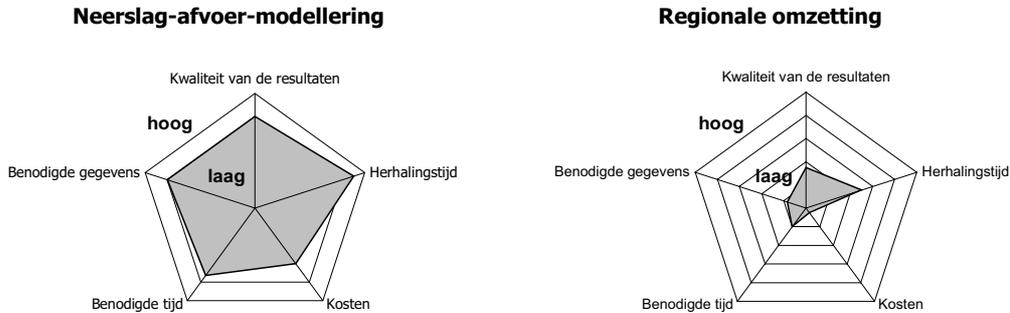
Wanneer van een stroomgebied **afvoermetingen** beschikbaar zijn, dan kunnen deze **statistisch** worden **bewerkt**. Zo kan aan de hand van de jaarlijkse hoogste afvoeren bijvoorbeeld met behulp van empirische en theoretische verdelingsfuncties de over- en onderschrijding van een bepaalde hoogwaterafvoer worden bepaald.

De bij een meetstation gemeten afvoer is een steekproef van het totaal van alle afvoeren. Daarbij is een belangrijk uitgangspunt, dat in de steekproef alle eigenschappen van het totaal der afvoeren bij benadering aanwezig zijn. Voor een analyse van de extreme waarden moeten de elementen van de steekproef statistisch onafhankelijk zijn. Daarom staan jaarlijkse en partiële reeksen centraal. Voor de gekozen steekproef kan de empirische frequentieverdeling worden bepaald. Als men nu uitspraken wil doen over de mogelijke over- of onderschrijdingskans van bepaalde hoogwaterafvoeren, dan moet men van de discrete, empirische verdeling overgaan op een theoretische kansverdeling. Er wordt dus geprobeerd om uit de steekproef het gehele spectrum van hoogwaterafvoeren af te leiden.

Er bestaan in principe **veel verdelingsfuncties** die geschikt zijn voor toepassing in de hoogwaterstatistiek. In de praktijk rijst dan ook de vraag welke verdelingsfunctie moet worden gebruikt en op welke wijze de parameters van deze verdelingsfunctie moeten worden bepaald. Vroeger moest men zich beperken tot een aantal verdelingsfuncties, met name vanwege tijdrovende berekeningen, maar nu bestaan er dankzij de informatica vele keuzemogelijkheden. Dit verschil tussen „vroeger“ en „nu“ wordt o.a. ook duidelijk in de DVWK-aanbevelingen (Duitse vereniging voor water- en cultuurbouw), die in de Rijnsoeverstaten gemeengoed zijn geworden. De oude aanbevelingen (1979) leidden op grond van statistische parameters van de meetreeksen naar één enkele verdelingsfunctie. Het nadeel van deze werkwijze schuilt in ieder geval in het feit, dat deze methode voor het bepalen van hoogwaterfrequenties op slechts één verdelingsfunctie berust en dat vergelijkingsmogelijkheden daardoor grotendeels ontbreken. Bij de nieuwe aanbevelingen van de DVWK (1999a) en een daarop gebaseerd softwarepakket om hoogwaterafvoeren te bepalen, is de werkwijze flexibeler geworden en kan uit een groot aantal mogelijke verdelingsfuncties worden gekozen. Omdat tegenwoordig dankzij deze software nog maar **weinig rekentijd nodig is** voor aanpassing van een theoretische verdelingsfunctie aan een meetreeks, kan uit een breed scala aan verdelingsfuncties worden gekozen. De gebruiker moet o.a. door middel van fitting zelf bepalen welke verdelingsfuncties worden gekozen. Deze werkwijze bevat echter een subjectieve component die problematisch is, omdat het keuzeprobleem niet kan worden opgelost met behulp van een kwalitatieve beoordeling met statistische criteria. Het is echter een wezenlijk voordeel dat, dankzij de software, de aanpassingen visueel getoetst kunnen worden en men niet alleen hoeft af te gaan op de moeilijk te beoordelen kwalitatieve criteria.

Regionale Toepassing

Voor het gebruik van een eenvoudig model voor het bepalen van hoogwaterafvoeren in stroomgebieden zonder afvoermeting ter plekke, dus een model uit de groep „Regionale Omzetting“ – zijn de eisen ten aanzien van beschikbare gegevens gering evenals de **benodigde hoeveelheid tijd en geld**. Deze voor de praktijk gunstige voorwaarden („tijd is geld“) moeten echter met een vaak ongewisse kwaliteit van de resultaten worden „bekocht“ (vgl. afb. i).



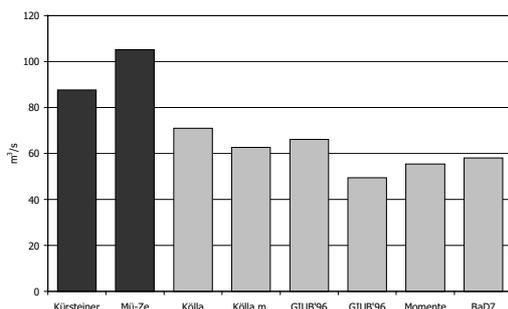
Afb. i Gegevens over de kosten en de hoeveelheid tijd voor de toepassing van het model en de kwaliteit van de modellering (uit landenrapportage Duitsland).

Door de **beperkt beschikbare tijd** bestaat er in de praktijk voorkeur voor de minder complexe modellen. In dit geval staat tegenover een geringe tijdsinvestering (bij handmatig gebruik: uren, enkele dagen) een geringe nauwkeurigheid van het model (vgl. afb. iii). Dat roept vragen op over de betrouwbaarheid van de resultaten, die bij de meeste modellen niet kan worden berekend, omdat de modellen geen betrouwbaarheidsintervallen leveren. In deze vorm zijn de resultaten voor het waterbeheer en de waterbouwkunde slechts met voorbehoud te gebruiken. Hoe gaat men met deze situatie om?

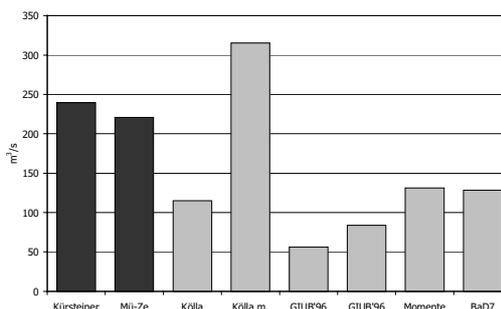
In de Zwitserse landenrapportage wordt voorgesteld om **in beginsel zo mogelijk te kiezen voor het gebruik van eenvoudige modellen**. Voorgesteld wordt om de spreiding van de waarden, die het gevolg is van het gebruik van vele in de praktijk erkende methoden, te gebruiken om indirect een betrouwbaarheidsinterval te verkrijgen. Deze werkwijze wordt in het kort aan de hand van de twee in afbeelding ii getoonde voorbeelden verduidelijkt.

In het geval van de Langeten en de Lonza werden zes onafhankelijke methoden gebruikt, die allemaal tot de groep „Regionale omzetting“ behoren (lichte balken). Bij de Langeten zijn er vergelijkbare bepaalde waarden voor de hoogwaterafvoer met een herhalingstijd van 100 jaar. Deze kunnen zodoende goed worden begrensd. Tevens maakt de vergelijking met geschatte extreme hoogwaterafvoeren (EHQ, donkere balken) de plausibiliteit van de resultaten duidelijk. De extreme hoogwaterafvoeren worden op grond van de omhullende van de hoogst waargenomen hoogwaterafvoeren bepaald. Bij de Lonza is de spreiding van de bepaalde hoogwaterafvoeren om onbekende reden, iets groter; één geschatte waarde voor HQ_{100} overtreft zelfs het EHQ. Daardoor kan de grootte van de berekende afvoeren niet naar tevredenheid worden begrensd. De grote spreiding van de resultaten kan een aanwijzing zijn voor bijzondere ruimtelijke omstandigheden waarmee bij enkele modellen geen rekening wordt gehouden. Er kunnen eventueel in een tweede fase oorzaken voor het „falen“ van enkele modellen worden gevonden, zoals het niet voldoen aan modelcriteria of onvolledige neerslaggegevens. Als dit niet het geval is, dan zijn nadere analyses nodig voor het verkrijgen van bevredigender resultaten, zoals bijvoorbeeld door het gebruik van korte meetreeksen of het doorrekenen van historische hoogwaters.

Langeten



Lonza



Afb. ii Spreiding van de bepaalde hoogwaterafvoeren van de Langeten in Huttwil en van de Lonza in Blatten.

Pfaundler (2001) heeft in een uitgebreide analyse de Index-Flood-methode onderzocht en daarbij vastgesteld, dat de kwaliteit van de berekende resultaten kan worden verbeterd, wanneer de Index Flood ($HQ_{2,33}$) met behulp van **korte meetreeksen** (> 3 jaar!) kan worden bepaald. Deze uitspraak met betrekking tot korte meetreeksen heeft specifiek betrekking op de Index-Flood-methode die ook met regionale gegevens (Growth curve) rekening houdt. De uitspraak ondersteunt overigens ook de betekenis van dergelijke metingen.

In dezelfde richting als de korte meetreeksen wijst het **betrekken van historische hoogwaterstanden** in de berekeningen. Deze hoogwaters die optraden voordat hoogwaterafvoeren werden gemeten, leveren informatie over situaties bij hoogwater in de laatste 200 jaar. Dit leidt tot waardevolle informatie, die bij alle methoden zou moeten worden meegenomen. Wel moet zorgvuldig worden onderzocht, of de historische gegevens representatief zijn en voor het bepalen van de hoogwaterfrequentie kunnen worden gebruikt. De moeite die het kost om deze informatie te bemachtigen, moet echter niet worden onderschat, met name wanneer de historische hoogwaters moeten worden gekwantificeerd.

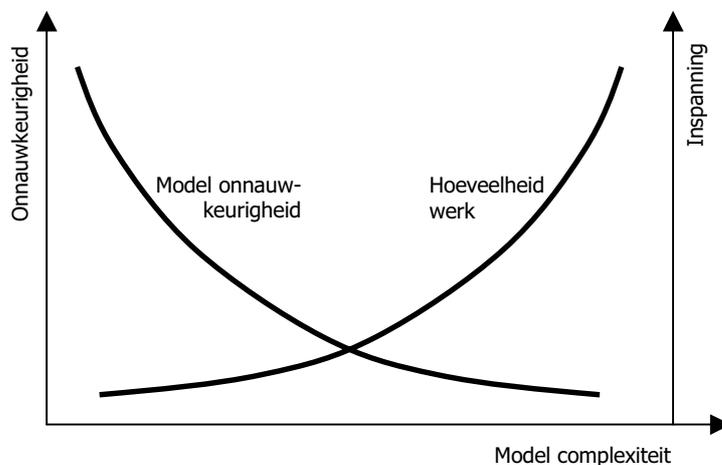
Met de hierboven geschetste werkwijze – het gebruik van zoveel mogelijk erkende methoden – krijgt men in de praktijk de beschikking over een goede basis voor het begrenzen van de maatgevende waarden. Hieraan moet wel worden toegevoegd, dat bij de vaststelling van de maatgevende afvoer – naast de werkelijke frequentiebepaling – onderzoek naar potentiële schade en risicoanalyse ook een uiterst belangrijke rol spelen.

Een ander belangrijk criterium voor de keuze van een model is – naast de beschikbaarheid van gegevens en de ter beschikking staande tijd – **de omvang van het stroomgebied**. In dit rapport komt duidelijk tot uitdrukking dat de methoden, die in stroomgebieden van gemiddelde grootte worden gebruikt, niet zondermeer voor zeer kleine stroomgebieden (oppervlakte < 10 km²) kunnen worden gebruikt. Het ontstaan en de ontwikkeling van afvoer worden in stroomgebieden van uiteenlopende omvang niet door dezelfde processen gedomineerd. De lokaal wisselende omstandigheden, die het afvoer karakter van een klein stroomgebied kenmerken (bij grote stroomgebieden worden ze uitgemiddeld of afgezwakt), kunnen slechts worden bepaald met behulp van moeizame karteringen. Bij het verzamelen van gegevens in middelgrote gebieden kan gebruik gemaakt worden van gegevensbestanden van deelgebieden (kaarten van de bodemgesteldheid, bodemgebruik etc.). Deze parameters worden voor een deel automatisch verzameld (zoals in het programmapakket HQ_x meso CH, Barben 2001). Bij zeer kleine stroomgebieden speelt het veldwerk een belangrijke rol. Bij analyses in de kleine stroomgebieden doet zich ook nog het probleem voor, dat er maar voor een zeer beperkt aantal gebieden betrouwbare, lange meetreeksen beschikbaar zijn.

Neerslag-Afvoer-Modellering

Bij bepaalde, vaak **complexere vraagstellingen** – dus wanneer het bijvoorbeeld niet meer voldoende is om alleen de maximale afvoer te bepalen – worden neerslag-afvoer-modellen toegepast. Ze **kosten veel tijd** (enkele weken tot een paar maanden) en leiden in de regel tot nauwkeurige en vaak ook betere resultaten dan de minder complexe modellen van de Regionale Omzetting (vgl. afb. iii). Het bewijs voor de betere kwaliteit van deze benadering is overigens ook met dit rapport nog niet geleverd.

De neerslag-afvoer-modellen onderscheiden zich door hun ruimtelijke en temporele resolutie en vooral ook door de gedetailleerdheid van de beschrijving van fysische processen. Plate (1992) is van mening dat alle „ingenieurhydrologische” modellen (hydrologische modellen die voor het praktische gebruik zijn ontworpen), bij voldoende nauwkeurigheid zo eenvoudig mogelijk moeten zijn. Moore et al. (1992) wijzen erop, dat de algemeen heersende mening, dat de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van een neerslag-afvoer-model positief zouden correleren met de complexiteit ervan, veelal niet juist is.



Afb. iii Schets van de samenhang tussen complexiteit van het model, modelleringsinspanning en onnauwkeurigheid van het model (uit Weingartner 1999).

Een neerslag-afvoer-model voldoet op het eerste gezicht zeker nog het meest aan de eis om tot een procesgeoriënteerde bepaling te komen. Het gebruik ervan is wel aan bepaalde beperkingen onderhevig:

- De inzet van dergelijke modellen is bij **ontbrekende afvoergegevens** niet mogelijk, daar de modellen **niet** kunnen worden **gecalibreerd**. Wanneer er korte meetreeksen beschikbaar zijn, is het belangrijk dat daarin ook extreme hoogwaterafvoeren voorkomen om een zo bruikbaar mogelijk model te krijgen dat ook bij extreme situaties kan worden toegepast. De ervaring leert, dat modellen vaak niet-extreme hoogwaters heel goed simuleren, en dus in dergelijke gevallen goed werken, maar dat diezelfde modellen bij zeldzame en extreme hoogwaters vanwege de niet-lineaire processen kunnen falen. Deze stelling hangt natuurlijk af van de complexiteit van de gebruikte modellen (input-parameters, deelmodellen, ruimtelijke resolutie etc.).
- Tegenwoordig zijn er zeer veel neerslag-afvoer-modellen beschikbaar die dankzij nagenoeg onbeperkte computercapaciteit bijzonder complex kunnen zijn. Voor het calibreren van de parameters **ontbreken** echter vaak de **nodige ruimtelijke gegevens** (b.v. bodemgegevens), zodat hier van veronderstellingen moet worden uitgegaan en vereenvoudigingen moeten worden aangebracht, waardoor de betrouwbaarheid van de modellen sterk kan dalen. Ten gevolge van de vaak grote ruimtelijke resolutie van de modellen (distributed models) moeten de input-parameters geïnterpoleerd worden, hoewel de noodzakelijke kennis omtrent ruimtelijke variabiliteit vaak ontbreekt.

Voor het bepalen van zeldzame en extreme hoogwaterafvoeren met neerslag-afvoer-modellen bestaan er in principe twee mogelijkheden. De ervaring leert, dat een op reële gebeurtenissen gebaseerde modellering veel problemen oplevert. Daarbij worden bij een maatgevende neerslag in een stroomgebied de hoogwaterafvoeren berekend. De keuze van randvoorwaarden (bodemvochtgehalte, verloop van de neerslagintensiteit) kan de resultaten echter doorslaggevend beïnvloeden. Daarom verdienen lange-termijn-simulaties de voorkeur. Hierbij worden lange reeksen van de model-input-parameters gebruikt en een aaneengesloten lange afvoerreeks gesimuleerd, die vervolgens met behulp van statistiek voor extreme waarden kan worden geanalyseerd.

Overige aspecten

De meeste modellen van de drie beschreven groepen zijn bedoeld voor de hoogste afvoeren van bepaalde waarschijnlijkheden/jaarfrequenties. Aan andere parameters die voor waterhuishoudkundige toepassingen eveneens van groot belang zijn, zoals stijgingsduur, afvoervolumes of algemener, het afvoerverloop, wordt alleen door de neerslag-afvoer-modellen systematisch aandacht besteed.

Bij de keuze van de modellen voor het oplossen van een bepaalde probleemstelling, zijn – zoals hiervoor is aangetoond – enerzijds de beschikbare gegevens en anderzijds de aanwezige kennis van het betreffende gebied de belangrijkste elementen:

Bij voldoende gegevens, dus wanneer er lange, homogene afvoermeeptreeksen bestaan, staan de analyses van de extreme waarden centraal. **Bij beperkte gegevens**, dus wanneer vooral korte, onvolledige of helemaal geen afvoergegevens beschikbaar zijn, worden de beide groepen „Neerslag-Afvoer-Modellering“ en „Regionale Omzetting“ toegepast.

De keuze voor een model moet echter niet alleen van de gegevenssituatie afhangen, maar zou ongeveer als volgt moeten verlopen:

1. Vraagstelling formuleren
2. Een model kiezen dat op de vraagstelling is toegesneden
3. De gegevens verzamelen die nodig zijn voor de toepassing van het model.

De analyses c.q. enquêtes, waaruit de volgende landenrapportages zijn voortgekomen, hebben duidelijk aangetoond: **het perfecte model bestaat niet**. De gebruikers zijn bij het gebruik van modellen voor het bepalen van hoogwaterfrequenties gedwongen compromissen te sluiten. Ze moeten bij het kiezen van een model voortdurend afwegingen maken met betrekking tot beschikbare gegevens, beschikbare tijd en doelstellingen.

Summary

High-water estimates are still being considered extremely important in the CHR countries, because of the great variety of questions involved. The range of application extends from questions about dimensioning, through the processing of basic data when mapping out the risk potential, to complex definitions of problems in the field of water management. Natural physical conditions play a prominent part in this respect. Questions about high-water estimates in the Netherlands, for example, clearly differ from those in the Alpine countries. In the first case, the emphasis is placed on the major rivers, the discharge of which is monitored. In the Alpine countries, where there are hardly any discharge data, if at all, the basins are the key issue. This different emphasis explains the various points of view on which high-water discharge forecasts are based. But even a single area of application may comprise **numerous models**, indicating the importance of high-water monitoring, both in research and in practice.

The large number of diverse models dealt with in this report may in principle be subdivided into three procedural groups, briefly described here.

Analysis of extreme values

If **discharge data** are available in a basin, it is possible to **process** these **statistically**. Based on the annual peak waters, for example, it is possible to estimate to what extent a certain high-water discharge level will be over- or underrun by means of empirical and theoretical distributions.

The discharge measured at a monitoring station is a random sample of the total of all discharges. Within this context, it is taken as an important condition that all the properties of all the discharges are approximately available in the random sample. For an analysis of extreme values, the elements of the random sample must be statistically independent. This is why annual and partial series are the pivotal point. The empirical frequency distribution can be assessed for the selected random sample. If, after that, information is required about the possible overrun or underrun of certain high-water discharge levels, it is necessary to change from the discrete empirical distribution to a theoretical distribution. This is why attempts are made to determine the entirety of high-water situations on the basis of the random sample.

In principle, **many distribution functions** are suitable for use in high-water statistics. The question is, however, which distribution functions have to be used, and on the basis of which procedures the parameters of these distribution functions must be defined. In the past, the number of distribution functions was limited, in particular due to time-consuming and expensive calculations, but nowadays, thanks to information technology, many options are available. This difference between „before” and „today” also becomes clear from e.g. the DVWK recommendations (German Society for Hydraulics & Agricultural Engineering), which have become widely accepted in the Rhine riparian states. Based on the statistic index numbers of sets of measurements, the old recommendations (1979) led to a single distribution function. The disadvantage of this procedure is the fact that the entire estimate is based on only one function; as a result there are hardly any possibilities for comparison. With the new recommendations of the DVWK (1999a) and the high-water forecasting software that is based on these, the procedure has been made more flexible, and there is a large number of possible distribution functions to choose from. Nowadays, thanks to **efficient high-water forecasting software**, only **few calculations** are required to adapt a theoretical distribution function to a set of measurements; thus, it is possible to choose from a wide range of distribution functions. The users have to determine themselves, based on e.g. adaptation indicators, which distribution functions to choose. However, this working method comprises a subjective component, which is problematic, all the more so because the selected problem cannot be solved by means of a quality assessment with statistical criteria. On the other hand, it is an important advantage that, thanks to the software, the adaptations can be checked visually, so that it is not only the problematic quality indicator that needs to be taken into account.

Regional Application

For the use of a simple model for estimates in basins without short-term measurements – therefore a model of the procedural group entitled „Regional Application” – the requirements for available data are modest, as are those regarding **time and money**. However, these favourable conditions – from a practical point of view („time is money”) – have to be „paid for” with an often uncertain quality of results (cf. fig. i).

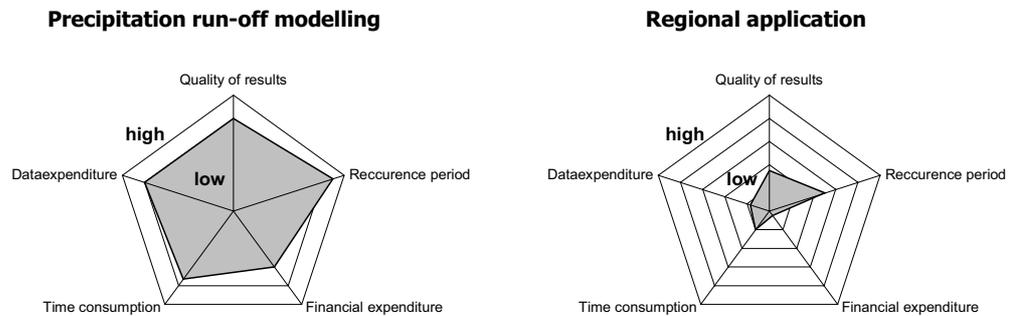


Fig. i Details of costs and time required for the application of the model and the quality of the modelling (from the German country report).

Due to the **limited time available**, the less complex models are preferred in practice. In this case, the limited amount of time to be invested (with manual use: hours, a few days) is offset by the model's limited accuracy (cf. fig. iii). This raises several questions as to the reliability of the results, which cannot be determined with most models, because the results do not supply any uncertainty intervals. In this form, the results for water management and hydraulic engineering can only be used with reservations. How does one deal with this situation?

In Swiss country reports, a **possible point of departure for the selection** of simple models is presented. It is proposed to use the spread of the values, which is caused by the use of many processes that are recognised in practice, to indirectly obtain an uncertainty interval. This procedure will be briefly explained on the basis of the two examples shown in figure ii.

In the case of the Langeten and the Lonza, six independent points of departure were used, which all belong to the procedural group of „Regional application” (light-coloured columns). At the Langeten comparable estimate values for the highest discharge every 100 years are found. It is therefore easy to define the latter. At the same time, the comparison to estimated extreme high-waters (EHQ, dark-coloured columns) indicates the plausibility of the results. The extreme high-waters are determined on the basis of envelopes to the highest observed peak waters. At the Lonza, the value spread of the estimate is slightly larger; one estimated value for the HQ₁₀₀ even exceeds the EHQ. As a result, the target value cannot be defined a priori in the required manner. The wide spread of the results may be indicative of special circumstances in the natural environment, which is ignored by some models. In a second phase, the reasons for the „failure” of some models may be found, such as failure to meet the requirements for models or incomplete precipitation data. If this is not the case, further analyses are needed to achieve satisfactory results, for example, by means of short-term measurements or historical high-waters.

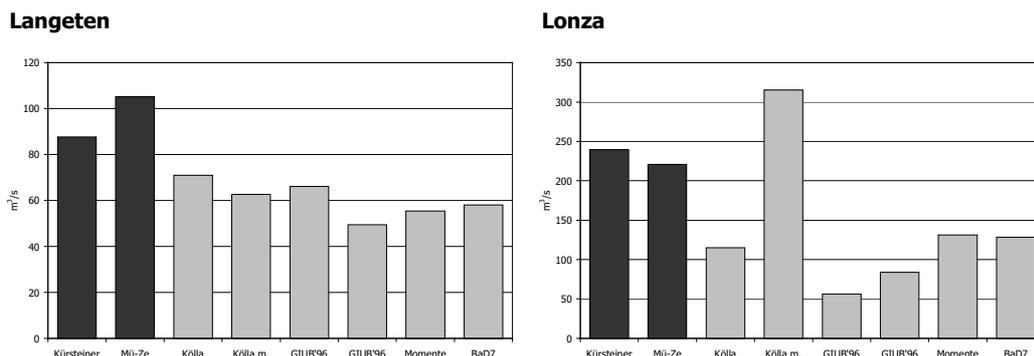


Fig. ii Spread of high-water estimates at the Langeten in Huttwil and the Lonza in Blatten.

Pfaundler (2001) has researched the Index Flood Method in an extensive analysis, and determined that the quality of the estimate may be improved if the Index Flood ($HQ_{2,33}$) can be estimated by means of **short-term measurements** (> 3 years!). This statement relating to short-term measurements clearly refers to the Index Flood Method that also takes account of regional data (Growth curve). For that matter, the statement emphasises once again the significance of such current measurements.

The same trend as that of the short-term measurements is indicated by the **inclusion of historical high-waters in the estimates**, that is of high-waters that have been found through measurements and that provide information about high-waters in the last approx. 200 years. This would generate useful data, which ought to be included in all procedures. On the other hand, it is necessary to verify carefully whether the historical details are representative and can be used for high-water estimates. The effort required to obtain this information ought not to be underestimated, however, in particular if historical high-waters are to be quantified.

With the working method described above – the use of recognised procedures insofar as possible – practice is given a proper foundation for defining dimensioning values. It should be added to this, however, that when the discharge dimension is determined – apart from the real high-water estimate – the research into potential damage and possible risks also plays an extremely important role.

Another important criterion for the selection of a model is – besides the availability of data and the time at one's disposal – the **extent of the basin**. This report clearly shows that the methods that are used in meso-scale basins cannot simply be transferred to very small basins (surface area < 10 km²). The formation and concentration of the discharge in basins of varying sizes are not dominated by the same processes. The variable circumstances in a certain area, typical of the discharge character of a small basin (in large basins they are either traced or weakened), can only be registered by mapping them out accurately. Contrary to collecting information in meso-scale basins, where the small-scale databases of the total area can be used (maps of soil condition, land use, etc.) and the parameters are partly generated automatically (as in the software programme HQx_meso_CH , Barben 2001), in very small basins fieldwork plays an important part. When analysing these basins, another problem is that only a very small number of areas have the disposal of reliable, extensive sets of measurements.

Precipitation Run-off Models

In certain, often **more complex questions** – in other words, when it is not sufficient to just estimate the peak high-waters – the precipitation run-off models are used. They are **very time-consuming** (from a few weeks to several months) and usually generate more accurate and often better results than the less complex models of the Regional Application (cf. fig. iii). The proof of the better quality of these points of departure, however, has not been furnished with this report.

The precipitation run-off models distinguish themselves from the physical processes in their assessment according to space and time and, especially, also in the degree of detail in their illustrations. Plate (1992) believes that all „hydraulic engineering“ models, hydraulic models designed for practical use, ought to be sufficiently accurate and at the same time as simple as possible. Moore et al. (1992) have pointed out that the generally prevailing view that the reliability and accuracy of a precipitation run-off model would correlate positively with its complexity is often incorrect.

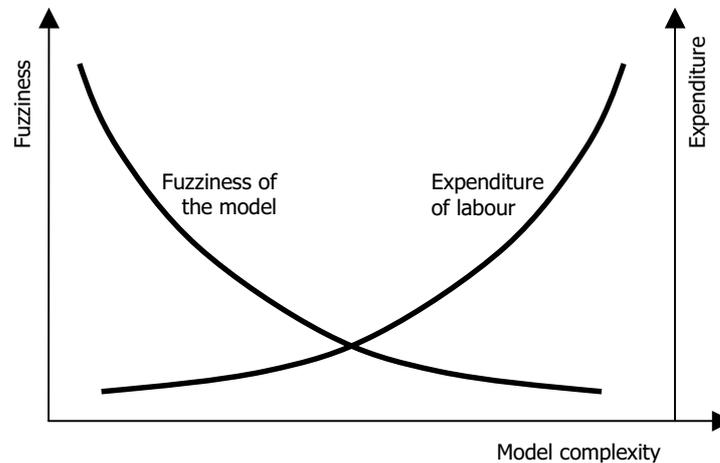


Fig. iii Sketch of the relationship between the model's complexity, modelling activities and low accuracy of the model (from Weingartner 1999).

At first sight, a precipitation run-off model seems best able to meet the requirement of obtaining a process-oriented estimate. However, its use is subject to certain limitations:

- The use of these models is impossible if **run-off data are lacking**, since the models **cannot be calibrated**. When shorter sets of measurements are available, it is important that these include extreme high-waters in order to obtain as practical a model as possible, which can also be used in extreme situations. Experience shows that models often give a good simulation of non-extreme high-waters and therefore operate satisfactorily in these cases, but that the same models may fail in the event of rare and extreme high-waters, because of their non-linear processes. This proposition obviously depends on the complexity of the models used (input parameter, submodels, physical distribution, etc.).
- Nowadays, a large number of precipitation run-off models are available, which may be extremely complex due to the virtually unlimited supply of computer capacity. However, the **required physical details** required for calibrating the parameters are often **lacking** (e.g. soil index numbers), making it necessary to use hypotheses and to apply simplifications, which may considerably reduce the reliability of the models. As a result of the often broad physical spread of the models (distributed models), the input parameters must be interpolated, although the necessary knowledge about physical variability is often lacking.

In order to estimate rare and extreme high-waters with precipitation run-off models, there are in principle two options. Experience shows that a model based on real events causes many problems. In this case, individual high-waters are calculated by means of precipitation measurements in a basin. However, the choice of preconditions (soil humidity, course of precipitation intensity) may decisively affect the results. That is why long-term simulations are preferred. In this case, extensive sets of model input parameters are used, whilst an uninterrupted, long-term series of run-off data is simulated, which subsequently can be analysed statistically on the basis of extreme values.

Other aspects

Most models of the three procedural groups described are oriented towards the peak waters of certain probabilities/annual rhythms. The precipitation run-off models only deal systematically with other parameters, which are also of vital importance when used in water management, such as rise duration, discharge volumes, or, more generally, the course of the discharge.

When selecting models for solving a certain defined problem, the most important elements are – as shown earlier – on the one hand, the available data and, on the other hand, the available knowledge of the relevant area.

If there are **sufficient details**, or in other words, if there are extensive, homogeneous sets of discharge measurements, the analyses of the extreme values are central. If there is **limited information**, or in other words, if there are shorter or incomplete discharge data, or there is none available at all, the two procedural groups named „Precipitation Run-off Model” and „Regional Application” are used.

However, the selection of a model ought not to depend merely on the information situation, but ought to be carried out roughly as follows:

1. Define the question
2. Select a model that is geared to the question
3. Collect the information required for the application of the model

The analyses and/or questionnaires on which the following country reports are based have shown clearly: **there is no perfect model**. When using models to determine high-water discharge levels, the users are forced to reach compromises. When selecting a model, they must continuously consider aspects such as available information, available time and purpose.

1 Übersicht

1.1 Geschichte der Hochwasserabschätzung

Der Anfang der Hochwasserabschätzung an Stellen ohne Direktmessungen liegt in einer Zeit, als noch kaum Abfluss- aber schon einige Niederschlagsdaten zur Verfügung standen. In der Periode von 1842 bis 1847 präsentierten irische Ingenieure um Thomas Mulvaney (1822-1892) erstmals eine Methode zur Abschätzung von Hochwasserspitzen (Dooge 1957, Biswas 1970). Die Methode gehört zum Typ **Rational Formula**, bei der die Niederschlagsintensität, welche von der Konzentrationszeit des Einzugsgebietes und der Wiederkehrperiode des zu bestimmenden Abflusses abhängt, mit dem Abflusskoeffizienten und der Einzugsgebietsfläche multipliziert wird.

Um 1850 wurden in Mitteleuropa verschiedene hydrometrische Dienste gegründet, zu deren Aufgabe der Aufbau von Netzen von Wasserstandsmessstellen gehörte. Bis die ersten Abflussmessungen für die Entwicklung von Formeln zur Schätzung von Hochwasserabflüssen verwendet werden konnten, vergingen jedoch einige Jahre. In der Schweiz dauerte es beispielsweise über zehn Jahre, bis Lauterburg 1876 eine Übersicht über die Abflüsse in der Schweiz veröffentlichte. Seine Abschätzformel war weltweit eine der ersten, die mit sogenannten **Hüllkurven** versuchte, einen Zusammenhang zwischen der Einzugsgebietsfläche und den maximalen Hochwasserspitzen herzustellen. Bei der Anwendung von Hüllkurven geht man davon aus, dass sich das Verhalten der gemessenen Einzugsgebiete einer Region (die für die Ableitung der Hüllkurven verwendet wurden) auf ungemessene übertragen lasse. Es gibt hier aber nicht nur die alten Formeln. In den letzten Jahren entstanden bedeutende Weiterentwicklungen, die auf dem Hüllkurvenansatz basieren.

Die Veröffentlichung erster Formeln für die Hochwasserabschätzung fällt mit einer sehr grossen Nachfrage nach Bemessungsgrössen zusammen. Dafür gab es zwei Ursachen: Einerseits wurden viele Flusskorrekturen in dieser Zeit projektiert und ausgeführt. Andererseits stand – als sich in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts die Elektrizität als neues Medium der Energieverteilung durchzusetzen begann – der Ausbau der Wasserkräfte unmittelbar bevor.

Als aus den hydrometrischen Messnetzen erste lange Messreihen für die Auswertung zur Verfügung standen, war die **Extremwertanalyse**, die sich mit kleinen Eintretenswahrscheinlichkeiten beschäftigt, bereits relativ weit entwickelt. Die Auswertung von Messreihen war jedoch eine aufwändige Angelegenheit. Heute ist die Anpassung von theoretischen Verteilungsfunktionen an empirische Verteilungen dank leistungsfähiger Standardsoftware mit nur geringem Aufwand verbunden. Da aber die objektiven Kriterien für die Auswahl der *besten Verteilungsfunktion* nach wie vor fehlen, ist die Extremwertanalyse immer noch komplex und erfordert statistisch und hydrologisch geschultes Fachpersonal.

Mit der Entwicklung der EDV-Systeme fallen nicht nur Analysen mit der Extremwertstatistik leichter. Dank der raschen Verfügbarkeit von hydrologisch relevanten, flächendeckenden Datensätzen gab es in den letzten Jahren und Jahrzehnten an allen Fronten der Hochwasserabschätzung enorme Fortschritte zu verzeichnen. Es wurden einerseits bestehende Ansätze mit neu verfügbaren Daten überarbeitet und teilweise erweitert, andererseits sind neue Methoden entstanden, die ohne den Einsatz von Computern schlicht nicht denkbar waren. Zu dieser zweiten Gruppe gehören insbesondere regressionsanalytische Verfahren und allgemein Übertragungsfunktionen, die von einer grossen Zahl von Prädiktoren ausgehen. Die EDV-Möglichkeiten erleichterten grundsätzlich auch den Einsatz deterministischer Modelle zur Hochwasserabschätzung. Deren Einsatz in Einzugsgebieten, welche über keine Abflussmessungen verfügen, ist aber nach wie vor sehr eingeschränkt.

Die verschiedenen Anwender von Hochwasserabschätzmodellen stellen immer höhere Ansprüche an die ihnen zur Verfügung stehenden Berechnungswerkzeuge. Die einen möchten nicht nur die Hochwasserspitze, sondern die ganze Ganglinie oder die Fracht eines extremen Ereignisses kennen, die andern interessieren sich für die grössten Abflussereignisse, die überhaupt auftreten können (PMF). Mit **Niederschlag-Abfluss-Modellen** können viele dieser Fragen angegangen werden, eini-

ge bleiben aber immer noch offen. So ist beispielsweise – im Gegensatz zur Extremwertanalyse – der Umgang mit Wiederkehrperioden und Konfidenzintervallen noch nicht geklärt.

1.2 Generelle Methodenübersicht

Die Gliederung der hier vorgestellten Methoden orientiert sich an der Verfügbarkeit der vorhandenen Abflussdaten in einem Einzugsgebiet (vgl. Abb. 1.1). Gliederungen nach anderen Kriterien sind durchaus vorstellbar und werden auch vorgenommen (vgl. z.B. Länderbericht Deutschland).

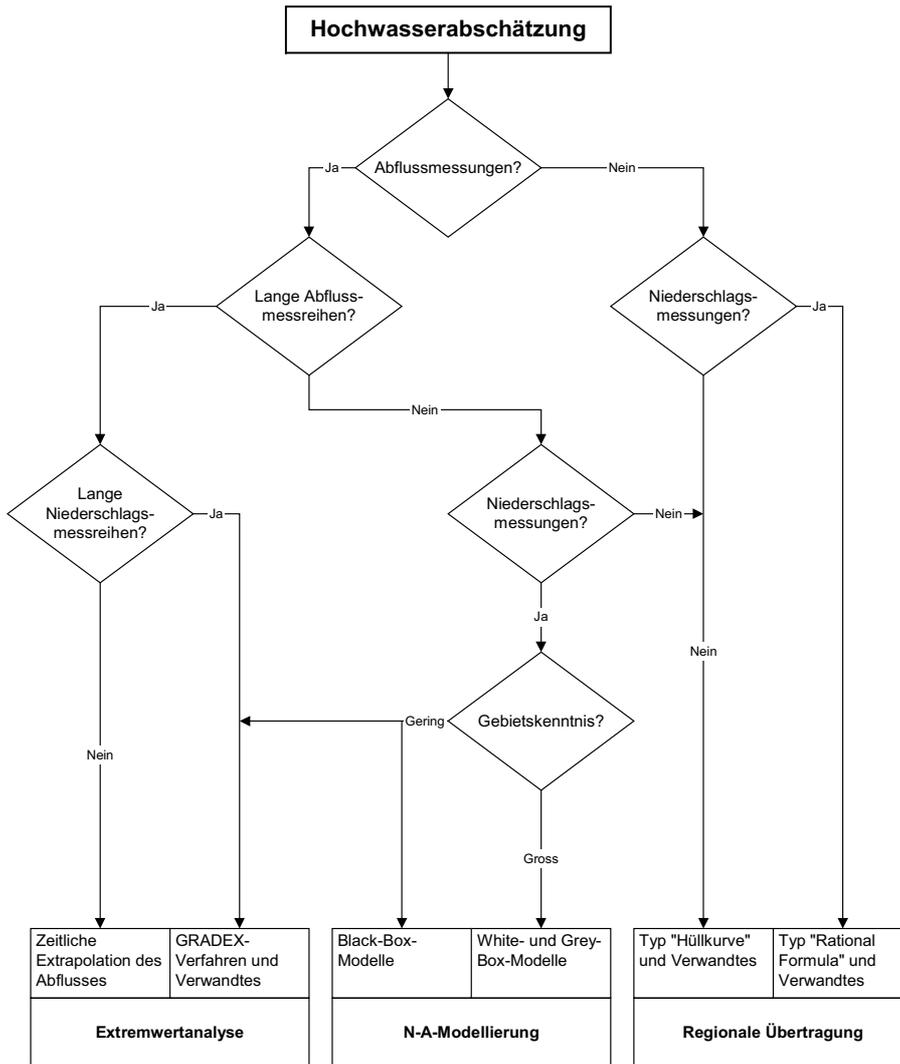


Abb. 1.1 Einordnung der Hochwasser-Abschätzverfahren.

Kapitel 1.2.1 widmet sich den Methoden zur Abschätzung von Hochwasserspitzen beliebiger Wiederkehrperioden, die in Einzugsgebieten eingesetzt werden, die über keine Abflussmessungen verfügen. In Kapitel 1.2.2 geht es um die Bestimmung von Bemessungsabflüssen aus langen Zeitreihen von Jahreshöchstwerten mit den Mitteln der Extremwertstatistik. Sind die verfügbaren Abflussmessreihen eher kurz, können als Alternative oder Ergänzung zu den in Kapitel 1.2.2 besprochenen Ansätzen Niederschlag-Abfluss-Modelle eingesetzt werden. Auf diese Art der Abschätzung wird in Kapitel 1.2.3 eingegangen. Die in den Länderberichten dargestellten Methoden und Verfahren sind am Schluss jedes Kapitels in einer Tabelle aufgelistet.

1.2.1 Methoden für die Anwendung in ungemessenen Einzugsgebieten

Zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen in ungemessenen Einzugsgebieten werden meist Verfahren der Regionalisierung eingesetzt. In der Literatur wird anstelle von „Regionalisierung“ manchmal auch von „regionalhydrologischen Analysen“ gesprochen (Weingartner 1999). „Regionalisation, in its traditional useage, may be defined as the interpolation of location-specific data across a spatially continuous area. Use of the technique is widespread in the geographical sciences whenever the need arises to transfer information from points where it is available to points where it is absent or in some way deficient. The most widely used product of regionalisation is the isoline map” (Acreman und Wiltshire 1989). Gemäss dieser Definition bildet die Lage im Raum einen entscheidenden Faktor für die Ausprägung eines Geoelements, im vorliegenden Fall des Hochwasserabflusses. Wie die beiden Autoren aber an anderer Stelle richtig bemerken, trifft die Voraussetzung des räumlichen Kontinuums – das Phänomen, dass sich Geoelemente über den Raum hinweg stetig ändern – nur für bestimmte hydrologische Grössen und für bestimmte Raum- und Zeitskalen zu. Der Hochwasserabfluss beispielsweise, der von einer Reihe varianter und invarianter Faktoren gesteuert wird, zeigt in der Regel ein räumlich diskontinuierliches Verhalten: Benachbarte Einzugsgebiete weisen oft ein unterschiedliches Abflussverhalten auf. Isolinienkarten, wie sie von Acreman und Wiltshire erwähnt werden, sind aus diesem Grund als Darstellungsform nicht immer geeignet.

Regionale Übertragungsfunktionen

Die Analyse, Simulation sowie die Inter- und Extrapolation raumvarianter Strukturen sind Schwerpunkte regionalhydrologischer Analysen (Weingartner 1999). Dabei spielen die sogenannten regionalen Übertragungsfunktionen (Schwentker und Streit 1983) eine wichtige Rolle. Das grundlegende Prinzip bei den regionalen Übertragungsfunktionen besteht darin, hydrologische Grössen oder die Parameter eines hydrologischen Modells in Funktion varianter und invarianter Gebietskenngrössen zu setzen. Prozesse, die im Einzugsgebiet ablaufen, werden dabei nicht im kausalanalytischen Sinn betrachtet. Zur Herleitung dieser Funktionen geht man von gemessenen Einzugsgebieten aus, in denen sowohl Hochwasserkennwerte wie Gebietskenngrössen zur Verfügung stehen. Die unabhängigen Gebietskenngrössen charakterisieren

- das Einzugsgebiet als Ganzes (z.B. geographische Lage, Fläche, Höhen- und Neigungsverhältnisse, Expositionen, Form),
- die Gerinne (z.B. Länge, Gefälle),
- die Verhältnisse im Untergrund (z.B. Durchlässigkeit, Speicherkapazität),
- die Vegetations- und Landnutzungverhältnisse (z.B. Anteil bewaldeter Flächen),
- die klimatologischen Bedingungen (z.B. Strahlung, Temperatur, Niederschlag) sowie
- die anthropogenen Beeinflussungen (z.B. Versiegelungsgrad).

Die sogenannten empirischen Verfahren bilden eine wichtige Gruppe innerhalb der regionalen Übertragungsfunktionen. Sie haben ihre Wurzeln oftmals im ausgehenden 19. Jahrhundert und sind in der Praxis weit verbreitet. Dabei ist der Funktionstyp a priori vorgegeben (z.B. $Q_{\max} = a \cdot F_n^b$) und es geht darum, die Koeffizienten mit Hilfe der gemessenen Einzugsgebiete zu eichen.

Mit den regionalen Übertragungsfunktionen wird also die räumliche Variabilität hydrologischer Grössen mathematisch formuliert, so dass eine Abschätzung von Hochwasserkennwerten in Einzugsgebieten ohne Direktmessungen möglich ist.

Regional-taxonomische Verfahren

Als zweite wichtige Verfahrensgruppe sind die regional-taxonomischen Verfahren zu nennen, welche vom klassischen Verständnis der Regionalisierung im Sinne einer „Unterteilung der Landoberfläche in Regionen mit ähnlichem oder einheitlichem hydrologischen Regime“ (Becker 1992) ausgeht. Hydrologische Prozesse sind allgemein sehr variabel in Raum und Zeit. Das Bestreben hydrologischer Analysen ist es, das Mass an Determiniertheit und Regelmässigkeit in den hydrologischen Prozessen herauszuarbeiten (Gutknecht 1993). Schwentker und Streit (1983) fassen diese klassische, strukturierende Vorgehensweise bei regionalhydrologischen Analysen unter dem Begriff

„regional-taxonomisch begründete Verfahren“ zusammen: „Zielsetzung der regionalen Taxonomie ist die Typisierung von Raumeinheiten. Durch die Typisierung werden in der Regel Raumeinheiten zu Gruppen nach Massgabe einer Ähnlichkeitsdefinition zusammengefasst.“ Sind die gefundenen Raumeinheiten zudem räumlich zusammenhängend, so kann – im Gegensatz zu den räumlich nicht zusammenhängenden Raumtypen – von Regionen gesprochen werden. Mit den regional-taxonomischen Verfahren sollen also hydrologisch relevante Raumstrukturen erkannt und dadurch die räumliche Variabilität hydrologischer Grössen erklärt bzw. modelliert werden; sie erlauben es, die Komplexität der realen Welt zu reduzieren. Taxonomische Verfahren basieren auf Gebietskenngrössen und/oder auf hydrologischen Grössen.

Die Ausweisung hydrologisch ähnlich reagierender Gebiete stellt gerade im Hochwasserbereich eine sehr grosse Herausforderung dar und gelingt oftmals nicht. Einzugsgebiete, Regionen oder Raumtypen mit gleichen oder sehr ähnlichen hydrologischen Eigenschaften im umfassenden Sinn gibt es nicht. Ähnlichkeiten lassen sich – wenn überhaupt – nur problembezogen, also bezüglich einer bestimmten hydrologischen Grösse bestimmen.

Bei der Abschätzung hydrologischer Grössen in ungemessenen Einzugsgebieten ist folgendes Vorgehen denkbar:

1. Bildung von Raumtypen oder Regionen nach einem geeigneten, zielgrössenorientierten Typisierungsansatz;
2. Zuordnung des Gebietes ohne Messdaten zu einem Raumtyp bzw. zu einer Region;
3. Übernahme der typspezifischen hydrologischen Kennwerte oder Modellparameter.

Die beiden Ansätze „regional-taxonomische Verfahren“ und „regionale Übertragungsfunktionen“ lassen sich unter dem Oberbegriff „regionale Übertragung“ zusammenfassen (Schwentker und Streit 1983). Je nach Fragestellung kann es sinnvoll sein, die beiden Verfahrensgruppen zu kombinieren: Mit einer vorgeschalteten problembezogenen taxonomischen Untersuchung lassen sich hydrologisch ähnlich reagierende Einzugsgebiete oder Regionen identifizieren, die als Basis für die Entwicklung regionaler Übertragungsfunktionen dienen können. Die Erfahrung zeigt, dass sich bei regional differenzierten Modellen – im Vergleich mit den sogenannten Globalmodellen – die Wertintervalle der Modellparameter verkleinern und damit die Aussagekraft und Güte der regionalhydrologischen Modelle verbessern lassen (Weingartner 1999).

Tab. 1.1 In den Länderberichten dargestellte Methoden und Verfahren; für die Anwendung in Einzugsgebieten ohne Direktmessungen des Abflusses.

Methoden für die Anwendung in Einzugsgebieten ohne Direktmessungen des Abflusses			
Verfahren	Anwendungsbereich		Seite im Bericht
	T [a]	EZG-Fläche [km²]	
BaD7	1 - HQ _{max}	10 - 200	44
Clark	1 - HQ _{max}	< 5	65
GIUB'96	HQ ₁₀₀	1 - 500	37
Hofbauer	HQ _{max}	10 - 20'000	23
HQ-Längsschnitt	1 - 100	1 - 10'000	76; 114
HQ-REGIO	1 - 100	10 - 5'000	117
IfK (ETHZ)	1 - HQ _{max}	0.5 - 150	54
IsHoT+W	1 - 200	10 - 100'000	127
Kölla	20, 100	0.5 - 100	59
Kölla meso	20, 100	10 - 200	32
Kölla mod.	20, 100	10 - 200	35
Kürsteiner	HQ _{max}	10 - 20'000	26
LfU Baden-Württemberg	1 - 100	10 - 13'000	121
Melli	HQ _{max}	0.3 - 10'000	20

Mod. Fließzeitverfahren	1 - HQ _{max}	< 5	62
Momente	1 - HQ _{max}	10 - 200	41
Müller-Zeller	HQ _{max}	2 - 100	29
Rationale Methode	10 - 100	1 - 10	100
Reg-Ex	100	--	124
Taubmann/Thiess/Chow	5, 10, 25, 50, 100	1 - 30	56
VUT-FLOOD	1 - HQ _{max}	1 - 1'000	79
Wundt	100	keine Einschränkung	76; 98

1.2.2 Methoden für die Anwendung in gemessenen Einzugsgebieten

Liegen für einen Gewässerquerschnitt genügend lange Messreihen vor, können die Hochwasserabflüsse mit einer Extremwertanalyse abgeschätzt werden. Dabei wird versucht, eine theoretische Verteilungsfunktion an die empirische Verteilung der Messwerte anzupassen. Die Messwerte sind meist Jahreshöchstwerte oder alle Werte über einer bestimmten Schwelle (partielle Serie).

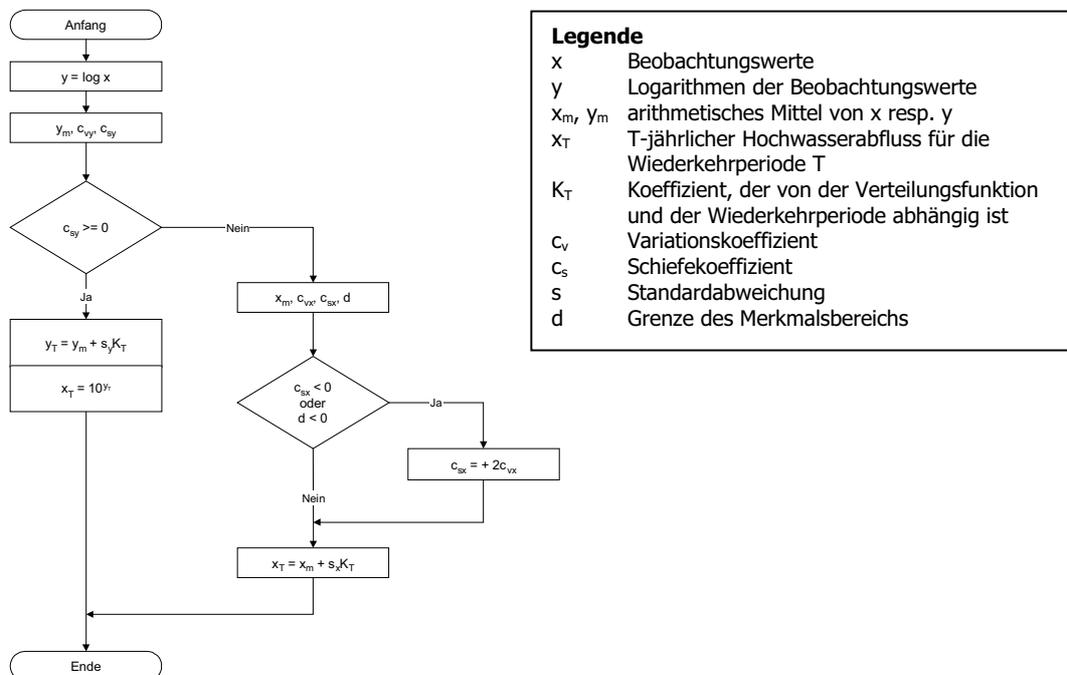


Abb. 1.2 Empfehlungen zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit. DVWK (1979).

Für die Bestimmung von Hochwasserabflüssen aus langen Messreihen mit den Mitteln der Extremwertstatistik bestehen viele Ansätze, denen unterschiedliche Verteilungsfunktionen und Parameterschätzverfahren zugrunde liegen. Damit stellt sich in der Anwendung die Frage, welche Verteilungsfunktion verwendet werden soll. Bei den „alten“ DVWK-Empfehlungen des Jahres 1979 ist klar ersichtlich, welche Verteilungsfunktion (VF) zu wählen ist, um eine T-jährliche Hochwasserspitze aus einer langen Messreihe zu extrapolieren (vgl. Abb. 1.2). Je nach Schiefe und Lage des Fusspunktes der empirischen Verteilung kommen die *Pearson III*-, die *log-Pearson III*- oder die *Gamma-Verteilung* in Frage. Die Vorteile dieses Vorgehens liegen bei den objektiven Kriterien, welche zur Wahl der VF führen, und bei der Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Der Nachteil besteht darin, dass es möglicherweise eine bessere Anpassung an die Daten gibt und man damit eine bessere Abschätzung für die gesuchte Größe erhalten könnte.

Bei den neuen Empfehlungen des DVWK (1999a) und einer darauf basierenden Hochwasserabschätz-Software hat man den Weg über die Präsentation von mehreren möglichen VF gewählt. Weil heute die Anpassung einer theoretischen VF an eine Messreihe dank leistungsfähiger Software nur einen kleinen Berechnungsaufwand bedeutet, wird eine ganze Palette von VF vorgeschlagen (vgl. Abb. 1.3). Die Anwenderin und der Anwender müssen u.a. anhand von Anpassungsmassen selber entscheiden, welche VF sie auswählen.

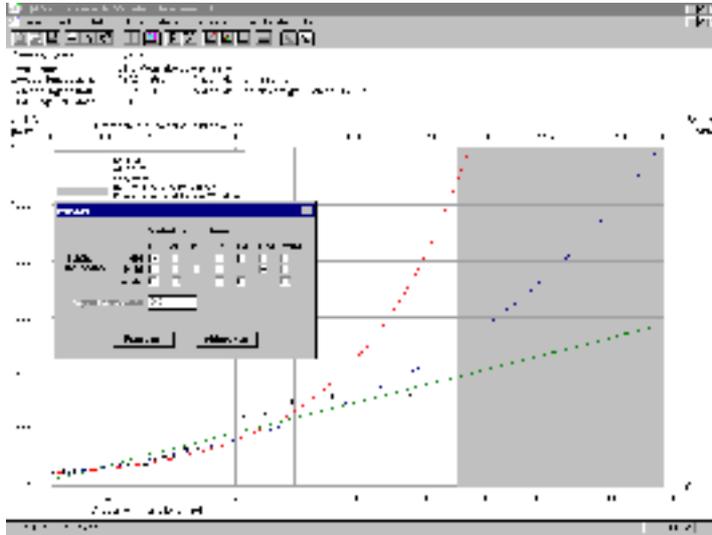


Abb. 1.3 Beispiel für die Auswahl der Verteilungsfunktionen (nach HQ-EX).

Die beiden DVWK-Empfehlungen zeigen deutlich, in welchem Spannungsfeld sich die Hochwasserabschätzung in der Praxis befindet. Musste man sich früher vor allem auch aus Gründen des Berechnungsaufwandes auf wenige VF beschränken, bestehen heute dank der EDV viele Auswahlmöglichkeiten, welche der Vorgehensweise allerdings eine subjektive Komponente vermittelt. Die Gütebeurteilung über statistische Kriterien ist oftmals problematisch. Ein wesentlicher Vorteil moderner Verfahren besteht darin, dass sich die Anpassungen rasch visuell überprüfen lassen.

Tab. 1.2 In den Länderberichten dargestellte Methoden und Verfahren; für die Anwendung in Einzugsgebieten mit Direktmessungen des Abflusses.

Methoden für die Anwendung in Einzugsgebieten mit Direktmessungen des Abflusses			
Verfahren	Anwendungsbereich		Seite im Bericht
	T [a]	EZG-Fläche [km ²]	
EXTREM	1 - 1'000, selten PMF	keine Beschränkung	108
HQ-EX	1 - 1'000, selten bis 10'000	10 - 100'000	104
HQ _{1'250}	1'250	Rhein Lobith	180
HQ _{10'000}	10'000	1 - 500	112
HVERT	1 - 100	1 - 100'000	111
IsHoT+W	1 - 200	1 - 100'000	111
KLUDON	1 - 100	1 - 10'000	111
UNISTAT	1 - 1'000	keine Beschränkung	75
VUT-FLOOD	1 - HQ _{max}	1 - 1'000	79

1.2.3 Niederschlag-Abfluss-Modellierung

Unter N-A-Modellierung können alle Ansätze zusammengefasst werden, die einen Niederschlag rechnerisch in einen Abfluss transformieren. „Hydrologische Niederschlag-Abfluss-Modelle beschreiben die kausalen Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Abfluss mathematisch und dienen zur Ermittlung der Abflüsse aus einem Einzugsgebiet. Das Ziel der Modellanwendung ist vor allem, aus vorgegebenen Niederschlagsereignissen die resultierenden Hochwasserganglinien zu berechnen“ DVWK (1999b). Übersichten und Klassifizierungen von N-A-Modellen findet man beispielsweise bei Nemeč (1993) oder Maniak (1999).

In ungemessenen Einzugsgebieten stellt die modellmässige Beschreibung des kausalen Zusammenhangs zwischen Niederschlag und Abfluss eine noch nahezu unüberwindbare Hürde dar. N-A-Modelle benötigen für die Eichung stets zeitlich hochaufgelöste Messwerte der Input- und Output-Parameter. Da solche oftmals fehlen, sind sie in den meisten Fällen keine Alternative zu den regionalhydrologischen Ansätzen. Gelingt es allerdings, ein N-A-Modell einzusetzen, bieten sich für die Hochwasserabschätzung interessante Möglichkeiten.

Die N-A-Modellierung zur Bestimmung von Bemessungsgrössen kennt zwei ganz unterschiedliche Vorgehensweisen.

- Bei der **ereignisbezogenen Modellierung** berechnet man einzelne Hochwasserereignisse, indem ein Bemessungsniederschlag auf ein Einzugsgebiet appliziert wird. Die Wahl der Randbedingungen (Bodenfeuchte, Niederschlags-Intensitätsverlauf) kann die Ergebnisse entscheidend beeinflussen.
- Die **Langzeitsimulation** verwendet lange Reihen der Modellinputparameter (Niederschlag, Temperatur, Strahlung etc., je nach Komplexität des verwendeten Modells) und simuliert eine durchgehende, lange Abflussreihe, die anschliessend extremwertstatistisch ausgewertet wird.

Für die Bemessungspraxis ist die Langzeitsimulation sinnvoller, denn bei der ereignisbezogenen Modellierung ist es wegen der grossen Unsicherheiten bei der Festlegung der Randbedingungen unmöglich, mit der Wiederkehrperiode umzugehen, die beim Hochwasserschutz gerade bei der Differenzierung der Schutzziele eine zentrale Rolle spielt (BWW 1995, DVWK 1989). Die Langzeitsimulation bringt jedoch bei der praktischen Durchführung nicht zu vernachlässigende Schwierigkeiten mit sich. So ist es heute noch mit sehr grossem Aufwand verbunden, für ein beliebiges Einzugsgebiet lange, für das Gebiet repräsentative Reihen der Modellinputparameter zu erstellen (räumliche Interpolation aus benachbarten Meteo-Stationen oder Verwendung von Wettergeneratoren).

Tab. 1.3 In den Länderberichten dargestellte Methoden und Verfahren; Niederschlag-Abfluss-Modelle.

Niederschlag-Abfluss-Modelle			
Verfahren	Anwendungsbereich		Seite im Bericht
	T [a]	EZG-Fläche [km ²]	
ARC/EGMO	1 - 100	< 5'000	151
ASGi	1 - 100	< 10'000	155
EGLSYN	1 - 1'000	0.1 - 150	132
FGM	1 - HQ _{max}	1 - 4'000	137
HYBNAT	1 - HQ _{max}	< 10'000	149
LARSIM / FGMOD	1 - 1'000, selten auch HQ _{max}	10 - 100'000	145
NASIM	1 - HQ _{max}	< 5'000	142

Literatur

- Acreman, M.C., Wiltshire, S. (1989):** The Regions are Dead; Long Live the Regions. Methods of Identifying and Dispensing with Regions for Flood Frequency Analysis. In: IAHS-Publication No. 187:175-188, Wallingford.
- Barben, M. (2001):** Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in mesoskaligen Einzugsgebieten. Dissertation am Geographischen Institut der Universität Bern, Bern.
- Becker, A (1992):** Methodische Aspekte der Regionalisierung. In: Mitteilung der Senatskommission für Wasserforschung der DFG Nr. 11:16-32, Weinheim.
- Biswas, A. (1970):** History of Hydrology. North Holland Publishing Company, Amsterdam.
- BWW (Bundesamt für Wasserwirtschaft) (1995):** Anforderungen an den Hochwasserschutz '95. Bern.
- Dooge, J. (1957):** The rational method for estimating flood peaks. Irish contribution to the technique. Engineering 184, 311-313.
- DVWK (1979):** Empfehlungen zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit. DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, Nr. 101, Hamburg.
- DVWK (1989):** Wahl des Bemessungshochwassers. Entscheidungswege zur Festlegung des Schutz- und Sicherheitsgrades. DVWK-Merkblatt, Nr. 209, Hamburg.
- DVWK (1999a):** Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. DVWK-Merkblatt, Nr. 251, Bonn.
- DVWK (1999b):** Hochwasserabflüsse. DVWK-Schriften, Nr. 124, Bonn.
- Gutknecht, D. (1993):** Grundphänomene hydrologischer Prozesse. In: Zürcher Geographische Schriften, Heft 53:25-38, Zürich.
- Lauterburg, R. (1876):** Versuch zur Aufstellung einer allgemeinen Übersicht der aus Grösse und Beschaffenheit der Flussgebiete abgeleiteten Schweizerischen Stromabflussmengen, gestützt auf die meteorologischen Beobachtungen der Schweiz, nebst Anleitung zur Behandlung dieser Aufgabe im Allgemeinen. Commissions Verlag Huber, Bern.
- Maniak, U. (1999):** Flussgebietsmodelle. In: Mathematische Modelle in der Gewässerkunde. Stand und Perspektiven. BfG-Mitteilungen Nr. 19, Koblenz.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., McMahon, T. (1992):** Physically Based Hydrologic Modeling – Is the Concept Realistic? In: Water Resources Research Vol. 26, No. 10:2659-2666, Washington D.C.
- Mulvaney, T. (1850-1851):** On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rainfall and flood discharges in a given catchment. Proceedings of the Institution of Civil Engineers of Ireland.
- Nemec, J. (1993):** Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation of the dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales. KHR-Bericht II-7, Lelystad.
- Pfaundler, M. (2001):** Adapting, analysing and evaluating a flexible Index Flood regionalisation approach for Switzerland. Dissertation an der Eidg. Technischen Hochschule Zürich, Zürich.

Plate, E. (1992): Skalen in der Hydrologie: Zur Definition von Begriffen. In: Mitteilung der Senatskommission für Wasserforschung der DFG Nr. 11:33-45, Weinheim.

Schwentker, F., Streit, U. (1983): Regionale Übertragung hydrologischer Parameter – ein Überblick. Manuskript zum Vortrag anlässlich der Jahresversammlung des Arbeitskreises Hydrologie in Göttingen, Göttingen.

Weingartner, R. (1999): Regionalhydrologische Analysen – Grundlagen und Anwendungen. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 37, Bern.

2 Länderbericht Schweiz

M. Barben, F. Forster, C. Hegg, R. Weingartner

2.1 Einleitung

2.1.1 Problemstellung

In den letzten Jahren sind die Anforderungen an die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Abschätzungen von Hochwasserabflüssen ständig gestiegen. Das hat zwei wichtige Ursachen:

1. Mit dem Bevölkerungswachstum und der damit verbundenen Zunahme der besiedelten Flächen wurden und werden zunehmend Räume genutzt, die bezüglich Hochwassergefahr sehr ungünstig liegen. Die Einwohnerzahl der Schweiz hat sich von 3.3 Millionen im Jahr 1900 auf 6.9 Millionen im Jahr 1990 mehr als verdoppelt (BFS 1996). Und in Zukunft lassen die wachsende Wohnbevölkerung, mehr Arbeitskräfte, kleinere Haushalte und grösser werdende Ansprüche den Bedarf an Arbeits-, Wohn- und Verkehrsflächen ansteigen. Damit einher geht ein stetiger Anstieg des Schadenpotentials. Niggli (1999) nennt für den Bereich der Messstation der Gürbe in Belp im Zeitraum 1900 bis 1990 eine Erhöhung des Schadenpotentials um 600 Prozent. Es ist klar, dass bei einer erhöhten Konzentration der Sachwerte auch der Wunsch nach einem zuverlässigen Hochwasserschutz auftaucht und immer genauere Methoden für die Abschätzung von seltenen Hochwassern verlangt werden.
2. Im Anschluss an die Hochwasserereignisse des Jahres 1987 hat ein Umdenken im Hochwasserschutz eingesetzt. Galt früher ein genereller Ausbau für hundertjährige Hochwasser, spricht man heute gerne von der Differenzierung der Schutzziele (BWW 1995). Das heisst, dass nicht alles und jedes gegen das berühmte und vielzitierte hundertjährige Hochwasser (HQ_{100}) geschützt werden soll, sondern dass man sich nach den zu schützenden Werten richtet. Geschlossene Siedlungen werden vor einem HQ_{100} geschützt, während bei landwirtschaftlich genutzten Flächen alle 5 bis 20 Jahre Überschwemmungen akzeptiert werden. Es müssen also Abschätzmethode angewandt werden, die nicht nur ein HQ_{100} liefern, sondern die auch mit anderen Jährlichkeiten umgehen können. Es wird nun von der Bemessungspraxis viel mehr Flexibilität verlangt.

Am Anfang jeder Hochwasserschutzmassnahme und vieler ökologischer Fragestellungen steht die hydrologische Beurteilung des Fliessgewässers. Und genau hier macht sich eine grosse Verunsicherung breit. So gibt es zwar für die Anwendung in der Praxis eine sehr grosse Anzahl von Modellen, im konkreten Fall ist es aber oftmals nicht klar, welches Modell sich am besten eignet und mit welchen Fehlern bei der Abschätzung zu rechnen ist.

Der einfachste Fall – aber selbst der ist nicht unumstritten – ist derjenige, bei dem in einem Einzugsgebiet aus einer langen Messreihe mit Extremwertstatistik ein Bemessungshochwasser einer beliebigen Wiederkehrperiode bestimmt werden kann. Hier reden wir aber von jenen Fällen, in denen es überhaupt keine oder nur sehr kurze Abflussmessungen gibt. In dieser Situation schwört jedes Ingenieurbüro und jede Behörde, welche sich mit Hochwasserschutz beschäftigt, auf seine (eigenen) Modelle oder Faustformeln. Es ist deshalb nahezu unmöglich, Resultate zu vergleichen.

Diese problematische Ausgangslage wird durch einen grossen Kosten- und damit Zeitdruck verschärft. Unbegreiflicherweise stehen für hydrologische Abklärungen nur wenig Mittel zur Verfügung. Umfragen bei Ingenieurbüros haben gezeigt, dass für eine Hochwasserabschätzung ein bis maximal zwei Tage zur Verfügung stehen. Wenn für die Anwendung eines deterministischen Modells noch Grundlagendaten (Flugbilder, Boden- und Landkarten, etc.) beschafft und interpretiert werden müssen, sieht man bald, dass die Zeit für eine Feldbegehung (die bei kleinen Einzugsgebieten unerlässlich ist) und für die eigentliche Berechnung der Bemessungsgrössen zu knapp ist.

Unter diesem Druck wird oft zu einfachen Methoden gegriffen, die rasch zu Ergebnissen führen, aber von denen insbesondere unerfahrene Anwender nicht wissen, wie zuverlässig sie sind. Es bleibt dann das ungute Gefühl, die Hochwasserspitze stark unter- oder stark überschätzt zu haben. Eine Unterschätzung ist gefährlich für Menschen und Sachwerte, eine Überschätzung dagegen führt zu einer unnötigen Verschleuderung von Ressourcen.

Im Rahmen dieses Länderberichts werden die in der Praxis häufig angewandten Modelle kurz vorgestellt; es werden aber auch Modellvergleiche vorgenommen, die mithelfen sollen, die Verunsicherung bei der Hochwasserabschätzung zu verkleinern. Es hat sich gezeigt, dass es sinnvoll ist, die Methoden nach der Grösse der Einzugsgebiete zu gliedern, da in unterschiedlich grossen Einzugsgebieten die Abflussbildung und die Abflusskonzentration nicht von den gleichen Prozessen dominiert werden und sich die Erhebung der Modellparameter stark unterscheiden kann. So werden zehn Methoden für mesoskalige (10 bis 200 km², Kapitel 2.2) und fünf Methoden für kleine Einzugsgebiete (< 5 km², Kapitel 2.3) besprochen. Die Grundlagen für die mesoskaligen Einzugsgebiete wurden am Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB), jene für die kleinen Einzugsgebiete an der Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft in Birmensdorf (WSL) erarbeitet.

2.1.2 Vorgehen

Sollen verschiedene Hochwasserabschätzverfahren (Modelle) beurteilt und miteinander verglichen werden, braucht es ein Referenzsystem, mit dem die Güte der Abschätzungen gemessen werden kann. Dieses Referenzsystem besteht aus Einzugsgebieten, die über lange Abflussmessreihen verfügen, welche es erlauben, mit der Extremwertstatistik Referenzwerte (z.B. HQ₁₀₀) abzuleiten. In den folgenden Abschnitten soll dargestellt werden,

- a) nach welchen Kriterien die Einzugsgebiete zur Beurteilung der Hochwasserabschätzmodelle ausgewählt,
- b) wie die Referenzwerte (HQ₁₀₀) dieser Gebiete ermittelt,
- c) auf Grund welcher Überlegungen die Modelle ausgewählt und
- d) wie die Modelle schliesslich beurteilt wurden.

a) Auswahl der Einzugsgebiete mit langen Messreihen

Nicht jede Abflussmessreihe eignet sich für die Ableitung von Referenzwerten im Hinblick auf Hochwasseranalysen. Unter *Referenzwert* wird hier eine Hochwasserspitze [m³/s] verstanden, die man aus einer langen Abflussmessreihe mit den Mitteln der Extremwertstatistik berechnet. Wenn nichts anderes vermerkt ist, hat der Referenzwert eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren.

Eine Station, die über ein stabiles Gerinne verfügt, bei der Eichmessungen im Hochwasserbereich gemacht werden konnten, deren Gewässer kaum anthropogen beeinflusst ist und bei der schon sehr lange gemessen wird, wäre die ideale Referenzstation für Hochwasseruntersuchungen. Man kann nicht sagen, diese ideale Referenzstation gebe es in der Schweiz nicht. Aber wenn nur ideale Stationen für die Analysen verwendet würden, könnte man wegen einer zu kleinen Stichprobe überhaupt keine Aussagen bezüglich Güte und Gültigkeit machen. Es ist nötig, Kompromisse einzugehen. Spreafico und Stadler (1986 und 1988) und Spreafico und Aschwanden (1991) haben in insgesamt vier Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie (LHG) Resultate aus umfangreichen Untersuchungen zu Messreihen des Bundes, der Kantone und von Hochschulen publiziert. Die Messreihen wurden auf Homogenität hin untersucht und die Messstelle bezüglich Gerinnestabilität beurteilt, so dass man zu den Punkten *stabiles Gerinne* und *Beeinflussungsgrad* gute Vorstellungen hat. Die grössten Kompromisse ergeben sich bei der Länge der Messreihe und den Eichmessungen bei Hochwasser. Damit ist gemeint, dass Referenzwerte aus Messreihen gewonnen werden, die zwar homogen sind und von Stationen mit stabilem Gerinnebett stammen, in vielen Fällen aber nur über Eichmessungen bei Mittelwasser verfügen und kürzer sind, als man sich das für die Abschätzung eines HQ₁₀₀ wünschen würde.

Mesoskalige Einzugsgebiete

Die hier getroffene Auswahl der Referenzgebiete lehnt sich sehr stark an Düster (1994) an, der sich am Geographischen Institut der Universität Bern intensiv mit Hochwassermodellierung beschäftigte und die Untersuchungen an 88 schweizerischen Einzugsgebieten durchgeführt hat. Seine Messreihen wurden bis 1996 aktualisiert und mit Daten von Einzugsgebieten mit einer Fläche zwischen 200 und 500 km² ergänzt. Tabelle 2.1 zeigt die Verteilung der Flächen und in Abbildung 2.1 ist die Lage der Referenzgebiete dargestellt.

Tab. 2.1 Einzugsgebietsfläche der mesoskaligen Testgebiete.

Flächen-Bereich Fn [km ²]	Anzahl EG	stat. Masszahlen	
10 < Fn ≤ 20	16	Mittel	86.2 km²
20 < Fn ≤ 50	28	Minimum	9.9 km ²
50 < Fn ≤ 100	26	Maximum	478.5 km ²
100 < Fn ≤ 150	13		
150 < Fn ≤ 200	4		
200 < Fn ≤ 500	8		

Die Verteilung der Einzugsgebiete im Raum lässt erahnen, welche Probleme beim Vergleich der Resultate auftreten können. Beim ersten Blick auf die Karte glaubt man, eine recht gleichmässige Verteilung der Gebiete zu erkennen. Doch bei genauerer Betrachtung sieht man einerseits ziemlich grosse Lücken (z.B. Wallis) und andererseits Klumpen mit vielen aneinandergrenzenden Einzugsgebieten (z.B. Kanton Basel-Landschaft). Die Informationsdichte schwankt also räumlich stark, und es ist schwierig, allgemeingültige, flächendeckende Aussagen zur Modellgüte zu machen. Wieso gibt es diese Lücken? Dafür ist das Auswahlkriterium *kleiner Beeinflussungsgrad* verantwortlich. Eine Karte von Margot et al. (1992) im Hydrologischen Atlas der Schweiz zeigt eindrücklich, wie gross die Beeinflussung der Fliessgewässer durch Kraftwerke im Wallis ist. Wegen dieser starken Beeinflussung ist es praktisch unmöglich, dort für die Untersuchung geeignete Einzugsgebiete zu finden. Und wieso gibt es Klumpen? Werden zusätzlich zu den LHG-Stationen noch kantonale und private Stationen in die Untersuchung einbezogen (nicht alle Kantone verfügen über eigene Messnetze), kann es zu regionalen Konzentrationen kommen.



Abb. 2.1 Lage der Referenzgebiete.

Kleine Einzugsgebiete

Bei den kleinen Einzugsgebieten ist die Auswahl von geeigneten Referenzgebieten stark eingeschränkt. Für die Modellvergleiche stehen die Forschungsgebiete der WSL im Vordergrund, die zum Teil über ausserordentlich lange Messreihen verfügen (vgl. Tab. 2.2).

Tab. 2.2 Einzugsgebietsfläche und Messreihenlänge der kleinen Testgebiete.

Einzugsgebiet	Fläche [km ²]	Messreihe [Jahre]	Region und verantwortliche Institution
Erlenbach	0.75	22	Alpthal, Kt. Schwyz; WSL
Vogelbach	1.55	26	
Rotenbach	1.65	45	Schwarzsee, Kt. Freiburg; WSL
Schwändlibach	1.4	45	
Sperbelgraben	0.55	85	Emmental, Kt. Bern; Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), WSL
Rappengraben	0.6	95	
Rietholzbach	3.2	23	Toggenburg, Kt. St. Gallen; BWG, Inst. für Atmosphäre und Klima der ETHZ

Vor rund hundert Jahren wurden im Emmental die Gebiete Rappengraben und Sperbelgraben instrumentiert; seit 1957 werden die beiden Abflusstationen vom Bundesamt für Wasser und Geologie betreut. Anfangs der Fünfzigerjahre begann man in den Voralpen des Kantons Freiburg im Rotenbach und im Schwändlibach zu messen und in den Sechzigerjahren wurden die Aktivitäten im Alptal im Erlenbach und im Vogelbach aufgenommen. Diese Gebiete werden mit dem Rietholzbach – einem Testgebiet der ETHZ – ergänzt.

b) Berechnung der Referenzwerte

Bei der Bestimmung von Referenzwerten wird grundsätzlich so vorgegangen, wie das in Kapitel 1.2.2 beschrieben wird. Das heisst, der empirischen Verteilung der Höchstwerte (bekannt aus der langen Messreihe des Referenzgebietes) wird eine theoretische Verteilungsfunktion angepasst, so dass in Bereiche extrapoliert werden kann, die über den Beobachtungszeitraum hinausgehen. Für den Einsatz in der Hydrologie kommen mehrere Verteilungsfunktionen und verschiedene Parameterschätzverfahren in Frage. Die meisten vergleichenden Analysen wurden mit hundertjährlichen Abflussspitzen (HQ_{100}) durchgeführt.

Mesoskalige Einzugsgebiete

Es wird eine Verteilungsfunktion (VF) gewählt, die eine Verallgemeinerung der Extremwertverteilungen Typ I bis III darstellt. Bei dieser sogenannten *Allgemeinen Extremwertverteilung* (AE) wird eine Parametrisierung verwendet, die alle drei Typen verbindet (Bogner und Mader 1999). Es wird nur noch eine Funktion verwendet, die sich an die gegebenen Verhältnisse anpasst. Die Parameter der VF werden mit der Momenten-Methode geschätzt.

Kleine Einzugsgebiete

In den Analysen für die kleinen Einzugsgebiete wurden bei den langen Messreihen (> 25 Jahre) die jährlichen Höchstwerte mit den Gumbel-Verteilungen (1. oder 2. Extremalverteilung) bestimmt. Bei kürzeren Messperioden behilft man sich mit der Auswertung partieller Datenserien. Hier wurde die Exponential-Verteilung oder die Pareto-Verteilung eingesetzt.

c) Modellwahl

Mesoskalige Einzugsgebiete

Die Untersuchungen können nicht alle publizierten Modelle und Verfahren miteinbeziehen, die seit Iszkowski (1886) und Lauterburg (1887) veröffentlicht wurden (vgl. Abb. 2.2). Deshalb musste eine Auswahl getroffen werden. Dabei standen Verfahren im Vordergrund, die auf mesoskalige, 10 bis 200 km² grosse Einzugsgebiete zugeschnitten sind. Welche Modelle oder Verfahren zur Hochwasserabschätzung werden in dieser Studie untersucht? Es sind Verfahren, die

- entweder in der Praxis eine grosse Verbreitung gefunden haben oder aber
- sehr aktuell sind (Entwicklung in den letzten Jahren) und die
- bei der Anwendung in der Praxis keinen grossen Arbeitsaufwand erfordern (nicht mehr als ein bis zwei Tage, vgl. Abb. 2.2).

