

WIENER MITTEILUNGEN

WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER

Extreme Abflussereignisse: Dokumentation – Bedeutung – Bestimmungsmethoden

Band 206 - Wien 2007

WIENER MITTEILUNGEN

WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER

Band 206

Extreme Abflussereignisse

Dokumentation - Bedeutung - Bestimmungsmethoden

ÖWAV – Seminar
Bundesamtsgebäude Wien
24. - 25. Mai 2007

Herausgeber:
o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Dr.h.c. Dieter Gutknecht
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien

Veranstalter:



Institut für Wasserbau und
Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/223
1040 Wien



Österreichischer Wasser- und
Abfallwirtschaftsverband
Marc-Aurel-Straße 5
1010 Wien

Druck: Riegelnik
Piaristengasse 19
1080 Wien

ISBN: 978-3-85234-098-2

Vorwort

Die extremen Ereignisse der nahen Vergangenheit haben dazu geführt, dass die Frage nach dem Umgang mit solchen Ereignissen neu gestellt wird. Dies hängt mit einer Neuorientierung im Hochwasserschutz zusammen, die ihren Ausdruck findet in Formulierungen wie „Leben mit dem Hochwasser“ (Vischer, 1993), „von der Gefahrenabwehr (und vom Sicherheitsdenken) zur Risikokultur“ (DKKV, 2003), „Integriertes Hochwassermanagement“ (BMLFUW, 2004; Habersack et al., 2005). Die neuen Konzeptionen sind dadurch charakterisiert, dass sie den ganzen Handlungsbogen von den Vorsorgemaßnahmen vor dem Eintreffen des Ereignisses über die Notfallmaßnahmen und den Katastrophenschutz während des Ereignisses bis zu den Nachsorgemaßnahmen nach Ablauf des Ereignisses in einen Risikozyklus einbeziehen.

Für die Ingenieurpraxis bedeutet dies, die entsprechenden Techniken bereitzustellen, um die Konzepte in Planungen in geeigneter Weise umsetzen zu können. Bei Betrachtung der Möglichkeiten aber auch der Grenzen der zur Zeit zur Verfügung stehenden Methoden zur Abschätzung des Hochwasserrisikos (siehe das Buch „Hochwasserrisiken“ von B. Merz, 2006) zeigt sich, dass die Forderung nach einem Hochwasserrisikomanagement sehr ambitiös ist. Dies gilt insbesondere für die Frage nach der Abschätzung des Restrisikos, der im neuen Konzept eine wichtige Rolle zukommt. Die Vorbedingung dafür ist die Möglichkeit, extreme Hochwasserabflüsse mit ausreichender Genauigkeit abschätzen zu können.

Vor eine ähnlich gelagerte Fragestellung sieht sich die Wasserwirtschaft bei der Entwicklung von Konzepten, wie mit dem Auftreten von langen Hitze- und Trockenperioden umzugehen wäre, gestellt. Auch hier bedarf es neuer Methoden und Techniken, die Planungsgrundlagen entsprechend aufzubereiten.

Mit den in diesem Band vereinigten Beiträgen zum Seminar „Extreme Abflussereignisse“ werden einige aktuelle Aspekte in diesem Zusammenhang aufgegriffen. Am Beginn steht die Frage nach der Einordnung der Ereignisse in den geschichtlichen Zusammenhang und nach der Beschaffung von Information über historische Ereignisse. In einem umsetzungsorientierten Block wird die Rolle extremer Ereignisse in Planung und Projektierung behandelt. Der dritte Block ist Beiträgen zu methodischen Fragen zur Bestimmung extremer Ereignisse gewidmet.

Die Veranstalter Österreichischer Wasserwirtschaftsverband und Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie der Technischen Universität würden sich freuen, wenn mit den hier vorgelegten Beiträgen ein kleiner Beitrag zu den Bemühungen um gute Lösungsansätze für die Praxis geleistet werden könnte.

Dieter Gutknecht

Inhaltsverzeichnis

Einführung

- U. Grünwald:* Zur Einbeziehung historischer hydrologischer Extremereignisse – Erfahrungen aus dem Elbegebiet 7
- R. Böhm und I. Auer:* 250 Jahre Klimavariabilität in den Alpen 17

Extreme Ereignisse – Erhebung, Dokumentation, Rekonstruktion

- Ch. Rohr:* Historische Hochwasserforschung: Die Überschwemmungen an der Traun im 15. und 16. Jahrhundert 29
- H. Wiesbauer:* Historische Überflutungen am Kamp 43
- F. Naef:* Extreme Hochwässer verstehen – Beispiele aus der Schweiz 59
- J. Hübl:* Ereignisdokumentation in Wildbächen – Systematik und mögliche Ergebnisse 69

Rolle extremer Ereignisse in Planung und Projektierung

- D. Gutknecht:* Bemessungshochwässer kleiner Auftretenswahrscheinlichkeit – Zur Entwicklung eines Leitfadens zur Ermittlung von Bemessungshochwässern für Talsperren 85
- G. Meon, M. Anhalt, J. Ihringer und J. Höfer:* Risikobasierte Verfahren zur Hochwasserbemessung von Stauanlagen – Übersicht zum laufenden RIMAX-Projekt 101
- B. Merz und A. Thielen:* Die Bedeutung von extremen Ereignissen in der Risikoquantifizierung 117
- R. Godina und F. Nobilis:* Kritische Trocken- und Niederwasserperioden 131
- P. Lorenz:* Hochwasser-Bemessungskenngrößen im Behördenverfahren 147

Bestimmung extremer Abflussereignisse - Methoden

- D. Gutknecht:* Bestimmungsmethoden – Überblick 155
- R. Merz:* Hochwasserstatistik – Das Ausreißerproblem 181
- S. Scherrer:* Hochwasserabschätzung als Synthese von Statistik, Historie und Abflussprozessen 195
- V. Weilguni:* Bemessungsniederschläge – Starkniederschlagsauswertung beim Hydrographischen Dienst 209
- G. Blöschl:* Einsatz von Simulationsmethoden bei der Bestimmung extremer Abflüsse 227
- G. Laaha und G. Blöschl:* Niederwasser – Bestimmungsmethoden 247

ZUR EINBEZIEHUNG HISTORISCHER HYDROLOGISCHER EXTREMEREIGNISSE – ERFAHRUNGEN AUS DEM ELBEGEBIET

Uwe Grünewald

1. Die Verwendung möglichst langer homogener und konsistenter hydrologischer Beobachtungsreihen für die Planung, Bemessung und Bewirtschaftung wasserwirtschaftlicher Systeme ...

Die wasserwirtschaftliche Planungs-, Bemessungs- und Bewirtschaftungspraxis orientiert auf die Nutzung möglichst langer homogener und konsistenter hydrologischer Beobachtungsreihen. Abbildung 1 vermittelt einen Eindruck über die Informationen und Methoden, die aus hydrologischer Sicht dabei zur Unterstützung verwendet werden.

Beobachtungen über hydrologische Abläufe liegen in vielen Teilen Mitteleuropas schon seit mehr als 100 Jahren vor. Bei solchen Reihenlängen lassen sich die Mittelwerte MQ schon relativ gut ableiten bzw. besitzen die jeweiligen „Gewässerkundlichen Hauptzahlen“, z. B. NNQ bzw. HHQ (niedrigster bzw. höchster in der Beobachtungsperiode gemessener Wert) schon eine gewisse Aussagekraft. Auf der Basis von statistischen und stochastischen Analysen können die das Dargebot charakterisierenden Kennwerte abgeleitet und die der Aufgabenstellung entsprechenden Parameter von deterministischen oder stochastischen Simulationsmodellen bestimmt werden.

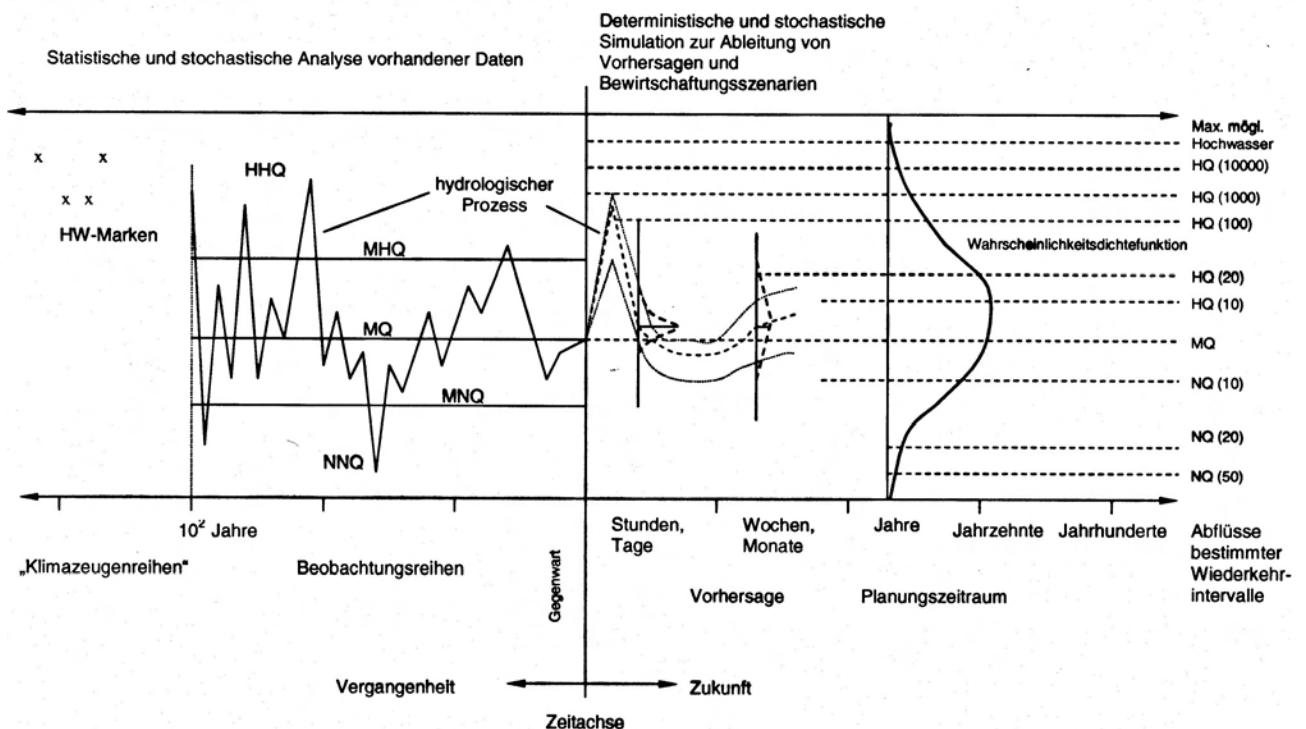


Abb. 1: Hydrologische Informationen für die Unterstützung der Planung, Bemessung und Bewirtschaftung von wasserwirtschaftlichen Systemen (verändert nach Dyck & Peschke, 1995).

Bei der Bemessung wasserwirtschaftlicher Anlagen und Systeme sind deren extreme Belastungen abzuschätzen, die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auftreten können. Je nach Bedeutsamkeit der Anlagen, der von ihnen ausgehenden Gefahren und Risiken usw. sind dabei sehr kleine Überschreitungswahrscheinlichkeiten zu ermitteln. So wird beispielsweise in Deutschland nach der überarbeiteten DIN 19700 (2004) die Betrachtung von Wiederkehrzeiten bis 10.000 Jahren gefordert, welche sehr große Extrapolationen darstellen. Letztlich kommen sie ohne umfassende Daten-Analyseverfahren sowie Überlegungen zur Informationserweiterung nicht aus.

Bei der Bemessung auf der Basis von Jahres-Hochwasserscheitel-Werten $HQ(a)$ dürfte streng genommen unter Verwendung einer Beobachtungsreihe von n Jahren und einem Kollektiv von $n * HQ(a)$ ohne Kenntnis der „wahren“ statistischen Verteilungsfunktion nur Aussagen bis zum n -jährlichen Ereignis abgeleitet - also nur interpoliert - werden.

Meist sind aber Aussagen über die Größe zu erwartender viel seltener $HQ(T)$ mit Wiederkehrintervallen $T \gg n$ gefordert. Dann muss weit über den beobachteten Bereich hinaus extrapoliert werden. Um die Fehlermöglichkeiten einzuschränken, ist dafür zunächst eine gründliche und umfängliche Prüfung und Analyse der verwendeten HQ -Werte erforderlich (siehe z. B. Dyck et al., 1976), ehe eine entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilung angepasst und Extrapolationen („landläufig empfohlen“ maximal $3 * n$, siehe z. B. DVWK, 1999) vorgenommen werden können. Ist zur Bemessung seltener $HQ(T)$ die Wahrscheinlichkeits-Verteilungsfunktion noch weiter über diesen Bereich hinaus zu extrapolieren, sind alle verfügbaren zusätzlichen Informationen über das Hochwasserregime zu erschließen.

Prinzipiell bestehen dabei die drei Möglichkeiten der zeitlichen, der räumlichen und der kausalen Informationserweiterung (Grünwald, 2006b). Die häufigste und bekannteste Methode der zeitlichen Informationserweiterung dürfte die Einbeziehung historischer Hochwasser sein. Bei der Berücksichtigung historischer HQ_h können verschiedene Ansätze verwendet werden, die sich durch das Gewicht unterscheiden, welches den Daten der n -jährigen Beobachtungsreihe und den historischen Daten zugeordnet wird. In der Regel liegen längere durchgehende Beobachtungsreihen von Jahreshöchst durchflüssen $HQ(a)$ und einige wenige historische Hochwasserdurchflüsse HQ_h vor. Dann werden die $HQ(a)$ der Beobachtungsreihe mit der Anzahl n als repräsentativ für die fehlenden HQ des historischen Zeitraumes n_h angesehen.

Bei der räumlichen Informationserweiterung wird über die Betrachtung der Beobachtungsreihe nur an einem Pegel hinausgegangen und versucht, diese mit Ergebnissen von Wahrscheinlichkeitsanalysen innerhalb einer sogenannten „hochwasserhomogenen Region“ zu verknüpfen. Auch hier gibt es mit den verschiedenen „Bezugs- HQ -Verfahren“ (z. B. Hansel, 1970; Dyck et al., 1976) seit längerem geeignete und bewährte Berechnungsmethoden. In neuerer Zeit schlugen Kleeberg & Schumann (2001) eine „Konvention zur Ableitung von Hochwasserscheitelwerten geringer Überschreitungswahrscheinlichkeit“ auf der Basis solcher regionalisierter Untersuchungen vor, der sicherlich noch weitere folgen werden.

Die Methoden und Verfahren der kausalen Informationserweiterung reichen von der Einbeziehung der Information teilweise länger beobachteter Niederschlagsreihen z. B. mit dem GRADEX-Verfahren (Lang & Oberlin, 1994) über die Verwendung von deterministischen Niederschlags-Abfluss-Modellen zur Transformation von Bemessungsniederschlägen in Bemessungsabflüsse bis hin zur kontinuierlichen stochastischen bzw. gekoppelten stochastischen und deterministischen Simulation von Durchflüssen (z. B. Grünewald, 1977).

2. ... und macht die Einbeziehung historischer hydrologischer Extremereignisse wünschenswert ...