Verbreitung in der Praxis: Von den unzähligen Modellen, die in den letzten gut 100 Jahren entwickelt wurden, haben etwa ein Dutzend einen gewissen Bekanntheitsgrad erlangt (vgl. Tab. 2.3). Wie Interviews mit Anwenderinnen und Anwendern aus mehreren Tiefbauämtern und Ingenieurbüros ergeben haben, werden fünf davon heute in der schweizerischen Bemessungspraxis regelmässig eingesetzt (in Tab. 2.3 grau unterlegt). Diese in der Praxis verbreiteten Modelle werden hier bei den Analysen mitberücksichtigt, da nur so beurteilt werden kann, ob die neuesten, weiter unten vorgestellten Modellentwicklungen gegenüber diesen älteren Ansätzen wirkliche Verbesserungen erbringen. Ingenieure sind eher bereit, neue Verfahren zu akzeptieren und anzuwenden, wenn diese mit den eingespielten Modellen verglichen werden können.

Tab. 2.3 Hochwasser-Abschätzverfahren mit einem gewissen Bekanntheitsgrad und ihr Erscheinungsjahr. Grau unterlegt: die in den Interviews am häufigsten genannten Verfahren; sie werden in Kapitel 2.2 ausführlich beschrieben.

Iszkowski	1886
Lauterburg	1887
Hofbauer	1916
Kürsteiner (Heusser 1947)	1917
Melli	1924
Müller	1943
Kreps	1952
Rational Formula (viele Autoren)	
Widmoser	1974
Bruschin und North	1977
Sydler, Widmoser und Zollinger	1982
VAW 86	1986
Kölla	1986

Die übrigen Verfahren wurden in den Interviews nur noch vereinzelt erwähnt. Sie sind für die Praxis und damit auch für unsere Analysen von untergeordneter Bedeutung.

Aktualität: In den letzten Jahren wurden in der Schweiz mehrere Hochwasser-Abschätzverfahren entwickelt, die nicht nur ein bestimmtes HQ_x als Zielgrösse haben, sondern – im Sinne eines differenzierten Hochwasserschutzes – Bemessungsgrössen beliebiger Jährlichkeit liefern.

Tab. 2.4 Aktuelle Hochwasser-Abschätzverfahren, Übersicht. In Kapitel 2.2 werden diese Verfahren (ohne Regression) ausführlich beschrieben.

Modell	Autor / Autorin
Kölla	Kölla (1986)
Momente	Düster (1994)
Regression	Düster (1994)
Kölla mod	Manser (1997)
GIUB'96	Weingartner (1998)
BaD7	Barben (2001)

Das Modell *Kölla* wurde bereits unter dem Aspekt *Verbreitung in der Praxis* aufgeführt. Da es sich um ein neueres Modell handelt, muss es auch hier wieder erwähnt werden. Es fand nicht zuletzt dank Kursen, die an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW) durchgeführt wurden, eine rasche Verbreitung.

Arbeitsaufwand: Der Arbeitsaufwand, der bei der Anwendung eines Modells entsteht, ist nicht immer einfach abzuschätzen. Bei ein paar Modellen hängt er stark von der Routine und der Infrastruktur der Anwenderinnen und Anwender ab; so können beispielsweise beim Verfahren von Kölla (1986) Parameter wie die Gerinnelänge mühsam *von Hand* aus der Karte bestimmt oder sehr rasch mit einem Geografischen Informationssystem (GIS) ermittelt werden.

Es besteht aber auch bei den empirischen Modellen ein grosser Unterschied, ob sie traditionell angewendet werden oder ob mit zeitgemässen Mitteln aufbereitete Daten zur Verfügung stehen. So können die Beiwerte (*c*-Werte) des Verfahrens von Kürsteiner (1917) bzw. Heusser (1947) aus Karten abgeschätzt werden, oder aber sie könnten einmal berechnet und in einer *c*-Wert-Karte dargestellt werden.

In Abbildung 2.2 wird das Erscheinungsjahr dem Arbeitsaufwand, der für die Modellanwendung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet benötigt wird, gegenübergestellt. Nach den eben gemachten Ausführungen ist klar, dass es sich bei der Bezifferung des Arbeitsaufwandes nur um Schätzungen handelt. Die Abbildung zeigt, dass die älteren Verfahren in der Regel eines sehr kleinen Aufwands bedürfen. Dies ist sicherlich ein wesentlicher Grund dafür, dass sie auch heute noch derart verbreitet sind. Gefragt sind nach wie vor einfache, eingespielte Verfahren, die mit geringem Zeitaufwand zu einer Abschätzung hydrologischer Grössen in Einzugsgebieten führen, die über keine oder nur wenige Messdaten verfügen. Erst in neuerer Zeit wurden die Verfahren etwas komplexer, wie die Abbildung 2.2 anhand des zunehmenden Arbeitsaufwandes bei der Modellanwendung verdeutlicht. Als neues Arbeitsinstrument werden nun auch GIS mit den entsprechenden digitalen Datensätzen eingesetzt.

Aufgrund der diskutierten Kriterien werden die folgenden Verfahren im Länderbericht näher betrachtet (vgl. Abb. 2.2):

- Modelle, die sich in der Praxis durchgesetzt haben: Kölla, Kürsteiner, Müller, Hofbauer, Melli.
- Modelle, die weniger als 15 Jahre alt sind und keinen allzu grossen Arbeitsaufwand auslösen: Kölla mod., GIUB'96, BaD7, Momente.

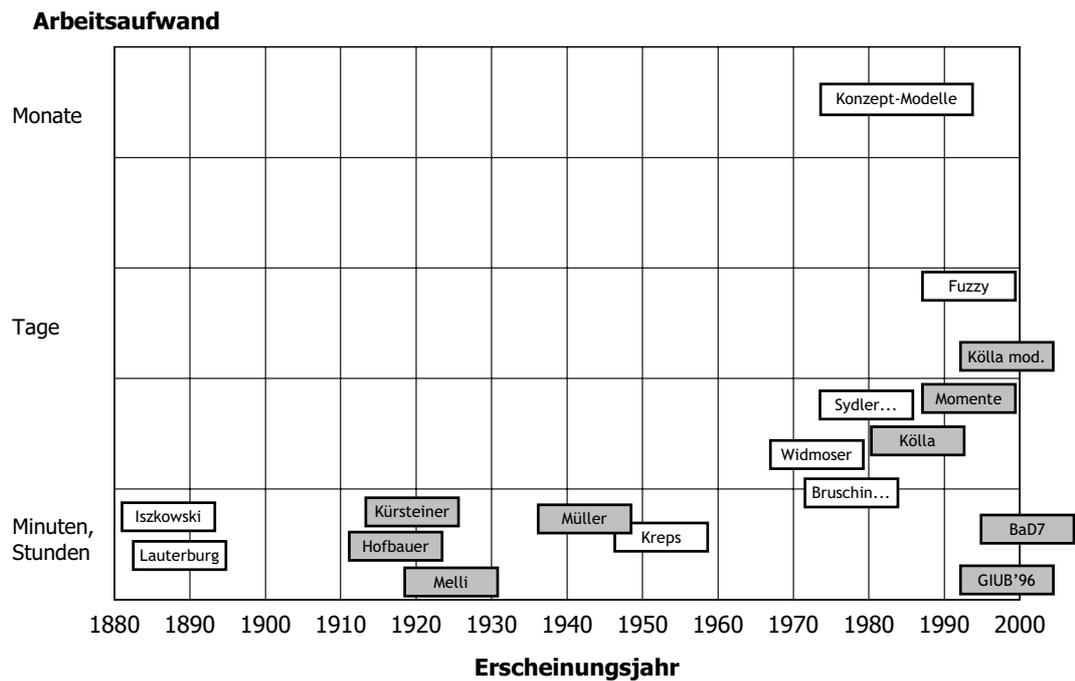


Abb. 2.2 Erscheinungsjahr und Arbeitsaufwand bei Hochwasser-Abschätzverfahren: Der Arbeitsaufwand bezieht sich auf eine manuelle Berechnung, ohne das Computer-Programm HQx_meso_CH (Barben 2001).

Kleine Einzugsgebiete

Vor knapp zehn Jahren wurden von der WSL für eine Fortbildungsveranstaltung neun Abschätzverfahren in sieben kleinen Einzugsgebieten (vgl. Tab. 2.2) getestet. Diese Arbeit bildet die Basis für die Untersuchung, die im Kapitel 2.3 dargestellt wird. Von den neun Abschätzverfahren wurden damals vier als ungeeignet eingestuft und die fünf verbleibenden wurden im Rahmen des KHR-Projekts noch einmal eingehend getestet (vgl. Tab. 2.5). Die Liste wurde ergänzt durch ein neues Verfahren (modifiziertes Clark-Verfahren), das im Rahmen einer Praktikumsarbeit an der WSL entstanden ist.

Tab. 2.5 Die analysierten Abschätzverfahren für die kleinen Einzugsgebiete.

Modell
Formel des Institutes für Kulturtechnik (ETHZ)
Verfahren nach Taubmann/Thiess/Chow
Verfahren nach Kölla
Modifiziertes Fließzeitverfahren
Modifiziertes Clark-Verfahren

d) Modellbeurteilung

In den als Referenz verwendeten meso- und mikroskaligen Einzugsgebieten werden die ausgewählten Modelle eingesetzt und mit den Referenzwerten verglichen. Dieser Vergleich erlaubt unter anderem Aussagen zur Güte dieser Modelle.

2.2 Mesoskalige Einzugsgebiete

2.2.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden in Kurzportraits jene Modelle vorgestellt, die aufgrund der in Kapitel 2.1.2 diskutierten Kriterien ausgewählt wurden. Diese Modelle besitzen zum Teil unterschiedliche Zielgrößen:

- **Q_{max}**: Modelle, die auf Hüllkurven basieren, die um gegebene Datenkollektive der höchsten beobachteten Hochwasserspitzen (HHQ) gelegt wurden (z.B. Kürsteiner, GIUB'96). Dabei ist zu beachten, dass die Q_{max}-Werte verschiedener Modelle nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden können, da die Herleitung der Beziehungen, die eine Hüllkurve beschreiben, auf sehr unterschiedlichen Datengrundlagen beruhen. Q_{max}-Werte werden oftmals verwendet, um ein sogenanntes EHQ (Extremhochwasser) einzugrenzen.
- **HQ₂₀, HQ₁₀₀**: Modelle, die Hochwasserspitzen bestimmter Wiederkehrperioden berechnen (z.B. Kölla oder GIUB'96)
- **HQ_x**: Modelle, bei denen die Wiederkehrperiode frei gewählt werden kann (z.B. Momente, BaD7)

Um die Vergleichbarkeit der Resultate zu erhöhen, werden in den Modellportraits jeweils im Abschnitt *Güte der Resultate* ähnliche Abbildungen gezeigt. Oben links (ol) werden die Abschätzungen aus den 95 Einzugsgebieten den Referenzwerten (HQ₁₀₀) gegenübergestellt. Oben rechts (or) stehen die Korrelationskoeffizienten dieser Gegenüberstellung. Unten geht es um eine räumliche Beurteilung der Abweichungen:

- Flächendeckend für die ganze Schweiz sind unten links (ul) die relativen Abweichungen [%] vom Referenzwert in einer Pseudo-3D-Grafik mit einer Rasterweite von 10 km aufgetragen, wobei die Abweichungen an den 95 Referenzstationen als Stützstellen für die räumliche Interpolation dienen. Die x-y-Ebene repräsentiert die räumliche Ausdehnung der Schweiz in Landeskoordinaten.
- Die Informationen der räumlichen Interpolation wurden verwendet, um die mittleren relativen Abweichungen pro Basisgebiet zu berechnen (Abbildung unten rechts, ur). Die Basisgebiete entstammen dem „Hydrologischen Atlas der Schweiz“ (HADES). Die relativen Abweichungen wurden klassiert; die Werte reichen von dunkelrot für Unterschätzung der Referenzwerte über 50 % bis dunkelgrün für Überschätzung der Referenzwerte über 500 % (vgl. Tab. 2.6.).

Tab. 2.6 *Legende der Abbildungen im Abschnitt „Güte der Resultate“.*

Abweichung von der Referenz [%]		
Unterschätzung	geringe Abweichung	Überschätzung
 < -50	 -25 bis 25	 25 bis 50
 -50 bis -25		 50 bis 100
		 100 bis 500
		 > 500

Die Beschreibung der Modelle orientiert sich an den Originalarbeiten. Die Abschätzungen wurden mit dem von Barben (2001) entwickelten Software-Paket HQ_x_meso_CH durchgeführt. Dazu wurden die Modellinputparameter flächendeckend für die Schweiz aufbereitet. Das ist bei den neueren Modellen unproblematisch, da die Modellentwicklungen auf digitalen Datensätzen basieren. Bei älteren Modellen kann es aber im Vergleich zu einer klassischen Anwendung zu geringfügigen Abweichungen kommen, auf die in den Modellportraits hingewiesen wird.

Da das Modell Kölla einerseits in diesem Kapitel vorgestellt und andererseits auch bei den kleinen Einzugsgebieten beschrieben wird, ist es sinnvoll, die beiden Versionen nicht unter dem

gleichen Namen aufzuführen. Um Verwechslungen zu vermeiden, wird deshalb das Modell im Kontext mit mesoskaligen Einzugsgebieten als *Kölla meso* bezeichnet. Dabei werden die Parameter im Gegensatz zum Original „automatisch“ mit der Software HQx_meso_CH bereitgestellt.

Die Wahl der Modellparameter kann stark von der Erfahrung und den Ortskenntnissen der Anwenderinnen und Anwender abhängen. In dieser Publikation werden Vergleiche präsentiert, die sich ergeben, wenn die Modelle mit objektiv erhobenen Parametern, die mit HQx_meso_CH berechnet wurden, angewandt werden. Es sei aber darauf hingewiesen, dass es möglich ist, bei der Software-Anwendung einzelne Modellparameter aufgrund von Expertenwissen zu verändern.

2.2.2 Die Modelle

2.2.2.1 Melli

Beschreibung des Modells

Das Modell nach Melli (1924), das im Umfeld der Stadtentwässerung entstanden ist, ist eines der ältesten und zugleich eines der einfachsten, das in der Schweiz noch eingesetzt wird. Q_{\max} ist einzig eine Funktion der Einzugsgebietsfläche; das heisst in der bekannten Form von $Q_{\max} = a \cdot F^b$ sind a und b (!) konstant. Melli unterscheidet zwei Grössenbereiche der Einzugsgebiete:

$$\begin{aligned} Q_{\max} &= 7.426 \cdot F^{5/6} && \text{für EG} < 100 \text{ km}^2 \\ Q_{\max} &= 15.94 \cdot F^{2/3} && \text{für EG} > 100 \text{ km}^2 \end{aligned}$$

mit:

$$\begin{aligned} Q_{\max} & \quad \text{Abflussspitze [m}^3\text{/s]} \\ F & \quad \text{Einzugsgebietsfläche [km}^2\text{]} \end{aligned}$$

Da nebst der Fläche keine Parameter erhoben werden müssen, ist diese Methode in der Anwendung sehr simpel.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Melli macht keine Angaben zur Wiederkehrperiode seiner Hochwasserabschätzungen. Der Vergleich der Referenzwerte mit den Abschätzungen nach Melli zeigt, dass sein Q_{\max} im Durchschnitt etwa 2.5 mal grösser als ein HQ_{100} ist (vgl. Abb. 2.3).

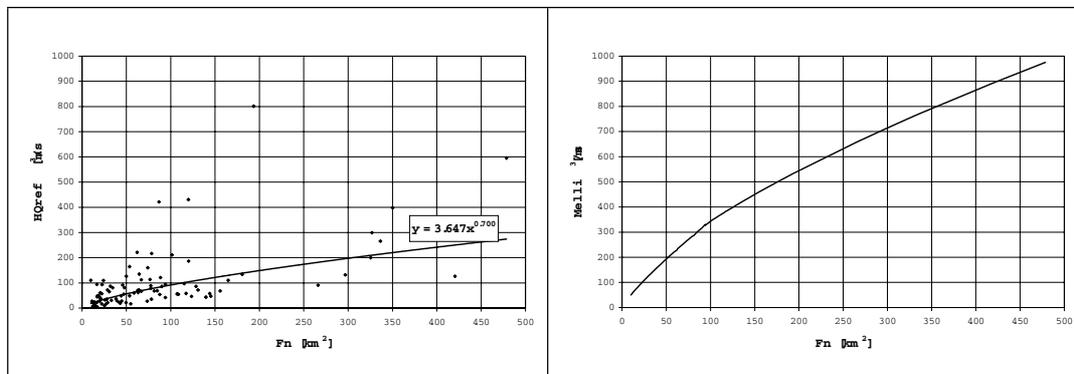


Abb. 2.3 Vergleich der Referenzwerte mit Q_{\max} nach Melli.
links: Referenzwerte (HQ_{100}) in Funktion der Einzugsgebietsfläche (Werte der 95 Referenzgebiete und daraus abgeleitete Funktion)
rechts: Q_{\max} nach Melli in Funktion der Einzugsgebietsfläche.

Einzugsgebietsfläche

Melli gibt einen Bereich für die Einzugsgebietsfläche von 30 bis 1'000'000 ha (0.3 bis 10'000 km²) an. Den Bereich bis 100 km² hat er mit etwa 20 Hochwasserbeobachtungen verschiedener Bäche überprüft. Der Bereich von 100 km² bis 10'000 km² wird in seiner Publikation nur *vollständigkeithalber* erwähnt und die Parameter anhand von etwa 50 Hochwasserbeobachtungen ermittelt. Es ist nicht ersichtlich, welche Einzugsgebiete für die Eichung verwendet wurden.

Naturräumliche Zuordnung

Es werden nirgends naturräumliche Einschränkungen bei der Anwendung erwähnt. Das heisst, die Methode darf in der ganzen Schweiz ohne Einschränkung eingesetzt werden.

Notwendige Inputdaten

Das Modell verwendet als Inputdaten nur die Einzugsgebietsgrösse.

Fallbeispiel

$$Q_{\max} = 7.426 \cdot 58.7^{5/6} = 221 \text{ m}^3/\text{s}$$

Güte der Resultate

Die Parameter des Modells (nur Einzugsgebietsfläche) können von verschiedenen Anwenderinnen und Anwendern relativ genau bestimmt werden. Das Resultat der Abschätzung ist deshalb unabhängig von Berufserfahrung und Gebietskenntnissen.

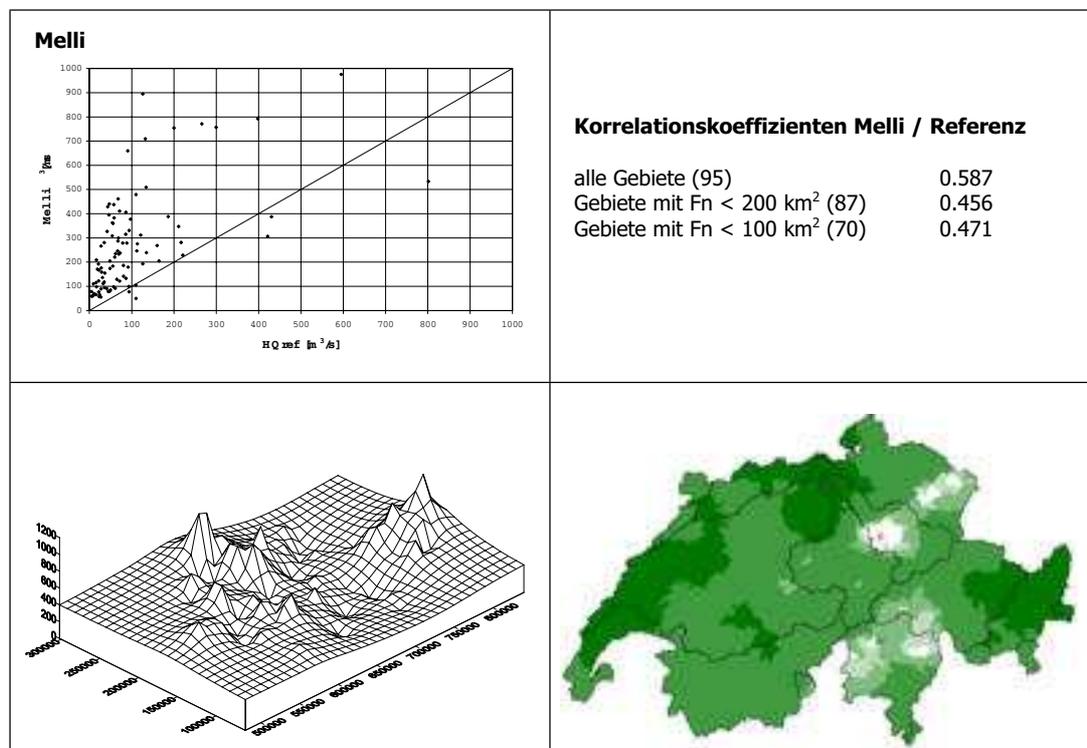


Abb. 2.4 Resultate der Hochwasserabschätzung nach Melli.
ol: Abschätzungen nach Melli und Referenzwerte (HQ_{100})
or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.

Abbildung 2.4 zeigt, dass die zu erwartenden Resultate der Abschätzungen sehr unsicher sind. Das kommt in der Abbildung oben links zum Ausdruck. Wenn die Q_{\max} nach Melli den Referenzwerten gegenübergestellt werden, ergibt sich bei den Ergebnissen eine grosse Streuung. Die Datenpunkte sollten idealerweise auf einer Geraden liegen und wenn Q_{\max} einem HQ_{100} entsprechen würde, würden diese gedachte Gerade und die in der Abbildung (ol) eingezeichnete 1:1-Gerade zusammenfallen. Das Q_{\max} von Melli ist in grossen Teilen der Schweiz bedeutend grösser als der Referenzwert (vgl. das hohe Niveau der Oberfläche bei der z-Achse in Abbildung 2.4, ul). Alleine die massive Überschätzung der Referenzwerte hat keinen Einfluss auf die Güte der Resultate (vgl. Kapitel 2.2.3). Wenn die Streuung der Datenpunkte sehr klein wäre, ergäbe sich eine

ebene Oberfläche bei den relativen Abweichungen von den Referenzwerten (u_l) und die Abschätzungen nach Melli könnten – um ein HQ_{100} zu erhalten – mit einem konstanten Faktor multipliziert werden. Weil die Streuung der Datenpunkte jedoch sehr gross ist, ist dieser direkte Zusammenhang nicht gegeben. Ein Vergleich von Abschätzungen der Zielgrösse Q_{\max} mit Referenzwerten HQ_{100} kann also durchaus wertvolle Hinweise zur Güte der Q_{\max} -Modelle liefern. Die allgemeinen Aussagen dieses Abschnitts gelten auch für die Modelle Hofbauer, Kürsteiner und Müller-Zeller.

Ohne eine räumliche Gliederung nach weiteren Kriterium ist das Modell nach Melli für schweizerische Verhältnisse sehr unzuverlässig und als alleinige Methode zur Hochwasserabschätzung nicht zu empfehlen. Dieses Ergebnis erstaunt keineswegs, wenn man an die grossen Unterschiede bei der Gebietsausstattung der untersuchten Einzugsgebiete denkt. Der Ansatz über die Einzugsgebietsfläche kann nur weiterhelfen, wenn man sich in einer homogenen Region befindet und sich die hochwasserrelevanten Gebietsparameter nur unwesentlich voneinander unterscheiden.

Literatur

Melli, E. (1924): Die Dimensionierung städtischer Kanäle. In: Schweizerische Bauzeitung 12, 137-141, Zürich.

2.2.2.2 Hofbauer

Beschreibung des Modells

Das Modell nach Hofbauer (1916) ist vom Aufbau her demjenigen von Melli (1924) ähnlich. Zur Ausgangsform $Q_{\max} = a \cdot F^b$ wird ein Faktor α eingeführt, der in Funktion der Hangneigung zwischen 0.25 und 0.7 variieren kann.

$$Q_{\max} = \alpha \cdot 60 \cdot F^{1/2}$$

mit:

Q_{\max}	Abflussspitze [m ³ /s]
α	Abflussbeiwert [-]
F	Einzugsgebietsfläche [km ²]

Obschon sich Hofbauer bewusst war, dass es sich bei seinem Vorschlag um einen einfachen Ansatz handelt, der sich nur für überschlägige Berechnungen und für Spitzenabflüsse eignet, liess er verlauten: „Diese Formel lässt an Einfachheit nichts zu wünschen übrig und liefert innerhalb der Grenzen $F = 10 \text{ km}^2$ und $F = 20'000 \text{ km}^2$ auch für unsere österreichische Reichshälfte recht zutreffende Werte“.

Die α -Werte hat er folgendermassen definiert:

Tab. 2.7 α -Werte nach Hofbauer.

	α	
Flachland	0.25	bis 0.35
Hügelland und Mittelgebirge	0.35	bis 0.5
Gebirgsland	0.5	bis 0.7

Die Formel wurde von Hofbauer an „einer Anzahl beobachteter Katastrophen in Österreich und Süddeutschland“ überprüft.

Um die Hofbauer-Formel flächendeckend und GIS-gestützt anzuwenden, wurden die α -Werte der Tabelle 2.7 nach Abbildung 2.5 in Funktion der Hangneigung festgelegt und für ein 100 m-Raster berechnet.

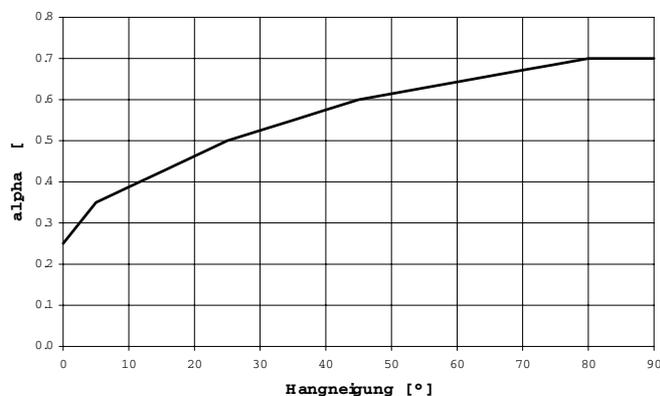


Abb 2.5 α -Wert nach HQx_meso_CH.

Aus einem digitalen Höhenmodell wird die Hangneigung abgeleitet und für jeden Gitterpunkt des Rasters berechnet. Die Grenze zwischen Flachland und Hügelland wurde bei einer Hangneigung von 5° und die Grenze zwischen Hügelland und Gebirgsland bei einer Hangneigung von 25° festgelegt.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Hofbauer spricht im Zusammenhang mit seinen Abschätzungen von *maximalen Hochwassermengen* und verzichtet auf die Angabe von Wiederkehrperioden. Der Vergleich der Referenzwerte mit den Abschätzungen nach Hofbauer zeigt, dass das Q_{\max} nach Hofbauer durchschnittlich 2.4 mal grösser als ein HQ_{100} ist. Die Streuung der Datenpunkte in Abbildung 2.6 (ol) ist jedoch so gross, dass in konkreten Fällen keine zuverlässigen Angaben gemacht werden können.

Einzugsgebietsfläche

Hofbauer gibt einen sehr grossen Flächenbereich an: für die *österreichische Reichshälfte* soll die Formel für Flächen von 10 bis 20'000 km² *zutreffende Werte* liefern.

Naturräumliche Zuordnung

Der Ansatz darf auf Gebiete mit ähnlichen Rahmenbedingungen (Alpen, Mitteleuropa) ausserhalb der *österreichischen Reichshälfte* übertragen werden. Die Anwendung wird nicht durch irgendwelche Gebietsparameter eingeschränkt. Das heisst, die Methode darf in der ganzen Schweiz ohne Einschränkung eingesetzt werden.

Notwendige Inputdaten

Das Modell benötigt als Inputdaten die Einzugsgebietsgrösse und den α -Wert. Die Modellparameter werden aus den bereitstehenden Datensätzen berechnet.

Fallbeispiel

$$\alpha \text{ aus } HQx_meso_CH = 0.352$$

$$Q_{\max} = 0.352 \cdot 60 \cdot 58.7^{1/2} = \mathbf{162 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Güte der Resultate

Bei der Bestimmung der Parameter haben Anwenderinnen und Anwender keinen grossen Spielraum. Berufserfahrung und Gebietskenntnisse beeinflussen das Ergebnis nur in geringem Masse.

Die drei Bilder von Abbildung 2.6 zeigen die im allgemeinen grossen positiven Abweichungen von den Referenzwerten für ein HQ_{100} . Die grosse Streuung (ol) deutet darauf hin, dass es praktisch unmöglich ist, das Verhältnis Hofbauer/ HQ_{100} zuverlässig anzugeben. Die Angabe unter *Jährlichkeit des Ereignisses* ist also nur als eine Grössenordnung zu verstehen. Hochwasserabschätzungen nach Hofbauer sollten also nie alleine massgebend sein.

Die grosse Streuung und die ausgeprägten Problemzonen zeigen deutlich, dass das Modell zu einfach aufgebaut ist. Eine markante Verbesserung der Resultate könnte erreicht werden, wenn das Modell für homogene Regionen geeicht würde. Einfache Ansätze wie dieser können unmöglich der grossen landschaftlichen und klimatischen Vielfalt der ganzen Schweiz gerecht werden.

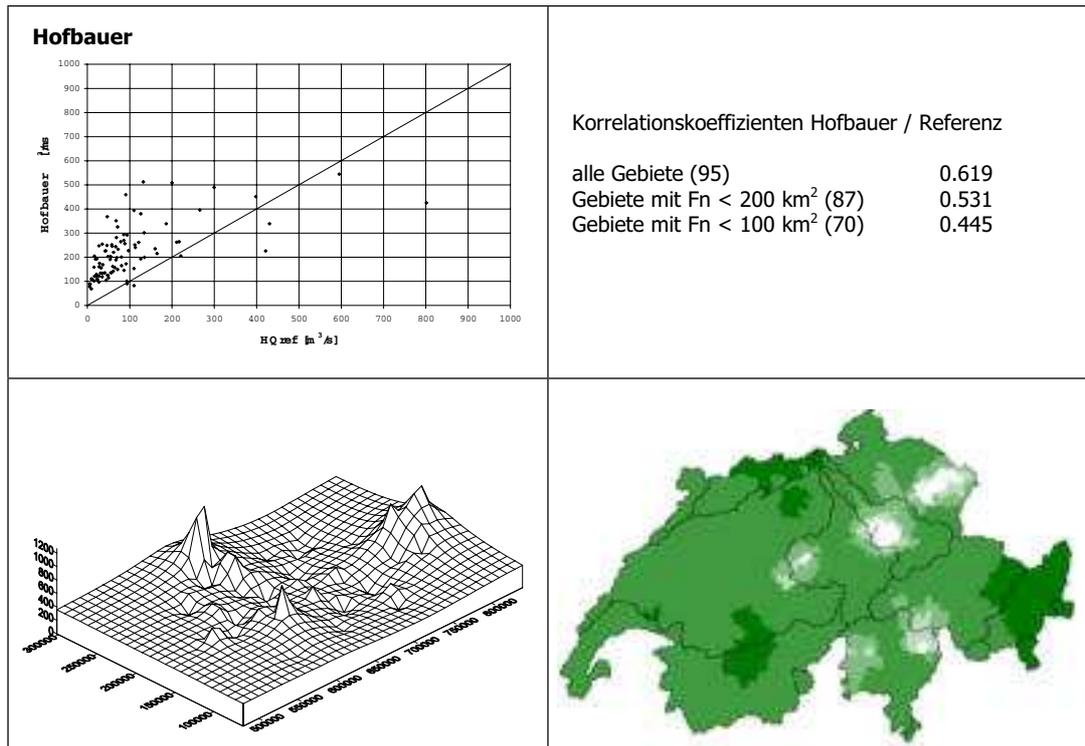


Abb. 2.6 Resultate der Hochwasserabschätzung nach Hofbauer.
 ol: Abschätzungen nach Hofbauer und Referenzwerte (HQ_{100})
 or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
 ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.

Literatur

Hofbauer, R. (1916): Eine neue Formel für die Ermittlung der grössten Hochwassermengen. In: Österreichische Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst, 38-40, Wien.

2.2.2.3 Kürsteiner

Beschreibung des Modells

Bei Kürsteiner (1917) wird eine Hüllkurve der Form $Q_{\max} = a \cdot F^b$ für die Abschätzungen von Spitzenabflüssen verwendet. Dabei ist a nicht konstant, sondern variiert in Abhängigkeit der Hangneigung gemäss Tabelle 2.8. Da der Faktor a in der Schweiz unter dem Namen c bekannt ist, ist im folgenden vom c -Wert nach Kürsteiner die Rede.

$$Q_{\max} = c \cdot F^{2/3}$$

mit:

Q_{\max}	Abflussspitze [m ³ /s]
c	Charakter des EG [-]
F	Einzugsgebietsfläche [km ²]

Tab. 2.8 c -Werte nach Kürsteiner resp. Heusser¹

	c
ausgesprochen flaches Gelände, mit leicht hügeligen Randgebieten; Kanäle aus Riedentwässerungen	2.5 bis 4
teilweise flaches und teilweise hügeliges Einzugsgebiet	4 bis 6
meist hügeliges Voralpengelände	6 bis 9
steiles gebirgiges Einzugsgebiet	9 bis 12
vergletscherte Einzugsgebiete	3 bis 5

Für HQx_meso_CH wurde die Tabelle 2.8 in einen flächendeckenden Datensatz umgesetzt. Die Tabelle kann so interpretiert werden, dass der c -Wert nur von der Neigung und vom Vorhandensein eines Gletschers abhängig ist. Abbildung 2.7 zeigt den Zusammenhang zwischen der Hangneigung und dem c -Wert.

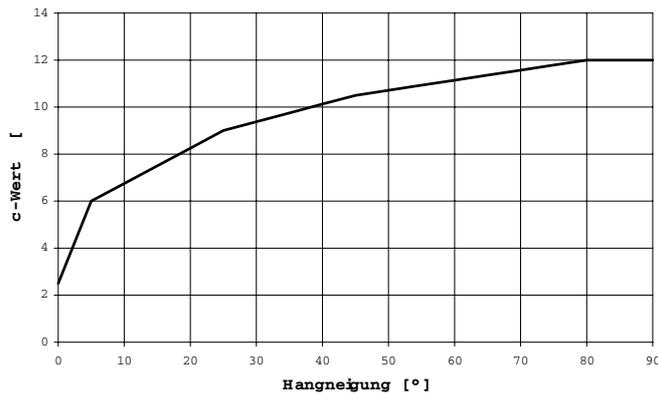


Abb. 2.7 c -Wert nach HQx_meso_CH, umgesetzt nach Heusser (1947).

¹ Eigenartigerweise ist die Abschätzmethode unter dem Namen Kürsteiner bekannt, obschon Heusser (1947) gezeigt hat, wie die c -Werte zu bestimmen sind. Kürsteiner hat sich nur sehr knapp zur Hochwasserabschätzung geäussert: „Die spezifischen Abflussmengen sind nach der empirischen, an einer grossen Zahl von tatsächlich beobachteten Hochwassermengen abgeleiteten Formel $q = (9 \text{ bis } 12) / F^{1/3}$ berechnet worden, unter Berücksichtigung des höchsten Wertes, der Zahl 12“.

Jedem Gitterpunkt eines Rasters kann, abgeleitet aus einem digitalen Höhenmodell, ein Neigungswert zugeordnet werden. Daraus lässt sich nach der Beziehung aus Abbildung 2.7 ein mittlerer c -Wert für ein beliebiges schweizerisches Einzugsgebiet berechnen. Die Grenze zwischen flach und hügelig wurde bei einer Hangneigung von 5° und die Grenze zwischen hügelig und steil bei einer Hangneigung von 25° festgelegt. Aus der Arealstatistik (BFS 1985) kann die Gletscherfläche bezogen werden, der ein c -Wert von 4 zugewiesen wird. Damit steht einer flächendeckenden Kartierung von c nichts mehr im Weg.

Unter dem Namen *Kürsteiner* haben sich in der Schweiz Verfahren etabliert (z.B. Kanton Zürich), die von Kürsteiner (1917) nur den Exponenten b übernommen haben, den Koeffizienten c aber an abgelaufenen Ereignissen eichen und nicht mehr aus den Gebietseigenschaften ableiten.²

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Heusser (1947) erwähnt, dass das Q_{\max} ungefähr einem HQ_{100} entspreche. Ein Vergleich der Referenzwerte mit den Abschätzungen nach Kürsteiner zeigt eine mittl. Überschätzung von rund 40 %.

Einzugsgebietsfläche

Kürsteiner (1917) äusserte sich in seinem Aufsatz leider nicht, für welche Einzugsgebietsflächen die Formel gilt und welche Einzugsgebiete er für die Eichung verwendet hatte. Heusser (1947) wurde konkreter und publizierte eine Abbildung, in der die meisten Datenpunkte in einem Flächenbereich von 5 bis 500 km² liegen. Die Grenzen sind nicht scharf, aber die Abbildung von Heusser zeigt, dass das Modell ganz bestimmt die mesoskaligen Einzugsgebiete dieser Untersuchung abdeckt.

Naturräumliche Zuordnung

Es werden weder von Kürsteiner noch von Heusser naturräumliche Einschränkungen bei der Anwendung erwähnt. Daraus darf gefolgert werden, dass das Modell in der ganzen Schweiz ohne Einschränkung eingesetzt werden darf.

Notwendige Inputdaten

Das Modell benötigt als Inputdaten die Einzugsgebietsgrösse und den c -Wert. Die Modellparameter werden aus den bereitstehenden Datensätzen berechnet.

Fallbeispiel

$$c \text{ aus } HQx_meso_Ch = 5.81$$

$$Q_{\max} = 5.81 \cdot 58.7^{2/3} = \mathbf{88 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Güte der Resultate

Die Gegenüberstellung der Abschätzungen nach Kürsteiner und der Referenzwerte (HQ_{100}) zeigt eine recht grosse Streuung. Der Schwerpunkt der Punktwolke liegt deutlich über der 1:1-Geraden. Im allgemeinen ist also ein Q_{\max} nach Kürsteiner deutlich grösser als ein HQ_{100} . Bei Kürsteiner gibt es zwei ausgeprägte Problemzonen im Bereich des Kantons Basel-Landschaft und im Unterengadin (vgl. Abb. 2.8, ul). Dazwischen, in einem breiten Band das von Süden nach Nordosten läuft, liefert das Modell relativ gute Ergebnisse.

Der Ansatz nach Kürsteiner ist für eine generelle, schweizweite Anwendung sehr einfach aufgebaut. Verbesserungen könnten durch die Bildung von homogenen Regionen mit regionenspezifischen Modellparametern erzielt werden.

2 Die Ergebnisse im Abschnitt *Güte der Resultate* beziehen sich nur auf die hier dargestellten originalen Ansätze von Kürsteiner und Heusser.

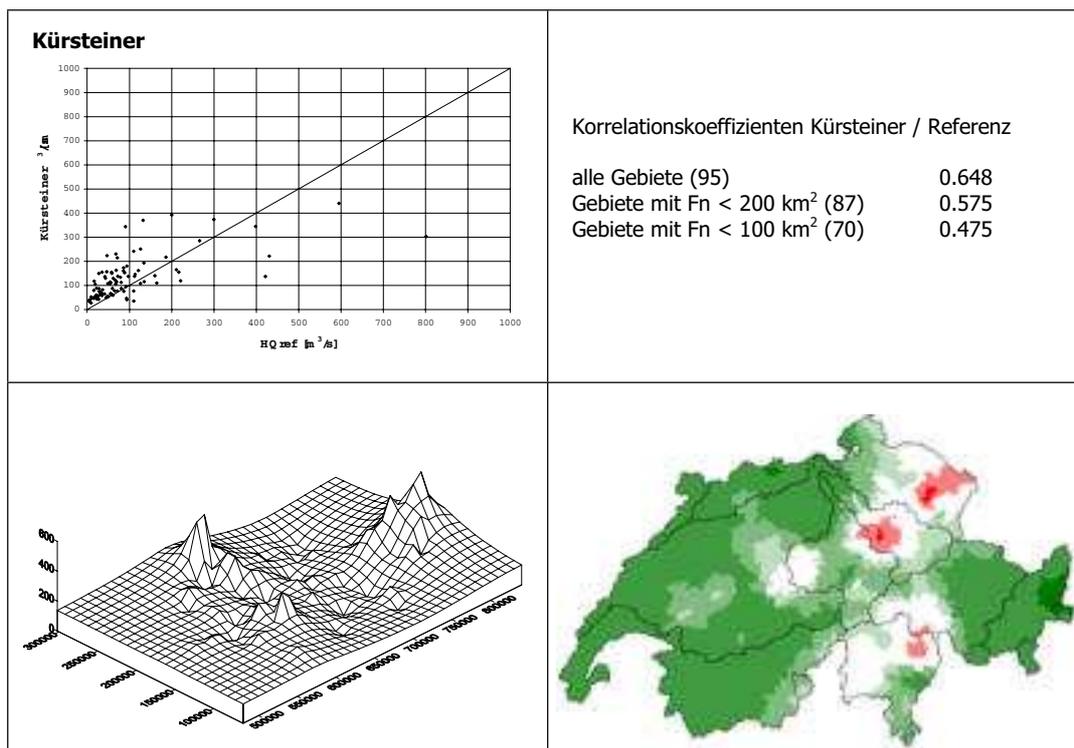


Abb. 2.8 *Resultate der Hochwasserabschätzung nach Kürsteiner.*
 ol: Abschätzungen nach Kürsteiner und Referenzwerte (HQ_{100})
 or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
 ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.

Literatur

Heusser, H. (1947): Die Voraussage der maximalen Hochwassermenge. In: Schweizerische Technische Zeitschrift, 31, 524-526.

Kürsteiner, L. (1917): Das neue Elektrizitätswerk der Stadt Chur. In: Schweizerische Bauzeitung, 1, 4-8, Zürich.

2.2.2.4 Müller-Zeller

Beschreibung des Modells

Müller (1943) schlägt einen Ansatz vor, der ähnlich aufgebaut ist, wie derjenige von Kürsteiner (1917). Auch er verwendet eine Hüllkurve der Form $Q_{\max} = a \cdot F^b$ und der Exponent beträgt ebenfalls $2/3$. Der Abflusskoeffizient hängt von der Vegetation und von der Hangneigung ab. Zeller (1975) hat den Ansatz noch verfeinert und mit einer Zonenkarte der Starkniederschläge ergänzt (vgl. Abb. 2.9).

$$Q_{\max} = \alpha \cdot \psi \cdot F^{2/3}$$

mit:

Q_{\max}	Abflussspitze [m ³ /s]
α	Zonenkoeffizient [-]
ψ	Abflusskoeffizient [-]
F	Einzugsgebietsfläche [km ²]

Tab. 2.9 ψ -Werte nach Müller resp. Zeller (z).

Höhenlage	Charakter	ψ		
		flach	bis	steil
oberhalb Waldgrenze	undurchlässige Weideböden, Fels	0.4	bis	0.8
	Schutthalden (z)	0.05	bis	0.4
Waldgrenzgebiet	Alpweiden mit Sträuchern, einzelne Bäume	0.3	bis	0.7
	lichter Wald ohne Schluss	0.2	bis	0.6
tiefere Lagen	junger Wald, Wies- und Ackerland	0.1	bis	0.5
	vernässte Gebiete, Sumpf (z)	0.3	bis	0.6

Es wurde versucht, für HQx_meso_CH die Landnutzungsklassen der Arealstatistik (BFS 1985) den ψ -Werten aus Tabelle 2.9 zuzuordnen. ψ ist eine Funktion der Hangneigung und der Landnutzung. Die kleinen Werte jedes Landnutzungsbereiches sind bei flachen und die grossen Werte bei steilen Flächen einzusetzen. Für jede Landnutzungsklasse wurde, wie bei Hofbauer und Kürsteiner, eine Funktion bestimmt, die den Verlauf von ψ in Abhängigkeit der Hangneigung definiert. Die Grenze zwischen flach und mittel wurde bei 5°, die Grenze zwischen mittel und steil bei 25° gezogen.

Damit möglichst flächendeckende Landnutzungsinformationen vorliegen, müssen die vielen Klassen der Arealstatistik ziemlich pragmatisch den Klassen von Müller zugeordnet werden. Gletscher (flächenmässig nicht unbedeutend) erhalten generell ein ψ von 0.1, Gewässer ein ψ von 1.0 und Siedlungen ein ψ von 0.5 (unabhängig der Hangneigung). Alter und junger Wald lassen sich nicht unterscheiden.

Bei diesem Ansatz könnten gute Gebietskenntnisse und Erfahrungen von Vorteil sein. Im Programm HQx_meso_CH kann aus diesem Grund der ψ -Wert vom Anwender angepasst werden.

Zeller (1975) unterscheidet in seiner Karte (vgl. Abb. 2.9) drei verschiedene Zonen mit α -Werten von 20 (hell), 35 (mittel) und 50 (dunkel). Die Karte zeigt indirekt die Starkniederschlagsgebiete der Schweiz.



Abb. 2.9 Zonenkarte für die α -Werte nach Zeller.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Müller macht keine Angaben zur Jährlichkeit. Ein Vergleich der Referenzwerte der 95 Einzugsgebiete mit den Abschätzungen nach Müller-Zeller ergibt eine mittl. Überschätzung von rund 80 %.

Einzugsgebietsfläche

Müller (1943) nennt für sein ursprüngliches Modell (ohne die Regenzone) einen Gültigkeitsbereich von 2 bis 1'000 km². Zeller schränkt die Anwendung seiner Karte der Regencharakteristik auf Einzugsgebietsgrößen von 0.5 bis 100 km² ein. Da Müller nur in Verbindung mit Zeller verwendet wird, kann der Einsatzbereich auf 2 bis 100 km² festgelegt werden.

Naturräumliche Zuordnung

Von Müller gibt es für die Anwendung keine naturräumlichen Einschränkungen. Nach der Umsetzung für HQx_meso_CH dürfte es die grössten Probleme in grossen Höhen (ungünstige Angaben zur Landnutzung) und in stark überbauten Gebieten geben. Es wird empfohlen, bei diesen Bedingungen die Parameter besonders gründlich zu überprüfen.

Notwendige Inputdaten

Das Modell benötigt als Inputdaten die Einzugsgebietsgrösse, den α - und den ψ -Wert. Die Modellparameter werden aus den bereitstehenden Datensätzen berechnet.

Fallbeispiel

$$\alpha \text{ aus HQx_meso_Ch} = 34.7$$

$$\psi \text{ aus HQx_meso_CH} = 0.20$$

$$Q_{\max} = 34.7 \cdot 0.2 \cdot 58.7^{2/3} = 105 \text{ m}^3/\text{s}$$

Güte der Resultate

Die Korrelationskoeffizienten sind gegenüber den bisher besprochenen Modellen markant angestiegen. Das heisst, dass die Zuverlässigkeit für eine Hochwasserabschätzung zugenommen hat. Der Einbezug eines Niederschlagsparameters und die Bildung differenzierterer Gebietscharakterklassen erhöht die Genauigkeit der Abschätzungen. Die grossen Problemzonen sind aber auch bei Müller-Zeller vorhanden.

Die Einführung der Niederschlagszonen geht in Richtung Bildung von homogeneren Regionen, wie sie bei den bereits vorgestellten Modellen vorgeschlagen wurde.

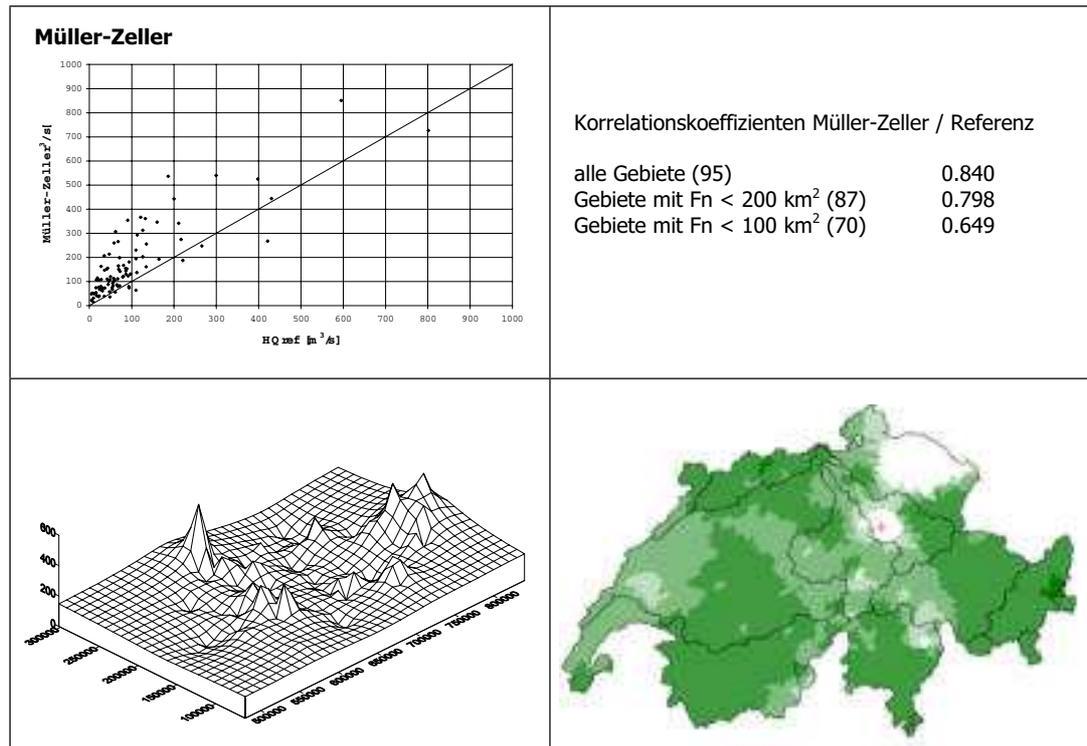


Abb. 2.10 Resultate der Hochwasserabschätzung nach Müller-Zeller.

ol: Abschätzungen nach Müller-Zeller und Referenzwerte (HQ_{100})

or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})

ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.

Literatur

Müller, R. (1943): Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauung. Mitteilungen der VAW Nr. 4, Zürich.

Zeller, J. (1975): Berechnung der Abflusswassermenge. Beilage zur Vorlesung „Wildbach- und Hangverbau“, Abteilung VI, ETH Zürich.

2.2.2.5 Kölla meso

Beschreibung des Modells

Das Modell Kölla (1986) ist ein Vertreter der Laufzeitverfahren. Bei diesen Verfahren stellt man sich vor, dass ein Hochwasserabfluss dann maximal ist, wenn das gesamte Einzugsgebiet zum Abfluss beiträgt. Die Zeit, die verstreicht bis das geschieht, nennt man Konzentrationszeit.

Die *Rational Formula* ist die einfachste Form der Abschätzung einer Hochwasserspitze mit dem Laufzeitverfahren:

$$HQ_x = r_x(t_c) \cdot \psi_s \cdot F_n$$

mit:

HQ_x	x-jährliche Abflussspitze [m ³ /s]
r_x	x-jährliche Niederschlagsintensität [mm/h]
t_c	Konzentrationszeit des Einzugsgebietes [h]
ψ_s	Spitzenabflussbeiwert [-]
F_n	Einzugsgebietsfläche [km ²]

Das Modell von Kölla ist eine Weiterentwicklung der *Rational Formula*. Beim Vergleich der beiden Formeln erkennt man noch deren ähnliche Struktur. Der Abflussbeiwert fällt bei Kölla weg. An seine Stelle tritt eine beitragende Fläche, die sich in Abhängigkeit der Wiederkehrperiode ausdehnt.

$$HQ_x = (r_x(t_{c(x)}) + r_s - f_x) \cdot (FL_{\text{eff}(x)} + FL_b) \cdot 0.278 + Q_{\text{vgl}(x)}$$

mit:

r_x	Niederschlagsintensität [mm/h] eines Blockregens der Dauer t_c
t_c	Konzentrationszeit [h] mit $t_c = t_1 + t_2$
t_1	Benetzungszeit [h]
t_2	Laufzeit im Gerinne [h]
r_s	Schmelzwasseräquivalent der Schneedecke [mm/h]
f_x	Verluste [mm/h]
FL_{eff}	beitragende Flächen [km ²]
FL_b	befestigte Flächen [km ²]
Q_{vgl}	Abfluss aus den vergletscherten Teilen des Einzugsgebietes [m ³ /s]
0.278	Umrechnungsfaktor von [mm/h] in [m ³ /s]

Kölla (1986) hat den Ansatz folgendermassen umschrieben: „Ein Hochwasser entsteht aus einem Regen bestimmter Intensität, der auf hydraulisch an ein Gerinne angeschlossene Flächen fällt und von dort – abzüglich des Verlustanteils an den Untergrund und an die Erweiterung der gerinnenahen Sättigungszonen – zum Gerinne und schliesslich zum Kontrollquerschnitt abfließt. Hochwasserspitze, effektiv beitragende Fläche und eventuell der Verlust sind Funktion einer gewählten Jährlichkeit x“.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Das Modell Kölla meso liefert Abschätzungen für ein HQ_{20} und ein HQ_{100} .

Einzugsgebietsfläche

Kölla (1986) nennt einen Gültigkeitsbereich von 1 bis 100 km². In HQ_x _meso_CH kann das Modell Kölla meso wahlweise mit einer Abminderung des Gebietsniederschlags eingesetzt werden (das ist in der Originalarbeit nicht vorgesehen). Deshalb kann das Modell auch in Einzugsgebieten >

100 km² (bis etwa 500 km²) verwendet werden. In diesen Fällen sollte das Modell aber nur mit einer Niederschlagsabminderung eingesetzt werden. Die von Kölla (1986) angegebene Untergrenze von 1 km² sollte mit HQx_meso_CH nicht ausgereizt werden, weil die Bestimmung der Gerinnelänge auf dem digitalen Gewässernetz 1:25'000 (L+T 1999) basiert. In diesem Datensatz sind alle Gerinne digitalisiert, die in der Regel perennierend und auf der Landeskarte blau eingezeichnet sind. Nach Kölla (1986) sollten zusätzlich aber auch jene Gerinne berücksichtigt werden, die trocken fallen können; diese sind auf der Landeskarte mit einer schwarz gepunkteten Liniensignatur eingetragen. Bei kleinen Einzugsgebieten fallen diese Unterschiede zwischen perennierenden und episodischen Gerinnen ins Gewicht; sie können das Abschätzungsergebnis massgeblich beeinflussen. Deshalb wird bei der Anwendung des Modells mit HQx_meso_CH eine Untergrenze von 10 km² empfohlen.

Naturräumliche Zuordnung

Bei der Umsetzung der Landschaftscharakteristik in ein erforderliches Regenvolumen und in die Verluste spielt die Bodeneignungskarte (BFS 1980) die entscheidende Rolle (in Originalarbeit und HQx_meso_CH). In der Bodeneignungskarte geht es um die Eignung bezüglich einer landwirtschaftlichen Nutzung. Aus diesem Grund sind ab einer Höhe, in der Landwirtschaft nicht mehr betrieben werden kann auch die Daten zu den Böden nicht mehr in der für hydrologische Fragestellungen nötigen Qualität vorhanden. Für die Anwendung in diesen Höhen bekommt deshalb die Erfahrung der Hydrologinnen und Hydrologen eine nicht zu unterschätzende Bedeutung.

Notwendige Inputdaten

Das Modell benötigt als Inputdaten verschiedene Gebiets- und Niederschlagsparameter. Alle Modellparameter werden aus den bereitstehenden Datensätzen berechnet. Die Starkniederschlagsdaten stammen aus dem HADES: Die Niederschlagsintensität r_x wird von HQx_meso_CH iterativ ermittelt.

Fallbeispiel

alle Werte aus HQx_meso_CH

r_x	= 13.59	mm/h
t_c	= 4.98	h
r_s	= 1.66	mm/h
f_x	= 4.37	mm/h
FL_{eff}	= 22.00	km ²
FL_b	= 1.49	km ²
Q_{vgl}	= 0	m ³ /s

$HQ_{100} = 71 \text{ m}^3/\text{s}$

Güte der Resultate

Die Streuung der Resultate ist recht gross (vgl. Abb. 2.11, ol). In der Gegenüberstellung der Abschätzungen nach Kölla meso mit den Referenzwerten erkennt man, dass die Datenpunkte nicht ganz symmetrisch um die 1:1-Gerade verteilt sind. Man muss im Durchschnitt mit Überschätzungen von rund 25 % durch das Modell Kölla meso rechnen. Die Regionen mit starken Überschätzungen liegen gleichmässiger über die Schweiz verteilt als bei den stark von der Fläche dominierten Verfahren (Melli, Hofbauer, Kürsteiner).

Es hat sich bei den Analysen gezeigt, dass das Modell Kölla meso sehr empfindlich auf den Parameter r_x (Niederschlagsintensität) reagiert. In Regionen mit extremen Niederschlagsgradienten, beispielsweise um die Rigi (siehe Geiger et al. 1992; Tafel 2.4 im HADES), können die Differenzen beträchtlich werden. In solchen Regionen sollten zum Vergleich noch andere Modelle eingesetzt werden.

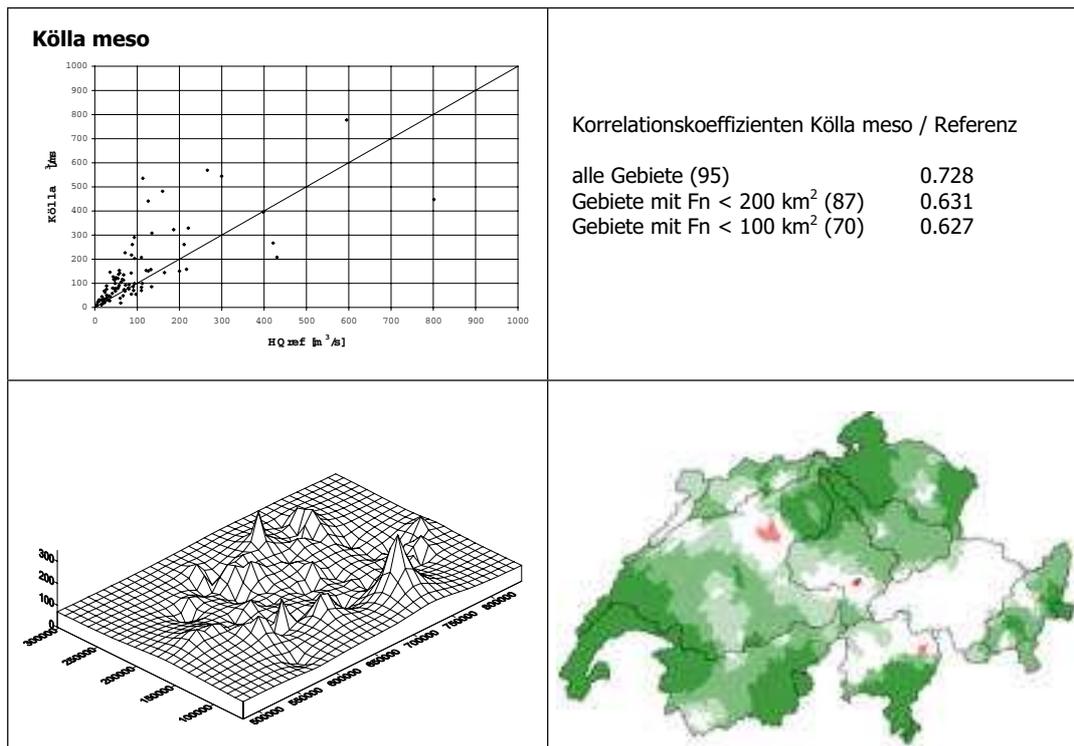


Abb. 2.11 Resultate der Hochwasserabschätzung nach Kölla meso.
 ol: Abschätzungen nach Kölla meso und Referenzwerte (HQ_{100})
 or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
 ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.

Literatur

Kölla, E. (1986): Zur Abschätzung von Hochwassern in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessungen. Mitteilungen der VAW Nr. 87, Zürich.

2.2.2.6 Kölla mod.

Beschreibung des Modells

Kölla mod. ist gleich aufgebaut wie das Modell Kölla (1986) bzw. Kölla meso. Der Unterschied liegt bei der Bestimmung einzelner Modellparameter. Manser (1996) versuchte, die subjektive Bestimmung der Landschaftscharakteristik und die damit verbundene Ermittlung des *erforderlichen Benetzungsvolumens* zu objektivieren, indem er einen direkten Zusammenhang zwischen dem erforderlichen Benetzungsvolumen und der Bodentiefe herleitet. Die Daten zur Bodentiefe entstammen der Bodeneignungskarte der Schweiz (BFS 1980). Die Bodentiefe wird nach dem in Kapitel 2.2.2.8 vorgestellten prozessorientierten Ansatz ermittelt. Im weiteren wird bei Kölla (1986) die beitragende Fläche FL_{eff} in Funktion der Gerinnelänge, bei Manser (1996) hingegen über den relativen Flächenbeitrag (Düster 1994) berechnet.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Wie beim Modell Kölla meso, Kapitel 2.2.2.5.

Notwendige Inputdaten

Das Modell benötigt als Inputdaten verschiedene Gebiets- und Niederschlagsparameter. Alle Modellparameter werden aus den bereitstehenden Datensätzen berechnet. Die Starkniederschlagsdaten stammen aus dem HADES, Tafel 2.4 (Geiger et al. 1992): Die Niederschlagsintensität r_x wird von HQx_meso_CH iterativ ermittelt.

Fallbeispiel

alle Werte aus HQx_meso_CH

$$r_x = 12.18 \text{ mm/h}$$

$$t_c = 5.83 \text{ h}$$

$$r_s = 1.66 \text{ mm/h}$$

$$f_x = 4.97 \text{ mm/h}$$

$$FL_{\text{eff}} = 23.91 \text{ km}^2$$

$$FL_b = 1.49 \text{ km}^2$$

$$Q_{\text{vgl}} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$HQ_{100} = 63 \text{ m}^3/\text{s}$$

Güte der Resultate

Die Resultate sind mit denjenigen von Kölla meso vergleichbar. Die Auswirkungen der Modellmodifikationen bei der Bestimmung des erforderlichen Benetzungsvolumens und der beitragenden Fläche sind eher von untergeordneter Bedeutung. Die Streuung der Resultate beim Vergleich von Abschätzungen und Referenzwerten ist hier etwas kleiner. Es muss mit einer durchschnittlichen Überschätzung eines HQ_{100} von rund 40 % gerechnet werden.

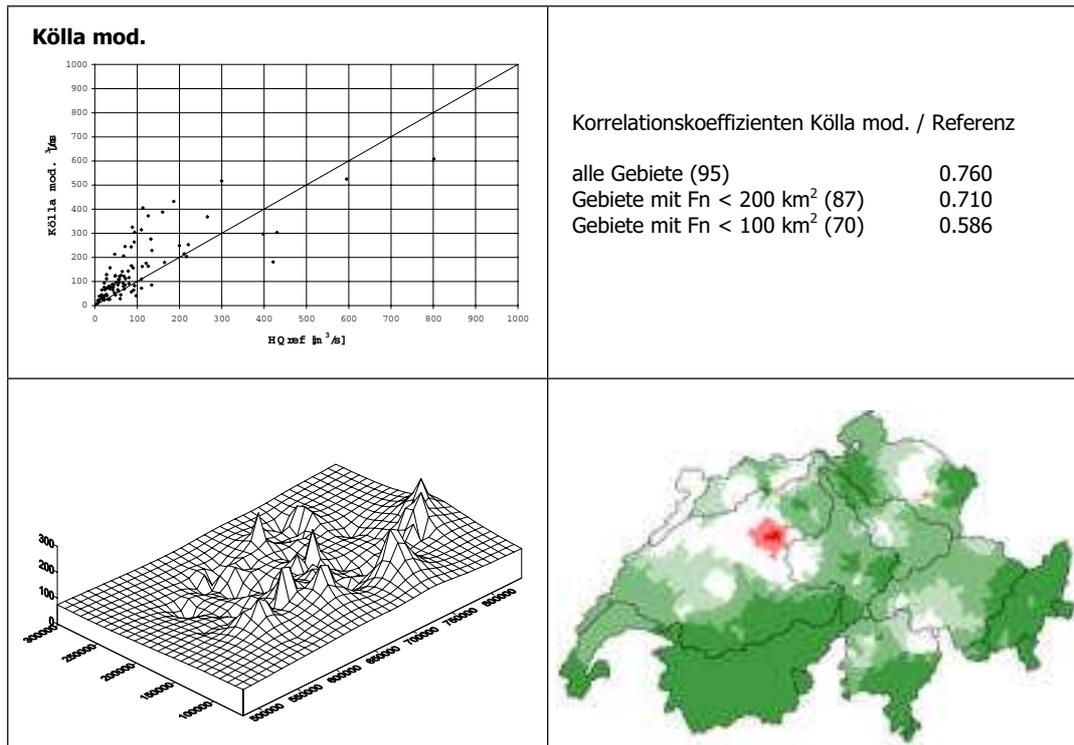


Abb. 2.12 Resultate der Hochwasserabschätzung nach Kölla mod.
 ol: Abschätzungen nach Kölla mod. und Referenzwerte (HQ_{100})
 or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
 ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.

Literatur

Kölla, E. (1986): Zur Abschätzung von Hochwassern in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessungen. Mitteilungen der VAW Nr. 87, Zürich.

Manser, S. (1996): Analyse verschiedener regionalhydrologischer Modelle zur Hochwasserabschätzung in Gebieten ohne Direktmessungen. Diplomarbeit in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Publikation Gewässerkunde Nr. 183, Bern.

2.2.2.7 GIUB'96

Beschreibung des Modells

Kan (1995) und Weingartner (1999) haben für das Modell GIUB'96 maximale Hochwasserspitzen ausgewertet, die vom ehemaligen Amt für Strassen- und Flussbau (ASF 1974) und von der LHG (Spreafico und Stadler 1986 und 1988, Spreafico und Aschwanden 1991) gesammelt wurden. Die über 700 Beobachtungen stammen aus dem Zeitraum 1869 bis 1991.

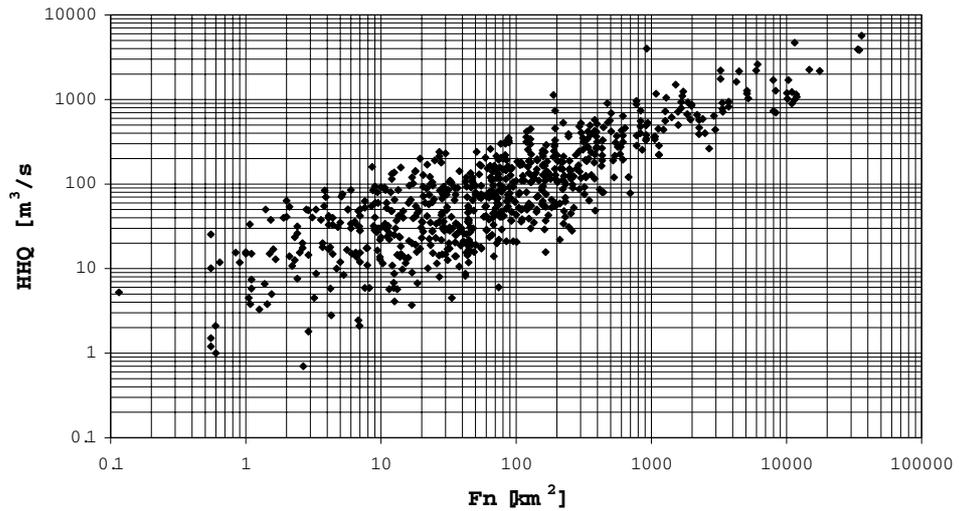


Abb. 2.13 Datengrundlage für das Modell GIUB'96.

Aus diesem gesamtschweizerischen Datenkollektiv wurden Regionen mit einem vergleichbaren extremen Hochwasserverhalten abgeleitet (vgl. Abb. 2.14; in Kan (1995) und Weingartner (1999) ist das Vorgehen ausführlich beschrieben).

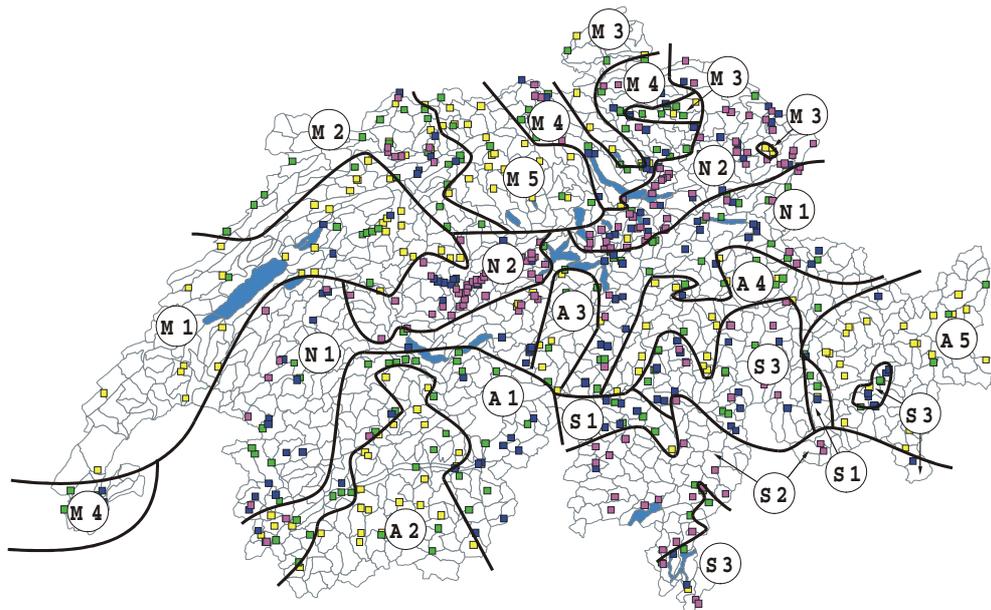


Abb. 2.14 Hochwasserregionen der Schweiz nach Kan (1995).

Für alle Regionen wurden Kennwerte bestimmt, die eine Abschätzung von 100jährigen Hochwasserspitzen erlauben. Weingartner (1999) präsentiert mit GIUB'96 zwei Modelle: beim einen Ansatz ist der Spitzenabfluss eine Funktion der Einzugsgebietsfläche (dieses Modell heisst im Folgenden GIUB'96 (Fn)), beim anderen Ansatz ist der Spitzenabfluss eine Funktion des mittleren Jahresabflusses (GIUB'96 (MQ)).

$$HQ_{100} = a \cdot Fn^b \quad \text{und} \quad HQ_{100} = a \cdot MQ^b$$

mit:

HQ ₁₀₀	100jährige Abflussspitze [m ³ /s]
a, b	regionenspez. Parameter [-]
MQ	mittl. Jahresabfluss [m ³ /s]
Fn	Einzugsgebietsfläche [km ²]

Vom Aufbau her gleichen diese Funktionen denjenigen von Melli (1924) und Kürsteiner (1917). Bei ihnen wurde aber ein genereller Ansatz für die ganze Schweiz formuliert, während bei GIUB'96 möglichst homogene Regionen gebildet wurden, die es erlauben, regionenspezifische Parameter herzuleiten. Zudem ist die Datengrundlage beim Modell GIUB'96 um einiges besser als bei anderen Modellen, die älteren Datums sind.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

GIUB'96 eignet sich für die Abschätzung von 100jährigen Spitzenabflüssen.

Einzugsgebietsfläche

Weingartner (1999) liefert die Grundlagen für eine grafische Festlegung des Gültigkeitsbereichs. Für jede einzelne Region werden in einem Diagramm die Hochwasserwerte eingetragen (ähnlich wie in Abb. 2.13), die für die Berechnung der Regressionsgeraden verwendet wurden. Die Punkteverteilung in den Diagrammen ist ein Indiz für den Gültigkeitsbereich. Für mesoskalige Einzugsgebiete, wie sie hier besprochen werden, ist das Modell ohne Einschränkung einsetzbar.

Naturräumliche Zuordnung

Die Hochwasserregionen sind flächendeckend für die Schweiz ausgeschieden. Das heisst, dass es auch hier keine Einschränkungen zu machen gibt. Bei einer Anwendung im Bereich von Regionsgrenzen sollte man besonders vorsichtig sein. Je nach Wahl der Region, können die Ergebnisse beträchtlich variieren.

Notwendige Inputdaten

Das Modell benötigt als Inputdaten die Einzugsgebietsgrösse oder den mittleren Jahresabfluss (MQ) und die Lage des Ausflusspunktes aus dem Einzugsgebiet (für die Bestimmung der Regionszugehörigkeit). Die Modellparameter werden aus den bereitstehenden Datensätzen berechnet oder ausgewählt. In HQx_meso_CH ist ein Modell von Weingartner und Aschwanden (1992) integriert, welches den MQ schätzt. Der geschätzte Wert kann als Vorschlag betrachtet werden und wird weiterverwendet, wenn keine besseren Angaben zum mittleren Abfluss vorliegen.

Fallbeispiel

alle Werte aus HQx_meso_CH	
HQ-Region M2	
MQ	= 1.49 m ³ /s
HQ ₁₀₀	= a · Fn ^b a = 5.98 b = 0.59
HQ ₁₀₀	= 66.1 m ³ /s
HQ ₁₀₀	= a · MQ ^b a = 37.27 b = 0.71
HQ ₁₀₀	= 49.4 m ³ /s

Güte der Resultate

Die Modelle GIUB'96 ($HQ_{100} = f(Fn)$ und $HQ_{100} = f(MQ)$) gehören zu den zuverlässigsten Modellen für mesoskalige Einzugsgebiete, die im Rahmen dieser Untersuchung vorgestellt werden und dies trotz ihres einfachen Aufbaus. Die Streuung ist sehr klein (vgl. Abb. 2.15 und 2.16, ol) und auch das allgemeine Niveau der Pseudo-3D-Grafik liegt in z-Richtung nahe bei Null. Das heisst, dass die abgeschätzten Werte sehr gut 100jährigen Spitzenabflüssen entsprechen.

In grossen Teilen der Schweiz gibt es weder bedeutende Über- noch bedeutende Unterschätzungen der Referenzwerte (vgl. Abb. 2.15 und 2.16, ur).

Das Modell GIUB'96 (Fn) ist bezüglich Aufbau noch einfacher als das Modell nach Kürsteiner. Mit der Bildung von Hochwasserregionen ist es aber gelungen, die Genauigkeit der Ergebnisse sehr stark zu erhöhen.

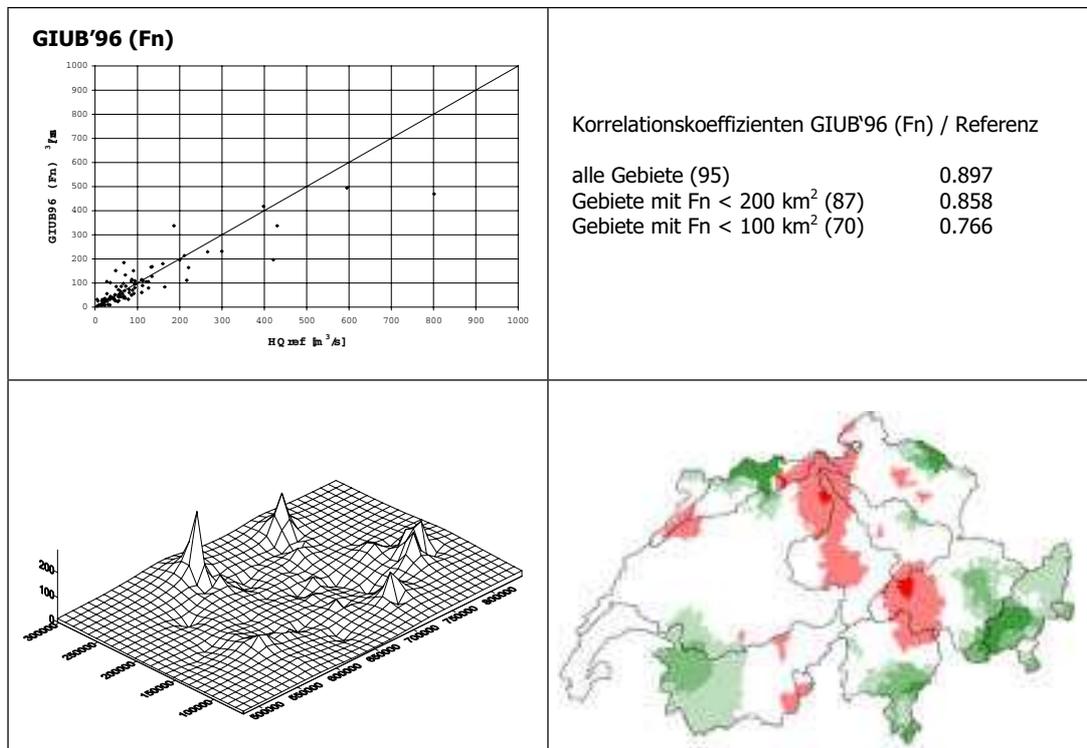


Abb. 2.15 Resultate der Hochwasserabschätzung nach GIUB'96 (Fn).

ol: Abschätzungen nach GIUB'96 (Fn) und Referenzwerte (HQ_{100})

or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})

ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.

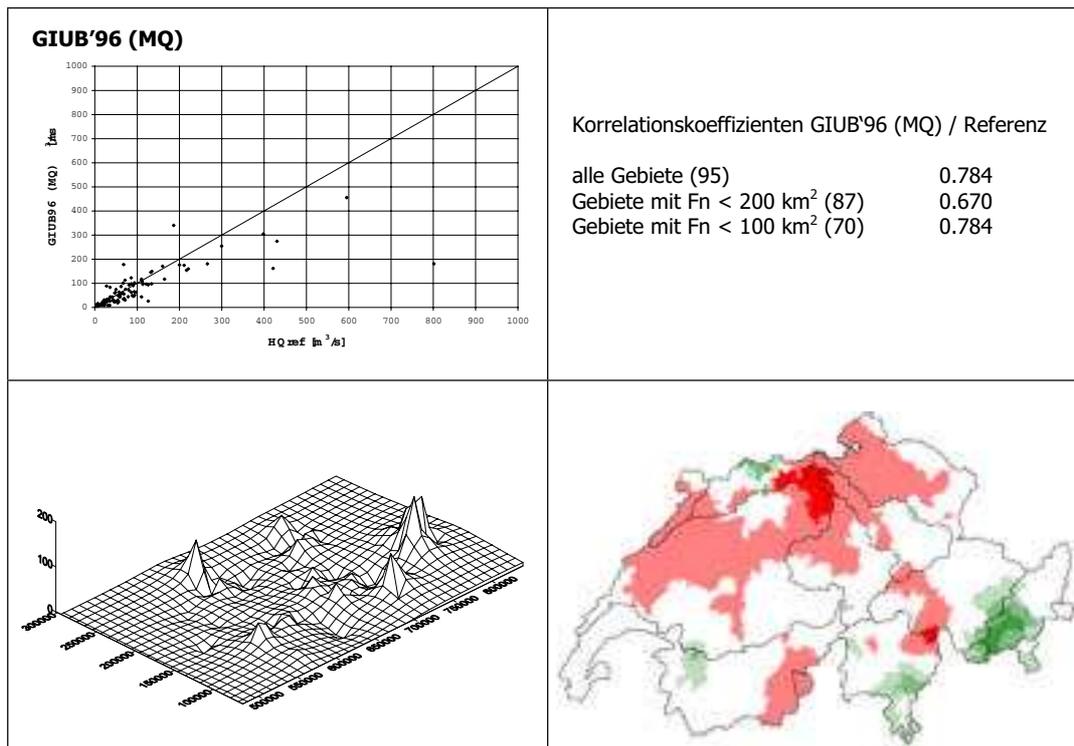


Abb. 2.16 Resultate der Hochwasserabschätzung nach GIUB'96 (MQ).
 ol: Abschätzungen nach GIUB'96 (MQ) und Referenzwerte (HQ_{100})
 or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
 ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.