Die überwiegend verwendete (empirische) Formel für die zeitliche Einordnung der beobachteten HQ(a)

$$P_u(HQ) = \frac{m(HQ)}{n+1} \quad (1)$$

mit

$P_u(HQ)$ - empirische Unterschreitungs-Wahrscheinlichkeit der Jahreshöchstdurchflüsse HQ(a)

m - Rangzahl der nach der Größe geordneten HQ(a) („vom kleinsten zum größten“)

n - Anzahl der Jahre, für die HQ(a) vorliegen („Länge der Beobachtungsreihe“)

ist bei der Einbeziehung historischer Hochwasser zu ergänzen. Den historischen Hochwassern wird z. B. eine empirische Unterschreitungswahrscheinlichkeit $P_u(HQ_h)$ zugeordnet, die ihnen aufgrund ihrer Rangfolge $m_h = 1, 2, \dots$ innerhalb des historischen Zeitraumes n_h zukommt gemäß

$$P_u(HQ_h) = 1 - \frac{m_h}{n_h} \quad (2)$$

D.h. es ist festzustellen, für wie viele Jahre das historische Hochwasser das (jeweils) größte war.

Liegen Hochwasserdurchflüsse gleichzeitig im betrachteten historischen Zeitraum und in der Beobachtungsreihe („Ausreißer“), dann ist deren zeitliche Einordnung anhand der historischen Rangfolge (und des entsprechenden Zeitraumes) vorzunehmen. Letztlich kann auch die Bestimmung der Parameter der Verteilungsfunktion nach der Momentenmethode über die Einbeziehung historischer Hochwasser erfolgen (siehe Krause, 1969; Dyck et al., 1976; DVWK, 1999). Schumann (2007) stellt ein Verfahren zur Einbeziehung historischer Hochwasser in extremwertstatistischen Analysen unter Verwendung partieller wahrscheinlichkeitsgewichteter Momente vor und zeigt u. a., dass unter Einbeziehung historischer Ereignisse eine regionale Vereinheitlichung der Extremwertstatistik möglich ist.

Das für viele Menschen überraschende, große Auguthochwasser 2002 an der Elbe hat auch vielfältige Diskussionen zur statistischen Einordnung des extremen Wasserstands- und Durchflussereignisses ausgelöst. Während der „niemals zuvor beobachtete

Wasserstand“ von 9,40 m am Pegel Dresden von vielen „Klimaexperten“ gern als eindeutiges und endgültiges Zeichen des sich vollziehenden Klimawandels gedeutet wird (Grünwald, 2006a), lässt sich der von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG, 2002) ermittelte Hochwasserscheiteldurchfluss von ca. 4.580 m³/s keinesfalls so scheinbar einfach einordnen. Je nach der zu Grunde gelegten Beobachtungsreihe (IKSE, 2004) kann diesem ein Wiederkehrintervall von etwas mehr als 100 Jahren bis mehr als 1.000 Jahren zugeordnet werden (siehe Abbildung 2).

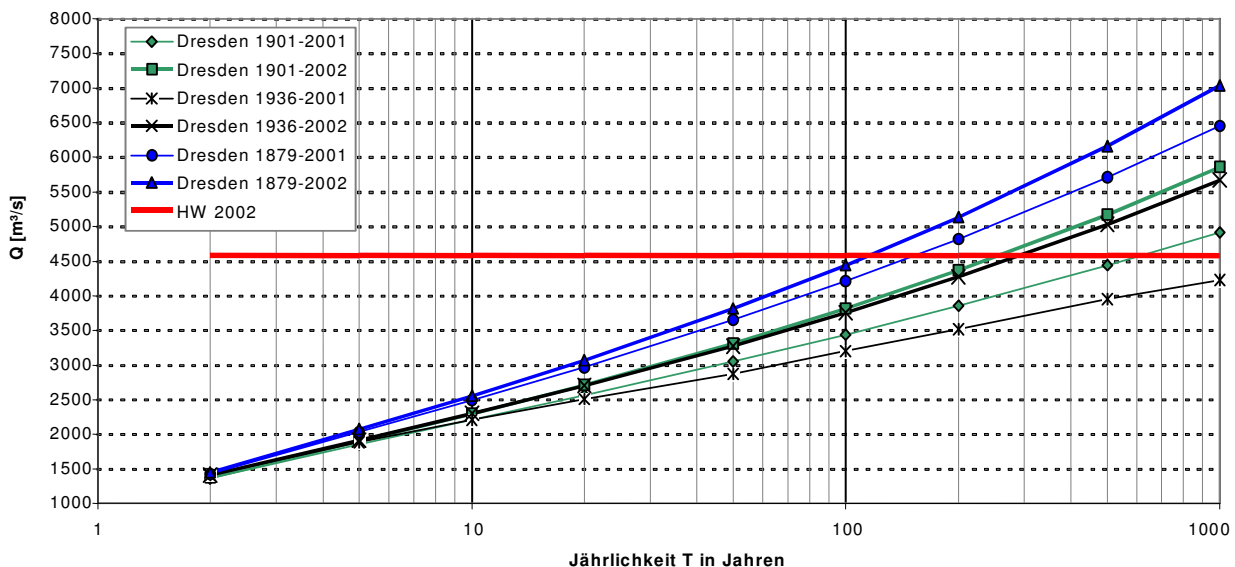


Abb. 2: Einfluss der Reihenlänge auf die Hochwasserwahrscheinlichkeiten am Elb-Pegel Dresden (IKSE, 2004).

Dieser „Interpretationswillkür“ lässt sich am ehesten entgegentreten, wenn neben einer sorgfältigen Bereinigung und Berichtigung der Durchflussdaten auch eine möglichst umfassende Informationserweiterung erfolgt (siehe z. B. Schümberg, 2005). Dies ist u. a. Gegenstand eines vom Deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der RIMAX-Initiative geförderten Teilprojektes (BTU & DHI, 2004). Im Rahmen dieses Projektes war es u. a. nötig und möglich, sich näher mit den historischen Wasserstands- und Durchflussdaten der Elbe zu beschäftigen.

3. ... dabei ergaben sich selbst für den langjährig beobachteten Elbpegel Dresden eine ganze Reihe von Überraschungen

Dank vor allem der „Chronologischen Geschichte der großen Wasserfluthen des Elbstroms seit tausend und mehr Jahren“ von Christian Gottlieb Pötzsch (Pötzsch, 1784) sind am Dresdner Elbpegel seit dem Jahr 1501 und sporadisch davor Hochwasserstandsdaten überliefert. Darüber hinaus liegen seit 1806 tägliche Beobachtungen der Wasserstände vor. In mehr oder minder systematischer Weise wurde dieses umfangreiche Datenmaterial im Laufe der Jahrhunderte von wechselnden Institutionen auf dem Gebiet des heutigen Freistaates Sachsen weiter vervollständigt, aufbereitet, dokumentiert, popularisiert (z. B. Fügner, 1995), zur Bewältigung verschiedenartiger

wasserbaulicher und wasserwirtschaftlicher Probleme usw. genutzt. Im letzten Jahrzehnt befindet sich der Großteil der Unterlagen im „Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie“ (LfUG) in Dresden, dem „Wasser- und Schifffahrtsamt“ (WSA) Dresden sowie der „Bundesanstalt für Gewässerkunde“ (BfG) in Koblenz.

Die bei diesen Institutionen digital oder in Archiven vorhandenen Datensätze konnten dank der guten vertrauensvollen interinstitutionellen und interdisziplinären Zusammenarbeit zusammengebracht, analysiert, einheitlich dokumentiert usw. werden. Eine ausführliche Diskussion der dabei festgestellten Differenzen und Unstimmigkeiten der insgesamt 56.500 Tageswerte kann hier selbstverständlich nicht erfolgen.

Im Bestreben, möglichst lange, plausible und konsistente Datenreihen zu erstellen, zeigte sich aber generell zunächst überwiegend eine gute Übereinstimmung der in Archiven gefundenen wasserwirtschaftlichen Altunterlagen mit den erhaltenen Datensätzen. Dadurch war es möglich, eine (zunächst noch) projektinterne „Monographie der historischen Hochwasser in Sachsen“ (Fügner, 2006) zusammenzustellen. Letztlich reichten die dazu interdisziplinär bewältigten Arbeitsschritte von der Recherche der historischen Pegeldata über die Dokumentation von Hochwassermarken, die Zusammenstellung von historischen Vermessungsdaten bis hin zur Auswertung sonstiger wasserwirtschaftlicher Altunterlagen im Bereich der Oberen Elbe. Eine deutlich gewordene Überraschung bezieht sich auf die vor allem im Zeitraum 1874 bis 1932 häufig beobachtete Verwechslung von Scheitelwerten mit beobachteten Terminwerten am Tag des größten Wasserstandes (Bartl, 2007). Neben den entsprechend zu korrigierenden Wasserstandswerten bis zu 144 cm ergaben sich daraus teilweise erheblich andere Eintrittszeiten der Jahresmaxima.

Kritisch gilt es immer wieder mit der Verwendung von Hochwassermarken umzugehen. Besonders überraschte dabei sogar der Staatsbetrieb Staatliche Schlösser, Burgen und Gärten Sachsen/Geschäftsbereich des Sächsischen Staatsministeriums der Finanzen, welcher die Elb-Hochwassermarken vom August 2002 und vom März 1845 am Fliederhof des Schlosses Pillnitz willkürlich und eigenmächtig verfälschte (Abbildung 3). Es zeigt sich, dass nicht nur frühere Generationen Schwierigkeiten hatten, verantwortungsbewusst mit solchen historischen Zeitzeugen umzugehen (Deutsch et al., 2006).



Abb. 3: Willkürlich veränderte Hochwassermarken am Fliederhof im Schloss Pillnitz bei Dresden. Die helle Linie auf beiden Bildern zeigt den Höchstwasserstand im August 2002 an, die dunkle Marke links (oben) den historischen Hochwasserstand vom März 1845. Auf der rechten Seite sind die Hochwassermarke von 1845 nach oben gesetzt und die neue Hochwassermarke von 2002 oberhalb des Maximalwasserstandes angebracht (Fotos: Grünewald, 2003 und 2004).

Eine außerordentlich schwierige und wichtige Aufgabe ist die Transformation der langjährigen Wasserstandsreihen in Durchflussreihen. Auch hier waren umfangreiche Recherchen und hydrologische Analysen bezüglich der für verschiedene Zeitbereiche gültigen „Schlüsselkurven“ für den Pegel Dresden nötig (Bartl, 2007; Schümberg, 2007). Dabei galt es zu berücksichtigen, dass sich sowohl die Flusslandschaft der Elbe verändert hat als auch immer wieder Veränderungen der Flussquerschnitte auftraten (Tabelle 1).

Letztlich legen diese Untersuchungen die Vermutung nahe, dass die Extremhochwasserabflüsse der Jahre 1845 (bisher angegeben: 5700 m³/s) und 1890 (bisher angegeben: 4350 m³/s) als zu hoch einzuschätzen sind, was auch mit den Abschätzungen von Pohl (2006) übereinstimmt. Aus diesem Grunde ist es sinnvoll und notwendig, über instationäre hydraulische Modelluntersuchungen belastbare Aussagen über die Abflussbedingungen im 19. Jahrhundert anzustreben (Bartl und Matz, 2007), um auch von dieser Seite her die statistische Einordnung der extremen Abflüsse zu verbessern.

Tab. 1: Änderungen der Gewässereigenschaften und deren Auswirkungen auf den Durchfluss (bei gleichem Wasserstand) und den Wasserstand (bei gleichem Durchfluss) (Pohl, 2006)

	Durchfluss (m ³ /s)	Wasserstand (m ü. NN)
Begradigung, Laufverkürzung, Gefällezunahme	Q↑	W↓
Natürlicher Geschiebetrieb → Erosion im Oberlauf	Q↑	W↓
Natürlicher Geschiebetrieb → Sedimentation im Unterlauf	Q↓	W↑
Buhnen, Leitwerke, Verringerung der Breite → Erosion, Eintiefung	Q?	W?
Ausbau, Verminderung der Rauheit	Q↑	W↓
Spannweiten der Brücken größer	Q↑	W↓
Mehr Brücken, Vorlandverbauung	Q↑	W↑

War es schon für *einen* Pegel – hier Dresden/Elbe – nicht ganz einfach, die Vielzahl von Unschärfen zu überwinden, so ergaben sich noch Überraschungen ganz anderer Art, wenn es im föderal strukturierten Deutschland darum geht, in Folge des Augusthochwassers 2002, eine „länderübergreifende Hochwasserstatistik für die Elbe“ zu erstellen. Zunächst hat sich dazu aus den „deutschen Anlieger-Bundesländern“ eine Arbeitsgruppe unter Leitung der BfG gebildet. Gemäß der im Bild 2 dargestellten Brisanz einigte sich diese auf die Auswahl einer einheitlichen Jahresreihe (1890 bis (inzwischen) 2006). Während sich bei dieser Reihenverlängerung und der durchgeführten Extremwertanalyse daraufhin bei allen im Längsschnitt betrachteten Pegeln von Dresden, Torgau, Wittenberg, Aken, Barby, Magdeburg bis Tangermünde bei HQ(100) eine Erhöhung ergab, „sackte“ dieser Wert am Pegel Wittenberge dagegen ab. Da auf dieser Basis später aber die Festlegung von Bemessungshochwasserständen für die Elbdeiche erfolgt, entstanden „länderspezifische Irritationen“ sowie Aufklärungsbedarf. Als eine wesentliche Ursache für diese Besonderheit am Pegel Wittenberge konnte die Tatsache identifiziert werden, dass sich zwischen Tangermünde und Wittenberge die Retentionsräume insbesondere durch den Bau der Wehrgruppe an der Havelmündung (zunächst bis 1936, dann erweitert bis 1954) drastisch vermindert haben. Dazu galt es entsprechende Bereinigungsverfahren zu entwickeln (Grünwald et al., 2006), um verbesserte Ansatzpunkte einer länderübergreifenden Wahrscheinlichkeitsanalyse entlang der deutschen Elbe zu haben. Auch hier liefern zusätzliche hydraulische Untersuchungen eine verbesserte Aussagefähigkeit (z. B. Helms et al., 2002).

4. Resümee

Letztlich zeigen die verschiedenen Untersuchungen zur Einbeziehung historischer hydrologischer Extremereignisse am Beispiel der Elbe auf, dass auf diesem Wege zweifellos wertvolle zusätzliche Informationen nicht nur zur statistischen Einordnung von Extremereignissen gewonnen werden können. Sie erfordern aber sorgfältige und umfassende interdisziplinäre Untersuchungen, die nicht frei von Überraschungen sind.

5. Literatur

Bartl, S. (2007) Datendiskussion zum Pegel Dresden. Cottbus, 22.02.2007 (unveröffentlichte Studie im Rahmen von BTU & DHI (2004)).

Bartl, S. und Matz, S. (2007) Integration von historischen und hydraulisch/hydrologischen Analysen zur Verbesserung der regionalen Gefährdungsabschätzung und zur Erhöhung des Hochwasserbewusstseins. RIMAX-Statusseminar März 2007, PowerPoint-Präsentation, Potsdam, 40 S.

BfG (2002) Bundesanstalt für Gewässerkunde: Das Auguthochwasser 2002 im Elbegebiet. Koblenz, September, 48 S.

BTU und DHI (2004) Lehrstuhl Hydrologie und Wasserwirtschaft der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus & DHI Wasser und Umwelt Syke: Integration von historischen und hydrologisch/hydraulischen Analysen zur Verbesserung der regionalen Gefährdungsabschätzung und zur Erhöhung des Hochwasserbewusstseins. Vorhabensbeschreibung zur BMBF-Förderaktivität „Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse RIMAX“. - Cottbus, Syke.

Deutsch, M., U. Grünewald und K. T. Rost (2006) Historische Hochwassermarken - Ausgangssituation, Probleme und Möglichkeiten bei der heutigen Nutzung. In: Disse, M., Guckenberger, K., Pakosch, S., Yorük, A., Zimmermann, A. (Hrsg.): Risikomanagement extremer hydrologischer Ereignisse. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2006, 22./23. März 2006 an der Universität der Bundeswehr München. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 15.06, Band 1. Vorträge 1, Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften - Hennef: DWA 2006, S. 59-70, ISBN-10: 3-939057-31-2, ISBN-13: 978-3-939057-31-4.