Literatur

ASF (Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau) (1974): Die grössten bis zum Jahre 1969 beobachteten Abflussmengen von schweizerischen Gewässern. Bern.

Kan, C. (1995): Die höchsten in der Schweiz beobachteten Abflussmengen bis 1990. Diplomarbeit in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Publikation Gewässerkunde Nr. 169, Bern.

Weingartner, R., Aschwanden, H. (1992): Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.2, Bern.

Weingartner, R. (1999): Regionalhydrologische Analysen – Grundlagen und Anwendungen. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 37, Bern.

2.2.2.8 Momente

Beschreibung des Modells

Beim Modell Momente von Düster (1994) werden die Parameter *mittlere Jahreshochwasserspitze* (mHQ) und *Standardabweichung der Jahreshochwasserspitzen* (s(HQ)) der hydrologischen Grundgleichung mit Gebietsparametern geschätzt.

$$HQ_x = mHQ + K_x \cdot s(HQ)$$

mit:

mHQ	mittlere Jahreshochwasserspitze [m ³ /s]
s(HQ)	Standardabweichung der Jahreshochwasserspitzen [m ³ /s]
K _x	f(Jährlichkeit, Verteilungsfunktion) [-]

Ein erster auf der hydrologischen Grundgleichung basierender Ansatz wurde in der Schweiz von Sydler, Widmoser und Zollinger (1982) entwickelt. Sie verwendeten zur Schätzung der beiden Momente die Parameter Fläche, Umfang, Schwerpunktabstand, Tallänge und die Flussdichte. Düster hat zwölf Jahre später mit verbesserten Datengrundlagen die Momente neu berechnet:

$$mHQ = f(F_n, V_{gl}, N, I_m, O_{ed}, W_{SV})$$

$$s(HQ) = f(F_n, N, W_{SV})$$

mit:

F _n	beitragende Fläche [km ²]
V _{gl}	Vergletscherungsgrad [%]
N	Jahresniederschlag [mm]
I _m	mittlere Hangneigung [°], rFb
O _{ed}	Oedlandanteil [%], rFb
W _{SV}	mittl. Wasserspeichervermögen [mm], rFb
	rFb: relativer Flächenbeitrag [0..1]

Da sich in der Zwischenzeit die Datenlage weiter verbessert hat, wurden die Modellparameter neu geeicht, so dass gegenüber den Vorgaben von Düster (1994) gewisse Abweichungen bestehen.

Die Gebietsparameter werden mit dem sogenannten relativen Flächenbeitrag gewichtet. Dabei wird davon ausgegangen, dass alle Teile des Einzugsgebietes zu einem Hochwasserabfluss beitragen, jedoch mit unterschiedlichem Gewicht. Je grösser die Hangneigung und je kleiner die Entfernung vom Gewässernetz ist, desto grösser wird der relative Beitrag zu einem Hochwasserereignis. Dieser relative Beitrag einer Raumeinheit dient als Gewichtungsfaktor zur Berechnung der Gebietskenngrössen.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Das Modell Momente ist bezüglich Jährlichkeit äusserst flexibel. Bei einer Abschätzung eines HQ_x bleiben die Momente mHQ und s(HQ) konstant. Der Koeffizient K_x hingegen ist abhängig von der Wiederkehrperiode x und der Verteilungsfunktion und kann für beliebige x bestimmt werden. Düster (1994) verwendete für seine Berechnungen stets die Gumbel-Verteilung.

Einzugsgebietsfläche

Das Modell wurde in 95 schweizerischen Einzugsgebieten mit einer Fläche zwischen 10 und 500 km² geeicht. Es wird deshalb empfohlen, das Modell nur unter diesen Bedingungen einzusetzen.

Naturräumliche Zuordnung

Das Modell sollte nicht in Einzugsgebieten eingesetzt werden, die über ganz extreme Parameterkombinationen verfügen (z.B. städtische Einzugsgebiete oder stark vergletscherte Gebiete). Die Verteilung der Gebietsparameter der Eichgebiete gibt an, in welchem Bereich sich die Gebietsparameter der Einzugsgebiete bewegen sollten, für die Abschätzungen vorzunehmen sind.

Notwendige Inputdaten

Das Modell benötigt als Inputdaten verschiedene Gebiets- und Niederschlagsparameter. Alle Modellparameter werden aus den bereitstehenden Datensätzen berechnet.

Fallbeispiel

alle Werte aus HQ_{x_meso_CH}

$$mHQ = 23.58 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$s(HQ) = 10.16 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$K_x = 3.137$$

$$HQ_{100} = 55 \text{ m}^3/\text{s}$$

Güte der Resultate

Die Abschätzungen zeigen im Vergleich mit den Referenzwerten eine relativ kleine Streuung (vgl. Abb. 2.17, ol). Die Datenpunkte sind scheinbar zufällig um die Gerade verteilt. Das heisst, es gibt keine systematischen Unter- oder Überschätzungen. Das sieht man auch sehr gut am tiefen Niveau in z-Richtung der Pseudo-3D-Grafik in der Abbildung 2.17 (ul). Das eben skizzierte Bild zeigen auch die klassierten relativen Abweichungen in Abbildung 2.17 (ur). Ein sehr grosser Flächenanteil der Schweiz liegt in der neutralen Klasse (symmetrisch um Null) und es gibt wenige Flächen mit grossen Unter- beziehungsweise Überschätzungen.

Die mit dem relativen Flächenbeitrag gewichteten Parameter können nicht *von Hand* bestimmt werden. Das hat den Vorteil, dass bei ihnen keine subjektive Komponente einfließen kann. Auf der anderen Seite ist es kaum mehr möglich abzuschätzen, ob plausible Werte für ein Einzugsgebiet erhoben wurden.

Weil es in der Schweiz eine beschränkte Zahl von Einzugsgebieten gibt, die sich für hydrologische Studien eignen, mussten bei der Modellbeurteilung Gebiete verwendet werden, die Düster (1994) auch schon für die Eichung des Modells Momente berücksichtigt hat. Auch bei der neuen Eichung der Regressionsgleichungen konnte diesem Problem nicht ausgewichen werden. Die Modellvergleiche bei Momente sind also nicht unabhängig, sondern es handelt sich um eine Insample-Überprüfung. Bei weiteren Modellen, die hier vorgestellt werden, gilt dieser Punkt zwar auch, aber nicht in demselben Ausmass wie beim Modell Momente.

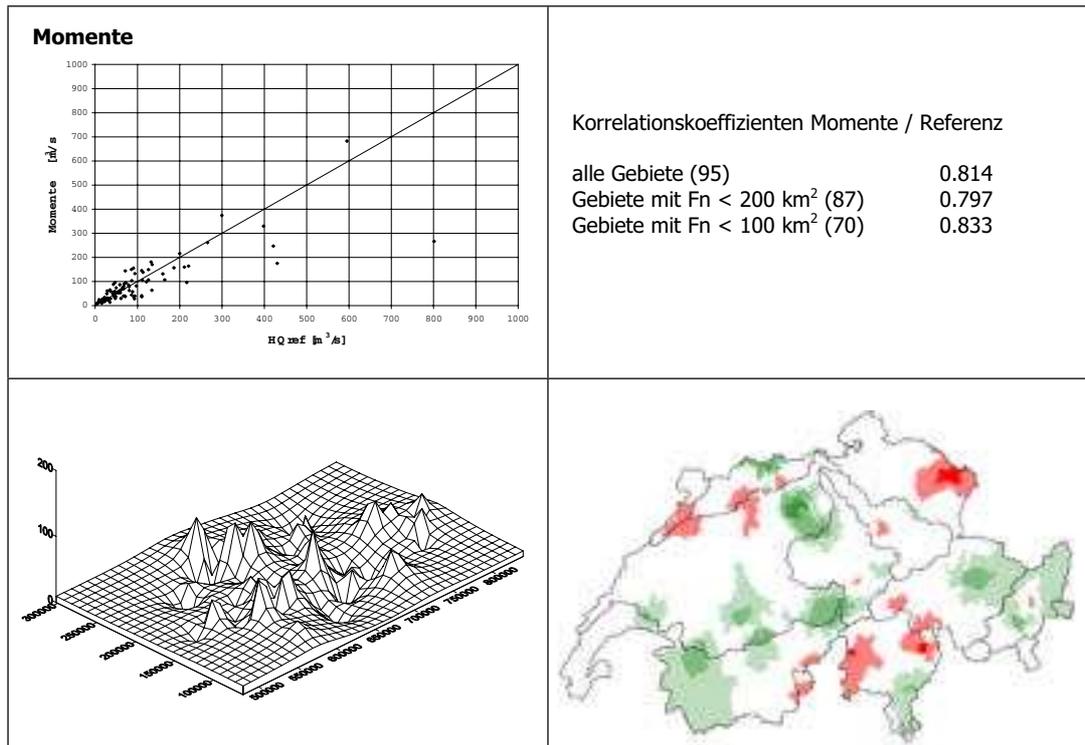


Abb. 2.17 Resultate der Hochwasserabschätzung nach Momente.

ol: Abschätzungen nach Momente und Referenzwerte (HQ_{100}).

or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})

ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.

Literatur

Düster, H. (1994): Modellierung der räumlichen Variabilität seltener Hochwasser in der Schweiz. Geographica Bernensia G44, Bern.

Sydler, P.-A., Widmoser, P., Zollinger, F. (1982): Statistische Untersuchungen von Extremabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Institut für Kulturtechnik, ETHZ.

2.2.2.9 BaD7

Beschreibung des Modells

Bei BaD7 von Barben (2001) wurden bestehende Ansätze von Düster (1994) mit neuen Ideen kombiniert und zu einem neuen Modell zusammengesetzt. Das Modell geht von der *mittleren spezifischen Jahreshochwasserspitze* und der *Standardabweichung der spezifischen Jahreshochwasserspitzen* in 95 über die Schweiz verteilten Referenzgebieten aus. Mit diesen beiden Parametern kann über die hydrologische Grundgleichung (vgl. Kapitel 2.2.2.8) eine spezifische Hochwasserspitze mit beliebiger Wiederkehrperiode berechnet werden.

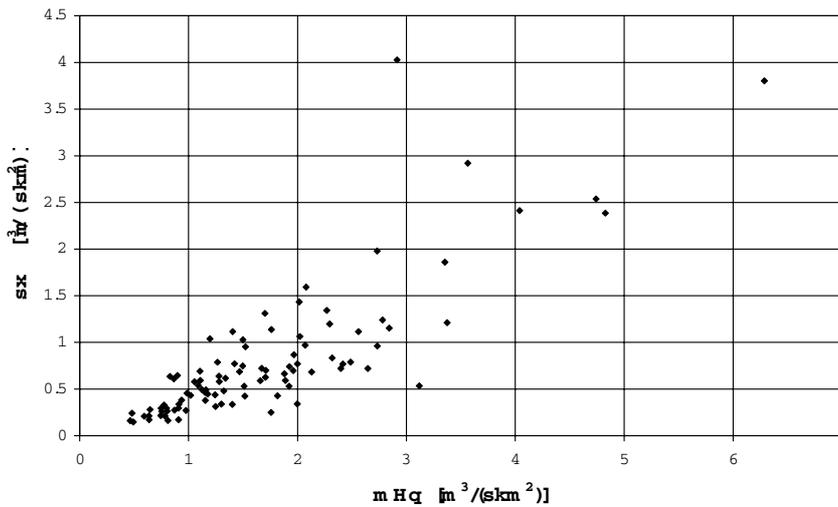


Abb. 2.18 Die Momente der spezifischen Jahreshochwasserspitzen der 95 Referenzgebiete.

Die beiden Momente eines ungemessenen Gebietes erhält man durch Mittelung der Momente der sechs ähnlichsten Gebiete. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

Mit den standardisierten Gebietsparametern³

Elongationsfaktor	[-]
Gletscheranteil	[%]
Jahresniederschlag	[mm]
Neigung	[°], rFb
Ödlandanteil	[%], rFb
Versiegelungsgrad	[%]
Weideanteil	[%], rFb
	rFb: relativer Flächenbeitrag [0..1]

spannt man einen siebendimensionalen Raum auf (daher der zweite Teil des Namens **D7**). Das ungemessene Einzugsgebiet bildet mit seinen Gebietsparametern den Startpunkt in diesem Raum. Vom Startpunkt aus wird zu allen 95 Datenpunkten der Referenzstationen die euklidische Distanz berechnet. Die mHq und sx (vgl. Abb. 2.18) der sechs Gebiete mit den kleinsten euklidischen Distanzen zum gesuchten Gebiet werden anschliessend gemittelt und damit eine spezifische Hochwasserspitze mit beliebiger Wiederkehrperiode berechnet.

³ Es sind die Gebietsparameter, die Düster (1994) für das Modell Fuzzy verwendet hat.

Ein grosser Vorteil dieses Modells ist seine hohe Flexibilität. Die Liste der Referenzgebiete kann erweitert werden, ohne dass sich dabei etwas am Modell ändert. Das Modell muss nicht geeicht und kann für beliebige Wiederkehrperioden verwendet werden.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Das Modell BaD7 ist bezüglich Jährlichkeit (wie das Modell Momente) äusserst flexibel. Bei einer Abschätzung eines HQ_x bleiben die Momente mHQ und $s(HQ)$ konstant. Der Koeffizient K_x ist hingegen abhängig von der Wiederkehrperiode und der Verteilungsfunktion und kann für beliebige x bestimmt werden.

Einzugsgebietsfläche

Das Modell wurde mit Daten aus 95 mesoskaligen Einzugsgebieten entwickelt. Es ist deshalb zu empfehlen, diesen Rahmen nicht zu verlassen.

Naturräumliche Zuordnung

Das Modell sucht in einem bestehenden Pool die sechs ähnlichsten Einzugsgebiete. Es liefert also nur dann vernünftige Werte, wenn die Parameterkombination des fraglichen Einzugsgebietes auch im Pool einigermaßen vertreten ist. Das heisst, es sollte nicht in Einzugsgebieten eingesetzt werden, die über ganz extreme Parameterkombinationen verfügen.

Notwendige Inputdaten

Das Modell benötigt als Inputdaten verschiedene Gebiets- und Niederschlagsparameter. Alle Modellparameter werden aus den bereitstehenden Datensätzen berechnet.

Fallbeispiel

alle Werte aus HQx_meso_CH	
Elongationsfaktor	= 0.0853
Gletscheranteil	= 0.0 %
Jahresniederschlag	= 1374 mm
Neigung	= 6.7 °, rFb
Ödlandanteil	= 0.1 %, rFb
Versiegelungsgrad	= 2.5 %
Weideanteil	= 0.0 %, rFb

$$HQ_{100} = 58 \text{ m}^3/\text{s}$$

Güte der Resultate

Die Streuung der Datenpunkte bei der Gegenüberstellung der Abschätzungen mit den Referenzwerten ist relativ klein und der lineare Zusammenhang ziemlich gross (vgl. Abb. 2.19, ol resp. or). Die Werte scheinen zufällig um die Gerade verteilt zu sein. Das heisst, dass die Abschätzungen als HQ_{100} bezeichnet werden können.

Die Modellgüte kann verbessert werden, wenn es gelingt, zusätzliche zuverlässige Stationen in die Liste mit den Referenzstationen aufzunehmen (vgl. *Beschreibung des Modells*). Dabei sollte der Pool mit Einzugsgebieten ergänzt werden, die über seltene Parameterkombinationen verfügen. Damit würde das Spektrum breiter und die Zuordnung der sechs ähnlichsten Gebiete besser abgestützt.

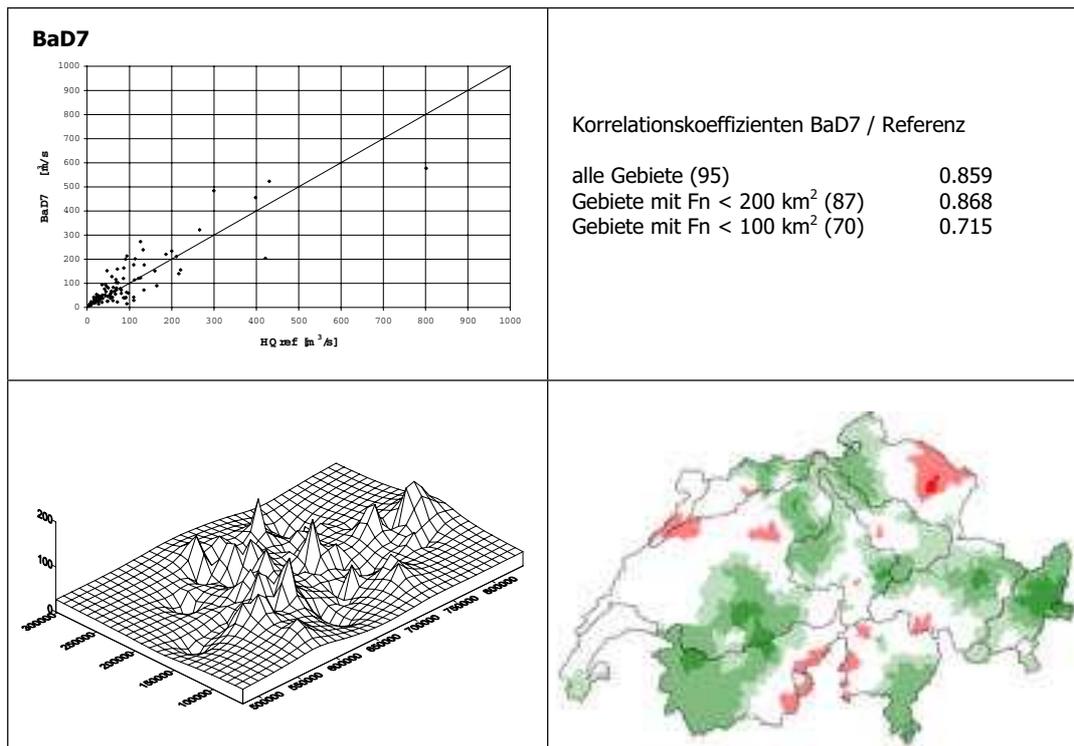


Abb. 2.19 Resultate der Hochwasserabschätzung nach BaD7.
 ol: Abschätzungen nach BaD7 und Referenzwerte (HQ_{100}).
 or: Korrelationskoeffizienten Abschätzungen / Referenzwerte (HQ_{100})
 ul, ur: Relative Abweichungen von den Referenzwerten in Prozent.

Literatur

- Barben, M. (2001):** Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in mesoskaligen Einzugsgebieten. Dissertation am Geographischen Institut der Universität Bern, Bern.
- Düster, H. (1994):** Modellierung der räumlichen Variabilität seltener Hochwasser in der Schweiz. Geographica Bernensia G44, Bern.

2.2.3 Modellvergleich

Im Kapitel 2.2.2 werden alle im Rahmen dieser Untersuchung analysierten Modelle einzeln vorgestellt. Dabei werden kaum Quervergleiche oder vergleichende Interpretationen gemacht. Das vorliegende Kapitel 2.2.3 soll nun diese Lücke schliessen, indem die Einzelergebnisse zu Übersichten zusammengetragen werden. In Abbildung 2.20 sind die Pseudo-3D-Grafiken, welche die relativen Abweichungen in Prozent darstellen, gesamthaft ausgewiesen. Es muss darauf geachtet werden, dass sich der Massstab der z-Achse (rel. Abweichungen) von Modell zu Modell ändern kann. Abbildung 2.21 zeigt die Übersicht der klassierten relativen Abweichungen, und Tabelle 2.10 enthält eine Zusammenstellung verschiedener statistischer Masszahlen, mit denen sich Qualität oder Eignung der Modelle beurteilen lassen. Grundlage zur Tabelle 2.10 bilden die mittleren relativen Abweichungen der 1062 Basisgebiete. Diese Abweichungen wurden – ausgehend von den 95 Referenzstationen – mit interpolierten Fehlertopographien bestimmt.

Diese Quervergleiche zwischen den Modellen sollen insbesondere Antworten auf folgende Fragen geben:

- a) Gibt es **qualitative Unterschiede** bei der Anwendung von Hochwasser-Abschätzmodellen in der Schweiz?
- b) Gibt es – geografisch gesehen – **Problemregionen**, wo alle Modelle schlechte Abschätzungen liefern?
- c) Schneiden einzelne Modelle im Vergleich so schlecht ab, dass man sie generell **nicht empfehlen** kann?

a) Qualitative Unterschiede

Wie würde die ideale Oberfläche in Abbildung 2.20 aussehen? Es wäre eine Ebene auf dem Niveau 0 in z-Richtung. Das würde bedeuten, dass die 95 Abschätzungen eines Modells genau den Referenzwerten entsprächen. Dass dies unmöglich zu realisieren ist, ergibt sich schon aus den verschiedenen Unsicherheiten bei der Bestimmung der Referenzwerte (vgl. Kapitel 1.2.2).

Die Frage wird trotzdem gestellt: Welche Modelle kommen der Idealvorstellung am nächsten? Für die Beschreibung der idealen Oberfläche gibt es zwei Kriterien: das **Niveau** und die **Form**. Wenn die Form stimmt, ist das Niveau kein Problem. Denn dann wäre das Verhältnis zwischen Abschätzung und Referenzwert bekannt, und die Abschätzung könnte durch Multiplikation mit einer Konstanten sehr leicht korrigiert werden. Wegen der unterschiedlichen Zielgrössen der Modelle (Q_{\max} bei Melli, Hofbauer, Kürsteiner, Müller-Zeller und HQ_{100} resp. HQ_x bei Kölla meso, Kölla mod., GIUB'96, Momente, BaD7) sind grosse Unterschiede beim Niveau zu erwarten.

Niveau: Die grössten Abweichungen von den Referenzwerten (HQ_{100}) haben erwartungsgemäss die Vertreter mit der Zielgrösse Q_{\max} (vgl. Tab. 2.10). Angeführt wird die Gruppe von Melli mit rund 350 % mittlerer relativer Abweichung. Auf der anderen Seite des Vergleichs stehen die Modelle mit kleinen mittleren relativen Abweichungen. Hierzu gehören insbesondere GIUB'96 (Fn), GIUB'96 (MQ) und das Modell Momente.

Form: Aussagen zur Form können mit der Standardabweichung und mit der maximalen Differenz (Maximum - Minimum) gemacht werden. Modelle mit einer kleinen Standardabweichung sind zuverlässig, Modelle mit einer grossen Standardabweichung unsicher. In diesem Sinn sind GIUB'96 (MQ), Momente und BaD7 die zuverlässigsten, Melli und Hofbauer die unzuverlässigsten Modelle. An der Standardabweichung kann sehr schön aufgezeigt werden, wie ein Modell mit der Integration zusätzlicher Parameter verbessert werden kann. Melli verwendet als einzigen Parameter die Einzugsgebietsfläche (Standardabweichung = 220), Hofbauer und Kürsteiner arbeiten zusätzlich mit der Hangneigung (212; 112) und bei Müller-Zeller werden noch die Vegetation und der Starkniederschlag integriert (104).

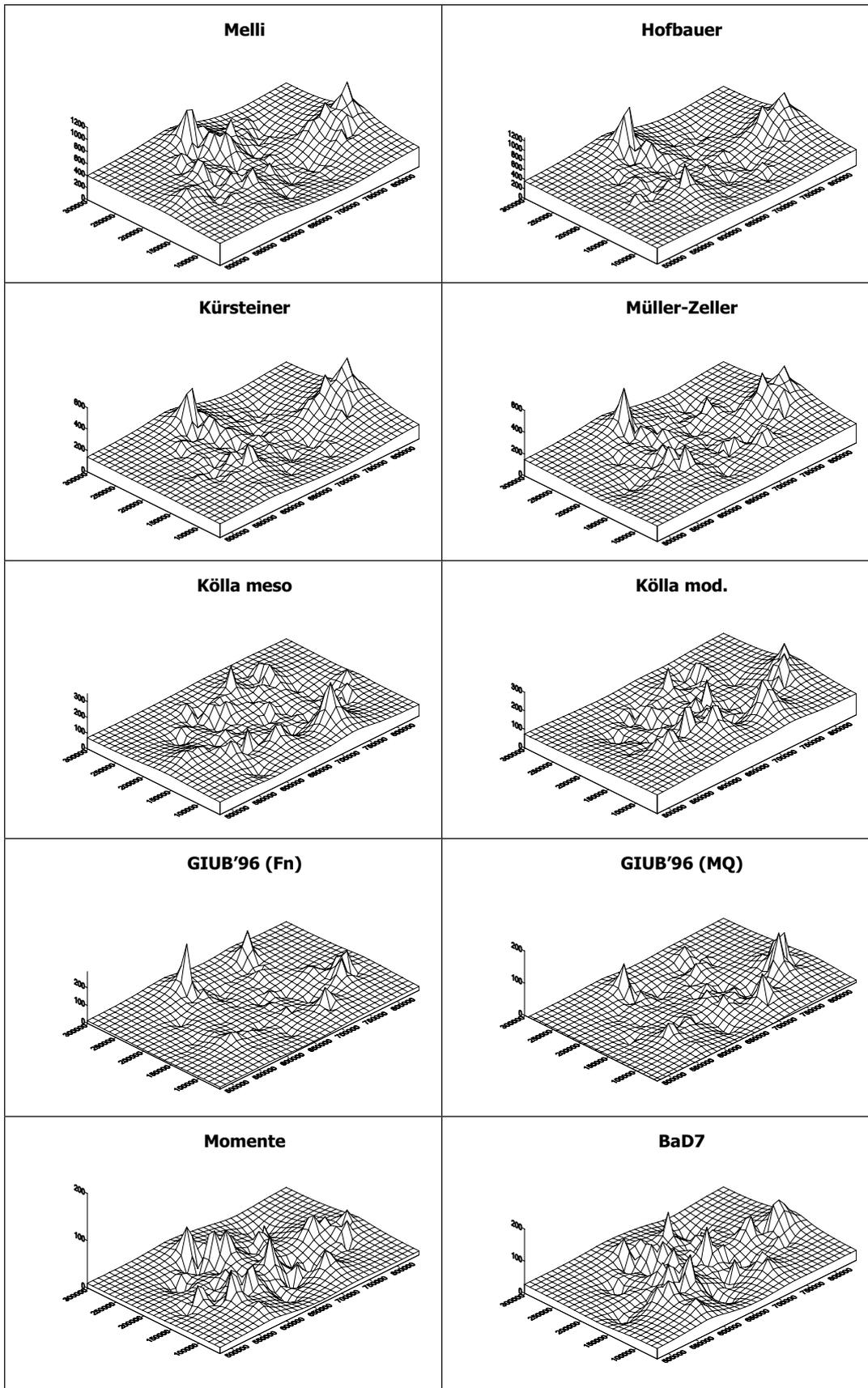


Abb. 2.20 Relative Abweichungen von den Referenzwerten [%]. Übersicht.

Tab. 2.10 Statistische Masszahlen zu den relativen Abweichungen [%] der 1062 Basisgebiete.

	Melli	Hofbauer	Kürsteiner	MüllerZeller	Köllameso	Köllamod.	GIUB (Fn)	GIUB (MQ)	Momente	BaD7	Mittel ¹
Minimum	-31	-19	-57	-25	-55	-51	-60	-66	-64	-67	-39
25 %-Quantil	159	158	43	75	28	40	-15	-27	-6	3	-2
Mittel	351	304	120	141	75	92	9	-8	10	31	20
Median	343	277	105	112	64	77	0	-14	9	28	14
75 %-Quantil	496	377	168	173	116	134	26	6	27	58	39
Maximum	1403	1609	662	802	352	325	478	184	145	162	300
Standardabw.	220	212	112	104	62	71	41	29	26	38	32
Max. - Min.	1434	1628	718	826	406	375	538	250	209	229	339

1 Mittel: Mittlere Abschätzung der Modelle GIUB'96 (Fn) und BaD7.

Die qualitativen Unterschiede zeigen sich auch deutlich bei den klassierten relativen Abweichungen in Abbildung 2.21. Modelle mit einem grossen Anteil weisser Flächen, das heisst ohne gravierende Unter- oder Überschätzungen der Referenzwerte, sind zuverlässig, Modelle mit viel farbigen Anteilen unzuverlässig.

b) Problemregionen

Es gibt ganz offensichtlich Regionen, in denen eine vernünftige Abschätzung der Hochwasserspitzen schwierig zu realisieren ist. Das Engadin und das Gebiet des Kantons Basel-Landschaft sind solche Regionen. Die meisten Modelle überschätzen hier die Referenzwerte deutlich (vgl. Abb. 2.20). Die in diesen Regionen festgestellten grossen Differenzen zwischen Abschätzungen und Referenzwerten können zwei Gründe haben:

- 1) In den Gebieten liegen besondere Verhältnisse vor, mit denen das Modell nicht zurechtkommt.
- 2) Die über eine theoretische Verteilungsfunktion ermittelten Referenzwerte sind mangelhaft.

In vielen Fällen ist wohl der erste Punkt für die grossen Abweichungen zwischen Abschätzung und Referenz verantwortlich. Verschiedene Beispiele haben aber gezeigt, dass auch Referenzwerte mit grösseren Unsicherheiten belegt sein können. Besteht ein solcher Verdacht – z.B. bei (zu) kurzen Abflussreihen – können die hier diskutierten Modelle eingesetzt werden, um die extremwertstatistischen Analysen zu überprüfen.

Es ist schwierig bis unmöglich, die wahren Gründe für die Existenz von Problemregionen zu finden. Wenn man dies könnte, wäre man in der Lage, mit diesem Wissen weit bessere Modelle zu entwickeln.

Erwähnenswert sind die ähnlichen Muster der Modelle Melli, Hofbauer, Kürsteiner und Müller-Zeller. Hierin zeigt sich der ähnliche Aufbau dieser Modelle, bei denen die Fläche (F) den dominanten Modellparameter bildet ($Q_{\max} = a \cdot F^b$). Die durch die Berücksichtigung weiterer Parameter erzielten „Modellverbesserungen“ steigern zwar die Qualität der Abschätzungen (vgl. Tab. 2.10), sie vermögen aber die räumlichen Fehlermuster nicht entscheidend zu verändern. Die restlichen Modelle unterscheiden sich in den räumlichen Fehlermustern deutlich.

Abbildung 2.21 illustriert die Werte aus Tabelle 2.10 sehr schön. Man sieht beispielsweise, wie sich Unterschiede beim Mittelwert farblich niederschlagen. GIUB'96 (MQ) mit einer mittleren relativen Abweichung von -8 % hat in der Karte ziemlich grosse neutrale und rote Flächen, während das Modell GIUB'96 (Fn) mit einer mittleren Abweichung von 9 % bedeutend weniger rote und mehr grüne Flächen besitzt.

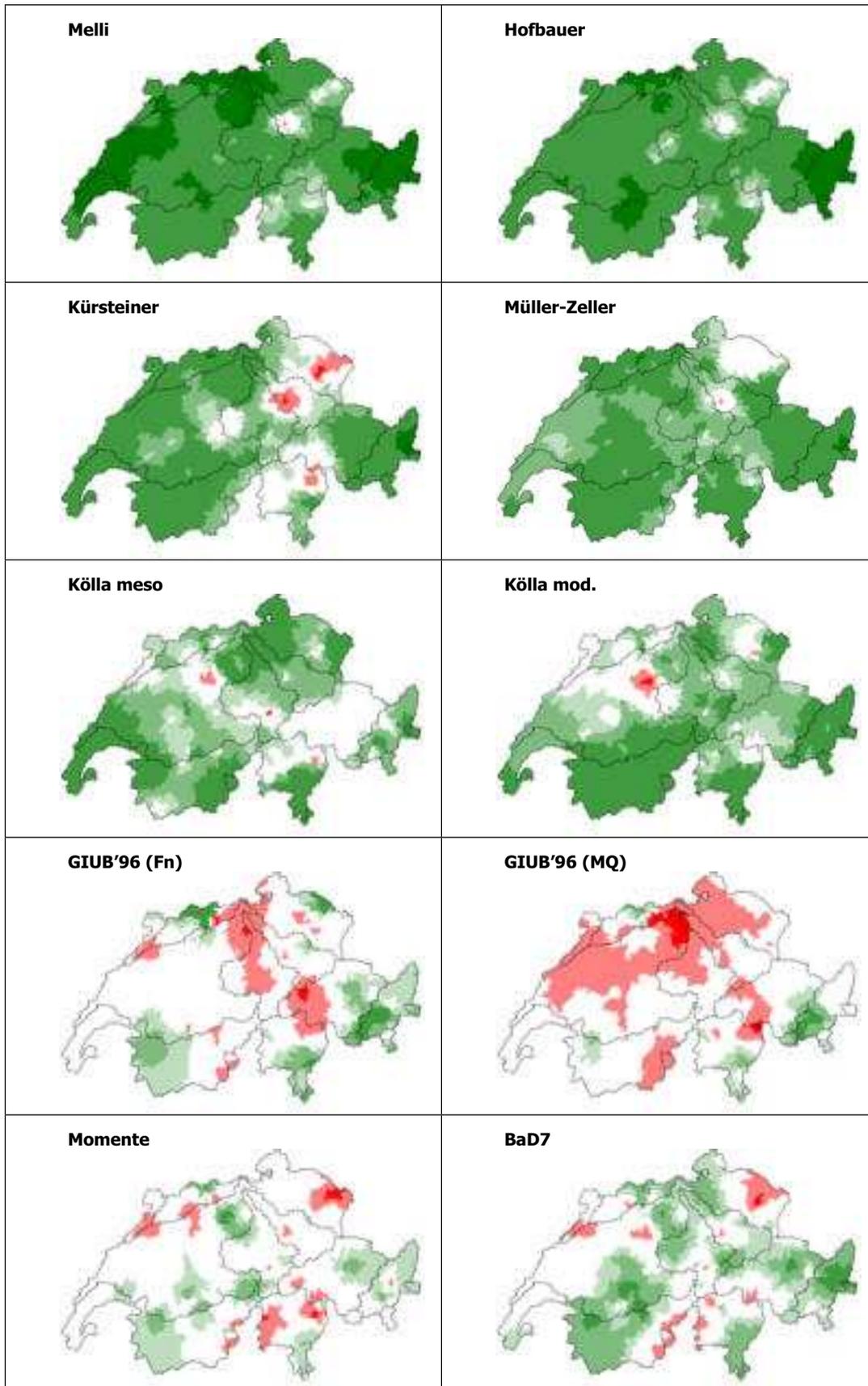


Abb. 2.21 Klassierte relative Abweichungen von den Referenzwerten [%]. Übersicht.

Auch aus der Sicht der Problemregionen (wie schon im Abschnitt *qualitative Unterschiede*) schneiden die Modelle GIUB'96, Momente und BaD7 verhältnismässig gut ab. Die Flächen mit den satten Farben in Abbildung 2.21 (Klassen mit den extremsten Abweichungen) sind klein und, was für eine gemeinsame Anwendung wichtig ist, sie befinden sich oft an anderen Stellen.

Alle Modelle haben ihre Eigenheiten, ihre Stärken und Schwächen. Je mehr sie sich im Aufbau unterscheiden, desto wahrscheinlicher ist es, dass sie nicht am gleichen Ort „versagen“. Weingartner (1998) hat schon vor der Existenz von HQx_meso_CH empfohlen, Modelle kombiniert anzuwenden (Mittelwert von zwei bis drei verschiedenen Abschätzungen). Jetzt, mit HQx_meso_CH, das mit äusserst geringem Aufwand zehn Resultate liefert, ist diese Forderung mehr als erfüllt. Das Programm liefert aber keine fixen Mittelwerte (das könnte in Einzelfällen zu gefährlichen Ergebnissen führen). Es bietet vielmehr eine Gesamtschau der Resultate, die anschliessend mit dem Einsatz von Expertenwissen interpretiert werden muss.

Dass der Ansatz der Mittelung von Modellergebnissen aber zu einer wesentlichen Verbesserung gegenüber einer Abschätzung mit einem einzigen Modell führen kann, zeigen die folgenden Erläuterungen: Die Analysen mit verschiedenen Modellkombinationen haben gezeigt, dass die Mittelung der Abschätzungen der Modelle GIUB'96 (Fn) und BaD7 zu den besten Resultaten führen: Der Korrelationskoeffizient, der die Stärke des Zusammenhangs zwischen Referenzwert und Abschätzung bestimmt, wird vor allem für die kleineren Einzugsgebiete deutlich erhöht (vgl. Abb. 2.22, ur). Die Standardabweichung der relativen Abweichungen der 1062 Basisgebiete liegt mit 32 % im Bereich der besten Einzelmodelle (vgl. Tab. 2.10).

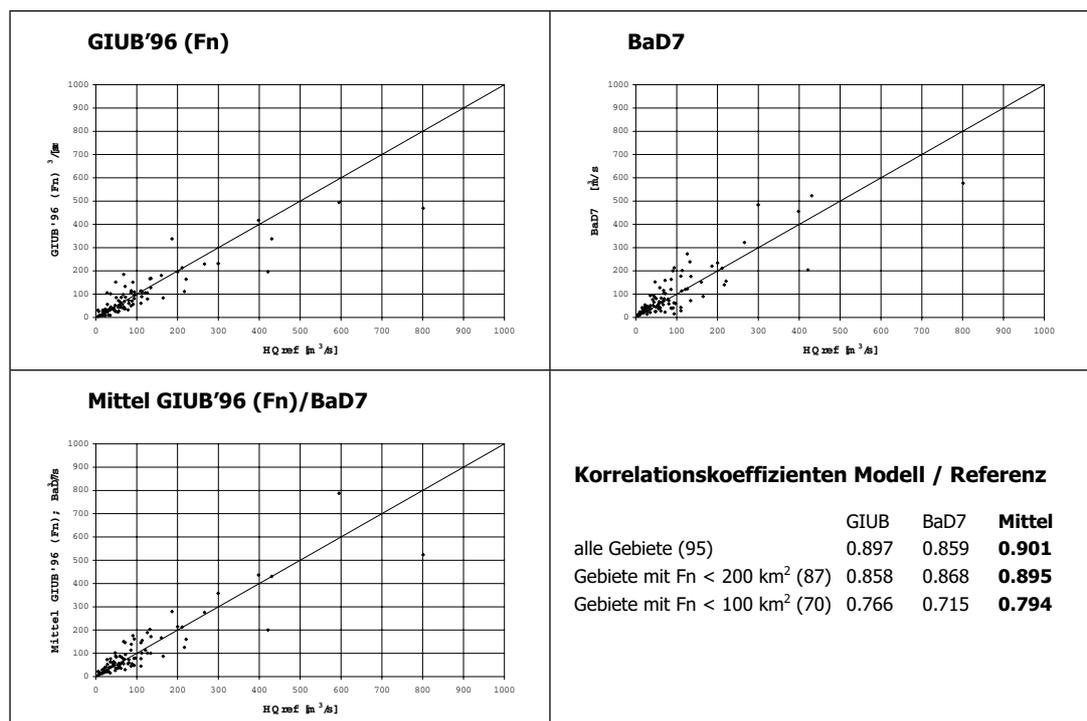


Abb. 2.22 Gegenüberstellung Modelle / Referenzwerte mit den Korrelationskoeffizienten.

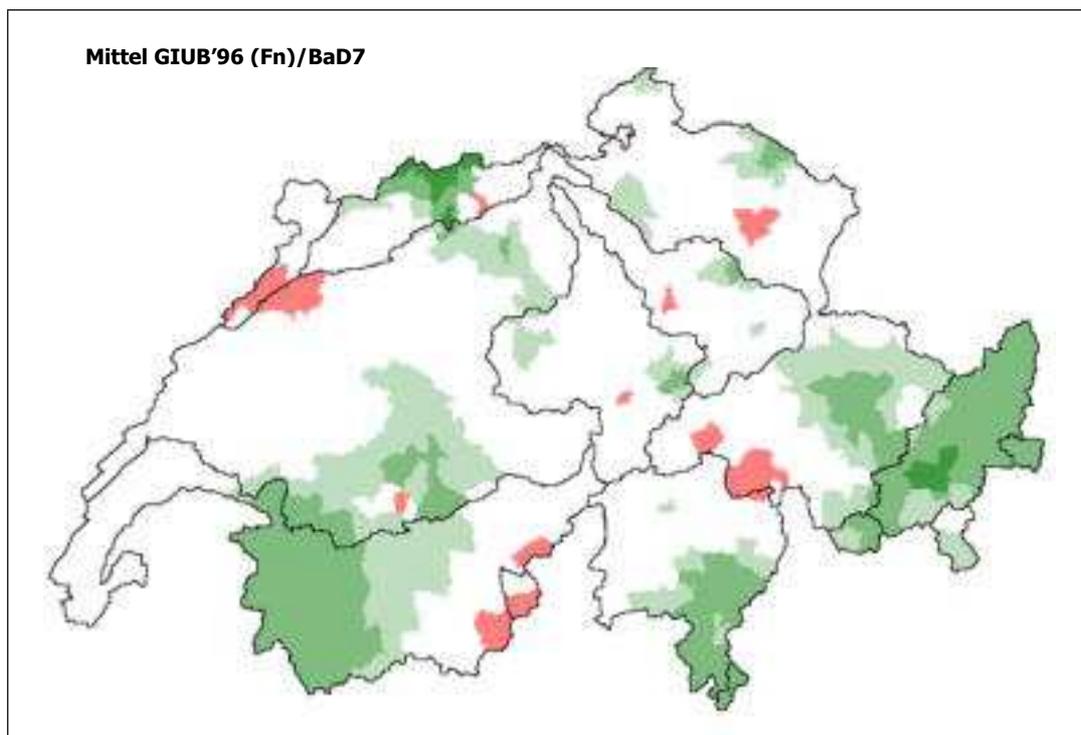


Abb. 2.23 Klassierte relative Abweichungen von den Referenzwerten [%] aus den mittleren Abschätzungen von GIUB'96 (Fn) und BaD7.

c) Eignung der Modelle

In Tabelle 2.11 ist eine grobe Wertung der Modelle für den Fall zusammengestellt, bei dem nur ein einziges Modell zur Anwendung gelangt. Diese Empfehlung wird durch den Einsatz von HQx_meso_CH relativiert, da der Berechnungsaufwand für die Modelle minimal ist. Durch die breite Palette von Abschätzungen werden die Möglichkeiten der Interpretation verbessert. Die in Tabelle 2.11 angegebenen Eignungen können dabei als „Gewichtungsfaktoren“ angesehen werden, die zeigen, welche Abschätzungen bei der Interpretation wie zu bewerten sind.

Tab. 2.11 Eignung der untersuchten Modelle.

Modell	Eignung
Melli	eher nicht geeignet
Hofbauer	eher nicht geeignet
Kürsteiner	eher nicht geeignet
Müller-Zeller	geeignet
Kölla meso	geeignet
Kölla mod.	geeignet
GIUB'96 (Fn)	gut geeignet
GIUB'96 (MQ)	gut geeignet
Momente	gut geeignet
BaD7	gut geeignet

2.3 Kleine Einzugsgebiete

2.3.1 Einleitung

In diesem Teil des Länderberichts werden 5 Modelle bezüglich ihrer Anwendbarkeit in kleinen Einzugsgebieten (< 5 km²) vorgestellt und beurteilt. Es handelt sich um die in Tabelle 2.5 zusammengestellten Hochwasserabschätzverfahren. Die Verfahren wurden in den folgenden 7 Einzugsgebieten getestet:

Tab. 2.12 Übersicht über die Gebieteigenschaften der Testeinzugsgebiete.

	Fläche [km ²]	Mittl. Höhe [m ü. M.]	Geologie	Vernässun- g	Waldanteil [%]	Freiland- anteil [%]
Erlenbach	0.75	1350	Flysch	Ja	40	60
Vogelbach	1.55	1360	Flysch	Ja	65	35
Rotenbach	1.65	1450	Flysch	Ja	15	85
Schwändlibach	1.4	1440	Flysch	Ja	30	70
Sperbelgraben	0.55	1060	Molasse	Nein	95	5
Rappengraben	0.6	1140	Molasse	Ja	35	65
Rietholzbach	3.2	800	Molasse	Ja	30	70

In den Einzugsgebieten Erlenbach, Vogelbach, Rietholzbach wurden neben den partiellen Serien auch die jährlichen Höchstwerte ausgewertet. In allen Fällen waren die Resultate der partiellen Auswertung stets kleiner als jene der jährlichen Höchstwerte.

Eine Extrapolation auf ein 100jähriges Hochwasser ist streng betrachtet nur in den vier Einzugsgebieten mit den längsten Messreihen (Rappen- und Sperbelgraben sowie im Roten- und Schwändlibach) zulässig. Der Vollständigkeit halber werden die anderen drei Gebiete im Folgenden trotzdem berücksichtigt. Es kann dabei aufgrund der Geländebeurteilungen davon ausgegangen werden, dass die Extrapolation im Erlenbach das effektive HQ₁₀₀ eher überschätzt (das gleiche gilt vermutlich auch im Rotenbach), während es im Vogelbach eher unterschätzt wird.

2.3.2 Die Modelle

2.3.2.1 Die Hochwasserformel des Institutes für Kulturtechnik (ETHZ)

Beschreibung des Modells

Der Ansatz für die Hochwasserformel ist im Bericht von Sydler et. al. (1982) ausführlich dokumentiert. Die Arbeit stellt eine Weiterführung der Untersuchungen von Widmoser (1974) dar. Als Grundlage dienten Sydler die Daten von 88 Einzugsgebieten im Alpenraum (CH, D, A) mit Flächen zwischen 0.5 und 147 km². Vier Gebiete waren kleiner als 5 km². Für jedes Gebiet wurden die zwei Parameter der Gumbelverteilung bestimmt, so dass Hochwasser von beliebiger Jährlichkeit geschätzt werden können. Mit Hilfe von multiplen Regressionen wurde der Zusammenhang zwischen verschiedenen Kombinationen von Gebietsparametern und den zwei Parametern der Gumbel-Verteilung untersucht. Dabei beschränkte man sich auf Parameter, welche sich aus der topografischen Karte herauslesen lassen.

$$HQ_x = HQP1 + k \cdot HQP2 \quad [m^3/s]$$

$$\ln(HQP1) = -0.9451 - 0.7668 \cdot \ln(F/(U \cdot a_s)) + 1.650 \cdot \ln(F/L_T) + 1.040 \cdot \ln(L_G/F)$$

$$\ln(HQP2) = -1.3700 - 0.6866 \cdot \ln(F/(U \cdot a_s)) + 1.485 \cdot \ln(F/L_T) + 1.004 \cdot \ln(L_G/F)$$

$$k = -\ln(-\ln(1-1/x))$$

HQ _x	Hochwasserabfluss der Jährlichkeit x [m ³ /s]
HQP1	Parameter der Gumbelverteilung
HQP2	Parameter der Gumbelverteilung
k	Frequenzfaktor
F	Fläche des Einzugsgebietes [km ²]
U	Umfang des Einzugsgebietes [km]
a _s	Abstand zwischen Gebietsschwerpunkt und Abflussmessstation [km]
L _T	Tallänge (= Länge zwischen Messstation und Wasserscheide) [km]
L _G	Gerinnelänge (Länge aller eingezeichneten Gerinne, Karte 1:50'000) [km]
x	Jährlichkeit des gesuchten Hochwassers [Jahre]

In einer ausführlichen Version dieser Hochwasserformel wurden in der Regression zur Bestimmung der Gumbelparameter als zusätzliche Parameter noch die mittlere Gebietshöhe, die mittlere Hangneigung, der Gletscher- und der Waldanteil berücksichtigt. Für die hier berücksichtigten kleinen Einzugsgebiete ergab die ausführliche Version der Formel deutlich zu kleine Hochwasserwerte.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Das Verfahren kann für eine beliebig gewählte Jährlichkeit angewendet werden.

Einzugsgebietsfläche

Aufgrund der für die Herleitung der Hochwasserschätzformel verwendeten Untersuchungsgebiete ist der Ansatz mindestens für Gebiete zwischen 0.5 km² < F < 150 km² anwendbar.

Naturräumliche Zuordnung

Eine naturräumliche Zuordnung ist für dieses Verfahren nicht vorgesehen. Das Verfahren basiert nur auf Parametern aus der Landeskarte.

Notwendige Inputdaten

Die notwendigen Inputdaten sind bei der Modellbeschreibung zusammengestellt.

Aufwand

Im Zeitalter des GIS dürfte der zeitliche Aufwand für die Bereitstellung der topografischen Parameter in der Grössenordnung von 1-2 Std. liegen. Die eigentliche Hochwasserberechnung z.B. in Excel wird nur wenige Minuten beanspruchen.

Güte der Resultate

In der endgültigen Formel wurden nur noch 5 Einzugsgebiets-Parameter verwendet mit dem Hinweis, dass die übrigen vernachlässigt werden könnten, da sie die Ergebnisse nicht wesentlich verbesserten. Für die kleinen Einzugsgebiete (< 5 km²) war der Unterschied jedoch z.T. enorm gross, so dass die ausführliche Variante z.T. bis zu 2-5 mal kleinere Resultate ergab.

Generell liefert das Verfahren sehr uneinheitliche Resultate: in zwei Fällen unterschätzt die Formel den statistisch ermittelten Hochwasserwert um einen Faktor 2 und in zwei anderen Einzugsgebieten überschätzt sie ihn um denselben Faktor.

Massgebende Parameter wie z.B. der Niederschlag bzw. der Boden sind nicht im Verfahren integriert. Diese Parameter lassen sich zwar nicht aus der topografischen Karte ablesen, sie sind aber heute mit verhältnismässig kleinem Aufwand aus entsprechenden Publikationen ableitbar.

Die betrachtete Hochwasserschätzformel liefert für die untersuchten kleinen Einzugsgebiete im Vergleich zu den statistisch ermittelten Hochwasserwerten sehr uneinheitliche und z.T. stark abweichende Resultate. Wir empfehlen aus diesem Grunde die Methode zur Eingabelung eines Bemessungshochwassers nicht zu verwenden.

Literatur

Sydler, P.-A., Widmoser, P., Zollinger, F. (1982): Statistische Untersuchungen von Extremabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Institut für Kulturtechnik, ETH Zürich.

Widmoser, P. (1974): Extremabflüsse aus vierzig kleinen Einzugsgebieten der Schweiz. Schweizerische Bauzeitung, 92. Jahrgang, Nr. 32, 1974, S. 757-765.

2.3.2.2 Das Verfahren nach Taubmann/Thiess/Chow

Beschreibung des Modells

Das Verfahren stützt sich auf das von Chow (1962, 1964) in den USA entwickelte Berechnungsverfahren, das einerseits auf dem SCS-Verfahren basiert und andererseits von der vom Fließzeitverfahren her bekannten Annahme ausgeht, dass ein Abflussmaximum dann auftritt, wenn die massgebende Regendauer gleich der Konzentrationszeit ist. Dabei müssen sowohl die massgebenden Starkniederschläge als auch die wichtigsten Gebietskennwerte bekannt sein.

Das Verfahren ermöglicht sowohl die Berechnung der massgebenden Hochwasserspitze als auch des entsprechenden Hochwasservolumens durch Bestimmung einer Hochwasserganglinie. Das Verfahren wurde von Thiess auf die hydrologischen Verhältnisse in Baden-Württemberg angepasst und von Taubmann in verschiedenen schweizerischen Einzugsgebieten getestet.

Nach der Fließzeitformel gilt:

$$HQ(T) = \text{Konst.} \cdot i_c \cdot A$$

wobei gilt:

HQ(T)	Hochwasser mit einer Jährlichkeit von T Jahren [m ³ /s]
Konst.	konstanter Faktor (einheitsbedingte Umrechnung: Konst. = 0.278 bei Verwendung der angegebenen Einheiten)
i_c	abflusswirksamer Nettoniederschlag [mm/h]
A	Fläche [km ²]

nach entsprechender Umformung lautet die Gleichung nach Taubmann/Thiess:

$$HQ(t,T) = X(t,T) \cdot Y(t,T) \cdot Z(t) \cdot A$$

wobei gilt:

X	Abflussfaktor, welcher identisch ist mit der abflusswirksamen Niederschlagsintensität (abhängig vom Abflussbeiwert α , welcher der <i>curve number</i> im SCS-Verfahren entspricht, abhängig von der Zeit t und der Wiederkehrdauer T)
Y	Klimafaktor, der aus dem Verhältnis der massgebenden N-Intensität vom betrachteten Einzugsgebiet zu derjenigen in Urbana (Illinois, USA) resultiert [-]
Z	Scheitelreduktionsfaktor ($Z(t) = Q(t) / HQ$), welcher eine Art Zeitbeiwert des Fließzeitverfahrens darstellt (abhängig von der Gebietscharakteristik)
A	Fläche [km ²]
t	massgebende Niederschlagsdauer (Konzentrationszeit) [h]
T	Jährlichkeit [Jahre]

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Die Nomogramme zur Bestimmung der X-Werte sind zur Zeit nur für die Jährlichkeiten 5, 10, 25, 50 und 100 Jahre vorhanden. Der Jährlichkeit des Hochwasserabflusses liegt wie bei anderen Abschätzverfahren die Jährlichkeit des Niederschlages zugrunde.

Einzugsgebietsfläche

Chow (1962) entwickelte das Verfahren für kleine ländliche Einzugsgebiete bis ca. 30 km². In Taubmann (1986) wird der Anwendungsbereich für Flächen < 300 km² und > 1 km² angegeben. Die Anwendung in Gebieten mit Flächen < 1 km² ergab in Bezug auf die maximalen Hochwasserspitzen keinen Hinweis auf Unzulässigkeit.

Naturräumliche Zuordnung

Die naturräumliche Zuordnung geschieht über die aus dem SCS-Verfahren bekannten *curve numbers*.

Notwendige Inputdaten

Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung des Abschätzverfahrens sind die Boden- bzw. Landnutzungskenntnisse, die mit Vorteil von einer Begehung stammen. Damit lässt sich der Abflussbeiwert α festlegen.

Weitere Inputdaten sind:

i_E bzw. i_U	tatsächliche Niederschlagsintensität im interessierenden Einzugsgebiet bzw. in Urbana (Illinois,USA) [mm/h]
L	Länge des Hauptgerinnes [km]
J	Mittleres Gefälle des Hauptgerinnes [m/m]
H	Geschätzte mittlere Fliesstiefe [m]

Aus diesen Parametern lassen sich die Konzentrationszeit und daraus zusammen mit der interessierenden Wiederkehrdauer die massgebenden Niederschlagsintensitäten ableiten. Der Klimafaktor Y in der umgeformten Hochwasserformel bestimmt sich aus dem Verhältnis der massgebenden Niederschlagsintensität vom betrachteten Einzugsgebiet zu derjenigen in Urbana (Illinois, USA). Der Einbezug von US-Niederschlagsdaten in eine schweizerische Hochwasserberechnung mutet jedoch etwas eigenartig an. Eine mögliche Anpassung an hiesige Verhältnisse bestünde allenfalls darin, eine schweizerische Bezugsstation einzubauen.

Aufwand

Der zeitliche Aufwand hängt etwas von der Grösse des Einzugsgebietes ab. Der reine Rechenaufwand dürfte etwa bei $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ Tag pro Klein-Einzugsgebiet liegen. Dazu kommt der Zeitaufwand für eine Gebietsbegehung, der je nach Grösse und Heterogenität des Einzugsgebietes auf etwa 1-2 Tage zu veranschlagen ist. Seit kurzem existiert auch ein Programm zur Berechnung der massgebenden Hochwasserganglinie. Damit kann der reine Rechenaufwand noch deutlich reduziert werden. Insgesamt dürfte für die Anwendung des Verfahrens ein Zeitaufwand von 1-2 $\frac{1}{2}$ Tagen resultieren.

Güte der Resultate

Das Verfahren weist für die untersuchten Klein-Einzugsgebiete eine bemerkenswerte Konstanz auf. Im Vergleich zu den anderen Hochwasserschätzverfahren liefert das vorliegende Verfahren recht konsequent Hochwasserwerte, die am unteren Rand des Streubandes liegen, welches durch die mit den verschiedenen Verfahren berechneten Schätzwerte gebildet wird.

Von den oben aufgeführten Inputdaten ist der Abflussbeiwert α der mit Abstand sensitivste Parameter. Fehlerbetrachtungen haben ergeben, dass Abweichungen von 5 Prozentpunkten beim α -Wert beim resultierenden Hochwasserabfluss bis zu 30 %ige Differenzen ergeben können. Die Tabelle, welche die Zuordnung der Abflussbeiwerte α ermöglicht, ist v.a. auf mittelländische, landwirtschaftlich genutzte Flächen ausgerichtet. Für voralpine und alpine Gebiete hingegen, welche vielfach landwirtschaftlich nicht genutzte Flächen (hydrologisch unterschiedlich reagierende Waldflächen, Nassflächen, Schutthalden etc.) aufweisen, ist sie zuwenig ausführlich.

Um die mit dem Verfahren berechneten Hochwasserwerte etwas anzuheben, könnte man gemäss Taubmann (mündliche Mitteilung) beim Parameter H, der die mittlere Fliesshöhe für einen Abfluss bei Mittelwasser repräsentiert, allenfalls den Pegelwert H für ein Hochwasser einsetzen. Dies hätte eine kürzere Konzentrationszeit, somit eine grössere massgebende NS-Intensität und in der Folge etwas grössere Hochwasserwerte zur Folge. Nach Taubmann (1984) ist der Parameter H nicht sehr sensitiv, aber durch diese Anpassung könnte sich durchaus eine Verbesserung der Resultate ergeben. Für den Erlenbach und den Vogelbach wurde der Test gemacht und für ein

Hochwasser ein realistischer Pegelwert von 1 m eingesetzt. In der Folge hat sich der 100jährige Hochwasserwert um 20 bis 30 % erhöht. Für die beiden untersuchten Einzugsgebiete kann man auch die neuen Werte noch als unteren Grenzwert für das HQ_{100} betrachten. Dabei gilt es aber klar festzuhalten, dass die Konzentrationszeiten des Verfahrens im Vergleich zu gemessenen Hochwasser-Anstiegszeiten generell zu kurz sind. Die nach der Erhöhung der Pegelwerte H resultierenden Konzentrationszeiten haben nichts mehr mit der Realität zu tun, denn sie sind viel zu kurz. Die diesbezüglichen Untersuchungen müssten aber auch noch für die anderen Kleineinzugsgebiete gemacht werden.

Bei der Ganglinienberechnung handelt es sich weniger um einen hydrologisch begründeten Ganglinien-Verlauf, als vielmehr um eine mathematische Umlegung einer bekannten Abflusssumme, bei bekanntem Maximalabfluss und zugeordneter Zeitmarke.

Im Hinblick darauf, dass zur plausiblen Festlegung von Bemessungshochwassern ohnehin mehrere vertrauenswürdige Verfahren angewendet werden sollen, schlagen wir vor, diese Methode mitzuberücksichtigen. Die Resultate dieser Methode könnten als untere Grenzwerte angesehen werden.

Literatur

Chow, V. T. (1962): Hydrologic determination of waterway areas for the design of drainage structures in small drainage basins. Bulletin No 462 University of Illinois USA.

Chow, V.T. (1964): Handbook of applied hydrology. A compendium of water-resources technology. New York.

Taubmann, K.-C.,Thiess, N. (1984): Ingenieurmäßige Anwendung verschiedener Hochwasser-Abschätzmethoden auf kleine und zusammengesetzte Einzugsgebiete am Testbeispiel der Ergolz. Muttenz.

Taubmann, K.-C. (1986): Ingenieurhydrologische Hochwasserabschätzung. Wasser, Energie, Luft, Jahrg.78, Nr. 10, S. 277-281.

2.3.2.3 Das Hochwasserabschätzverfahren nach Kölla

Beschreibung des Modells

Diese Hochwasser-Schätzmethode basiert auf dem Fliesszeitverfahren. Aufgrund neuerer Erkenntnisse über die Abflussbildung wurde die ursprüngliche Laufzeitformel wie folgt abgeändert (Kölla 1986, 1987):

- Gerinneferne Teilflächen tragen nicht zur Abflussspitze bei. Anstelle der Gesamtfläche des Einzugsgebietes geht deshalb die effektiv beitragende Fläche in Gerinnenähe ein. Diese Fläche wird beidseitig jedes Gerinnes durch die erste oberirdische Wasserscheide bzw. eine maximal beitragende Hanglänge von 100 m begrenzt.
- Die massgebende Regendauer (Konzentrationszeit) ist weitgehend davon abhängig, welches Benetzungsvolumen für das Erreichen einer gewissen Abflussbereitschaft der effektiv beitragenden Fläche in Gerinnenähe notwendig ist.

Damit geht die bekannte Fliesszeitformel über in:

$$HQ(x) = [i(T_c, x) - f(T_c, x)] \cdot FL_{\text{eff}} \cdot k_G + Q_{\text{Gl}}, \quad \text{mit } T_c = T_B + T_{\text{Fl}}$$

wobei gilt:

HQ(x)	Hochwasserabfluss der Jährlichkeit x [m ³ /s]
i(T _c , x)	Niederschlagsintensität der Jährlichkeit x und der Dauer T _c [mm/h]
f(T _c , x)	Verluste an den Untergrund [mm/h]
FL _{eff}	effektiv zum Hochwasserabfluss beitragende Fläche [km ²]
k _G	Faktor, der abflusserhöhenden Effekt von feuchten Vorbedingungen berücksichtigt
Q _{Gl}	Gletscherabfluss [m ³ /s]
T _c	Konzentrationszeit [h]
T _B	Benetzungszeit [h]
T _{Fl}	totale Fliesszeit [h]

Das Verfahren wurde für die Bestimmung des 20jährigen Hochwassers hergeleitet und nachher mit Umrechnungsmöglichkeiten für 100jährige Ereignisse ergänzt. Die entscheidenden Parameter sind die effektiv beitragende Fläche und das erforderliche Benetzungsvolumen. Die effektiv beitragende Fläche basiert auf der kumulativen Länge des aus der Karte 1:25'000 ermittelten wasserführenden Gerinnenetzes L_{Ge}. Das Verfahren sieht vor, das erforderliche Benetzungsvolumen aufgrund der Landschaftscharakteristik mit Hilfe der Bodeneignungskarte zu bestimmen.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Im Gegensatz zu den anderen hier vorgestellten Schätzverfahren wird die Jährlichkeit des Hochwasserabflusses beim Verfahren nach Kölla nicht nur über die Niederschlagsjährlichkeit, sondern auch durch eine entsprechende Anpassung der beitragenden Fläche FL_{eff} und des Benetzungsvolumens berücksichtigt. Allenfalls muss auch der Faktor k_G angepasst werden, da dieser von der Konzentrationszeit T_c abhängt. Grundsätzlich trifft aber auch Kölla die Annahme, dass der interessierende Hochwasserabfluss dieselbe Jährlichkeit aufweist wie die massgebende Niederschlagsintensität.

Einzugsgebietsfläche

Das Verfahren wurde aus Datenserien von ca. 120 Abflussmessstationen in schweizerischen Einzugsgebieten mit Flächen zwischen 0.5 und 100 km² hergeleitet.

Naturräumliche Zuordnung

Die naturräumliche Zuordnung geschieht im wesentlichen über das Benetzungsvolumen. Dieses ist abhängig von der Landschaftscharakteristik d.h. von den naturräumlichen Gegebenheiten im Einzugsgebiet. Im weiteren ist der Flächenfaktor, der die beitragende Fläche der Jährlichkeit anpasst, ebenfalls von der naturräumlichen Zuordnung abhängig.

Notwendige Inputdaten

Die notwendigen Inputdaten sind in der Modellbeschreibung zusammengestellt.

Aufwand

Grundsätzlich ist die Meinung, dass das Benetzungsvolumen als einziger von den naturräumlichen Gegebenheiten abhängiger Parameter mit Hilfe der Bodeneignungskarte bestimmt werden soll. Da diese Karte lediglich im Massstab 1:200'000 existiert, ist sie für kleine Einzugsgebiete, wie sie im Rahmen dieser Untersuchung interessieren, in vielen Fällen zu wenig genau. In kleinen Einzugsgebieten < 10 km² sind die naturräumlichen Gegebenheiten durch eine Feldbegehung zu erheben. Je nach Grösse und Heterogenität des Einzugsgebietes muss hierfür mit einem Zeitaufwand von 1-2 Tagen gerechnet werden. Für die Verarbeitung und Bereinigung der Daten, die Bestimmung der kumulativen Gerinnelänge sowie die eigentliche Hochwasserberechnung im Büro dürfte ein weiterer Halbtage genügen, so dass für die Hochwasserberechnung mit Hilfe des Verfahrens nach Kölla in kleinen Einzugsgebieten insgesamt mit einem Zeitaufwand von maximal 2½ Tagen gerechnet werden muss.

Güte der Resultate

Für die 20jährigen Hochwasser zeigt das Kölla-Verfahren nur gerade für das Gebiet des Rappengrabens eine Differenz von $\leq 15\%$ im Vergleich mit dem entsprechenden aus den Messdaten extrapolierten Hochwasserwert (=100 %). Für die übrigen Kleingebiete gibt das Kölla-Verfahren gegenüber der statistischen Auswertung um bis zu 50 % zu kleine und bis zu 100 % zu grosse Hochwasserwerte an. Für die T-jährlichen Hochwasser, wobei T der Anzahl Messjahre in den einzelnen Einzugsgebieten entspricht, wachsen die Differenzen zwischen dem Kölla-Verfahren und den Extrapolationswerten an. Nur im Rappengraben stimmt der geschätzte Hochwasserwert mit dem statistisch ermittelten Wert gut überein. Für die übrigen 6 Gebiete vergrösserten sich die Differenzen, und für eine Wiederkehrdauer von T Jahren ergibt das Kölla-Verfahren gegenüber der statistischen Auswertung um bis zu 60 % zu kleine und bis zu 120 % zu grosse Hochwasserwerte.

Die 100jährigen Hochwasser können nur in 4 Einzugsgebieten (Rappen- und Sperbelgraben sowie Roten- und Schwändlibach) zum Vergleich herangezogen werden, da die Messreihen der übrigen Einzugsgebiete für die Extrapolation auf 100jährige Ereignisse zu kurz sind. Die für diese 4 Einzugsgebiete mit dem Kölla-Verfahren ermittelten 100jährigen Hochwasserabflüsse scheinen im Falle des Schwändlibaches und des Rappengrabens in ihrer Grössenordnung durchaus vertrauenswürdig. Im Rotenbach hingegen entspricht der geschätzte Hochwasserwert jenem von Taubmann, der jeweils nur als absolut unterster Grenzwert betrachtet werden kann. Im Gegensatz dazu dürfte im Falle des Sperbelgrabens der Kölla-Wert für HQ₁₀₀ eher einem oberen Grenzwert entsprechen.

Für die untersuchten kleinen Einzugsgebiete resultierten für das 100jährige Hochwasser Konzentrationszeiten von 1½ und 2½ Std. Das sind erfahrungsgemäss deutlich zu hohe Werte (z.T. bis dreimal zu gross). Dies führt insbesondere bei den Frachtberechnungen zu deutlichen Überschätzungen.

Das Verfahren Kölla liefert für die untersuchten kleinen Einzugsgebiete im Vergleich zu den statistisch ermittelten Hochwasserwerten auch für kürzere Wiederkehrperioden nur teilweise befriedigende Resultate. Während die Bemessungshochwasser für verschiedene Wiederkehrperioden in einzelnen Einzugsgebieten einigermassen zutreffend sind, überschätzt das Verfahren das Hochwasser in anderen Fällen klar, um es in einem weiteren Gebiet ebenso deutlich zu unterschätzen. Für kleine Gebiete wirkt das Verfahren Kölla demnach etwas unzuverlässig. Da zur plausiblen Eingabelung eines Bemessungshochwassers aber ohnehin mehrere Verfahren angewendet werden sollen, schlagen wir vor, diese Methode dennoch mitzubersichtigen.

Literatur

Kölla, E. (1986): Zur Abschätzung von Hochwassern in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessungen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich, Nr. 87.

Kölla, E. (1987): Abschätzung von Spitzenabflüssen in kleinen natürlichen Einzugsgebieten der Schweiz. Schweizer Ingenieur und Architekt, 1987, Nr. 33-34, S. 965-972.

2.3.2.4 Das modifizierte Fliesszeitverfahren

Beschreibung des Modells

Das modifizierte Fliesszeitverfahren entspricht dem allgemein bekannten Fliesszeitverfahren, wobei die massgebenden Parameter nach klar vorgegebenen Anweisungen festzulegen sind. Die im vorliegenden Formelvergleich verwendete Schätzformel lautet wie folgt:

$$HQ(x) = 0.278 \cdot i(T_{c,x}) \cdot \Psi_s \cdot E \quad [\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2]$$

wobei die einzelnen Werte wie folgt definiert sind:

HQ(x)	Hochwasserabfluss mit der Wiederkehrperiode x [m ³ /s]
i	massgebende Niederschlagsintensität [mm/h]
Ψ_s	Spitzenabflusskoeffizient [-]
E	Einzugsgebietsfläche [km ²]
T_c	Konzentrationszeit [min]
x	Wiederkehrdauer [Jahre]

Der Umrechnungsfaktor 0.278 ist bedingt durch die gewählten Einheiten.

Die massgebende Niederschlagsintensität i wird in Abhängigkeit der Konzentrationszeit T_c bestimmt, d.h. derjenigen Zeit, die ein Wassertropfen benötigt, um vom entferntesten Einzugsgebietsrand zum Gebietsauslass zu gelangen. Die Konzentrationszeit wird als Summe der eigentlichen Fliesszeit T_{F1} und einer Benetzungszeit T_B berechnet. Dabei geht man von einer konstanten Niederschlagsintensität über die gesamte Niederschlagsdauer aus.

$$T_c = T_{F1} + T_B$$

Die reine Fliesszeit T_{F1} wird nach dem Ansatz von Kirpich (Chow, 1964) bestimmt. Sie ergibt sich in Abhängigkeit der maximalen Fliesslänge sowie dem mittleren Gefälle wie folgt:

$$T_{F1} = 0.0195 \cdot L^{0.77} \cdot J^{-0.385} \quad [\text{min}]$$

dabei bedeuten:

L	die maximale Fliesslänge (Distanz der Messstation vom entferntesten Punkt des Einzugsgebiets dem Haupttal folgend) [m]
J	mittleres Gefälle entlang der maximalen Fliesslänge [m/m]

Die Benetzungsdauer T_B ergibt sich nach einem Ansatz von Kölla (1986), wobei basierend auf der Bodeneignungskarte der Schweiz zunächst das Benetzungsvolumen V_{o20} definiert wird. Damit gewisse Abflussvorgänge in und auf dem Boden erst einsetzen können, muss eine gewisse Benetzung des Bodens gewährleistet sein. Ausgehend von einer zunächst geschätzten Konzentrationszeit T_c wird die entsprechende Niederschlagsintensität i für die gewünschte Wiederkehrperiode anhand der Starkniederschlagskarten des Hydrologischen Atlases der Schweiz (Geiger et al. 1992) bestimmt. Mit der berechneten Fliesszeit T_{F1} lässt sich die Benetzungsdauer T_B berechnen, die zusammen mit der Niederschlagsintensität i zu einem Benetzungsvolumen V_o' führt. Dieses wird mit dem Benetzungsvolumen V_{o20} nach Kölla verglichen, wobei im Fall einer Abweichung die angenommene Konzentrationszeit T_c variiert und der Berechnungsvorgang wiederholt wird.

Beim modifizierten Fliesszeitverfahren wird die abflusswirksame Fläche aus dem Produkt der gesamten Einzugsgebietsfläche und dem Spitzenabflusskoeffizienten Ψ_s bestimmt. Der Abflusskoeffizient Ψ_s kann aufgrund der Infiltrationsbedingungen und dem Wasseraufnahmevermögen des Bodens beurteilt werden (Rickli und Forster, 1997). Dabei wird das Gesamtgebiet in Teilflächen mit entsprechend vergleichbaren Eigenschaften unterteilt und der Gesamt-Abflusskoeffizient als flächengewichtetes Mittel aus den Teilflächen bestimmt. Bei dieser Methode wird vor allem dem Zusammenwirken verschiedener Standorteinflüsse grosse Bedeutung beigemessen.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Der Jährlichkeit des Hochwasserabflusses liegt wie bei anderen Abschätzverfahren die Jährlichkeit des Niederschlages zugrunde.

Einzugsgebietsfläche

Das Verfahren wurde bisher nur in Einzugsgebieten getestet, die weniger als 5 km² Fläche aufweisen.

Naturräumliche Zuordnung

Die naturräumliche Zuordnung geschieht einerseits über den Abflusskoeffizienten Ψ , der aufgrund der Infiltrationsbedingungen und des Wasseraufnahmevermögens der im Einzugsgebiet vorherrschenden Bodentypen beurteilt wird, und andererseits über das der Berechnung der Benetzungszeit T_B zugrunde gelegte Benetzungsvolumen $V_{0,20}$, das nach Kölla (1986) aufgrund der Bodeneignungskarte der Schweiz bestimmt wird.

Notwendige Inputdaten

Die notwendigen Inputdaten sind bei der Modellbeschreibung zusammengestellt.

Aufwand

Die naturräumlich bestimmten Gebietsparameter werden durch eine Feldbegehung erhoben. Je nach Grösse und Heterogenität des Einzugsgebietes muss mit einem Zeitaufwand von 1-2 Tagen gerechnet werden. Eine zweckmässige Vorbereitung der Begehung im Büro in bezug auf die Ausscheidung von hydrologisch vergleichbaren Teilgebieten erleichtert die Feldarbeit (ca. ½ Tag). Die Vorbereitung umfasst das Aufstellen einer Hypothese aufgrund von Bodenkarten und Gebietsbeschreibungen. Sie kann im Feld verifiziert und verfeinert werden. Für die Verarbeitung und Bereinigung der Daten sowie die eigentliche Hochwasserberechnung im Büro dürfte ein weiterer Halbtag genügen, so dass für die Hochwasserberechnung mit Hilfe des modifizierten Fließzeitverfahrens insgesamt mit einem Zeitaufwand von 2-3 Tagen gerechnet werden muss.

Güte der Resultate

Für die 20jährigen Hochwasser zeigt das modifizierte Fließzeitverfahren für 2 Einzugsgebiete eine Differenz von $\leq 15\%$ im Vergleich mit dem entsprechenden aus den Messdaten extrapolierten Hochwasserwert (=100 %). Für 2 der untersuchten Gebiete gibt das modifizierte Fließzeitverfahren gegenüber der statistischen Auswertung um 20-25 % höhere und in 3 weiteren 15-35 % zu tiefe Werte an. Für die T-jährlichen Hochwasser (T bedeutet die Anzahl Messjahre in den einzelnen Einzugsgebieten) wachsen die Differenzen zwischen dem modifizierten Fließzeitverfahren und den Extrapolationswerten noch leicht an. In 2 Einzugsgebieten beträgt die Differenz zwischen dem modifizierten Fließzeitverfahren und der Extrapolation gerade etwa 15 %. Für 3 weitere liegt der aus dem modifizierten Fließzeitverfahren resultierende Hochwasserwert zwischen 25 und 40 % unter dem Extrapolationswert. Für die letzten 2 Kleingebiete bestimmt das modifizierte Fließzeitverfahren Hochwasserwerte, die 30-35 % über den aus den Messwerten statistisch ermittelten Hochwasserwerten liegen.

Die 100jährigen Hochwasser können nur in 4 Einzugsgebieten (Rappen- und Sperbelgraben sowie Roten- und Schwändlibach) zum Vergleich herangezogen werden, da die Messreihen der übrigen Einzugsgebiete für die Extrapolation auf 100jährige Ereignisse zu kurz sind. Die für diese 4 Einzugsgebiete mit dem modifizierten Fließzeitverfahren ermittelten 100jährigen Hochwasserabflüsse scheinen in ihrer Grössenordnung durchaus vertrauenswürdig, auch wenn der für das Rotenbachgebiet aus den Messdaten extrapolierte Wert deutlich höher liegt als der entsprechende Fließzeitwert. Im Gegensatz zum Schwändlibach erfolgte die Extrapolation der Hochwasserdaten mit Hilfe der 2. Extremalverteilung. Diese ergab im Rotenbach zwar das bessere Bestimmtheitsmass, aber im Vergleich zum unmittelbar benachbarten, ähnlich aufgebauten Schwändlibach dürfte der extrapolierte Wert für das 100jährige Hochwasser zu hoch liegen. Für

den Sperbelgraben scheint das modifizierte Fliesszeitverfahren eher einen unteren Grenzwert darzustellen.

Von den oben aufgeführten Inputdaten sind der Abflusskoeffizient Ψ_s sowie die Konzentrationszeit T_c die beiden sensitivsten Parameter. Je nach Einzugsgebietsform kann es durchaus sein, dass sich durch künstliches Abtrennen eines Teilgebietes ein grösserer bzw. massgebenderer Hochwasserabfluss ergibt, weil eine kürzere Konzentrationszeit und damit eine grössere Niederschlagsintensität resultieren. Dies kann insbesondere in Gebieten vorkommen, die im oberen Gebietsteil ein Art flaches Hochplateau aufweisen.

Das modifizierte Fliesszeitverfahren liefert für die untersuchten kleinen Einzugsgebiete im Vergleich zu den statistisch ermittelten Hochwasserwerten einigermaßen vertrauenswürdige Resultate. Da zur plausiblen Eingabelung eines Bemessungshochwassers mehrere vertrauenswürdige Verfahren angewendet werden sollen, schlagen wir vor, diese Methode mitzubersichtigen.

Literatur

Chow, V.T. (1964): Handbook of applied hydrology. A compendium of water-resources technology. New York.

Geiger, H., Röthlisberger, G., Stehli, A., Zeller, J. (1992): Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901-1970. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.4, Bern.

Kölla, E. (1986): Zur Abschätzung von Hochwassern in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessungen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich, Nr. 87.

Rickli, C., Forster, F. (1997): Einfluss verschiedener Standorteigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 148 Jahrgang., Nr. 5, pp. 367-385.