DIN (2004) Deutsches Institut für Normung: DIN 19700-10, 11, 12. Stauanlagen Teil 10, 11 und 12. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN. Berlin, 28 S.

DVWK (1999) Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau: Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. - DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 251/1999, Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.

Dyck, S., N. Hansel, C. Kluge, D. Lauterbach und M. Schramm (1976) Angewandte Hydrologie. Teil 1: Berechnung und Regelung des Durchflusses der Flüsse. - VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.

Dyck, S. und G. Peschke (1995) Grundlagen der Hydrologie. - Verlag für Bauwesen, 3. Auflage, Berlin.

Fügner, D. (1995) Hochwasserkatastrophen in Sachsen. Taucha, Tauchaer Verlag.

Fügner, D. (2006) Monographie der Historischen Hochwasser in Sachsen. Dresden, 24.11.2006, (unveröffentlichte Zuarbeit im Rahmen von BTU & DHI (2004)).

Grünewald, U. (1977) Stochastische Simulation von Tagesmittelwerten des Durchflusses in Hochwasserzeiten.- Wasserwirtschaft-Wassertechnik 27, H. 1, S. 28-31; H. 2, S. 51-53.

Grünewald, U. (2006) Extreme hydro(meteoro-)logische Ereignisse im Elbegebiet. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 58, H. 3/4, S. 35-42.

Grünewald, U. (2006) „Kann der Schlüssel zur wasserwirtschaftlichen Zukunft allein in der relativ kurz beobachteten Vergangenheit gesucht werden?“ In: Disse, M., Guckenberger, K., Pakosch, S., Yorük, A., Zimmermann, A. (Hrsg.): Risikomanagement extremer hydrologischer Ereignisse. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2006, 22./23. März 2006 an der Universität der Bundeswehr München. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 15.06, Band 2. Vorträge 2, Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften - Hennef: DWA 2006, S. 303-313, ISBN-10: 3-939057-31-2, ISBN-13: 978-3-939057-31-4.

Grünewald, U., Bartl, S. und Schümborg, S. (2006) Studie zur Ableitung von Hochwasserbemessungswerten im deutschen Binnen-Elberaum insbesondere für den Pegel Wittenberge. Cottbus, 12.09.2006 (unveröffentlichte Zuarbeit für das Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz (MLUV) des Landes Brandenburg).

Hansel, N. (1970) Zur Bestimmung maximaler Hochwasserdurchflüsse durch regionale Betrachtungen. - WWT 20, H. 8, S. 259-263.

Helms, M., Ihringer, J. und Nestmann, F. (2002) Analyse und Simulation des Abflussprozesses der Elbe. In: Nestmann, F., Büchele, B. (Hrsg.) (2002): Morphodynamik der Elbe. Schlussbereich des BMBF-Verbundprojektes mit Einzelbeiträgen der Partner und Anlagen-CD. Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe.

IKSE (2004) Internationale Kommission zum Schutz der Elbe: Dokumentation des Hochwassers vom August 2002 im Einzugsgebiet der Elbe. Magdeburg, 2004.

Kleeberg, H.-B. und A. H. Schumann (2001) Ableitung von Bemessungsabflüssen kleiner Überschreitungswahrscheinlichkeiten. - Wasserwirtschaft 91, H. 2, S. 90-95.

Krause, G. (1969) Untersuchungen historischer Hochwasserereignisse zur Verbesserung der Genauigkeit der Ermittlung statistischer Hochwasser. - WWT 19, S. 20-23.

Lang, M. und G. Oberlin (1994) Preliminary test for mapping the 100-year flood with the AGREGEE Model. FRIEND: Flow Regimes from International Experimental and

Network Data. - Proc. of the Braunschweig Conference, Oct. 1993. IAHS Publ. no. 221.

Pohl, R. (2006) Ermittlung von Wasserstands-Abfluss-Beziehungen aufgrund historischer Informationen. *Acqua alta*, Hamburg, Forum 3 – Historischer Hochwasserschutz, PowerPoint-Präsentation, September 2006.

Pötzsch, C.G. (1784) Chronologische Geschichte der großen Wasserfluthen des Elbstroms seit tausend und mehr Jahren.- Waltherische Hofbuchhandlung, Dresden, 1784. mit Nachtrag und Fortsetzung von 1786 und 1800.

Schumann, A. (2007) Anwendung partieller wahrscheinlichkeitsgewichteter Momente zur Berücksichtigung historischer Ereignisse bei der Extremwertstatistik. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 51, 2007, Heft 2, S. 73-81.

Schümbert, S. (2005) Verlängerung der Reihe der Jahreshöchstabflüsse am Pegel Torgau für die Jahre 1890 bis 1935 und Bestimmung der Hochwasser-Bemessungswerte für die Jahresreihe 1890 - 2004. Cottbus, Dezember (unveröffentlichte Zuarbeit für die BfG Koblenz).

Schümbert, S. (2007) Vergleich von W-Q-Beziehungen am Pegel Dresden für Durchflüsse von mehr als 2000 m³/s auf der Basis von Durchflussmessungen und Profilvergleichen. Cottbus (unveröffentlichte Zuarbeit im Rahmen von BTU & DHI (2004)).

Anschrift des Verfassers:

Uwe Grünwald
Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Lehrstuhl Hydrologie und Wasserwirtschaft
Postfach 101344, 03013 Cottbus
Email: Uwe.Gruenewald@tu-cottbus.de

250 JAHRE KLIMAVARIABILITÄT IN DEN ALPEN

Reinhard Böhm und Ingeborg Auer

1. Einleitung

In den letzten Jahren konnte die Arbeitsgruppe Klimavariabilität der ZAMG einen räumlich dichten (mehrere hundert Einzelstationen), multiplen (mehrere Klimaelemente), langen (längste Reihen zurück bis 1760), qualitätsgeprüften (hunderte Inhomogenitäten und tausende Ausreißer entfernt, Datenlücken geschlossen) Klimadatensatz auf Monatsbasis erstellen. Die Daten wurden von zahlreichen (mehr als 20) Providern aus 10 Alpenländern gesammelt und vorläufig als geschlossener Datensatz 1800-2003 in „station-mode“ und in 2 verschiedenen „grid-modes“ aufbereitet. Zusatzfinanzierungen zu HISTALP kamen von verschiedenen nationalen und EU-Projekten (CLIVALP, ALOCLIM, ALPCLIM, ALP-IMP). Die ZAMG plant, HISTALP auch in Zukunft als Klimamonitoring-Aktivität weiter zu führen. Derzeit wird an einem Update bis inklusive Winter 2006/07 gearbeitet. Neben den erwähnten Kontakten mit den Daten Providern existiert derzeit diesbezüglich eine enge Zusammenarbeit mit der Climatic Research Unit der University of East Anglia, dem ISAC-Institut der CNR-Bologna und dem Institut für allgemeine und angewandte Physik der Universität Mailand. Eine HISTALP Gesamt- und Referenzpublikation ist kürzlich erschienen (Auer et al., 2007) und wird hier vorgestellt. Zusätzlich wird – im Hinblick auf das Hauptthema der Tagung in Abschnitt 4 auf eine gerade in Arbeit befindliche Analyse der Veränderungen der Klimavariabilität im Alpenraum eingegangen.

2. Datengrundlage – Homogenisierung – Outlierkorrektur

Für mehr als 200 Standorte im Großraum Alpen konnten im Rahmen von HISTALP (Auer et al., 2007) mehr als 500 Klimareihen von sieben Klimaparametern auf der Basis von regulären instrumentellen Messungen bis zurück ins 18. Jahrhundert rekonstruiert werden. Der Ausdruck „Rekonstruktion“ mag bei Messreihen verwundern, wird aber ganz bewusst verwendet, da nicht nur derart lange Klimareihen immer auch nichtklimatische Informationen enthalten, die vor der Analyse beseitigt werden müssen. Bei diesem Vorgang der Homogenisierung werden die historischen Messungen an den aktuellen Zustand der Messstation angepasst. „Historisch“ ist dabei sehr rigoros zu verstehen – durchschnittlich geschieht alle 20 bis 30 Jahre auch an professionellen Stationen eine Änderung der Instrumente und deren Aufstellung, der Umgebung, der Berechnungsalgorithmen, der Beobachtungszeiten u.a.m. Gerade zurzeit erleben wir eine einschneidende neue Inhomogenität durch die Automatisierung der meteorologischen Messnetze. Eine Anzahl von mathematischen Homogenitätstests und Verfahren zur Berechnung der notwendigen Anpassungen, kombiniert mit intensiven Recherchen in den historischen Stationsarchiven, erlauben es in den meisten Fällen, das Homogenitätsproblem auf befriedigende Weise zu lösen. Ausdrücklich gewarnt sei vor der unkritischen Verwendung von Originaldaten für die Analyse der Klimavariabilität – man untersucht dann nicht das Klima sondern

beispielsweise die Geschichte der Aufstellungshöhen eines Barometers, die Einführung eines neuen Typs von Ombrometer oder die Änderungen der Messtermine. Den zweiten unverzichtbaren Bestandteil einer Klimarekonstruktion in der instrumentellen Periode bilden die Erkennung und die Eliminierung von Ausreißern von Einzelwerten. Sie kommen meist durch Druck- bzw. Tippfehler in die Datensammlungen und sind häufiger, als man vermutet. Sie verfälschen vor allem Analysen, die auf Extremereignisse abzielen. Die monatlichen Zeitreihen der HISTALP-Datenbank der ZAMG sind im Original und in der homogenisierten und Ausreißer-korrigierten Fassung vorhanden, in Form von Stationsreihen und in drei verschiedenen aufgelösten Grid-Versionen.

Abbildung 1 zeigt das Gebiet, das durch HISTALP abgedeckt ist (die Alpen und deren weitere Umgebung) und die zeitliche Abdeckung, die für Temperatur und Luftdruck bis ins 18. Jahrhundert zurückreicht, für den Niederschlag bis 1800, für die anderen Elemente etwas später ansetzt. HISTALP ist weltweit einzigartig, was die Qualität und was die Dichte der räumlichen Abdeckung, vor allem in der frühen instrumentellen Periode anbetrifft.

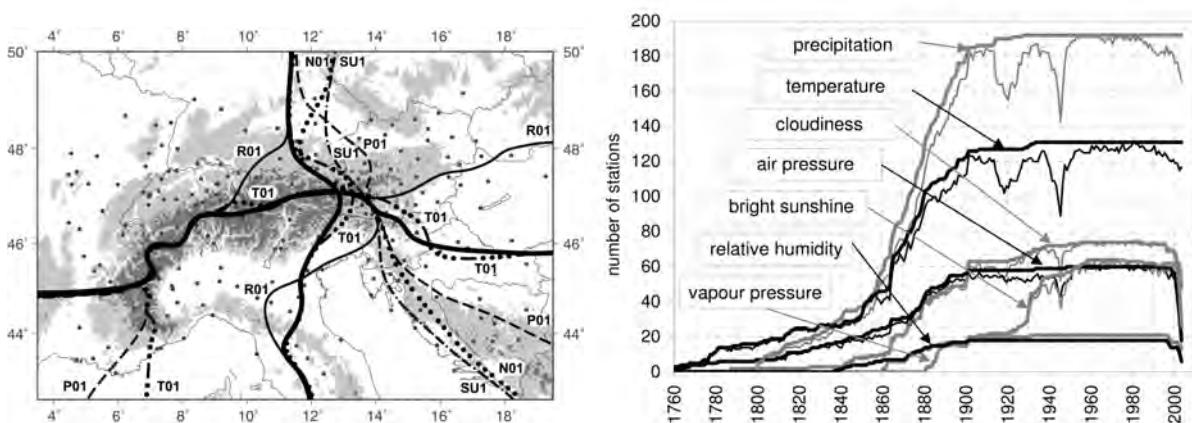


Abb. 1: Die Datengrundlage von HISTALP. Links: das Stationsnetz (Punkte) und eine objektive räumliche Regionalisierung durch PCA (Auer et al., 2007) in vier Hauptklimagebiete. T01: Regionalisierung bezüglich Temperatur, P01: Luftdruck, R01: Niederschlag, SU1: Sonnenschein, N01: Bewölkung. Die dicken schwarzen Linien stellen den Regionalisierungskompromiss dar, der den Großraum Alpen in zwei mediterrane und zwei Klimazonen in der gemäßigten Westwindzone teilt. Die meridionale Trennungslinie bei 11-13°E steht für den Übergang von ozeanischen zu kontinentalen Einflüssen dar. Rechts: die zeitliche Entwicklung der instrumentellen Klimareihen im Großraum Alpen für die sieben Hauptklimaelemente (die unruhigeren unteren Linien geben jeweils die vorhandenen Originaldaten an, die glatten oberen die ergänzten homogenisierten).

3. Ergebnisse aus zweieinhalb Jahrhunderten Klimavariabilität im Großraum Alpen

Bisher galt das Hauptaugenmerk unserer Gruppe der Erzeugung und ständigen Weiterentwicklung des Datensatzes. Es liegen aber auch bereits erste Analyseergebnisse vor, die in der Folge überblicksartig gestreift werden.

3.1 Querschnitt durch 250 Jahre Klimaentwicklung im Alpenraum

Die folgenden Abbildungen 2 bis 5 geben einige Beispiele für die Klimaentwicklung im Großraum Alpen (GAR), die hier notwendigerweise unvollständig ist. Sie sind der HISTALP Basispublikation entnommen (Auer et al., 2007), die vor kurzer Zeit erschienen ist. Es handelt sich jeweils um die mittleren Zeitreihen einer oder mehrerer Subregionen.

Abb. 2 zeigt den mittleren Temperaturverlauf im Großraum Alpen (135 Einzelreihen) im Vergleich zu demjenigen der gesamten Nordhalbkugel (ca. 2000 Reihen). Als erstes fällt die wesentlich größere Varianz der regionalen gegenüber der hemisphärischen Reihe auf, ein typisches statistisches Merkmal, das aus der größeren Stichprobe der hemisphärischen Reihe folgt. Als zweiten Unterschied erkennt man eine seit dem 19. Jahrhundert gegenüber der nordhemisphärischen Reihe etwa doppelt so starke Erwärmung im Alpenraum. Ein Blick auf die Differenzenreihe (in der Abbildung oben) zeigt, dass das nicht auf einer stetigen Entwicklung beruht, sondern dass lediglich auf zwei unterschiedlichen Subperioden – auf besonders kalten 1890er Jahren und auf besonders warmen 1990er Jahren in den Alpen. Die etwa 80 Jahre dazwischen zeigen einen weitgehend identischen Trend.

Auf einen der Gründe für diese regionale Besonderheit der Temperaturentwicklung in unserer Region weist Abb. 3 hin – den Einfluss der Zirkulation. Die Abbildung vergleicht die langfristigen Trends der Temperatur und des Luftdrucks, die sowohl für die Jahrhunderttrends (im Bild links), als auch für die 50-jährigen Trends sehr ähnlich sind. Die leichte Abkühlung in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts war ebenso mit einem Rückgang des Luftdrucks verbunden, wie die markante Erwärmung des 20. Jahrhunderts mit einem Luftdruckanstieg. Offenbar fand im 20. Jahrhundert eine generelle nordwärts Verlagerung des Subtropen-Hochdruckgürtels statt, was auch andere Untersuchungen, vor allem aus Italien bestätigen. Das geht einher mit vermehrtem Sonnenschein in der Region, was sich in den entsprechenden HISTALP-Reihen zeigt und dadurch zu der regionalen Verstärkung des globalen Hintergrundtrends der Temperatur.

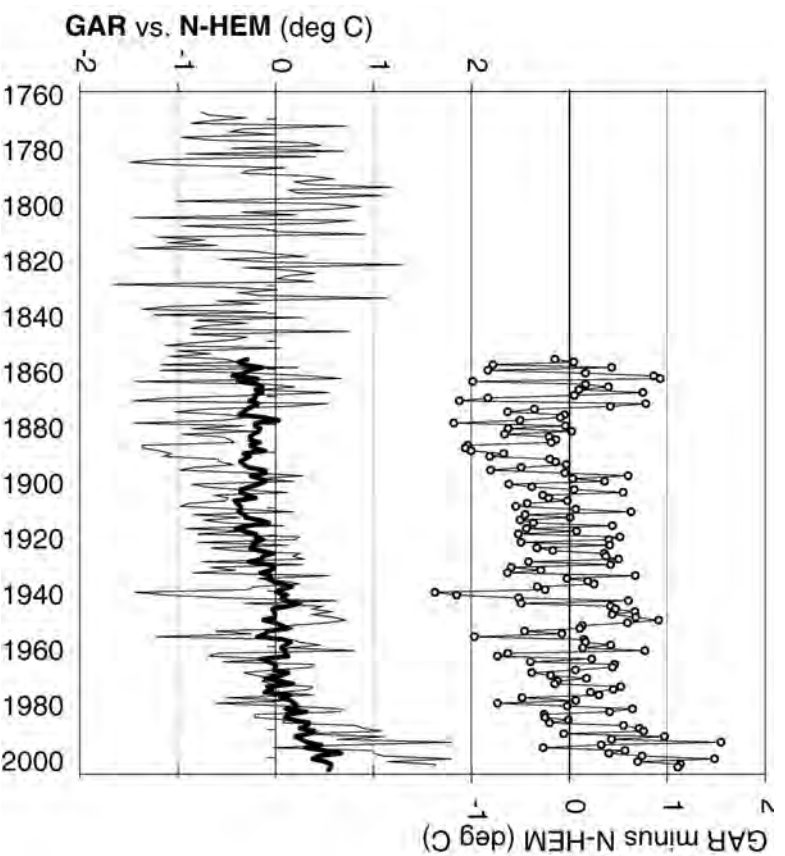


Abb. 2: Jahresmittel der Lufttemperatur gemittelt über alle HISTALP-Stationen seit 1767 (unten, grau), gemittelt über alle Stationen der Nordhalbkugel seit 1856 (CRU, Norwich, unten schwarz), sowie die Differenzreihe GAR minus CRU.

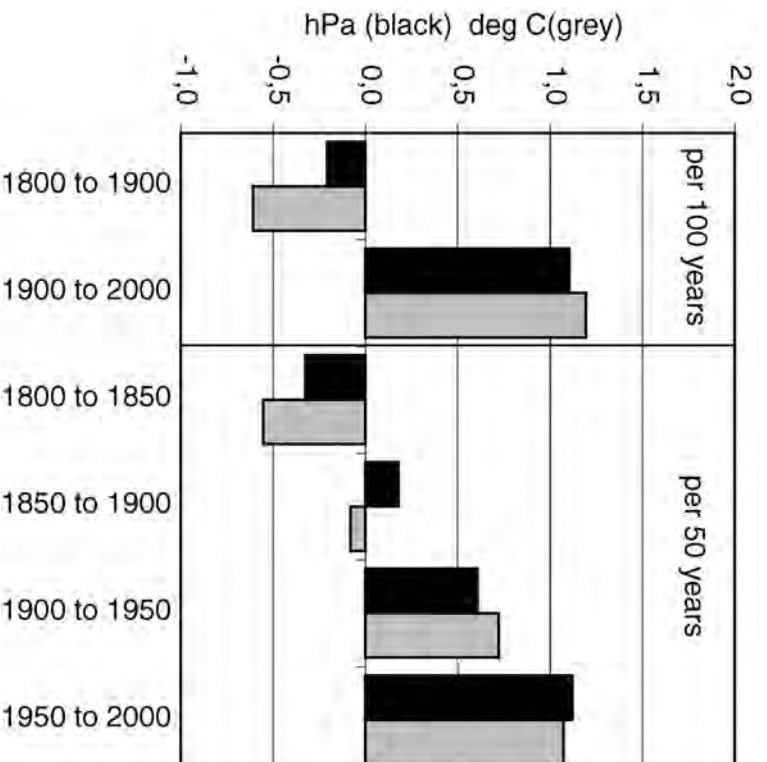


Abb. 3: 100-jährige (links) und 50-jährige (rechts) Trends der Jahresmittel der Lufttemperatur (grau) und des Luftdrucks (schwarz), beide gemittelt über alle HISTALP Stationen unterhalb von 1500m (Temperatur) bzw. 600m (Luftdruck).

Die in Abbildung 2 gezeigte mittlere Zeitreihe über den gesamten Alpenraum macht nur bei diesem Klimaparameter Sinn, da bei der Lufttemperatur in allen Teilregionen hochgradig ähnliche Trends vorliegen – langfristig verlief die Temperaturentwicklung von Marseille, Karlsruhe oder Budapest, bis zur Zugspitze und zum Sonnblick in der Dreitausenderregion der Alpen praktisch gleich. Anderslautende frühere Behauptungen, dass sich die Hochalpen starker erwärmt hatten als die Umgebung haben sich als haltlos herausgestellt.

Bei anderen Klimaelementen, wie der Bewölkung, der Sonnenscheindauer und vor allem dem Niederschlag ist eine derartige regionale Einheitlichkeit der Trends nicht gegeben. Die markantesten Antagonisten sind die Subregionen nordwestlich und südöstlich des Alpenbogens, die über eineinhalb Jahrhunderte hindurch sogar gegensätzliche Trends mit ansteigendem Niederschlag im Nordwesten, und Austrocknung im Südosten zeigen (Abbildung 4, links). An beiden Regionen hat auch Österreich Anteil, wo es in Vorarlberg und Tirol feuchter, in Kärnten, Teilen der Steiermark und des Burgenlandes trockener geworden ist. Die entsprechenden (allerdings etwas kürzeren) Zeitreihen der Bewölkung zeigen die analogen subregionalen Entwicklungen.

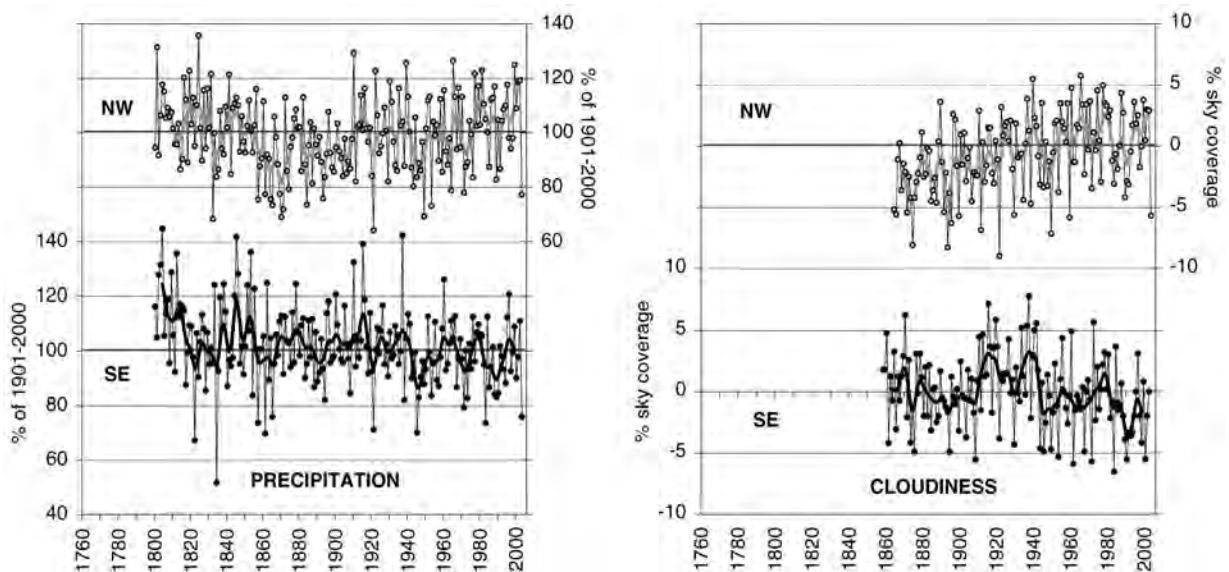


Abb. 4: Regionale Zeitreihen der Hauptregionen Nordwest (oben) und Südost (unten) der Jahressummen des Niederschlages (links) und der Jahresmittel des Bedeckungsgrades (rechts). Alle Reihen sind Abweichungen vom Mittel des 20. Jahrhunderts, Einzeljahre und 10-jährig Tiefpass-gefiltert.

Sehr selten findet man in der Literatur Daten und Analysen über langjährige Entwicklungen der Luftfeuchte. HISTALP bietet sie für zwei Feuchtegrößen (die relative Feuchte und das absolute Feuchtemaß Dampfdruck) für die Subregionen NW, NE und HIGH (Hochalpin > 1500m) an. Für die mediterranen Teile der Alpenregion konnten die dortigen Datenerzeuger (noch) keine Feuchtereihen zur Verfügung stellen. Die Ergebnisse sind durchaus interessant und physikalisch einleuchtend. Die rechten

Diagramme der Abbildung 5 zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf des Dampfdrucks (unten) zu dem der Temperatur (oben) und zwar sowohl in den Hochalpen (grau) als auch in den Tälern und Ebenen (schwarz). Das kommt nicht unerwartet, wenn man den von Magnus formulierten exponentiellen Anstieg des Sättigungsdampfdruck mit der Lufttemperatur bedenkt. Ob diese Potential einer erhöhten Aufnahmefähigkeit der wärmeren Luft für Wasserdampf allerdings genutzt werden kann, hängt auch von der Möglichkeit des advektiven Feuchtenachschubs von den Quellregionen ab, die zum größeren Teil die Ozeane sind, nur zum geringeren Teil aus der Verdunstung über Land gespeist werden. Da die Bergregionen der Alpen über die stärkeren Höhenwinde ungestörter und direkter mit dem Atlantik und dem Mittelmeer in Verbindung stehen, insgesamt maritimer sind, als die Täler, Becken und das Tiefland der Umgebung der Alpen, kommt es nicht unerwartet, dass das feinere Maß der relativen Feuchte (unten links) sehr unterschiedliche Trends zeigt: Das Hochalpinum zeigt langfristig kaum einen Trend, der Feuchtenachschub vom Ozean kann also offenbar die erhöhte Aufnahmefähigkeit der wärmer werdenden Luft abdecken. Bei den Tieflandstationen hingegen klappt das nicht: Sie sind mehr abgeschirmt gegenüber dem Atlantik und zeigen eine starke sekulare Austrocknungstendenz, wobei dem Langfristtrend die dekadischen Entwicklungen der Lufttemperatur spiegelbildlich nachgebildet sind. Es liegt sogar ein (hier nicht gezeigter) west-östlicher Trend von geringerer zu stärkerer Austrocknung vor, allerdings aus den erwähnten Datengründen zurzeit nur für die Gebiete nördlich des Alpenhauptkamms.

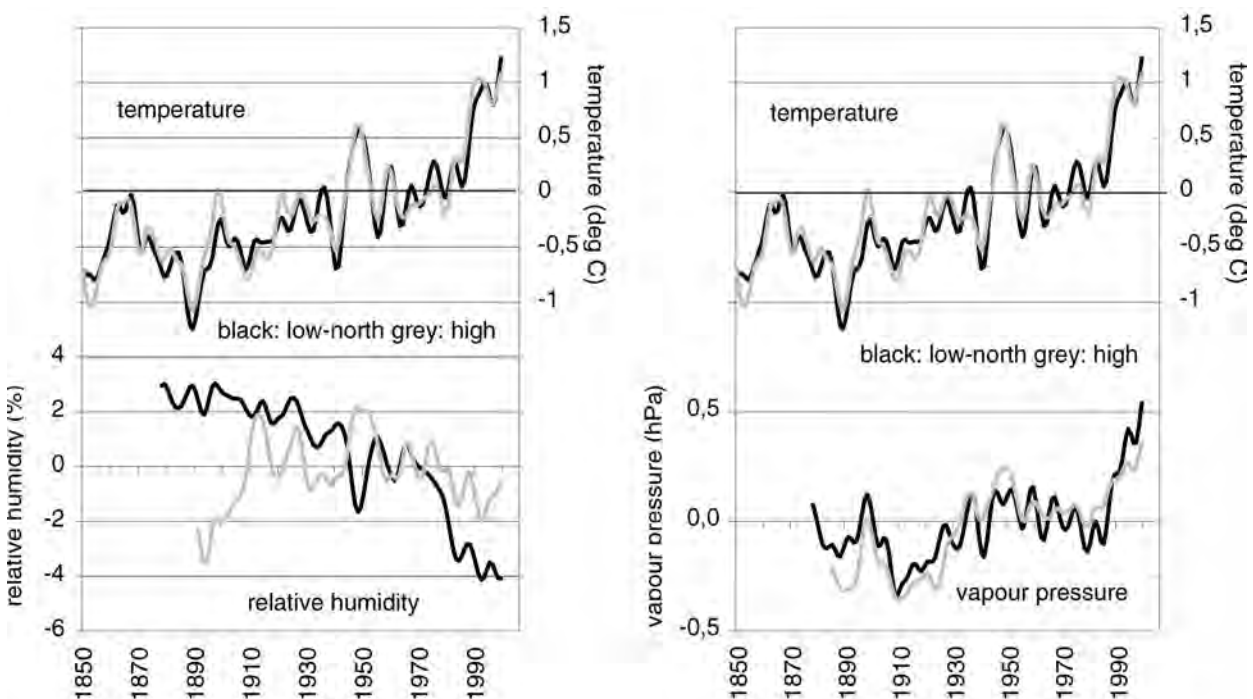


Abb. 5: Geglättete Temperatur (oben) und Feuchtereihen (unten links relative Feuchte, unten rechts Dampfdruck) für die Regionen Nord < 1500m (schwarz) und Hochalpin (> 1500m, grau), 10-jährig Tiefpass-gefilterte Reihen.

Abbildung 6 zeigt Beispiele für die kleinste zeitliche Auflösung, die HISTALP bietet, Monatsreihen. Für den Februar im Nordwesten (links) und den Mai im Südosten zeigen die mittleren Bewölkungs- (unten) und Sonnenscheinreihen die zu erwartenden Gegenläufigkeit sowohl bei den Einzelmonaten, als auch im dekadischen und sekularen Maßstab.