2.3.2.5 Das modifizierte Clark-Verfahren

Beschreibung des Modells

Das vorliegende Abschätzverfahren basiert auf dem einfachen Konzeptmodell nach Clark, einem Niederschlag-Abfluss-Modell welches den Abflussvorgang in Einzugsgebieten durch Kombination der zwei Grundprozesse beschreibt: lineare Speicherung und lineare Translation (Koehler 1976). Der lineare Einzelspeicher wird durch die Speicherkonstante K beschrieben und ist am Gebietsausgang gedacht. Der K -Wert weist die Dimension der Zeit auf und kann als Schwerpunktsabstand zwischen dem Zufluss und dem Abfluss aus dem Speicher aufgefasst werden. Der K -Wert charakterisiert damit das Einzugsgebiet. Die lineare Translation wird über ein Zeit-Flächen-Diagramm berücksichtigt. Dieses Zeit-Flächen-Diagramm definiert die Inputfunktion zum linearen Speicher. Prinzipiell wird ermittelt, in welcher zeitlichen Verteilung der Niederschlag auf das Einzugsgebiet fällt, welcher Anteil als Effektivniederschlag zur Hochwasserwelle beiträgt und in welcher zeitlichen Verteilung das Wasser dem Linearspeicher am Gebietsausgang zugeführt wird.

Die Abflussbildung basiert einerseits auf dem Zeit-Flächendiagramm und andererseits auf der Unterteilung des gesamten Einzugsgebiets in hydrologisch ähnlich reagierende Teilgebiete (Rickli und Forster 1997). Für die numerische Berechnung des Hochwasserausflusses $Q(t)$ aus dem linearen Speicher wählte Clark den Übergang zu diskreten Zeitschritten. Dazu bietet sich das Verfahren von Muskingum an.

Das Modell dient nicht dazu, beliebige abgelaufene Hochwasserereignisse nachzubilden, sondern ermöglicht die Bestimmung von Bemessungsabflüssen und -ganglinien.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Jährlichkeit des Ereignisses

Der Jährlichkeit des Hochwasserabflusses liegt wie bei anderen Abschätzverfahren die Jährlichkeit des Niederschlages zugrunde. Unter dieser Annahme kann das Verfahren für eine beliebige Wiederkehrdauer angewendet werden.

Einzugsgebietsfläche

Das Verfahren wurde in zehn kleinen Einzugsgebieten getestet, davon waren zwei grösser als 2 km^2 (3.2 und 4.6 km^2). Die vorliegenden Resultate lassen vermuten, dass das Verfahren in den kleineren Gebieten bessere Resultate liefert als in den grösseren.

Naturräumliche Zuordnung

Die naturräumliche Zuordnung geschieht einerseits über die Festlegung des Wasserspeichervermögens (WSV) im Einzugsgebiet und andererseits über die Bestimmung der Isochronen (Linien gleicher Fliesszeit), deren Basis die naturräumlich beeinflussten Fliesszeiten der verschiedenen Einzugsgebietspunkte bis zum Gebietsauslass darstellen. Das WSV fliesst seinerseits wieder in die Bestimmung anderer Parameter ein (z.B. Abflusskoeffizient Ψ_v und Speicherkonstante K).

Notwendige Inputdaten

Die notwendigen Gebietsparameter, insbesondere jene, welche den Boden und die Landnutzung betreffen, sind durch eine Feldbegehung zu erheben.

Konzentrationszeit t_c : Die zeitliche Verteilung, in welcher der Effektivniederschlag dem Gebietsausfluss zugeführt wird, wird über das Flächen-Zeit-Diagramm festgelegt. Dieses wird durch die Isozonierung des Einzugsgebietes (Festlegung der Isochronen) erreicht. Dazu wird der Geländeoberfläche und dem Gerinne in Abhängigkeit der topographischen und hydrologischen Verhältnisse eine Abflussgeschwindigkeit zugewiesen. Daraus ist die für das Einzugsgebiet massgebende Laufzeit (= Konzentrationszeit t_c) und der daraus resultierende massgebende

Niederschlag abzuleiten. Die Grundlagen dazu bilden entweder der Hydrologische Atlas der Schweiz (Geiger, 1992) oder die statistische Auswertung der Daten von unmittelbar benachbarten Niederschlagsstationen.

Wasserspeichervermögen WSV: Als Wasserspeichervermögen wird der kurzfristig während eines Extremniederschlagsereignisses mobilisierbare Bodenspeicher betrachtet. Dazu werden sowohl die Infiltrationsbedingungen an der Bodenoberfläche als auch die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens beurteilt. Dabei sind Kenntnisse über die Parameter Vernässung, Verdichtung, Bodenaufbau, Skelettgehalt und Gründigkeit unerlässlich (Rickli und Forster 1997).

Abflusskoeffizient Ψ_v : Der Abflusskoeffizient Ψ_v ist definiert als das Verhältnis zwischen dem Effektivniederschlag N_{eff} und dem Ereignisniederschlag N . Es handelt sich in diesem Verfahren um einen Volumenabflusskoeffizienten. Der Effektivniederschlag wird über ein modifiziertes SCS-Verfahren bestimmt, wobei die Speichereigenschaften des Einzugsgebietes über das Wasserspeichervermögen in die Formel eingehen

$$N_{eff} = \frac{(N - 0.2 \cdot WSV)^2}{N + 0.8 \cdot WSV} \rightarrow \Psi_v = N_{eff} / N$$

Speicherkonstante K: Die Speicherkonstante K wird im Normalfall aufgrund von abgelaufenen Ereignissen berechnet. Bei der Erarbeitung des modifizierten Clark-Verfahrens liess sich ein Zusammenhang zwischen dem Wasserspeichervermögen (WSV) und der Speicherkonstanten K herstellen, so dass für dieses Abschätzverfahren der K -Wert über eine Gebietsansprache abgeleitet wird.

Aufwand

Die nötigen Gebietsparameter werden durch eine Feldbegehung erhoben. Je nach Grösse und Homogenität des Einzugsgebietes muss hierfür mit einem Zeitaufwand von 1-2 Tagen gerechnet werden. Eine zweckmässige Vorbereitung der Begehung im Büro in bezug auf die Ausscheidung von hydrologisch vergleichbaren Teilgebieten erleichtert die Feldarbeit. Die Vorbereitung umfasst das Aufstellen einer Hypothese aufgrund von Bodenkarten und Gebietsbeschreibungen und benötigt ca. ¼-½ Tag. Sie kann im Feld verifiziert und verfeinert werden. Nach der Begehung erfolgt eine weitere Verarbeitung der Daten im Büro. Mit einem GIS oder von Hand werden die Teilgebiete ausgeschieden und die Isochronen eingetragen. Für die Verarbeitung und Bereinigung der Daten im Büro müssen ca. 1-2 weitere Tage eingesetzt werden, so dass je nach Einzugsgebiet mit einem zeitlichen Gesamtaufwand von ca. 2-4 Tagen gerechnet werden muss.

Güte der Resultate

Für die Beurteilung des modifizierten Clark-Verfahrens wurden für die 7 untersuchten Kleineinzugsgebiete je das 20-jährliche, das T-jährliche (T entspricht dabei der Messreihendauer der einzelnen Einzugsgebiete) sowie das 100-jährliche Hochwasser ermittelt und mit dem entsprechenden statistischen Extrapolationswert aus den Messdaten verglichen.

Für die 20-jährlichen Hochwasser zeigt das Clark-Verfahren für 5 Einzugsgebiete eine Differenz von $\leq 15\%$ im Vergleich mit dem entsprechenden Extrapolationswert (=100%). Für den Vogel- und den Rietholzbach gibt das modifizierte Clark-Verfahren gegenüber der statistischen Auswertung um 50% höhere Werte an, wobei aufgrund der Bachbettbeurteilung im Vogelbach die Messwerte der letzten 20 Jahre und damit auch die statistisch ermittelten Hochwasserwerte eher zu klein sein dürften. Im Falle des Rietholzbaeches, dem grössten in diesem Formelvergleich untersuchten „kleinen Einzugsgebiet“ kam der Verdacht auf, dass das Verfahren für Einzugsgebietsflächen $> 2.5 \text{ km}^2$ allenfalls noch etwas zu grosse Hochwasserwerte liefert. Im Hinblick auf seine Anwendung als Bemessungsverfahren liegt das Verfahren aber auf der sicheren Seite.

Für die T-jährlichen Hochwasser wachsen die Differenzen zwischen dem Clark-Verfahren und den Extrapolationswerten an. Nur noch in 2 Einzugsgebieten beträgt die Differenz zwischen dem

Clark-Verfahren und der Extrapolation weniger als 15 %. Für 3 weitere liegt der aus dem Clark-Verfahren resultierende Hochwasserwert zwischen 20 und 50 % über dem Extrapolationswert. Einzig im Falle des Rappengrabens und des Rotenbaches ergibt das Clark-Verfahren deutlich kleinere Wert als die Extrapolation. In beiden Fällen liegt der Extrapolation die 2.Extremalverteilung zugrunde. In beiden Fällen scheinen die Resultate des Clark-Verfahrens dennoch realistisch. Im Falle des Rappengrabens macht sich nämlich die Nutzungsänderung im Vergleich zum Beginn der 95-jährigen Messreihe bemerkbar, indem das Einzugsgebiet zunehmend verbuscht und die Weidenutzung gegenüber früher drastisch zurückgegangen ist.

Die 100jährigen Hochwasser können nur in 4 Einzugsgebieten (Rappen- und Sperbelgraben sowie Roten- und Schwändlibach) zum Vergleich herangezogen werden, da die Messreihen der übrigen Einzugsgebiete für die Extrapolation auf 100jährige Ereignisse zu kurz sind. Die für diese 4 Einzugsgebiete mit dem modifizierten Clark-Verfahren ermittelten 100jährigen Hochwasserabflüsse scheinen in ihrer Grössenordnung durchaus vertrauenswürdig, auch wenn der für das Rotenbachgebiet aus den Messdaten extrapolierte Wert deutlich höher liegt als der entsprechende Clark-Wert. Im Gegensatz zum Schwändlibach erfolgte die Extrapolation der Hochwasserdaten mit Hilfe der 2. Extremalverteilung. Diese ergab im Rotenbach zwar das bessere Bestimmtheitsmass, aber im Vergleich zum unmittelbar benachbarten, ähnlich aufgebauten Schwändlibach dürfte der extrapolierte Wert für das 100jährige Hochwasser zu hoch liegen.

Generell liefert das modifizierte Clark-Verfahren befriedigende bis gute Resultate. Wenn wir davon ausgehen, dass zur plausiblen Eingabelung eines Bemessungshochwassers ohnehin mehrere vertrauenswürdige Verfahren angewendet werden sollen, schlagen wir vor, diese Methode mitzuberücksichtigen.

Literatur

- Geiger, H., Röthlisberger, G., Stehli, A., Zeller, J. (1992):** Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901-1970. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.4, Bern.
- Koehler G. (1976):** Niederschlag-Abfluss-Modelle für kleine Einzugsgebiete. Schriftenreihe des Kuratoriums für Wasser- und Kulturbauwesen, Heft 25. pp. 41-48. Hamburg - Berlin.
- Rickli C., Forster, F. (1997):** Einfluss verschiedener Standortseigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 148 Jahrgang, Nr. 5, pp. 367-385.
- Vogt, S., Forster, F. (1999):** Hochwasserschätzung in kleinen Einzugsgebieten. Ein Abschätzverfahren nach Clark zur Bestimmung einer Hochwasser-Bemessungsganglinie. Interner Hydrologie-Bericht B360, WSL, Birmensdorf.

2.3.3 Beurteilung der Hochwasserschätzverfahren

In Abbildung 2.24 sind die Resultate von fünf verschiedenen Hochwasserabschätzverfahren zur Bestimmung des 20jährigen Hochwassers in den sieben untersuchten Einzugsgebieten dargestellt. In einem ersten Schritt wurde das 20jährige Hochwasserereignis als Vergleichsbasis ausgewählt, weil in fast allen untersuchten Einzugsgebieten diese Messdauer erreicht ist und somit das aufgrund der Messdaten extrapolierte 20jährige Hochwasser einigermassen gut abgestützt erscheint.

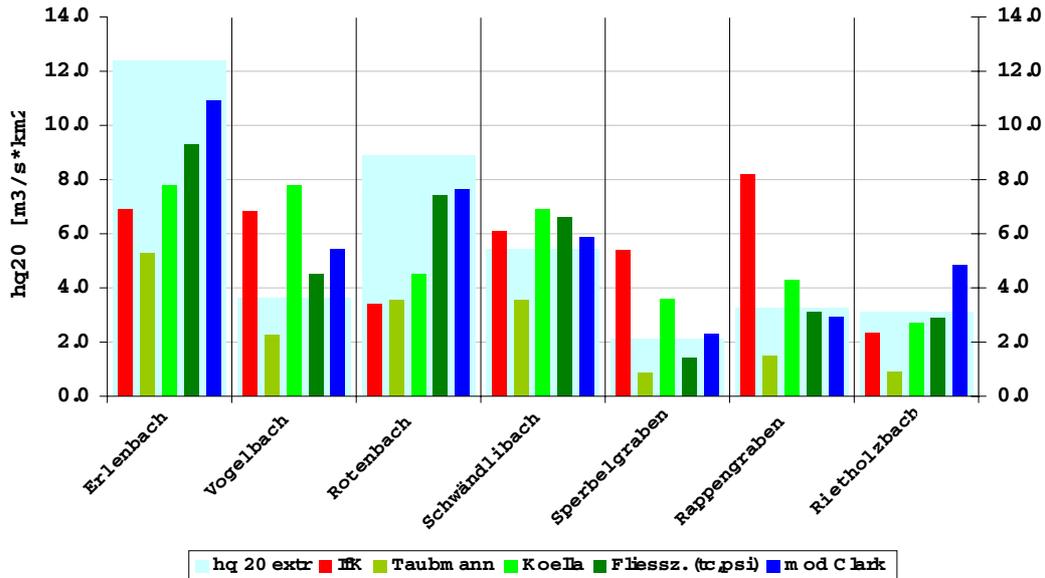


Abb. 2.24 Die für kleine Einzugsgebiete mit verschiedenen Verfahren bestimmten 20jährigen Hochwasser. Sie sind dem aus den vorhandenen Messdaten extrapolierten Hochwasserwert (hq_{20} extr) gegenübergestellt. Die Messdauer in den verschiedenen untersuchten Einzugsgebieten ist unterschiedlich lang (vgl. Tab. 2.2).

Im Falle des Vogelbaches fällt auf, dass das aus den Messdaten extrapolierte 20jährige Hochwasser von allen Verfahren deutlich übertroffen wird (eine Ausnahme bildet das Verfahren nach Taubmann). Aufgrund der Bachbettbeurteilung im Vogelbach erscheinen diese Hochwasserschätzungen als durchaus realistisch.

In Abbildung 2.25 sind die Resultate der gleichen Hochwasserabschätzverfahren für eine Jährlichkeit dargestellt, die der Messdauer im jeweiligen Einzugsgebiet entspricht.

In Abbildung 2.26 sind die Resultate dieser fünf Hochwasserschätzverfahren in den gleichen Einzugsgebieten für die 100jährigen Hochwasser dargestellt. Neben den bisher aufgeführten Abschätzverfahren ist im Falle des 100jährigen Hochwassers auch das Verfahren nach Müller berücksichtigt, das nicht ein 100jähriges Hochwasser bestimmt, sondern das grösstmögliche. Als weiterer Vergleichswert ist zudem auch der Wert des bisher höchsten gemessenen Hochwassers eingetragen.

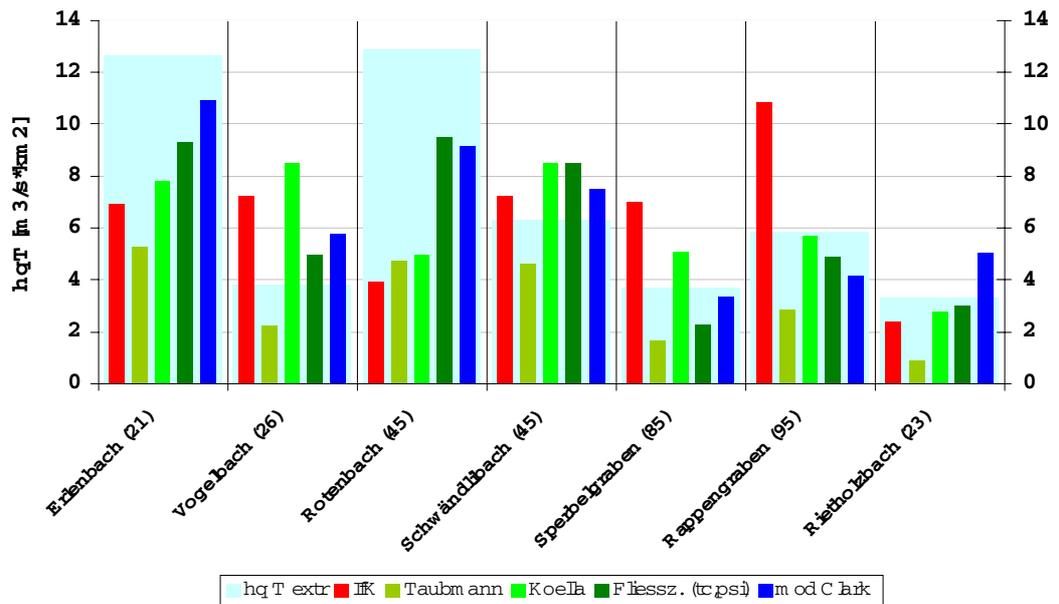


Abb. 2.25 Die für kleine Einzugsgebiete mit verschiedenen Verfahren bestimmten Hochwasser für eine Jährlichkeit, die der Messdauer im jeweiligen Einzugsgebiet entspricht. Die Messdauer in den verschiedenen untersuchten Einzugsgebieten ist unterschiedlich lang (vgl. Klammerwerte bei den Einzugsgebietenamen). Die verschiedenen Hochwasserschätzverfahren sind dem aus den vorhandenen Messdaten extrapolierten Hochwasserwert (hqT extr) gegenübergestellt.

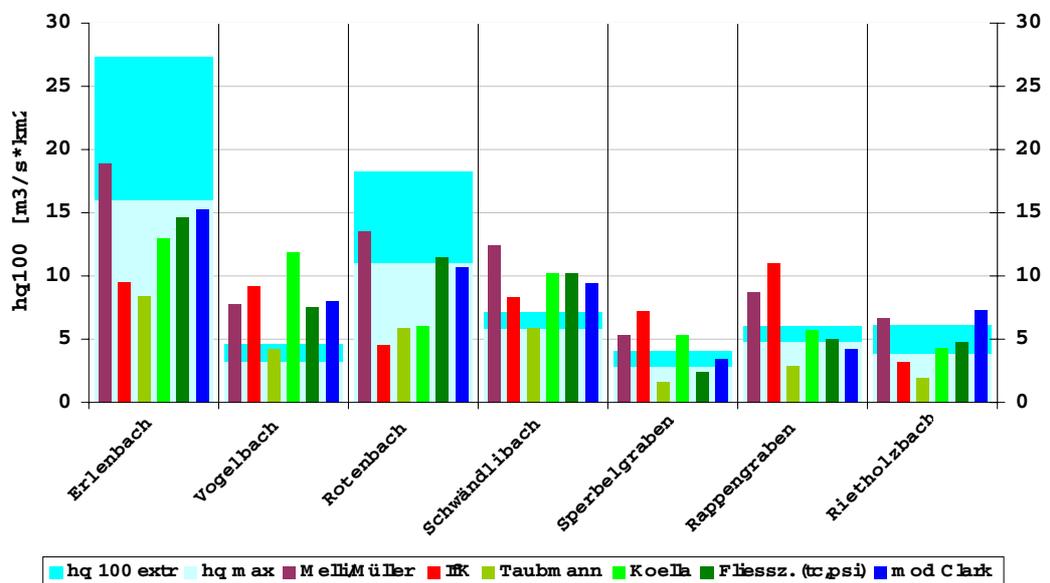


Abb. 2.26 Die für kleine Einzugsgebiete mit verschiedenen Verfahren bestimmten 100jährigen Hochwasser. Die verschiedenen Hochwasserschätzverfahren sind dem aus den vorhandenen Messdaten extrapolierten Hochwasserwert (hq₁₀₀ extr) und dem grössten bisher gemessenen Hochwasser (hq max) gegenübergestellt. Die Messdauer in den verschiedenen untersuchten Einzugsgebieten ist unterschiedlich lang (vgl. Tab. 2.2).

2.4 Fazit

Im Länderbericht Schweiz wurden die Verfahrensgruppen Extremwertanalyse und Niederschlag-Abfluss-Modellierung (vgl. Abb. 1.1) bewusst nicht diskutiert. Die Extremwertanalyse, die sich nur in Einzugsgebieten mit langen Messreihen effizient einsetzen lässt, wird im Länderbericht Deutschland (siehe Kapitel 4.5) ausführlich beschrieben. In der Schweiz sind die vom DVWK entwickelten Vorgehensweisen weit verbreitet. N-A-Modelle gelangen in der Schweiz eher in Einzelfällen zum Einsatz, und zwar dann, wenn eine hohe Genauigkeit gefordert ist und wenn Abflussdaten zur Modelleichung zur Verfügung stehen. Sind solche Daten nicht vorhanden, ist der Einsatz eines N-A-Modells in den meisten Fällen nicht möglich. Aus diesem Grund, aber auch wegen des grossen Arbeitsaufwandes sind N-A-Modelle in der Praxis nicht verbreitet.

Der Vergleich der Modelle, welche eine Abschätzung von Hochwasserspitzen in Einzugsgebieten ohne Abflussdaten erlauben, hat deutlich gezeigt, dass es sinnvoll ist, die Methoden nach der Grösse der Einzugsgebiete zu gliedern. Modelle, die in mesoskaligen Einzugsgebieten eingesetzt werden können, lassen sich nicht bedenkenlos auf Kleingebiete (Fläche $< 10 \text{ km}^2$) übertragen. Die Abflussbildung und die Abflusskonzentration werden in unterschiedlich grossen Einzugsgebieten nicht von den gleichen Prozessen dominiert. Die kleinräumig wechselnden Verhältnisse, die die Abflusscharakteristik eines kleinen Einzugsgebietes prägen, können nur mit aufwändigen Kartierungen erfasst werden. Bei grossen Einzugsgebieten werden sie ausgemittelt oder gedämpft. Während bei der Datenerhebung in mesoskaligen Gebieten auf flächendeckende, kleinmasstäbliche Datensätze zurückgegriffen werden kann (Bodeneignungskarten, Bodennutzungskarten, etc.) und die Parameter zum Teil automatisch erhoben werden, spielt die Feldbegehung in Kleingebieten eine wichtige Rolle. Bei der Eichung von Hochwasserabschätzverfahren für Kleingebiete kommt erschwerend dazu, dass nur für sehr wenige Gebiete aussagekräftige, lange Messreihen zur Verfügung stehen.

Aus den beschriebenen Gründen kommt es zur paradoxen Situation, dass hydrologische Beurteilungen von Fließgewässern in kleinen Einzugsgebieten im allgemeinen komplexer und zeitaufwändiger sind als in mesoskaligen Gebieten.

In beiden Teilen des Länderberichtes kommt klar zum Ausdruck, dass es *das* optimale Modell für einen konkreten Bemessungsfall nicht gibt. Es wird deshalb vorgeschlagen, immer mehrere Modelle gleichzeitig anzuwenden und die Streuung der Ergebnisse als eine Art Vertrauensintervall zu nutzen. Um diese Strategie anwenden zu können, braucht es effiziente Hilfsmittel. Diese Hilfsmittel sollen so aufgebaut sein, dass sie ohne grossen Aufwand neue Modelle und aktualisierte Datensätze – die für die Bestimmung der Modellparameter verwendet werden – integrieren können. Ein Beispiel für ein solches Hilfsmittel bildet das im Länderbericht kurz vorgestellte Programmpaket HQx_meso_CH.

Die Weiterentwicklung von Instrumenten für die Hochwasserabschätzung ist nur möglich, wenn auch auf der Seite der Datengrundlagen (z.B. Bodenkarten mit hydrologisch relevanten Parametern), der Messnetze (lange Messreihen mit qualitativ guten Abflussmessungen) und der Prozessforschung (es gibt bei der Abflussbildung und -konzentration noch viele offene Fragen) Fortschritte erzielt werden. Das gilt insbesondere für die kleinen Einzugsgebiete, in denen die Anwendung von hydrologischen Modellen vielfach an mangelhaften Inputparametern scheitert.

Literatur

- ASF (Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau) (1974):** Die grössten bis zum Jahre 1969 beobachteten Abflussmengen von schweizerischen Gewässern. Bern.
- Barben, M. (2001):** Beurteilung von Verfahren zur Abschätzung seltener Hochwasserabflüsse in mesoskaligen Einzugsgebieten. Dissertation am Geographischen Institut der Universität Bern, Bern.
- BFS (Bundesamt für Statistik) (1996):** Herausforderung Bevölkerungswandel, Perspektiven für die Schweiz. Bericht des Perspektivstabes der Bundesverwaltung. Bern.
- Bogner, K., Mader, H. (1999):** Niederschlags- und Abflussmodellierung kleiner alpiner Einzugsgebiete am Beispiel des Globasnitzbaches. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 51. Jahrgang, Heft 3/4, Wien.
- Bruschin, J., North, M. (1977):** Projekthochwasser für Einzugsgebiete ohne Abflussbeobachtungen. In: Schweizerische Bauzeitung, 95. Jahrgang, Heft 25, 407-412, Zürich.
- BWW (Bundesamt für Wasserwirtschaft) (1995):** Anforderungen an den Hochwasserschutz '95. Bern.
- Chow, V. T. (1962):** Hydrologic determination of waterway areas for the design of drainage structures in small drainage basins. Bulletin No 462 University of Illinois USA.
- Chow, V.T. (1964):** Handbook of applied hydrology. A compendium of water-resources technology. New York.
- Düster, H. (1994):** Modellierung der räumlichen Variabilität seltener Hochwasser in der Schweiz. Geographica Bernensia G44, Bern.
- DVWK (1999):** Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. DVWK-Merkblatt, Nr. 251, Bonn.
- Geiger, H., Röthlisberger, G., Stehli, A., Zeller, J. (1992):** Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901-1970. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.4, Bern.
- Heusser, H. (1947):** Die Voraussage der maximalen Hochwassermenge. In: Schweizerische Technische Zeitschrift, 31, 524-526.
- Hofbauer, R. (1916):** Eine neue Formel für die Ermittlung der grössten Hochwassermengen. In: Österreichische Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst, 38-40, Wien.
- Iszkowski, R. (1886):** Beitrag zur Ermittlung der Niedrigst-, Normal- und Höchstwassermengen auf Grund charakteristischer Merkmale der Flussgebiete. In: Zeitschrift des Österreichischen Architektur- und Ingenieurvereins, 69-98, Wien.
- Kan, C. (1995):** Die höchsten in der Schweiz beobachteten Abflussmengen bis 1990. Diplomarbeit in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Publikation Gewässerkunde Nr. 169, Bern.
- Koehler G. (1976):** Niederschlag-Abfluss-Modelle für kleine Einzugsgebiete. Schriftenreihe des Kuratoriums für Wasser- und Kulturbauwesen, Heft 25. pp. 41-48. Hamburg - Berlin.
- Kölla, E. (1986):** Zur Abschätzung von Hochwassern in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessungen. Mitteilungen der VAW Nr. 87, Zürich.

- Kölla, E. (1987):** Abschätzung von Spitzenabflüssen in kleinen natürlichen Einzugsgebieten der Schweiz. Schweizer Ingenieur und Architekt, 1987, Nr. 33-34, S. 965-972.
- Kreps, H. (1952):** Die näherungsweise Ermittlung grosser Hochwasserabflussspenden im Lichte neuerer Betrachtungen. In: Wasser- und Energiewirtschaft, 55-57, Baden.
- Kürsteiner, L. (1917):** Das neue Elektrizitätswerk der Stadt Chur. In: Schweizerische Bauzeitung, 1, 4-8, Zürich.
- Lauterburg, R. (1887):** Anleitung zur Berechnung der (mitteleuropäischen) Quellen- und Stromabflussmengen aus der Regenmenge, Grösse und Beschaffenheit der Quellen- und Flussgebiete. In: Allg. Bauzeitung, 9-13, 17-20, 27-30, Wien.
- Manser, S. (1996):** Analyse verschiedener regionalhydrologischer Modelle zur Hochwasserabschätzung in Gebieten ohne Direktmessungen. Diplomarbeit in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Publikation Gewässerkunde Nr. 183, Bern.
- Margot, A., Sigg, R., Schädler, B., Weingartner, R. (1992):** Beeinflussungen der Fliessgewässer durch Kraftwerke (≥ 300 kW) und Seeregulierungen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.3, Bern.
- Melli, E. (1924):** Die Dimensionierung städtischer Kanäle. In: Schweizerische Bauzeitung 12, 137-141, Zürich.
- Müller, R. (1943):** Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauung. Mitteilungen der VAW Nr. 4, Zürich.
- Niggli, M. (1999):** Hochwasserrisiko: Schadenpotential von Fliessgewässern. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern, Publikation Gewässerkunde Nr. 236, Bern.
- Rickli, C., Forster, F. (1997):** Einfluss verschiedener Standorteigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 148 Jahrgang, Nr. 5, pp. 367-385.
- Spreafico, M., Stadler, K. (1986):** Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 7, Bern.
- Spreafico, M., Stadler, K. (1988):** Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 8, Bern.
- Spreafico, M., Aschwanden, H. (1991):** Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie Nr. 16 und 17, Bern.
- Sydler, P.-A., Widmoser, P., Zollinger, F. (1982):** Statistische Untersuchungen von Extremabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Institut für Kulturtechnik, ETHZ.
- Taubmann, K.-C., Thiess, N. (1984):** Ingenieurmässige Anwendung verschiedener Hochwasser-Abschätzmethoden auf kleine und zusammengesetzte Einzugsgebiete am Testbeispiel der Ergolz. Muttenz.
- Taubmann, K.-C. (1986):** Ingenieurhydrologische Hochwasserabschätzung. Wasser, Energie, Luft, Jahrg.78, Nr. 10, S. 277-281.
- Vogt, S., Forster, F. (1999):** Hochwasserschätzung in kleinen Einzugsgebieten. Ein Abschätzverfahren nach Clark zur Bestimmung einer Hochwasser-Bemessungsganglinie. Interner Hydrologie-Bericht B360, WSL, Birmensdorf.

- Weingartner, R., Aschwanden, H. (1992):** Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.2, Bern.
- Weingartner, R. (1998):** Analyse der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Hochwasser in der Schweiz. Ein Beitrag zur Hochwasserabschätzung. Schlussbericht NFP 31, vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Weingartner, R. (1999):** Regionalhydrologische Analysen – Grundlagen und Anwendungen. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 37, Bern.
- Widmoser, P. (1974):** Extremabflüsse aus 40 kleinen Einzugsgebieten der Schweiz. Schweizerische Bauzeitung 92(32), 757-765.

3 Länderbericht Österreich

G. Blöschl, R. Godina, R. Merz

3.1 Methoden zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten in Österreich

Allgemeines

In Österreich werden hydrologische Gutachten zum grössten Teil von den jeweiligen hydrographischen Landesabteilungen durchgeführt, mit Ausnahme von Wien, wo selbst keine Gutachten für Oberflächengewässer erstellt werden, sondern nur die an den Pegeln erhobenen Daten weitergegeben werden. Einige Bundesländer (Oberösterreich, Tirol) haben sich entschlossen, nur mehr Gutachten im Behördenbereich durchzuführen und sämtliche andere Gutachten an Zivilingenieure auszulagern. Trotzdem werden die meisten Gutachten bezüglich Hochwasserkennwerte und Auftretenswahrscheinlichkeit von den Hydrographischen Landesdiensten erstellt. Deshalb bezieht sich dieser Bericht in erster Linie auf eine Methode die in Österreich für eine grosse Zahl von Gutachten angewandt wird.

Beschreibung der Methode

Extremwertstatistische Berechnungen

Alle im Hydrographischen Dienst für Österreich erfassten Abflussmessstellen werden routinemässig nach 3 verschiedenen Verfahren extremwertstatistisch ausgewertet. Diese Verfahren sind die extremwertstatistische Verteilung nach Gumbel Typ I, Pearson III bzw. log. Pearson III und nach Schreiber-Nobilis. Bei den beiden ersten Verfahren gehen dabei nur jeweils die Jahreshöchstwerte in die Berechnung ein, während beim zuletzt genannten Verfahren sämtliche erfassten Hochwasserwerte über einem bestimmten Grenzwert herangezogen werden (partielle Serie). Das Ergebnis dieser Berechnung wird in Form einer Ergebnistabelle den Hydrographischen Landesdiensten gesandt und bildet dort die Grundlage der Gutachten.

Von einigen Landesdiensten wird das Statistikprogramm UNISTAT (Sackl 1993) zur Extremwertstatistischen Analyse verwendet. Dieses Programm bietet für die Auswahl der empirischen Wahrscheinlichkeit 6 verschiedene Formeln an. Zur Auswahl stehen 11 Verteilungsfunktionen. Mathematische Anpassungstests, wie nach Kolmogoroff-Smirnow oder Chi-Quadrat Test sind nicht eingebaut. Generell wird empfohlen, die Daten graphisch mit der angepassten Verteilung zu vergleichen und diejenigen Parameter zu wählen, bei denen sich die optisch beste Anpassung ergibt.

Für die endgültige gebietsweise Festlegung der Hochwasserhäufigkeiten sind weiter folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen: die jeweilige Güte der Abflussmessstelle bzw. des Hochwasserkollektives, allfällige Inhomogenitäten innerhalb der beobachteten Jahresreihe (zum Beispiel anthropogene Einflüsse auf die Hochwasserverhältnisse) sowie die meteorologischen, orografischen und geologischen Verhältnisse des betreffenden Einzugsgebietes.

Grundlage sämtlicher Angaben von Hochwasserwahrscheinlichkeiten in beobachteten Einzugsgebieten sind die Aufzeichnungen und die extremwertstatistischen Analysen an den Pegelstationen des jeweiligen Fliessgewässers.

Als Ausgangsdaten dienen dabei im allgemeinen die jährlich höchsten Hochwasserabflüsse innerhalb einer Beobachtungsreihe. Wenn zwischen Hochwasserabflüssen verschiedener Zeiträume (Monate, Jahreszeiten) unterschieden werden soll, dann ist ein Wert pro Jahr aus dem entsprechenden Zeitraum der Berechnung zugrunde zu legen. Um gut brauchbare Ergebnisse zu erzielen (zumindest bis HQ_{100}), sind etwa 20-30 jährliche Beobachtungsreihen notwendig. Extrapolationen sind um so weniger sicher, je grösser der Unterschied zwischen der Wiederholungszeitspanne und der Beobachtungsdauer ist.

Für kleine Wiederholungszeitspannen (< 15 Jahre), die sich nicht auf partielle, sondern auf jährliche Serien stützen, wird eine Korrekturformel (DVWK 1979) verwendet.

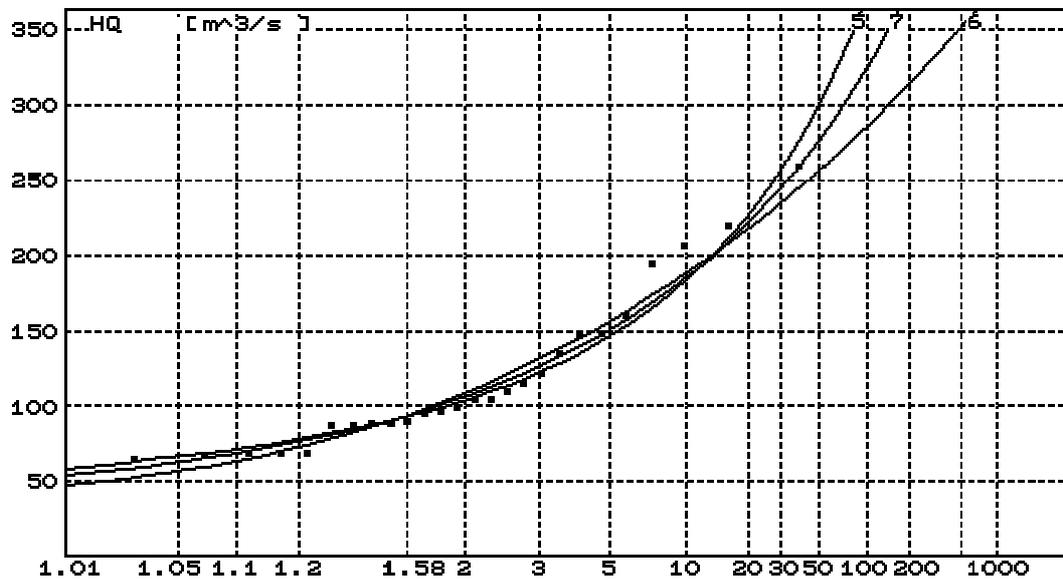


Abb. 3.1 Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeiten.

In Abbildung 3.1 ist eine typische Berechnung von Hochwasserdaten (Frequenzdiagramm) und die Anpassungskurven (log. Gumbel (5), Pearson III (6) und log Pearson III (7)) für einen Pegel als Beispiel dargestellt.

Regionalisierung

Sehr viel komplexer als in beobachteten Einzugsgebieten zeigt sich die Ermittlung von Hochwasserdaten in unbeobachteten Einzugsgebieten. In Österreich verwendet man zur Regionalisierung hauptsächlich theoretische Hochwasserformeln in der Form:

$$HQ = f(A_E) \quad (1)$$

Eine dieser Hochwasserformeln ist die Formel von Wundt (1949), die für die Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeitswerten in der Steiermark und auch in Vorarlberg und Salzburg herangezogen wird.

Die Formel lautet:

$$HQ_{100,unret.} = 13,8 \times A_E^{0,6} \quad (2)$$

mit: A_E Einzugsgebietsgröße [km²]

Im folgenden Text wird beschrieben wie, auf Grundlage von extremwertstatistischen Berechnungen mit den Daten von Messstellen eines Gewässers, ein hydrologischer Längenschnitt erstellt wird.

Die Werte die mit der Gleichung (2) ermittelt werden, sollten laut Definition die obere Hüllkurve der gemessenen Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet darstellen. Für viele Einzugsgebiete in Österreich kann dieser Wert auch mit dem HQ_{100} gleichgesetzt werden (Kreps 1975). In einem weiteren Schritt wird versucht, für einzelne Flussgebiete und Einzugsgebietstypen eine plausible Relation (Verhältniszahl) aus mittels hochwasserstatistischen Methoden an den Pegelstellen ermittelten Werten zum Wundt-Wert, zu bestimmen (vgl. Abb. 3.2).

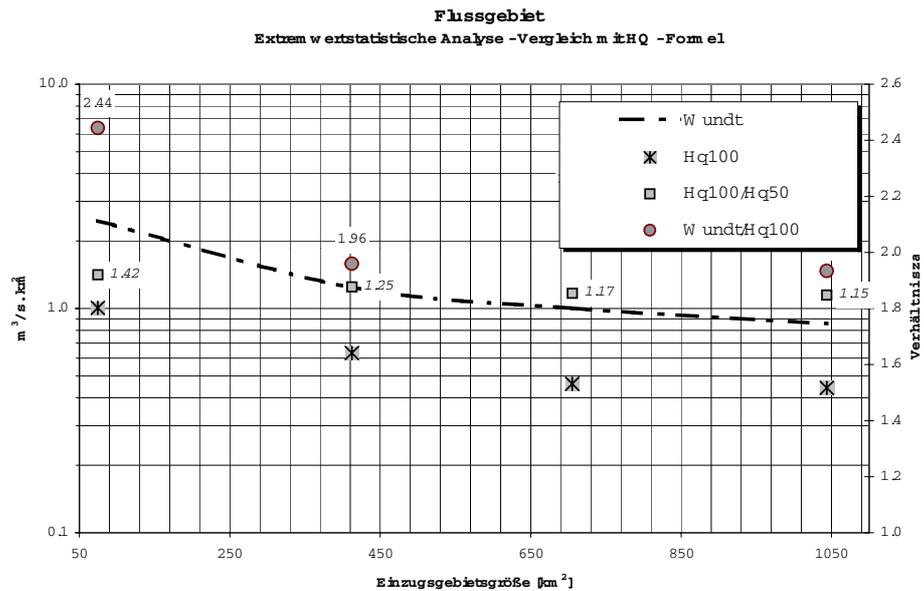


Abb. 3.2 Statistische Analyse und Verhältniszahlen an den Messstellen im Flussgebiet.

Mit Gleichung 2 und der für das Flussgebiet ermittelten Verhältniszahl (in Abb. 3.2 mit \sim markiert) können Bemessungswerte für jedes Teileinzugsgebiet gerechnet werden. Ebenso kann ein hydrologischer Längenschnitt des gesamten Flussgebietes ermittelt werden (vgl. Abb. 3.3).

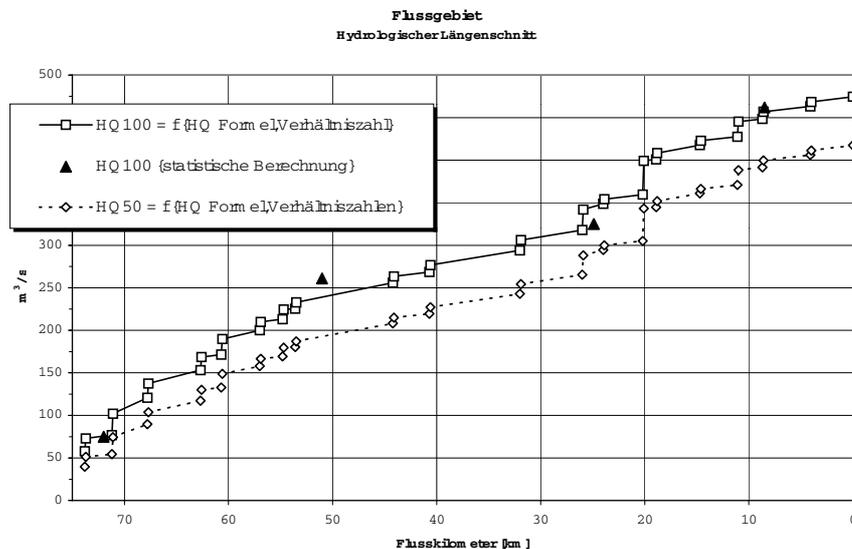


Abb. 3.3 Hydrologischer Längenschnitt für ein Flussgebiet.

Die Werte von HQ_1 bis HQ_{50} für solch abgegrenzte Gebiete können dadurch ermittelt werden, dass das Verhältnis von diesen Hochwasserwerten zum HQ_{100} an Pegelstellen dieses speziellen Gebietes auf das gesamte Gebiet übertragen werden (in Abb. 3.2 mit \sim markiert).

Die Abbildung 3.3 zeigt die mit der Gleichung 2 und den Verhältniszahlen errechneten HQ_n -Werte des hydrologischen Längenschnittes. Die Ergebnisse der extremwertstatistischen Berechnung sind mit Δ markiert.

Hochwasserspenden benachbarter Einzugsgebiete

Zusätzlich zu der oben beschriebenen Methode zur Festlegung von Hochwasserkennwerten werden Spenden benachbarter Einzugsgebiete für die Abschätzung von Hochwasser, Mittelwasser oder auch Niederwasserwerten herangezogen, wobei vor allem auf vergleichbare Verhältnisse (Geologie, Fläche und Form, Gefälle, Flächennutzung etc.) geachtet wird.

Angewandt wird die Methode von den hydrographischen Abteilungen in Tirol und Vorarlberg, wo Spenden benachbarter Flussgebiete in einem doppelt logarithmischen Massstab aufgetragen werden. Erkennt man dabei einen Zusammenhang in der Form $Hq = f(A_E)$ (vgl. Abb. 3.4), so kann für unbeobachtete Profile des Flussgebietes interpoliert bzw. extrapoliert werden.

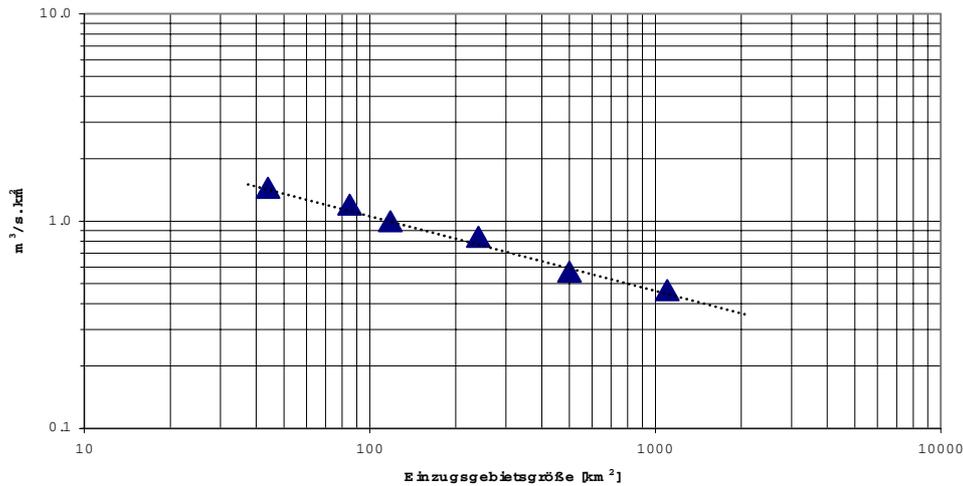


Abb. 3.4 Hq_{100} -Spenden an Messstellen vergleichbarer Einzugsgebiete.

Anwendungsbereich, Erfahrungen

Die beschriebenen Methoden werden zur Festlegung von Hochwasserkennwerten in Österreich angewandt. Ungefähr 1'700 Gutachten pro Jahr werden so von den Hydrographischen Landesdiensten erstellt.

Notwendige Eingangsdaten

Grundlage für die Gutachten sind in erster Linie die extremwertstatistischen Berechnungen an allen Durchflussmessstellen in Österreich. Diese Berechnungen werden routinemässig im Hydrographischen Zentralbüro durchgeführt und für den „internen Dienstgebrauch“ an die Landesdienststellen weitergeleitet. Dort werden die zur Berechnung verwendeten Kollektive geprüft, fehlerhafte oder beeinflusste Messstellen korrigiert, beziehungsweise entfernt und unter Verwendung der Flächenverzeichnisse für jedes in Frage kommende Flussgebiet hydrologische Längenschnitte erstellt.

Aufwand

Generell werden in Österreich noch keine Gebühren für Gutachten bezüglich Hochwasserabschätzung von den Hydrographischen Landesdiensten in Rechnung gestellt. Dies betrifft vor allem Einzugsgebiete mit einer Pegeldichte und einer Datenqualität, die die Erstellung eines HQ-Kennwerte Längenschnitts am Gewässer erlauben und damit der Aufwand für die HQ-Schätzung eines unbeobachteten Flussprofils minimiert werden kann.

3.2 VUT-FLOOD – ein Modellsystem zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeit

Beschreibung des Modells

VUT-FLOOD (Vienna University of Technology FLOOD frequency system) ist ein Modellsystem zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeit in Gebieten mit sowie ohne Abflussbeobachtungen. Die Modellphilosophie folgt mehreren Grundsätzen: (a) Generell wird versucht, ein möglichst grosses Mass an Verständnis der hydrologischen Prozesse in die Abschätzung der Hochwasserjährlichkeiten einzubringen. (b) VUT-FLOOD besteht aus einer Modellhierarchie mit unterschiedlich komplexen Ansätzen, die je nach Datenlage und möglichem Aufwand zu wählen sind. (c) Der Ermessensspielraum für die Anwenderin und den Anwender nimmt mit der Komplexität der Komponente zu. (d) Grundsätzlich soll die Ermittlung von allen Hochwasserparametern womöglich aus Abflussbeobachtungen am gleichen Vorfluter, alternativ aus Abflussbeobachtungen in ähnlichen Gebieten, und nur als letzte Möglichkeit aus Gebieteigenschaften erfolgen.

Zielgrösse des Modells ist der x-jährliche Hochwasserabfluss (HQ_x), der jedoch – je nach Modul – auf unterschiedliche Weise bestimmt wird. Für Gebiete mit Abflussbeobachtungen besteht der erste Ansatz aus einer lokalen Hochwasserstatistik, wobei verschiedene Verteilungsfunktionen zu prüfen sind. Die Gumbelverteilung und die GEV Verteilung werden auf Basis der Erfahrungen für Österreich empfohlen. Die regionale Hochwasserstatistik dient zur Verbesserung der Hochwasserwerte für grosse Jährlichkeiten sowie zur Bestimmung von Hochwasserwerten für unbeobachtete Gebiete. Dafür stehen in VUT-FLOOD die folgenden Module zur Verfügung:

Das einfachste Modul ist der „Geostatistische Ansatz“ (Merz et al. 2000a). Dabei wird angenommen, dass die ersten drei statistischen Momente (MHq , Cv , Cs) der Verteilungsfunktion der Hochwasserwerte Zufallsgrössen sind. Die räumliche Korrelation dieser Momente wird nun für die regionale Übertragung genutzt. Vorerst wird zur Berücksichtigung der Flächenabhängigkeit der Hochwasserabflüsse die mittl. jährliche Hochwasserspense MHq mittels $MHq' = MHq \cdot A^{0,25} \cdot 100^{-0,25}$ auf eine nominale Gebietsgrösse von 100 km² reduziert. Die Momente MHq' , Cv und Cs werden nun den Flächenschwerpunkten der Pegelzugsgebiete zugeordnet. Mit Hilfe von Ordinary Kriging werden die Momente für den Flächenschwerpunkt des Zielgebietes ermittelt. Nun hängt die Zuverlässigkeit der Momente stark von der Reihenlänge des Hochwasserkollektivs und von der Ordnung des Momentes ab. Das MHq etwa kann wesentlich zuverlässiger als Cs aus kurzen Reihen geschätzt werden. Dieser Effekt wird im Geostatistischen Ansatz berücksichtigt, indem der Nugget des Variogramms gleich der Unsicherheit zufolge kurzer Reihenlänge gesetzt wird, die aus Monte Carlo Analysen gewonnen wird. Das erlaubt ein „poolen“ von regionaler Information, wodurch Hochwässer mit grossen Jährlichkeiten zuverlässiger bestimmt werden können als bei einer rein lokalen Betrachtungsweise. Zusätzlich erlaubt der Geostatistische Ansatz eine methodisch saubere Übertragung von Hochwasserkenngrössen auf unbeobachtete Gebiete, da es sich um die beste lineare regionale Schätzmethode ohne systematischen Fehler handelt (BLUE).

Das nächste Modul, das einen Schritt in Richtung mehr Prozessverständnis darstellt, ist die SAFE Methode (Piock et al. 2000; Blöschl et al. 2000b). SAFE steht für Seasonality Analysis for regional Flood Estimation. Dieses Akronym spiegelt die Grundidee dieses Ansatzes wider, nämlich aus der Saisonalität verschiedener hydrologischer Variablen Information über die hochwasserrelevanten Prozesse abzuleiten und diese für die Ermittlung der HQ_x heranzuziehen. Verwendet werden die Jahreshochwässer, die mittleren monatlichen Abflüsse (Abflussregime), die mittleren monatlichen Niederschläge und die Extremniederschläge. Die Saisonalität wird mittels der Saisonalitätsmasse von Pardé und Burn quantifiziert. Diese lassen Prozesse wie Stauniederschläge am Alpennordrand, Gletscherabfluss und häufiges Auftreten konvektiver Gewitterereignisse auf regionaler Massstabsebene erkennen. Mit Hilfe einer Clusteranalyse und dieser Saisonalitätsmasse wurden homogene Hochwasserregionen bestimmt. Diese Regionen sind nun die Basis für die Anwendung der Index-Flood Methode. Die normierten Hochwasserwahrscheinlichkeitsverteilungen (d.h. die „growth curves“) werden als Mittelwerte jeder Region angesetzt. Das mittlere Jahreshochwasser wird für unbeobachtete Gebiete aus Regressionen zu Gebieteigenschaften (wie etwa Jahresniederschlag, Landnutzung, Geologie, Bodentyp, topographische Grössen,

Seeretentionsindex) abgeleitet. Für eine Region, die Teile des österreichischen Alpenvorlandes umfasst, sieht die Regression etwa wie folgt aus (Blöschl et al. 2000a):

$$MHq = -1.61 + 0.00052 \cdot JN + 1.3 \cdot FARL$$

Dabei ist MHq die mittlere jährliche Hochwasserspense ($m^3/(s \cdot km^2)$), JN der mittlere Jahresniederschlag (mm) und $FARL$ ist ein Seeretentionsindex (0 bei sehr starker Retention und 1 ohne Retention).

Ein weiterer Modul nützt die in den Starkniederschlägen enthaltene Information für die Berechnung der Hochwässer explizit aus (Merz et al. 1999a). Es handelt sich dabei um ein Verfahren der abgeleiteten Hochwasserstatistik, bei dem eine Niederschlagsstatistik mit einem Abflussmodell gekoppelt wird. Forschungsversionen dieses Moduls zeigten, dass nur eine sehr kleine Anzahl von Modellparametern auf regionaler Skala zuverlässig bestimmt werden können (Blöschl and Sivapalan 1997; Francesconi 1999). Deshalb wurde für die praktischen Anwendungen in diesem Modul ein sehr einfaches Abflussmodell mit zwei Parametern gewählt, das der Gradexmethode entlehnt wurde. Die wesentliche Annahme besteht darin, dass ab einer bestimmten Jährlichkeit Sättigung des Gebiets auftritt und deshalb jeder zusätzliche Niederschlag in Direktabfluss umgewandelt wird. Diese Formulierung der abgeleiteten Hochwasserstatistik liegt "auf der sicheren Seite", da besonders in manchen Flachlandgebieten Sättigung des gesamten Gebietes selbst bei sehr hohen Jährlichkeiten nicht auftritt. Für die Bemessung ist deshalb dieser Modul zur Einschätzung oberer Grenzwerte des HQ_x geeignet. Für das Zielgebiet werden die statistischen Kenngrößen des Starkniederschlags durch räumliche Interpolation der entsprechenden Kenngrößen von Stationen bestimmt. Die beiden Modellparameter sind ARF (der Flächenabminderungsfaktor für den Niederschlag) sowie der r-Wert (eine Masszahl für die Abflussdynamik). Für beide Werte werden im Modul regional abgeleitete Größen vorgeschlagen, die im Einzelfall vom Anwender geändert werden können.

Der Modul, bei dem das höchste Mass an Prozessverständnis eingebracht wird, ist der "Process-mixing approach". Dieser Modul vereinigt die Vorzüge der zuvor beschriebenen Module, allerdings auf Kosten einer grösseren Komplexität. Die Grundidee in diesem Modul ist, dass vorerst hydrologische Ähnlichkeit zwischen dem Zielgebiet und den in der Nähe liegenden Pegelinzugsgebieten bestimmt wird. Dies erfolgt auf der Basis von Gewichten für Prozessstypen (z.B. grundwasserbürtiger Abfluss; Oberflächenabfluss; Karstabfluss; Schneeschmelzabfluss). Das Zusammensetzen der Prozessgewichte in Verbindung mit einer Einschätzung der massgebenden Prozesse für das Zielgebiet ermöglicht die Berechnung der HQ_x und gleichzeitig eine Einschätzung der dazu führenden hydrologischen Prozesse. Dieser Modul ist in Arbeit und wird Ende 2001 zur Verfügung stehen.

Anwendungsbereiche

Anwendbarkeit des Verfahrens auf Basis der Daten und Erfahrungen in Österreich:

- Jährlichkeit: bis etwa 200 Jahre
- Einzugsgebietsfläche: ca. 1 bis 1'000 km^2
- naturräumliche Zuordnung: vom Flachland bis alpine Gebiete. Anm.: Die naturräumliche Gliederung ist eine der Stärken des SAFE Ansatzes und des „Process-mixing approach“.

Notwendige Inputdaten

Je nach Modul, Datenanforderungen zunehmend mit Modellkomplexität:

Geostatistischer Ansatz: Als Inputdaten werden nur die Koordinaten des Flächenschwerpunktes des Zielgebietes benötigt. Weitere Daten (Koordinaten der Flächenschwerpunkte der Pegelinzugsgebiete, statistische Hochwassermomente, Variogramme) liegen für Österreich aufbereitet vor und sind Teil des Modells.

SAFE Methode (Saisonalität): Als Inputdaten werden Gebietseigenschaften (Jahresniederschlag, Landnutzung, Geologie, Bodentyp, topographische Größen, Seeretentionsindex) benötigt. Die für ein bestimmtes Zielgebiet benötigten Gebietseigenschaften sind je nach Region unterschiedlich. Weitere Informationen (Hochwasserregionen, statistische Hochwassermomente) liegen für Österreich aufbereitet vor und sind Teil des Modells.

Abgeleitete Hochwasserstatistik: Als Inputdaten werden die Koordinaten des Flächenschwerpunktes des Zielgebietes sowie optional der Flächenabminderungsfaktor für den Niederschlag (ARF) sowie eine Masszahl für die Abflussdynamik (der r-Wert) benötigt. Weitere Informationen (statistische Momente der Extremniederschläge und der Hochwässer, Koordinaten der Niederschlagsstationen, Variogramme für Niederschlags- und Hochwassermomente) liegen für Österreich aufbereitet vor und sind Teil des Modells.

Process-mixing approach: Als Inputdaten werden Gebietseigenschaften, Niederschlagsdaten und Hochwasserdaten benötigt.

Fallbeispiel

Teile der hier beschriebenen Methoden der lokalen und regionalen Hochwasserstatistik sind in einem Softwarepaket integriert, das SOFT-FLOOD (SOFTware for FLOOD frequency analysis) genannt wird. Derzeit enthält das Softwarepaket Methoden der lokalen Hochwasserstatistik sowie Methoden der abgeleiteten Hochwasserstatistik auf lokaler und regionaler Basis. Eine Einbindung der anderen Ansätze ist in Arbeit. Das Paket enthält auch umfangreiche geprüfte Hochwasserdaten für Österreich einschliesslich Metainformationen zu den Pegeln und den Gebieten. Die Philosophie bei der Softwareentwicklung bestand darin, möglichst Schnittstellen zu existierender Standardsoftware (wie Excel, Geogrid, Surfer) einzurichten, wodurch der Programmieraufwand für Graphiken reduziert wurde. Die Schnittstellen erleichtern auch die Verwendung existierender Datensätze. SOFT-FLOOD ist vollständig menügeführt und ist in Visual Fortran programmiert. SOFT-FLOOD wird von den Hydrographischen Diensten in Österreich sowie im Lehrbetrieb verwendet.

Abbildung 3.5 zeigt ein Beispiel für die Anwendung des Geostatistischen Ansatzes von VUT-FLOOD für Österreich und die Schweiz. Dargestellt sind Abflussspenden des Hochwassers mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren. Abbildung 3.6 zeigt als Beispiel das Menü für die abgeleitete Hochwasserstatistik in SOFT-FLOOD.

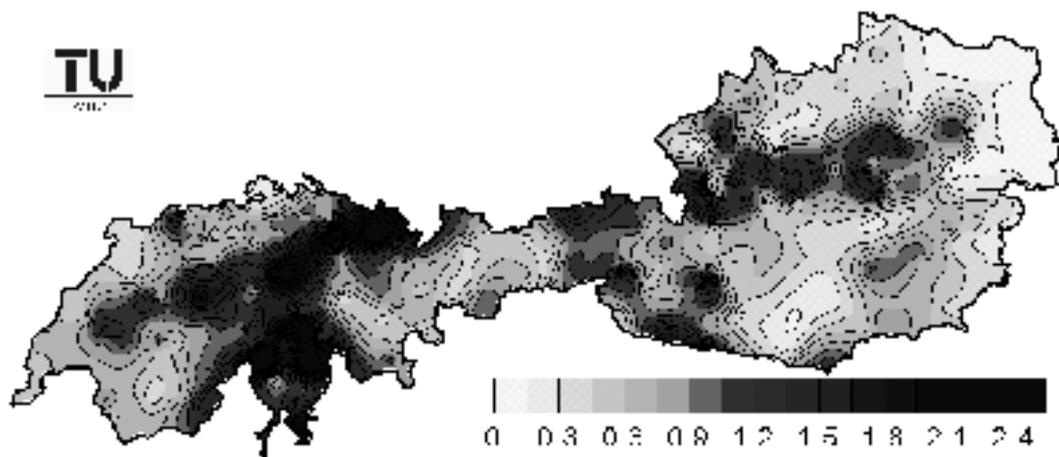


Abb. 3.5 100 jährliche Hochwasserspenden ($m^3/(s \cdot km^2)$) bezogen auf eine Einzugsgebietsgrösse von $100 km^2$ ermittelt mit dem Geostatistischen Ansatz. Aus Merz et al. (2000b).

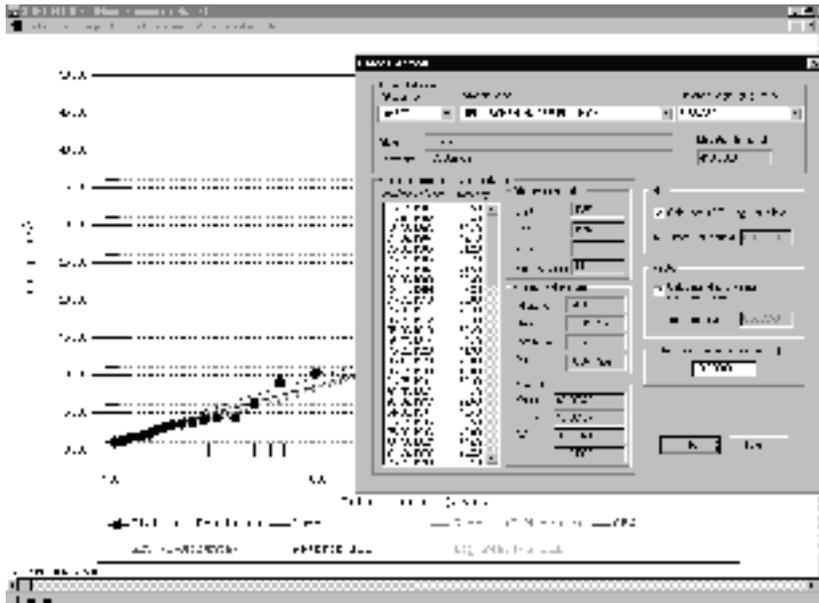


Abb. 3.6 Beispiel eines SOFT-FLOOD Menüs (Abgeleitete Hochwasserstatistik).

Aufwand

Aufwand für Hochwasserabschätzung inklusive der Bereitstellung und Aufbereitung der Inputdaten variiert je nach Modul.

- Geostatistischer Ansatz: sehr geringer Aufwand (nur Angabe der Koordinaten des Zielgebietes).
- SAFE Methode: derzeit gewisser Aufwand (Bestimmung der Gebietseigenschaften durch Verschneiden vorliegender Gebietsdaten auf Rasterbasis mit den Grenzen des Zielgebietes).
- Abgeleitete Hochwasserstatistik: geringer Aufwand bei Verwendung regionalisierter Modellparameter (ARF, r-Wert). Ziemlicher Aufwand bei Ableitung der Modellparameter aus lokalen Daten durch Analyse von Starkregenereignissen und Hochwasserwellen in benachbarten Gebieten, was jedoch empfohlen wird.
- Process-mixing approach: derzeit grosser Aufwand. Bei endgültigem Vorliegen der Software wird auch für die komplexeren Module der Aufwand für die Anwendung in Österreich gering sein, da alle notwendigen Informationen (z.B. Gebietseigenschaften) Teil des Moduls sein werden.

Kosten

Kosten für die Anwender: die Software SOFT-FLOOD ist kostenlos. Die Kosten ergeben sich aus dem zusätzlich notwendigen Aufbereiten von Daten je nach Modul. Die Weitergabe der in SOFT-FLOOD integrierten hydrologischen Daten ist nach Zustimmung des Hydrographischen Dienstes von Österreich möglich.

Güte der Resultate

Für alle Module wurden umfangreiche Fehlerauswertungen mittels Jackknifing durchgeführt (Merz et al. 2000b), wobei jeweils ein Pegel für die Regionalisierung nicht verwendet wurde und das aus der Regionalisierung gewonnene HQ_x mit dem aus den Abflussbeobachtungen an diesem Pegel berechneten HQ_x verglichen wurde. Dies ist also kein Anpassungstest sondern eine echte Verifikation des Regionalisierungsverfahrens für unbeobachtete Gebiete. Abbildung 3.7 zeigt eine Gegenüberstellung von regionalisierten und lokal berechneten 100 jährlichen Hochwasserabflüssen. Detaillierte Fehleranalysen zeigen, dass für den Geostatistischen Ansatz und die SAFE Methode der systematische Fehler sehr klein ist, für die abgeleitete Hochwasserstatistik jedoch erwartungsgemäss ein deutlicher systematischer Fehler auftritt, der auf die getroffene Annahme der Sättigung zurückzuführen ist. Die zufälligen Fehler sind je nach Region unterschiedlich und nehmen mit der Jährlichkeit zu.

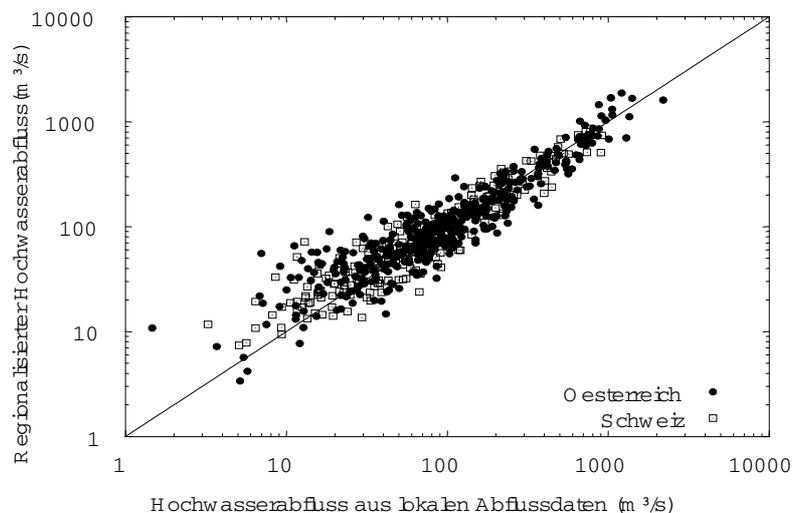


Abb. 3.7 Gegenüberstellung von aus regionaler Information mittels des Geostatistischen Ansatzes berechneten 100 jährlichen Hochwasserabflüssen und Werten, die aus Abflussbeobachtungen gewonnen wurden (Gumbelverteilung) für 617 Einzugsgebiete in Österreich und der Schweiz.

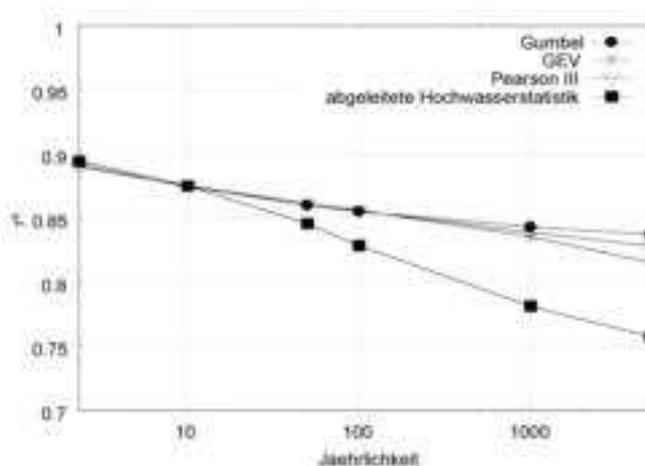


Abb. 3.8 Fehlerauswertungen mittels Jackknifing für regionalisierte Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit für 356 Einzugsgebiete in Österreich. Die Werte entsprechen der Genauigkeit bei der regionalen Übertragung auf unbeobachtete Gebiete. Aus Merz et al. (2000b).

Abbildung 3.8 zeigt als Beispiel die Auswertungen für den Geostatistischen Ansatz ausgedrückt als Bestimmtheitsmasse r^2 . In Anbetracht der sehr grossen hydrologischen Heterogenität im Untersuchungsgebiet sind die erzielten Bestimmtheitsmasse von 0.85-0.9 als gut einzustufen. Ein Vergleich zeigte, dass diese Ergebnisse deutlich besser liegen als andere übliche Verfahren wie der Region of Influence Approach. Interessant ist, dass das Bestimmtheitsmass für die abgeleitete Hochwasserstatistik bei grossen Jährlichkeiten stärker abnimmt als beim Geostatistischen Ansatz. Bei der Extrapolation auf grosse Jährlichkeiten wird bei der abgeleiteten Hochwasserstatistik die Niederschlagsinformation von grösserer Bedeutung wodurch die Werte nach den beiden Verfahren grössere Unterschiede aufweisen und das Bestimmtheitsmass abnimmt. Für derart grosse Jährlichkeiten ist anzunehmen, dass die Ergebnisse der abgeleiteten Hochwasserstatistik zuverlässiger sind als die rein auf Basis von lokaler Extremwertstatistik berechneten Referenzwerte.

Literatur

- Blöschl, G., Sivapalan M. (1997):** Process controls on regional flood frequency: Coefficient of variation and basin scale. *Water Resources Research*, 12, pp. 2967-2980.
- Blöschl, G., Piock-Ellena, U., Merz, R., Gutknecht, D. (1999):** Prozessorientierte Regionalisierung von Hochwässern In: G. Koehler (Ed.) Bemessungsabflüsse für kleine Einzugsgebiete. Proceedings of a Congress in Kaiserslautern 4-5 March 1999. Schriftenreihe des Fachgebiets Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, no 9, pp. 267-285.
- Blöschl, G., Merz, R., Piock-Ellena, U. (2000a):** Skalierungsprobleme bei der Regionalisierung von Hochwässern. Endbericht, Österreichische Akademie der Wissenschaften (HÖ-18). Oktober 2000. Institut für Hydraulik, TU-Wien.
- Blöschl, G., Piock-Ellena, U., Merz, R. (2000b):** Abflusstypen-Klassifizierung als Basis für die Regionalisierung von Hochwässern. Endbericht, Österreichische Akademie der Wissenschaften (HÖ-12). Februar 2000. Institut für Hydraulik, TU-Wien.
- DVWK (1979):** Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 101.
- Francesconi, A. (1999):** Analysing process controls on floods by comparing simulated and observed flood statistic patterns. Tesi di Laurea. Università degli Studi di Bologna and TU-Wien.
- Kreps, H. (1975):** Praktische Arbeit in der Hydrographie. Österreichisches Nationalkomitee für die Internationale Hydrologische Dekade. Zu beziehen durch: Hydrographisches Zentralbüro im Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; 1030 Wien, Marxergasse 2.
- Merz, R., Blöschl, G. (1999):** Regionalisation of flood frequency. In: Rosso (Ed) Flash-flood Risk Assessment under the iMpacts of land use changes and river Engineering WORKs. Annual report to the European Community DG XII. Politecnico di Milano.
- Merz, R., Blöschl, G., Piock-Ellena, U. (1999a):** Zur Anwendbarkeit des Gradex-Verfahrens in Österreich, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 51, Heft 11/12, pp. 291-305.
- Merz, R., Piock-Ellena, U., Blöschl, G., Gutknecht, D. (1999b):** Seasonality of flood processes in Austria. In: Hydrological Extremes: Understanding, Predicting, Mitigating (ed. by L. Gottschalk, J.C. Olivry, D. Reed and D. Rosbjerg) Proc. Birmingham Symp., July 1990. IAHS Publ. no. 255, pp. 273-278.
- Merz, R., Blöschl, G., Piock-Ellena, U., Rieger, W. (2000a):** Regionalisierung von Bemessungshochwässern mit geostatistischen Verfahren. Interpraevent 2000, 26–30 June, 2000 in Villach. Vol. 1, pp. 71-84.
- Merz, R., Pfaundler, M., Blöschl, G., Burlando, P. (2000b):** Regionalisation of flood frequency – an intercomparison. In: Rosso (Ed) Flash-flood Risk Assessment under the iMpacts of land use changes and river Engineering WORKs. Final report to the European Community DG XII. Politecnico di Milano. In preparation.
- Piock-Ellena, U., Merz, R., Blöschl, G., Gutknecht, D. (1999):** On the regionalisation of flood frequencies - Catchment similarity based on seasonality measures. In: Proceedings of the 28th Biennial IAHR Congress in Graz, Austria 22-27 Aug. 1999. Technical University of Graz, Institute for Hydraulics and Hydrology, CD Rom: 434.htm.
- Piock-Ellena, U., Pfaundler, M., Blöschl, G., Burlando P., Merz, R. (2000):** Saisonalitätsanalyse als Basis für die Regionalisierung von Hochwässern. *wasser, energie, luft*, 92, pp. 13-21.

Sackl, B. (1993): Benutzerhandbuch UNISTAT „Statistische Auswertung eindimensionaler Stichproben“; Zivilingenieurbüro hydroconsult - Sackl / Graz).

Wundt, W. (1949): Die grössten Abflussspenden in Abhängigkeit von der Fläche. Die Wasserwirtschaft, Heft 2.

4 Länderbericht Deutschland

H.-B. Kleeberg, R. Mück

4.1 Einleitung

Der vorliegende Länderbericht Deutschland basiert auf schriftlichen Umfragen, mit dem Ziel festzustellen, welche der folgenden drei Methoden:

1. Empirische und regional gültige Formeln,
2. Statistische Verfahren,
3. Deterministische Niederschlag-Abfluss-Modelle

bei der Abschätzung von seltenen und extremen Hochwasserabflüssen eingesetzt werden. Dabei stehen zunächst die Hochwasserscheitelabflüsse als Bemessungsabflüsse für Massnahmen des Hochwasserschutzes und der Anlagensicherheit sowie für Risikobetrachtungen im Vordergrund. Niederschlag-Abfluss-Modelle sind für andere Zwecke entwickelt worden. Sie haben den Vorzug, Ganglinien zu generieren, die bei Retentionsberechnungen für Speicher und für instationäre Abflussberechnungen in Gewässernetzen und Talauen benötigt werden. Gleichwohl wird mit jeder Ganglinie auch ein Scheitelabfluss ermittelt, so dass diese Modelle auch für die Ableitung dieser Art von Bemessungsabflüssen einsetzbar sind.

Jede der drei Methoden, die im Kapitel 4.3 noch einmal etwas ausführlicher beschrieben sind, beinhaltet eine beliebige Anzahl unterschiedlicher Verfahren (Ansätze, Vorgehensweisen, Modelle), die alle zielführend sein können.

Der Fragebogen ist in einem ersten Schritt an die für Festlegung von Bemessungsabflüssen zuständigen Behörden der deutschen Bundesländer, d.h. an die Wasserwirtschaftsverwaltungen der Bundesländer verschickt worden. Später konnten auch noch die Ingenieurbüros, Wasserverbände und Hochschulinstitute befragt werden. Diese werden in Deutschland häufig von den für die wasserwirtschaftliche Planung zuständigen Ämtern und Verwaltungen mit der Abschätzung von Hochwasserabflüssen für konkrete Projekte beauftragt. Weil aber nicht bekannt ist, welche Büros und Institute sich mit der Abschätzung von Hochwasserabflüssen befassen, wurden diese zunächst in einem einseitigen Fragebogen nur nach ihren Aktivitäten in dieser Hinsicht und nach der Anwendung einiger inzwischen überregional eingesetzter Verfahren gefragt. Erst nach einer positiven Antwort wurden sie gebeten, den ausführlichen Fragebogen zu beantworten, sofern die von ihnen eingesetzten Verfahren nicht schon bekannt waren.

Mit den ausführlichen Fragebögen wurde zu den einzelnen Verfahren folgendes erhoben:

- Namen des Verfahrens oder der Software, Quellen (Literatur),
- Details zum Verfahren und Datenbedarf, Datenverfügbarkeit,
- Erfahrungen zur Anwendbarkeit, zu den notwendigen Eingabedaten, zum Aufwand und zur Güte der Resultate.

Zusätzlich wurden je nach Methode spezifische Fragen nach speziellen Algorithmen gestellt.

4.2 Ergebnisse

Der Fragebogen ist – unterstützt durch die LAWA-AG Daten – von fast allen 16 Bundesländern, bei denen die Abschätzung von Bemessungshochwasser bedeutsam ist (das sind alle Flächenländer), beantwortet worden. Von den 80 befragten Ingenieurbüros, Verbänden und Universitäten haben 42 geantwortet. Es war einerseits nicht von vorne herein bekannt, welche der angefragten Institutionen sich überhaupt mit der Abschätzung von Hochwasserabflüssen befassen, und andererseits war vermutlich die Bereitschaft, sich der Beantwortung eines Fragebogens (auch wenn er nur eine Seite umfasst) zu widmen, der vermeintlich mangelnden Produktivität wegen nicht sehr gross. Leider wurden manchmal auch die Fragebögen nur unzureichend beantwortet.

In der Übersicht Anlage 2 sind die Institutionen aufgelistet, die angeschrieben worden sind. Der Liste ist zu entnehmen, ob es überhaupt im Aufgabenbereich liegt, Hochwasserabflüsse abzuschätzen. Zusätzlich ist angegeben, welche Methoden angewandt werden und innerhalb welcher Methoden weitere Informationen zu den Verfahren gegeben worden sind.

Aus den Antworten ist erkennbar, dass alle drei wesentlichen Methoden (Empirische und regional gültige Formeln, Statistische Verfahren, Deterministische Modelle) eingesetzt werden, mit einem Schwergewicht bei den statistischen Methoden und ihren Verfahren.

Oft beruhen die eingesetzten Verfahren auf Algorithmen und Modellen, deren Allgemeingültigkeit und regionale Übertragbarkeit oder sogar ein bundesweiter Konsens behauptet wird, aber nicht bewiesen ist. Vielfach sind es spezielle Entwicklungen für eine Verwaltung oder eine andere Institution, für eine Region oder gar nur für ein Flussgebiet. Häufig sind sie in der Literatur nicht zu finden oder nicht näher erläutert und dann nur mit erheblichen Aufwand und Rückfragen nachzuvollziehen. Erstaunlich ist, wie stark immer noch subjektive Erfahrungen und Einschätzungen - ohne quantitative Nachweise der Qualität eines Verfahrens - die Anwendung und vermeintliche Tauglichkeit prägen.

Bei der folgenden Zusammenstellung der angewandten Verfahren zur Abschätzung seltener und extremer Hochwasserabflüsse in Deutschland wurde daher auf folgende Gesichtspunkte verstärkt geachtet:

1. Ausreichende Dokumentation des Verfahrens in der Literatur, in Empfehlungen oder in Programmbeschreibungen sowie in Erfahrungsberichten,
2. Erhöhte Verbreitung und Akzeptanz des Verfahrens in der Wasserwirtschaftsverwaltung, in Ingenieurbüros, Verbänden und Hochschulinstituten (insbesondere zur Beurteilung der Erfahrungen, die mit dem Verfahren in unterschiedlichen Regionen gemacht worden sind),
3. Leichte Anwendbarkeit bzw. Übertragbarkeit auf andere Regionen (z.B. Unterstützung durch bestehende Software).

Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte ergibt sich, dass in Deutschland bei Projekten der wasserwirtschaftlichen Praxis folgende Methoden und Verfahren eingesetzt werden (vgl. auch Anlage 3):

Empirische und regional gültige Formeln

- Hüllkurve nach Wundt
- Rationale Methode

Statistische Verfahren auf der Basis von Abflussdaten

- Lokale Ansätze
- HQ-EX
 - EXTREM
 - IsHoT+W
 - KLUDON
 - HVERT

- Regionalhydrologische Ansätze
- HQ-Längsschnitt
 - HQ-REGIO
 - Verfahren des LfU Baden-Württemberg
 - Reg-Ex
 - IsHoT+W

Deterministische Modelle (Niederschlag-Abfluss-Modelle)

- Blockmodelle
- EGLSYN

- Flächendetaillierte Modelle
- FGM
 - NASIM
 - LARSIM / FGMOD
 - HYBNAT
 - ARC/EGMO
 - ASGi

Im vorliegenden Bericht werden diese Verfahren in den Kapiteln 4.4 bis 4.8 dem Kriterienkatalog entsprechend vorgestellt. Sie werden heute in der bei der Festlegung von Bemessungsabflüssen durch die Aufsichtsbehörden, aber auch in der Bemessungspraxis der Verwaltung, der Ingenieurbüros, der Verbände und auch von Hochschulinstituten verbreitet akzeptiert und angewendet. Die hier getroffenen Feststellungen über Erfahrungen, Güte der Resultate und Aufwand bei der Anwendung der einzelnen Verfahren stammen aus den beantworteten Fragebögen. Um die Verfahren und Modelle jeweils kurz zu beschreiben, wird soweit wie möglich die verfügbare Originalliteratur herangezogen. Abschliessend werden zu jedem angewendeten Verfahren die Literaturangaben aus den Fragebögen übernommen und durch eigene Recherchen ergänzt.

Folgende Verfahren, die im Zuge der Umfrage zwar genannt, aber nicht erläutert worden sind, werden nicht weiter beschrieben und bewertet:

Empirische und regional gültige Formeln

- Empirische Ansätze zur Berechnung von Hochwassern, z.B. nach Lauterbach-Glos
- Wasserwirtschaftsverwaltungen Thüringen,
Sachsen-Anhalt und Sachsen

Statistische Verfahren auf der Basis von Abflussdaten

- Hwsaar
- Wasserwirtschaftsverwaltung Saarland

Deterministische Modelle

- NAMLFW
 - HEC-1, HEC-2
- Wasserwirtschaftsverwaltung Rheinland-Pfalz
Wasserwirtschaftsverwaltung Sachsen-Anhalt
und Ingenieurbüro
- Hochwasservorhersagemodell Bode
 - PIRAY
 - BCENA
 - NAXOS
 - CURE
 - Fluss
- Wasserwirtschaftsverwaltung Sachsen-Anhalt
Ingenieurbüro
Ingenieurbüro
Universitätsinstitut
Ingenieurbüro
Ingenieurbüro

Die Qualität dieser Verfahren sei damit nicht angezweifelt. Sie entziehen sich z.T. mangels Spezifikation oder Dokumentation der Bewertung. Manchmal sind nur Namen von grundlegenden Verfahren oder von Softwareprodukten genannt. Die Programme HEC-1 und HEC-2 sind vom Hydrologic Engineering Center des US Army Corps of Engineers bereits in den 70-er Jahren entwickelt und danach laufend verbessert worden. Sie sind international eingeführt und werden

weltweit angewandt. Leider sind Erfahrungen bei der Anwendung durch deutsche Institutionen nicht mitgeteilt worden.

Es wird empfohlen, eingesetzte Verfahren umfassend zu dokumentieren und damit bewertbar zu machen. Langfristig sollten Modellvergleiche („Ringversuche“) durchgeführt werden.

Bei den Niederschlag-Abfluss-Modellen zeigt sich aber auch, dass die Vielfältigkeit der eingesetzten Modelle mit weniger als 20 weitaus geringer ist, als es die Zusammenstellung des vom BMU (1997) veröffentlichten Statusbericht über Stand und Einsatz mathematisch-numerischer Modelle in der Wasserwirtschaft mit 64 verschiedenen Niederschlag-Abfluss-Modellen vermuten lässt.

Das dürfte allerdings weniger eine Frage der Qualität eines Modells sein. Vielmehr hängt die Verbreitung und der praktische Einsatz ab von:

- der Möglichkeit, die Anwendbarkeit eines Modells unter Beweis zu stellen,
- dem Zeit- und Personalaufwand,
- der Verfügbarkeit von Personal, das mit der Anwendung vertraut ist.

Viele Modellentwicklungen, die vor allen Dingen an Universitätsinstituten und anderen Forschungsinstitutionen betrieben worden sind, sind nicht in die Praxis umgesetzt worden, sondern allein für Forschungszwecke genutzt worden. Damit ist meistens verbunden zu dokumentieren, dass bestimmte Weiterentwicklungen und neue Ansätze zielführend sind. Die Umsetzung in die Praxis bleibt danach oft „auf der Strecke“. Sie ist aufwendig, denn aus einem EDV-Programm muss ein Softwareprodukt mit benutzerfreundlicher Oberfläche sowie zweckmässigem Pre- und Postprozessing gemacht werden. Dafür fehlt im Forschungsbereich das Geld. Erst ingenieurmässige Anwendungen oder gar die Übernahme durch eine Wasserwirtschaftsverwaltung, einen Wasserverband oder ein Ingenieurbüro können zu der wünschenswerten Anwendung führen.

Die Auflistung wird nicht ganz vollständig sein, weil es wahrscheinlich ist, dass unbeabsichtigt einige Institutionen nicht befragt worden sind. Da aber davon ausgegangen werden kann, dass 80 % bis 90 % der praktischen eingesetzten Verfahren erfasst worden sind, kann von einer repräsentativen Erhebung ausgegangen werden.

4.3 Mögliche Methoden und Verfahren

4.3.1 Allgemeines

Wesentliches Kriterium für die Anwendung eines bestimmten Verfahrens ist die Aufgabenstellung und die vorhandene Datenbasis. Bei den Aufgaben ist zu unterscheiden, ob Bemessungsabflüsse als Scheitelabflüsse oder Hochwasserganglinien für Retentionsberechnungen benötigt werden. Gegenstand dieses Statusberichtes ist es, die Verfahren darzustellen und zu bewerten, die für die Ableitung von Bemessungsabflüssen als Scheitelabflüsse eingesetzt werden. Die genannten Niederschlag-Abfluss-Modelle sind aber selbstverständlich auch geeignet, Hochwasserganglinien zu ermitteln.

Je nachdem, ob beobachtete Abflüsse oder Niederschläge vorliegen und wie lang die Zeitreihen sind, ergeben sich im Prinzip folgende unterschiedliche Vorgehensweisen:

Keine Abflussbeobachtungen vorhanden, keine Niederschlagsbeobachtungen vorhanden	empirische Verfahren (Hüllkurven)
Keine Abflussbeobachtungen vorhanden, aber Niederschlagsbeobachtungen vorhanden	empirische Verfahren (z.B. Rational Formula)
Keine Abflussbeobachtungen vorhanden, aber Abflussbeobachtungen (lange Reihen) in der Umgebung vorhanden	Statistische Verfahren regionale Analyse
Abflussbeobachtungen (lange Reihen) vorhanden, aber keine Niederschlagsbeobachtungen vorhanden	Statistische Verfahren lokale Analyse
Abflussbeobachtungen (kurze Reihen) vorhanden, und Niederschlagsbeobachtungen (lange Reihen) vorhanden	N-A-Modelle

(N-A-Modelle sind ursprünglich für die Ableitung von Hochwasserganglinien entwickelt worden. Sie ermöglichen es dabei auch, Bemessungs-Scheitelabflüssen zu schätzen.)

Ein weiteres Kriterium für die Anwendung ist der Aufwand für die Datenbeschaffung und die Berechnungen. Selbstverständlich kann für die Ableitung des Bemessungsabflusses eines einfachen Strassendurchlasses nicht der gleiche Aufwand getrieben werden wie für den Nachweis der Anlagensicherheit einer Talsperre oder für die Bemessung einer Hochwasserentlastungsanlage. Gleichwohl ist festzustellen, dass insbesondere beim Hochwasserschutz entlang der Flüsse mehr und mehr der Aufwand für die hydraulischen Berechnungen der Überschwemmungsgefährdung gesteigert wird, während sich der Aufwand für die Abflussberechnung nicht in gleichem Masse erhöht. Die Genauigkeit der hydrologischen Grundlagendaten steht mehr und mehr im Widerspruch zur Genauigkeit der damit durchgeführten hydraulischen Berechnungen. Der Aufwand für die Abschätzung der Bemessungsabflüsse sollte deshalb erheblich gesteigert werden.

Berechnete Bemessungsabflüsse werden ausserdem plausibilisiert, d.h. vom Sachbearbeiter oder der Aufsichtsbehörde aufgrund von Kenntnissen über regionale Ausprägungen, von Vergleichen mit Nachbarpegeln oder Längsschnitten sowie von Einschätzungen der Qualität der verwendeten Daten subjektiv verändert, ehe sie beispielsweise als sogenannte amtliche Bemessungsabflüsse für weitere Untersuchungen und Planungen verwendet werden. Dieser amtlichen Festlegung kommt in der Praxis eine erheblich Bedeutung zu. Sie ist unabhängig vom eingesetzten Berechnungsverfahren und gilt auch für die Ergebnisse von Niederschlag-Abfluss-Berechnungen. Dabei wird u.U. einem Auftragnehmer, der dazu erforderliche Unterlagen erarbeitet, durchaus vorgegeben, wie die Bemessungsabflüsse zu berechnen sind. Die abschliessende Festlegung bleibt der Behörde oder den zuständigen Fachstellen vorbehalten.

Die möglichen Verfahren lassen sich im wesentlichen den drei unterschiedlichen Methoden empirische und regional gültige Formeln, statistische Verfahren auf der Basis beobachteter Abflüsse

mit lokalen Ansätzen einerseits und regionalhydrologischen Ansätzen andererseits sowie den deterministischen Niederschlag-Abfluss-Modellen zuordnen.

Die Güte der Resultate des einen oder anderen Verfahrens spielt bei der Auswahl, welches Verfahren angewandt werden soll, kaum eine Rolle. Dies ist wenig verwunderlich, denn die entsprechenden Angaben fehlen sowohl in der Literatur als auch bei den Anwendern selbst. Nur sehr selten gibt es vergleichende Untersuchungen.

4.3.2 Methode: Empirische und regional gültige Formeln

Zu den älteren, aber noch nicht veralteten Verfahren zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen an unbeobachteten Gewässerquerschnitten, zählen die Hüllkurven. Um sie aufzustellen, müssen viele Messwerte über Scheitelabflüsse in den betreffenden Regionen vorliegen. Meist werden in einem doppeltlogarithmischen Massstab die Abflussspenden gegen die Grösse des Einzugsgebietes aufgetragen und die Umhüllende für diese Punkte wird als obere Grenze für die maximalen Hochwasserabflussspenden H_{qmax} dieser Region angesehen. Um nicht nur die extremsten Hochwasserabflüsse einer Region zu ermitteln, wird, z.B. auch die 90 %-Umhüllende, die 90 % aller beobachteten Extremabflüsse einschliesst, herangezogen.

Ein weiteres Verfahren der empirischen und regional gültigen Formeln ist die Rationale Formel, von der verschiedene Modifikationen und Vereinfachungen existieren. Gemeinsam ist diesen Varianten (ob mit Wahrscheinlichkeitsaussage (Wiederkehrintervall) oder ohne), dass messbare topographische Kenngrössen des Einzugsgebietes eingehen und der Scheitelabfluss dem Produkt von Regenspende, Einzugsgebietsgrösse und Abflussbeiwert proportional ist. Je nach Detaillierungsgrad dieser empirischen Formeln fliessen auch andere einzugsgebietsbezogene Grössen ein, z.B. der abflusswirksame Niederschlag oder die Niederschlagsspende.

Tab. 4.1 Wichtige Abhängigkeiten bei empirischen und regional gültigen Formeln.

$$HQ_T = f(A_{Eo}, T, a, b, c, N)$$

Variable	Grösse des Einzugsgebietes	Wiederkehrintervall	Gebietskenngrössen	Niederschlag
Verfahren				
Hüllkurven für H_{qmax}	X			
Beliebige Formeln für HQ_T	X	X	X	
Rationale Formel für HQ_T	X	X	X	X

4.3.3 Methode: Statistische Verfahren auf der Basis von Abflussdaten

4.3.3.1 Lokale Ansätze

Es hat sich in der wasserwirtschaftlichen Praxis als zweckmässig erwiesen, Bemessungsabflüsse nach ihrer Unter- oder Überschreitungswahrscheinlichkeit und – mit Zeitbezug – nach ihrer Jährlichkeit festzulegen. Damit werden aufwendige Kosten-Nutzen-Betrachtungen umgangen. Es ist allerdings notwendig, Häufigkeitsverteilungen zu ermitteln und möglichst an analytischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen anzupassen. Ist an einem Pegel eine ausreichend lange Beobachtungsreihe von Hochwasserscheitelabflüssen vorhanden, so ist diese Anpassung möglich. Es können Jahresreihen oder partielle Serien der Hochwasserabflüsse verwendet werden. Die angepasste Verteilungsfunktion wird bis zu demjenigen seltenen Hochwasserereignis extrapoliert, das interessiert. Diese Extrapolation ist jedoch grundsätzlich problematisch, da bei der pegelbezogenen Analyse die Verteilungsfunktion am Beginn des Extrapolationsbereiches meist durch sehr wenige grosse Messwerte gestützt ist und die Qualität der Extrapolation nicht nachprüfbar ist (DVWK-Schrift 124, 1999).

In Deutschland hat ein in den siebziger Jahren gebildeter Fachausschuss des DVWK die DVWK-Regel 101 mit dem Titel „Empfehlung zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit“ erarbeitet. Zwischenzeitlich haben sich die Leistungsfähigkeit der Rechner und Programme sowie der Anspruch an die Erläuterung des mathematisch-statistischen Hintergrundes geändert. Diese geänderten Rahmenbedingungen verlangten nach einer Neubearbeitung der Regel 101. In der Reihe der DVWK-Merkblätter erschien daher im Heft 251 (1999) mit dem Titel „Statistische Analysen von Hochwasserabflüssen“ eine Empfehlung zur Gewinnung von Stichproben hydrologischer Daten und deren Prüfung sowie statistischen Auswertung.

Es wird in diesem Merkblatt darauf hingewiesen, dass Hochwasserstatistik kein „richtiges“ Berechnungsverfahren mit einer einzigen, eindeutigen Lösung darstellt, sondern eine grössere Zahl gleichwertiger Verfahren mit einem Lösungsspektrum beinhaltet, aus dem der gesuchte Bemessungswert letztendlich festzulegen ist.

Statistische Verfahren unterscheiden sich insbesondere durch die Wahl der analytischen Verteilungsfunktion und der Parameterschätzverfahren. Aber selbst bei der Wahl der gleichen Verteilungsfunktion und des gleichen Parameterschätzverfahren können unterschiedliche Ergebnisse auftreten, die durch verschiedene Lösungsalgorithmen für die Parameterbestimmung verursacht sind. Die häufig angewendeten Verteilungsfunktionen führen in der Regel zu ähnlichen Ergebnissen bezüglich der Wiederholungszeitspannen, wenn diese innerhalb des Umfangs der beobachteten Datenreihen liegen. Ist die Extrapolationsspanne jedoch deutlich grösser als die doppelte Länge der Beobachtungsreihe, werden die Abweichungen unter den einzelnen Verteilungsfunktionen beträchtlich. Allen Schätzungen ist gemein, dass bereits bei einem hundertjährigen Hochwasser allein aus statistischen Gründen der Vertrauensbereich um $\pm 20\%$ bis 30% schwankt und bei noch kleineren Überschreitungswahrscheinlichkeiten weiter erheblich zunimmt. Die Schwankungen aufgrund der Datenunsicherheiten kommen noch zusätzlich hinzu. Eine in der wasserwirtschaftlichen Praxis häufig geäusserte Meinung, es dürfe bis zum dreifachen der Länge der Beobachtungsreihe extrapoliert werden, ist nicht belegt (DVWK-Schrift 124, 1999).

Bei der Erarbeitung des DVWK-Merkblattes 251 standen dem dazu tätigen Fachausschuss grundlegende Arbeiten von Kluge (1996) zur Verfügung, der viele hydrologisch relevante Verteilungsfunktionen, Parameterschätz- und Testverfahren sammelte und testete. Im Merkblatt werden eine grössere Anzahl von Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Methoden zur Berechnung von Hochwasserabflüssen vorgeschlagen, woraus eine gewisse Spannbreite von Ergebnissen berechnet werden kann. Zur Auswahl der Bemessungsabflüsse, ausgedrückt durch ein Wiederkehrintervall oder qualifiziert als PMF, werden keine Hinweise gegeben. Zudem sind die Ausführungen zu den eigentlichen Methodiken trotz des relativ breiten Umfangs des Merkblattes derartig kurz gefasst, dass für den Praktiker auf dieser Grundlage eine Anwendung der genannten Verteilungsfunktionen und Parameterschätzungen äusserst schwierig sein dürfte (Schultz 1998).

Ausserdem darf nicht verkannt werden, dass es mehrere Möglichkeiten für die Schätzung der Parameter von Verteilungsfunktionen gibt und selbst beim gleichen Schätzverfahren die von Kluge (1996) ausgewählten statistischen Lösungsansätze sich von denjenigen, die Plate (1993) vorschlägt, unterscheiden, was zu unterschiedlichen Schätzungen der Hochwasserabflüsse bestimmter Wiederkehrintervalle führt. Für den Praktiker ist das zweifelsohne unbefriedigend. Dem kann jedoch nur begegnet werden, wenn Konventionen über die zu verwendenden Lösungsalgorithmen oder Softwareprodukte getroffen werden. Dies würde aber eine ungerechtfertigte Einschränkung der Planungsvielfalt und Produktauswahl bedeuten und ist deshalb nicht gerechtfertigt.

4.3.3.2 Regionalhydrologische Ansätze

Sind Bemessungsabflüsse für Gewässerquerschnitte gefragt, für die keine oder nur ungenügende Beobachtungsdaten vorhanden sind, müssen die pegelbezogenen Informationen auf diese Gewässerquerschnitte übertragen werden. Diese räumliche Interpolation oder Extrapolation bezeichnet man als Regionalisierung. Der Begriff steht in den Geowissenschaften und in der Hydrologie ursprünglich für die Ausweisung räumlich zusammenhängender, in bezug auf eine Zielgrösse möglichst homogener Raumeinheiten mit der zusätzlichen Bedingung der Kontingenz

(Weingartner 1999). Diese enge Definition ist aber inzwischen einer weitergehenden gewichen, bei der jede Art der Übertragung von Informationen unter Nutzung von mehr oder weniger aufwendigen Modellvorstellungen vom Punkt auf die Fläche, von der Fläche auf Punkte sowie von Punkt zu Punkt eingeschlossen ist. Es wird dann von regionalhydrologischen Ansätzen gesprochen.

Prinzipiell lassen sich die für die Abschätzung von Hochwasserabflüssen einzusetzenden Regionalisierungsverfahren in zwei Hauptgruppen einteilen, zum einen die Quantifizierung der Komponenten der hydrologischen Prozesse auf einer regionalen Skala und zum anderen die Ermittlung der Beziehung hydrologischer Variablen zu den physio-geographischen und klimatischen Charakteristiken einer Region. Die erstgenannte Hauptgruppe umfasst die Methode der deterministischen Niederschlags-Abfluss-Modelle, die aufgrund ihrer Vielzahl in einem gesonderten Unterpunkt besprochen werden. Dagegen stützt sich die letztgenannte Hauptgruppe von Regionalisierungsverfahren in der Hydrologie im wesentlichen auf die Erstellung von Regressionsbeziehungen zwischen messbaren varianten und invarianten Gebietsmerkmalen und hydrologischen Kenngrößen (HQ_T, MHQ).

Eine Erweiterung der klassischen Regressionsbeziehungen stellt das sogenannte Bezugs-HQ-Verfahren (engl. index-flood procedure) dar (Dalrymple, 1960; Haupt et al., 1999). Bei diesem wird eine regional gültige Verteilungsfunktion, mit einer ortsabhängigen Unbekannten – dem Bezugs-HQ – als Skalenfaktor, bestimmt. Das vom betrachteten Gewässerquerschnitt abhängige Bezugs-HQ kann in einem separaten Schritt über Regressionsbeziehungen geschätzt werden. Damit diese Vorgehensweise anwendbar ist, müssen die Variationskoeffizienten der Hochwasserabflüsse aller Gewässerquerschnitte einer Region ähnlich sein (Gupta, 1994), was manchmal nicht beachtet wird und dann zu schlechten Ergebnissen führt.

Aus den Methoden der regionalen Übertragung zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen lässt sich noch eine weiterführende Variante, denen eine klassische Regionenbildung nach hydrologischen Gesichtspunkten vorausgeht, abgrenzen. Hydrologische Raumeinheiten werden dabei mit Hilfe von Gebietsmerkmalen oder Kennwerten der Abflusszeitreihen gebildet.

Den regionalhydrologischen Ansätzen sind auch Hochwasserlängsschnitte zuzuordnen. Mit Hilfe von Hochwasserspendendiagrammen und der Einzugsgebietsgröße können hier für jeden Gewässerquerschnitt Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeit ermittelt werden. Der Aufstellung von Hochwasserspendendiagrammen, in denen die Einzugsgebietsfläche gegen Hochwasserspenden bestimmter Jährlichkeiten aufgetragen werden, gehen lokale statistische Analysen der Abflussreihen von Pegeln im betrachteten oder benachbarten Flusseinzugsgebiet voraus.

Tab. 4.2 Wichtige Abhängigkeiten bei statistischen Verfahren.

$$HQ_T = f(Q_1, Q_2, \dots, Q_n, a, b, c)$$

Variable	Messwerte an Pegeln	Wiederkehrintervall	Grösse des Einzugsgebietes	Gebietskenngrößen
Verfahren				
Lokale Ansätze für 1 < T < 200 Jahre und für T > 200 Jahre	X	X		
Regionale Ansätze für 1 < T < 200 Jahre und für T > 200 Jahre	X	X	X	X
Längsschnitte für 1 < T < 200 Jahre	X	X	Optional	Optional

4.3.4 Methode: Deterministische Niederschlag-Abfluss-Modelle

4.3.4.1 Allgemeines

Mit Niederschlag-Abfluss-Modellen wird versucht, die Abflussbildung aus dem Niederschlag, die Abflusskonzentration in den Teilgebieten und die Abflussveränderung in den Gewässern unter den vorliegenden Gebietseigenschaften (Randbedingungen) nachzuvollziehen. Aus hochwasserbürtigen Niederschlägen folgen Hochwasserabflüsse. Während die vorgenannten Methoden und Verfahren nur geeignet sind, Hochwasserscheitelabflüsse zu ermitteln, werden mit Niederschlag-Abfluss-Modellen die gesamten Ganglinien berechnet, deren Scheitelwerte dann als Bemessungsabflüsse verfügbar sind. N-A-Modelle sind allerdings primär entwickelt worden, um Hochwasserganglinien oder die Ganglinien der Wasserhaushaltskomponenten zu berechnen.

Es existieren eine Vielzahl von Modelltypen und -varianten. Grundsätzlich unterscheiden sich diese durch ihren räumlichen Detaillierungsgrad und der Nähe zur Physik bei der mathematischen Abbildung der hydrologischen Teilprozesse. Der Datenbedarf wird umso grösser, je geringer der Abstraktionsgrad ist, d.h. je flächendetaillierter modelliert wird, je mehr Teilprozesse in Algorithmen gefasst werden und je mehr physikalische Ansätze verwendet werden. Ob damit die Aussagegenauigkeit gesteigert wird, ist z.Z. noch unbekannt.

In der wasserwirtschaftlichen Praxis ist es deshalb nach wie vor gerechtfertigt, mit einfachen Niederschlag-Abfluss-Modellen, die mit wenigen Modellparametern auskommen, zu arbeiten. Der Datenbedarf und der Arbeitsaufwand sind geringer. Die Abhängigkeit der Modellparameter von Gebiets- oder Ereignismerkmalen lässt sich bei den einfacheren Modellen mit wachsender Erfahrung, d.h. nach einer Vielzahl von Anwendungen, brauchbar abschätzen.

Unabhängig vom Modelltyp und der Modellvariante ist noch zu unterscheiden, ob einzelne Bemessungsereignisse mit Hilfe von „Bemessungsniederschlägen“ (Niederschlagsereignisse mit Wahrscheinlichkeitsaussage) ermittelt werden oder ob zunächst mit sehr langen Reihen von Niederschlägen eine Langzeit- oder Seriensimulation des Abflusskontinuums einschl. aller Hochwasserereignisse durchgeführt wird, um dann eine statistische Analyse der berechneten Hochwasserscheitelabflüsse anzuschliessen.

Neben den flussgebietsbezogenen N-A-Modellen werden in der wasserwirtschaftlichen Praxis auch stadthydrologische Untersuchungen mit Hilfe von N-A-Modellen durchgeführt. Trotz der gleichen Aufgabenstellung (Simulation des Abflussgeschehens) ist die Modellentwicklung für Kanalnetze und Flussgebiete unterschiedlich, da bei der Kanalnetzberechnung hydraulische Berechnungen des Entwässerungssystems im Mittelpunkt der Überlegungen stehen (DVWK-Schriften 1999). Der vorliegende Bericht beschränkt sich deshalb auf N-A-Modelle, die zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen in mesoskaligen Flussgebieten eingesetzt werden.

Nach einer Zusammenstellung des Arbeitskreises „Mathematische Flussgebietsmodelle“ (BMU 1997) lassen sich als häufigste N-A-Modelle folgende Typen unterscheiden.

4.3.4.2 Blockmodelle

Blockmodelle sind Konzeptmodelle, bei denen das Einzugsgebiet räumlich nicht unterteilt wird. Bei der mathematischen Abbildung der hydrologischen Teilprozesse wird die Physik nicht im einzelnen nachvollzogen. Diese Modellgruppe bestimmt das Abflussverhalten eines Einzugsgebietes auf einen auslösenden Niederschlag integral (als Block) über empirische Ansätze, deren Parameter anhand von beobachteten Niederschlag-Abfluss-Ereignissen oder regionalen Erfahrungen abgeleitet werden. Blockmodelle werden zur Simulation von Einzelereignissen aus Bemessungsniederschlägen an einem vorgegebenen Gewässerquerschnitt verwendet. Aufgrund der integralen Sichtweise dieser Modelle sind sie für kleinere, hinsichtlich Morphologie und Geologie verhältnismässig homogene Einzugsgebiete zur Ermittlung von Scheitelabflüssen und Bemessungsganglinien sowie zum Nachweis örtlicher Wirkungen geeignet. Kombiniert mit Ansätzen zur Vorgeschichte (Jahreszeit,

Vorregen) können Blockmodelle auch zur Langzeit- und Seriensimulation eingesetzt werden (DVWK-Schriften 1999).

4.3.4.3 Flächendetaillierte Modelle

Bei grösseren Einzugsgebieten oder bei Einzugsgebieten mit grossen Höhenunterschieden nimmt die hydrometeorologische Variabilität in einem Masse zu, dass diese nicht mehr durch einfache Blockmodelle erfasst wird. Gleichermassen verhält es sich bei erhöhter räumlicher Heterogenität der pedologischen und geologischen Verhältnisse sowie der Landnutzung im Einzugsgebiet. Darüber hinaus müssen flächendetaillierte Modelle eingesetzt werden, sollen überörtliche Wirkungen von wasserwirtschaftlichen Massnahmen nachgewiesen werden.

Die verwendbaren physikalischen Ansätze sind meistens Ansätze, die Punktprozesse (z.B. an Bodensäulen) oder Prozesse in kleinen Hangflächen beschreiben können. Sie müssen für grössere Räume parameterisiert werden oder die zu verwendenden Parameter, z.B. hydraulische Leitfähigkeit oder Gefälle, geben, da sie letztlich über Raumeinheiten gemittelt oder integriert werden müssen, keine wahren Werte, sondern nur noch einen Index wieder. Man spricht dann von effektiven Parametern.

Der Aufspaltung in viele Teilprozesse liegt meistens eine gedankliche Vorstellung zugrunde, die zwar plausibel ist, aber keineswegs der Realität entsprechen muss. Dies gilt vor allem für sogenannte Bodenspeichermodelle, die das Infiltrationsverhalten des Bodens und die Wasserbewegung im Boden unter Berücksichtigung der zeitlichen Veränderung der Bodenfeuchte zu simulieren in der Lage sein sollen. Dabei ist der Umgang mit der unbekannt Heterogenität der Böden ein grosses Problem.

Der räumliche Detaillierungsgrad kann nicht beliebig weit getrieben werden, weil dann die Beschaffung der Parameterwerte nicht mehr möglich ist und rechentechnische Schwierigkeiten eintreten.

In jedem Fall ist auch bei Modellen mit geringem Abstraktionsgrad eine Kalibrierung erforderlich, die sehr flexibel ist, wenn viele Parameter festzulegen sind. Diese Flexibilität wird aber mit Regellosigkeit erkauft, die eine ungefähre Zuordnung von Parametergrössen zu Ereignis- oder Gebietsmerkmalen unmöglich macht. Deshalb wird dann nur eine Auswahl von Parametern (z.B. 10) kalibriert und die Fehler der verbleibenden anderen Parameter werden in der Kalibrierung der ausgewählten Parameter mit versteckt.

Über die Genauigkeit der Ergebnisse im Vergleich zu denen der detaillierten Modellen lässt sich z.Z. nichts aussagen.

Prinzipiell gilt, dass mit wachsender Komplexität des N-A-Modells auch die Anforderungen an die verfügbaren Daten und der Aufwand für ihre Erhebung und Aufbereitung zunimmt. Gleichermassen steigt auch die Zahl der Modellparameter, mit denen die Modellanpassung vorgenommen werden muss. Darüber hinaus ist die Qualität der Ergebnisse einer N-A-Simulation nicht nur vom verwendeten Modell abhängig, sondern unterliegt auch der Erfahrung des Bearbeiters mit dem verwendeten Modell. Daher kann die allgemeine Verbreitung des Einsatzes eines Modells und die dadurch erworbene Erfahrung im Umgang mit sensiblen Modellparametern die Anwendbarkeit und die Qualität der Ergebnisse eines Modells deutlich verbessern.

Tab. 4.3 Wichtige Abhängigkeiten bei Niederschlag-Abfluss-Modellen.
 $HQ(t) = f(N(\text{Höhe}, \text{Dauer}, \text{zeitl. Verteilung}, \text{räuml. Verteilung}), a, b, c, \dots, n)$

Abflussbildung (vertikale Wasserflüsse)

	Gebietseinteilung		Niederschlag					Gebietskenngrossen					
	ungegliedert	gegliedert	Höhe	Dauer	Gebietsniederschlag	Blockregen	räumlich verteilt	Zeitlich verteilt	Abflussbeiwert Konstant	Abflussbeiwert f(t) o.ä., z.B. CN	Landnutzung	Boden	Gefälle
Blockmodell	X		X	X	X	X	X	X	X	X			
Detailmodell		X	X	X			X	X			X	X	X

Abflusskonzentration (laterale Wasserflüsse)

	Gebietseinteilung		Gebietskenngrossen						
	ungegliedert	gegliedert	UH	linearer Speicher	Speicher-kaskaden	Zeit-Flächen-Diagramm	Topograph. Index	Transmissivitäten	Gerinne-kenngrossen
Blockmodell	X		X	X	X	X			
Detailmodell		X				X	X	X	X

4.4 Angewandte empirische und regional gültige Formeln

4.4.1 Hüllkurve nach Wundt

Beschreibung des Modells

Die Aufstellung von Hüllkurven für grösste beobachtete Hochwasserabflüsse erfordert grundsätzlich eine Vielzahl von Messwerten über die Scheitelabflüsse in der betreffenden Region. Meist werden in einem doppeltlogarithmischen Massstab die Scheitelabflüsse gegen die Grösse des Einzugsgebietes aufgetragen.

Wundt (1949, 1965) trägt zur Ermittlung der Höchstwerte der Abflussspenden für Europa die logarithmierte Einzugsgebietsfläche gegen die logarithmierten höchsten gemessenen Abflussspenden auf. Er geht dabei von folgender Beziehung aus:

$$HHq = a * A_{Eo}^b$$

Zusätzlich zur Umhüllungskurve für die höchsten Abflussspenden trägt Wundt (1965) eine zweite Umhüllungskurve ein, mit der er das obere Zehntel der Spitzenwerte nicht mehr einschliesst, was bedeutet, dass 90 % aller Spitzenabflussspenden unterhalb dieser Kurve liegen. Er bezeichnet diese Umhüllende als 90 %-Kurve. Neben der graphischen Darstellung seiner Umhüllungskurven gibt Wundt (1949) für die Konstanten a und b aus obiger Gleichung für verschiedene Fälle folgende Werte an.

Tab. 4.4 Konstanten der math. Darstellung der Umhüllenden nach Wundt (aus Wundt 1949).

Umhüllende	Bergland und kontinentale Lage		Ebene und ozeanische Lage		Spitzenwerte
	50 %	90 %	50 %	90 %	100 %
a	2'050	13'800	109	502	500'000
b	-0,286	-0,405	-0,031	-0,118	-0,632

Zusätzlich gibt Wundt (1965) nach einer Arbeit von Kreps (1963) die Koeffizienten für die 90 %-Kurve an, so dass die Beziehung folgende Form erhält:

$$Hq_{90\%} = 13,8 * A_{Eo}^{-0,6}$$

Für diese Formel gilt jedoch die Einschränkung, dass für Einzugsgebietsflächen kleiner 100 km² geringere Werte anzusetzen sind.

Gleichzeitig weist Wundt (1965) darauf hin, dass für bestimmte Regionen, z.B. Teile der Alpen, gesonderte Formeln aufgestellt werden müssen, da diese die dortigen Abflussverhältnisse und damit die Beobachtungen besser wiedergeben.

Die Hüllkurven nach Wundt (1965) sind nach 1965 nicht mehr aktualisiert worden.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Mit den Hüllkurven nach Wundt wird beim Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft sowie bei zwei Ingenieurbüros, einem Wasserverband und zwei Hochschulinstituten gearbeitet.

Jährlichkeit des Ereignisses

Die 90 %-Hüllkurve nach Wundt wird zur groben Abschätzung der Hochwasserabflüsse im Vorfeld genauerer Untersuchungen und der Hochwassersituation für weniger schützenswerte Objekte herangezogen. Aber auch für die Bemessung von Hochwasserscheitelabflüssen der Jährlichkeit 100 wird die 90 %-Hüllkurve verwendet.

Einzugsgebietsfläche

Die betrachteten Wildbacheinzugsgebiete in Bayern erreichen Flächen von ca. 150 km² und beschränken sich auf Hochgebirgsregionen. Für Einzugsgebiete die eine kleinere Fläche als 100 km² aufweisen, wird die 90 %-Umhüllende zur Abschätzung des HQ₁₀₀ entsprechend der Hinweise von Wundt (1965) abgemindert.

Die Einschränkung der Anwendung der Hüllkurve nach Wundt für bayerische Wildbacheinzugsgebiete in Hochgebirgsregionen mit Flächen bis ca. 150 km² gilt nicht prinzipiell.

Erfahrungen

Die Datenverfügbarkeit wird als sehr gut bewertet. Das hydrologische Expertenwissen des Bearbeiters hat im Hinblick auf die Güte der Abschätzung ein hohes Gewicht.

Notwendige Inputdaten

Als Eingangswert in dieses Verfahren sind lediglich die Einzugsgebietsgrößen, die aus Topographischen Karten oder Geographischen Informationssystemen ermittelt werden können, der betrachteten Querschnitte notwendig.

Aufwand (zeitlich)

Der Arbeitsaufwand für die Durchführung der Abschätzung inklusive der Ermittlung der Einzugsgebietsgröße wird mit etwas weniger als einem viertel Tag angegeben.

Aufwand (finanziell)

Kein Aufwand ausser dem manuellen Bearbeitungsaufwand.

Güte der Resultate

Die Güte der Resultate wird nicht beurteilt. Die Beurteilung würde es erfordern, zusätzlich die Hochwasserabflüsse nach statistischer Methode oder mit N-A-Modellen zu schätzen. Gerade dieser Aufwand ist bei der praktischen Anwendung für kleinere Projektes nicht gerechtfertigt.

Literatur

Kreps, H. (1963): Eine kritische Betrachtung von Hochwasserformeln. In: Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich, Nr. 36.

Wundt W. (1949/1950): Die grössten Abflusspenden in Abhängigkeit von der Fläche. In: Die Wasserwirtschaft, Heft 2, Jahrgang 40:59-64.

Wundt W. (1965): Grenzwerte der Hochwasserspende und der mittleren Abflusspende in Abhängigkeit von der Fläche. In: Die Wasserwirtschaft, Heft 1, 55. Jahrgang.

4.4.2 Rationale Methode

Beschreibung des Modells

Die Rational Formula hat sich als Flutplanverfahren (Laufzeitverfahren) zur Berechnung städtischer Kanalnetze bewährt. Den vielen Varianten des Verfahrens ist die Vorstellung von der sogenannten Konzentrations- und Anlaufzeit gemeinsam. Sie basiert auf der Annahme, dass der Hochwasserabfluss – bei konstanter Regenintensität – dann maximal ist, wenn das gesamte Einzugsgebiet oder dessen hochwasserrelevanten Teilgebiete zum Abfluss beitragen (Weingartner 1999).

Eine leicht abgewandelte Form der „Rational Formula“ wird im Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft verwendet, um in kleinen Einzugsgebieten den Scheitelabfluss verschiedener Jährlichkeiten zwischen HQ_1 bis HQ_{100} zu ermitteln. Die Scheitelabflüsse werden nach folgender Formel berechnet. Sie basiert auf dem Ansatz, dass das Volumen des effektiven Niederschlags (als Produkt des Niederschlags und des Abflussbeiwertes) identisch mit dem Volumen der Abflussganglinie ist (BLfW 1999).

$$HQ_T = \frac{h_N * A_{Eo} * \psi_m}{(0,5 * (t_{An} + t_{Ab}) * 0,0\theta)}$$

mit:

HQ_T	Hochwasserscheitelabfluss [m ³ /s]
h_N	Niederschlagshöhe (Blockregen) [mm]
A_{Eo}	Einzugsgebietsfläche [km ²]
ψ_m	Abflussbeiwert [-]
t_{An}	Anlaufzeit der Hochwasserwelle [min]
t_{Ab}	Ablaufzeit der Hochwasserwelle [min]

Für die Berechnung mit Hilfe dieser Formel werden folgende Annahmen getroffen (vgl. Abb. 4.1):

1. Das Einzugsgebiet wird gleichmässig überregnet,
2. Der Niederschlag wird als Blockregen angenommen, d.h. die Niederschlagsintensität ändert sich nicht mit der Zeit,
3. Ein Regenereignis bestimmter Jährlichkeit ergibt ein Hochwasserereignis gleicher Jährlichkeit,
4. Die Typpanglinie hat eine Dreiecksform. Die Niederschlagsdauer t_N ist gleich der Anlaufzeit t_{An} der Hochwasserwelle. Unter dieser Annahme stellt sich mit Ende des Niederschlags der maximale Abfluss HQ_T ein,
5. Anlaufzeit t_{An} und Ablaufzeit t_{Ab} verändert sich bei verschiedenen Regenereignissen nicht. Sie bestimmen sich ausschliesslich aus den morphologischen Eigenschaften des Einzugsgebietes und des Gewässers,
6. Der Basisabfluss wird vernachlässigt.

Für die erforderlichen Niederschlagshöhen h_N können Bemessungsniederschläge dem KOSTRA-Atlas des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 1997) entnommen werden. Dabei ist die gewünschte Jährlichkeit des Ereignisses und die Niederschlagsdauer zu berücksichtigen. Die Niederschlagsdauer muss der über Gebietskenngrössen ermittelten Anlaufzeit t_{An} entsprechen: $t_N = t_{An}$. Aus der KOSTRA-Tabelle ist zunächst diejenige Dauerstufe auszuwählen, die der berechneten Anlaufzeit am nächsten kommt. Der Wert für t_{An} ist anschliessend auf den gewählten Wert zu setzen.

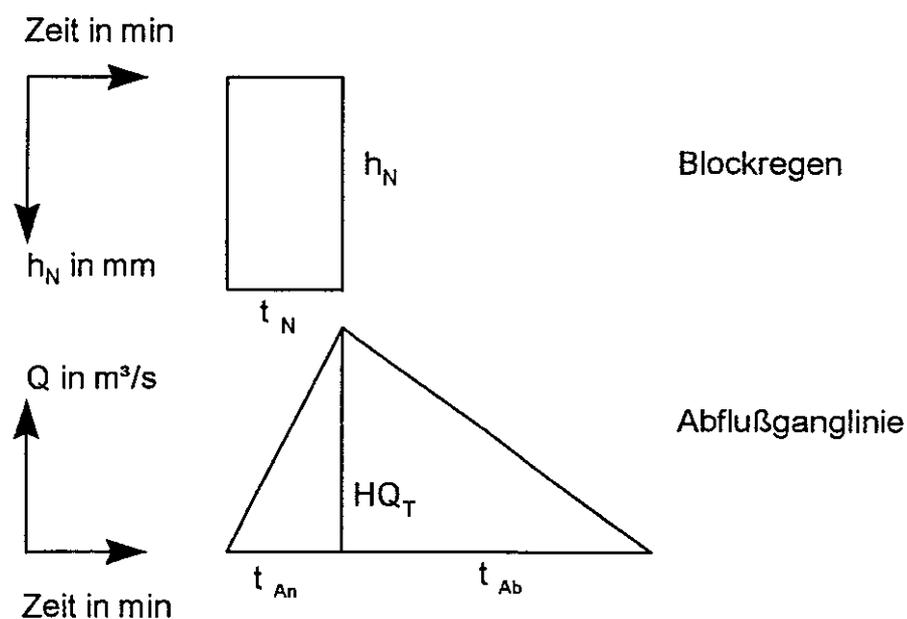


Abb. 4.1 Schematische Darstellung der Dreiecksganglinie mit An- und Ablaufzeit (aus BLfW 1998).

Der Abflussbeiwert des Einzugsgebietes, d.h. der Quotient aus der Abflusshöhe des Direktabflusses (effektiver Niederschlag) und der tatsächlichen Niederschlagshöhe des dazu gehörigen Niederschlagsereignisses, muss geschätzt werden. Im Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft werden hierzu Erfahrungswerte, die in Bayern gelten, herangezogen. Für seltene Hochwasserereignisse (HQ_{100}) sind dies:

Südlich der Donau und im Bayerischen Wald:	0,4 bis 0,6
Nördlich der Donau:	0,5 bis 0,7

Der niedrige Abflussbeiwert wird bei einer höheren Rückhaltefähigkeit des Einzugsgebietes (z.B. bei Mooregebieten) vergeben. Die niedrigen Werte sind auch bei häufigeren Hochwasserereignissen (HQ_1 bis HQ_{10}) zu wählen. Darüber hinaus können Abflussbeiwerte vielfach für bestimmte Regionen und Landschaftsformen der Literatur entnommen werden.

Zur Ermittlung der Anlaufzeit sind bestimmte Kennwerte des Einzugsgebietes notwendig:

- L Maximale Fließweglänge [km], dies ist die maximale Länge des Fließweges vom Untersuchungsquerschnitt bis zum Schnittpunkt zwischen der Wasserscheide und dem bis dorthin verlängerten Hauptgewässer
- Δh Höhendifferenz im Einzugsgebiet [m], dies ist die Differenz zwischen dem höchsten Punkt am Ende des verlängerten Hauptgewässers und der Geländehöhe am gesuchten Gewässerquerschnitt
- A_{Eo} oberirdisches Einzugsgebiet [km²]

Nach diesen Gebietskennwerten kann die Anlaufzeit t_{An} der Hochwasserwelle nach folgender Bestimmungsgleichung (Basis der Bestimmungsgleichung: Kirpich-Formel, vom BLfW (1999) für die gewählten Dreieckstypganglinien modifiziert) ermittelt werden:

$$t_{An} = 227 * \left(\frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385}$$

Zu beachten ist, dass die Anlaufzeit t_{An} sinnvoll mit den Dauerstufen der Bemessungsniederschläge, z.B. aus dem KOSTRA-Atlas, festzulegen ist (DWD 1997). Die

Ablaufzeit hängt von den Retentionseigenschaften des Einzugsgebietes ab und kann als Mehrfaches der Anlaufzeit durch einen Faktor F geschätzt werden (vgl. Tab. 4.5):

$$t_{Ab} = F * t_{An}$$

Der Scheitelabfluss HQ_T verkleinert sich mit grösser werdendem Faktor F und somit wachsender Ablaufzeit t_{An} . F richtet sich nach der Landnutzung und nach der sogenannten hydraulischen Charakteristik im Einzugsgebiet und kann für verschiedene Landnutzungen der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tab. 4.5 Faktor F für verschiedene Landnutzungsarten (nach BLfW 1998).

Landnutzung im Einzugsgebiet	Hydraulische Charakteristik	Faktor F
Siedlungsgebiet	Überwiegend befestigte, hydraulisch glatte Flächen	1
Aufgelockerte Bebauung mit Gärten, landwirtschaftliche Nutzflächen	Nur teilweise befestigte Flächen	1,25
Mischung von Waldanteilen sowie Acker- und Wiesenflächen, Bebauung untergeordnet	Normalfall	1,5
Hohe Anteile von Wald, Moorflächen, vielfach anmoorige Böden	Hohe Retention, raue Verhältnisse	2

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Die Rationale Formel wird am Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft sowohl für grobe Abschätzungen im Vorfeld genauerer Untersuchungen und im Zusammenhang weniger schützenswerter Objekte eingesetzt. Darüber hinaus lassen sich mit diesem Verfahren Hochwasserabflüsse für Bemessungsaufgaben und Überschwemmungszonen abschätzen. Ebenfalls arbeiten das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie, das Staatliche Umweltamt Minden sowie drei Ingenieurbüros mit der Rationalen Formel, allerdings nicht immer mit dem oben beschriebenen Ansatz, sondern mit ähnlichen Verfahren.

Jährlichkeit des Ereignisses

Die Anwendung der Rationalen Formel beschränkt sich auf Hochwasserereignisse mit Jährlichkeiten zwischen 10 und 100 Jahren.

Einzugsgebietsfläche

Das Spektrum der untersuchten Einzugsgebietsgrößen reicht von 1 bis 10 km².

Naturräumliche Zuordnung

Hinsichtlich des naturräumlichen Gültigkeitsbereiches wird das oben beschriebene Verfahren im Mittelgebirge und Flachland eingesetzt. Eine allgemeine Beschränkung des Verfahrens auf diese beiden Naturräume ist jedoch nicht bekannt.

Erfahrungen

Bei der Anwendung dieses Verfahrens wird dem hydrologischen Expertenwissen ein hohes Gewicht zugesprochen. Die allgemeine Datenverfügbarkeit wird als gut eingeschätzt.

Notwendige Inputdaten

- Der regionale Einsatz des hier beschriebene Verfahrens erfordert Informationen über
- die Gesamtfläche,
 - das Gefälle,
 - den Anteil an Wald und
 - bebauter Fläche im Einzugsgebiet.

Diese Größen werden aus topographischen Karten ermittelt. Zusätzlich sind statistische Niederschlagshöhen bereitzustellen, die beispielsweise dem KOSTRA-Atlas zu entnehmen sind. Abflussbeiwerte sowie An- und Ablaufzeiten werden nach o.g. Ansätzen geschätzt und vom Sachbearbeiter modifiziert. Dabei erfolgt ein Vergleich mit genaueren Untersuchungen an zahlreichen bayerischen Pegeln.

Aufwand (zeitlich)

Die Datenbeschaffung und -aufbereitung eingeschlossen, beträgt der zeitliche Aufwand dieses Verfahrens zwei Tage.

Aufwand (finanziell)

Kein Aufwand ausser dem manuellen Bearbeitungsaufwand.

Güte der Resultate

Eine Fehlerbetrachtung der Modellresultate erfolgt nicht. Sie würde erfordern, zusätzlich die Hochwasserabflüsse nach statistischer Methode oder mit N-A-Modellen zu schätzen. Gerade dieser Aufwand ist bei der praktischen Anwendung für kleinere Projekte nicht gerechtfertigt.

Literatur

Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, BLfW (Hrsg.) (1998): Hydrologische Planungsgrundlagen, Hochwasser, Loseblattsammlung des Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft.

Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, BLfW (Hrsg.) (1999): Hydrologische Planungsgrundlagen, Hochwasserlängsschnitt, Loseblattsammlung des Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft.

4.5 Angewandte statistische Verfahren – Lokale Ansätze

4.5.1 HQ-EX: Wahrscheinlichkeitsanalyse von Hochwasserabflüssen

Beschreibung des Modells

Zur Durchführung der statistischen Hochwasseranalysen nach dem DVWK-Merkblatt 251 (1999) wurde von der Firma WASY das Softwareprodukt HQ-EX entwickelt (WASY 1997). Die Entwicklung von HQ-EX und die Erarbeitung des Merkblattes gingen Hand in Hand; dadurch sind die in Kapitel 4.3.3.1 genannten Defizite ausgeglichen worden. Das hat zu einer weiten Verbreitung von HQ-EX geführt. Es darf nicht unerwähnt bleiben, dass dem Programm HQ-EX die in Kapitel 4.3.3.1 erwähnten Arbeiten von Kluge (1996) zugrunde liegen und es auch andere weit verbreitete Lösungsansätze statistischer Verfahren gibt (Plate, 1993). Aus unterschiedlichen Lösungsansätzen bei der Berechnung der Parameter nach gleichen Methoden und aus unterschiedlichen Bewertungsansätzen bei der Auswahl der besten Verteilung resultieren von einander abweichende Ergebnisse trotz gleicher Verteilungsfunktionen und gleicher Methoden der Parameterschätzung.

Das Programmpaket hat einen Leistungsumfang, der mit den im DVWK-Merkblatt 251 (1999) gegebenen Empfehlungen weitestgehend übereinstimmt.

Es besteht die Möglichkeit, mit HQ-EX Stichproben von Jahreshöchstabflüssen an Pegeln zu analysieren. Hierfür können die zugehörigen empirischen Verteilungsfunktionen durch 7 verschiedene analytische Verteilungsfunktionen in der Regel mit drei unterschiedlichen Schätzmethode für die Verteilungsparameter approximiert werden. Tabelle 4.6 zeigt die verschiedenen analytischen Verteilungsfunktionen. Ihre Auswahl erfolgte nach ihrer Bewährung in der hydrologischen Bemessungspraxis sowie für einzelne besondere Anwendungsfälle.

Tab. 4.6 Analytische Verteilungsfunktionen des Programm HQ-EX (nach WASY 1997).

Verteilungsfunktion	Anzahl der Parameter
Extremwertverteilung Typ 1 (E1)	2
Allgemeine Extremwertverteilung (AE)	3
Gemischte Extremwertverteilung (ME)	4
Logarithmische Normalverteilung (LN3)	3
Pearson-Typ 3-Verteilung (P3)	3
Logarithmische Pearson-Typ 3-Verteilung (LP3)	3
Weibull-Verteilung (WB3)	3

Die erzielte Güte der Anpassung kann über drei unterschiedliche Anpassungsmasse beurteilt werden, die zur Auswahl der besten Verteilung alle drei addiert werden, obwohl sie unterschiedliche Skalen haben. Alle Ergebnisse können in Form von Tabellen und Grafiken dargestellt werden. Als Beispiel für eine Grafik ist in Abbildung 4.2 das Ergebnis einer Anpassung für verschiedene analytische Verteilungen dargestellt.

Die Ermittlung eines Bemessungshochwassers erfolgt im Programm in drei Stufen:

1. Zuerst werden alle Stichprobenmomente, die für die Parameterschätzung und die Berechnung von Konfidenzintervallen benötigt werden, berechnet.
2. Anschliessend werden für alle sieben analytischen Verteilungsfunktionen die Parameterwerte geschätzt. Die Parameterschätzung erfolgt abgesehen von Ausnahmen bei der ME und LP3 für alle Verteilungsfunktionen nach der
 - Momentenmethode,
 - Maximum-Likelihood-Methode,
 - Methode der wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente.

3. In einem letzten Schritt werden für alle analytischen Verteilungsfunktionen und Schätzmethoden die drei folgenden Anpassungsmasse berechnet:
- Anpassungsmass D nach Kolmogorov,
 - $n\omega^2$ -Anpassungsmass,
 - Quantil-Korrelation r_p .

Alle Ergebnisse können in Tabellen und Grafiken ausgegeben werden (vgl. Abb. 4.2).

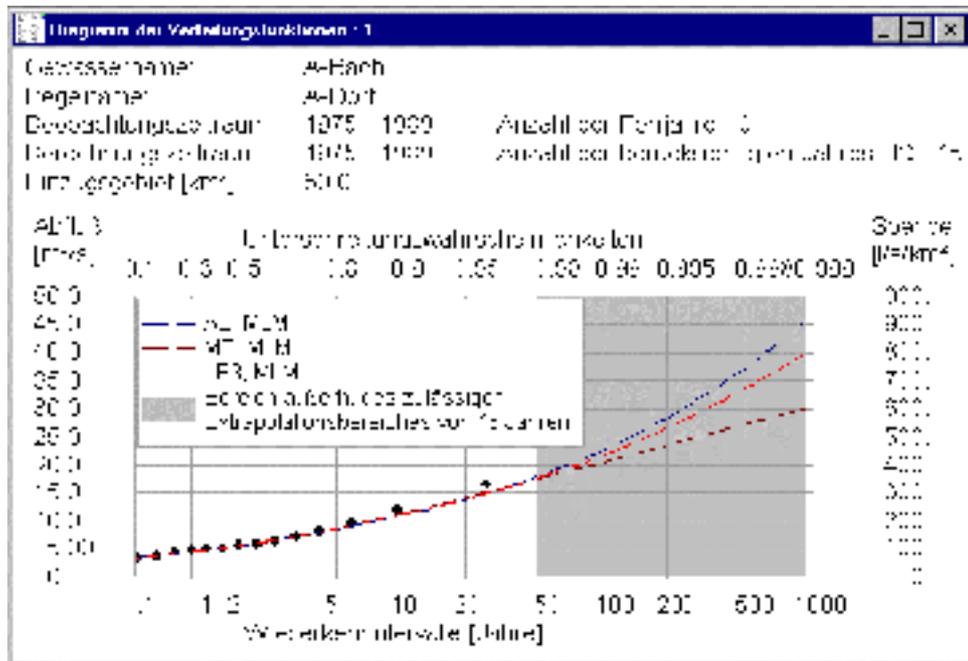


Abb. 4.2 Beispiel für eine Ergebnisdarstellung in HQ-EX (aus WASY 1997).

Für die Darstellung der empirischen Verteilung der Stichprobe wird ausschliesslich die Eintragungswahrscheinlichkeit nach Cunnane verwendet:

$$P_i = \frac{(i-0,4)}{(n+0,2)}$$

Zusätzlich zu den Verteilungsfunktionen können die Konfidenzgrenzen (Vertrauensbereich) für unterschiedliche Signifikanzniveaus α unter der Annahme, dass die Abweichungen von dem berechneten Wert $x(P)$ normalverteilt sind, dargestellt werden (WASY 1997). Zur Prüfung der verwendeten Stichprobe kann darüber hinaus eine Trendanalyse durchgeführt werden.

Neben der Möglichkeit, mit Hilfe des Programmpaketes HQ-EX statistische Hochwasseranalysen durchzuführen, gibt das DVWK-Merkblatt 251 (1999) verschiedene Hinweise zur Datengewinnung und -prüfung, nämlich zu:

- Trendanalyse und Trendbereinigung,
- Ausreisserbehandlung,
- Prüfung auf Homogenität und Repräsentanz der Stichprobe,
- Einbindung historischer Hochwasserereignisse,
- Verwendung von partiellen Serien.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Mit den deutschen Bundesländern Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Thüringen, Rheinland-Pfalz, Sachsen und Niedersachsen findet das Programmpaket HQ-EX und damit die Empfehlungen des DVWK zur statistischen Hochwasseranalyse eine breite Akzeptanz und Verbreitung. Darüber hinaus wird es häufig in Ingenieurbüros und bei Verbänden eingesetzt. Entsprechende Erfahrungen liegen vor und werden im folgenden zusammengefasst dargestellt.

Jährlichkeit des Ereignisses

Das Spektrum der Jährlichkeiten der zu ermittelnden Hochwasserscheitelabflüsse reicht in der Regel von einem bis zweihundert Jahre. Allerdings wird in Sachsen und in Thüringen sowie bei Ingenieurbüros und Verbänden mit HQ-EX auch bis zu Hochwasserabflüssen mit Überschreitungswahrscheinlichkeiten von $1/10^4$ pro Jahr, also extremen Abflüssen, extrapoliert. In den meisten Fällen werden Bemessungsscheitelabflüsse abgeleitet. In einigen Fällen dienen die Ergebnisse auch der Festlegung von Überschwemmungszonen oder der Ermittlung des Hochwasserrisikos während der Bauzeit von Objekten, der Nachweise zur Anlagensicherheit von Talsperren, Rückhaltebecken und besonderen technischen Anlagen (z.B. Kernkraftwerken) sowie der Analyse des Restrisikos bei technischen Anlagen.

Einzugsgebietsfläche

Die untersuchten Einzugsgebiete weisen meist eine Fläche zwischen 10 bis $5 \cdot 10^4$ km² auf. Es werden damit aber auch die Hochwasserdaten von Pegeln grosser Einzugsgebiete, z.B. Weser, Rhein, Donau, Elbe, statistisch analysiert. Eine Beschränkung hinsichtlich der Einzugsgebietsgrösse besteht nicht. Die Abschätzung extremer Abflüsse erfolgt allerdings nur für Einzugsgebiete bis zu 150 km² Grösse.

Naturräumliche Zuordnung

Der naturräumliche Gültigkeitsbereich des vorgestellten Verfahrens richtet sich mehr nach den in den einzelnen Bundesländern vorkommenden Landschaftsformen. Eine naturräumliche Einschränkung besteht daher nicht.

Erfahrungen

Mit der Verfügbarkeit eines Softwarepaketes wird die statistische Hochwasseranalyse relativ einfach. Die Datenverfügbarkeit wird, je nach Jährlichkeit des zu ermittelnden Hochwassers, als gut bis sehr gut beurteilt. Trotz dieser Vorteile wird für die Beurteilung der Güte der Resultate dem hydrologischen Expertenwissen ein hohes Gewicht beigemessen.

Notwendige Inputdaten

Als Eingabedaten werden Jahresserien des Hochwasserscheitelabflusses benötigt. Die Serien sind vor einer statistischen Analyse in HQ-EX im Hinblick auf

- Homogenität,
- Trends und
- Ausreisser zu prüfen.

Ausreisser werden mit Hilfe eines Tests extrahiert und gegebenenfalls nach Prüfung ihrer Plausibilität eliminiert (DVWK-Merkblätter 1999).

Bei nicht homogenen Serien wird versucht, die Ursache zu finden, um die Serie korrigieren und verwenden zu können. In den meisten oben genannten Bundesländern werden Trendanalysen mit linearen Regressionen durchgeführt. Wenn ein Trend vorliegt, wird die Jahresserie der Hochwasserabflüsse nicht weiter verwendet.

Aufwand (zeitlich)

Der von den meisten Anwendern angegebene Zeitaufwand für die Abschätzung eines Hochwasserabflusses ist mit ca. einem Tag und weniger relativ gering und einheitlich. Bei den Angaben zur Datenaufbereitung differieren die angegebenen Zeiten wesentlich stärker, was sich im

Aufwand für die Prüfung der Zeitreihen auf Homogenität, Trends und Ausreisser begründen lässt. Diese hat auf die Qualität der Resultate einen wesentlichen Einfluss.

Aufwand (finanziell)

Abgesehen vom Erwerb des Softwarepaketes HQ-EX sind keine weiteren Kosten zu erwarten.

Güte der Resultate

Zur Güte der Resultate werden keine Angaben gemacht, sie lässt sich in der Regel auch nicht quantitativ angeben, da im Extrapolationsbereich Vergleichsdaten fehlen. Das Programm HQ-EX bietet jedoch die Möglichkeit an, für jede angepasste analytische Verteilungsfunktion Konfidenzintervalle entsprechenden Signifikanzniveaus darzustellen. Das sind allerdings nur die statistischen Abweichungen ohne Berücksichtigung der Ungenauigkeiten aus den Daten selbst.

Literatur

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, DVWK (Hrsg.) (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. In: DVWK-Merkblätter 251, 42 Seiten, Bonn.

Kluge C. (1996): Wahrscheinlichkeitsanalysen von Hochwasserdurchflüssen. In: Dresdner Berichte 7, 122 Seiten, Dresden.

Schultz, G., A. (1998): Kritische Überlegungen zur Bestimmung des Bemessungshochwasserabflusses. In: Bericht 82 der Versuchsanstalt Oberrach und des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München: 118-129.

WASY (1997): HQ-EX, Version 2.0, Benutzerhandbuch. WASY: Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH, 24 Seiten, Berlin

4.5.2 EXTREM (IHW/IWK-Paket: Hochwasseranalyse)

Beschreibung des Modells

Am Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe wurde von Ihringer und Kron (1993) ein EDV-Programm zur statistischen Hochwasseranalyse erstellt. Dieses wurde weiterentwickelt und ist inzwischen als Programm EXTREM Bestandteil des sogenannten IHW/IWK-Paketes, einem Softwareprodukt des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (vgl. auch Abschnitt 4.8.1).

Neben der Aufbereitung und Prüfung der Zeitreihen sowie der Ableitung von jährlichen und partiellen Serien umfasst das Programm die Prüfung vieler unterschiedlicher statistischer Verteilungsfunktionen auf ihre Anpassung sowie viele dem Extremverhalten zugeordnete Teiluntersuchungen wie Tests auf Homogenität, Trend und Sprünge.

Im Programm EXTREM, das die statistische Hochwasseranalyse auf der Basis von jährlichen und partiellen Serien ermöglicht, können 15 verschiedene analytische Verteilungsfunktionen angepasst werden. Die Schätzung der Parameter erfolgt zunächst über die Momenten-Methode (MM) und wahlweise auch über die Maximum-Likelihood-Methode (MLM). Von letzterer Schätzmethode sind die Normal- und Log-Normal, die Exponential- und WAKBY-Verteilung ausgenommen. Folgende Verteilungen sind implementiert (Ihringer und Kron 1993):

Tab. 4.7 Analytische Verteilungsfunktionen in EXTREM (nach Ihringer und Kron 1993).

Analytische Verteilungsfunktion		Anzahl der Parameter	Kurzbezeichnung	Schätzverfahren
Familie	Name			
Normal	Normalverteilung	2	NORMAL	MM
	Log-Normalverteilung	2	LOG-NORMAL-2	MM
		3	LOG-NORMAL-3	MM, MLM
Extremal-I	Gumbelverteilung	2	GUMBEL	MM, MLM
	Log-Gumbelverteilung	2	LOG-GUMBEL	MM, MLM
Gamma	Gammaverteilung	2	GAMMA	MM, MLM
	Log-Gammaverteilung	2	LOG-GAMMA	MM, MLM
	Pearson-III-Verteilung	3	PEARSON-3	MM, MLM
	Log-Pearson-III-Verteilung	3	LOG-PEARSON-3	MM, MLM
Weibull	Weibull-II-Verteilung	2	WEIBULL-2	MM, MLM
	Log-Weibull-II-Verteilung	2	LOG-WEIBULL-2	MM, MLM
	Weibull-III-Verteilung	3	WEIBULL-3	MM, MLM
	Log-Weibull-III-Verteilung	3	LOG-WEIBULL-3	MM, MLM
	Exponentialverteilung	1	EXPONENT-1	MM
		2	EXPONENT-2	MM
Wakey	WAKEBY-Verteilung	5	WAKEBY	MM

Für den Test der Anpassungsgüte stehen sowohl der ω^2 - als auch der Kolmogorov-Smirnow-Wert zur Verfügung. Darüber hinaus können alle angepassten Wahrscheinlichkeitsverteilungen graphisch dargestellt und deshalb miteinander visuell verglichen werden. Als dazu notwendige empirischen Eintragungswahrscheinlichkeiten kann zwischen der Plotting Position nach Weibull, Hazen, Tschschodajew, Blom und Gringerton gewählt werden. Zusätzlich können Konfidenzbereiche vorgegebener Signifikanz zur Darstellung der Streubereiche der Extremwerte in eine Graphik eingetragen werden (Ihringer und Kron 1993).

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Das Programmpaket Extrem wird in den Bundesländern Bayern, Baden-Württemberg, Hessen, Nordrhein-Westfalen, Saarland, Thüringen, bei verschiedenen Wasserverbänden und in mehreren Ingenieurbüros insbesondere für die Abschätzung von Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeiten verwendet. Hinzu kommt die Ausweisung bzw. Abschätzung von Überschwemmungszonen.

Jährlichkeit des Ereignisses

Die Harzwasserwerke in Niedersachsen ermitteln zudem mit dem oben beschriebenen Verfahren die Sicherheit besonders schützenswerter Anlagen und berechnen daher auch extreme Abflüsse mit Wiederholungszeitspannen von 1'000 Jahren. Zusätzlich wird versucht, den vermutlich grössten Hochwasserabfluss zu bestimmen. Im Allgemeinen wird jedoch das Programm EXTREM eingesetzt, um Hochwasserabflüsse mit Jährlichkeiten zwischen 1 und 200 Jahren zu berechnen.

Einzugsgebietsfläche

Die Grösse der betrachteten Einzugsgebietes richtet sich stark nach den Bundesländern und nach den vorkommenden Einzugsgebietsflächen. Sie liegen im Bereich zwischen 10 und 10'000 km². Dies bedeutet jedoch nicht, dass es für dieses Verfahren eine Beschränkung der Einzugsgebietsgrösse gibt.

Naturräumliche Zuordnung

Im Hinblick auf die naturräumliche und regionale Gültigkeit des Verfahrens bestehen keine Einschränkungen.

Erfahrungen

Die Anwendung des beschriebenen Verfahrens erfordert ein hohes bis sehr hohes Mass an hydrologischen Expertenwissen. Die Datenverfügbarkeit richtet sich nach der Jährlichkeit des betrachteten Bemessungshochwassers und damit nach der erforderlichen Länge der Zeitreihen. Da die meisten Zeitreihen in ausreichender Länge bei den zuständigen Behörden vorliegen, wird die Verfügbarkeit der Daten als gut bis sehr gut eingestuft.

Notwendige Inputdaten

Als Eingabedaten für das Programm EXTREM werden homogene Serien von Hochwasserabflüssen benötigt. Dies können sowohl partielle als auch jährliche Serien sein. Mit der Voraussetzung der Homogenität wird eine eingehende Prüfung der Datenreihen erforderlich. Die Zeitreihen sollten daher hinsichtlich Ausreissern, Trends und Sprüngen analysiert werden. Serien mit Trends sollten nicht verwendet werden. Dagegen muss bei Feststellung von Ausreissern individuell entschieden werden, ob diese in der Serie verbleiben oder eliminiert werden. Insgesamt werden in den meisten Fällen inhomogene Reihen nicht verworfen, sondern die Ursachen gesucht und ggf. eine Begrenzung oder Auswahl der Zeitreihe vorgenommen. Neben den Zeitreihen von Hochwasserabflüssen werden keine Daten benötigt.

Aufwand (zeitlich)

Der Zeitaufwand für die Bereitstellung der Daten wird von den Verwaltungen mit wenigen Stunden angegeben, da die Daten meist routinemässig erfasst werden und den zuständigen Behörden schon vorliegen. Der Aufwand kann für andere Institutionen erheblich sein. Zeitaufwendiger stellt sich die Prüfung der Daten hinsichtlich ihrer Homogenität und die Durchführung der Abschätzung des gewünschten Hochwassers dar. Angegeben wurden hier Zeiträume von wenigen Stunden bis zu zwei Tagen.

Aufwand (finanziell)

Neben den Kosten für die Beschaffung des Programmpaketes des IHW/IWK Karlsruhe und der Daten ist mit keinen weiteren Kosten zu rechnen. Die genauen Beschaffungskosten für das Programmpaket sind mit dem IHW/IWK zu klären.

Güte der Resultate

Das Programmpaket EXTREM bietet die Möglichkeit an, Konfidenzbänder für verschiedene Signifikanzniveaus graphisch mit den entsprechenden angepassten analytischen Verteilungsfunktionen darzustellen. Quantitative Angaben über die erfahrungsmässige Schwankungsbreite wurden nicht gemacht. Diese ist jedoch stark vom Stichprobenumfang und der Qualität der Daten abhängig.

Literatur

Ihringer, J., Kron, W. (1993): Softwarepaket für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Anwenderhandbuch, Band 1: Hochwasseranalyse. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe.

4.5.3 IsHoT+W (Informationssystem Hochwasser – Trends und Wahrscheinlichkeiten)

Das im Rahmen des Informationssystems Hochwasser vom Institut für Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik / Ottobrunn entwickelte Softwareprodukt IsHoT+W lässt ebenfalls die Schätzung von Hochwasserabflüssen bestimmter Überschreitungswahrscheinlichkeiten zu. Da es darüber hinaus auch Ansätze zur Regionalisierung, d.h. zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen an Gewässerquerschnitten, an denen keine Beobachtungen vorliegen, enthält, wird es im Kapitel 4.6 Angewandte statistische Verfahren – Regionalhydrologische Ansätze beschrieben. Prinzipiell kann es ebenso wie HQ-EX eingesetzt werden. Es enthält allerdings wesentlich mehr Verteilungsfunktionen und weitere Parameterschätzmethoden. Ausserdem können damit umfangreiche Test auf Homogenität und Sprünge sowie Trendanalysen nach verschiedenen Verfahren, z.B. auch mit sogenannten robusten Verfahren durchgeführt werden.

IsHoT+W wird von den Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder Bayern, Niedersachsen, Thüringen sowie dem entwickelnden Ingenieurbüro eingesetzt.

4.5.4 KLUDON

KLUDON ist ein im Softwareprodukt NASIM (vgl. Kapitel 4.8.2) integriertes Programm für die Anpassung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen an beobachtete und von NASIM berechnete Jahreshöchstabflüsse. Die Auswahl der Typen von Verteilungen ist beschränkt. Die Parameterbestimmung erfolgt nach der Momentenmethode.

Die Ergebnisdarstellung wird graphisch durch die Software TimeView unterstützt.

KLUDON wird von den Nutzern des Programms NASIM, d.h. den Ländern Nordrhein-Westfalen, Sachsen sowie einigen Ingenieurbüros und Verbänden eingesetzt.

4.5.5 HVERT

HVERT ist ein EDV-Programm, das im Zuge umfangreicher Programmentwicklungen für die Wasserwirtschaftliche Rahmenplanung Anfang der 70-er Jahre am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover entwickelt und später am Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München sowie vom Ingenieurbüro Blasy und Mader / Eching weiterentwickelt worden ist. Es dient der statistischen Analyse von Zeitreihen der Hochwasserscheitelabflüsse und lässt beliebige Extrapolationen zu. Die Anzahl Verteilungsfunktionen ist beschränkt. Die Parameterschätzung erfolgt nach der Momentenmethode.

HVERT wird zur Zeit nur von dem o.g. Ingenieurbüro eingesetzt.

4.5.6 Ableitung von Hochwasserabflüssen der Überschreitungswahrscheinlichkeit 10^{-4} an Binnengewässern

Beschreibung des Verfahrens

Das folgende Verfahren ist zur Anwendung beim Nachweis der Hochwassersicherheit kerntechnischer Anlagen vorgeschlagen worden. Dabei wird von einem Hochwasserscheitelabfluss der Überschreitungswahrscheinlichkeit 10^{-2} pro Jahr auf einen Hochwasserscheitelabfluss der Überschreitungswahrscheinlichkeit 10^{-4} pro Jahr geschlossen. Es wird davon ausgegangen, dass der Hochwasserscheitelabfluss der Überschreitungswahrscheinlichkeit 10^{-2} nach den üblichen statistischen Verfahren (DVWK, 2000) abgeleitet wird.

Dem Verfahren liegt folgende grundsätzliche Überlegung zugrunde: Es ist inzwischen kaum mehr strittig, dass Extrapolationen zu Überschreitungswahrscheinlichkeiten kleiner als 10^{-2} pro Jahr bei der verfügbaren Datenbasis nicht möglich sind. Auch wenn längere Beobachtungsreihen vorhanden wären, könnten diese der Inhomogenitäten, Trends und Sprünge wegen nicht verwendet werden. Insofern ist auch die Einbeziehung sogenannter historische Hochwasser höchst problematisch. Werden dennoch Extrapolationen in diese extremen Bereiche hinein erforderlich, so dürften sie mit allen Verteilungsfunktionen und Parameterschätzverfahren gleich falsch sein. Und es gibt keine Möglichkeit, daraus eine beste Schätzung auszuwählen. Es wird deshalb eine einheitliche Vorgehensweise (als Konsens) vorgeschlagen, die von einer maximierten Schiefe der Verteilungsfunktion ausgeht. Der maximierte Wert der Schiefe von $c = 4$ ist an mehr als tausend Reihen von Hochwasserscheitelabflüssen deutscher Pegel abgeleitet worden.

Für eine über die Überschreitungswahrscheinlichkeiten von kleiner als 10^{-2} pro Jahr hinausgehende Extrapolation – und nur für diese – wird die Pearson-III-Wahrscheinlichkeitsverteilung zugrunde gelegt. Auf ihrer Basis werden benötigte Häufigkeitsfaktoren bestimmt und die Schiefe auf $c = 4$ maximiert. Es ist nicht erforderlich, für die Extrapolation andere Häufigkeitsverteilungen zu verwenden, weil nicht nachweisbar ist, dass sie bessere Ergebnisse liefern.

Es ist die standardisierte Verteilungsfunktion in der Form zu verwenden:

$$HQ_{(10^{-4})} = MHQ + s_{HQ} \cdot k_{(10^{-4})}$$

mit

$HQ_{(10^{-4})}$	Hochwasserscheitelabfluss mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10^{-4} pro Jahr [m^3/s]
MHQ	Mittlerer Hochwasserscheitelabfluss einer längeren Zeitreihe [m^3/s]
s_{HQ}	Standardabw. der Hochwasserscheitelabflüsse einer längeren Zeitreihe [m^3/s]
$k_{(10^{-4})}$	Häufigkeitsfaktor für eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10^{-4} pro Jahr

Die statistischen Parameter MHQ und s_{HQ} sowie die tatsächliche Schiefe c werden aus den Beobachtungsdaten eines repräsentativen Pegels berechnet.

Der Häufigkeitsfaktor $k_{(10^{-4})}$ wird als Produkt des Häufigkeitsfaktors k und eines Quotienten f berechnet:

$$k_{(10^{-4})} = k \cdot f$$

Der Häufigkeitsfaktor k wird für die Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10^{-2} pro Jahr und die tatsächliche Schiefe c der Beobachtungsdaten aus Tabelle 4.8 entnommen.

Der Quotienten f wird aus dem Häufigkeitsfaktor $k_{(10^{-4})_{\max}}$ für eine maximierte Schiefe von $c = 4$ und dem Häufigkeitsfaktor $k_{(10^{-2})_{\max}}$, ebenfalls für die maximierte Schiefe $c = 4$ berechnet. Beide Häufigkeitsfaktoren sind unabhängig von ortsspezifischen Daten. Damit ist f eine Konstante:

$$f = k_{(10^{-4})_{\max}} / k_{(10^{-2})_{\max}} = 12,36 / 4,37 = 2,8$$

Somit folgt

$$HQ_{(10^{-4})} = MHQ + s_{HQ} \cdot k \cdot 2,8$$

Bei der Anwendung des Verfahrens sind die allgemeinen Vorgaben des DVWK-Merkblattes 251/1999 für die statistische Analyse von Hochwasserabflüssen zu berücksichtigen.

Tab. 4.8 Häufigkeitsfaktoren k für eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10^{-2} pro Jahr und die tatsächliche Schiefe c der Beobachtungsdaten.

c	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
k	2,33	2,40	2,47	2,54	2,62	2,69	2,76	2,82	2,89	2,96	
c	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	
k	3,02	3,09	3,15	3,21	3,27	3,33	3,39	3,44	3,50	3,55	
c	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	
k	3,61	3,66	3,71	3,75	3,80	3,85	3,89	3,93	3,97	4,01	
c	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0
k	4,05	4,09	4,12	4,16	4,19	4,22	4,26	4,29	4,31	4,34	4,37

Alternativ zu den Tabellenwerten kann k ausreichend genau nach der Formel $k = 2,326 + 0,769 \cdot c + 0,065 \cdot c^2$ berechnet werden.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Es liegen noch keine umfangreichen Erfahrungen vor. Lang (2001) publiziert positive Ergebnisse erster Vergleiche. Wird dieses Verfahren in der Art eines Konsens grundsätzlich angewandt, so hat es den Vorteil, vergleichbare Ergebnisse zu liefern sowie schnell und ohne zusätzlichen Aufwand angewendet werden zu können.

Die Güte der Resultate ist ebenso wenig nachprüfbar wie bei anderen Verfahren.

Literatur

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, DVWK (Hrsg.) (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen; DVWK-Merkblatt 251, 1999.

Kleeberg, H.-B.; Schumann, A. H. (2001): Ableitung von Bemessungsabflüssen kleiner Überschreitungswahrscheinlichkeiten, Wasserwirtschaft, 91. Jg., Heft 2, Feb. 2001, S.90-95.

Lang, J. (2001): Auswirkungen der neuen DIN 19700 auf die Bemessung von Hochwasserrückhalteräumen, Wasserwirtschaft, Heft 7/8, 2001.

4.6 Angewandte statistische Verfahren – Regionalhydrologische Ansätze

4.6.1 HQ-Längsschnitt: Hochwasserabfluss- und Hochwasserabflussspendenlängsschnitte

Beschreibung des Modells

Um die aus Pegelbeobachtungen gewonnenen Informationen auf Flussabschnitte ohne Beobachtung zu übertragen, werden für zahlreiche Flussgebiete in verschiedenen Bundesländern Deutschlands Hochwasserlängsschnitte und Hochwasserspendendiagramme erarbeitet. Grundlage ist die Berechnung der Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeit HQ_T unter Heranziehen von Jahresreihen der Hochwasserscheitelwerte und mathematischen Verteilungsfunktionen. Vor der Berechnung werden die vorhandenen Jahresreihen auf Konsistenz und Homogenität geprüft. Zur Prüfung auf Konsistenz wird die Abflussermittlung (Abflusskurve, Pegelchronik, Nullpunktänderung) genauer betrachtet. Bei Inkonsistenzen werden die Datenreihen korrigiert und weiterführend bearbeitet (BLfW 1999).

Auf Basis dieser Reihen werden für jeden Pegel analytische Verteilungsfunktionen angepasst. Die Wahl der geeigneten Verteilungsfunktion erfolgt über statistische Testverfahren, wobei nach Möglichkeit eine gemeinsame Verteilungsfunktion für ein Flussgebiet gewählt wird. Für 1- und 2-jährliche Hochwasserabflüsse (HQ_1 und HQ_2) werden partielle Serien zugrunde gelegt (BLfW 1999).

Im Hochwasserlängsschnitt werden die mittleren Hochwasserabflüsse MHQ und die Hochwasser unterschiedlicher Jährlichkeit HQ_T (Ordinate) über dem Flusslauf (Flusskilometer, Abszisse) eingetragen. Hierüber können Hochwasserabflüsse an beliebigen Querschnitten zwischen den Pegeln ermittelt werden (vgl. Abb. 4.3).

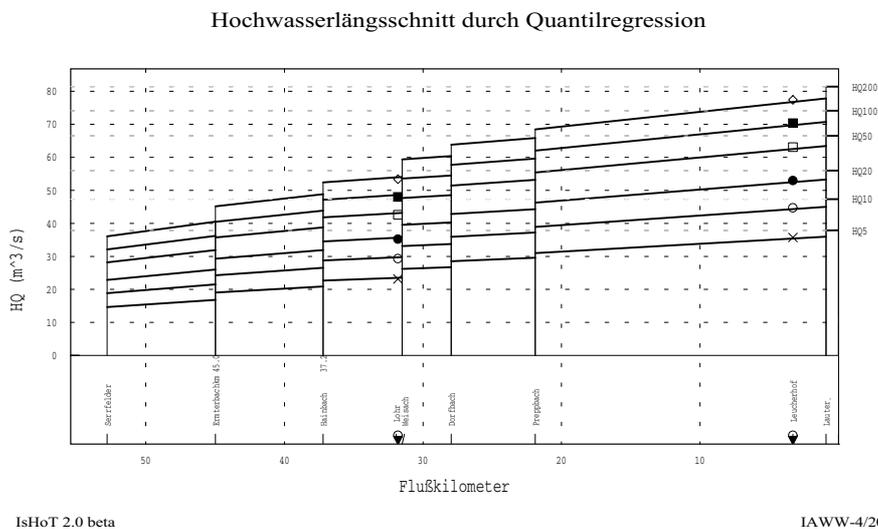


Abb. 4.3 Hochwasserlängsschnitt, erstellt mit dem Programmpaket IsHoT+W (aus Kleeberg und Willems 2000).

Im Hochwasserspendendiagramm werden die mittleren Hochwasserabflussspenden MHQ und die Hochwasserabflussspenden verschiedener Jährlichkeiten Hq_T auf einer doppeltlogarithmischen Skala gegen die Einzugsgebietsgröße aufgetragen. Dabei ist die Einzugsgebietsgröße einer der wichtigsten Kennwerte für den Hochwasserabfluss aus einem Gebiet. Die Hochwasserabflussspenden wachsen mit kleiner werdendem Einzugsgebiet. Für Hochwasserabflussspenden kann näherungsweise folgende Potenzfunktion angesetzt werden:

$$Hq_T = c_1 * A_{Eo}^{-c_2}$$

Werden die Hochwasserabflussspenden z.B. MH_Q oder Hq_T in doppeltlogarithmischen Papier gegen die Einzugsgebietsfläche aufgetragen, so ergibt obige Gleichung im Idealfall eine Gerade. Entsprechend wird versucht, die Hochwasserabflussspenden entlang des Flusslaufes durch eine Gerade zu approximieren. Auf diese Weise können auch Hochwasserabflüsse für Teilgebiete der Zuflüsse und Hochwasserlängsschnitte über die Spendendiagramme ermittelt werden (BLfW 1999).

Das grösste Problem ist die Ermittlung der Höhe der Sprünge an den Stellen, an denen Zuflüsse vorhanden sind. Deshalb werden für alle Zuflüsse Angaben über den Flusskilometer sowie die Einzugsgebietsfläche vor und nach der Mündung benötigt (Kleeberg und Willems 2000).

Hochwasserlängsschnitte und Hochwasserspendendiagramme werden in der Regel für seltene Hochwasserabflüsse mit Jährlichkeiten zwischen einem und hundert Jahren erstellt. Grössere Abweichungen von der Geraden deuten auf unterschiedliche hydrologische Verhältnisse hin, soweit Konsistenz und Homogenität der Reihen erfüllt sind.

Für die Erstellung von Hochwasserabflüssen steht ein Softwarepaket mit dem Namen IsHoT+W zur Verfügung, das vom Institut für Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik / Ottobrunn zusammen mit den Wasserwirtschaftsverwaltungen von Bayern, Niedersachsen und Thüringen erarbeitet wurde (Kleeberg und Willems 2000) und weiterentwickelt wird.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Hochwasserlängsschnitte werden erstellt, um grobe Abschätzungen für Hochwasserabflüsse im Vorfeld genauerer Untersuchungen vornehmen zu können. Ausserdem dienen Hochwasserlängsschnitte für die Festlegung oder Abschätzung von Überschwemmungszonen und die grobe Abschätzung der Hochwassersituation für weniger schützenswerte Objekte. Im wesentlichen sind auf diesem Gebiet die Länder Bayern, Niedersachsen und Thüringen aktiv. Zwei Ingenieurbüros, ein Verband und ein Hochschulinstitut haben mitgeteilt, dass sie Hochwasserlängsschnitte aufstellen.

Jährlichkeit des Ereignisses

Das Verfahren wird üblicherweise eingesetzt um Hochwasserscheitelabflüsse mit Jährlichkeiten bis zu 100 Jahren abzuleiten. In Bayern werden sowohl seltene als auch extreme Hochwasserabflüsse über Längsschnitte ermittelt. Dies schliesst auch maximale Hochwasserabflüsse ein.

Einzugsgebietsfläche

Hochwasserlängsschnitte können prinzipiell für Einzugsgebietsgrössen zwischen 10 bis 100'000 km² erstellt werden.

Naturräumliche Zuordnung

Im Hinblick auf die naturräumlichen Gültigkeitsbereich werden Hochwasserlängsschnitte in Hochgebirgen und Mittelgebirgen genauso wie im Flachland angewendet. Die regionale Zuordnung entspricht dabei jeweils den administrativen Grenzen der zuständigen Wasserbehörde (Bundesland).

Erfahrungen

Im allgemeinen wird die Datenverfügbarkeit für dieses Verfahren als mittel bis gut eingestuft. Das Gewicht des erforderlichen Expertenwissens bei der Ermittlung von Längsschnitten erweist sich als mittel bis hoch.

Notwendige Inputdaten

Für den Hochwasserlängsschnitt, den Hochwasserspendenlängsschnitt oder die entsprechenden Diagramme werden Informationen über die Einzugsgebietsfläche und die Flusskilometrierung der Pegel und Einmündungen sowie ausreichende Zeitreihen beobachteter Hochwasserabflüsse HQ an Pegeln, die eine repräsentative statistische Hochwasseranalyse erlauben, benötigt.

Aufwand (zeitlich)

Die Beschaffung und spezifische Aufbereitung der Pegeldaten und Informationen über das Flussgebiet nimmt bei Gebieten bis ca. 5'000 km² ca. fünf Tage in Anspruch, wenn alle Daten bereits zuvor geprüft und für tauglich angesehen worden sind. Zur Durchführung der Abschätzung selbst sind ca. sechs weitere Arbeitstage einzuplanen. Der genaue Arbeitsaufwand richtet sich nicht nur nach der Grösse des Flussgebietes für den der Längsschnitt erstellt werden soll, sondern auch nach der Anzahl der Pegel, von denen Daten verarbeitet werden müssen.

Nach Fertigstellung des Hochwasserlängsschnittes für ein Flussgebiet ist das Ablesen von Hochwasserabflüssen für bestimmte Querschnitte nur noch ein Aufwand von Minuten.

Aufwand (finanziell)

Neben der Beschaffung der notwendigen Inputdaten entstehen keine weiteren Kosten, ausser man entscheidet sich für ein kommerzielles Programmpaket zur Unterstützung. Längsschnitte können jedoch prinzipiell mit jedem Tabellenkalkulationsprogramm erstellt werden, wenn die statistische Hochwasseranalyse bereits erfolgt ist und das Problem der Höhe der Abflüsse aus den Zuflüsse gelöst ist.

Güte der Resultate

Die vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft angegebenen Schwankungsbreiten der HQ_T liegen im Bereich zwischen 10-25 %. Da jedoch meistens die Schätzungen der Hochwasserscheitelabflüsse an den Pegeln bereits grössere statistische Schwankungen aufweisen, dürfte diese Angabe eher nach oben zu korrigieren sein.

Literatur

- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (Hrsg.) (1999):** Hydrologische Planungsgrundlagen, Hochwasserlängsschnitt, Loseblattsammlung des Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft.
- Kleeberg, H.-B., Willems, W. (2000):** Informationssystem Hochwassertrends / Hochwasserwahrscheinlichkeiten, IsHoT / IsHoW, Benutzerhandbuch. Institut für Angewandte Wasserwirtschaft, München.

4.6.2 HQ-REGIO

Beschreibung des Modells

Als Erweiterung des Programmsystems HQ-EX (WASY 1997), das zur statistischen Hochwasseranalyse dient, wurde im Zeitraum 1987 bis 1989 von Fügner et al. (1990) ein Regionalisierungsverfahren entwickelt, das es ermöglichen sollte, an unbeobachteten Flussquerschnitten in Einzugsgebieten des Mittelgebirges und Hügellandes in den ehemaligen Bezirken Dresden und Chemnitz Hochwasserabflüsse zu ermitteln. Dieses Regionalisierungsverfahren wird in einem Softwarepaket mit dem Namen HQ-REGIO bereitgestellt.

Auf der Basis von 53 Pegeln aus dem Bezirk Dresden und 38 Pegeln aus dem Bezirk Chemnitz wurde mit Hilfe von praktischen und leicht ermittelbaren Gebietskennwerte eine Mehrfachregression auf die Quantile der Jahreshöchstabflusspenden Hq_T entwickelt. Zur Ermittlung der geeigneten Variablen und zur Festlegung eines optimalen Regressionsmodells wurden Kreuz- und Regressionsanalysen durchgeführt sowie Fehlerbetrachtungen angeschlossen. Die Auswahl von homogenen Regionen erfolgte durch Variation der Pegelgruppen und nach hydrologischen Gesichtspunkten. Es ergaben sich zwei Regionen: Die Pegel der Flussgebiete Mulde/Weisse Elster (Bezirk Chemnitz) und die Pegel der Flussgebiete und Nebenflüsse Elbe/Schwarze und Elster/Spree/Nebenflüsse Neisse (Bezirk Dresden).

Kreuzkorrelationen zwischen den Quantilen der Hochwasserspenden unterschiedlicher Jährlichkeiten und den Gebietskennwerten sowie die gezielte Variation der Geofaktoren bei verschiedenen Mehrfachregressionen führten zu sechs unabhängigen Variablen. Folgende Gebietskennwerte bildeten demnach die beste Kombination:

P	Mittlerer jährlicher Gebietsniederschlag [mm/a]
A_{Eo}	Einzugsgebietsgröße [km ²]
$\alpha = R/P$	Abflussverhältnis [%], mit $R = MQ$
W	Waldanteil [%]
f_{ET}	Formfaktor [-], $f_{ET} = L \cdot L / A_{Eo}$, mit $L =$ Einzugsgebietslänge
I_G	mittleres Gefälle [‰]

Um die Voraussetzung der Normalverteilung für eine Mehrfachregression zu wahren, wurden statistische Tests und gegebenenfalls Transformationen der Variablen durchgeführt. Es ergab sich eine Regressionsgleichung mit unterschiedlichen Sätzen von Koeffizienten in Abhängigkeit von T:

$$\sqrt{Hq_T} = a_0 + a_1 \cdot P + a_2 \cdot \ln(A_{Eo} + 0,5) + a_3 \cdot \ln(R/P) + a_4 \cdot \sqrt{W} + a_5 \cdot \sqrt{f_{ET}} + a_6 \cdot \sqrt{I_G}$$

mit a_0 bis a_6 von T abhängige Koeffizienten.

Diese Mehrfachregression gilt für Jährlichkeiten zwischen 2 bis 50 Jahren. Für Quantile der Abflusspende mit höheren Jährlichkeiten (100-1000a) wird als abhängige Variable statt der Wurzel der Abflusspende der Logarithmus gewählt, der Rest der Regressionsbeziehung bleibt bestehen.

$$\ln(Hq_T) = a_0 + a_1 \cdot P + a_2 \cdot \ln(A_{Eo} + 0,5) + a_3 \cdot \ln(R/P) + a_4 \cdot \sqrt{W} + a_5 \cdot \sqrt{f_{ET}} + a_6 \cdot \sqrt{I_G}$$

mit a_0 bis a_6 von T abhängige Koeffizienten.

Fügner et al. (1990) machen mit ihrem Regionalisierungsverfahren Aussagen für Hochwasserscheitelabflüsse mit Jährlichkeiten zwischen 2 und 1'000 Jahren. Die Ergebnisse wurden an 110 Pegeln mit Einzugsgebietsflächen zwischen 1,8 km² und 2'982 km² mit statistischen Hochwasseranalysen verglichen. Daraus ergibt sich folgendes Bild: Für das Modell der 53 untersuchten Pegel des Bezirks Dresden betragen die Abweichungen 20-32 %. Das Modell der 38 untersuchten Pegel im Bezirk Chemnitz wies Abweichungen zu den statistischen Hochwasseranalysen von 11-14 % auf.

Diese Variante von HQ-REGIO wird in Sachsen angewendet. Um das Programmpaket HQ-REGIO zu nutzen, müssen 10 Regressionsbeziehungen für 10 Wiederkehrintervalle in das

Programmsystem integriert werden. Damit können für unbeobachtete Querschnitte mit den dafür zu bestimmenden Geofaktoren wahrscheinlichkeitsbehaftete Hochwasserabflüsse berechnet werden.

HQ-REGIO wurde von Haupt et al. (1999) weiterentwickelt, geändert und für neue Regionen in Mecklenburg-Vorpommern anhand von 58 Pegelstationen angepasst, wobei eine Objektivierung der Regionenbildung vorgenommen wird. Haupt et al. (1999) verwenden

- das Kriterium der Saisonalität der Hochwasserabflüsse,
- den Dalrymple-Test auf die Homogenität der Hochwasserquantile für $T = 10$ Jahre,
- für eine homogene Region im Sinne des Abflussregimes grundsätzlich die gleiche Form der statistischen Verteilung der Hochwasserabflüsse und damit die gleiche analytische Verteilungsfunktion, die an die empirische Verteilung angepasst wird.

Für Mecklenburg-Vorpommern erweisen sich alle Pegel, an deren Hochwasserabflüsse die dreiparametrische Weibullverteilung zufriedenstellend approximiert werden kann, als zu einer Region zugehörig.

Für die anschließende Mehrfachregression auf die Scheitelabflusspenden Hq_T werden folgende unabhängige Gebietskenngrößen verwendet:

A_{Eo}	Einzugsgebietsgröße [km ²]
GF	Kennwert zur Gebietsform [-]
I_G	mittleres Geländegefälle [‰]
UD	Kennwert zu Boden/Geologie [-]
SR	Kennwert zum Seeneinfluss [-]
P	mittlerer jährlicher Gebietsniederschlag [mm/a]

Für eine nähere Erläuterung der Gebietskennwerte sei hier auf die Veröffentlichung Haupt et al. (1999) verwiesen. Daraus ergab sich nach Prüfung der Variablen auf Normalverteilung und etwaiger Transformation folgendes Regressionsmodell:

$$\ln(Hq_{100}) = -1,5 - 0,15 * \ln(A_{Eo}) + 0,366 * GF^2 + 0,097 * \ln(I_G) + 0,447 * e^{UD} - 0,557 * \ln(SR) + 2,88 * \ln\left(\frac{P}{100}\right)$$

Mit dieser Auswahl von Geofaktoren erreichen Haupt et al. (1999) einen multiplen Korrelationskoeffizienten 0,91 bei Abflusspenden der Jährlichkeit $T = 100$.

Zusätzlich zu dieser Mehrfachregression berechnen Haupt et al. (1999) eine reduzierte Version für Geofaktoren, die sehr einfach bereitzustellen sind. Diese Geofaktoren sind:

A_{Eo}	Einzugsgebietsgröße [km ²]
SR	Kennwert zum Seeneinfluss [-]
P	mittlerer jährlicher Gebietsniederschlag [mm/a]

Es ergibt sich folgender Ansatz:

$$\ln(Hq_{100}) = 2,528 - 0,234 * \ln(A_{Eo}) - 0,553 * \ln(SR) + 1,573 * \ln\left(\frac{P}{100}\right)$$

Die Vollversion der Mehrfachregression führt zu Abweichungen von 18 % zwischen statistischen HQ_T und regionalisierten HQ_T für Jährlichkeiten zwischen 2 und 100 Jahren. Bei der reduzierten Version sind grössere Abweichungen von ca. 24 % in Kauf zu nehmen (Haupt et al. 1999).

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Die oben beschriebenen Regionalisierungsverfahren werden in den Bundesländern Sachsen, Sachsen-Anhalt, Rheinland-Pfalz und Thüringen sowie vom entwickelnden Ingenieurbüro angewendet.

Jährlichkeit des Ereignisses

Die Jährlichkeiten der seltenen Hochwasserscheitelabflüsse, die ermittelt werden sollen, liegen zwischen 1 und 100 Jahren. Prinzipiell wird darauf hingewiesen, dass auch extreme Hochwasserscheitelabflüsse abgeschätzt werden können, ohne dass dies belegt wird oder belegt werden kann. Ob die meist kurzen Zeitreihen (ca. 30 Jahre) eine weitgehende Extrapolation für $T > 200$ Jahre erlauben, ist unbewiesen. Die Resultate der Regionalisierung dienen dem gesamten Spektrum an Bemessungsaufgaben.

Einzugsgebietsfläche

Eingesetzt werden die genannten Regionalisierungsverfahren in Einzugsgebieten mit Flächengrößen zwischen 10 und 5'000 km².

Naturräumliche Zuordnung

Bisher wurde das Verfahren in Flachland- und Mittelgebirgsregion angewendet. Die regionale Gültigkeit ist dabei auf die homogenen Regionen beschränkt, deren Pegeldata zur Aufstellung des Modells verwendet wurden.

Erfahrungen

Im Hinblick bei den Erfahrungen im Einsatz der hier beschriebenen Regionalisierungsverfahren wird die Datenverfügbarkeit als mittel bis gut bewertet. Die Bewertung der Ergebnisse erfordert ein hohes Mass an hydrologischem Expertenwissen.

Notwendige Inputdaten

Neben einer ausreichenden Zahl an repräsentativen Pegelmessstellen mit langen Zeitreihen werden eine Vielzahl an Gebietsparametern benötigt (siehe oben). Diese Gebietsparameter können:

- mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems,
- aus digitalen Höhenmodellen,
- Bodenkarten und
- geologischen Karten

abgeleitet oder aus entsprechenden analogen Karten ermittelt werden. Zusätzlich sind klimatologische Messreihen auszuwerten oder meteorologische Jahrbücher heranzuziehen.

Aufwand (zeitlich)

Der zeitliche Aufwand für die Durchführung der Abschätzung wird allgemein als sehr gering (unter einem halben Tag) angegeben, da hierfür ein Programmpaket zur Verfügung steht. Diese Zeitangaben setzen ein gültiges angepasstes Regionalisierungsmodell voraus (übernimmt ggf. die Fa. WASY). Der Aufwand für die Bereitstellung der Geofaktoren richtet sich stark nach der Verfügbarkeit eines Geographischen Informationssystems und kann daher als hoch eingestuft werden.

Aufwand (finanziell)

Das Softwarepaket HQ-REGIO kann über die Firma WASY bezogen werden. Mit der Möglichkeit die oben beschriebenen Regionalisierungsansätze durch die Fa. WASY durchführen zu lassen, erhöht sich der finanzielle Aufwand neben dem Einsatz eines Geographischen Informationssystems, der zu empfehlen ist, entsprechend. Genauere Kosten für die Bereitstellung des Regionalisierungsverfahrens HQ-REGIO für eine bestimmte Region sind mit der Fa. WASY zu klären.

Güte der Resultate

Die Schwankungsbreite der erzielten Ergebnisse werden mit durchschnittlich 20 % angegeben. Als Referenzwerte werden statistische Hochwasseranalysen an beobachteten Querschnitten herangezogen.

Literatur

- Fügner, D., Schramm, M., Peter, A., Schiek, P. (1990):** Neue Methoden zur Berechnung von Hochwasserscheiteldurchflüssen mit Wahrscheinlichkeitsaussage. In: Wasserwirtschaft – Wassertechnik, Heft 5:112-114, Berlin.
- Haupt, R., Miegel, K., Schramm, M., Walther, J. (1999):** Saisonalität und Regionalisierung von Hochwasserscheitelabflüssen in Mecklenburg-Vorpommern. In: Wasserwirtschaft, 89, 7-8:388-394.
- WASY (1997):** HQ-EX, Version 2.0, Benutzerhandbuch. WASY: Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH, 24 Seiten, Berlin.
- WASY (2000):** Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH, Internet-Homepage, www.wasy.de.

4.6.3 Verfahren des LfU in Baden-Württemberg

Beschreibung des Modells

Bei der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1999) kommt ein von Dr.-Ing. Ihringer am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe entwickeltes Regressionsverfahren zur Regionalisierung von Hochwasserquantilwerten zum Einsatz. Das Modell wurde anhand von Zeitreihen der Jahreshöchstabflüsse von 335 Pegeln in Baden-Württemberg entwickelt und getestet.

Zur Bestimmung der Regressionskoeffizienten wurden an alle zur Verfügung stehenden Zeitreihen 12 analytische Verteilungsfunktionen anhand der Maximum-Likelihood- und der Momentenmethode angepasst. Mit Hilfe der Verteilungsfunktion, die die beste Anpassung an die Messdaten im Extrembereich liefert, wurden im nächsten Schritt der mittlere Hochwasserabfluss MHQ und die Hochwasserquantilwerte HQ_T für $T = 2, 5, 10, 20, 50, 100$ und 200 Jahre berechnet. Ausgehend von diesen Daten wurde folgende Regressionsbeziehung aufgestellt:

$$\ln(Y) = C_0 + C_1 * \ln(A_{Eo}) + C_2 * \ln(S + 1) + C_3 * \ln(W + 1) + \\ + C_4 * \ln(I_g) + C_5 * \ln(L) + C_6 * \ln(L_c) + C_7 * \ln(P) + C_8 * \ln(LF)$$

mit

$Y = MHq$ bei Regionalisierung der MHq-Werte

oder

$$Y = \frac{Hq_T}{MHq} \text{ für } T = 2, 5, 10, 20, 50, 100 \text{ oder } 200 \text{ Jahre zur Regionalisierung der } HQ_T\text{-Werte}$$

Y	abhängige Variable
MHq	Spende des mittleren jährlichen Höchstabflusses [$m^3/(s * km^2)$]
Hq_T	Spende des T-jährlichen Höchstabflusses [$m^3/(s * km^2)$]
C_0-C_8	von T abhängige Koeffizienten [-]
A_{Eo}	Fläche des Einzugsgebietes [km^2]
S	Bebauungsanteil [%]
W	Waldanteil [%]
I_g	gewogenes Gefälle [%]
L	Fliesslänge des Hauptgewässers von der Wasserscheide bis zum gewünschten Querschnitt [km]
L_c	Fliesslänge entlang des Hauptgewässers vom Gebietsschwerpunkt bis zum gewünschten Querschnitt [km]
P	mittlerer jährlicher Gebietsniederschlag [mm]
LF	Landschaftsfaktor [-]

Der Landschaftsfaktor ist ein dimensionsloser Wert, der eingeführt worden ist, um die Residuen der Regression weiter zu reduzieren. Er repräsentiert nach Angaben des LfU die hydrogeologisch-bodenkundlich-landschaftsräumlichen Verhältnisse und er konnte flächendeckend für Baden-Württemberg kalibriert und regionalisiert werden.

Die Umrechnung des Wertes Y_T in das zugehörige HQ_T erfolgt über die Gleichung:

$$HQ_T = Y_T * MHq * A_{Eo} = Y_T * MHQ$$

Es wurde bei diesem Regionalisierungsansatz versucht, die unabhängigen Grössen unter dem Gesichtspunkt der theoretischen Begründung auszuwählen.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Das oben erläuterte Regionalisierungsverfahren wurde für das Bundesland Baden-Württemberg flächendeckend ausgearbeitet und dient der wasserwirtschaftlichen Vollzugspraxis. Hierfür wurden

57 Hochwasserlängsschnitte für alle wichtigen Flussläufe erstellt. Zusätzlich wurden Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit an 411 Pegeln und an ca. 2'000 Knoten des „Gewässerkundlichen Flächenverzeichnis Baden-Württemberg“ berechnet sowie für diese 2'000 Knoten die Gebietskennwerte ermittelt. Sie werden in einem Geographischen Informationssystem (ARC/VIEW) bereitgehalten. Der Anwender kann somit für Gewässerknoten, die nicht in der Nähe eines Pegels liegen und nicht in einem Hochwasser-Längsschnitt enthalten sind, die Hochwasserkennwerte über das Regionalisierungsmodell berechnen. Darüber hinaus wird dem Anwender ein Berechnungsmodul bereitgestellt, mit dem er für Einzugsgebiete, die nicht im Gewässerkundlichen Flächenverzeichnis enthalten sind, eigene Berechnungen zur Ermittlung der Hochwasserabflusskennwerte MHQ und HQ_T durchführen kann. Die erforderlichen Gebietskenngrößen müssen jedoch selbst abgeleitet werden.

Jährlichkeit des Ereignisses

Für die Bemessungsaufgaben werden HQ_T mit Jährlichkeiten zwischen 1 und 100 Jahren ermittelt. Die Berechnung extremer Hochwasserabflüsse mit einer Wiederholungszeitspanne von 1'000 Jahren erfolgt nach der Beziehung $HQ_{1000} = 1,6 * HQ_{100}$, auch wenn dieser Zusammenhang nach der allgemeinen Häufigkeitsverteilung so nicht zulässig ist.

Einzugsgebietsfläche

Die untersuchten Einzugsgebietsgrößen liegen zwischen 10 bis 13'000 km².

Naturräumliche Zuordnung

Bisher wurde das Verfahren in Flachland- und Mittelgebirgsregion angewendet. Die regionale Gültigkeit ist dabei auf die homogenen Regionen beschränkt, deren Pegelraten zur Aufstellung des Modells verwendet wurden.

Erfahrungen

Die allgemeine Datenverfügbarkeit wird als gut eingestuft. Das hydrologische Expertenwissen hat vor allem bei der Interpretation der erzielten Ergebnisse ein hohes Gewicht.

Notwendige Inputdaten

Neben den erforderlichen Pegelraten werden für das Regionalisierungsmodell eine Reihe von Gebietskenngrößen benötigt (siehe oben). Diese können anhand von

- digitalen Höhenmodellen, (Einzugsgebietsfläche, gewogenes Gefälle, Fließlänge L , Fließlänge L_C)
- Satellitenaufnahmen (Bebauungs-, Waldanteil) und
- digitalisierten Einzugsgebietsgrenzen (Fließlänge L , Fließlänge L_C) ermittelt werden.

Der Einsatz eines Geographischen Informationssystems ist daher zweckmässig.

Als abgeleitete Größen wird zudem der mittlere jährliche Gebietsniederschlag benötigt. Er kann anhand der mittleren jährlichen Niederschlagshöhe ermittelt werden.

Aufwand (zeitlich)

Da das Regionalisierungsmodell für Baden-Württemberg bereits flächendeckend erarbeitet worden ist, wird der Zeitaufwand zur Abschätzung eines Hochwasserscheitelabflusses an einem bestimmten Querschnitt als sehr gering bewertet. Andere Angaben, z.B. zum Zeitaufwand bei der Ableitung von Gebietsparametern, wurden nicht gemacht.

Aufwand (finanziell)

Neben den Kosten für die Beschaffung der Eingangsdaten, muss das Geographische Informationssystem ARC/VIEW bereitgestellt werden. Zusätzlich muss ein Softwarepaket zur Bildverarbeitung zur Verfügung stehen, sollen die Gebietskennwerte Bebauungsanteil und Waldanteil aus Satellitendaten abgeleitet werden.

Güte der Resultate

Die Fehlerbetrachtung der Ergebnisse erfolgte anhand der Gegenüberstellung von Quantilen des Hochwasserabflusses, die einerseits über das Regionalisierungsmodell und andererseits durch statistische Analysen an den Pegeln ermittelt wurden (vgl. Abb. 4.4). Nach Erfahrungen des LfU in Baden-Württemberg liegen bei 85 % der Pegel die Abweichungen bei $\pm 12,5 \%$, und bei 40 % der Pegel sind die Abweichungen kleiner als 2,5 %.

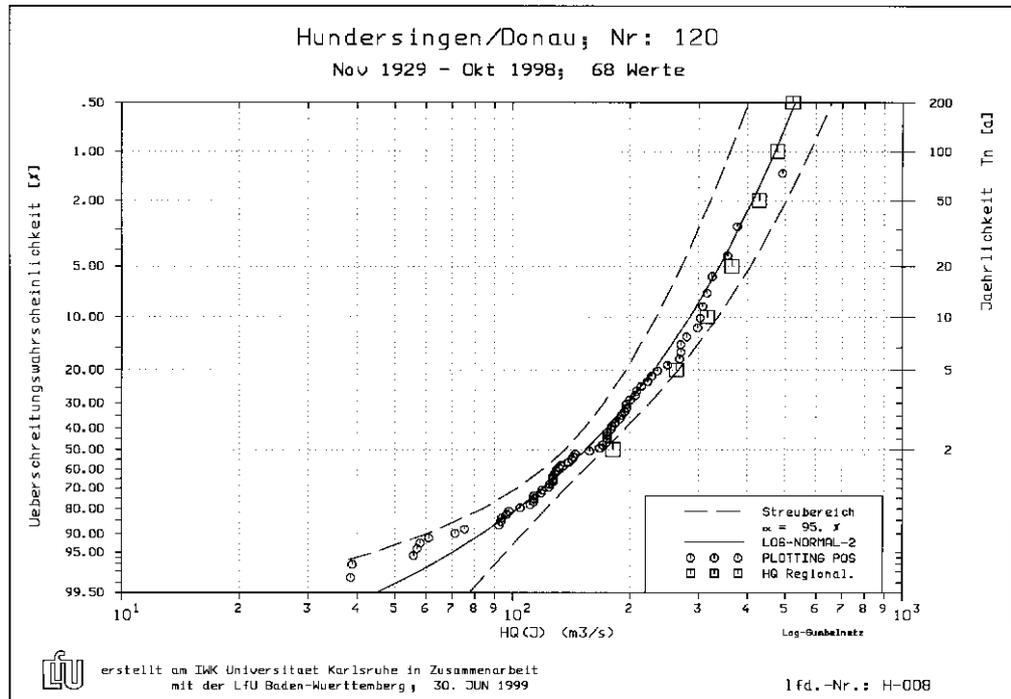


Abb. 4.4 Vergleich der Hochwasserabflusskennwerte aus der Pegelstatistik und aus der Regionalisierung für den Pegel Hundersingen/Donau (aus LfU 1999)

Literatur

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.) (1999): Hochwasser-Wahrscheinlichkeiten in Baden-Württemberg, Selbstverlag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe, 1. Auflage.

4.6.4 Reg-Ex

Beschreibung des Modells

Für das Staatliche Amt für Umweltschutz in Magdeburg wurde von Schumann und Pfütznern (1999) ein Verfahren zur Regionalisierung von Parametern einer Verteilungsfunktion auf der Basis einer multiplen log-linearen Regression für Pegel im Regierungsbezirk Magdeburg entwickelt. Bei der Untersuchung wurden mit Hilfe der L-Momentenmethode (siehe Hosking und Wallis 1997) verschiedene Verteilungsfunktionen an Zeitreihen der Jahreshöchstabflüsse von 17 Pegeln mit einer maximalen Einzugsgebietsgrösse von 300 km² angepasst. Die Länge der Beobachtungsreihe lag bei einem Pegel unter 20 Jahren, bei sechs zwischen 20 und 30 Jahren und bei den übrigen Pegeln über 30 Jahren.

Anhand einer Quantilkorrelationsanalyse und der Auswertung von L-Momentendiagrammen wurde festgestellt, dass die Allgemeine Extremwertverteilung die besten Anpassungsergebnisse an die zur Verfügung stehenden Daten liefert. Zur Berücksichtigung lokaler Unterschiede wurden zwei homogene Regionen gebildet und die Pegel diesen zugeordnet. Die Abgrenzung der Regionen erfolgte anhand der mittleren Hochwasserabflusspenden MH_q und der Einzugsgebietsfläche A_{Eo} . Die genaue Vorgehensweise bei der Klassifizierung wird in dem zitierten Bericht nicht deutlich. Zur Beschreibung der Heterogenität der Abflüsse in den beiden Regionen wurden getrennt multiple Regressionsgleichungen bestimmt, die die Grösse der drei Parameter der Verteilung anhand von Einzugsgebietskennwerten beschreiben.

Als Einzugsgebietskennwerte wurden folgende Parameter näher untersucht:

- Einzugsgebietsfläche
- mittlere Abflusspende
- Anteil der Sommer-Hochwasser an den Jahres-HQ-Werten
- mittlere topographische Höhe
- Flächenanteil mit Durchlässigkeitswerten < 30 cm/Tag
- Flächenanteil mit Stauwasser
- Grundwassernaher Flächenanteil
- Flächenanteil mit geringer Bodenmächtigkeit
- Ackerflächenanteil
- bebauter Flächenanteil
- Summe der Flächenanteile Wald, Gehölz und krautiger Vegetation
- Gesamtlänge des Gewässernetzes
- Flussdichte
- mittleres Gefälle
- KOSTRA-Niederschlagswerte der Dauer $D=15$ min, 30 min, 60 min, 90 min, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h, 48 h, 72 h für Wiederkehrintervalle T von 1 Jahr oder 100 Jahren (siehe DWD (1997)).

Durch nicht näher erläuterte Untersuchungen konnten folgende Gebietskennwerte als für die Regressionsbeziehung als massgeblich ermittelt werden:

- Region 1: Flächenanteil mit geringer Bodenmächtigkeit, KOSTRA-Niederschlagswert der Dauer 24 h mit Wiederkehrintervall 100 Jahre, KOSTRA-Niederschlagswert der Dauer 15 min mit Wiederkehrintervall 100 Jahre, Einzugsgebietsgrösse, Verhältnis der natürlichen Logarithmen der KOSTRA-Niederschläge der Dauer 72 h mit Wiederkehrintervall 1 Jahr und 100 Jahre
- Region 2: Summe der Flächenanteile Wald, Gehölz und krautiger Vegetation, Flussdichte, Flächenanteil mit geringer Bodenmächtigkeit, KOSTRA-Niederschlagswert der Dauer 48 h mit Wiederkehrintervall 100 Jahre, Einzugsgebietsgrösse

Dieses Verfahren zur Regionalisierung ist eindeutig von praktischen Überlegungen geleitet. So weist die Liste der untersuchten Einzugsgebietskennwerte nur Kenngrössen auf, die in der betrachteten Region leicht zu erheben sind. Theoretische Überlegungen bezüglich der Grössen spielten bei der Entwicklung des Verfahrens eine untergeordnete Rolle. Auch die schliesslich in die

Regressionsgleichungen eingehenden Kenngrößen (z.B. die Verwendung des Quotienten der natürlichen Logarithmen der KOSTRA-Niederschläge der Dauer 72 h mit Wiederkehrintervall 1 und 100 Jahre als unabhängige Variable der Regressionsgleichung) machen die praktische Zielsetzung dieser Arbeit deutlich.

Das vorgestellte Verfahren ist aus den genannten Gründen (Wahl der Einzugsgebietskenngrößen ohne nähere theoretische Betrachtungen, Regionalisierung von Parametern einer Verteilungsfunktion) nicht ohne weiteres auf andere Gebiete übertragbar.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Das Verfahren wird im Regierungsbezirk Magdeburg eingesetzt.

Jährlichkeit der Ereignisse

Das Regionalisierungsverfahren wird für die Abschätzung von seltenen Hochwasserereignissen mit Jährlichkeiten bis über 100 Jahren durchgeführt.

Einzugsgebietsfläche

Angaben für die maximale Grösse der Einzugsgebiete die betrachtet worden sind, wurden nicht gemacht. Ihre Mindestgrösse betrug 10 km².

Naturräumliche Zuordnung

Entsprechend der naturräumlichen Gegebenheiten des Regierungsbezirks Magdeburg ist das Modell bisher auf Mittelgebirgs- und Flachlandräume angewendet worden. Einschränkungen in der räumlichen Übertragbarkeit des Modellansatzes sind nicht bekannt.

Erfahrungen

Nach Erfahrungen im Regierungsbezirk Magdeburg ist für die Anwendung des Regionalisierungsverfahrens ein hohes Mass an hydrologischem Expertenwissen notwendig. Die Verfügbarkeit der notwendigen Eingangsdaten wird als gut bewertet.

Notwendige Inputdaten

Die notwendigen Eingabedaten und Gebietskenngrößen werden aus behördlichen Datenbanken mit Einzugsgebietsinformationen, ATKIS-Daten und digitalen Höhenmodellen (Landesvermessungsamt) abgeleitet. Zusätzlich werden Bodeninformationen und geologische Informationen benötigt, die anhand der Bodenübersichtskarte 1 : 200'000 und der Geologischen Übersichtskarte 1 : 400'000 ermittelt werden können. Beide Kartenwerke sind am Geologischen Landesamt in Sachsen-Anhalt erhältlich.

Weiterhin sind Angaben aus dem KOSTRA-Atlas notwendig. Darüber hinaus sind Informationen über die Landnutzung erforderlich. Diese werden aus Luftbildbefliegungen extrahiert (CIR-Filme, Colour InfraRed).

Aufwand (zeitlich)

Mit der Verfügbarkeit eines Regionalisierungsmodells ist lediglich mit der Datenbereitstellung und -aufbereitung ein Zeitaufwand verbunden. Dieser wird mit einem zehntel bis zwanzigstel Arbeitstag angegeben.

Aufwand (finanziell)

Abgesehen vom Erwerb (keine Angaben) des Modells Reg-Ex und der Eingangsdaten sowie der Notwendigkeit über ein Geographisches Informationssystem zu verfügen, entstehen bei der Anwendung dieses Verfahrens keine weiteren Kosten.

Güte der Resultate

Eine Fehlerbetrachtung wird durchgeführt. Erfahrungswerte wurden jedoch nicht genannt.

Literatur

Deutscher Wetterdienst, DWD (Hrsg.) (1997): Starkniederschlagshöhen für Deutschland. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.

Hosking, J.R.M. Wallis, J.R. (1997): Regional Frequency Analysis. Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne.

Schumann, A.H. & Pfützer, B. (1999): Regionalisierung einer hochwasserstatistischen Verteilungsfunktion unter Anwendung eines Geographischen Informationssystems. In: ``Bemessungsabflüsse für kleine Einzugsgebiete" Tagungsband zum Kolloquium vom 4./5. März 1999 an der Universität Kaiserslautern, Berichte des Fachgebietes Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, Heft 9.

4.6.5 IsHoT+W

Beschreibung des Modells

Das Informationssystem Hochwasser mit dem Softwareprodukt IsHoT+W wurde am Institut für Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik / Ottobrunn entwickelt und dient einerseits der Prüfung von Zeitreihen der Hochwasserabflüsse auf Homogenität, Trends und Sprünge (IsHoT) und andererseits der Abschätzung von Hochwasserabflüssen und -spenden bestimmter Wahrscheinlichkeiten (IsHoW) an beobachteten wie auch unbeobachteten Querschnitten eines Einzugsgebietes (Kleeberg und Willems 2000). Als wesentliche Eigenschaften der Funktionalitäten des Informationssystems ist die Möglichkeit der lokalen und regionalen Analyse von Hochwasserabflüssen hervorzuheben. Im Gegensatz zu anderen Programmsystemen zur statistischen Analyse von geophysikalischen Daten bietet IsHoT+W eine Vielzahl von Funktionen zur Datenprüfung. Die verwendeten jährlichen oder partiellen Serien können hinsichtlich Homogenität, Trends und Sprünge mit klassischen und modernen robusten Ansätzen überprüft werden.

Was die Unterscheidung in lokale und regionale Analyse angeht, so lassen sich bei der lokalen Analyse statistische Untersuchungen von einzelnen Pegelreihen durchführen. Für regionale Analyse hingegen werden auf der Basis von mehreren Pegeln, die einer homogenen Region zugeordnet werden, statistische Analysen durchgeführt. Die Regionen werden dabei durch objektivierte Verfahren, wie der Cluster- und Diskriminanzanalyse, gebildet. Als Sinn und Zweck der Regionenbildung können zwei Gesichtspunkte angeführt werden: Zum einen können innerhalb homogener Regionen auch an unbeobachteten Querschnitten Aussagen über die Hochwasserwahrscheinlichkeit getroffen werden, zum anderen lassen sich lokale Schätzungen von Trends oder Hochwasserquantilen durch die regionale Betrachtung stabilisieren.

Für die Regionalisierung ist die bekannte Quantilschätzung durch Regression und das Index-Flood-Verfahren in IsHoT+W realisiert.

Bei der lokalen Analyse können neben den bekannten primärstatistischen Kennwerten verschiedene Homogenitätsanalysen durchgeführt werden. Hierzu stehen in IsHoT+W verschiedene univariate (z.T. parametrisch und nichtparametrisch) und bivariate (sog. relative) statistische Verfahren zur Verfügung. Im Fall der bivariaten Verfahren wird ein Vergleich mit einer als homogen bekannten Referenzreihe durchgeführt. Darüber hinaus sind im Informationssystem Trendanalysen implementiert, die auf klassischen und robusten Ansätzen basieren (siehe Kleeberg und Willems 2000). In einer Sprunganalyse nach Bernier können zudem Bruchpunkte in der Zeitreihe dedektiert werden. Eine automatische Trendbereinigung wird nicht angeboten.

Die lokale Analyse beinhaltet auch die Wahrscheinlichkeitsbetrachtung der Hochwasserserien. Um eine der 23 verschiedenen analytischen Verteilungsfunktionen anzupassen, können die folgenden drei Parameterschätzverfahren genutzt werden:

- Momentenmethode,
- L-Momentenmethode,
- Lineare und nichtlineare Regression.

Wobei nur in sechs Fällen zwei Parameterschätzmethoden angewendet werden, für den Rest nur eine.

Den Parameterschätzverfahren Regression und L-Momente liegen sogenannte Plotting Positionen (empirische Überschreitungswahrscheinlichkeiten) zugrunde. In IsHoT+W können alle gängigen Plotting Positionen (PP) ausgewählt werden. Die PP nach Hosking und Wallis eignet sich für das L-Momenten-Verfahren am besten und ist deshalb auch Standard in IsHoT+W.

Für die Beurteilung der Anpassungsgüte ist der $n\omega^2$ -Test implementiert. Gleichzeitig dient der $n\omega^2$ -Wert auch dazu, ein Ranking der angepassten analytischen Verteilungsfunktionen durchzuführen. Zusätzlich wird als Gütemass das nichtlineare Bestimmtheitsmass als Quotient zwischen der durch das Modell erklärten zur Gesamtvarianz der empirischen Wahrscheinlichkeiten sowie das nichtlineare Bestimmtheitsmass als Quotient zwischen der erklärten zur Gesamtvarianz

der empirischen Jährlichkeiten berechnet. Das letzt genannte Mass ist insbesondere gegenüber Abweichungen im Bereich hoher Jährlichkeiten sensitiv.

Ein prinzipieller Gedanke der regionalen Analyse ist, dass es homogene Regionen gibt, für die sich die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der innerhalb liegenden Pegel nur durch einen pegelspezifischen Skalierungsfaktor, dem sog. flood index, unterscheiden. Die dimensionslose Wahrscheinlichkeitsverteilung, die aus normierten Reihendaten sämtlicher Pegel einer Region ermittelt wurde, heisst regionale Wachstumskurve (engl. regional growth curve). Der Skalierungsfaktor kann z.B. das MHQ einer Pegelreihe sein. Geschätzt werden die Parameter der regionalen Wachstumskurve über das L-Momenten-Verfahren.

Die notwendigen Arbeitsschritte einer regionalen Analyse beinhalten folgende Punkte:

- Zuerst werden homogene Regionen mit Hilfe einer Clusteranalyse und einer nachgeschalteten Diskriminanzanalyse gebildet.
- Danach werden die Regionen im Hinblick auf ihrer Homogenität nach einem speziellen Gütemass überprüft und ggf. modifiziert.
- Im letzten Schritt schätzt man die regional gültigen Parameter, um für beliebige, auch unbeobachtete Gewässerquerschnitte innerhalb einer Region Hochwasserquantile zu bestimmen. Hierzu ist es notwendig, den Skalenfaktor überall zu kennen. Er kann ebenfalls, wie bei der Quantilschätzung, über eine Regression oder aus kürzeren Zeitreihen ermittelt werden.

Wie bereits erläutert, wird zur Bildung von homogenen Regionen versucht, diese über objektive Kriterien abzugrenzen. Die angewandte Clusteranalyse kann dabei flexibel auf verschiedene Pegelmerkmale ausgerichtet werden. Zum einen lässt sich ein Pegel durch gebietspezifische Merkmale, wie:

- Einzugsgebietsgrösse [km²]
- Rechtswert [m]
- Hochwert [m]
- Pegelnullpunkt [m ü. NN]

charakterisieren. Zum anderen können auch abflussspezifische Merkmale (z.B. MHQ, Standardabweichung, Schiefe usw.) für eine Clusterung herangezogen werden. Auch eine Kombination aus gebiets- und abflussspezifischen Merkmalen ist für die Regionalisierung möglich. Die nachgeschaltete Diskriminanzanalyse führt zu objektiven Kriterien über die Zuordnung von beliebigen Punkten im Raum zu einer Region. Verwendet werden in IsHoT+W ausschliesslich Gebietsmerkmale für die Diskriminanzanalyse. Durch die Trennung der Variablenauswahl für Cluster- und Diskriminanzanalyse wird gewährleistet, dass Pegel zu einer Region zusammengefasst werden, die nicht nur hinsichtlich ihrer Gebiets-, sondern auch im Hinblick ihrer Abflussmerkmale möglichst ähnlich sind.

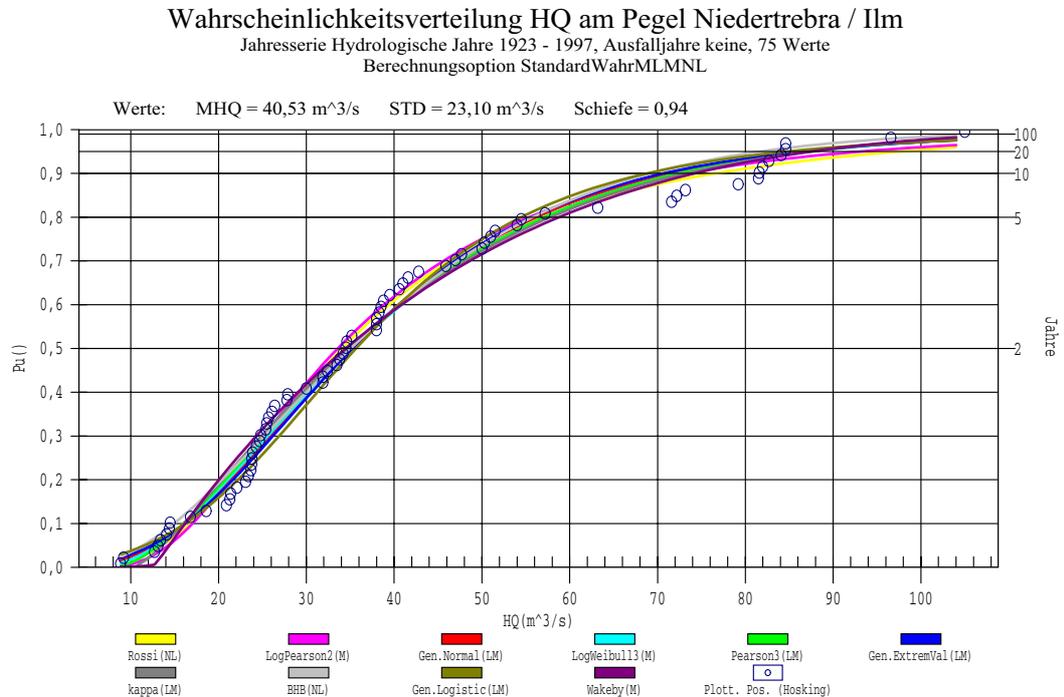
Neben der „objektiven“ Regionenbildung können Pegel in IsHoT+W auch interaktiv unterschiedlichen Regionen zugeordnet werden.

Für die ausgewählten homogenen Regionen können zudem Trendanalysen gemeinsame durchgeführt werden. Dazu sind die einer Region angehörenden Messreihen durch ihren MHQ-Wert zu normieren. Die nachgeordnete Prüfung der Homogenität der Reihendaten erfolgt nach einem von Hosking und Wallis (1997) vorgeschlagenen Diskordanz-Mass, das auf einem Vergleich der L-Momenten-Verhältniswerte an einzelnen Pegeln mit dem regional gültigen Verhältniswert beruht. Zusätzlich werden die Regionen auf Homogenität geprüft. Zu diesem Zweck wird die beobachtete Unterschiedlichkeit der Reihenmerkmale mit der erwarteten Unterschiedlichkeit einer homogenen Region verglichen.

Sind homogene Regionen bestimmt, so muss lediglich der Skalenparameter (z.B. MHQ) an allen Querschnitten bekannt sein, um für alle Punkte innerhalb einer Region Hochwasserquantile ermitteln zu können.

Darüber hinaus bietet IsHoT+W auch die Möglichkeit an, eine klassische Quantilregression auf die Einzugsgebietsgrösse für die Regionalisierung von Hochwasserdurchflüssen durchzuführen. Als Spezialfall solcher Quantilregressionen lassen sich Hochwasserlängsschnitte erstellen.

Was die Ausgabemöglichkeiten bei der Ergebnisdarstellung angeht, so bietet IsHoT+W eine Vielzahl von anschaulichen und übersichtlichen Plots z.B. mit Eintrag der Konfidenzintervalle bei Wahrscheinlichkeitsanalysen an einzelnen Pegeln oder Trendgraphiken und Kombination verschiedenster analytischer Verteilungsfunktionen (vgl. Abb. 4.5).



IsHoT 1.2

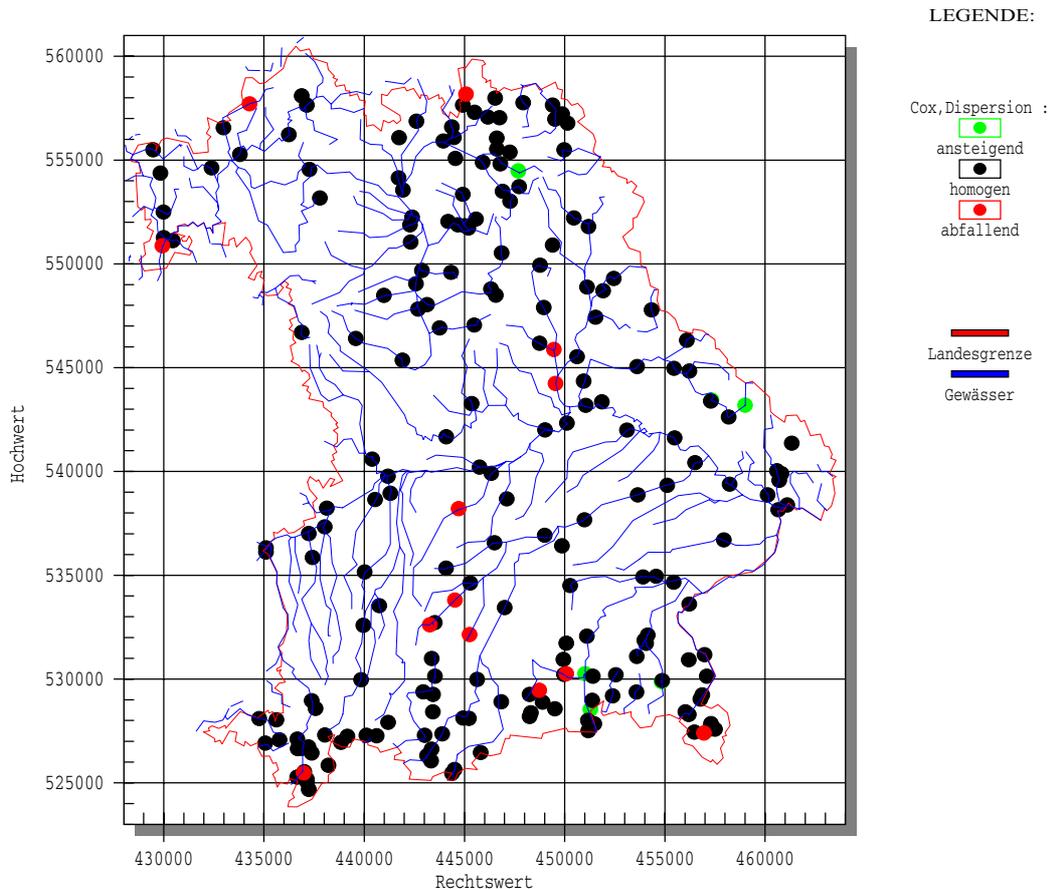
TMLNU-11/1998

Abb. 4.5 Beispiel für die graphische Darstellung angepasster Verteilungsfunktionen in IsHoT+W (aus Kleeberg und Willems 2000).

Besonders hervorzuheben ist jedoch die Möglichkeit, Ergebniskarten zu erstellen, in denen sich zwei Variablen gleichzeitig visualisieren lassen. Über die Größe und Farbe von Kreisen (Bubble-Graphik) kann die räumliche Verteilung von Ergebnissen abgelesen werden (Kleeberg und Willems 2000). Man erhält somit z.B. eine einprägsame Übersicht über die regionale Verteilung der Richtung von Trends (vgl. Abb. 4.6).

Ergebniskarte Bayern, Berechnungsoption StandardHomTrendSprung

Kreisfarbe: Cox,Dispersion , Kreisradius: keine Variable



IsHoT 1.2

BLfW-SG23-11/1998

Abb. 4.6 Beispiel der Darstellung der räumlichen Verteilung von Variablen mit IsHoT+W (aus Kleeberg und Willems 2000)

Insgesamt liefert die räumliche Darstellbarkeit eine erhöhte Unterstützung bei der Beurteilung von Berechnungsergebnissen.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Das Programm IsHoT+W wird bei den Landesämtern in Bayern, Niedersachsen und Thüringen eingesetzt.

Jährlichkeit des Ereignisses

Es werden Hochwasserabflüsse geschätzt, deren Wiederholungszeitspannen bis zu 200 Jahren betragen. Für Analysen des Restrisikos bei technischen Anlagen (Rückhaltebecken, Talsperren) werden extreme Hochwasserabflüsse mit Jährlichkeiten bis zu 10'000 Jahren und maximale Hochwasserabflüsse bestimmt.

Einzugsgebietsfläche

Die betrachteten Einzugsgebiete weisen Flächen zwischen 10 und 100'000 km² auf.

Naturräumliche Zuordnung

Eine naturräumliche Einschränkung für die Anwendung des oben beschriebenen Verfahrens besteht nicht. Eine ausreichende Datenlage vorausgesetzt, kann es weltweit eingesetzt werden.

Erfahrungen

Die Datenlage für eine Anwendung des Verfahrens wird als sehr gut bewertet. Nach Einschätzung des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft hängt die Güte der Abschätzung mit diesem Verfahren stark vom hydrologischen Expertenwissen des Bearbeiters ab.

Notwendige Inputdaten

Die notwendigen Eingangsgrößen sind neben ausreichend langen Zeitreihen von Abflussdaten folgende Informationen:

- Grösse des Einzugsgebietes
- Lage der Pegel (Koordinaten und Höhe ü. NN)
- Flusskilometrierung (Lagepläne)

Aufwand (zeitlich)

Liegen die Jahresserien der Pegel vor, wird ein Zeitraum von einem halben Tag für die Datenbereitstellung und -prüfung veranschlagt. Die Durchführung der Abschätzung des gewünschten Hochwassers benötigt einen weiteren halben Tag.

Aufwand (finanziell)

Über die Kosten für IsHoT+W sind keine Angaben gemacht worden.

Güte der Resultate

Nach Erfahrungen des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft liegen die Schwankungsbreiten der erzielten Ergebnisse zwischen 10 und 25 %.

Literatur

Kleeberg, H.-B., Willems, W. (2000): Informationssystem Hochwassertrends / Hochwasserwahrscheinlichkeiten, IsHoT / IsHoW, Benutzerhandbuch. Institut für Angewandte Wasserwirtschaft, München.

4.7 Angewandte deterministische Modelle (N-A-Modelle) – Blockmodelle

4.7.1 EGLSYN (synthetische Einheitsganglinien)

Beschreibung des Modells

Das Verfahren der synthetischen Einheitsganglinien gehört zu den Black-Box-Modellen, bei denen das betrachtete Einzugsgebiet als einheitliches System angesehen wird, auf welches als Eingabe der abflusswirksame Niederschlag in seiner zeitlichen Abfolge wirkt. Als Ausgabe wird die resultierende Abflusswelle des direkten Abflusses Q_D erzeugt. Die Umwandlung erfolgt in einer für das jeweilige Einzugsgebiet charakteristischen Form. Sie wird durch eine Übertragungsfunktion (Unit Hydrograph, UH) beschrieben (vgl. Abb. 4.7).

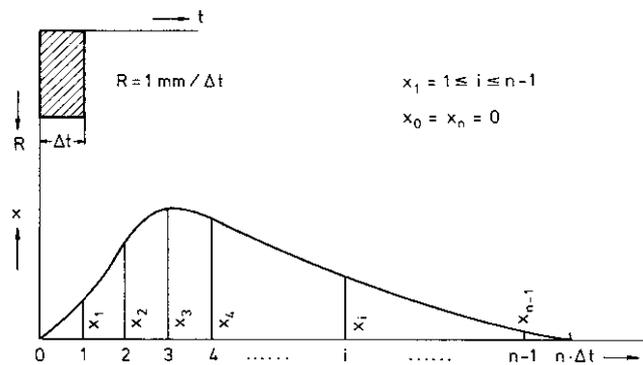


Abb. 4.7 Schematische Darstellung einer Standardeinheitsganglinie (aus BLfW 1999).

Wird der verursachende abflusswirksame Niederschlag (r_w) als Folge von Einzelimpulsen betrachtet, so ergibt sich der Direktabfluss Q_D aus der Superposition von Einzelwellen, die sich aus dem Produkt von der UH-Ordinate und der Größe des abflusswirksamen Niederschlags des entsprechenden Zeitintervalls ergeben. Die einzelnen so erzeugten Teilwellen überlagern sich entsprechend der Aufeinanderfolge der r_w . Zur Berechnung der i -ten Ordinate des Direktabflusses ergibt sich folgende Formel (BLfW 1999):

$$Q = dt * \sum_{j=1}^m (u_{i-j+1} * r_{w(j)})$$

für $0 < i - j + 1 < n$

Q_D	Ordinate des Direktabflusses [m^3/s]
u	Ordinate des Unit Hydrographen [$m^3/s * mm$]
r_w	abflusswirksamer Niederschlag [mm/h]
dt	Zeitschritt [h]
m	Anzahl Niederschlagsintervalle ($j = 1, 2, \dots, m$)
n	Anzahl Ordinaten des Unit Hydrographen
i	Laufindex des Direktabflusses

Im Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft wird für dieses Modell ein Programm mit dem Namen EGLSYN verwendet. Es dient dazu, Abflussganglinien sowie die zugehörigen Scheitelabflüsse und Abflussfüllen in Einzugsgebieten von einigen Hektar bis ca. 150 km^2 Fläche zu berechnen. Es werden dabei synthetische, d.h. aus Gebietskenngrößen abgeleitete Einheitsganglinien oder direkt als Funktion vorgegebene Einheitsganglinien angewandt.

Zusätzlich werden als Eingabegröße Niederschläge bestimmter Dauer und Häufigkeit oder Niederschlagszeitreihen und Angaben über den Abflussbeiwert bzw. die nicht zum Abfluss gelangenden Niederschlagsanteile benötigt. Letztere Angaben werden gebraucht, um den

abflusswirksamen Niederschlag zu berechnen. Für den Fall, dass Niederschlagszeitreihen vorliegen, kann das Programm die gewünschten Bemessungsniederschläge ermitteln.

Für die Ableitung einer synthetischen Einheitsganglinie existieren eine Reihe von Ansätzen. Welche Gebietsgrößen und zusätzlichen Angaben die verschiedenen Ansätze zur Bestimmung der Einheitsganglinie notwendig sind, kann nachfolgender Tabelle entnommen werden (aus BLfW 1999).

Programm EGLSYN Eingabegrößen für die Berechnung synthetischer Einheitsganglinien												
Name des Einzugsgebietes:												
Gebietspezifische Parameter		Dimension	Wert	Verfahren								
				①	②	③	④	⑤	①	②		
				Braun/Seeger	DVWK Südbayern	Lutz Südbayern	Thiele	Lutz/Caspary	Eingabe der EGL-Ordinaten	Dreiecks-EGL	EGL am Pegel (Loseblattsammlung)	
Dauer des Zeitintervalls	ΔT	h oder min		●	●	●	●	●	●	●		
Fläche (oberirdisches Einzugsgebiet)	A_{Eo}	km ²		●	●	●	●	●	●	●		
Vorfluterlänge	L	km		○	●	●	●	●	○	○		
Vorfluterlänge bis Schwerpunkt	L_c	km				●		●				
Absolutes mittleres Gefälle des Vorfluters $\Delta H / L$	I_{abs}	%					●					
Gewogenes mittleres Gefälle des Vorfluters (Ermittlung siehe Anlage)	I_{mit}	%			●	●		●				
Maximale Geländehöhe (des Einzugsgebietes)	H_{max}	m ü. NN		●								
Bebauter Flächenanteil	ε_b	%				●		●				
Bewaldeter Flächenanteil	ε_w	%				●		●				
Gebietsparameter	P1	-						□				
Rauhigkeitsbeiwert des Vorfluters (Strickler)	k_{St}	m ^{1/3} /s						□				
Einzelordinaten der EGL		-							●			
Anlaufzeit der EGL (z.B. $[(0,868 \cdot L^3 / \Delta H)^{0,386}] + 1,5$)	T_P	h (oder min)								●		
Abfallzeit der EGL (z.B. $2,0 \cdot T_P$)	T_R	h (oder min)								●		
Meßstellenummer											●	
Rechtswert		km										
Mittelpunkts-Koordinaten im Gauß-Krüger-System		km										
Hochwert		km										
Mittelpunkts-Koordinaten im Gauß-Krüger-System		-										
Gesamtabflußbeiwert		-										
Basisabfluß	Q_B	m ³ /s										
Steigung des Basisabflusses pro Stunde		m ³ /s/h										
Schwellwerte für Füllenberechnung		m ³ /s										

- notwendige Eingaben
- mögliche Eingaben
- alternative Eingaben

Die Eingabe einer Abflussganglinie als Einheitsganglinie ist dann zweckmässig, wenn historische N-A-Ereignisse verwendet werden sollen, um z.B. den Abflussbeiwert eines Einzugsgebietes zu kalibrieren. In diesem Fall müssen die Ordinaten der Niederschlagsganglinie im gleichen Zeitintervall vorliegen wie es für die Einheitsganglinie vorgegeben wurde.

In den meisten Fällen empfiehlt es sich, für die Bemessung die Niederschlags-Dauerhäufigkeitstabellen nach KOSTRA zu verwenden. Darüber hinaus können auch Ganglinien des Niederschlags angegeben werden. Für den statistischen Niederschlag des KOSTRA-Atlas können darüber hinaus Angaben über die zeitlichen Verlauf der Niederschlagsintensitäten gemacht werden:

- Blockregen,
- Anfangsbetont,
- Mittenbetont,
- Endbetont.

Prinzipiell haben alle zeitlichen Niederschlagsverteilungen eine ähnliche Eintrittswahrscheinlichkeit, sie erzeugen aber unterschiedliche Abflussmaxima. Dies sollte bei der Auswahl beachtet werden. In der Regel ist ein mittenbetonter Niederschlag zu empfehlen. Bei kleinen Einzugsgebieten mit kurzen Laufzeiten und damit auch kurzen massgebenden Niederschlagsdauern (> 1 h) sollten Blockregen herangezogen werden.

Für die Ermittlung des effektiven oder abflusswirksamen Niederschlags, der letztlich in die Übertragungsfunktion eingeht, stehen sieben Möglichkeiten zur Verfügung:

- Einfachste Möglichkeit ist die Vorgabe oder Schätzung eines Abflussbeiwertes. Der effektive Niederschlag ergibt sich bei diesem Verfahren in jedem Zeitintervall durch Multiplikation des gefallen Niederschlags mit dem Abflussbeiwert (BLfW 1999).
- Bei der zweiten Möglichkeit wird das gesamte nicht abflusswirksame Niederschlagsvolumen (errechnet aus dem gewählten Abflussbeiwert) als konstante Versickerungsrate in jedem Zeitintervall von der jeweiligen Niederschlagssumme abgezogen.
- Als dritte Möglichkeit kann eine konstante Verlustrate vorgegeben werden.
- Abflussbeiwert nach Koehler, Abflussbeiwertverfahren mit variablem Abflussbeiwert. Der Abflussbeiwert ist in jedem Berechnungsintervall abhängig vom Anfangsverlust und der Niederschlagsintensität.
- Verlustrate nach Horton, Verlustatenverfahren mit variabler Verlustrate. Die Grösse der Verlustrate ist in jedem Berechnungsintervall abhängig von der aktuellen Bodenfeuchte.
- CN-Methode, Abflussbeiwertverfahren mit konstantem Abflussbeiwert. Der Abflussbeiwert wird nach dem SCS-Verfahren mit der Modifikation nach Øverland bestimmt.
- Asymptotischer Abflussbeiwert, Abflussbeiwertverfahren mit variablen Abflussbeiwert. Der Abflussbeiwertverlauf wird als Funktionsverlauf vorgegeben.

Bei der Abflussberechnung kann neben dem Direktabfluss durch Hinzufügen eines Basisabflusses, der entweder konstant oder als linear steigend angenommen wird, der gesuchte Hochwasserabfluss ermittelt werden. Darüber hinaus kann die Abflussfülle der Hochwasserereignisse oberhalb vorzugebender Schwellenwerte berechnet werden.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Mit Hilfe der synthetischen Einheitsganglinien werden in Bayern seltene Hochwasserabflüsse zum einen grob abgeschätzt, zum anderen für die Prognose von Scheitelabflüssen für Bemessungsaufgaben angewendet. In seltenen Fällen werden auch extreme Hochwasserabflüsse bestimmt, um die Anlagensicherheit von Talsperren, Rückhaltebecken oder besonderer technischer Einrichtungen (z.B. Kernkraftwerke) zu prüfen. Die zahlreichen Anwendungen in Bayern sind möglich, weil dort für sehr viele kleine Einzugsgebiete die Einheitsganglinien und alle zugehörigen Parameter und Kenngrössen bestimmt und in einem umfangreichen Katalog bereitgestellt worden sind.

Jährlichkeit des Ereignisses

Das Spektrum der betrachteten Hochwasserabflüsse erstreckt sich über Wiederholungszeitspannen von 100 bis zu 1'000 Jahren. Extreme Hochwasserabflüsse noch grösserer Wiederholungszeitspannen können zwar auch über die synthetischen Einheitsganglinien bestimmt werden – dies wird jedoch nicht empfohlen.

Einzugsgebietsfläche

Angewendet wird das Verfahren auf Einzugsgebiete zwischen ca. 0,1 und 150 km².

Naturräumliche Zuordnung

Das Verfahren hat keine naturräumliche oder regionale Gültigkeitsbeschränkung.

Erfahrungen

Im allgemeinen wird die Datenverfügbarkeit als durchschnittlich bewertet. Vom Bearbeiter wird ein hohes Mass an hydrologischem Expertenwissen verlangt.

Notwendige Inputdaten

Wenn die Form der Einheitsganglinie bekannt ist, so stellt der Niederschlag die wichtigste Eingangsgrösse dar. Es können sowohl statistisch festgelegte Niederschläge als auch beobachtete Niederschläge als Modellbelastung verwendet werden. Statistische Niederschlagshöhen oder -intensitäten können dem KOSTRA-Atlas des Deutschen Wetterdienstes entnommen werden. Die Annahmen für den zeitlichen Intensitätsverlauf dieser Niederschläge reicht dabei von linear über anfangs- und mittenbetont bis hin zu endbetonten Niederschlägen. Beobachtete Niederschläge werden nach historischen Niederschlagsereignissen ausgewählt. Zusätzlich zu den Niederschlägen erfolgt eine Berücksichtigung der Wasserabgabe aus der aktuellen Schneedecke indem ein Niederschlagsäquivalent vorgegeben wird. Die Vorgabewerte werden statistisch ermittelt.

Für die Ermittlung der abflussbildenden und abflusskonzentrierenden Parameter sind verschiedene Angaben über topographische Gebietskenngrössen, Böden, Geologie und die Landnutzung notwendig. Dazu gehören:

- Einzugsgebietsgrösse,
- Lauflängen des Hauptvorfluters,
- Lauflänge aller Gewässer,
- Gefälle-Angaben,
- Schwerpunktangaben,
- Geologie,
- Bodenart,
- Rauigkeitsbeiwert (Schätzung oder Kalibrierung),
- Waldanteil,
- Siedlungsanteil,
- Brache,
- Wasserfläche.

All diese Angaben können aus topographischen, geologischen oder pedologischen Karten abgeleitet werden. Informationen über das Gefälle können zudem aus digitalen Höhenmodellen ermittelt werden. Darüber hinaus müssen für eine Kalibrierung der nicht mess- oder ableitbaren Parameter beobachtete Niederschlag-Abfluss-Ereignisse betrachtet werden. Hierzu werden neben den beobachteten Niederschlagsereignissen entsprechende Abflussganglinien benötigt.

Aufwand (zeitlich)

Der erforderliche zeitliche Aufwand richtet sich stark nach dem ausgewählten Verfahren. Er liegt für die Datenbereitstellung und -aufbereitung bei einem halben bis fünf Tagen. Dies schliesst die Parameterermittlung ein. Da in Bayern umfangreiche Untersuchungen zu Einheitsganglinien durchgeführt worden sind, kann hier auf zahlreiche Ergebnisse zurückgegriffen werden. Die Durchführung der Abschätzung des gewünschten Hochwasserabflusses selbst dauert ca. einen halben Tag.

Aufwand (finanziell)

Bei dem Programm EGLSYN handelt es sich um ein selbst entwickeltes, nicht kommerziell vertriebenes Softwareprodukt. Sowohl die Verfügbarkeit als auch die dabei möglicherweise entstehenden Kosten sind unbekannt.

Güte der Resultate

Eine Fehlerbetrachtung wird in Bayern nicht durchgeführt, weshalb auch keine Erfahrungswerte für die Schwankungsbreiten der Resultate angegeben werden können.

Literatur

Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, BLfW (Hrsg.) (1999): Hydrologische Planungsgrundlagen, Hochwasserlängsschnitt, Loseblattsammlung des Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft.

4.8 Angewandte deterministische Modelle (N-A-Modelle) – Flächendetaillierte Modelle

4.8.1 FGM (Flussgebietsmodell, IHW/IWK-Paket: Hochwasseranalyse)

Beschreibung des Modells

Das Flussgebietsmodell FGM ist Bestandteil des IHW/IWK-Paketes, eines Softwareproduktes des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe. FGM ist ein Konzeptmodell mit räumlicher Gliederung in Teileinzugsgebiete und Gewässerknoten. Letztere sind dabei Gebietsauslässe, Pegel, Zusammenflüsse, Engstellen und andere Querschnitte, für die eine Simulation der Abflussganglinie durchgeführt wird. Welche Berechnungen an jedem Gewässerknoten erfolgen, zeigt Abbildung 4.8.

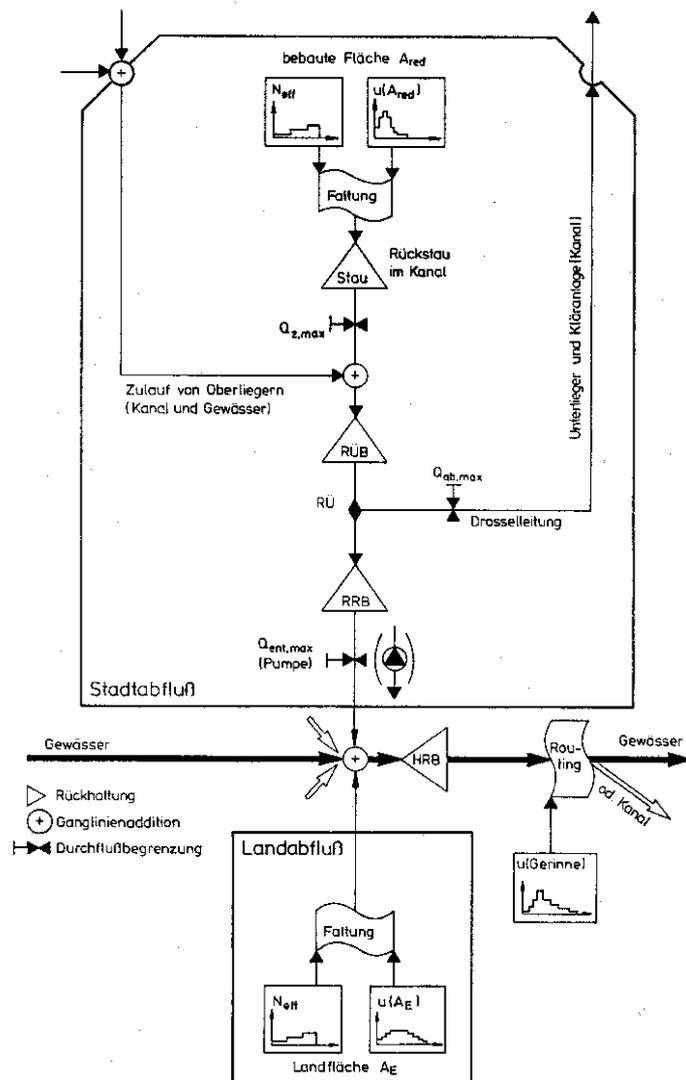


Abb. 4.8 Modellfunktionen an einem Gewässerknoten (aus Ihringer und Kron 1993).

Zwischen zwei Gewässerknoten befinden sich jeweils Gewässerstrecken, auf denen die abflussbeeinflussenden Gegebenheiten entlang des Gewässerlaufs (z.B. Wellenablauf und Hochwasserrückhaltung) nachgebildet werden (Ihringer und Kron 1993). In Abbildung 4.9 ist beispielhaft die Darstellung eines Einzugsgebietes in Graphenform mit Gewässerknoten, Hochwasserrückhaltebecken, Stadtabfluss und Überleitungen skizziert.

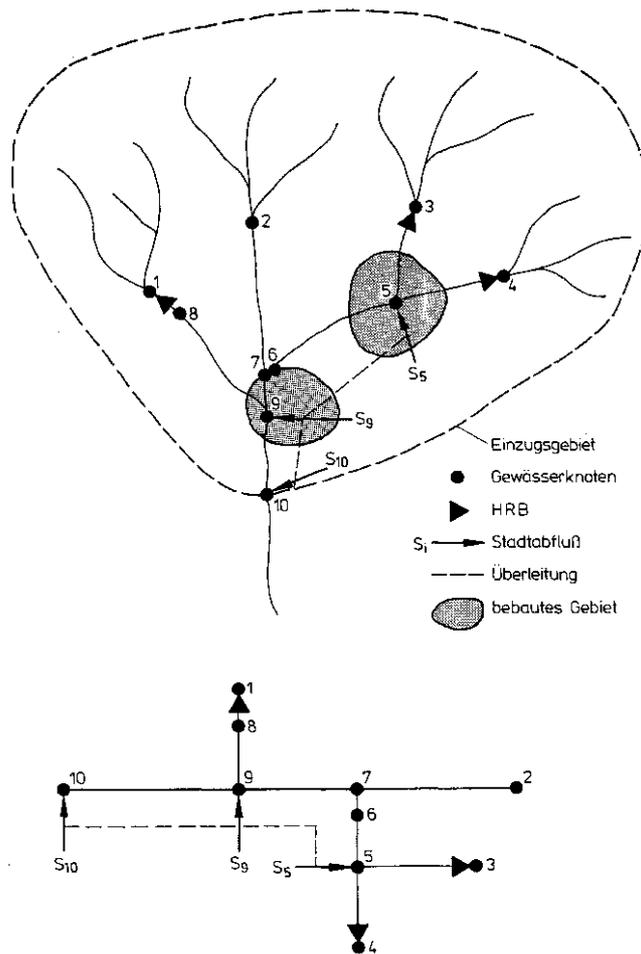


Abb. 4.9 Skizze eines Einzugsgebietes mit der Darstellung der Gewässerknoten in Graphenform (aus Ihringer und Kron 1993).

Das Modell muss für das jeweilige Einzugsgebiet kalibriert werden. Es wird zwischen Stadt- und Landabfluss unterschieden. Die Ermittlung von Bemessungsabflüssen aus statistischen Niederschlagsbelastungen ausgewählter Jährlichkeiten ist möglich.

Für die Ermittlung des abflusswirksamen Niederschlags über den Abflussbeiwert stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Zunächst ist zu unterscheiden, ob der Abflussbeiwert direkt aus Messdaten ermittelt werden kann oder ob hierzu eine Übertragung (Regionalisierung) des Abflussbeiwertes aus einem über- bzw. untergeordneten Einzugsgebiet oder einem Nachbargebiet erforderlich ist. Wenn ausreichend viele Messwerte vorliegen, kann das Koaxialdiagramm, das eine nichtlineare Regressionsbeziehung zwischen Gebietsrückhalt und ereignisspezifischen Parametern darstellt, angewendet werden. Liegen keine Messwerte vor, kann der Abflussbeiwert über eine Regionalisierung aus anderen Einzugsgebieten übertragen werden. Hierfür existieren zwei Verfahren:

- SCS-Verfahren,
- Regionalisierungsansatz nach Lutz für Abflussbeiwerte.

Die Abflusskonzentration kann optional im Modell ebenfalls auf unterschiedliche Weise berechnet werden. Zu nennen sei hier zur Berechnung der Einheitsganglinie:

- Einheitsganglinie über Einzelordinaten,
- Lineare Speicherkaskaden,
- Lineare Doppelspeicherkaskaden,
- Dreifache Speicherkaskaden.

Darüber hinaus kann die Einheitsganglinie mit Hilfe des Regionalisierungsverfahrens nach Lutz auch über gebiets- und ereignisspezifische Kenngrößen ermittelt werden. Ereignisspezifische Kenngrößen sind dabei die mittlere Niederschlagsintensität, Wochenzahl des Ereignisses sowie der mittlere Abflussbeiwert.

Für den Stadtabfluss stehen die Berechnungsmethoden Einzelordinaten und lineare Speicherkaskaden zur Verfügung.

Der Gerinneabfluss zwischen den Gewässerknoten kann ebenfalls auf unterschiedliche Weise berechnet werden. Für die Wellenverformung sind hier prinzipiell zwei Arten der Veränderung einer Abflussganglinie entlang einer Gewässerstrecke zusammengefasst:

- Verformung einer Ganglinie durch den Betrieb eines Hochwasserrückhaltebeckens,
- Verformung einer Ganglinie entlang der Gewässerstrecke infolge Translation und Retention.

Rückhaltebecken können für folgende Steuerungsarten simuliert werden:

- Rückhaltebecken mit konstantem Regelabfluss,
- Rückhaltebecken mit ungesteuerter Abgabe,
- Rückhaltebecken mit allgemeiner Abgabe als Funktion der Zeit,
- Rückhaltebecken mit allgemeiner Abgabe als Funktion des aktuellen Beckeninhalts.