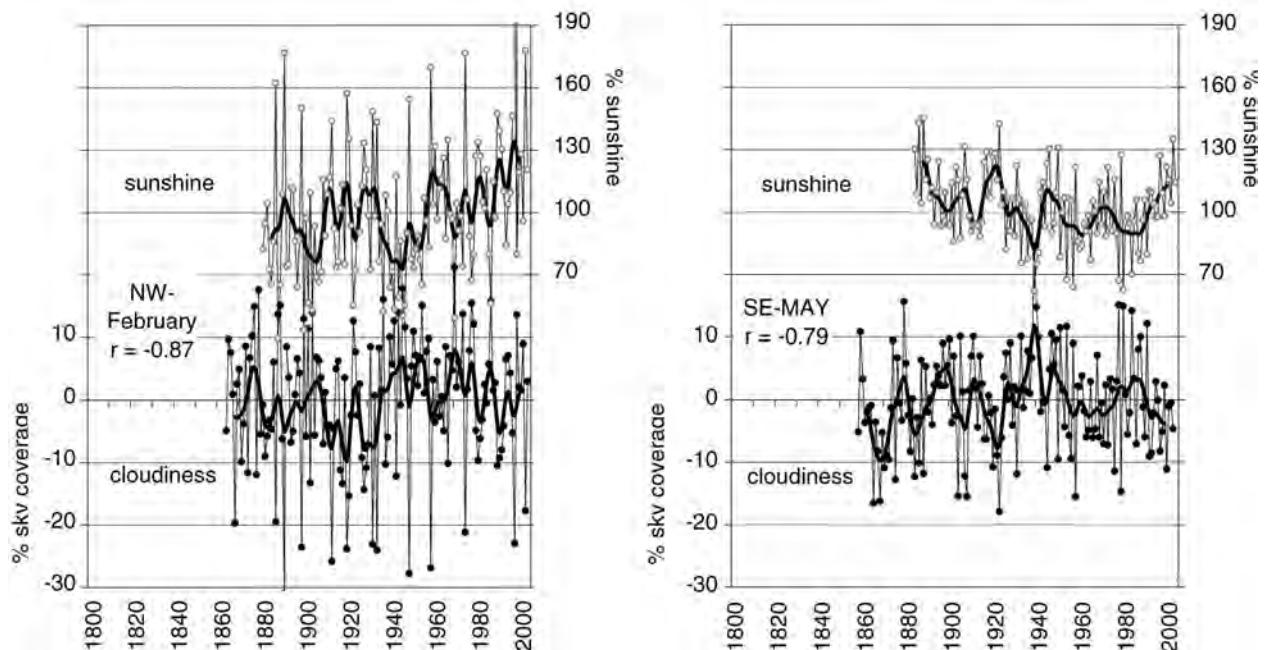


Abb. 6: Monatszeitreihen der Sonnenscheindauer (oben) und der Bewölkung (unten) für Februar in der Subregion Nordwest (links) und für den Monat Mai im Südosten des Alpenraums (rechts). Alle Reihen sind wieder Abweichungen vom Mittel des 20. Jahrhunderts, Einzeljahre und 10-jährig Tiefpass-gel filtert.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die HISTALP-Philosophie des Homogenisierens nur „externe“ Homogenitätstests und die entsprechenden Anpassungen zulässt, also Vergleiche von benachbarten, möglichst hoch korrelierten Reihen eines Klimaelements. Keineswegs werden „interne“ Homogenisierungen vorgenommen, basierend auf Vergleichen verschiedener Klimaparameter innerhalb einer Station. Dadurch konnten die Zeitreihen verschiedener Klimaparameter voneinander unabhängig gehalten werden, da sie nicht gegenseitig abgeglichen worden sind. Analyseergebnisse, die Korrelationen oder Antikorrelationen, parallele oder antiparallele Trends ergeben, sind somit als real und nicht als Artefakte des Homogenisierungsvorganges zu betrachten.

3.2 Entwicklung der Klimavariabilität

In der aktuellen Klimadiskussion wird oft eine bereits stattfindende Zunahme der Klimavariabilität postuliert. Darunter werden nicht nur Extremereignisse wie Starkregen, Hagel, Muren, Sturm, etc. verstanden (die hier nicht behandelt werden, da sie Daten mit täglicher oder sub-täglicher zeitlicher Auflösung erfordern, für die im

Alpenraum und auch anderswo noch an einer adäquaten Datenbasis gearbeitet wird), sondern auch Phänomene wie Hitzesommer (2003 z.B.), extreme Winter (2005/06?), Dürre, Überschwemmungen in größeren Flusssystemen u.ä. – alles Klimaphänomene, die sich auch oder ausschließlich in Klimadaten geringerer zeitlicher Auflösung (monatlich, jahreszeitlich, jährlich) manifestieren. Gerade die peniblen Ausreißer-Korrekturen, die an den HISTALP Datensätzen für Lufttemperatur, Niederschlag und Luftdruck angebracht worden sind (tausende Ausreißer erkannt und entfernt, die speziell bei Fragen über Extremwerte zu inakzeptablen Fehlern führen können) machen diese Zeitreihen sehr brauchbar für derartige Fragestellungen. Ein zweiter Vorteil des HISTALP Datensatzes ist seine Länge, die statistisch abgesicherte Aussagen zulässt, (ein Manko von vielen Untersuchungen auf der Basis von zu kurzen Stichproben ist deren Insignifikanz im Hinblick auf das „Signal to Noise Ratio“). Es wird gerade mit Hilfe eines Sub-Satzes der längsten HISTALP Zeitreihen (long series subset – LSS) die Variabilität und deren evt. vorhandene Trends der Klimaelemente Lufttemperatur, Luftdruck und Niederschlag in den letzten 200 Jahren analysiert. Ein vielleicht überraschendes aber eindeutiges Ergebnis ist – allgemein formuliert – das Vorherrschen von keinen bis eher abnehmenden Trends der Schwankungsbreite des Klimas in Großraum Alpen vom 19. zum 20. Jahrhundert. Es werden im Vortrag die bis dato verwendeten Analysemethoden erläutert und auch erste regionale Erklärungsversuche für das Phänomen zur Diskussion gestellt.

Untersucht wird der LS-Subset Reihe für Reihe, um eventuelle Varianz-Beeinflussungen durch die immer geringer werdende Zahl der Reihen zu vermeiden, je weiter man in die Vergangenheit zurückgeht. Die Reihen werden in zwei unterschiedlichen Strukturen untersucht: in Blockstruktur, also je eine Reihe für den Jänner, den Februar, ...Dezember, Frühling, Sommer, ... Jahr, und in sequentieller Anordnung, alle Monate hintereinander auf der Zeitachse angeordnet. Ziel der Untersuchung sind nun nicht die Klimatrends selbst, sondern eventuell existierende Trends oder Fluktuationen der Varianz, oder eines anderen Streuungsmaßes. Deshalb wurden die Reihen zunächst durch Hochpassfilterung trendbereinigt, da stärkere Trends die Varianz beeinflussen können - mit 30 Jahren Filterweite für die Blockdaten und 10 Jahre (120 Werte) für die sequentiellen Daten. Da vor allem der Niederschlag nicht normalverteilt ist, wurden als verteilungsfreie Streuungsmaße Interquantilbereiche verschiedener Breite ausgewählt. Diese werden in Subintervallen von 30 (Blockdaten) bzw. 10 Jahren (sequentielle Daten) berechnet, die in Zeitschritten von einem Jahr (einem Monat) überlappend über die trendbereinigten Reihen bewegt werden („moving window technique“). Um den vor allem bei den sequentiellen Monatsreihen störenden Einfluss des Jahresganges zu unterdrücken, sind alle Daten vor der Analyse standardisiert worden (bezüglich der einheitlichen Periode 1901-2000).

Die Analyse ist bereits weit fortgeschritten und ein generelles Ergebnis steht bereits fest: Für den Großraum Alpen ist die vor allem in der öffentlichen Klimadebatte, aber auch in Fachkreisen oft vertretene Ansicht „das Klima wird immer verrückter“ nicht haltbar. Für die Temperatur ist sowohl auf Monats-, als auch auf Jahreszeiten und

Jahresbasis in den beiden letzten Jahrhunderten, als auch in den letzten Jahrzehnten sowohl im mediterranen Bereich als auch im Bereich nördlich des Alpenhauptkamms größtenteils ein Rückgang der Variabilität zu beobachten. Abbildung 7 zeigt das für sequentielle Monatsreihen in der Subregion Nordost (wo sich auch Wien befindet, siehe Abb. 1) für drei verschiedenen „extreme“ Interquantilbereiche, Tabelle 1 gibt entsprechende Zahlenwerte der linearen Trendanalyse in allen Teilregionen für die letzten 200, 100 und 50 Jahre. Von den 27 subregionalen Trends der Temperaturvariabilität sind 25 negativ und nur 2 schwach positiv. Signifikant negativ sind 7 Trends, 5 davon im Bezug auf die letzten 200 Jahre, 2 im Bezug auf die letzten 50 Jahre. Für den Luftdruck sind die Verhältnisse ähnlich, nur beim Niederschlag gibt es vereinzelt auch Zunahmen, vor allem im mediterranen Teil des Großraums Alpen - jedoch überwiegt auch hier bei weitem die Abnahme der Variabilität.

Die abschließende Abbildung 8 zeigt als Beispiel für jahreszeitliche Niederschlags-trends die Sommer- und Winterzeitreihen des 80%-Interquantilbereichs für die Subregionen Süd, Nordwest und Nordost. Neben der sommers wie winters generell höheren Variabilität des Niederschlages im mediterranen Bereich finden sich im Sommer (oberes Diagramm) kaum langfristige Trends, sondern überwiegend Oszillationen im dekadischen Maßstab, deren aktuellste seit etwa 1980 eine gegenläufige Entwicklung eines variabler (extremer) werdenden mediterranen Niederschlages gegenüber ruhiger werdenden Verhältnissen im Nordwesten und Südosten.

Im Winter gibt es bis in die 1970er Jahre langfristig steigende Variabilität im Nordwesten und langfristig geringer werdende im Südosten, beides parallel zu den entsprechenden Langfristtrends des Niederschlages selbst (der in Abb. 4 gezeigt worden ist). Im Nordosten ist, ebenfalls bis um 1970, ein schwächeres Ansteigen der Variabilität als im Nordwesten gegeben. Ab den 1980er Jahren, also im aktuellen „Treibhauszeitalter“, ist eine markante Veränderung aller drei Regionaltrends zu sehen, im Nordwesten und im Nordosten nimmt die Variabilität nun deutlich ab, im Süden bleibt sie gleich.

Tab. 1: Lineare Trends der Klimavariabilität in drei Teilregionen des Alpenraums am Beispiel der sequentiellen Monatsmittel der Temperatur. 95%ig signifikante Trends sind fett gedruckt, sonstige Details wie in Abb.7.

	vergangene			
	200 Jahre 1796-2005	100 Jahre 1896-2005	50 Jahre 1946-2005	
NE-IQR98	-1.2	-0.3	0.2	Stabw.
NW-IQR98	-0.8	-0.6	-0.1	Stabw.
S-IQR98	-1.0	-0.2	-0.1	Stabw.
NE-IQR90	-0.7	-0.2	0.0	Stabw.
NW-IQR90	-0.5	-0.2	-0.1	Stabw.
S-IQR90	-0.7	-0.4	-0.5	Stabw.
NE-IQR80	-0.6	-0.2	-0.1	Stabw.
NW-IQR80	-0.5	-0.3	-0.3	Stabw.
S-IQR80	-0.3	-0.3	-0.4	Stabw.

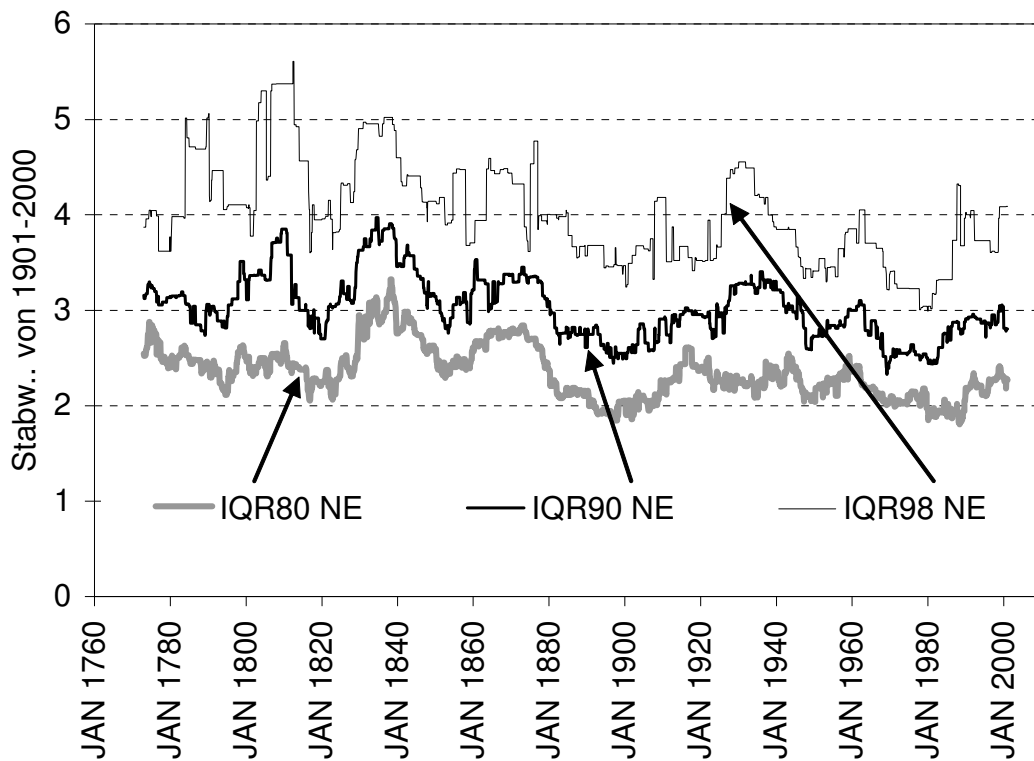


Abb. 7: Zeitreihen der Klimavariabilität im Nordosten des Alpenraums am Beispiel von übergreifenden 80%-, 90%- und 98% Interquantilbereichen von standardisierten und trendbereinigten Monatsmitteln der Lufttemperatur. Jeder Datenpunkt entspricht einem Zeitfenster von 120 Monaten. Beginn der Reihen: Jänner 1768 bis Dezember 1777, Ende: Jänner 1996 bis Dezember 2005.

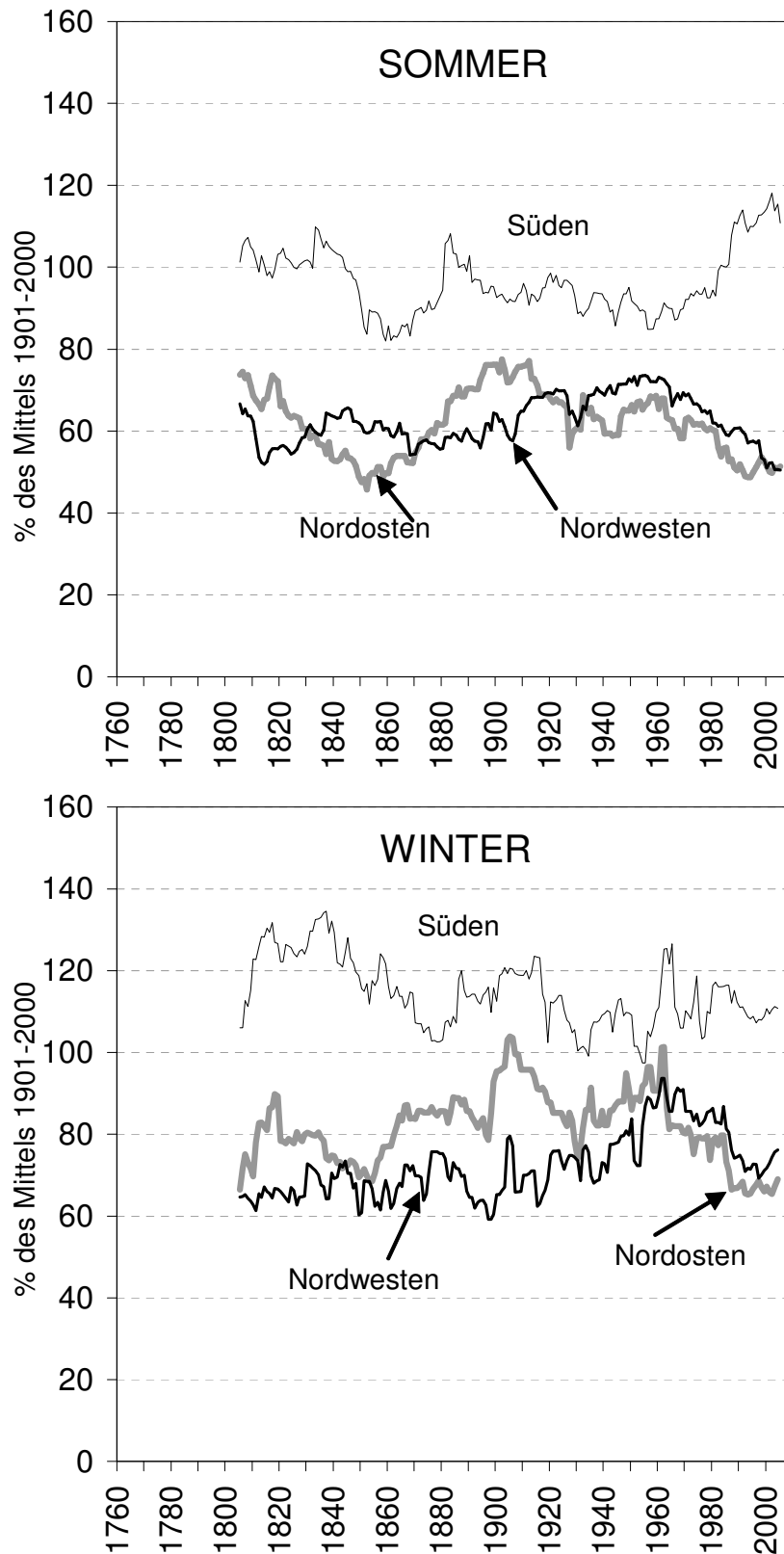


Abb. 8: Zeitreihen der Klimavariabilität in drei Subregionen des Großraums Alpen am Beispiel der Sommer- (oben) und der Wintersummen (unten) des Niederschlages. Datenbasis: Trendbereinigte Jahreszeitenreihen des LS-Subsets. Dargestellt sind die 80%-Interquantilbereiche in übergreifenden 30-jährigen Subintervallen.

4. Zusammenfassung

Unser kurzer Abriss aus der Klimageschichte der letzten zweieinhalb Jahrhunderte im Großraum Alpen sollte in erster Linie zwei Zwecken dienen. Zum Ersten wollen wir den neuen Datensatz HISTALP auch allen anderen Forschungsgruppen anbieten, die in der Klimaforschung selbst, oder in verwandten Fachgebieten, wie etwa der Hydrologie arbeiten, aber auch für alle Arten von Klimafolgenforschung. Es wurde viel Arbeit in die Erstellung des Datensatzes investiert, der in mancher Hinsicht weltweit allein dasteht. Die gezeigten wenigen Beispiele sollten auf interessante erste Ergebnisse hinweisen, die in manchem herrschende Meinungen für die Region bestätigen und mit neuen Daten untermauern, in manchen Bereichen, wie beispielsweise bei dem Postulat des angeblich extremer werdenden Klimas gibt es hingegen vielleicht überraschende, aber nun ebenfalls gut abgesicherte überraschende Ergebnisse. Von beidem hoffen wir, dass unsere Arbeiten zu einer Versachlichung der oft den Rahmen des wissenschaftlichen Argumentierens verlassenden Klimadiskussion beitragen können.

5. Literatur

Auer I., Böhm R., Jurkovic A., Lipa W., Orlik A., Potzmann R., Schöner W., Ungersböck M., Matulla C., Brunetti M., Nanni T., Maugeri M., Mercalli L., Briffa K., Jones P., Efthymiadis D., Mestre O., Moisselin Jm., Begert M., Müller-Westermeier G., Kveton V., Bochnicek O., Stastny P., Lapin M., Nieplova E., Cegnar T., Dolinar M., Gajic-Capka M., Zaninovic K., Majstorovic Z., Szalai S., Szentimrey T. (2007): HISTALP - HISTORICAL INSTRUMENTAL CLIMATOLOGICAL SURFACE TIME SERIES OF THE GREATER ALPINE REGION 1760-2003. *International Journal of Climatology* **27**: 17-46

Anschrift der Verfasser:

Reinhard Böhm
Ingeborg Auer
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
Hohe Warte 38, A-1190 Wien
Email: reinhard.boehm@zamg.ac.at, ingeborg.auer@zamg.ac.at

HISTORISCHE HOCHWASSERFORSCHUNG DIE ÜBERSCHWEMMUNGEN AN DER TRAUN IM 15. UND 16. JAHRHUNDERT

Christian Rohr

1. Einleitung – Probleme historischer Hochwasserforschung

Die historische Hochwasserforschung in Österreich beschäftigt sich in erster Linie mit extremen Wasserständen der letzten 200 Jahre – mit einem Schwerpunkt auf der Zeit nach den großen Flussregulierungen (Schwarzl, 1956; Kresser, 1957; Zisser, 1989). Die Gewinnung von historischen Hochwasserdaten aus vorindustrieller Zeit ist hingegen mit großen methodischen Problemen verbunden (Gees, 1996), die den Einsatz von spezialisierten Historikern (mit hydrologischen Grundkenntnissen) erfordert. Der folgende Beitrag setzt sich daher zum Ziel, diese Probleme in Ansätzen aus einer historisch-hilfswissenschaftlichen und einer kulturhistorischen Sicht aufzuzeigen. Vorausgeschickt sei auch, dass sich die historische Forschung zu Überschwemmungen dem Thema sowohl von einer klimageschichtlichen Seite nähert – also die Rekonstruktion von Naturereignissen zum Ziel hat – als auch von kulturgeschichtlicher Seite, die nach den Wahrnehmungs-, Deutungs- und Bewältigungsstrategien der Menschen fragt. Es soll deutlich gemacht werden, dass eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Kultur- und Naturwissenschaften bei der historischen Hochwasserforschung nicht nur für eine seriöse Auswertung von Archivalien notwendig ist, sondern auch für den Umgang mit extremen Abflussereignissen in heutiger Zeit wichtige Hinweise geben kann.

2. Neue Methoden zur Rekonstruktion historischer Hochwasser

2.1 Grenzen der Auswertbarkeit von Hochwassermarken

Seit den schweren Überschwemmungen des 16. Jahrhunderts – vor allem ab 1501, 1567, 1572 und 1598 – wurden im österreichischen Raum zur Erinnerung an die Pegelhöchststände Hochwassermarken angebracht. Sie befanden bzw. befinden sich zumeist an öffentlichen Gebäuden oder Durchgängen in Flussnähe.

Die Verwendung der Hochwassermarken im Zuge einer historisch-hydrologischen Forschung ist allerdings nur mit großer Vorsicht möglich. Bei der Berechnung der Hochwasserabflüsse wären zu viele Unbekannte zu berücksichtigen. Hierzu gehören neben den ohnehin ständig ablaufenden natürlich-dynamischen Prozessen im Gerinne insbesondere anthropogene Eingriffe in das Abflussgeschehen wie zum Beispiel Veränderungen des Flusslaufes durch massive Begradigungen und andere Regulierungen sowie Staustufen und Anlagen zur Wasserkraftnutzung (Rohr, 2006b). Allein an wenigen Stellen, etwa in Engelhartzell in Oberösterreich, wo die Donau durch ein Granitmassiv (Mühlviertel bzw. Sauwald) durchbricht, keinen Platz zur Ausbreitung in die Seite hat und sich höchstens wenige Zentimeter in den letzten Jahrhunderten eingetieft hat, ist ein Vergleich der historischen Hochwassermarken

einigermaßen möglich. Hydrologische Berechnungen der Wasserdurchflussmenge an anderen Orten müssen hingegen reine Hypothesen bleiben (Schwarzl, 1956; Kresser, 1957).

Außerdem wurden zahlreiche Hochwassermarken im Rahmen von Umbauten neu eingemauert oder sonst wie versetzt (Deutsch und Pörtge, 2002; Deutsch et al., 2006). Auch ist anzunehmen, dass vor allem durch Pinselstriche angezeichnete Pegelstände beim nächsten schweren Hochwasser wieder verwischt wurden. Der Neuauftrag der alten Hochwassermarke kann durchaus auch etwas verändert erfolgt sein. In vielen Fällen ist daher der tatsächliche Pegelstand nur mehr bedingt rekonstruierbar.

Hochwassermarken sind in erster Linie Erinnerungsmaße, die die Menschen nach besonders hohen Überschwemmungen anbrachten. Es fällt auf, dass die ersten Hochwassermarken im Ostalpenraum von der Millenniumsflut des Jahres 1501 herrühren, während etwa im Rhein-Main-Gebiet, aber auch an der Pegnitz in Nürnberg die dortige Millenniumsflut des Jahres 1342 den Beginn dieser Art von Erinnerungskultur markieren.

Das Sich-Erinnern an schwere Überschwemmungen half offensichtlich dabei, kleinere Hochwasser und deren Schäden leichter ertragen zu können. Zudem dürfte hinter der Memoria an vergangene Überschwemmungen auch eine Art *memento naturae* stecken. Die Auseinandersetzung mit der rauen, unberechenbaren Natur war gerade bei einem Leben nahe am Fluss eine ständige, die man sich immer vergegenwärtigen musste. Gebäude sollten nicht näher am Fluss gebaut werden als unbedingt notwendig. Das untere Stockwerk sollte so beschaffen sein, dass man es rasch noch evakuieren konnte. Jedes Sich-Darüber-Hinweg-Setzen konnte als Hybris gegenüber der Natur verstanden werden, die sich bitter rächen würde.

2.2 Klassifizierung von Hinweisen zu extremen Abflussereignissen in schriftlichen Quellen aus vorindustrieller Zeit

Da die Einbindung historischer Hochwassermarken in die Rekonstruktion von extremen Abflussereignissen mit großen Problemen verbunden ist, lässt sich heute die Intensität von Hochwasserereignissen im alpinen Raum vor dem Beginn des 20. Jahrhunderts nur noch in wenigen Fällen genauer rekonstruieren. Die Schwierigkeit liegt vor allem darin, die wenigen und vor allem sehr heterogenen Nachrichten in ein verlässliches, mehrstufiges Klassifikationsschema zu überführen. Ähnlich wie bei der in der historischen Seismologie verwendeten EMS98-Skala für Erdbeben bleibt nur die Möglichkeit, die Stärke und die Auswirkungen von Überschwemmungen aufgrund der angerichteten Schäden zu klassifizieren. Die bisherige Forschung stützte sich für Überschwemmungen des Spätmittelalters und der Frühen Neuzeit vor allem auf erzählende Quellen, auf frühe Wettertagebücher sowie auf Hochwassermarken. Aus der Beurteilung der Nachrichten über Überschwemmungen resultierte eine dreiteilige Skala, die allerdings die Wahrnehmung, Deutung und Bewältigung durch den Menschen – und damit auch die Repräsentation der Hochwasser in den Quellen – weitgehend unbeachtet lässt. Sie wurde 1996 durch Rüdiger Glaser entwickelt und von

Mathias Deutsch und Karl-Heinz Pörtge weiter präzisiert (Glaser, 1996; Glaser et al., 2002; Deutsch und Pörtge, 2002).

Dieses dreiteilige Klassifikationsschema, das offensichtlich vor allem in Hinblick auf die breiten, flachen Flusstäler Mittel- und Norddeutschlands erstellt wurde, weist aber auch Schwächen und Grenzen auf. So bleiben topographische Spezifika weitgehend unbeachtet. Im Hügelland sowie im Mittel- und Hochgebirge haben die Flüsse von vorne herein nur begrenzte Ausuferungsmöglichkeiten. Hingegen sind zahlreiche Siedlungen auf Anhöhen errichtet, die zumindest bei Überschwemmungen der Schadensstufe 1 und 2 weitgehend unangetastet bleiben. Auch der Aspekt der Verwundbarkeit einer Gesellschaft, vorrangig durch unerwartet eintretende Hochwasserereignisse und Serien von Überschwemmungen bleibt weitgehend unbeachtet.

Brücken und deren Reparatur nach Überschwemmungen sind hingegen als Parameter für die Intensität von Überschwemmungen besonders geeignet, da sie in jedem Fall nur wenige Meter über dem durchschnittlichen Pegelstand der Flüsse liegen, unabhängig von der Lage der Siedlungen. Außerdem ist aus einer kulturgeschichtlichen Perspektive weniger die tatsächliche Wasserdurchflussmenge, sondern das Ausmaß der Schäden maßgeblich, die in besonderem Maße durch Treibholz oder Eisgänge verursacht wurden.

Angaben in wirtschaftsgeschichtlichen Aufzeichnungen wie in den Welser Bruckamtsrechnungen sind zum einen frei von literarischer Topik und geben zum anderen relativ genau den Grad der Zerstörung der Brücke wieder, indem die Dauer und der Umfang der Reparaturen genau aufgelistet sind. Dabei sind Studien zu Flüssen mittlerer Größe wie etwa zur Salzach oder zur Traun leichter durchzuführen, da über diese schon seit dem Hochmittelalter Brücken führten; an der Donau entstanden Brücken erst deutlich später. Die steinerne Brücke von Regensburg bildete lange Zeit die einzige feste Verbindung zwischen Nord und Süd, zwischen Deutschland und Italien. Erst 1439 entstand die Brücke oberhalb von Wien, 1463 eine zwischen Krems und Mautern in der Wachau, 1497 die Brücke von Linz und 1505 die von Mauthausen (Rohr, 2006b).

Die folgenden Klassifikationskriterien sind daher weniger klimageschichtlich auf das messbare Ausmaß der Überschwemmung als hydrologisches Phänomen, sondern kulturgeschichtlich auf die Auswirkungen der Überschwemmung auf (Holz-)Brücken sowie auf die Lebenswelten der Menschen im Allgemeinen ausgerichtet (Rohr, 2006a; Rohr, 2006b).

Intensität 1: geringe und moderate Überschwemmungen von ufernahen Wiesen, Feldern und Siedlungen ohne nennenswerte Schäden

Intensität 2: größere Überschwemmungen, die Schäden anrichten, die in vorindustriellen Gesellschaften innerhalb eines Monats völlig behoben werden können

Intensität 3: sehr große Überschwemmungen, die große Schäden anrichten und Teile der (Holz-)Brücke völlig zerstören; dadurch wird ein Fährverkehr über den Fluss zumindest für einige Tage notwendig. Die Schäden können von

den Menschen in vorindustrieller Zeit nur in ein bis drei Monaten völlig behoben werden.

Intensität 4: extrem große Überschwemmungen, die aufgrund der enormen Schäden als Katastrophe wahrgenommen werden; die wirtschaftlichen und sozialen Strukturen sind zumindest für mehrere Monate schwer gestört, die Aufräumarbeiten dauern mehr als drei Monate. Die Menschen markieren den Wasserstand zur Erinnerung an die Katastrophe mit Hochwassermarken an Kirchen, Stadttoren und anderen öffentlichen Gebäuden.

Die Unterscheidung zwischen Intensität 3 und 4 – gegenüber der Schadensstufe 3 von Rüdiger Glaser – macht vor allem aus kulturgeschichtlicher Sicht Sinn, da es allein bei der höchsten Stufe innerhalb einer an Überschwemmungen gewöhnten Gesellschaft zu einer Katastrophenwahrnehmung kommt. Insgesamt aber decken sich vor allem die beiden ersten Stufen beider Systeme weitgehend.