Die Simulation der Wellenverformung im Gerinne kann über folgende Verfahren erfolgen:

- Translation: Verschiebung der Abflussganglinie ohne Verformung um die Fließzeit.
- Kalinin-Miljukov-Verfahren: Die Wellenverformung wird über eine lineare Speicherkaskade beschrieben, wobei die Parameter der Speicherkaskade zuvor z.B. aus Querprofilen der Gewässers über das Kalinin-Miljukov-Verfahren abgeleitet wurden.
- Kalinin-Miljukov-Verfahren mit Vorländern, Berücksichtigung des Retentionsverhaltens der Vorländer in unterschiedlichen Speicherkonstanten der Linearspeicher. Mit diesem Verfahren kann die Retentionswirkung von Überschwemmungsgebieten berücksichtigt werden.
- Doppelspeicherkaskaden: Die Wellenverformung wird über eine lineare Doppelspeicherkaskade beschrieben, wobei eine Kaskade das Abflussverhalten des Gewässerbettes und die andere Kaskade das Abflussverhalten des Vorlandes beschreibt. Die Parameter müssen zuvor mit geeigneten Verfahren ermittelt werden.
- Muskingum-Verfahren: Das Muskingum-Verfahren ist ein hydrologisches Verfahren deren Parameter aus gemessenen Abflussganglinien bestimmt werden.

Für die Ermittlung von Bemessungsganglinien einer vorgegebenen Jährlichkeit werden von Ihringer und Kron (1993) darüber hinaus noch Handlungsempfehlungen gegeben. Es wird davon ausgegangen, dass die Eingangsgröße Niederschlag einer bestimmten Jährlichkeit in Verbindung mit geeigneten Abflussbeiwerten und Einheitsganglinien zu einem Abfluss führen, dem die gleiche Jährlichkeit zugeordnet werden kann.

Die Abflussganglinie ergibt sich dann aus folgender Gleichung:

$$Q_j = Q_{Bj} + \frac{A_{Eo}}{3,6 * \Delta t} * \sum_{i=1}^j N_{eff,i} * u_{j-i+1}$$

mit:

Q_j	Abfluss im Zeitintervall $j * \Delta t$ [m^3/s]
$Q_{B,j}$	Basisabfluss im Zeitintervall $j * \Delta t$ [m^3/s]
A_{Eo}	Einzugsgebietsfläche [km^2]
Δt	Zeitschritt [h]
$N_{eff,i}$	effektive Niederschlagshöhe im Zeitintervall $j * \Delta t$ [m^3/s]; Entspricht der Niederschlagsintensität $I_{eff,i}$ [$mm/\Delta t$]
u_i	diskretisierte Systemfunktion (Einheitsganglinie)
mit:	$\sum u_i = 1,0$

Für die Berechnung der effektiven Niederschlagshöhe werden unter anderem Niederschläge mit Wahrscheinlichkeitsaussage benötigt. Hierzu können beispielsweise extremwertstatistische

Auswertungen des DWD, die im KOSTRA-Atlas flächendeckend für Deutschland dargestellt sind, herangezogen werden. Zu beachten ist dabei, dass es sich um Extremwerte von Punktniederschlägen handelt, die für eine Betrachtung grösserer Einzugsgebiete abgemindert werden müssen. Die Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Bemessungsniederschläge erfolgt über eine vorgegebene normierte Niederschlagsverteilung. Beispiele dafür sind der mittenbetonte, endbetonte oder die Niederschlagsverteilung nach der DVWK-Empfehlung (DVWK 1984).

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Nach Angaben der Autoren und Vertreter des Modells ist es in allen deutschen Bundesländern vorhanden und wird auch angewandt; in Österreich wurde es landesweit vom Ministerium eingeführt. Die diesem Bericht zugrunde liegenden Befragungen haben ergeben, dass es in Baden-Württemberg und Hessen angewendet wird. Darüber hinaus wird es bei sieben Ingenieurbüros und einem Wasserverband eingesetzt (vgl. Anlage 3).

Jährlichkeit des Ereignisses

In den beiden Bundesländern und bei den Ingenieurbüros werden mit dem Modell Hochwasserscheitelabflüsse mit Jährlichkeiten zwischen 1 und 100 Jahren berechnet. Darüber hinaus werden Hochwasserganglinien ermittelt, um die Bemessung von Hochwasserrückhaltebecken und Polder zu ermöglichen. In vier Fällen werden damit auch extreme Hochwasserabflüsse mit Jährlichkeiten > 500 Jahren abgeschätzt.

Einzugsgebietsfläche

Das Modell wird für Einzugsgebieten verwendet, die Flächen zwischen einem und ca. 5'000 km² aufweisen.

Naturräumliche Zuordnung

Einsatzgebiet des Modells sind Einzugsgebiete mit vorwiegend Mittelgebirgscharakter. Prinzipiell bestehen jedoch hinsichtlich des naturräumlichen Gültigkeitsbereiches keine Einschränkungen.

Erfahrungen

Im allgemeinen wird die Datenverfügbarkeit für dieses Verfahren als gut eingestuft. Dem erforderlichen Expertenwissen bei der Anwendung des Modells wird im Hinblick auf die Güte der Resultate ein hohes Gewicht beigemessen.

Notwendige Inputdaten

Als räumlich verteilte Informationen werden folgende Daten benötigt:

- Einzugsgebietsgrösse,
- Landnutzung,
- Versiegelungsanteil,
- Waldanteil,
- Flussmorphografische Kennwerte wie:
 - Fliesslänge,
 - Gesamtgefälle,
 - Gewogenes Gefälle,
 - Schwerpunktlauflänge,
 - Bodenarten.

Alle Daten können anhand von topographischen, thematischen Karten und Satellitenauswertungen abgeleitet werden. Zusätzlich werden Informationen über das Gerinneprofil benötigt.

Zur Bestimmung von Modellparametern für die Berechnung der Abflussbildung (10 Parameter) und -konzentration (5 Parameter) müssen beobachtete Hochwasserereignisse herangezogen werden. Hierzu werden Abfluss- als auch Niederschlagszeitreihen (z.B. stündliche und viertelstündliche

Zeitschrittweiten) benötigt. Für die Ermittlung von Hochwasserabflüssen bestimmter Wiederholungszeitspannen werden zudem Niederschläge benötigt, denen Jährlichkeiten zugeordnet werden können. Hierzu werden sowohl Werte dem KOSTRA-Atlas entnommen als auch eigene statistische Auswertungen von Niederschlagszeitreihen vorgenommen. Beobachtete Niederschlagsereignisse werden ebenfalls genutzt. Diese werden vor allem für die Kalibrierung von Modellparametern benötigt.

Aufwand (zeitlich)

Der zeitliche Aufwand für die Datenbereitstellung und -prüfung wird nicht genauer spezifiziert. Er hängt stark vom Einzugsgebiet und dem Detaillierungsgrad des Modells ab. Für die Durchführung der Abschätzung eines Hochwasserabflusses bestimmter Jährlichkeit wird ein Zeitaufwand von ca. 2 Tagen pro Teileinzugsgebiet kalkuliert.

Aufwand (finanziell)

Neben den Kosten für Beschaffung und Bereitstellung der erforderlichen Eingabedaten muss das Softwarepaket zur Hochwasseranalyse des IHW/IWK-Karlsruhe erworben werden. Dieses wird nicht kommerziell durch eine Firma vertrieben, sondern von der Universität Karlsruhe gegen eine Gebühr weitergegeben.

Güte der Resultate

Die Schwankungsbreite der Resultate liegt nach Erfahrungen von Baden-Württemberg bei ± 30 %. Die Autoren geben an, dass die Schwankungsbreite derjenigen von Pegelstatistiken entspricht.

Es sei angemerkt, dass die Anwendung des Modells zur Berechnung von extremen Abflüssen mit Überschreitungswahrscheinlichkeiten kleiner $2 \cdot 10^{-2}$ pro Jahr problematisch ist, weil das Modell dafür nicht kalibriert werden kann.

Literatur

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, DVWK (Hrsg.) (1984): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Teil II: Synthese. 34 Seiten, Hamburg, Berlin.

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, DVWK (Hrsg.) (1999): Einsatz von Niederschlag-Abfluss-Modellen zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen, DVWK-Schriften, Heft 24, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser, Bonn, 1999.

Ihringer, J., Kron, W. (1993): Softwarepaket für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Anwenderhandbuch, Band 1: Hochwasseranalyse. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe.

4.8.2 NASIM (Niederschlag-Abfluss-SIMulation)

Beschreibung des Modells

Das Modell NASIM wurde am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen von Ostrowski (1982) zur Langfristsimulation von Abflussganglinien entworfen. Es wird von der Firma Hydrotec, Aachen seit 1985 weiterentwickelt und vertrieben. Das Softwareprodukt hat Anbindungen an GIS, Visualisierungstools sowie ein Programm zur statistischen Hochwasseranalyse und ein Modell zur Berechnung des Gebietsniederschlages.

Insgesamt bietet es folgende Möglichkeiten:

- Kontinuierliche Simulation der Wasserbilanz,
- Abbildung physikalischer Prozesse der Speicherung und Wasserbewegung (Schnee, Bodenfeuchte, Grundwasser, Oberirdische Gewässer),
- Simulation urbaner Abflüsse (Kanalnetzberechnung).

Die Teilprozesse werden nach der klassischen Vorstellung eingeteilt:

- Abflussbildung (simuliert unter Verwendung physikalischer Parameter der Flächennutzung und des Bodens bei Beschränkung auf verfügbare Daten),
- Abflusskonzentration (simuliert mit linearen Speichern und Isochronenverfahren),
- Abflussveränderung (Wellenverformung, simuliert mit nichtlinearen Speicherkaskaden).

Besonderer Vorteil des Modells ist die Möglichkeit, die Zeitschritte der Berechnung variabel zu gestalten, z.B. auch in 10-Minuten-Schritten.

Bei dem als Regen fallendem Niederschlag wird zwischen dem in der Vegetationsdecke des Bodens gespeicherten, dem verdunstenden und dem den Boden erreichenden Wasser unterschieden. Im Rahmen der Abflussbildung wird die Wasserabgabe aus Schnee mit Hilfe des Snow-Compaction-Verfahrens (Knauf (1974)) beschrieben. Dieses wird soweit vereinfacht, dass zur Ermittlung der Schmelzrate nur die Temperatur und die Globalstrahlung bekannt sein müssen. Die Interzeption durch die Vegetationsdecke wird mit Hilfe eines einzelnen Speichers auf Basis eines Schwellenwertprinzips modelliert. Die Größe des Speichers ist abhängig vom Bewuchs, der Vegetationsdichte, Jahreszeit und Alter des Bestands. Der verbleibende Anteil des Niederschlages und die Wasserabgabe aus Schnee werden in rasch transportierten (Oberflächenabfluss), kurzfristig (Interflow) und langfristig gespeicherten (Infiltration, Perkolation) Niederschlag durch Lösung physikalisch begründeter Differentialgleichungen in Abhängigkeit der Bodenart, der aktuellen Bodenfeuchte und der Vegetation aufgeteilt. Elementarflächen und Bodenschichten können bei Bedarf berücksichtigt werden. Die Interaktion zwischen Grundwasser, Boden und oberirdischem Gewässer kann genauso betrachtet werden wie die Überflutung von Aueflächen, die Versickerung, der Grundwasseraustausch und der Kapillaraufstieg.

Die Abflusskonzentration wird für die drei Arten Grundwasserabfluss, Interflow und Oberflächenabfluss unterschiedlich modelliert. Während die beiden erstgenannten mit Hilfe linearer Speicher nachgebildet werden, kommt bei den Abflussprozessen an der Oberfläche ein vereinfachtes Isochronenverfahren zur Anwendung. Die Ermittlung der Isochronen (Linien gleicher Fliesszeit) erfolgt unter Verwendung des Ansatzes von Manning-Strickler. Zur Vereinfachung wird das betrachtete Einzugsgebiet stark abstrahiert. Die in diesem Gebiet zu bestimmenden Parameter sind die Form, die mittlere Hangneigung und die Oberflächenbeschaffenheit, sowie die Lage und die Gefälleverhältnisse des Hauptvorfluters.

Die Berechnung der Wellenverformung erfolgt anhand des Ansatzes von Kalinin-Miljukov (siehe z.B. Plate et al. 1977). Als Einzugsgebietskenngröße muss zur Bestimmung der Parameter des Verfahrens nur das Sohlgefälle des Gerinnes bekannt sein. Weiterhin werden Abfluss- und Wasserstandsmessungen zur Kalibrierung des Modells benötigt.

Während die Autoren davon ausgehen, dass für die Anwendung des Modells 9 Modellparameter kalibriert und 7 Parameter aus Messdaten abgeleitet werden müssen, geben die Anwender sehr unterschiedliche Zahlen an: 3 bis mindestens 10 zu kalibrierende Modellparameter

und 10 bis 22 ableitbare Parameter. Dies zeigt deutlich, wie wenig eindeutig der Begriff Parameter ist und welche Probleme sich hinter der Verwendung von Grössen verbergen, die zwar aus Messdaten abgeleitet werden können, der Skaleneffekte oder räumlichen und zeitlichen Mittelungen wegen dann aber nur noch Indizes (sogenannte effektive Parameter) darstellen. Diese haben dann im tatsächlich ablaufenden physikalischen Prozess keine Gültigkeit mehr; sie können ihn allenfalls vielleicht repräsentieren.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Das Modell NASIM wird durch die Firma HYDROTEC in Aachen kommerziell vertrieben. Es wird bei den Wasserwirtschafts- oder Umweltverwaltungen in Nordrhein-Westfalen und in Sachsen eingesetzt. Die Landesumweltverwaltung Nordrhein-Westfalen empfiehlt es für Abflussberechnungen und hat es zertifiziert. Darüber hinaus wird es bei drei Ingenieurbüros, einem Hochschulinstitut und vier Wasserverbänden, die geantwortet haben, praxisbezogen eingesetzt (Anlage 3). Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Verbreitung noch grösser ist.

Jährlichkeit des Ereignisses

Mit dem Modell werden seltene wie auch extreme Hochwasser bis zum HQ_{max} ermittelt. Extreme Abflüsse werden im Hinblick auf die Anlagensicherheit von Talsperren und Rückhaltebecken sowie das Restrisiko bei technischen Anlagen abgeschätzt.

Einzugsgebietsfläche

Nach Angaben der Autoren und der befragten Anwender kann NASIM für Einzugsgebiete mit mehreren tausend Quadratkilometern angewendet werden.

Naturräumliche Zuordnung

In Sachsen wurde das Modell an Einzugsgebiete im Mittelgebirge und Flachland angepasst. Für eine Übertragung auf andere Einzugsgebiete, die prinzipiell möglich ist, ist eine Kalibrierung des Modells notwendig.

Erfahrungen

Wegen der Festlegung der Anfangsbedingungen und der Parameterkalibrierung wird dem hydrologischen Expertenwissen ein hohes Gewicht im Hinblick auf die Güte Resultate beigemessen. Die Datenverfügbarkeit wird als gut bis sehr gut angesehen.

Die Kalibrierung des Modells erfolgt nach dem Trial and Error Prinzip nach sehr unterschiedlichen Gütekriterien. Ein Optimierungsalgorithmus wird nicht angewendet.

Notwendige Inputdaten

Als Eingabedaten werden benötigt:

- Einzugsgebiets- und Teileinzugsgebietsgrenzen (z.B. aus Topografischer Karte digitalisiert),
- Gefälle (aus DHM),
- Bodenformen (z.B. aus Übersichtskarte des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie),
- Starkniederschlagshöhen (aus KOSTRA-Atlas mit Sicherheitszuschlag oder Maximierte Gebietsniederschläge, beides vom DWD), der Niederschlag wird als mittenbetont angenommen (DVWK-Regel 1984),
- Zuordnungstabelle mit hydrologischen Kennwerten für Elementarflächen (Teileinzugsgebiete oder Hydrotope),
- Landnutzung (digitalisiert aus Topografischer Karte).

Aufwand (zeitlich)

Der Gesamtzeitaufwand für die Datenbereitstellung, Kalibrierung und Durchführung der Hochwasserabschätzung beträgt für Einzugsgebiete ($< 100 \text{ km}^2$) nach Angaben eines Anwenders nur ca. 6 Tage. Dagegen wird von den Autoren und anderen Anwendern der zeitliche Aufwand für

die Datenbereitstellung bei einem ca. 500 km² grossen Gebiet mit 25 bis 220 Tagen und für die Kalibrierung und Berechnung mit 0,25 bis 70 Tagen angegeben. Diese enormen Spannweiten zeigen, dass individuelle Aufgabenstellungen, Datenverfügbarkeiten, Kalibrierungsschwierigkeiten und verfügbares Personal und Expertenwissen den zeitlichen Aufwand stärker beeinflussen als die eigentlichen Modellstrukturen und Datenbedürfnisse.

Aufwand (finanziell)

Keine Angaben.

Güte der Resultate

Angaben über die Güte der Modellergebnisse liegen nicht vor.

Es sei angemerkt, dass die Anwendung des Modells zur Berechnung von extremen Abflüssen mit Überschreitungswahrscheinlichkeiten kleiner $2 \cdot 10^{-2}$ pro Jahr problematisch ist, weil das Modell dafür nicht kalibriert werden kann.

Literatur

DVWK (Hrsg.) (1984): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. DVWK-Regeln, 113, Hamburg und Berlin.

Hydrotec (1993): Modellbaustein zur Simulation von Bodenfeuchteprozessen (unveröffentlicht)

Knauf, D. (1975): Die Abflussbildung in schneebedeckten Einzugsgebieten des Mittelgebirges. Technischer Bericht aus dem Institut für Wasserbau der TH Darmstadt, Heft 17.

Ostrowski, M.W. (1982): Ein Beitrag zur kontinuierlichen Simulation der Wasserbilanz. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Band 42, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

Ostrowski, M.W. (1988): Das Simulationskonzept des LWA, in LWA-Materialien 4/88, Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf

Plate, E.J., Schultz, G.A., Seus, G.J. & Wittenberg, H. (1977): Ablauf von Hochwasserwellen in Gerinnen. Schriftenreihe des Kuratoriums für Wasser und Kulturbauwesen, Heft 27, Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin.

Wolf-Schumann, U.; Rothe, B. (1996): NASIM 2.5 – Niederschlag-Abfluss-Simulation und Wasserbilanzmodellierung, ESRI Arc Aktuell Kundeninfo, Heft 3.

4.8.3 LARSIM / FGMOD

Beschreibung des Modells

Auf der Basis des älteren, aber noch immer in der Anwendung stehenden Modells FGMOD (Ludwig, 1979) entwickelte Bremicker (2000) das flächendetaillierte (rasterbezogene) hydrologische Niederschlag-Abfluss-Modell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model). Das Modell LARSIM enthält deterministische Modellansätze auf der Basis physikalischer Modellkonzepte. Sein Modellschema zeigt Abbildung 4.10.

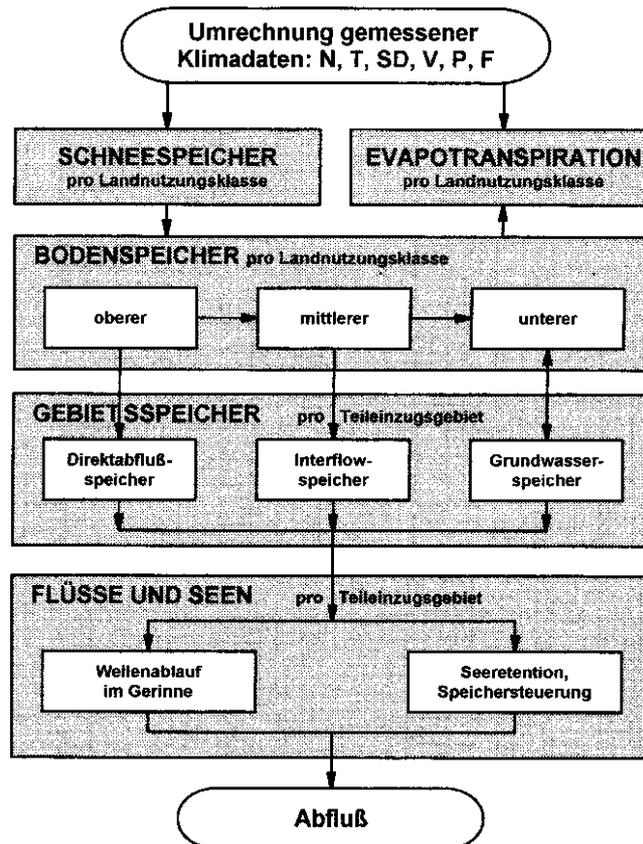


Abb. 4.10 Modellschema des Programms LARSIM (aus Bremicker et al. 1997).

Zur Berechnung der hydrologischen Teilprozesse sind folgende Ansätze in LARSIM implementiert:

Die Akkumulation und Ablation von Schnee wird über das vereinfachte Verfahren zur Modellierung des Wärmehaushaltes nach Knauf sowie das Snow-Compactions Verfahren nach Bertle bestimmt (Bremicker et al. 1997).

Die vertikalen Transporte zur Berechnung des Bodenwasserhaushaltes werden nach dem Xinanjiang-Verfahren ermittelt. Je nach Füllung des Bodenwasserspeichers und der Niederschlagsintensität tritt Zufluss in die Speicher für Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss in unterschiedlichen Relationen auf.

Die Verdunstung wird über den Ansatz von Penman-Monteith nach de MORECS-Schema berechnet.

Die Abflusskonzentration (laterale Transporte in die Gewässer) wird über drei parallele lineare Einzelspeicher für den Oberflächenabfluss, den Zwischenabfluss und den Grundwasserabfluss beschrieben.

Die Laufzeiten sowie die Retention in den Gewässern wird über hydrologische Verfahren der Wellenverformung im Gerinne berechnet.

Zur Berücksichtigung der subskaligen Prozesse werden für jedes Flächenelement die Evapotranspiration sowie der Bodenwasserhaushalt getrennt für verschiedene Landnutzungen und Feldkapazitäten der Böden berechnet. Die Modellparameter sind z.T. mit Gebietscharakteristika verknüpft, um so den möglichen Wertebereich der Parameter einzuschränken oder um eine Übertragung auf Einzugsgebiete ohne Abflussbeobachtungen zu ermöglichen.

Darüber hinaus besteht im Modellsystem die Möglichkeit, Informationen über die Steuerung von Speichern mit zu berücksichtigen. Zudem lassen sich Überleitungen zwischen Flüssen im Modell erfassen.

Als meteorologische Eingangsdaten werden

- der Niederschlag,
 - die Lufttemperatur,
 - die Luftfeuchte,
 - die Sonnenscheindauer,
 - der Luftdruck,
 - und die Windgeschwindigkeit,
- benötigt.

Beim Antrieb des Modells über gemessene Klimadaten erfolgt eine Höhenkorrektur und Umrechnung der Lufttemperatur und des Luftdrucks von den Messstationen auf jede Rasterfläche. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Niederschlagshöhen nach Ansätzen von SEVRUK und dem Deutschen Wetterdienst zu korrigieren (Bremicker et al. 1997).

Das Modell LARSIM ist für unterschiedliche räumliche und zeitliche Auflösungen einsetzbar. Bei guter Datenlage kann LARSIM auch für Planungszwecke und ggf. für operationelle Abfluss-Vorhersagen genutzt werden.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Das Modell LARSIM wird in den Bundesländern Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Bayern angewendet und vom Ingenieurbüro Dr. Ludwig / Karlsruhe weiterentwickelt und vertrieben. Es dient sowohl der Abschätzungen der Bemessungshochwassern als auch der Simulation des Wasserhaushaltes. In Bayern werden mit diesem Modell Überschwemmungszonen abgeschätzt und Hochwasservorhersagen getroffen.

Jährlichkeit des Ereignisses

In der Regel liegen die Jährlichkeiten, für die mit LARSIM Hochwasser abgeschätzt werden unter 200 Jahren. Für Risikoabschätzungen und zum Nachweis der Anlagensicherheit von Talsperren und Rückhaltebecken sowie anderen technischen Einrichtungen werden auch Hochrechnungen für Wiederholungszeitspannen von 1'000 Jahren und mehr durchgeführt.

Einzugsgebietsfläche

Die Grösse der untersuchten Einzugsgebiete liegt zwischen 10 und 100'000 km². Es wurde aber auch für die Berechnung der Abflüsse (und anderer Wasserhaushaltskomponenten) in sehr grossen Einzugsgebieten (> 100'000 km²) angepasst.

Naturräumliche Zuordnung

Eine naturräumliche oder regionale Beschränkung für den Einsatz des Modells existiert nicht. Das Modell muss wie alle Niederschlag-Abfluss-Modelle für jedes Flusseinzugsgebiet kalibriert werden.

Erfahrungen

Für die Anwendung des Modells wird nach den Erfahrungsberichten von Bayern und Rheinland-Pfalz ein mittleres bis hohes Mass an hydrologischem Expertenwissen benötigt. Die Verfügbarkeit von notwendigen Daten richtet sich stark nach dem Einzugsgebiet und den gewählten Verfahren zur Nachbildung der hydrologischen Teilprozesse. Zudem wird angegeben, dass sich eine Abschätzung des mittleren Flussprofils wie auch der Rauhigkeit aufgrund der mangelnden Datengrundlage problematisch darstellt.

Kalibriert wird das Modell zum einen nach dem Trial and Error Prinzip mit den Gütekriterien: Abflussscheitel, Abflusssumme, Gleichzeitigkeit des Eintretens der Scheitelabflüsse. Zum anderen werden auch Suchalgorithmen, wie das Marquardt-Verfahren eingesetzt, und als Zielfunktion die Fehlerquadratsumme und die hydrologische Deviation verwendet.

Notwendige Inputdaten

Als zeitinvariante räumlich bezogene Eingabedaten werden Informationen über die Teileinzugsgebietsgrößen, -schwerpunkte, Lauflängen der Gewässer und die Gefälleverhältnisse benötigt. Erhoben werden diese Daten durch Auswertung von topographischen Karten, digitalen Höhenmodellen oder eigene Begehungen. Hinzu kommt der Bedarf an Daten über die geologischen und naturräumlichen Gegebenheiten sowie Landnutzungsinformationen (z.B. Siedlungsanteil u.a.). Für den Gerinnabfluss werden zudem Quer- und Längsprofile benötigt.

Als meteorologische Eingangsdaten sind folgende Größen erforderlich:

- Niederschlagszeitreihen,
- Temperatur,
- Windgeschwindigkeit,
- Schneehöhe,
- Schneedichte,
- Ggf. Niederschlagsvorhersagen.

Alle oben genannten Daten liefert der Deutsche Wetterdienst. Die Modellbelastung erfolgt sowohl mit statistischen Niederschlägen als auch mit beobachteten Zeitreihen. Für statistische Niederschläge stehen wiederum Werte des KOSTRA-Atlas zur Verfügung. Darüber hinaus werden in Bayern und Rheinland-Pfalz eigene statistische Auswertungen von Niederschlagsserien verwendet. Als zeitlicher Intensitätsverlauf dieser Niederschläge werden alle Varianten von linear, anfangsbetont, mittenbetont bis hin zu endbetont angenommen.

Die Wasserabgabe aus der Schneedecke wird über statistische Analysen des Wasseräquivalents oder die Modellierung der Schneeakkumulation und -ablation (z.B. Tag-Grad-Verfahren) berücksichtigt.

Zusätzlich werden für die Kalibrierung nicht messbarer Modellparameter beobachtete Hochwasserabflüsse, die die jeweiligen Landesämter bereithalten, benötigt.

Aufwand (zeitlich)

Der Zeitaufwand für die Bereitstellung, Aufbereitung und Prüfung der Eingabedaten schwankt stark und ist erheblich vom Einzugsgebiet und dessen Grösse abhängig. Angegeben wird ein Zeitraum von 8 bis zu 200 Tagen. Für die Durchführung der Abschätzung des gewünschten Hochwasserabflusses ist zusätzlich, ebenfalls je nach Einzugsgebietscharakteristik, mit 20 bis 100 Tagen Zeitaufwand zu rechnen.

Aufwand (finanziell)

Neben der Datenbeschaffung sind keine weiteren Kosten zu erwarten. Die Verfügbarkeit des Modellsystems LARSIM ist ungeklärt. Diesbezüglich wird auf das Ingenieurbüro Dr. Ludwig / Karlsruhe verwiesen.

Güte der Resultate

Keine Angaben.

Es sei angemerkt, dass die Anwendung des Modells zur Berechnung von extremen Abflüssen mit Überschreitungswahrscheinlichkeiten kleiner 10^{-2} pro Jahr problematisch ist, weil das Modell dafür nicht kalibriert werden kann.

Literatur

Bremicker, M., Ludwig, K., Richter K.-G. (1996): Wasserhaushaltsmodelle für das Weser- und Ostsee-Einzugsgebiet. In: Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaftlicher Wasserbau der Universität Hannover, Heft 83:87-104.

Bremicker, M., Ludwig, K., Richter K.-G. (1997): Effiziente Erstellung mesoskaliger Wasserhaushaltsmodelle. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 41, Heft 5:209-215.

Bremicker, M., Ludwig, K., Richter K.-G. (1998): Effiziente Erstellung mesoskaliger Wasserhaushaltsmodelle. In: PIK-Report: Modellierung des Wasser- und Stofftransportes in grossen Einzugsgebieten. No. 43:23-32.

Bremicker, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele, Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i.Br.

Ludwig, K. (1979): Das Programmsystem FGMOD zur Berechnung von Hochwasser-Abflussvorgängen in Flussgebieten. In: Wasserwirtschaft 69, Heft 7+8:226-228.

4.8.4 HYBNAT

Beschreibung des Modells

Das Ingenieurbüro Brandt Gerdes Sitzmann, Darmstadt setzt das Modell HYBNAT zur hydrologischen Berechnung des Niederschlag-Abfluss-Transportprozesses ein. Es handelt sich um eine Konzeptmodell, bei dem die räumliche Gliederung nach Teileinzugsgebieten erfolgt, die Zeitschrittweite liegt zweckmässigerweise im Bereich von wenigen Minuten bis zu einer Stunde. Es werden folgende Teilprozesse simuliert:

- Abflussbildung, differenziert nach versiegelten Flächen (Abflussbeiwert 1,0) und durchlässigen Flächen (Abflussbeiwert als Funktion der Niederschlagshöhe und des CN-Wertes nach dem SCS-Verfahren, Modifikationen nach Euler und Zaiss sind möglich). Die Abflussaufteilung erfolgt in Direktabfluss, Zwischenabfluss und Basisabfluss.
- Abflusskonzentration in der Teilfläche, differenziert nach kanalisierten Flächen (Übertragungsfunktion doppelte Speicherkaskade) und „natürlich“ entwässernden Flächen (Übertragungsfunktion: dreifache Speicherkaskade mit unterschiedlichen Kaskadenparametern und Aufteilungsverhältnissen, Abhängigkeiten von L, J, tc).
- Abflusstransport im Gerinne als reine Translation oder mit Retentionsberechnung (Ansatz: Retentionsspeicher (Einzelspeicher oder Speicherkaskade), Stationäre Spiegellinienberechnung einschl. Versickerung in den Vorländern (bei vorzugebenden kf-Werten).
- Wellenaufteilung an Verzweigungen (nach unterschiedlichen Vorgaben).
- Speicherung in Rückhalteräumen (Abgabe konstant oder füllungsabhängig).

Prinzipiell wird von einer gleichmässigen Überregnung ausgegangen. Allerdings kann ein Abminderungsfaktor bestimmt werden, über den indirekt eine ungleichmässige Überregnung, die zu kleineren Hochwasserscheiteln führt, berücksichtigt werden kann.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Das Modell wird vom Ingenieurbüro Brandt, Gerdes, Sitzmann / Darmstadt weiterentwickelt und eingesetzt. Es wird nicht weitergegeben.

Jährlichkeit der Ereignisse

Das Modell wird sowohl für seltene Hochwasserscheitelabflüsse als auch für extreme Abflüsse zur Prüfung der Anlagensicherheit bei Talsperren und Rückhaltebecken eingesetzt.

Einzugsgebietsfläche

Das Modell kann für Einzugsgebiete bis zu mehreren 1'000 km² eingesetzt werden.

Naturräumliche Zuordnung

Nach Angaben der Autoren beschränkt sich die Anwendung auf Mittelgebirge und Flachland.

Erfahrungen

Das Modell wird nur bei einem Ingenieurbüro eingesetzt, das selbst über das erforderliche Expertenwissen (sowohl aus der Modellentwicklung heraus als auch durch sehr viele Anwendungen) verfügt. Das Gewicht dieses Expertenwissens wird als hoch eingeschätzt.

Das Modell muss kalibriert werden (manuell, ohne besondere Algorithmen und Zielfunktionen). Es wird auf Übereinstimmung von Abflussscheitel, Abflusssumme und die Gleichzeitigkeit des Scheiteleintritts geachtet. Es genügt, zwei Modellparameter festzulegen. Weitere Modellparameter werden aus Gebietskenngrössen festgelegt, wobei der Erfahrungsschatz der Anwender nicht unbedeutend sein dürfte.

Notwendige Inputdaten

Die Niederschlagsdaten stammen aus dem KOSTRA-Atlas oder von DWD-Stationen. Das Modell enthält keine Simulation des Schneedeckenauf- und -abbaus. Abflussganglinien, Scheitelabflüsse und Wasserspiegellagen müssen für die Kalibrierung bekannt sein. Weiterhin werden topographische Gebietskenngrößen (Gefälle, Fließlänge, Versiegelungsgrad) sowie Bodenarten und Landnutzungen (Anteile Wald, Acker, Wiese, versiegelte Fläche) benötigt, ausserdem Geschwindigkeitsbeiwerte und Querprofile.

Bei der Datenverfügbarkeit bestehen keine Probleme, wobei es allerdings Probleme bei den benötigten Gewässerprofilen geben kann.

Aufwand (zeitlich)

Für ein etwa 500 km² grosses Einzugsgebiet wird der Aufwand für die Datenbeschaffung mit 30 bis 300 Tagen, für die eigentlichen Berechnungen mit 10 bis 200 Tagen angegeben, je nach Aufgabenstellung.

Aufwand (finanziell)

Die Nutzung des Modells erfolgt allein durch das Ingenieurbüro, so dass neben den Kosten für die Datenbeschaffung keine weiteren Kosten für die Modellnutzung auftreten. Bedingungen für Nutzungsrechte sind nicht bekannt.

Güte der Resultate

Keine Angaben. Bei den Analyserechnungen (Kalibrierung) erfolgen beispielsweise Vergleiche mit Pegelaufzeichnungen und Geschwemmsellinien, Ortskundige werden befragt.

Es sei angemerkt, dass die Anwendung des Modells zur Berechnung von extremen Abflüssen mit Überschreitungswahrscheinlichkeiten kleiner 10^{-2} pro Jahr problematisch ist, weil das Modell dafür nicht kalibriert werden kann.

Literatur

Brandt, Thiele (1994): Wellenablaufberechnung bei Niederschlag-Abfluss-Modellen, 18. DVWK-Fortbildungslehrgang Hydrologie, Karlsruhe.

Brandt, Thiele (1995): Hochwasserschutzkonzepte in Deutschland, Kasseler Wasserwirtschaftliches Symposium 1994, Kasseler Wasserbau Mitteilungen, Heft 2.

Brandt, Thiele (1998): Modellierung des Hochwasserabflusses und Auswirkungen zentraler und dezentraler Rückhaltungen, Seminar Hochwasserschutz FH Wiesbaden, Akademie für Bauen und Umwelt e.V. und Hessisches Landesamt für Bodenforschung.

Lang, J. (2001): Auswirkungen der neuen DIN 19700 auf die Bemessung von Hochwasserrückhalteräumen, Wasserwirtschaft, Heft 7/8.

4.8.5 ARC/EGMO

Beschreibung des Modells

ARC/EGMO ist ein hydrologisches Modellierungssystem, das vom Büro für Angewandte Hydrologie (BAH) und dem Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V. (PIK) entwickelt wurde. Es ermöglicht eine flächendetaillierte und GIS-basierte Modellierung der massgeblichen hydrologischen Prozesse in einem Flussgebiet.

Die Ermittlung von Bemessungshochwasserwerten (Scheitel, Füllen) kann als Einzelereignissimulation unter Nutzung wahrscheinlichkeitsbehafteter Niederschläge (Starkniederschlagsgutachten des DWD, KOSTRA-Atlas) erfolgen. Ebenso sind Langzeitsimulationen mit anschliessender extremwertstatistischer Auswertung z.B. der Jahres-HQ möglich.

Bei der Strukturierung des Modells wurde konsequent zwischen Vertikalprozessen und lateralen Flüssen unterschieden (vgl. Abb. 4.11). Der modulare Aufbau erlaubt die Nutzung unterschiedlich detaillierter und strukturierter Teilprozessmodelle für unterschiedliche Aufgaben (Zielgrössen/Massstabsbereich).

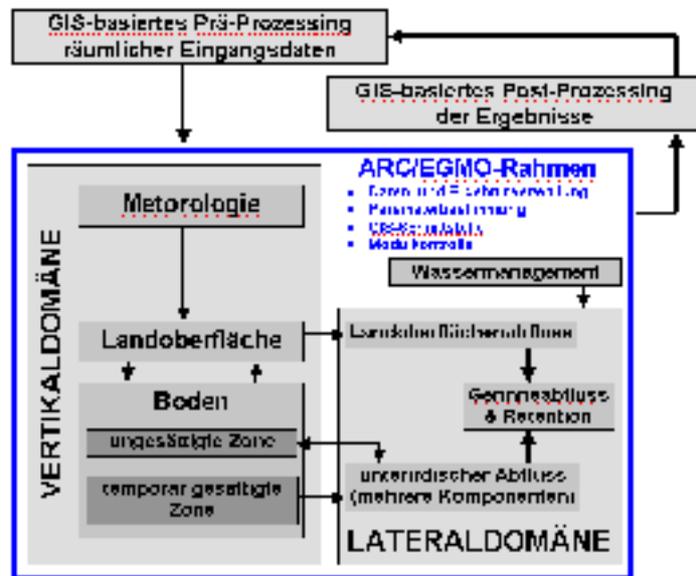


Abb. 4.11 Schematische Darstellung des Mehr-Ebenen-Konzepts in ARC/EGMO.

Bei den zur Beschreibung der Vertikalprozesse (Verdunstung, Abflussbildung) einsetzbaren Modulen handelt es sich um physikalisch begründete, konzeptionelle Modellansätze, mit deren Hilfe aus vorgegebenen Systeminputs (meteorologische Grössen) und vorgegebenen Systemeigenschaften (z.B. Boden- und Vegetationskennwerte) bzw. Systemzuständen (wie Speicherfüllungen) die innerhalb eines Flussgebietes bestimmenden Zustandsveränderungen und die resultierenden Systemausgänge wie Abflussbildung und Verdunstung ermittelt werden können.

In der Lateraldomäne werden verschiedene, hinsichtlich ihrer zeitlichen Dynamik unterirdische Abflusskomponenten und hinsichtlich ihrer Genese unterschiedliche oberirdische Abflusskomponenten (Abfluss von versiegelten Flächen, Hortonabfluss, Sättigungsflächenabfluss) zum Gewässersystem transformiert. Im Gewässer werden die Translations- und Retentionsprozesse beschrieben. Bebaute Flächen werden über ihren Versiegelungsgrad berücksichtigt und mit systemhydrologischen Ansätzen abgebildet.

Eine Übersicht über die verwendeten Ansätze gibt die nachfolgende Aufstellung.

Hydrometeorologie

- Potenzielle Verdunstung: Ansätze von Haude, Turc/Ivanov oder Penman
- Niederschlagskorrektur: Über stations- und witterungsabhängige Korrekturwerte (Schnee/Regen)
- Flächenübertragung der meteorologischen Eingangsgrößen: Für jeden Zeitschritt nach einem "erweiterten Quadrantenverfahren"
- Schneemodell: Tag-Grad-Verfahren

Abflussbildung/Wasserhaushalt

- Reale Evapotranspiration: feuchteabhängige Reduktion (erweiterter Priestley-Taylor-Ansatz)
- Interzeption: vegetationsabhängiger linearer Speicheransatz
- Infiltration: nach Horton
- Muldenspeicherung: Speicheransatz
- Sättigungsflächenbildung: feuchteabhängige Variation von gesättigten Flächenanteilen
- Bodensickerwasserbildung: Mehrspeicheransätze (Kapazitäten abhängig von den Boden- und Vegetationsparametern)

Abflusskonzentration

- auf der Landoberfläche: Je nach Datenverfügbarkeit kinematische Welle oder Speicher- und Translationsansätze
- unterirdisch: Einzellinearspeicher in Reihen- und Parallelschaltung
- im Gewässernetz: Einheitsganglinienverfahren, Speicheransätze oder Ansatz nach Kalinin-Miljukov. Zur Schätzung der Retentionsparameter K_{τ} in Abhängigkeit vom Durchfluss kann das Wasserspiegellagenprogramm WSPR (Knauf 2001) eingesetzt werden

Die räumliche Untergliederung des Untersuchungsgebietes ist für die einzelnen Modellierungsebenen unterschiedlich. Das Grundprinzip der Modellierung der vertikal gerichteten Abflussbildungsprozesse ist die Ausweisung von hydrologisch quasihomogenen Flächen auf der Basis der verfügbaren räumlichen Datenbasis. Diese sogenannten Elementarflächen können für mesoskalige Modellanwendungen zu Hydrotopen innerhalb von Teileinzugsgebieten zusammengefasst werden. Die Flächenvariabilität der hydrologischen Parameter innerhalb einer Hydrotopklasse wird über Verteilungsfunktionen beschrieben. Die Klassifizierung erfolgt entsprechend der Dominanz der hydrologisch relevanten Prozesse unter der Annahme, dass diese anhand der Flächeneigenschaften wie Morphologie, Bodentyp, Grundwasserflurabstand, Vegetation und Landnutzung definiert werden kann.

Die Beschreibung der flächenbezogenen lateralen Abflusskonzentrationsprozesse erfolgt auf der Basis von Regionen und Teileinzugsgebieten, die (für kleine Einzugsgebiete) wiederum durch Hangsegmente beschrieben werden können. Diese sind mit dem Gewässernetz verknüpft.

Die Modellierung der Abflusskonzentration im Gewässernetz erfolgt unter Nutzung gerichteter Vektoren als Verbindung zwischen Systemknoten (Gewässerpunkte). Die gewünschte Auflösung für die Abflussberechnungen im Gewässersystem wird GIS-basiert durch Vorgabe dieser Systemknoten festgelegt.

Als Gewässerknoten fungieren

- Pegel,
- Zusammenflüsse,
- interessierende Profile,
- Einleitungs- bzw. Entnahmepunkte oder
- Speicherbauwerke.

Einleitungen und Entnahmen können als Zeitreihe vorgegeben oder über Zeitfunktionen definiert werden. Speicherbauwerke können mit konstantem Regelabfluss oder in Abhängigkeit von der aktuellen Speicherfüllung/Wasserstand betrieben werden. Die Zeitschrittweite des Modells kann problemorientiert zwischen 5 Minuten bis 1 Tag festgelegt werden.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Das Modell wird nur vom Büro für Angewandte Hydrologie (BAH) / Berlin angewandt.
Es kann aber weitergegeben werden.

Jährlichkeit der Ereignisse

Aussagen können getroffen werden für Jährlichkeiten zwischen 10 und 100 Jahren. Beim Einsatz für stadthydrologische Prozesse werden auch häufigere Ereignisse ermittelt.

Einzugsgebietsfläche

Abhängig von der zur Verfügung stehenden Datenbasis lässt sich das Modell in Gebieten zwischen ca. 1 und 5'000 km² Grösse einsetzen (Mikro- bis Mesoskala). In Abhängigkeit von Datenbasis und Massstabsbereich können unterschiedliche räumliche und zeitliche Diskretisierungen verwendet werden.

Naturräumliche Zuordnung

Vorrangiges Einsatzgebiet des Modells ist das Tiefland und der Mittelgebirgsbereich. Für das Hochgebirge sind bisher keine Anwendererfahrungen vorhanden.

Erfahrungen

Für die Ermittlung von Bemessungshochwassern hat sich eine Kombination von Einzelereignis- und Langzeitsimulation als günstig erwiesen, wobei die Langzeitsimulation neben den Jahres-HQ als Basis für eine Extremwertstatistik auch „wahrscheinliche“ Startwerte für die Einzelereignisbetrachtung liefern kann. Da insbesondere für die Beschreibung der unterirdischen Abflusskonzentrationsprozesse einfache, konzeptionelle Ansätze verwendet werden, müssen deren Parameter im Gegensatz zu denen der Vertikaldomäne kalibriert werden. Das erfordert ein gewisses Mass an Expertenwissen, insbesondere dann, wenn im Zuge von Langzeitsimulationen der gesamte Wasserkreislauf abgebildet werden soll.

ARC/EGMO wurde bisher projektbezogen zur Ermittlung von Bemessungshochwassern für Einzugsgebiete in Brandenburg, Sachsen und Sachsen-Anhalt angewendet. Neben den hier gefragten Modellanwendungen zur Hochwasserabschätzung erfolgten im PIK im Rahmen der Impaktforschung von Landnutzungs- und Klimaänderungen Wasserhaushaltssimulationen für meso- bis makroskalige Teileinzugsgebiete der Elbe.

Notwendige Inputdaten

Die Datenverfügbarkeit für die Anwendung von ARC/EGMO kann als gut eingeschätzt werden. Das Modell ist so konzipiert, dass mit allgemein verfügbaren digitalen Karten gearbeitet werden kann und die erforderlichen Modellparameter direkt aus diesen Karten abgeleitet werden. Benötigt werden:

- Teilgebietsgliederung (z.B. gemäss LAWA),
- Landnutzung inklusive Versiegelungsgrad bebauter Flächen, Wurzeltiefe^(*) bei vegetationsbestandenen Flächen,
- Bodendaten für die wechselfeuchte Bodenzone wie nFK- und Kf-Wert,
- Grundwasserflurabstände^(*) für Modellanwendungen im Tiefland
- Topographie (Gefälle, Höhe, Exposition)
- Gewässernetz mit Höhenlage der Systemknoten, sofern vorhanden Profilvermessungen.

Die ^(*) gekennzeichneten Informationen sind nur erforderlich, wenn Langzeitsimulationen durchgeführt werden und damit der gesamte Wasserkreislauf abgebildet werden soll.

An meteorologischen Eingangsdaten sind erforderlich:

- synthetische Niederschlagsreihen für Bemessungsereignisse und/oder
- ausreichend lange Zeitreihen des Niederschlages, der potentiellen Verdunstung und der Lufttemperatur in einer der Gebietsdynamik adäquaten zeitlichen Auflösung für Langzeitsimulationen mit anschliessender extremwertstatistischer Auswertung.

Die Abbildung der räumlichen Differenzierung des Niederschlaggeschehens ist über eine ausreichend grosse Anzahl von (Stations)reihen zu gewährleisten. Für Langzeitsimulationen ist eine Kalibrierung insbesondere der Abflusskonzentrationsparameter (Einzellinearspeicherkonstanten für das Grundwassermodul, Speicherkonstanten für den Gewässerabfluss, sofern keine Gewässervermessungen vorliegen) notwendig. Hierfür werden vorzugsweise beobachtete Abflussreihen an verschiedenen Abflussquerschnitten des Untersuchungsgebietes verwendet. Für verschiedene Regionen liegen hier Erfahrungen für die Parameterschätzung vor.

Aufwand (zeitlich)

Der zeitliche Aufwand für die Datenbereitstellung, -prüfung und -aufbereitung hängt stark von der Grösse des Untersuchungsgebietes, dem gewünschten Detaillierungsgrad des Modells, vom vorhandenen Aufbereitungsgrad der notwendigen Eingangsdaten und der gewählten Bearbeitungsmethodik (Einzelereignis- oder/und Langzeitsimulation) ab. Für die Ermittlung von Bemessungswerten für ein (kleines) Einzugsgebiet über eine Einzelereignisbetrachtung sind 6 bis 8 Stunden anzusetzen. Eine Langzeitsimulation erfordert wesentlich mehr Eingangsdaten, einen höheren Aufwand bei der Parameterermittlung, längere Simulationszeiten und eine umfangreichere Auswertung (Extremwertstatistik).

Aufwand (finanziell)

Ein wesentlicher Kostenfaktor bei Langzeitsimulationen sind die erforderlichen "langen" Klimareihen des DWD. Für wissenschaftlich (und nicht kommerziell) arbeitende Institutionen ist das Modellsystem (bis auf eine Bereitstellungspauschale) kostenlos verfügbar. Auf Grund stetiger Weiterentwicklungen ist ein enger Kontakt mit den Programmentwicklern (BAH und PIK) empfehlenswert. Behörden erhalten ein angepasstes Gebietsmodell als Ergebnis eines Projektes (zeitlicher Aufwand für die Erstellung des Gebietsmodells: siehe oben).

Güte der Resultate

Die Schwankungsbreite der Ergebnisse liegt nach Erfahrungen in Sachsen-Anhalt bei $\pm 30\%$.

Literatur

Becker, A., Klöcking, B., Lahmer, W. and Pfützner, B. (2001): The Hydrological Modelling System ARC/EGMO. In: Mathematical Models of Watershed Hydrology (Eds.: Singh, V.P., Frevert, D. and Meyer, S.). Water Resources Publications, Littleton/Colorado (in preparation).

Pfützner, B., Lahmer, W. & Becker, A. (1997): ARC/EGMO - Programmsystem zur GIS-gestützten hydrologischen Modellierung, überarbeitete Kurzdokumentation zur Version 2.0.

Pfützner, B., Lahmer, W., Becker, A., Klöcking, B. (1998): ARC/EGMO – GIS-gestützte hydrologische Modellierung, Programmdokumentation.

WSPR (2001): Anwenderbeschreibung WSPR - Wasserspiegellagenberechnung für gegliederte Flussprofile unter besonderer Berücksichtigung von Bewuchs- und Bauwerkseinflüssen; Programm-Service-Wasserwirtschaft Knauf.

Internet: www.arcegmo.de

4.8.6 ASGi

Beschreibung des Modells

Bei dem Softwareprodukt ASGi handelt es sich um ein Modell zur Simulation von Abfluss und Stofftransport unter Nutzung von Geoinformationssystemen. Es ist ein rasterorientiertes physikalisch basiertes Modell, das in Zusammenarbeit mit dem Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft entwickelt worden ist und dort auch eingesetzt wird. Es besteht aus zwei Komponenten:

1. der benutzerfreundlichen Umgebung für das Prä- und Postprocessing, d.h. für die Dateneingabe und -aufbereitung entsprechend den Erfordernissen einer rasterorientierten Modellierung und den wahlweise aktivierten Modellbausteinen (Teilprozesse) sowie der gewünschten Ergebnispräsentation und Archivierung,
2. dem Kernbaustein Wasserflussmodell, d.h. der Simulation von Wasser- und Stoffströmen in hydrologisch mesoskaligen Flussgebieten mit Hilfe einer physikalisch basierten mathematischen Abbildung der Teilprozesse für die Abflussbildung, die Abflusskonzentration und der Abflussveränderung im Gewässernetz.

Das nach modernen Gesichtspunkten der Informationsverarbeitung arbeitende Modellsystem ist in der Lage, Wasser- und Stoffströme räumlich hoch aufgelöst zu berechnen. Historische, derzeitige oder zukünftig zu erwartende Bedingungen werden durch die Eingabedaten vorgegeben.

Eine GIS-Umgebung unterstützt den Datenfluss, die Datenhaltung und Darstellung beliebiger Raumdaten im Modellsystem.

Das eigentliche Wasserflussmodell enthält mehrere auf die jeweilige Datenlage abgestimmte konzeptionelle und physikalisch basierte Modellbausteine. Es wurde an der ETH Zürich unter dem Namen WaSIM-ETH (**W**asserfluss-**S**imulations-**M**odell) (Schulla 1999) entwickelt und kann der Gruppe der *Distributed Models* zugeordnet werden, welche zeitlich und räumlich in hoher Auflösung arbeiten. Die räumliche Untergliederung wird durch ein regelmässiges Raster realisiert. Eine Hierarchie von alternativen Modellbausteinen ermöglicht eine flexible, der jeweiligen Datenlage und Fragestellung angepasste Auswahl und ergibt letztlich eine spezifische und der Situation entsprechende Modellkonfiguration.

Die für die Simulation der Wasserflüsse notwendigen Eingabedaten lassen sich in zwei Gruppen einteilen

- A) Flächendaten, in der räumlichen Gliederung von geometrischen Grids (Datengrid):
- Höhenmodell, digital
 - Landnutzungsinformationen, digital
 - Bodenarteninformationen, digital

Zu Kontrollzwecken sind das vektorisierte Gewässernetz, die Pegeleinzugsgebiete und die Pegelkoordinaten zu empfehlen.

- B) Zeitreihen, stations- und pegelbezogen:
- Niederschlag,
 - Temperatur,
 - Wenn es die aktuelle Datensituation zulässt, können auch Zeitreihen der
 - Globalstrahlung,
 - Sonnenscheindauer,
 - Luftfeuchte und Windgeschwindigkeitverarbeitet werden.

Zur Kalibrierung und Validierung sind gemessene Abflussdaten notwendig.

Die Bereitstellung der Raumdaten erfolgt im sogenannten Datengrid. Dies bedeutet, alle raumbezogenen Primärdaten werden in einer einheitlichen räumlichen Auflösung (Rasterzellengrösse) und Geometrie in das Modellsystem importiert. Die Simulation selbst erfolgt

im Modellgrid, das eine grössere Maschenweite als das Datengrid hat. Die Eingangsdaten im Datengrid sind deshalb auf die Maschen des Modellgrids zu aggregieren. Die Generierung derjenigen Parameter, die auf raumbezogene Eingabedaten basieren, erfolgt bereits im Datengrid. Auch sie sind anschliessend auf die Maschen des Modellgrids hochzurechnen.

Die meteorologischen Zeitreihendaten müssen für jede Rasterzelle des Modellgrids bereitgestellt werden. Dies kann mit Hilfe verschiedener Interpolationsmethoden realisiert werden.

Neben den Eingabedaten werden zahlreiche Parameter benötigt, zum einen, um aus den Eingangsdaten Modellparameter zu generieren, die in die Simulation eingehen, zum anderen, um die Abbildung der einzelnen hydrologischen Teilprozesse zu steuern. Prinzipiell werden die Parametergruppen Globale Parameter, Interpolationsparameter, Parameter der Teilmodelle und Parameter der Zuordnungstabellen unterschieden.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Das Programmsystem wird beim Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft eingesetzt, wobei zunächst eine Beschränkung auf Wasserhaushaltssimulationen erfolgt. Prinzipiell lassen sich damit auch Hochwasserganglinien erzeugen, weil die Zeitschrittweite der Simulation beliebig, d.h. auch Stunden sein kann. Für diese Hochwasserschätzungen liegen aber noch keine Erfahrungen vor.

Literatur

Schulla, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flusseinzugsgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen, Zürcher Geographische Schriften, Heft 69, Geographisches Institut der ETH Zürich.

4.9 Beurteilung und Vergleich der Verfahren

4.9.1 Allgemeines

Die in diesem Bericht erfassten Methoden und Verfahren werden einerseits von Anwendern eingesetzt, die selbst keine Methoden- oder Modellentwicklung betreiben (Wasserwirtschaftsverwaltungen und Wasserverbände) und andererseits von den Entwicklern für die Bearbeitung praktischer Projekte genutzt und meistens von Ingenieurbüros weiterentwickelt. Immer werden aus dem verfügbaren Angebot diejenigen Verfahren ausgewählt, die

- wenig Zeit- und Personalaufwand erfordern,
- noch vertretbare Anforderungen hinsichtlich der Datenbereitstellung stellen,
- zu einem vermeintlich brauchbaren Ergebnis führen.

Die Anwendung beschränkt sich deshalb auf Methoden, bei denen eine Unterstützung durch Softwareprodukte nicht erforderlich ist oder auf Methoden, zu denen es gut dokumentierte Programme und Modelle mit guten Benutzeroberflächen und graphisch gestützten Ein- und Ausgaben gibt. Dabei besteht allerdings die Gefahr einer unkritischen Anwendung. Die Qualität der Methode wird leider nicht als Massstab für die Anwendung genommen, sondern allein die brauchbare Handhabbarkeit und der Bekanntheitsgrad. Das gleiche gilt für Weiterentwicklungen, diese erfolgen für die bekannten, nicht für die besten Konzepte. Das alles ist nicht verwunderlich, denn noch immer gibt es keine kritischen Methoden- und Modellvergleiche mit Standarddatensätzen, die zu einer objektiven Bewertung führen können. Noch immer werden viel zu wenige Modelle und Methoden zu Softwareprodukten aufbereitet, ausreichend dokumentiert sowie gepflegt, gewartet und weiterentwickelt. Public-domain-Software ist auf diesem Gebiet in Deutschland nicht vorhanden. Im Ausland entwickelte Verfahren und Modelle werden trotz internationaler Verbreitung kaum einmal übernommen.

Einfachere Verfahren, also empirische und regional gültige Formeln und statistische Verfahren, werden häufig genutzt, weil der Aufwand relativ gering ist und eine jahre- und jahrzehntelange Erfahrung vorliegt, obwohl die Güte der Resultate keineswegs befriedigend sein muss. Die Akzeptanz der Niederschlag-Abfluss-Modelle ist geringer, weil der Aufwand gross ist und weil der immer wieder geäusserten Verdacht nicht ausgeräumt ist: letztlich sei nicht erwiesen, dass Niederschlag-Abfluss-Modelle bessere Ergebnisse zu liefern in der Lage sind als einfachere Verfahren. Es muss in diesem Zusammenhang aber auch bedacht werden, dass die Ableitung von Bemessungsabflüssen als Scheitelabflüsse ursprünglich nicht das Ziel der N-A-Modelle war. Mit ihnen sollten vornehmlich Ganglinien für Retentionsberechnungen entwickelt werden. Dass dabei Scheitelabflüsse geradezu abfallen, kann selbstverständlich genutzt werden, wird aber des hohen Aufwandes für N-A-Modelle wegen auch teuer erkaufte.

Die Notwendigkeit, zukünftig Bemessungsabflüsse höherer Genauigkeit vorgeben zu müssen, resultieren u.a. aus der Tatsache, dass Bemessungshochwasser sehr oft als Vorgaben für hydraulische Modelle dienen, die bereits heute einen sehr hohen Genauigkeitsanspruch erfüllen können. Der Widerspruch hoher Genauigkeit auf Seiten der Hydromechanik und geringer Genauigkeit auf Seiten der quantitativen Hydrologie kann nicht weiter hingenommen werden. Es sind deshalb zwei Entwicklungspfade zu beschreiben:

- Verbessern der statistischen Verfahren durch Berücksichtigung neuerer regionalhydrologischer Ansätze und physikalischer Zusammenhänge (Entwicklung physikalisch begründeter Verteilungsfunktionen),
- Verbessern der deterministischen Modelle durch eine systematische und aufeinander abgestimmte Parameterisierung der physikalischen Prozesse bei Reduktion der Modellparameter (Entwicklung parameterarmer physikalisch basierter Modelle).

Gleichzeitig muss die Verfügbarkeit von Daten erheblich verbessert werden (Kapitel 4.9.2.2).

In Abbildung 4.12 (Netzdiagramme) und in Anlage 4 (Tabellen) sind die Erfahrungen der Anwender für die drei Methoden wiedergegeben.

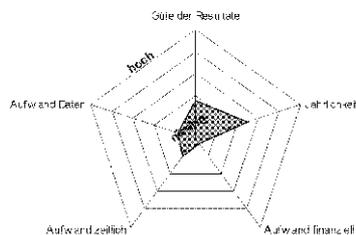
Die ausgefüllten Flächen der Netzdiagramme zeigen qualitativ, wie folgende Kriterien bewertet wurden:

- Güte der Resultate,
- Aufwand Daten,
- Aufwand zeitlich,
- Aufwand finanziell.

Je stärker sich die Fläche in Richtung eines Kriteriums ausdehnt, desto höher ist der Aufwand oder die Güte der Resultate bei der Anwendung dieser Methode.

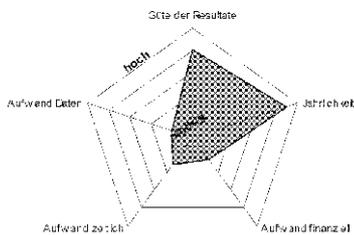
Eine Ausnahme bildet der Punkt Jährlichkeit, der sich auf die Jährlichkeit des geschätzten Abflussscheitels bezieht. Ein hoher Wert bedeutet, dass mit dieser Methode Abflussscheitel bis zu maximalen Hochwasserabflüssen, ein mittlerer Wert, dass mit dieser Methode Abflussscheitel bis zu HQ_{100} abgeschätzt werden.

Empirische und regional gültige Formeln

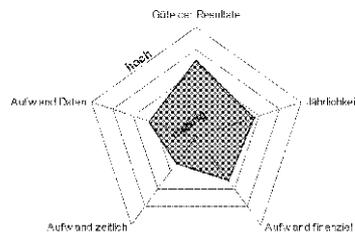


Statistische Verfahren

Lokale Ansätze auf der Basis von Abflussdaten

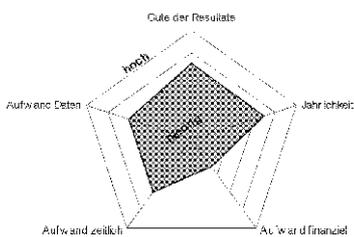


Regionalhydrologische Ansätze auf der Basis von Abflussdaten



Deterministische Modelle

Blockmodelle



Räuchdetaillierte Modelle

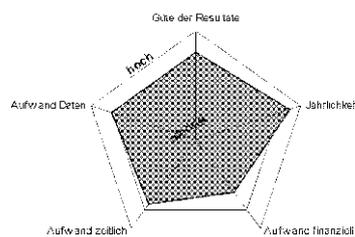


Abb. 4.12 Aufwand und Güte von Methoden zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen und Erfahrungen bei ihrer Anwendung¹

¹ In der Graphik bezieht sich die Jährlichkeit auf die betrachteten Hochwasserabflüsse, ein hoher Wert entspricht dem HQ_{max} , ein mittlerer Wert dem 100jährigen Hochwasserabfluss.

4.9.2 Probleme bei der Anwendung

4.9.2.1 Allgemeine Probleme zu Daten und Parametern

Von den Anwendern sind die in Tabelle 4.9 zusammengestellten Probleme genannt worden. Es ist leicht zu erkennen, dass die Aufzählung unvollständig ist.

Tab. 4.9 Allgemeine Probleme zu Daten und Parametern, die von den Anwendern genannt worden sind.

Empirische und regional gültige Formeln	Statistische Verfahren	Deterministische Modelle
<ul style="list-style-type: none"> ○ Schlechte Vergleichbarkeit der Datenherleitung ○ Probleme bei der länderübergreifenden Datenbereitstellung ○ Eingangsdaten müssen aus nicht vervielfältigbaren, i.d.R. nur in Fachbehörden vorhandenen, relativ alten Karten und Originalliteratur bestimmt werden. Damit besteht keine Allgemeinverfügbarkeit der Eingangsdaten und Berechnungsformeln ○ Fragen der Plausibilität, die aus der unterschiedlichen Beobachtungsdauer an den Messstellen resultiert ○ Datenerfassung (Probleme bei den Messungen) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Instationarität der Serien <ul style="list-style-type: none"> - zu kurze Zeitreihen - zu lange Zeitreihen ○ Nachbereitung der Serien, Prüfung von Einzelwerten ○ Die Beeinflussung historischer Werte ist schwer zu schätzen ○ Datenerfassung (Probleme bei den Messungen) <ul style="list-style-type: none"> - Fehlende Zuverlässigkeit der Abflusskurven und Messwerte - Ungenauigkeit der Messungen - Geräteausfall bei hohen Abflüssen - Gelegentliche Ausfallzeiten und Ergänzung durch benachbarte Pegel 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Abschätzung von Gewässerprofilen und Rauheiten ○ Erschwerte Plausibilitätskontrolle bei Gebieten ohne Pegel ○ Probleme bei der Regionalisierung von Modellparametern ○ Datenverfügbarkeit (Probleme bei der Bereitstellung) <ul style="list-style-type: none"> - Zu geringe Stationsdichte für die Messung der Niederschläge und anderer meteorologischer Merkmale - Mangelnde Verfügbarkeit stündlicher Daten (Niederschläge, Abflüsse) - Fehlerhafte Daten

Empirische und regional gültige Formeln sind leicht und schnell anwendbar, die Datenverfügbarkeit ist meistens gut, der Zeitaufwand ist i.d.R. mit weniger als 1 Stunde anzusetzen. Die Anwender legen sich selten Rechenschaft über Genauigkeiten und Anwendungsgrenzen ab.

Statistische Verfahren fassen auf langjährigen Beobachtungsreihen, bei denen Probleme der Datengenauigkeit einerseits und die statistische Homogenität der Zeitreihe andererseits dominieren. Beide Probleme werden mit unterschiedlichen Intensitäten im Vorfeld einer statistischen Analyse bearbeitet. Wobei der Umgang mit Datenfehlern und -inhomogenitäten sehr unterschiedlich ist und Korrekturen meistens unterbleiben, zweifelhafte Messreihen aber dennoch nicht immer konsequent ausgeschieden werden. Die Frage, welche Verteilungsfunktion und welche Schätzmethoden für die Parameter verwendet werden, wird mit grosser Aufmerksamkeit geprüft und analysiert, ohne dass dabei die Frage berücksichtigt wird, ob diese Verteilungen und Parameter auch im Extrapolationsbereich gültig sind. Gleichwohl kommt den statistischen Verfahren eine hohe praktische Bedeutung zu. Sie haben sich in der Praxis bewährt, auch wenn der Genauigkeitsgrad der Extrapolation seltener und extremer Hochwasserabflüsse nicht angegeben werden kann, wenn einmal von den statistischen Intervallbreiten abgesehen wird. Die Genauigkeit der Messdaten geht dabei nicht ein.

Eingesetzte deterministische Modelle sind ausnahmslos konzeptionelle Modelle, bei denen nicht physikalische Modellparameter kalibriert werden müssen. Je höher die Parameteranzahl ist, desto schwieriger wird die Kalibrierung und desto individueller bezüglich Ereignis und Gebiet werden die Parametersätze. Konzeptionelle Modelle und deren Parameter sind grundsätzlich nicht übertragbar und müssen für einzelne Einzugsgebiete angepasst werden.

4.9.2.2 Datenbereitstellung

Ergebnisse jeder Anwendung sind so gut wie die ihnen zugrunde liegenden Daten. Der Einsatz einer bestimmten Methode oder eines bestimmten Modells verlangt Daten in der erforderlichen zeitlichen und räumlichen Auflösung.

Die zunehmende Kommerzialisierung der Fachdienste des Bundes und der Länder, verbunden mit einer restriktiven Datenabgabepolitik oder hohen Kosten behindert zunehmend eine Modellanwendung und -weiterentwicklung durch Ingenieurbüros und Hochschulinstitute. Die meisten benötigten Daten werden von öffentlichen Institutionen erhoben, archiviert und weitergegeben. Die Nutzung dieser Daten durch öffentliche Institutionen ist mit geringen, durch Forschungsinstitutionen und private Unternehmen mit z. T. hohen finanziellen Aufwendungen verbunden, weil es in vielen Fällen als unerwünscht angesehen wird, dass diese Daten in den sogenannten „kommerziellen Bereich“ gelangen. Dies ist zwar volkswirtschaftlich unsinnig, aber oftmals durch Gebührenordnungen, das Umweltinformationsgesetz (Deutscher Bundestag 1994) und die neue Orientierung der Verwaltung, Produkte bereitstellen zu wollen, gedeckt. Es gibt keine einheitlichen Auslegungen und Ausführungen der gesetzlichen Grundlagen. Das Umweltinformationsgesetz definiert zwar, was Umweltdaten sind. Es ist auch dahingehend interpretierbar, dass bestimmte Daten, z.B. meteorologische und hydrometrische Daten, nicht unter die Bestimmungen des Gesetzes fallen.

Die restriktive Interpretation des Umweltinformationsgesetzes, die Nichtbefolgung der WMO-Resolutionen über den nichtdiskriminierenden und kostenfreien Zugang zu meteorologischen und hydrologischen Daten, die produktorientierte Haltung bei der Datenabgabe und die hohen Kosten für den Erwerb von Daten erweisen sich in zunehmendem Masse als hemmend für die Anwendung der genannten Verfahren und auch für die Entwicklung und Verbesserung der Modelle durch Ingenieurbüros und Hochschulinstitute.

Deshalb besteht ein erheblicher Bedarf, den Zugang zu Daten über die Umwelt neu zu regeln und den schon vorhandenen gesetzlichen Grundlagen anzupassen sowie einer Kommerzialisierung des Umganges mit diesen Daten, die mit öffentlichen Mitteln erschlossen wurden, vorzubeugen. Die Kommerzialisierung wirkt sich schädlich auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung aus, vernichtet Arbeitsplätze und behindert und verteuert die Anwendung und Verbesserung.

Ein generelles Defizit ist das Fehlen einer einheitlichen Datenstruktur (Datenmodell, Formatierung). Hier gibt es aufgrund der föderalen Struktur in Deutschland verschiedene Ansätze, die jedoch nicht kompatibel sind. Eine Standardisierung wäre wünschenswert. Dies erfordert, dass man sich unter Umständen von bestehenden länderspezifischen Regelungen trennt.

4.9.2.3 Räumlich verteilte Daten

Einige der Niederschlag-Abfluss-Modelle arbeiten mit räumlich verteilten Parametern und verlangen deshalb räumlich verteilte Daten, die heute teilweise durch die Fernerkundung wesentlich besser erhoben werden können als früher. Es handelt sich dabei zunächst um Rohdaten, die in einem oft schwierigen Prozess in reale Daten umgerechnet und geokodiert werden müssen. Sie lassen sich mit Geoinformationssystemen (GIS) auch rationell bereitstellen und verarbeiten. Allerdings steht die Nutzung solcher Daten und Methoden erst am Anfang. Modelle, deren Simulationsteil mit einem GIS gekoppelt ist oder der selbst in einem GIS abläuft, sind noch nicht in der breiten Anwendung, sondern in der Regel erst in der Entwicklung.

Rechen- und Speicherplatzkapazitäten dürften in diesem Zusammenhang bald keine Beschränkungen mehr nach sich ziehen. Vielmehr ist es praktisch nicht möglich, die theoretisch benötigten Parameter realitätsnah zu bestimmen. Dabei haben Institutionen der öffentlichen Verwaltung, die über die notwendigen Karten und Datensätze verfügen, auch den Vorteil, die Modelle als Anwender anpassen und die Modellparameter schätzen zu können.

4.9.2.4 Genauigkeit von Daten und Ergebnissen

Ein noch ungelöstes Problem liegt im Fehlen zuverlässiger Informationen über den Genauigkeitsgrad, die Zuverlässigkeit und die Unsicherheiten der Daten. Das betrifft alle Datenarten, sowohl raumbezogene als auch zeitbezogene Daten, sowohl die meteorologischen als auch die hydrologischen Daten, sowohl die terrestrisch erhobenen Daten als auch die Satellitendaten. Folglich ist auch unbekannt, wie sich die Unsicherheiten der Eingangsdaten auf die Ergebnisse von Verfahren und Modellen auswirken. Die Bandbreiten der Resultate sind im allgemeinen völlig unbekannt. Hier sind systematische Untersuchungen der Daten, der Fehlerfortpflanzung in den Modellen und der Schwankungen der Modellergebnisse notwendig.

4.9.3 Konsequenzen

Die statistischen Verfahren sind durch Regionalisierungsansätze zu ergänzen, bei denen möglichst wenige repräsentative Gebietskennwerte verwendet werden. Eine umfassende Dokumentation dieser Verfahren und deren Vor- und Nachteile steht noch aus. Sie sollte in Kürze durchgeführt werden, um die auf diesem Gebiet bestehenden Defizite identifizieren zu können. Das Problem der statistischen Schätzung extremer Abflüsse lässt sich mit den heute verfügbaren statistischen Methoden, angewandt auf hydrologische Zeitreihen, nicht physikalisch basiert lösen. Vorübergehende Lösungen können darin bestehen, Hochwasserabflüsse mit Überschreitungswahrscheinlichkeiten kleiner 1/100 auf der Basis einer Konvention (Vereinbarung der Rechenvorschrift (Kleeberg und Schumann 2000)) abzuschätzen.

Die Verfügbarkeit von Daten kann durch den Aufbau von Datenbanken verbessert werden. Diese müssen heutzutage keineswegs mehr zentral sein, sie können dezentral sein. Dezentrale Datenhaltung verlangt jedoch die Vorgabe einheitlicher Strukturen und eines einheitlichen Datenkonzeptes. Das könnte als Nachteil, wenn nicht sogar als unüberwindliches Problem empfunden werden. Dezentrale Datenhaltung hat jedoch den Vorteil, dass die Datenkorrektur und -ergänzung unmittelbar bei den Verantwortlichen erfolgt und redundante Datenhaltung, die schnell zu einem Auseinanderdriften der Inhalte der Datenbestände führt, unterbleibt.

Neben der Verbesserung der Datensituation ist anzustreben, zukünftig möglichst wenig auf empirische und regional gültige Formeln zurückzugreifen, sondern sich mehr auf die hydrologische Statistik und Niederschlag-Abfluss-Modelle zu stützen, bei denen vermutlich höhere Genauigkeiten erreicht werden können und deren Genauigkeitsgrenzen durch Sensitivitätsuntersuchungen besser abschätzbar sind.

4.9.4 Hinweis

Obwohl die vorgelegte Studie den Anspruch erheben möchte, die gesamte praktische Anwendung der Methoden und Verfahren zur Abschätzung seltener und extremer Hochwasserabflüsse in Deutschland repräsentativ wiederzugeben, sind sich die Autoren bewusst, dass Lücken vorhanden sind, weil auf Umfrageergebnisse zurückgegriffen werden musste. Es ist deshalb nicht auszuschließen, dass die Aktivitäten der einen oder anderen Institution übersehen worden sind und dass die Verfahren nicht ganz vollständig und unterschiedlich detailliert aufgelistet worden sind.

Die Autoren möchten den Bericht aktualisieren und verbessern und bitten deshalb darum, ihnen dazu alle erforderlichen Informationen über Einsatzbereiche und Verfahren zur Abschätzung von seltenen und extremen Hochwasserereignissen zukommen zu lassen (e-mail-Adresse: Kleeberg@iawg.de; siehe auch www.iawg.de).

Literatur

- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, BLfW (Hrsg.) (1999):** Hydrologische Planungsgrundlagen, Hochwasserlängsschnitt, Loseblattsammlung des Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft.
- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, BLfW (Hrsg.) (1999):** Hydrologische Planungsgrundlagen, EGLSYN, Loseblattsammlung des Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft.
- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, BLfW (Hrsg.) (1998):** Hydrologische Planungsgrundlagen, Hochwasser, Loseblattsammlung des Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft.
- Bremicker, M., Ludwig, K., Richter K.-G. (1996):** Wasserhaushaltsmodelle für das Weser- und Ostsee-Einzugsgebiet. In: Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaftlicher Wasserbau der Universität Hannover, Heft 83:87-104.
- Bremicker, M., Ludwig, K., Richter K.-G. (1997):** Effiziente Erstellung mesoskaliger Wasserhaushaltsmodelle. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 41, Heft 5:209-215.
- Bremicker, M., Ludwig, K., Richter K.-G. (1998):** Effiziente Erstellung mesoskaliger Wasserhaushaltsmodelle. In: PIK-Report: Modellierung des Wasser- und Stofftransportes in grossen Einzugsgebieten. No. 43:23-32.
- Bremicker, M.: (2000):** Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele -, Freiburger Schriften zur Hydrologie, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg, Band 11, 2000.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (1997):** Stand und Einsatz mathematisch-numerischer Modelle in der Wasserwirtschaft. Veröffentlichung des BMU.
- Dalrymple, T. (1960):** Flood-frequency analysis, U.S. Geological Survey Water Supply Paper, 1543-A, 80 S.
- Deutscher Bundestag (1994):** Drucksache 469/94, Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie 90/313 EWG des Rates vom 7. Juni 1990 über den freien Zugang zu Informationen über die Umwelt.
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, DVWK (Hrsg.) (1984):** Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Teil II: Synthese. DVWK-Regeln, 113, 34 Seiten, Hamburg, Berlin.
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, DVWK (Hrsg.) (1999):** Hochwasserabflüsse. DVWK-Schriften 124, 254 Seiten, Bonn.
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, DVWK (Hrsg.) (1999):** Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. In: DVWK-Merkblätter 251, 42 Seiten, Bonn.
- Deutscher Wetterdienst, DWD (Hrsg.) (1997):** Starkniederschlagshöhen für Deutschland - KOSTRA, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main. (KOSTRA-Atlas, inzwischen auch als **KOSTRA-digital** beim ITWH / Hannover käuflich).
- Fügner, D., Schramm, M., Peter, A., Schiek, P. (1990):** Neue Methoden zur Berechnung von Hochwasserscheiteldurchflüssen mit Wahrscheinlichkeitsaussage. In: Wasserwirtschaft – Wassertechnik, Heft 5:112-114, Berlin.

- Gupta, V.K.; Mesa, O.J.; Dawdy, D.R. (1994):** Multiscaling theory of flood peaks: Regional quantile analyses, *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 12, S. 3405-3421.
- Haupt, R., Miegel, K., Schramm, M., Walther, J. (1999):** Saisonalität und Regionalisierung von Hochwasserscheitelabflüssen in Mecklenburg-Vorpommern. In: *Wasserwirtschaft*, 89, 7-8:388-394.
- Hosking, J.R.M. & Wallis, J.R. (1997):** *Regional Frequency Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne.
- Ihringer, J., Kron, W. (1993):** Softwarepaket für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Anwenderhandbuch, Band 1: Hochwasseranalyse. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe.
- Kleeberg, H.-B., Schumann, A. H. (2000):** Ableitung von Bemessungsabflüssen kleiner Überschreitungswahrscheinlichkeiten. *Wasserwirtschaft*, in Vorbereitung.
- Kleeberg, H.-B., Willems, W. (2000):** Informationssystem Hochwassertrends / Hochwasserwahrscheinlichkeiten, IsHoT / IsHoW, Benutzerhandbuch. Institut für Angewandte Wasserwirtschaft, München.
- Kluge C. (1996):** Wahrscheinlichkeitsanalysen von Hochwasserdurchflüssen. In: *Dresdner Berichte* 7, 122 Seiten, Dresden.
- Knauf, D. (1975):** Die Abflussbildung in schneebedeckten Einzugsgebieten des Mittelgebirges. Technischer Bericht aus dem Institut für Wasserbau der TH Darmstadt, Heft 17.
- Kreps, H. (1963):** Eine kritische Betrachtung von Hochwasserformeln. In: *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, Nr. 36.
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.) (1999):** Hochwasser-Wahrscheinlichkeiten in Baden-Württemberg, Selbstverlag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe, 1. Auflage.
- Ludwig, K. (1979):** Das Programmsystem FGMOD zur Berechnung von Hochwasser-Abflussvorgängen in Flussgebieten. In: *Wasserwirtschaft* 69, Heft 7+8:226-228.
- Ostrowski, M.W. (1982):** Ein Beitrag zur kontinuierlichen Simulation der Wasserbilanz. *Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft*, Band 42, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- Plate, E.J., Schultz, G.A., Seus, G.J. & Wittenberg, H. (1977):** Ablauf von Hochwasserwellen in Gerinnen. Schriftenreihe des Kuratoriums für Wasser und Kulturbauwesen, Heft 27, Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- Plate, E.J. (1993):** *Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure*, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- Schultz, G., A. (1998):** Kritische Überlegungen zur Bestimmung des Bemessungshochwasserabflusses. In: Bericht 82 der Versuchsanstalt Oberrach und des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München: 118-129.
- Schumann, A.H. & Pfützer, B. (1999):** Regionalisierung einer hochwasserstatistischen Verteilungsfunktion unter Anwendung eines Geographischen Informationssystems. In: "Bemessungsabflüsse für kleine Einzugsgebiete" Tagungsband zum Kolloquium vom 4./5. März 1999 an der Universität Kaiserslautern, Berichte des Fachgebietes Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, Heft 9.

WASY (2000): Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH, Internet
- Homepage, www.wasy.de.

WASY (1997): HQ-EX, Version 2.0, Benutzerhandbuch. WASY: Gesellschaft für
wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH, 24 Seiten, Berlin.

Weingartner, R. (1999): Regionalhydrologische Analysen, Grundlagen und Anwendungen. In:
Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 37, Bern.

Wundt W. (1949/1950): Die grössten Abflusspenden in Abhängigkeit von der Fläche. In: Die
Wasserwirtschaft, Heft 2, Jahrgang 40:59-64.

Wundt W. (1965): Grenzwerte der Hochwasserspende und der mittleren Abflusspende in
Abhängigkeit von der Fläche. In: Die Wasserwirtschaft, Heft 1, 55. Jahrgang.

Anlagen

1 Glossar

Den Begriffen, die in der Hochwasserhydrologie und bei der Anwendung der Methoden und Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen üblich sind, werden in der Praxis nicht immer die gleichen Bedeutungen zugeordnet. Das gilt beispielsweise für die Begriffe seltene und extreme Hochwasser, die Begriffe Parameter, Modellparameter, effektive Parameter, Kenngrößen und auch die Begriffe Kalibrierung, Verifikation, Validierung. Um Missverständnisse zu vermeiden, werden einige wichtige Begriffe, die in dem Bericht genannt sind, erläutert.

Seltene Hochwasserabflüsse

Als seltene Hochwasserabflüsse werden diejenigen Scheitelabflüsse bezeichnet, deren Überschreitungswahrscheinlichkeiten zwischen 10^0 und 10^{-2} pro Jahr liegen, in Ausnahmefällen auch bis $5 \cdot 10^{-2}$ pro Jahr (oder ausgedrückt in Wiederholungszeitspannen oder Jährlichkeiten im Bereich zwischen 1 und 500 Jahren). Das sind in der Regel Bemessungsabflüsse für Ausbaumassnahmen und Schutzbauwerke.

Extreme Hochwasserabflüsse

Hochwasserereignisse, deren Überschreitungswahrscheinlichkeit kleiner gleich 10^{-3} pro Jahr (oder Wiederholungszeitspannen von 1'000 oder mehr Jahren) aufweisen, werden zu den extremen Abflüssen gezählt. Da sind in der Regel Bemessungsabflüsse für die Anlagensicherheit von Talsperren, Rückhaltebecken und anderen technischen Anlagen oder es sind Abflüsse zur Risikoabschätzung. Zu den extremen Abflüssen gehören aber auch Hochwasserereignisse, denen keine Wahrscheinlichkeiten mehr zugeordnet werden können. Das sind maximale Hochwasserabflüsse (HQ_{\max}), maximierte oder sogenannte vermutlich grösste Hochwasserabflüsse (engl. Probable Maximum Flood, PMF).

Maximale Hochwasserabflüsse

Maximale Hochwasserabflüsse (HQ_{\max}) sind Maxima der grössten beobachteten Ereignisse einer Region. Ein Beispiel dafür stellen Umhüllungskurven der grössten beobachteten Hochwasserabflüsse (HHQ) einer Region dar. Maximale Hochwasserabflüsse können gegebenenfalls von maximierten und vermutlich grössten Hochwasserabflüssen übertroffen werden.

Maximierte Hochwasserabflüsse

Maximierte Hochwasserabflüsse sind rechnerisch ermittelte extreme Hochwasserabflüsse. Sie werden entweder pragmatisch nach der statistischen Methode mit maximierten Parametern (z.B. der Schiefe) ermittelt oder mit Niederschlag-Abfluss-Modellen berechnet, wobei theoretisch angenommen wird, dass die hydrologischen und meteorologischen Randbedingungen in einer Kombination auftreten, die Abflussbildung, Abflusskonzentration und Wellenablauf so beeinflussen, dass jeweils höchste Abflüsse entstehen. Da kein Niederschlag-Abfluss-Modell für derartige extreme Abflüsse kalibriert werden kann, ist die Anwendung problematisch, solange kein Konsens über die Maximierung der Parameter oder der Randbedingungen, die einer N-A-Berechnung zugrunde zu legen sind, erfolgt ist. Allein von einer maximierten Niederschlagsbelastung (z.B. MGN) auszugehen, ist keine ausreichende Festlegung. Ein entsprechender Konsens steht z.Z. noch aus.

Vermutlich grösste Hochwasserabflüsse (engl. Probable Maximum Flood, PMF)

Vermutlich grösste Hochwasserabflüsse werden durch Transformation aus vermutlich grössten Niederschlägen PMP (engl. Probable Maximum Precipitation) oder aus maximierten Gebietsniederschlägen MGN berechnet. Der PMP oder der MGN ist der theoretisch grösste Niederschlag einer bestimmten Dauer, der über einem bestimmten Einzugsgebiet und zu einer bestimmten Jahreszeit physikalisch möglich ist. Die Transformation eines solchen Niederschlages in einen Hochwasserabfluss kann theoretisch über N-A-Beziehungen erfolgen. Dazu gilt das gleiche, das oben über maximierte Hochwasserabflüsse erwähnt ist. Aus pragmatischen Gründen und wegen der schwierigen Trennbarkeit von PMF's und maximierten Hochwasserabflüssen werden beide Begriffe im vorliegenden Bericht synonym verwendet.

Kalibrierung

Kalibrierung ist die Anpassung (Inwertsetzung, **Verifikation**) von Modellparametern der N-A-Modelle, die nicht aus anderen Kenngrößen abgeleitet werden können oder die dazu dienen, aus räumlich oder zeitlich punktuellen Parametern effektive Parameter zu machen, die für eine Fläche oder eine Zeitspanne repräsentativ sind. Für die Kalibrierung eines Modells müssen beobachtete Eingangs- und Ausgangsdaten bereitstehen. Eine Kalibrierung ist nur für das ausgewählte Einzugsgebiet gültig. Manchmal wird hierfür der Begriff Eichung verwendet. Das Eichen ist allerdings ein amtlicher Vorgang.

Validierung

Validierung ist die Prüfung der Tauglichkeit eines Modells mit den bereits kalibrierten Parametern für einen Zeitraum oder für Ereignisse, die nicht für die Kalibrierung herangezogen worden sind. Für die Validierung müssen ebenfalls beobachtete Eingangs- und Ausgangsdaten bereitstehen.

2 Übersicht zu den befragten Institutionen

Ergebnisse der Befragungen		Methode					
		Nutzung + ja - nein			Fragebogen abgegeben zu		
		A	B	C	A	B	C
1		2	3	4	5	6	7
Bayern: Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft	Postfach 190 241 80602 München	+	+	+	+	+	+
Baden-Württemberg: Landesanstalt für Umweltschutz Wasser und Altlasten	Postfach 210 752 76157 Karlsruhe		+	+		+	+
Berlin:							
Brandenburg: Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg	Postfach 601 164 14411 Potsdam						
Bremen: Senator für Bau und Umwelt	Ansgaritorstr. 2 28195 Bremen						
Hamburg:							
Hessen: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie W3 Grundwasserschutz und Hydrologie	Rheingastr. 186 65203 Wiesbaden	+	+	+	+	+	+
Mecklenburg-Vorpommern: Landesamt für Umwelt Naturschutz und Geologie	Goldbergerstr. 12 18273 Güstrow						
Niedersachsen: Bezirksregierung Braunschweig	Postfach 3247 38022 Braunschweig		+			+	
Niedersächsisches Landesamt für Ökologie	Postfach 101 062 31110 Hildesheim	+	+		+	+	
Bezirksregierung Hannover	Postfach 203 30002 Hannover	+	+	+	+	+	+
Harzwasserwerke Abteilung Wasserwirtschaft	Nikolaistr. 8 31137 Hildesheim	+	+		+	+	
Nordrhein-Westfalen: Landesumweltamt NRW	Postfach 102 363 45023 Essen						
Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen	Postfach 40190 Düsseldorf						
Rheinland-Pfalz: Ministerium für Umwelt und Forsten	Kaiser-Friedr.-Str. 1 55116 Mainz	+	+	+	+	+	+
Saarland: Landesamt für Umweltschutz Sachbereich 6.3	Don Bosco Str. 1 66119 Saarbrücken		+			+	
Sachsen: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie Wasser/Oberirdische Wasser	Postfach 800 100 01101 Dresden	+	+	+	+	+	+
Sachsen-Anhalt: Staatliches Amt für Umweltschutz, Magdeburg Abt. Gewässerschutz, Dezernat 3.2 Hydrologie	Postfach 4080 39015 Magdeburg	+	+	+	+	+	+

Ergebnisse der Befragungen		Methode						
		A Empirische und regional gültige Formeln B Statistische Verfahren C Niederschlag-Abfluss-Modelle						
Bundesland / Behörde Anschrift		Nutzung + ja - nein			Fragebogen abgegeben zu			
		A	B	C		A	B	C
1		2	3	4		5	6	7
Staatliches Amt für Umweltschutz, Halle Abt. Gewässerschutz, Dezernat 3.2 Hydrologie	Postfach 600 113 06036 Halle		+	+			+	+
Schleswig-Holstein: Ministerium für Umwelt, Natur und Forsten des Landes Schleswig-Holstein	Postfach 6209 24123 Kiel							
Thüringen: Thüringer Landesanstalt für Umwelt	Prüssingstr. 25 07745 Jena	+	+			+	+	
Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt Ref. 506 – Gewässerkunde/Abflussregelu ng	Beethovenplatz 3 99085 Erfurt							

Ergebnisse der Befragung		Methode A Empirische und regional gültige Formeln B Statistische Verfahren C Niederschlag-Abfluss-Modelle					
Büros und Institute Name	Anschrift	Nutzung + ja - nein			Fragebogen abgegeben zu		
		A	B	C	A	B	C
1		2	3	4	5	6	7
AB-WA Plan	Lochhamer Schlag 6 82166 Gräfelfing						
AEW Plan GmbH	Graeffstr. 5 50823 Köln						
Aggerverband	Sonnenstr. 40 51645 Gummersbach						
Agrar- und Hydrotechnik GmbH	Huyssenallee 66-68 45128 Essen	-	-	+			
Arbeitsbereich Wasserbau Prof. Dr. E. Paschke	Denickestr. 22 21073 Hamburg						
Beller Consult GmbH	Linnestr. 5 79110 Freiburg i.Br.						
Beratender Ingenieur für Wasserwirtschaft	Landmanngassl 8 82284 Grafrath						
Bergisch-Rheinischer Wasserverband	Düsselberger Str. 2 42781 Haan	-	+	+		+	+
BGS – Brandt-Gerdes- Sitzmann	Eschollmühle 28 64297 Darmstadt		+	+		+	+
Birkhahn + Nolte GmbH	Drosselweg 13 25569 Kremperheide						
Dr. Blasy + Mader Beratende Ingenieure	Moosstr. 3 82279 Eching a.A.	-	+	+		+	+
Björnsen Beratende Ingenieure Erfurt GmbH	Brühler H-berg 2a 99092 Erfurt						
Björnsen Beratende Ingenieure Koblenz GmbH	Kurfürstenstr. 87a 56068 Koblenz	-	+	+			
Büro für angewandte Hydrologie Dr. B. Pfützner	Wollankstr. 117 13187 Berlin	-	+	+			+
Büro für Umweltbewertung und Geoökologie	Karl-Benner-Str. 10 35396 Giessen		-	+			
Consulting Engineers Salzgitter GmbH	Nord-Süd-Str. 1 38259 Salzgitter-Bad						
d + p Dänekamp + Partner	Nienhöfener Str. 29 25421 Pinneberg	-	-	-			
DAR Deutsche Abwasser- Reinigungs-Gesellschaft mbH	Nied. Köditzgasse 7 07318 Saalfeld						
Dorsch Consult Ingenieures. mbH	Hansastr. 20 80686 München						
Dr. U. Temper & Partner	Schanzstr. 8 82216 Gernlinden						

Ergebnisse der Befragung		Methode A Empirische und regional gültige Formeln B Statistische Verfahren C Niederschlag-Abfluss-Modelle					
Büros und Institute Name	Anschrift	Nutzung + ja - nein			Fragebogen abgegeben zu		
		A	B	C	A	B	C
einfalt & hydrotec GbR	Wakenitzmauer 33 23552 Lübeck	-	+	+			
Erftverband	Paffendorfer Weg 42 50126 Bergheim	-	+	+			
Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft Prof. Dr. G. Koehler	Erwin-Schröd.-Str. 67663 Kaiserslautern	-	+	+			
Lehrstuhl für Hydrologie und Wasserwirtschaft Prof. Dr. U. Grünewald	Th.-Neubauer-Str. 6 03046 Cottbus	-	+	+			+
Fendt Ingenieure GmbH	Bahnhofstr. 7 83093 Bad Endorf						
Herzog & Partner Beratende Ingenieure VBI	Im Bögel 7 76744 Wörth- Maximiliansau	-	-	+			+
HGN Hydrogeologie GmbH	Rothenburgstr. 10 99734 Nordhausen						
Hydro-Consult GmbH	Zossener Str. 55 10961 Berlin						
Hydroplan Ingenieur GmbH	Scheidtstr. 28 67547 Worms						
Hydroprojekt Ingenieurgesellschaft mbH (HPI)	Friedberger Str. 173 61118 Bad Vilbel	+	-	+			
Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH	Bachstr. 62-64 52066 Aachen	+	+	+	+	+	+
ia GmbH - Ingenieure et al. Produktions- und Umwelttechnik	Gotzinger Str. 48/50 81371 München						
igi Niedermeyer Institute GmbH	Hohentrüd. Str. 11 91747 Westheim						
IHU Gesellschaft für Ingenieur-, Hydro- und Umweltgeologie mbH	Am Sportplatz 1 99735 Nordhausen- Leimbach						
Ing.-Büro für Geotechnik und Umweltgeologie	Johann-Langmantel- Str. 16 82061 Neuried						
Ingenieurbüro Dieter Gier Beratender Ingenieur BYIKBAU	Faustnerweg 7 81479 München						
Ingenieurbüro Dr. Dahlem Beratende Ingenieure	Bonsiepen 7 45136 Essen						
Ingenieurbüro Dr. Karl Ludwig	Herrenstr. 14 76133 Karlsruhe	+	+	+	+		+
Ingenieurbüro EDR GmbH	Hansastr. 28 80686 München	-	-	-			

Ergebnisse der Befragung		Methode A Empirische und regional gültige Formeln B Statistische Verfahren C Niederschlag-Abfluss-Modelle						
Büros und Institute Name	Anschrift	Nutzung + ja - nein			Fragebogen abgegeben zu			
		A	B	C	A	B	C	
Ingenieurbüro Fassnacht	Alpenstr. 31 87764 Legau							
Ingenieurbüro Fischer	Carolinenstr. 26 07973 Greiz							
Ingenieurbüro für Hoch- und Tiefbau Herrn Bryknar	Sieglindenstr. 2 80639 München	-	-	-				
Ingenieurbüro Gerhard + Fuchs	Akademiestr. 7 80799 München	-	+	+				
Ingenieurbüro H. Köpf	Fraunhoferstr. 10/4 82152 Planegg							
Institut für Wasserbau FG Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung Prof. Dr. M. Ostrowski	Petersenstr. 13 64287 Darmstadt	-	+	+		+	+	
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft Prof. Dr. A. Bardossy	Pfaffenwaldring 61 70569 Stuttgart	+	+	+				
Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik Abt. Hydrologie Dr. J. Ihringer	Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe	-	+	+		+	+	
Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaftlicher ... Prof. Dr. K. Lecher	Appelstr. 9A 30167 Hannover							
Institut für Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik	Putzbrunner Str. 80 85521 Ottobrunn		+	+		+		
Lehrgebiet Wasser-Energie-Wirtschaft	Mies-van-der-Rohe-Str. 1 52074 Aachen							
Lehrstuhl für Hydrologie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik Prof. Dr. A. Schumann	Universitätsstr. 150 44801 Bochum		+			+		
Leichtweiss-Institut für Wasserbau Abt. Hydrologie und Wasserwirtschaft Prof. Dr. U. Maniak	Beethovenstr. 51a 38106 Braunschweig	+	+	+				
Linksniederrheinische Entwässerungs-Genossenschaft	Friedrich-Heinrich-Allee 64 47475 Kamp-Lintfort	-	+	+				
Lippeverband	Kronprinzenstr. 24 45128 Essen							
mll-WIS consult GbR	Havelstr. 7A 64295 Darmstadt							
W. Markgraf GmbH & Co.KG	Dieselstr. 9 95448 Bayreuth	-	-	-				
Netteverband	Hampoel 17 41334 Nettetal	-	-	-				
Niersverband	Freiheitsstr. 173 41747 Viersen							
Planungsbüro Obermeyer	Hansastr. 40 80686 München							

Ergebnisse der Befragung		Methode					
		A Empirische und regional gültige Formeln					
		B Statistische Verfahren					
		C Niederschlag-Abfluss-Modelle					
Büros und Institute Name	Anschrift	Nutzung + ja - nein			Fragebogen abgegeben zu		
		A	B	C	A	B	C
ProAqua	Turpinstr. 19 52066 Aachen	-	+	+			
RMD-Consult GmbH	Münchener Str. 12 85774 Unterföhring	+	-	+			
Ruhrverband – Talsperrenwesen	Kronprinzenstr. 37 45435 Essen	-	+	+			
Sachverständigenbüro für Grundwasser	Schrammenplatz 2/II 85435 Erding						
Schwalmverband	Bornerstr. 45 41379 Brüggen						
Staatliches Umweltamt Minden	Büntestr. 1 32427 Minden	+	+	+		+	+
Dr.-Ing. E. Steinle	Am Hirschberg 18 83629 Weyarn	-	-	-			
Thiele + Büttner GbR	Domplatz 24 99084 Erfurt	+	+	+			
Universität-GH Paderborn, Abt. Höxter Prof. Dr. G. Meon	Wilhelmshöhe 44 37671 Höxter						
Wahnachtalsperrenverband	Kronprinzenstr. 30 53721 Siegburg						
Wald & Corbe Beratende Ingenieure	Am Heckleklamm 18 76549 Hügelsheim		+	+			
Wasserverband Eifel-Rur	Stadtwerken 14 52351 Düren	-	-	-			
Wasserverband für das Obere Lippegebiet	Königstr. 16 33142 Büren	+	+	+			
Wasserverband Rhein-Sieg	53705 Siegburg						
Wasserverband Siegen - Wittgenstein	Einheitsstr. 23 57076 Siegen	-	-	-			
WASY GmbH	Goetheallee 21 01309 Dresden	+	+	+	+	+	
Werre Wasserverband	Kreishausstr. 20 32051 Herford						
Winkler & Partner Ingenieurbüro	Schlossstr. 59 A 70176 Stuttgart	-	+	+		+	+
WPW Ingenieure GmbH	Feldmannstr. 72/74 66119 Saarbrücken			+			
Wupperverband	Zur Schafbrücke 6 42283 Wuppertal	+	+	-			
Zink Ingenieure Ingenieur- Büro für Tief- und Wasserbau	Poststr. 1 77884 Lauf						

3 In den Fragebögen genannte Anwendungen

Empirische und regional gültige Formeln	
Verfahren	Institution
Hüllkurve nach Wundt	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 2 Ingenieurbüros 1 Wasserverband 2 Hochschulinstitute
Rationale Methode	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie Staatliches Umweltamt Minden 3 Ingenieurbüros
Andere empirische Ansätze zur Berechnung von Hochwassern	Thüringer Landesanstalt für Umwelt Staatliches Amt für Umweltschutz, Magdeburg Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie 4 Ingenieurbüros 2 Verbände 1 Hochschulinstitut

Statistische Verfahren auf der Basis von Abflussdaten - Lokale Ansätze	
Verfahren	Institution
HQ-EX	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland Pfalz Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie Bezirksregierung Braunschweig Niedersächsisches Landesamt für Ökologie Harzwasserwerke Thüringer Landesanstalt für Umwelt Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern Staatliches Amt für Umweltschutz, Magdeburg 4 Ingenieurbüros 3 Hochschulinstitute
EXTREM	Landesamt für Umweltschutz, Saarbrücken Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie Thüringer Landesanstalt für Umwelt Landesanstalt für Umwelt, Baden-Württemberg Harzwasserwerke Staatliches Umweltamt Minden 3 Ingenieurbüros 1 Wasserverband 1 Hochschulinstitut
IsHoT+W	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft Niedersächsisches Landesamt für Ökologie Thüringer Landesanstalt für Umwelt 1 Ingenieurbüro
KLUDON	Anwender des Softwareproduktes NASIM
HVERT	1 Ingenieurbüro
HQ _{10 000}	Noch unbekannt
Hwsaar	Landesamt für Umweltschutz Saarland

Statistische Verfahren auf der Basis von Abflussdaten - Regionalhydrologische Ansätze	
Verfahren	Institution
HQ-Längsschnitt	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft Niedersächsisches Landesamt für Ökologie 1 Ingenieurbüro
HQ-REGIO	Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland Pfalz Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie Staatliches Amt für Umweltschutz Sachsen Anhalt Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg Vorpommern
Verfahren des LFU in Baden-Württemberg	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
Reg-Ex	Staatliches Amt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt 1 Hochschulinstitut
IsHoT+W	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft Niedersächsisches Landesamt für Ökologie Thüringer Landesanstalt für Umwelt 1 Ingenieurbüro

Deterministische Niederschlag-Abfluss-Modelle - Blockmodelle	
Verfahren	Institution
EGLSYN	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft

Deterministische Niederschlag-Abfluss-Modelle - Flächendetaillierte Modelle	
Verfahren	Institution
FGM	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie 6 Ingenieurbüros 1 Wasserverband 1 Hochschulinstitut
NASIM	Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie Staatliches Umweltamt Minden 3 Ingenieurbüros 4 Wasserverbände
LARSIM / FGMOD	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland Pfalz 1 Ingenieurbüro 1 Hochschulinstitut
HYBNAT	1 Ingenieurbüro
ARC/EGMO	1 Ingenieurbüro
ASGi	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 1 Ingenieurbüro
NAMLFW	Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland Pfalz
HEC-1, HEC-2	Staatliches Amt für Umweltschutz, Halle 1 Ingenieurbüro
Hochwasservorhersagemodell Bode	Staatliches Amt für Umweltschutz, Magdeburg
PIRAY	1 Ingenieurbüro
BCENA	1 Ingenieurbüro
NAXOS	1 Hochschulinstitut
CURE	1 Ingenieurbüro
Fluss	1 Ingenieurbüro

4 Anwendungsbereiche, Aufwand und Güte der Verfahren

Empirische und regional gültige Formeln					
Verfahren	Anwendungsbereich		Aufwand		Güte der Resultate
	T [a]	EZG-Fläche [km ²]	zeitlich	finanziell	Schwankungsbreite
Hüllkurve nach Wundt	100	keine Einschränkung	sehr gering	keiner	--
Rationale Methode	10 - 100	1 - 10	mittel	keiner	--

Statistische Verfahren auf der Basis von Abflussdaten - Lokale Ansätze					
Verfahren	Anwendungsbereich		Aufwand		Güte der Resultate
	T [a]	EZG-Fläche [km ²]	zeitlich	finanziell	Schwankungsbreite
HQ-EX	1 - 1'000, selten bis 10'000	10 - 100'000	mittel	gering, Progr.-kosten	Konfidenzintervalle
EXTREM	1 - 1'000, selten PMF	10 - 7'000	mittel	gering, Progr.-kosten	Konfidenzintervalle
IsHoT+W	1 - 200	1 - 100'000	mittel	gering, Progr.-kosten	Konfidenzintervalle
KLUDON	1 - 100	1 - 10'000	hoch	mittel, Progr.-kosten	Konfidenzintervalle
HVERT	1 - 100	1 - 100'000	mittel	gering, Progr. frei	Konfidenzintervalle
HQ _{10 000}	10'000	1 - 500	sehr gering	sehr gering	unbekannt

Statistische Verfahren auf der Basis von Abflussdaten - Regionalhydrologische Ansätze					
Verfahren	Anwendungsbereich		Aufwand		Güte der Resultate
	T [a]	EZG-Fläche [km ²]	zeitlich	finanziell	Schwankungsbreite
HQ-Längsschnitt	1 - 100	1 - 10'000	höher	gering,	10 - 25 %
HQ-REGIO	1 - 100	10 - 5'000	nach Anpassung sehr gering	--	20 %
LfU Baden-Württemberg	1 - 100	10 - 13'000	sehr gering	höher, nicht verkäuflich	30 %
Reg-Ex	100	--	nach Anpassung sehr gering	höher, Programmkosten unbekannt	--
IsHoT+W	1 - 200	10 - 100'000	gering	gering, Progr.-kosten	10 - 25 %

Deterministische Niederschlag-Abfluss-Modelle – Blockmodelle					
Verfahren	Anwendungsbereich		Aufwand		Güte der Resultate
	T [a]	EZG-Fläche [km2]	zeitlich	finanziell	Schwankungsbreite
EGLSYN	1 - 1'000	0,1 - 150	mittel	--	--

Deterministische Niederschlag-Abfluss-Modelle - Flächendetaillierte Modelle					
Verfahren	Anwendungsbereich		Aufwand		Güte der Resultate
	T [a]	EZG-Fläche [km2]	zeitlich	finanziell	Schwankungsbreite
FGM	1 - HQ _{max}	1 - 4'000	mittel	--	30 %
NASIM	1 - HQ _{max}	< 5'000	hoch	--	--
LARSIM / FGMOD	1 - 1'000 selten auch HQ _{max}	10 - 100'000	hoch - sehr hoch	--	--
HYBNAT	1 - HQ _{max}	< 10'000	hoch	--	--
ARC/EGMO	1 - 100	< 5'000	hoch	--	30 %
ASGi	1 - 100	< 10'000	sehr hoch	--	30 %

5 Länderbericht Niederlande

H. Buiteveld

5.1 Einleitung

Die Niederlande sind ein „Waterland“, ein wasserreiches Land, was der Lage im Delta grosser Flüsse wie Rhein und Maas inhärent ist. Das Wasser bringt uns Wohlstand, aber auch Gefahr. Zur Hebung des Wohlstandes und zur Einschränkung der Gefahr versuchen wir schon jahrhundertlang, unsere Fähigkeit zur Wasserkontrolle möglichst gut einzusetzen (ICID 1993). Die Gefahr des Wassers kommt von zwei Seiten, von den Flüssen und vom Meer. Im Rahmen dieses Projektes beschränkt sich dieser Länderbericht auf die Flüsse. Bezüglich der Abschätzung von Hochwasserabflüssen geht es um die Frage, bis zu welchem Abfluss Schutz von Hab und Gut gewährt wird. In Anbetracht der Grösse und Art des potentiellen Überschwemmungsgebietes ist der Bemessungsabfluss ein Parameter von grosser gesellschaftlicher Bedeutung.

Im folgenden Kapitel wird als erstes ein geschichtlicher Überblick über den Hochwasserschutz in den Niederlanden skizziert (nach Bennekom und Parmet 1998). Danach wird die Methodik, mit welcher heute der Bemessungsabfluss des Rheins in den Niederlanden bestimmt wird beschrieben. Insbesondere wird dabei auch auf die problematischen Punkte eingegangen, welche sich bei der Bestimmung des Bemessungsabflusses beim Pegel Lobith ergeben.

5.2 Geschichte des Hochwasserschutzes in den Niederlanden

Die ersten Bewohner der Niederlande siedelten sich vor vielen Tausend Jahren auf den höher gelegenen Böden an. Seit dem Frühmittelalter wurden mehr und mehr Deiche gebaut, um die landwirtschaftlichen Nutzflächen vor zu häufiger Überflutung zu schützen. Schon im 14. Jahrhundert bestand ein geschlossenes Deichringsystem entlang der Flüsse, wodurch das Deichhinterland immer mehr genutzt werden konnte. Regelmässig gab es infolge von unvernünftigen Flussverwaltungen Überschwemmungen. Die Abflussverteilung über die unterschiedlichen Rheinäste spielte eine wichtige Rolle. Seit Anfang des 17. Jahrhunderts hat man sich bemüht, die Abflussverteilung zu verbessern. Massnahmen hatten öfters nicht die gewünschte Wirkung und wurden ausserdem durch Widerstand der beteiligten Städte und Provinzen erschwert, die damals ein bedeutender Machtfaktor waren (Ploeger 1982). Als Rijkswaterstaat 1798 gegründet wurde, wurde die Flussverwaltung zu einem nationalen Interesse. Die wichtigste damalige Aufgabe von Rijkswaterstaat war (und es ist noch immer eine der Kernaufgaben des heutigen Rijkswaterstaat), mittels einer guten Flussverwaltung für trockene Füsse zu sorgen.

Seit 1798 wurde auf zentraler Ebene am Hochwasserschutz gearbeitet, namentlich durch die Regulierung der Flussläufe und die Verstärkung der Deiche. Die Deichhöhe wurde auf der Grundlage des höchsten gemessenen Wasserstandes plus eines Freibords angesetzt. Das Freibord variierte im allgemeinen von 0,8 bis 1 m (Huitema 1947). Diese Methode auf der Grundlage des höchsten gemessenen Wasserstandes wurde bis zum Winter 1952/1953 verwendet. Am 1. Februar 1953 verursachte ein schwerer Sturm aus Nordwesten eine Sturmflut, die viele Deichbrüche zur Folge hatte. Insgesamt kamen 1'800 Menschen ums Leben und der Sachschaden war enorm. Nach drei Wochen war die Deltakommission eingesetzt und an die Arbeit gegangen. Es ging um die Frage, wie die Wiederholung einer solchen Katastrophe zu verhindern sei. Die Kommission begründete das heutige Schutzniveau in den Niederlanden, welches nicht länger auf den Höchstwasserständen, sondern auf der Überschreitungswahrscheinlichkeit sogenannter Bemessungswasserstände basiert.

Für die Niederlande wurde die Überschreitungswahrscheinlichkeit oder die Sicherheitsnorm nicht konstant vorgegeben. Das Flussgebiet im Osten der Niederlande erhielt ein tieferes Schutzniveau als der dicht besiedelte Westen. Ein wichtiger Grund dafür war das Risiko für die Bevölkerung. Die Warnzeit im Fall einer Sturmflut ist erheblich kürzer als jene bei einem

Hochwasserereignis in den Flüssen. Ein anderer wichtiger Grund war der Umfang der zu erwartenden Schäden. Die heutige Norm gründet auf einer mittleren jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von 1/1'250 an den Flüssen und bis zu 1/10'000 im Westen des Landes (vgl. Abb. 5.1). Bei den Flüssen mit Gezeiteneinfluss ist der Abfluss der wichtigste Faktor für die Bestimmung der Bemessungswasserstände. Die Wasserstände werden aufgrund des 1'250jährigen Abflusses ermittelt. Mit einem Zuschlag für Wellenschlag, Setzung des Deichkörpers und Bodensenkung, wird die endgültige Deichhöhe ermittelt. Seit 1996 werden die Sicherheitsnormen im Gesetz über Wasserschutzbauwerke festgelegt. Darin steht auch, dass der Hochwasserschutz in fünfjährlichem Turnus überprüft werden muss und die Bemessungsvorgaben alle fünf Jahre erneut festgelegt werden müssen. Der Minister legt sie in sogenannten „Rahmenbedingungsbüchern“ fest.

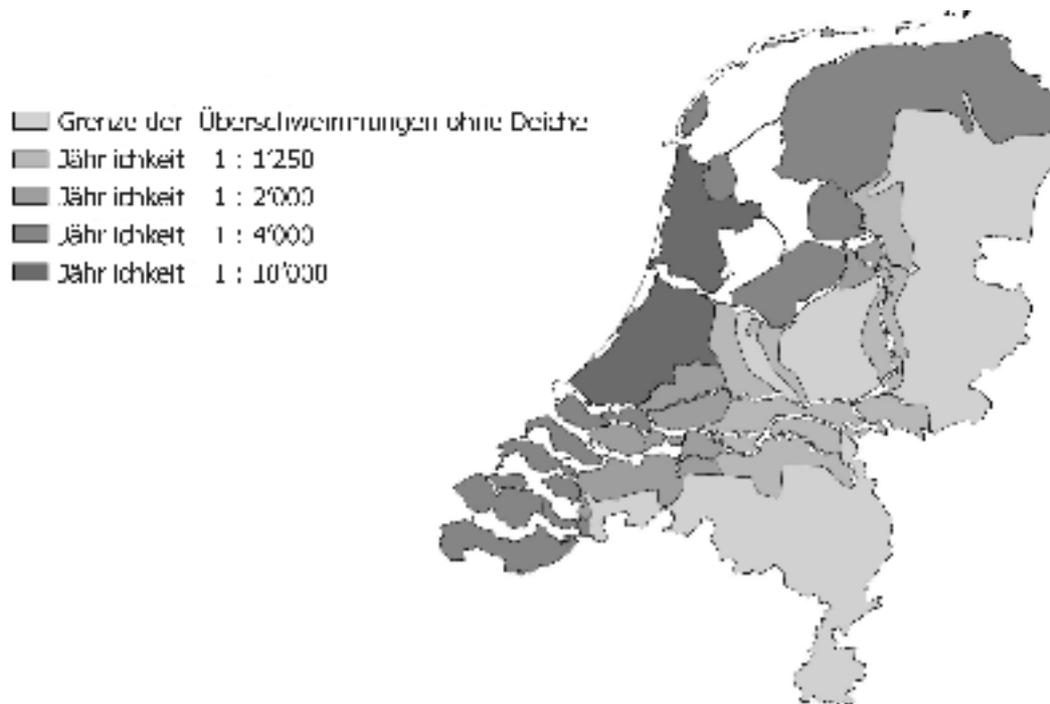


Abb. 5.1 Deichringe und Jährlichkeiten.

Bemessungsabfluss

Im Hinblick auf die grossen gesellschaftlichen Folgen sind Änderungen des Bemessungsabflusses unerwünscht. Jedoch, seit Einführung der auf Überschreitungswahrscheinlichkeit begründeten Methodik, hat sich der Bemessungsabfluss oftmals geändert. Neue Einsichten in Bezug auf Normfestsetzung, aber auch in Bezug auf die zu verwendenden Verfahren, haben eine wichtige Rolle gespielt. Auch die Natur, entweder durch den Menschen beeinflusst oder nicht, hat dazu beigetragen.

Der Bemessungsabfluss wurde 1956 zum ersten Mal ermittelt. Mit den vorhandenen Abflussreihen wurde eine Extrapolation zu einem 3'000jährigen Hochwasser aufgrund der logarithmischen Verteilungsfunktion durchgeführt. Der Bemessungsabfluss bei Lobith wurde damals auf 18'000 m³/s festgelegt. Der damalige Minister für Verkehr, Wasserwirtschaft und Öffentliche Arbeiten hielt diesen Bemessungsabfluss für einen „sehr sicheren Ausgangspunkt“. Aufgrund dieses Abflusses wurden Deichverstärkungen entworfen und durchgeführt. Diese Arbeiten waren umfangreich, weil die Deiche ursprünglich für einen Höchstabfluss von 12'600 m³/s gebaut worden waren. In der Gesellschaft wuchs der Widerstand, was zu Verzögerungen im Deichverstärkungsprogramm führte.

Deshalb wurde 1975 eine Sonderkommission gegründet, die Kommission Flussdeiche, auch als Kommission Becht bezeichnet. Ihre Empfehlung war, dass statt einer mittleren jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von $1/3'000$, eine Wahrscheinlichkeit von $1/1'250$ ein gutes Schutzniveau für das Flussgebiet war. Der Minister für Verkehr, Wasserwirtschaft und Öffentliche Arbeiten übernahm diesen Vorschlag. Man widmete der Absicherung des Bemessungsabflusses viel mehr Aufmerksamkeit als im Jahre 1956. Literaturstudien, Beratungen mit Sachverständigen in Deutschland und in der Schweiz und eine Homogenitätsuntersuchung der Daten führte zur Schlussfolgerung, dass am Pegel Lobith kein deutlicher Einfluss infolge von Einzugsgebietseingriffen oder Klimaänderungen zu spüren war. Nach den damaligen Erkenntnissen wurde zur Darstellung der Spitzenabflüsse in Lobith aus sechs Verteilungen die linear-exponentielle Verteilungsfunktion als die Bestgeeignete betrachtet (Rijkswaterstaat 1976). Der Bemessungsabfluss, mit einer mittleren Wiederkehrperiode von $1'250$ Jahren, wurde aufgrund der Zeitreihe 1901-1975 auf $16'500 \text{ m}^3/\text{s}$ festgelegt. Auch wurde ein Zuverlässigkeitsintervall festgesetzt. Die 95 %-Obergrenze für den Bemessungsabfluss betrug $19'050 \text{ m}^3/\text{s}$, mit einer Bandbreite von etwa 15 %. Diese grosse Unsicherheit ist der statistischen Extrapolation der relativ kurzen Zeitreihe inhärent. Ausserdem ist die Homogenität der Zeitreihe nicht optimal, und daher ist die richtige Häufigkeitsverteilung nicht bekannt. Es ist interessant, dass der ursprüngliche Bemessungsabfluss von $18'000 \text{ m}^3/\text{s}$ gut in das 95 %-Vertrauensintervall passt (vgl. Abb. 5.2).

Dieser erste Sprung im Bemessungsabfluss war nicht der letzte. Das Niederwassergerinne erwies sich als rauher als erwartet, so dass die Reduktion des Bemessungsabflusses nicht auch eine Reduzierung der erforderlichen Deichhöhe zur Folge hatte. Die Deiche mussten sogar noch erhöht werden. Die Deichverstärkungen stiessen nach wie vor auf grossen gesellschaftlichen Widerstand. Deshalb machte sich 1992 die Kommission zur Prüfung der Ausgangspunkte für Flussdeichverstärkungen (Kommission Boertien) an die Arbeit. Diese Kommission hat den Bemessungsabfluss erneut eingehend analysiert. Die Sicherheitsnorm blieb unverändert, aber der Bemessungsabfluss wurde aufgrund von Extrapolationen mit drei unterschiedlichen Häufigkeitsverteilungen (Gumbel, Pearson III, log-normal) und der längeren Zeitreihe (1901-1990) neu geschätzt.

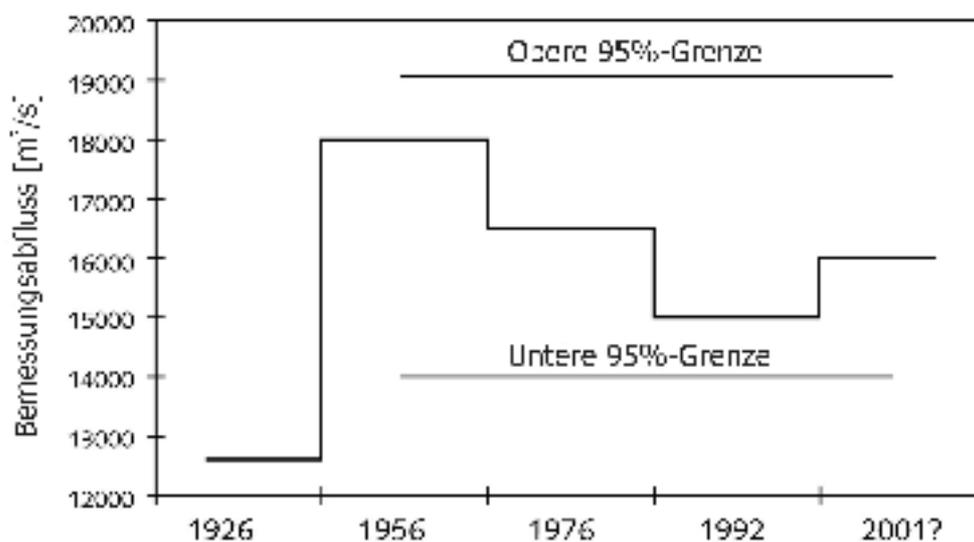


Abb. 5.2 Sprünge beim Bemessungsabfluss Lobith.

Nicht nur in dieser Hinsicht wurde die Methodik angepasst. Im Gegensatz zur Arbeit der Kommission Becht ergaben sich neue Erkenntnisse, insbesondere aus der Hochwasser Studienkommission. Diese Kommission wies nach, dass die Flussbauwerke am Oberrhein eine Erhöhung der Abflussspitzen in Lobith bewirkten. Aufgrund einer Analyse wurde für diese Flussbauwerke eine erhöhende Wirkung des Bemessungsabflusses um $1'000 \text{ m}^3/\text{s}$ angenommen.

Unter Berücksichtigung der vorgesehenen Massnahmen zur Hochwasserrückhaltung wurde jedoch lediglich von einer Erhöhung des Bemessungsabflusses um $500 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgegangen. Entsprechend kam man zu einem neuen Bemessungsabfluss von $15'000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Verkeer en Waterstaat 1993). Das Problem einer kurzen Messreihe und deren Homogenität soll in einem weiteren Schritt, basierend auf einem statistischen Niederschlagsgenerator und einem hydrologisch/hydraulischen Modell für das Rheingebiet, angegangen werden (Parmet et al. 1999).

Ein wesentliches Problem ist dabei die Genese von Hochwasserereignissen. Erwartet wird, dass der Niederschlagsgenerator mehr Einsichten in das Geneseproblem liefert, insbesondere auch in Hinblick auf mögliche Klimaveränderungen und deren Auswirkungen auf die Abflussverhältnisse im Rhein. Zugleich wird auf eine Methode hingearbeitet, die auch Überschwemmungsgefahren einbezieht. Ein solches Verfahren bietet die Möglichkeit, nicht nur Bemessungswasserstände, sondern auch andere Aspekte bei der Festlegung des Sicherheitsniveaus, wie Deichbruchgefahr und Hochwasserschäden zu berücksichtigen. Dies bedeutet, dass nicht nur die Höhe, sondern auch die Dauer einer Abflusswelle sowie deren Unsicherheiten in Höhe und Dauer mitberücksichtigt werden müssen. Dieses Verfahren bietet zudem die Möglichkeit eines Vergleichs mit anderen Sicherheitsrisiken, beispielsweise mit dem von Flugzeugkatastrophen oder mit dem von Störfällen in Chemiewerken.

5.3 Hochwasserabschätzung $HQ_{1\cdot250}$ in den Niederlanden

Seit 1996 werden die Sicherheitsnormen für den Hochwasserschutz in den Niederlanden gesetzlich festgelegt (Gesetz über Wasserschutzbauwerke). Darin ist vorgesehen, dass der bestehende Hochwasserschutz fünfjährlich neu zu ermitteln ist; die Bemessungsvorgaben werden danach gegebenenfalls erneut festgelegt. Hierzu gibt der Minister sogenannte Rahmenbedingungsbücher heraus. Die Norm für die Flussgebiete ohne Gezeiteneinfluss besteht in einer mittleren jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von $1/1'250$. Der Bemessungsabfluss ist der hauptsächlich bestimmende Wert für die mit einer 2-dimensionalen Wasserspiegellagenberechnung zu ermittelnden Bemessungswasserstände. Mit Zuschlägen für Wellenschlag, Setzung des Deichkörpers und Bodensenkung wird die endgültige Deichhöhe festgelegt. Der ($1'250$)jährliche Bemessungsabfluss wird statistisch ermittelt aus einer Zeitreihe, der am Pegel Lobith gemessenen Scheitelabflüsse, unter Verwendung von theoretischen Verteilungsfunktionen (Parmet und Langemheen 2000).

Die Inhomogenität der Daten des Pegels Lobith infolge des Ausbaus des Oberrheins wird berücksichtigt. Anhand von Modellhochwassern wird untersucht, welchen Effekt die Ausbaumassnahmen bei einem Abfluss von HQ_{200} haben (Lammersen et al. 2000). Anhand dieser Erkenntnisse wird die Zeitreihe des Pegels bei Lobith auf den Zustand 1977 homogenisiert und einer statistischen Analyse unterzogen.

Der Bemessungsabfluss wird unter Anwendung vier unterschiedlicher Verteilungsfunktionen (Gumbel, Pearson III, Lognormal, Exponentialverteilung) ermittelt. Mit der Wahl der Verteilungsfunktion wird allerdings zu einem Teil auch die Art der Zeitreihe festgelegt. Die drei erstgenannten Verteilungsfunktionen sind geeignet für die Verwendung von Jahresmaxima. In den Niederlanden werden dazu die Höchstabflüsse der hydrologischen Jahre gewählt. Für die Exponentialverteilung werden Scheitelwerte benutzt. Das Programm HYMOS von DelftHydraulics wird zur Anpassung der Daten an die statistischen Verteilungen verwendet.

Anwendungsbereiche, Erfahrungen

Weil nicht klar ist, welche Verteilungsfunktion am besten geeignet ist, hat man sich für die Verwendung von 4 statistischen Verteilungsfunktionen entschieden. Die Gumbelverteilung (extreme value type 1) gibt eine gute Anpassung an Abflüsse über $7'000 \text{ m}^3/\text{s}$. Abflüsse unterhalb dieses Wertes werden in diesem Fall nicht berücksichtigt. Der genannte Schwellenwert wurde visuell festgelegt. Für die Pearson III und die Log-normal-Verteilung gelten keine Schwellenwerte. Das $HQ_{1\cdot250}$ bei Lobith wird als Mittelwert der vier genannten Verteilungen festgelegt (vgl. Tab. 5.1 und Abb. 5.3 bis 5.6).

Tab. 5.1 Resultate der statistischen Verteilungsfunktionen für den Pegel Lobith nach der Methode Boertien II (Parment et al. 2000).

Jährlichkeit [Jahr]	Pearson III	Lognormal	Gumbel $Q_0 = 7'000$	Exponential	Mittelwert	Vertrauensintervall (95 %)	
						untere Grenze	obere Grenze
25	10'766	10'715	10'838	10'973	10'823	9'720	11'900
50	11'644	11'583	11'910	12'063	11'800	10'420	13'170
100	12'469	12'402	12'974	13'153	12'750	11'070	14'430
250	13'497	13'430	14'374	14'594	13'974	11'880	16'090
500	14'240	14'177	15'432	15'685	14'884	12'470	17'340
1'000	14'957	14'904	16'488	16'775	15'781	13'050	18'580
1'250	15'183	15'134	16'828	17'126	16'068	13'230	18'980
2'500	15'873	15'840	17'885	18'216	16'954	13'780	20'220
5'000	16'546	16'533	18'941	19'306	17'832	14'330	21'470
10'000	17'205	17'215	19'997	20'396	18'703	14'860	22'710

Q_0 = Schwellenwert bei der Gumbel-Verteilung [m^3/s]

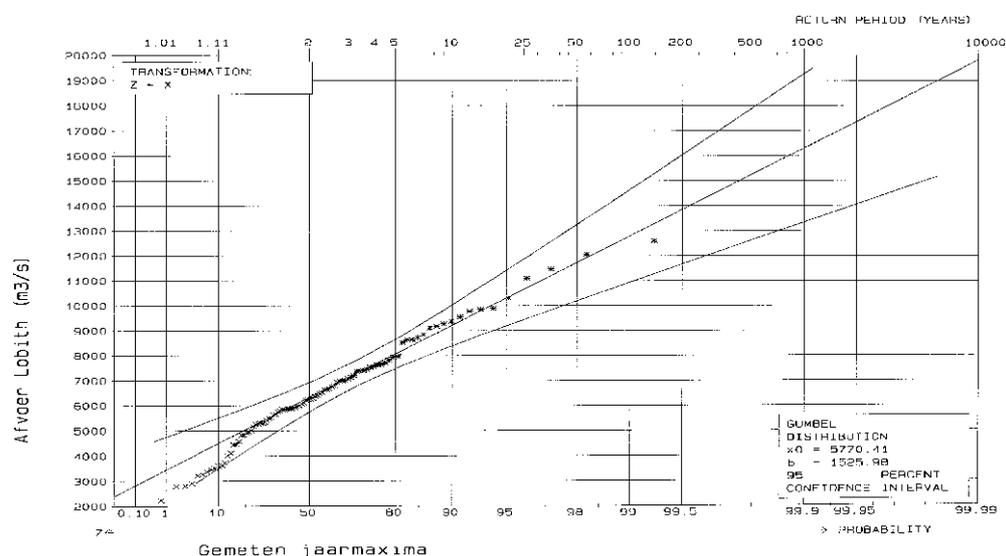


Abb. 5.3 Frequenzverteilung für Jahresmaxima mit der Gumbel-Verteilung mit einem Schwellenwert von $7'000 m^3/s$.

Notwendiger Input

Die Methode zur Bestimmung des $HQ_{1'250}$ ist ein statistisches Verfahren. Die benötigten Daten sind abgeleitet von der Zeitreihe (1901 bis 1998) der Scheitelabflüsse beim Pegel Lobith. Verwendet werden Jahresmaxima (von hydrologischen Jahren) oder partielle Serien von Abflüssen. Es ist notwendig, dass die Zeitreihe homogenisiert wird.

Aufwand

Die Methode zur Bestimmung des Bemessungsabflusses in den Niederlanden ist sehr arbeitsintensiv. Alle 5 Jahre muss der Bemessungsabfluss festgelegt werden. Die Zeit für die ganze Festlegung beträgt etwa 2 bis 3 Jahre. Hierin miteinbezogen sind die statistische Analyse, die Homogenisierung der Datenreihe und die 2-dimensionale Wasserstandsberechnung in den Rheinästen in den Niederlanden.

Güte der Resultate

Einen 1*250jährigen Abfluss aus einer Zeitreihe von nur knapp 100 Jahren ableiten zu müssen, ist problematisch. Die Bestimmung des Bemessungsabflusses basiert darum auf mehreren statistischen Extremwertverteilungen. Die benutzten Verteilungen sind mit dem Vertrauensintervall grafisch abgebildet (vgl. Abb. 5.4 bis 5.6). Das HQ_{1*250} wird als Mittelwert der vier Verteilungen festgelegt. In Tabelle 5.1 sind die Resultate und das 95 %-Vertrauensintervall aufgelistet.

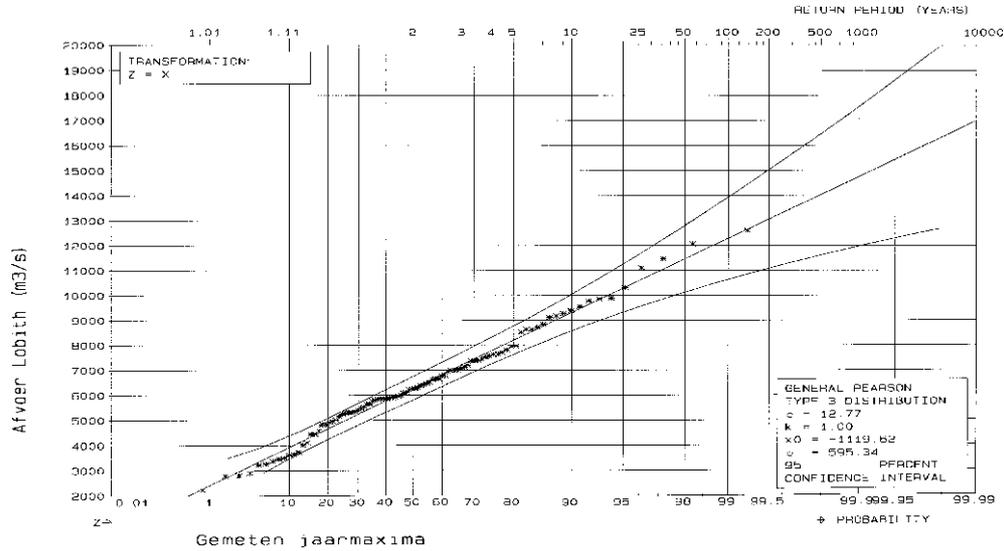


Abb. 5.4 Frequenzverteilung für Jahresmaxima mit der Pearson III-Verteilung.

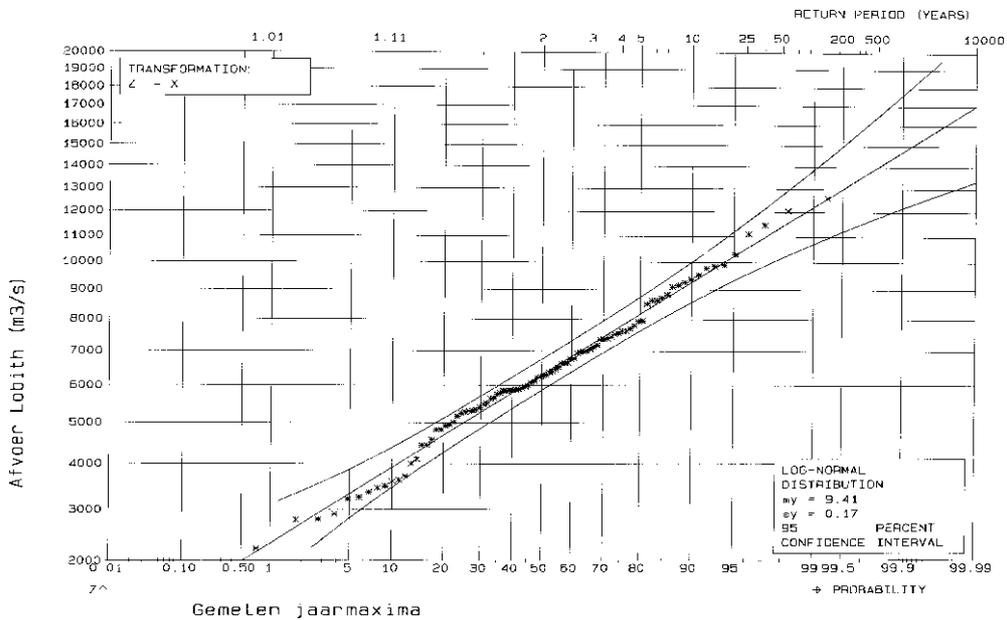


Abb. 5.5 Frequenzverteilung für Jahresmaxima mit der Lognormal-Verteilung.

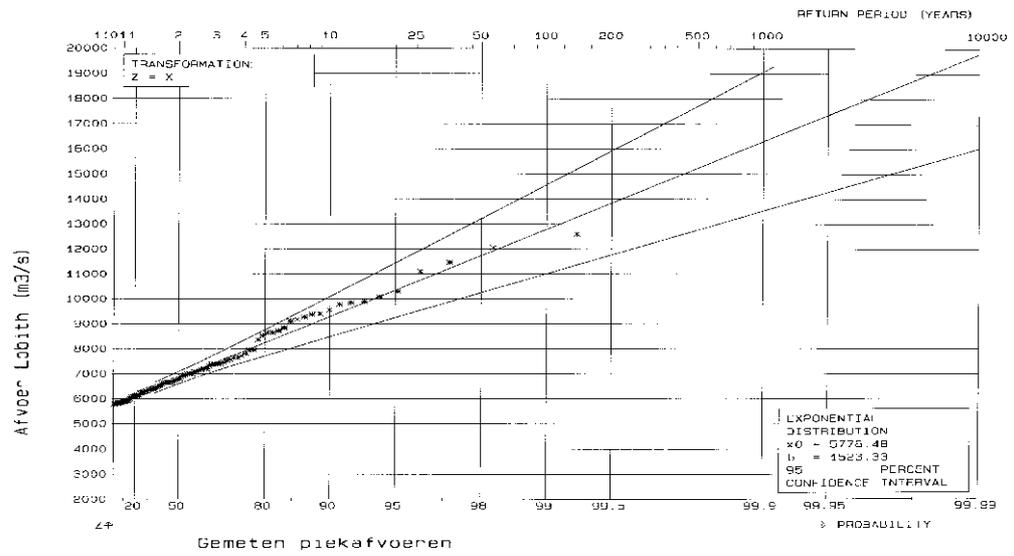


Abb. 5.6 Frequentzverteilung für Scheitelabflüsse mit der Exponential-Verteilung.

Literatur

- van Bennekom, A., Parmet B.W.A.H. (1998):** Bemessungsabfluss in den Niederlanden – menschliche Einflüsse und andere Unsicherheiten. BfG Mitteilungen 16:125-131, Koblenz.
- Huitema, T. (1947):** Dijken. Amsterdam.
- ICID (1993):** Man-made lowlands: history of water management and land reclamation in the Netherlands. Utrecht.
- Lammersen, R., Busch, N., Engel, H. (2000):** Einfluss der geplanten Retentionsmassnahmen an Ober- und Niederrhein auf extreme Abflüsse am Niederrhein. BFG-1221, Koblenz.
- Parmet, B.W.A.H., Buishand, T.A., Brandsma, T., Mülders, R. (1999):** Design discharge of the large rivers in the Netherlands, towards a new methodology. IAHS General Assembly, Birmingham.
- Parmet, B.W.A.H., v.d. Langemheen, H., Chbab, H., Kwadijk, J., Diermanse, F., Klopstra, D. (2000):** Analyse van de maatgevende afvoer van de Rijn te Lobith. RIZA rapport 2000.xxx, Arnhem.
- Parmet, B.W.A.H., Langemheen, W. (2000):** Hochwasserstatistik. Ermittlungen in den Niederlanden. RIZA, Beitrag zum Abschlussbericht der Hochwasserstudiengruppe für den Rhein in Nordrhein-Westphalen, Arnhem.
- Ploeger, B. (1982):** Bouwen aan de Rijn. Rijkswaterstaat serie, nr. 53.
- Rijkswaterstaat (1976):** Overschrijdingskansen van uitzonderlijke hoge Bovenrijnafvoeren. Rijkswaterstaat, nota 76.13.
- Verkeer en Waterstaat (1993):** Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterkingen, deelrapport 2: maatgevende belastingen. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.

CHR/KHR (1978): Das Rheingebiet, Hydrologische Monographie. Staatsuitgeverij, Den Haag/ Le bassin du Rhin. Monographie Hydrologique. Staatsuitgeverij, La Haye. ISBN 90-12017-75-0. Nicht mehr lieferbar.

Berichte der KHR**Rapports de la CHR**

- I-1 GREBNER, D. (1982): Objektive quantitative Niederschlagsvorhersagen im Rheingebiet. Stand 1982 (nicht mehr lieferbar) / Prévisions objectives et quantitatives des précipitations dans le bassin du Rhin. Etat de la question en 1982 (édition épuisée)
- I-2 GERHARD, H.; MADE, J.W. VAN DER; REIFF, J.; VREES, L.P.M. DE (1983): Die Trocken- und Niedrigwasserperiode 1976. (2. Auflage 1985) / La sécheresse et les basses eaux de 1976. (2ème édition, 1985). ISBN 90-70980-0 1 -0
- I-3 HOFIUS, K. (1985): Hydrologische Untersuchungsgebiete im Rheingebiet / Bassins de recherches hydrologiques dans le bassin du Rhin. ISBN 90-70980-02-9
- I-4 BUCK, W.; KIPGEN, R.; MADE, J.W. VAN DER; MONTMOLLIN, F. DE; ZETTL, H.; ZUMSTEIN, J.F. (1986): Berechnung von Hoch- und Niedrigwasserwahrscheinlichkeit im Rheingebiet / Estimation des probabilités de crues et d'étiages dans le bassin du Rhin. ISBN 90-70980-03-7
- I-5 TEUBER, W.; VERAART, A.J. (1986): Abflussermittlung am Rhein im deutsch-niederländischen Grenzbereich / La détermination des débits du Rhin dans la région frontalière germano-hollandaise. ISBN 90-70980-04-5
- I-6 TEUBER, W. (1987): Einfluss der Kalibrierung hydrometrischer Messflügel auf die Unsicherheit der Abflussermittlung. Ergebnisse eines Ringversuchs / Influence de l'étalonnage des moulinets hydrométriques sur l'incertitude des déterminations de débits. Résultats d'une étude comparative. ISBN 90-70980-05-3
- I-7 MENDEL, H.-G. (1988): Beschreibung hydrologischer Vorhersagemodelle im Rheineinzugsgebiet / Description de modèles de prévision hydrologiques dans le bassin du Rhin. ISBN 90-70980-06-1
- I-8 ENGEL, H., SCHREIBER, H.; SPREAFICO, M., TEUBER, W.; ZUMSTEIN, J.F. (1990): Abflussermittlung im Rheingebiet im Bereich der Landesgrenzen / Détermination des débits dans les régions frontalières du bassin du Rhin. ISBN 90-70980-10-x
- I-9 CHR/KHR (1990): Das Hochwasser 1988 im Rheingebiet / La crue de 1988 dans le bassin du Rhin. ISBN 90-70980-11-8
- I-10 NIPPES, K.-R. (1991): Bibliographie des Rheingebietes / Bibliographie du bassin du Rhin. ISBN 90-70980-13-4
- I-11 BUCK, W.; FELKEL, K.; GERHARD, H., KALWEIT, H.; MALDE, J. VAN; NIPPES, K.-R., PLOEGER, B., SCHMITZ, W. (1993): Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen - Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft / Le Rhin sous l'influence de l'homme - Aménagement, navigation, gestion des eaux. ISBN 90-70980-17-7
- I-12 SPREAFICO, M.; MAZIJK, A. VAN (Red.) (1993): Alarmmodell Rhein. Ein Modell für die operationelle Vorhersage des Transportes von Schadstoffen im Rhein. ISBN 90-70980-18-5
- I-13 SPREAFICO, M., MAZIJK, A. VAN (red.) (1997): Modèle d'alerte pour le Rhin. Un modèle pour la prévision opérationnelle de la propagation de produits nocifs dans le Rhin. ISBN 90-70980-23-1
- I-14 EMMENEGGER, CH. et al. (1997): 25 Jahre KHR. Kolloquium aus Anlass des 25jährigen Bestehens der KHR / 25 ans de la CHR. Colloque à l'occasion du 25e anniversaire de la CHR. ISBN 90-70980-24-x
- I-15 ENGEL, H. (1997): Fortschreibung der Monographie des Rheingebietes für die Zeit 1971-1990 / Actualisation de la Monographie du Bassin du Rhin pour la période 1971-1990. ISBN 90-70980-25-8
- I-16 GRABS, W. (ed.) (1997): Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. ISBN 90-70980-26-6
- I-17 ENGEL, H. (1999): Eine Hochwasserperiode im Rheingebiet. Extremereignisse zwischen Dez. 1993 und Febr. 1995. ISBN 90-70980-28-2

I-18 KOS, Th.J.M.; SCHEMMER, H.; JAKOB, A. (2000): Feststoffmessungen zum Vergleich von Messgeräte und Messmethoden im Rhein, 10-12 März 1998. ISBN 90-36953-54-5

Katalog/Catalogue 1 SPROKKEREEF, E. (1989): Verzeichnis der für internationale Organisationen wichtigen Messstellen im Rheingebiet / Tableau de stations de mesure importantes pour les organismes internationaux dans le bassin du Rhin. ISBN 90-70980-08-8

Berichte unter der Schirmherrschaft der KHR

Rapports sous l'égide de la CHR

II-1 MADE, J.W. VAN DER (1982): Quantitative Analyse der Abflüsse (nicht mehr lieferbar) / Analyse quantitative des débits (édition épuisée)

II-2 GRIFFIOEN, P.S. (1989): Alarmmodell für den Rhein / Modèle d'alerte pour le Rhin. ISBN 90-70980-07-x

II-3 SCHRÖDER, U. (1990): Die Hochwasser an Rhein und Mosel im April und Mai 1983 / Les crues sur les bassins du Rhin et de la Moselle en avril et mai 1983. ISBN 90-70980-09-6

II-4 MAZIJK, A. VAN; VERWOERDT, P., MIERLO, J. VAN, BREMICKER, M.; WIESNER, H. (1991): Rheinalarmmodell Version 2.0 - Kalibrierung und Verifikation / Modèle d'alerte pour le Rhin version 2.0 - Calibration et vérification. ISBN 90-70980-12-6

II-5 MADE, J.W. VAN DER (1991): Kosten-Nutzen-Analyse für den Entwurf hydrometrischer Messnetze / Analyse des coûts et des bénéfices pour le projet d'un réseau hydrométrique. ISBN 9070980-14-2

II-6 CHR/KHR (1992): Contributions to the European workshop Ecological Rehabilitation of Floodplains, Arnhem, The Netherlands, 22-24 September 1992. ISBN 90-70980-15-0

II-7 NEMEC, J. (1993): Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation of the dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales. ISBN 90-70980-16-9

II-8 MENDEL, H.-G. (1993): Verteilungsfunktionen in der Hydrologie. ISBN 90-70980-19-3

II-9 WITTE, W., KRAHE, P.; LIEBSCHER, H.-J. (1995): Rekonstruktion der Witterungsverhältnisse im Mittelrheingebiet von 1000 n. Chr. bis heute anhand historischer hydrologischer Ereignisse. ISBN 90-70980-20-7

II-10 WILDENHAHN, E.; KLAHOLZ, U. (1996): Grobe Speicherseen im Einzugsgebiet des Rheins. ISBN 90-70980-21-5

II-11 SPREAFICO, M., LEHMANN, C., SCHEMMER, H.; BURGDORFFER, M.; KOS, T.L. (1996): Feststoffbeobachtung im Rhein, Beschreibung der Messgeräte und Messmethoden. ISBN 90-70980-22-3

II-12 SCHÄDLER, B. (Red.) (1997): Bestandsaufnahme der Meldesysteme und Vorschläge zur Verbesserung der Hochwasservorhersage im Rheingebiet. Schlussbericht der IKSAR-Arbeitsseinheit 'Meldesysteme / Hochwasservorhersage' - Projektgruppe 'Aktionsplan Hochwasser' / Annonce et prévision des crues dans le bassin du Rhin. Etat actuel et propositions d'amélioration. Rapport final de l'unité de travail 'Systèmes d'annonce / prévision des crues' - Groupe de projet 'Plan d'action contre les inondations'. ISBN 90-70980-27-4

II-13 DRÖGE, B., HENOCH, H.; KELBER, W.; MAHR, U.; SWANENBERG, T.; THIELEMANN, T., THURM, U. (1999): Entwicklung eines Längsprofils des Rheins. Bericht für die Musterstrecke von Rhein-km 800 - 845. Arbeitsgruppe 'Sedimenttransport im Rhein' Projekt 3. ISBN 90-70980-29-0

II-14 MAZIJK, A. VAN; LEIBUNDGUT, CH.; NEFF, H.-P. (1999): Rhein-Alarm-Modell Version 2. 1. Erweiterung um die Kalibrierung von Aare und Mosel. Kalibrierungsergebnisse von Aare und Mosel aufgrund der Markierversuche 05/92, 11/92 und 03/94. ISBN 90-70980-30-4

II-15 KWADIJK, J.; DEURSEN, W. VAN (1999): Development and testing of a GIS based water balance model for the Rhine drainage basin. ISBN 90-70980-31-2

II-16 MAZIJK, A. VAN; GILS, J.A.G. VAN; WEITBRECHT, V.; VOLLSTEDT, S. (2000): ANALYSE und EVALUIERUNG der 2D-MODULE zur Berechnung des Stofftransportes in der Windows-Version des RHEINALARMMODELLS in Theorie und Praxis. ISBN 90-36953-55-3

INFORMATIONEN ÜBER DIE KHR

Die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR)

Die KHR ist eine Organisation, in der wissenschaftliche Institutionen der Rheinanliegerstaaten gemeinsam hydrologische Grundlagen für die nachhaltige Entwicklung im Rheingebiet erarbeiten.

Mission und Aufgaben der KHR sind

- Erweiterung der Kenntnisse über die Hydrologie des Rheingebietes durch:
 - gemeinsame Untersuchungen
 - Austausch von Daten, Methoden und Informationen
 - Entwicklung standardisierter Verfahren
 - Veröffentlichungen in einer eigenen Schriftenreihe
- Beiträge zur Lösung von grenzüberschreitenden Problemen durch die Entwicklung, Verwaltung und Bereitstellung von:
 - Informationssystemen (KHR-Rhein-GIS)
 - Modellen, wie z.B. Wasserhaushaltsmodelle und das Rhein-Alarmmodell

Die Länder, die sich daran beteiligen, sind

die Schweiz, Österreich, Deutschland, Frankreich, Luxemburg und die Niederlande.

Beziehung zur UNESCO und WMO

Die KHR wurde 1970 anlässlich der UNESCO-Empfehlung zur Förderung einer engeren Zusammenarbeit in internationalen Flussgebieten gegründet. Seit 1975 erfolgt die Fortsetzung der Arbeiten im Rahmen des Internationalen Hydrologischen Programms (IHP) der UNESCO und des Operationellen Hydrologischen Programms (OHP) der WMO.

Auszug aus den KHR-Aktivitäten für das Jahr 2001

Hochwasser

Das Projekt „Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen“ soll dazu beitragen, ein Werkzeug bereitzustellen, das es erlaubt, das im Hinblick auf verfügbare Messungen optimale Modell bzw. die geeignetste Modellkombination zu identifizieren.

Mit dem Projekt „DEFLOOD“ wird ein Beitrag zur Unterstützung des nachhaltigen Hochwassermanagements geleistet. Es zielt darauf ab, anhand von Referenzhochwassern Methoden für die Analyse der Wirksamkeit von Massnahmen zur Hochwasserrückhaltung im Rheineinzugsgebiet zu entwickeln.

Sediment

Sedimentation und Erosion können zu Problemen hinsichtlich der Fahrwassertiefe für die Schifffahrt, zu Austrocknung sowie zu einer Unterhöhlung von Fundamenten, Schädigung der Natur und Beeinträchtigung der Landschaftswerte führen. Die KHR-Untersuchungen richten sich im Jahr 2001 auf die Untersuchung von morphologischen Modellen, die im Rheineinzugsgebiet eingesetzt werden.

Rhein-GIS

Das geographische Informationssystem ist eine Datenbank des Rheineinzugsgebietes mit digitalisierten geographischen und hydrologischen Kenngrößen. Diese Datenbank umfasst auch meteorologische Zeitreihen. Das Rhein-GIS der KHR wird bei stets mehr Untersuchungen, bei denen die KHR als Partner fungiert, eingesetzt. Das System wird 2001 um neue Klimadaten erweitert und mit einer anwenderfreundlichen Benutzeroberfläche versehen.

Das Rhein-Alarmmodell sagt bei Schadstoffeinleitungen den Verlauf der Verunreinigung vorher. Die Anwenderfreundlichkeit und Zuverlässigkeit des Modells wurde neulich in Zusammenarbeit mit den niederländischen Anwendern des Modells erheblich verbessert.

Nähere Informationen über die KHR finden Sie auf der Website: www.chr-khr.org

La Commission internationale pour l'Hydrologie du bassin de Rhin (CHR)

La CHR est une organisation regroupant les instituts scientifiques des Etats riverains du Rhin dans le but d'établir des bases hydrologiques pour un développement durable dans le bassin du Rhin.

Mission et tâches de la CHR

- Elargir les connaissances sur l'hydrologie du bassin versant du Rhin par le biais:
 - de la recherche commune
 - de l'échange de données, méthodes et information
 - du développement de procédures normalisées
 - de publications dans les séries CHR
- Contribuer à la résolution de problèmes transfrontaliers par la réalisation, la gestion et la mise à disposition de:
 - systèmes d'information (SIG Rhin CHR)
 - modèles, par exemple des modèles de gestion des eaux et le Modèle d'Alarme pour le Rhin

Les pays suivants apportent leur collaboration

la Suisse, l'Autriche, l'Allemagne, la France, le Luxembourg et les Pays-Bas.

Relation avec l'UNESCO et l'OMM

La CHR a été fondée en 1970 sur la recommandation de l'UNESCO en vue de favoriser une collaboration plus étroite entre les bassins versants internationaux. Depuis 1975, les activités se poursuivent dans le cadre du Programme Hydrologique International (PHI) de l'UNESCO et du Programme Hydrologique Opérationnel (PHO) de l'OMM.

Sélection des activités de la CHR en 2001

Crues

Le projet „Inventaire des méthodes utilisées pour la détermination des débits de crues dans les bassins versants de taille moyenne“ vise à contribuer au développement d'un instrument permettant de déterminer le modèle optimal ou la combinaison la plus appropriée de modèles à utiliser en fonction des mesures disponibles.

Le projet „DEFLOOD“ contribue à une gestion durable des crues. L'objectif est de développer des méthodes pour analyser l'efficacité des mesures de réduction des niveaux de crues dans le bassin versant du Rhin en se basant sur des crues de référence.

Sédiments

La sédimentation et l'érosion peuvent provoquer des problèmes de profondeur du chenal pour la navigation, de tarissement, d'affaiblissement de fondations, de dommages à la nature et de nuisance aux intérêts paysagers. En 2001, l'étude de la CHR a concentré ses efforts sur les modèles morphologiques qui sont utilisés dans le bassin versant du Rhin.

SIG Rhin

Le Système d'Information Géographique est une base de données pour le bassin versant du Rhin et contient des données de base géographiques et hydrologiques numérisées. Cette base de données comprend aussi des séries temporelles météorologiques. Le SIG Rhin de la CHR est de plus en plus utilisé lors d'études auxquelles participe la CHR. Le système a été enrichi par de nouvelles données climatologiques et a été doté d'une interface utilisateur conviviale.

Le Modèle d'Alarme pour le Rhin prévoit la propagation de la contamination lors de rejets de substances toxiques. Une bonne collaboration avec les utilisateurs du modèle a permis d'améliorer considérablement sa convivialité ainsi que sa fiabilité en 2001.

Pour de plus amples informations sur la CHR, consultez le site Internet: www.chr-khr.org

De Internationale Commissie voor de Hydrologie van het Rijngebied (CHR)

De CHR is een organisatie, waarin de wetenschappelijke instituten van de Rijnsoeverstaten gezamenlijk hydrologische grondslagen voor een duurzame ontwikkeling in het Rijngebied uitwerken.

Missie en taken van de CHR

- Uitbreiden van de kennis over de hydrologie van het Rijnstroomgebied door:
 - gemeenschappelijk onderzoek
 - uitwisseling van gegevens, methoden en informatie
 - ontwikkeling van gestandaardiseerde procedures
 - publicaties in de CHR-reeksen
- Bijdragen aan het oplossen van grensoverschrijdende problemen door het maken, beheren en beschikbaar stellen van:
 - informatiesystemen(CHR Rijn GIS)
 - modellen, b.v. waterhuishoudingsmodellen en het Rijn Alarmmodel

Samenwerkende landen zijn

Zwitserland, Oostenrijk, Duitsland, Frankrijk, Luxemburg en Nederland.

Relatie met UNESCO en WMO

De CHR werd in 1970 opgericht naar aanleiding van een advies van de UNESCO om een nauwere samenwerking tussen internationale stroomgebieden te bevorderen. Sinds 1975 worden de werkzaamheden voortgezet in het kader van het Internationale Hydrologische Programma (IHP) van de UNESCO en van het Operationele Hydrologische Programma (OHP) van de WMO.

Selectie uit CHR-werkzaamheden in 2001

Hoogwater

Het project „Overzicht van toegepaste methoden voor het schatten van hoogwaterafvoeren voor middelgrote stroomgebieden” moet ertoe bijdragen om een instrument te ontwikkelen, waarmee in relatie tot de beschikbaarheid van metingen het optimale model of de meest geschikte combinatie van modellen kan worden bepaald.

Met het project „DEFLOOD” wordt een bijdrage geleverd aan de ondersteuning van duurzaam hoogwatermanagement. Het doel is methoden te ontwikkelen ter analysering van de effectiviteit van maatregelen ter verlaging van hoogwaterstanden in het Rijnstroomgebied op basis van referentie hoogwaters.

Sediment

Sedimentatie en erosie kunnen leiden tot problemen bij de vaargeuldiepte voor de scheepvaart, tot verdroging, ondermijning van fundamenteën, schade aan de natuur en aantasting van de landschappelijke waarden. Het CHR onderzoek concentreert zich in 2001 op bestudering van de morfologische modellen die in het Rijnstroomgebied worden gebruikt.

Rijn GIS

Het Geografische Informatiesysteem is een databank voor het Rijnstroomgebied met gedigitaliseerde geografische en hydrologische basisgegevens. Deze databank omvat ook meteorologische tijdreeksen. Het CHR Rijn-Gis wordt bij steeds meer onderzoeken ingezet, waarbij de CHR partner is. Het systeem werd in 2001 uitgebreid met nieuwe klimaatgegevens en voorzien van een gebruiksvriendelijke user interface.

Het Rijn Alarmmodel voorspelt bij lozingen van schadelijke stoffen het verloop van de verontreiniging. In goede samenwerking met de gebruikers van het model is de gebruiksvriendelijkheid en robuustheid van het model in 2001 aanzienlijk verbeterd.

Meer informatie over de CHR kunt u vinden op de website: www.chr-khr.org

International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR)

The **CHR** is an organisation in which the scientific institutes of the Rhine riparian states develop joint hydrological measures for sustainable development of the Rhine basin.

CHR's mission and tasks

- Acquiring knowledge of the hydrology of the Rhine basin through:
 - joint research
 - exchange of data, methods and information
 - development of standardised procedures
 - publications in the CHR series
- Making a contribution to the solution of cross-border problems through the formulation, management and provision of:
 - information systems (CHR Rhine GIS)
 - models, e.g. models for water management and the Rhine Alarm model

Co-operating countries

Switzerland, Austria, Germany, France, Luxembourg and the Netherlands.

Relationship with UNESCO and WMO

The CHR was founded in 1970 following advice by UNESCO to promote closer co-operation between international river basins. Since 1975, the work has been continued within the framework of the International Hydrological Programme (IHP) of the UNESCO and the Operational Hydrological Programme (OHP) of the WMO.

Selection of CHR activities in 2001

High water

The „Summary of allied processes for estimating high water discharges for meso-scale catchment areas“ project is to contribute to the development of a tool, to identify the best model or combination of models in the context of available measurements.

The „DEFLOOD“ project will contribute to sustainable high water management. The objective is to develop methods for analysing the effectiveness of measures to reduce high waters in the Rhine basin on the basis of high water references.

Sediment

Sedimentation and erosion can lead to problems in the navigable depth for shipping, to dehydration, to undermining of foundations, as well as to damage to nature and the landscape. CHR research in 2001 concentrated on the study of morphological models used in the Rhine catchment area.

Rhine GIS

The Geographical Information System is a database for the Rhine catchment area, holding digitised geographical and hydrological parameters. The database also covers meteorological time series. The CHR Rhine GIS is used in increasingly more studies, to which the CHR is a partner. In 2001, the system was expanded with new climatic data and equipped with a user-friendly GUI.

The Rhine Alarm model forecasts the progress of pollution following the discharge of harmful substances. In co-operation with its users, the model's user friendliness and sturdiness was considerably improved in 2001.

For more information on the CHR, refer to the web site: www.chr-khr.org

KOLOPHON

Publikation der CHR/KHR

Sekretariat, Postfach17

8200 AA Lelystad

Niederlande

Email: info@chr-kh.org

Website: www.chr-khr.org

Übersetzungen: Password Translations, Heino

Drucker: Veenman drukkers, Ede

ISBN: 90-36954-11-8



Secretariaat CHR/KHR
Zuiderwagenplein 2

Postbus 17
8200 AA Lelystad
Niederlande/Pays-Bas