2.3 Urkunden und Bruckamtsrechnungen

Überschwemmungen der Traun sind für das Spätmittelalter nur in wenigen Fällen direkt oder indirekt durch Urkunden belegt. Mehrere Urkunden aus dem 14. und 15. Jahrhundert geben auch Aufschluss über den Hochwasserschutz (Rohr, 2004): Am 5. Juni 1352 gewährte Herzog Albrecht II. von Österreich (1330-1358) den Bürgern von Wels auf zwei Jahre das Ungeld – eine Art Mehrwertsteuer – von Salz, Wein, Gewand und anderen Waren für Bauvorhaben der Stadt, insbesondere für Wasserschutzbauten zu verwenden. In einer weiteren Urkunde mit demselben Datum kommt ein offensichtlich aktuelles Problem beim Hochwasserschutz zutage: Manche Grundbesitzer weigerten sich, auf ihren Grundstücken öffentliche Schutzbauten errichten zu lassen, doch wurde das Gemeinwohl über den Privatbesitz gestellt, da zum Zwecke von Schutzbauten jeder Acker und jede Au offen gestellt werden musste. Da die beiden Urkunden Albrechts II. jeweils in Wels ausgestellt wurden, ist anzunehmen, dass im Rahmen des Besuchs des Herzogs ein „Lokalausweis“ durchgeführt wurde, der schließlich zu den Regelungen über den Hochwasserschutz führte. Eine weitere Urkunde über den Hochwasserschutz stammt aus dem Jahr 1376; sie verpflichtete die in der Umgebung liegenden Klöster Lambach und Kremsmünster zur aktiven Hilfe bei der Errichtung von Wasserschutzbauten und vor allem auch beim Ausbau des Welser Stadtgrabens. Der Stadtgraben bildete indirekt einen Teil des Hochwasserschutzes, da er ein Auffangbecken darstellte, das bei kleineren Hochwassern die Schäden für die Stadt selbst gering hielt. Eine ähnliche Ausrichtung wie die Urkunde von 1376 weist die des Königs Friedrichs IV. (1440-1493) vom 26. Juni 1445 auf. Der König forderte darin die Grundherren aller Grundherrschaften im Raum Wels auf, dass sie ihre Untertanen beauftragen, mit Robot (Zwangsarbeit) und Fuhren auf Verlangen der Stadt zu helfen, um die schweren Schäden nach dem letzten Hochwasser zu beheben und neuen Schäden vorzubeugen. Offensichtlich hatten in beiden Fällen die Ressourcen der Stadt Wels an Menschen und finanziellen Mitteln nicht ausgereicht, die schweren Hochwasserschäden einigermaßen rasch zu beseitigen.



Abb. 1: Die Stadt Wels von Süden aus gesehen. Kupferstich von Matthäus Merian (1649). Die Brücke dürfte zwischen dem Hochmittelalter und dem 17. Jahrhundert ihr Aussehen und ihre Lage nicht wesentlich verändert haben. Auch die Verzweigung der Traun in mehrere Arme, die landwirtschaftlich genutzte und mit Auenwald bewachsene Inseln umströmten, dürfte – wohl unter der Annahme sich immer wieder verändernder Flussarme – vom Gesamtbild her gleich geblieben sein.

Wenn auch die erwähnten Urkunden einen ersten Einblick in den Umgang der Welser Bürgerschaft mit den Überschwemmungen geben, so bleiben diese Nachrichten doch auf einige große Hochwasser beschränkt. Vor allem der Aspekt der Solidarität auf regionaler Ebene bei größeren Überschwemmungen wurde in den Urkunden angesprochen, offensichtlich weil diese nicht von vorneherein selbstverständlich war.

Beschränkt man sich also auf diesen leichter zugänglichen Quellenbestand, so bleiben freilich viele Desiderate zurück: Von wie vielen großen Hochwassern wissen wir, von wie vielen nicht? Wie oft traten kleinere Überschwemmungen auf? Welche Auswirkungen hatten sie? Lassen sich die materiellen Schäden der großen und kleineren Hochwasser einigermaßen eruieren?

Die Antwort auf derartige Fragen können Urkunden und auch erzählende Quellen nicht oder nur sehr lückenhaft geben. Im Falle von Wels freilich gewähren die Bestände der Welser Bruckamtsrechnungen zumindest für die Zeit ab der Mitte des 15. Jahrhunderts einen lebendigen Einblick in den Umgang auch mit den kleineren Überschwemmungen. Die von der Stadt ernannten Bruckamtsmeister schufen in ihrer Verwaltungstätigkeit eine umfassende Serie an Jahresabrechnungen, in denen u.a. die Ausgaben für die Instandsetzung der Brücke festgehalten wurden. Einzelne Fragmente

datieren aus den Jahren 1350, 1355, 1397/98 und 1428; ab 1441 hingegen sind die Jahrgänge mit einigen Lücken durchgehend erhalten und bilden so einen der bedeutendsten Bestände des Stadtarchivs Wels zum 15. und 16. Jahrhundert (Rohr, 2004; Rohr, 2006b).

Für eine Geschichte der Wahrnehmung, Deutung und Bewältigung von extremen Naturereignissen wurden derartige Bruckamtsrechnungen bis jetzt noch nie herangezogen, ja selbst für die Stadtgeschichtsforschung blieben sie bisher weitgehend unbeachtet. Der Hauptgrund dafür liegt sicherlich darin, dass es äußerst mühsam ist, auf mehr als 10.000 Seiten nach den verstreuten Nachrichten, die sich auf Überschwemmungen beziehen zu suchen, nicht zuletzt deswegen, weil die Schriften zum Teil extrem individuell und daher schwer lesbar sind.

Eine quantifizierende und statistische Auswertung solcher Bruckamtsrechnungen – ein ähnlicher Bestand ist auch für Bratislava erhalten, wartet aber noch auf eine Auswertung – stößt freilich auf größere Probleme: Zum einen stammen die Rechnungen von zahlreichen verschiedenen Bruckamtsmeistern, die jeweils individuell die Abrechnungen gestalteten. So können etwa die erwähnten Preise für Bauholz oder die Löhne für die an der Reparatur der Brücke beteiligten Handwerker nur mit einiger Vorsicht verglichen werden. Zum anderen sind manche Jahrgänge deutlich detaillierter gestaltet als andere und zwar unabhängig von der Menge der Ausgaben.

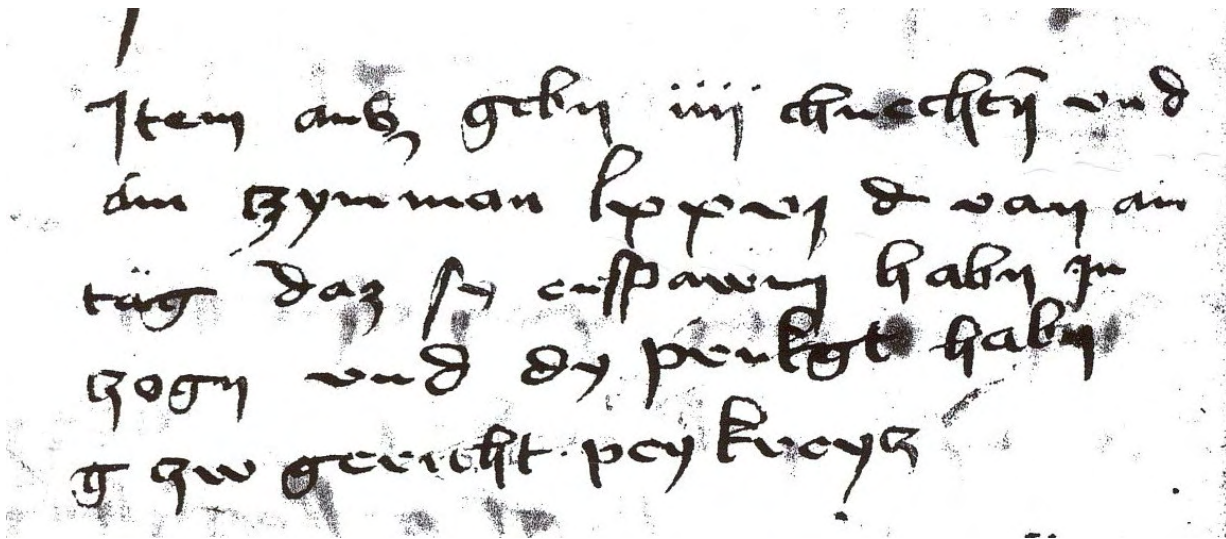


Abb. 2: Eintrag über Reparaturarbeiten an der Welser Traunbrücke nach einem Hochwasserschaden (Wels, Stadtarchiv, Bruckamtsrechnungen 1443, fol. 8v). Die Eintragung lautet: *Item aus gebn iiii chnecht(e)n und dm zym(er)man lxxvi d. van ain tåg daz sy enspawm haben in zogn und dy prukt haben g zw gericht pey kreyz* (Ebenso habe ich vier Knechten und dem Zimmermann insgesamt 76 Pfennige für einen Arbeitstag dafür bezahlt, dass sie lange Latten montiert und allgemein die Brücke beim Kreuz repariert haben).

Die Eintragungen erfolgten im Normalfall wöchentlich. Die Art und die Dauer der Handwerksarbeiten, für die das Bruckamt nach Überschwemmungen (*wegen der güss*) Löhne bezahlte, deutet somit präzise auf die Auswirkungen der Hochwasser hin: In

den meisten Fällen kann mittels der Bruckamtsrechnungen das Naturereignis auf die Woche genau datiert werden.

Probleme bereiten die zahlreichen missverständlichen Zahlenangaben, da im 15. Jahrhundert der Übergang von den römischen zu den arabischen Zahlen erfolgte, der den Bruckamtsmeistern ganz offensichtlich große Schwierigkeiten bereitete. Es ist daher notwendig, alle Zwischensummen durchzurechnen und die historischen Rechenfehler zu korrigieren.

Es ist auch nicht immer klar, ob die angegebenen Holzmengen wirklich rein zur Instandsetzung der Brücke und für andere Wasserschutzbauten im Umkreis der Brücke verwendet wurden oder auch anderen Zwecken dienten. Ein gewisser Handel mit dem in den Rechnungen angeführten Holz ist zwar anzunehmen, vor allem die Abgabe alten Materials an Bruckamtsuntertanen, doch ist er nicht konkret nachzuweisen. Insgesamt können aber die Holzeinkäufe und Handwerkerarbeiten auf die Brücke selbst und die Wasserschutzbauten in der unmittelbaren Umgebung bezogen werden, da für andere Bereiche, etwa den Stadtgraben, schon wieder andere Behörden zuständig waren.

Für die historisch-hydrologische Auswertung wurden weniger die Holzeinkäufe als Parameter herangezogen, denn diese erfolgten kontinuierlich, da man in einer historischen „Überschwemmungskultur“ ständig damit rechnete, dass das nächste Hochwasser innerhalb weniger Jahre eintreten werde. Vielmehr sind es vor allem die Dauer der Reparaturarbeiten und die Zahl der Handwerker, die daran beteiligt waren, weiters Angaben zur Einrichtung von Fährverkehr, die die Auswirkungen der Hochwasser klassifizieren lassen. Auch wenn durch den alle fünf bis zehn Jahre stattfindenden Wechsel im Bruckmeisteramt die Daten nicht vollständig homogen sind, so lassen sich doch seriöse langjährige Vergleiche anstellen.

3. Ergebnisse

3.1 Hydrologische Befunde

Mit der fortwährenden Abkühlung im Zuge der Kleinen Eiszeit nahm die Häufigkeit von Eisstößen deutlich zu. Bis zum 15. Jahrhundert dürften schwere Eisstöße im Donauraum eher die Ausnahme dargestellt haben, die in annalistischen Quellen extra hervorgehoben wurde. Völlig eisfreie Jahre waren aber auch wieder ungewöhnlich und daher berichtenswert. Während des 16. Jahrhunderts ist hingegen mehr und mehr davon auszugehen, dass die Flüsse oder zumindest längere, weiter verzweigte Abschnitte regelmäßig zufroren.

Die Welser Bruckamtsrechnungen lassen diesen Trend in zweierlei Hinsicht deutlich erkennen. Zum einen werden Winterhochwasser, hervorgerufen durch ein rasches Abschmelzen von Schnee und Eis nach Wärmeeinbrüchen oder durch Flutwellen, die durch Eisstöße hervorgerufen wurden, im 16. Jahrhundert häufiger, wie die unten stehende Grafik (Abbildung 3) erkennen lässt. Besonders in den 1560er-Jahren kam es

zu einer signifikanten Häufung von aus den Bruckamtsrechnungen rekonstruierbaren Eisstößen.

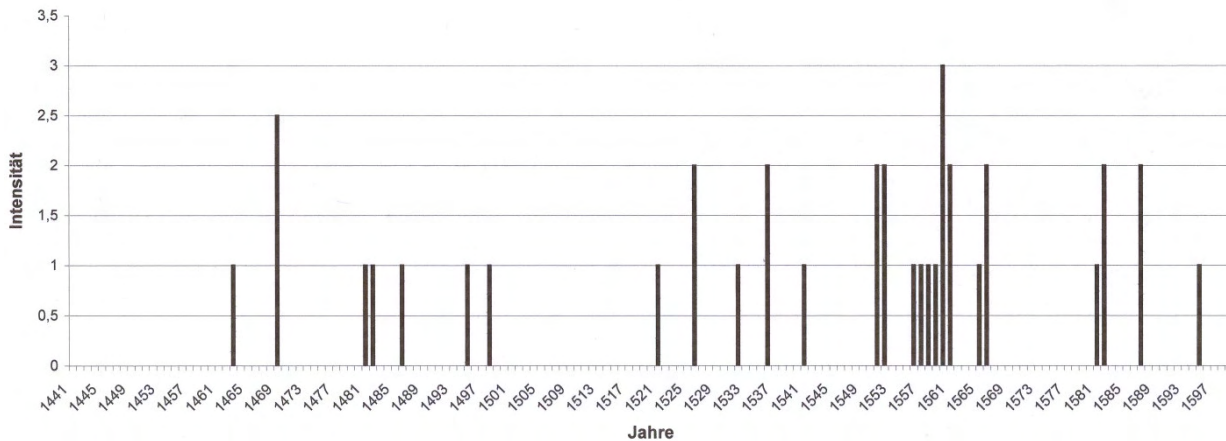


Abb. 3: Hochwasser und Eisstöße in den Monaten Jänner bis März an der Traun nach den Welser Bruckamtsrechnungen, 1441-1599. Daten bis 1574 nach Rohr (2006a), erweitert bis 1599.

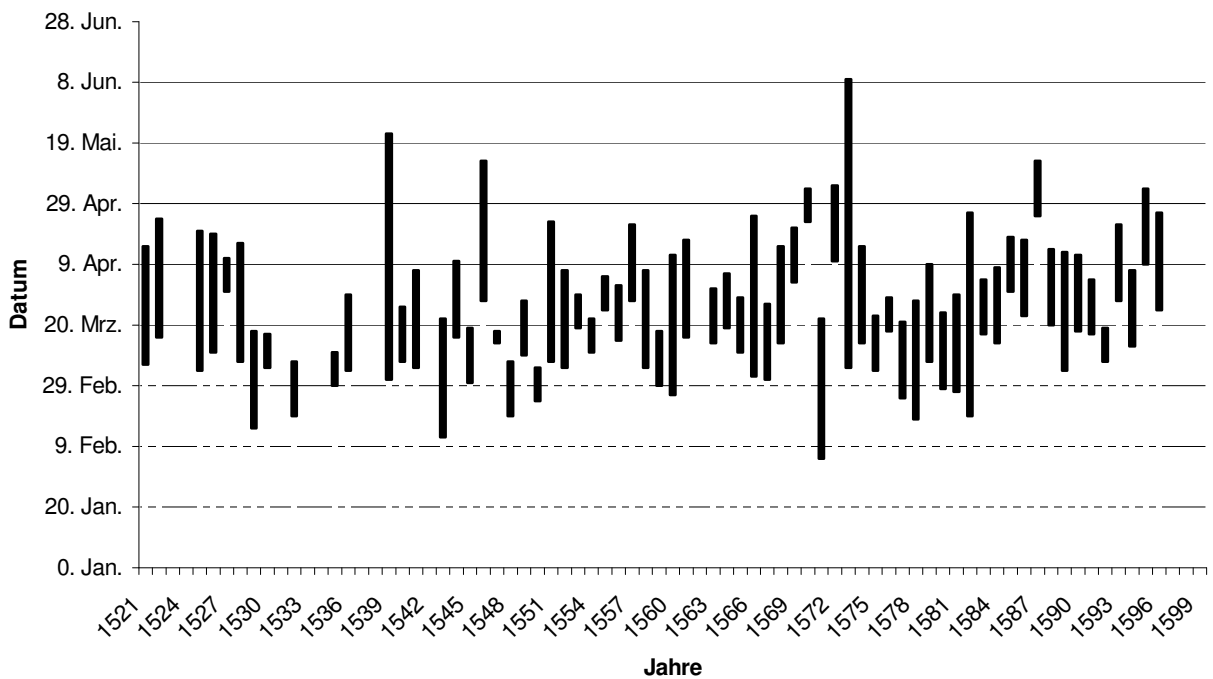


Abb. 4: Beginn und Dauer der Reparaturarbeiten an der Welser Traunbrücke im Frühjahr auf der Basis der Welser Bruckamtsrechnungen (1521-1599). Daten für 1521-1574 nach Rohr (2006a), erweitert bis 1599. Die Daten für 1597 bis 1599 sind nicht vergleichbar und wurden für diese Grafik weggelassen, da in diesen Jahren aus nicht im Detail nachvollziehbaren Gründen Generalsanierungen der Brücke ab Mitte Mai durchgeführt wurden, die sich jeweils über 7-13 Wochen zogen.

Seit den 1520er-Jahren ist in den Welser Bruckamtsrechnungen für fast jedes Jahr von größeren Reparaturen im Frühjahr die Rede. Auch wenn es nur selten explizit vermerkt ist, dürften diese Arbeiten mit Schäden in Verbindung stehen, die durch die

immer häufigeren Eisstöße, Schneemassen sowie Schmelzwasser verursacht wurden. Diese zum Teil enormen Schäden sind ein zusätzlicher Indikator für die Abkühlung während der Kleinen Eiszeit, die um 1570 ihren Tiefpunkt erreichte. Der Beginn der Reparaturarbeiten kann mit einiger Vorsicht auch als Parameter für das Ende des Winters und der Schneeschmelze im Alpenvorland herangezogen werden (Rohr, 2006a). Der Beginn der Arbeiten rückte im Laufe des 16. Jahrhunderts tendenziell im Kalender nach hinten, wie Abbildung 4 zeigt. Die Länge der Reparaturarbeiten lässt – bei aller Vorsicht – auch den Grad der Schäden durch Eis und Schnee erkennen.

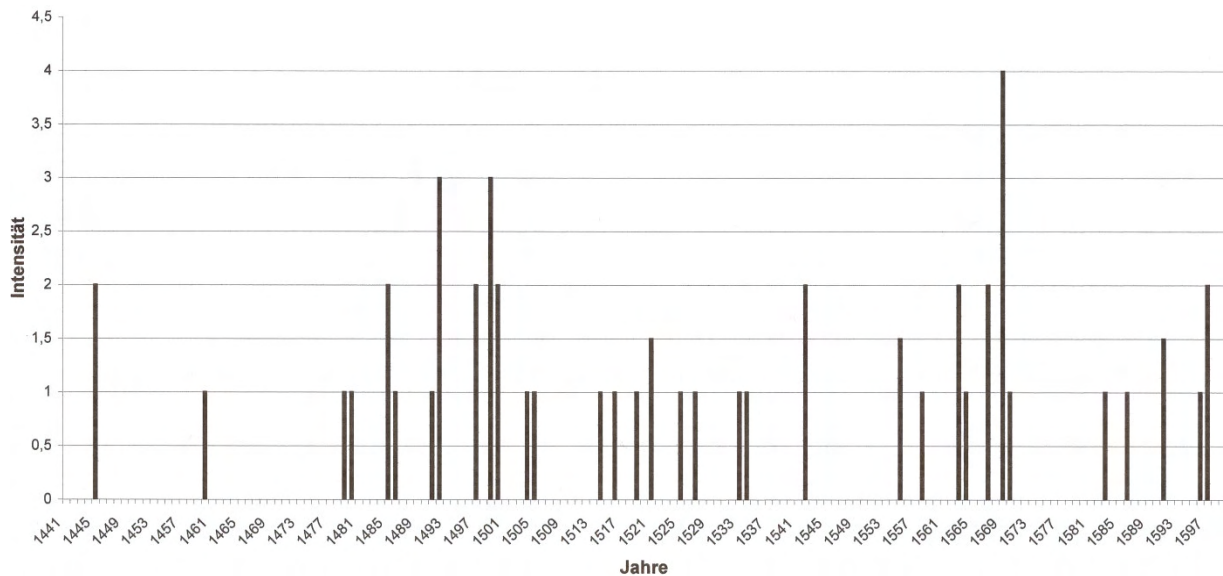


Abb. 5: Hochwasser in den Monaten Februar bis Mai an der Traun nach den Welser Bruckamtsrechnungen, 1441-1599. Daten bis 1574 nach Rohr (2006a), erweitert bis 1599.

An den Flüssen des Ostalpenraumes sowie des Alpenvorlandes waren großflächige Überregnungen zwischen Mitte Juni und Ende August in den meisten Fällen die Ursache für die bei weitem wasserreichsten Hochwasser. Die extreme Konzentration von Überschwemmungen auf die Sommermonate gehört zu den Spezifika des Ostalpenraums und lässt sich auch für die Flüsse Lech und Isar bestätigen (Böhm und Wetzel, 2006), während in Mitteldeutschland eine signifikante Überschwemmungshäufung nicht im Sommer, sondern im Winter festzustellen ist (Deutsch et al., 2004; Mudelsee et al., 2006). Nicht selten kam es vor allem durch regenreiche Tiefdruckgebiete aus dem nördlichen Mittelmeer zu mehrtägigen ergiebigen Regenfällen.

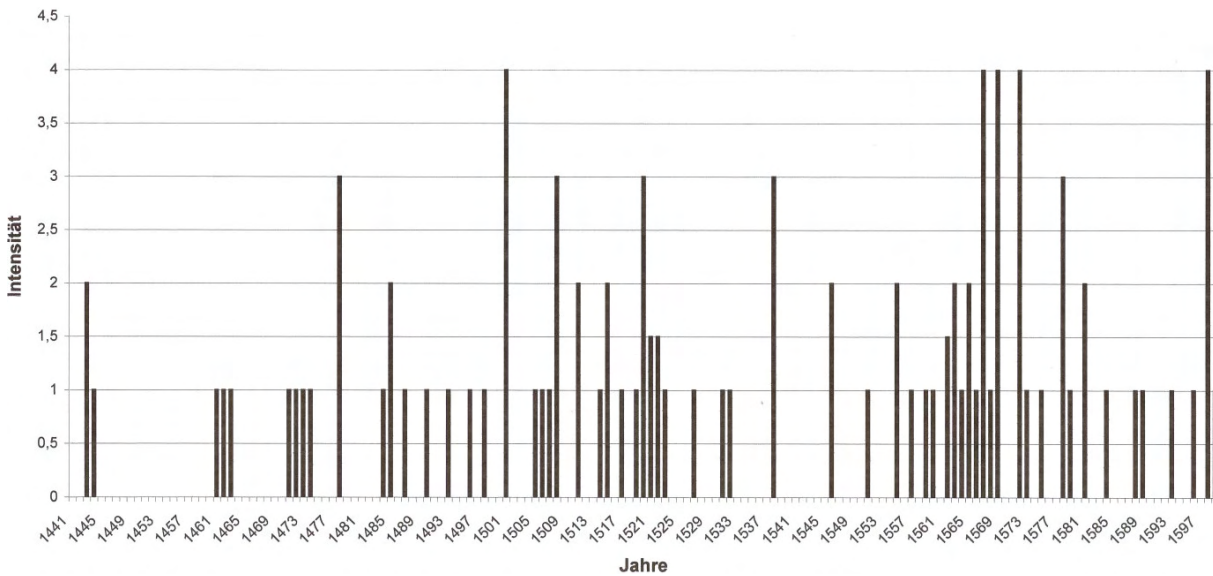


Abb. 6: Hochwasser in den Monaten Juni bis August an der Traun nach den Welser Bruckamtsrechnungen, 1441-1599. Daten bis 1574 nach Rohr (2006a), erweitert bis 1599.

Für ein Sommerhochwasser katastrophalen Ausmaßes war im Normalfall eine Serie von Niederschlagsperioden notwendig, d.h. das erste Regenereignis führte zumeist noch nicht zu einem extremen Hochwasser, sondern verringerte zunächst nur die Aufnahmefähigkeit des Bodens. Folgte dann im Abstand von weniger als zwei Wochen erneut eine zweite, lange Überregnungsphase, so floss nun der größte Teil des Wassers oberflächlich ab. Die Bäche und Flüsse schwellen daraufhin sehr rasch zu außergewöhnlicher Höhe an. Derartige „Doppelregenphasen“, die schließlich zu extremen Überschwemmungen führten, sind etwa für die Jahre 1501 (Regen Ende Juli und Mitte August), 1572 (Regen um den 30. Juni und um den 7./8. Juli) und 1598 (Regen um den 8. und um den 16. August) belegt. Um 1500 sowie in den 1560er- und 1570er-Jahren sind deutliche Häufungen von schweren Sommerhochwassern zu erkennen (vgl. Abb. 6).

Überschwemmungen im Herbst waren mit Abstand am seltensten, weil nach dem Ende der Schneeschmelze der Wasserstand der Flüsse kontinuierlich sank, sofern es nicht zu starken Regenfällen kam. Auch die Gewitterhäufigkeit nahm im Herbst deutlich ab. Anfang September waren zwar noch Überschwemmungen in der Art der Sommerhochwasser möglich, zerstörerische Fluten im Oktober, November und Dezember stellten aber im Ostalpenraum eine Ausnahme dar, wie die unten stehende Grafik (Abb. 7) am Beispiel der Traun zeigt. Allein in den letzten beiden Jahrzehnten des 16. Jahrhunderts ist eine leichte Häufung von leichten und mittelschweren Herbsthochwassern zu erkennen.

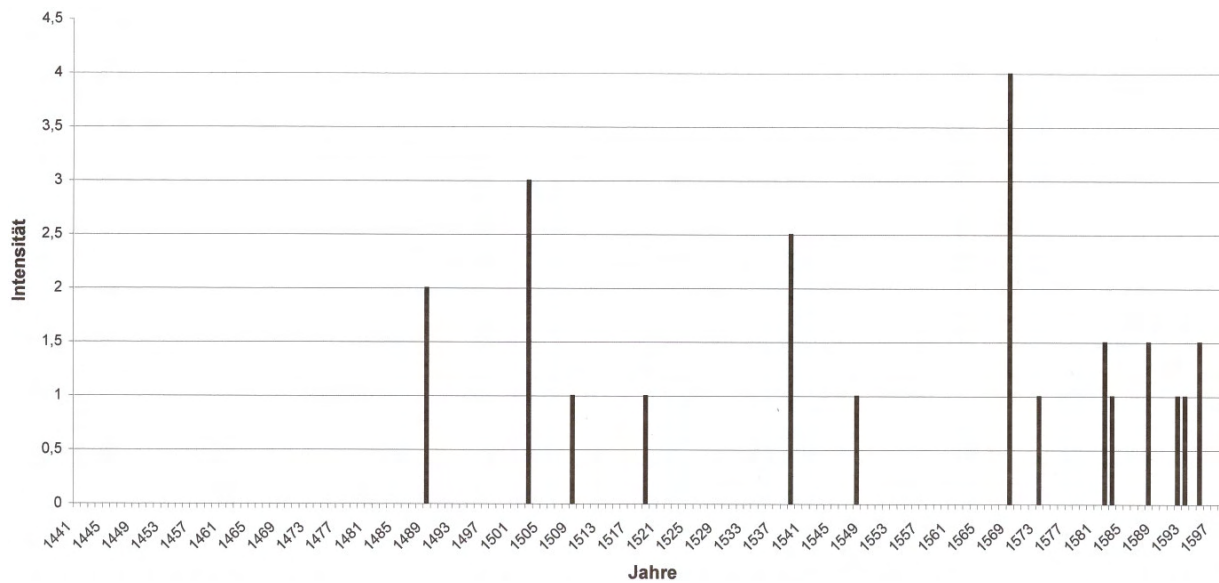


Abb. 7: Hochwasser in den Monaten September bis Dezember an der Traun nach den Welser Bruckamtsrechnungen, 1441-1599. Daten bis 1574 nach Rohr (2006a) erweitert bis 1599.

3.2 Kulturhistorische Befunde

Die Menschen in historischer Zeit lebten am und mit dem Fluss. Der Fluss ermöglichte ihnen in vielerlei Hinsicht überhaupt das Überleben und verhalf ihnen in zahlreichen Fällen zu einem gewissen Wohlstand. Ständig wiederkehrende Hochwasser müssen aber ebenso zum Alltag der Menschen dazugehört haben. Das Kriterium der Unerwartetheit kommt bei Überschwemmungen somit nicht so stark zum Tragen wie bei singulären Naturereignissen. Es stellt sich somit die Grundfrage, wie weit die Überschwemmungen der Traun von den Welser Bürgern des 15. und 16. Jahrhunderts überhaupt als Katastrophen erlebt wurden bzw. wenn ja, warum und wie.

Die Rekonstruktion von „Normalität“ gestaltet sich freilich deutlich schwieriger als die Erforschung von extremen Überschwemmungen. Normalität war es zumeist nicht Wert, in erzählenden Quellen dokumentiert zu werden. Allerdings ist gerade bei einer kulturgeschichtlich ausgerichteten Untersuchung des Verhältnisses der Menschen zu Naturereignissen wichtig, Aufschlüsse auch über die Normalität und die kleineren Abweichungen davon zu erzielen. Diese Ergebnisse sind nicht zuletzt deshalb von Bedeutung, weil ein „mentalitätsbezogener Zugang“ vor allem auch nach den Möglichkeiten und Unmöglichkeiten des Handelns und Denkens für die Menschen einer bestimmten Zeit, Region und sozialen Herkunft fragt (Rohr, 2001; Rohr, 2006b).

Erst die gemeinsame Rekonstruktion des Umgangs mit dem Fluss im Alltag und während der Katastrophe lässt die Frage beantworten, ob sich an den Flüssen im Ostalpenraum eine „Überschwemmungskultur“ gebildet hat. Die aus den Welser Bruckamtsrechnungen gewonnenen Erkenntnisse zur Wahrnehmung, Deutung und Bewältigung der Überschwemmungen zeigen deutlich, dass an den österreichischen Flüssen eine derartige Überschwemmungskultur in vorindustrieller Zeit bestanden hat:

Dazu gehört erstens eine genaue Kenntnis von Ursachen und Auswirkungen der Überschwemmungen; dies beinhaltete auch, dass Vorwarnsysteme existierten, etwa durch die Salzschiffer an der Traun. Zweitens stellten Gemeinschaften wie Städte ihre Vorsorge darauf ein, dass es zu einer raschen Abfolge von Überschwemmungen kommen kann und versuchen auch in Normalzeiten stets sich auf kleinere und größere Hochwasser vorzubereiten, etwa durch den regelmäßigen Ankauf von Holz für Brücken und Wasserschutzbauten. Schließlich resultiert daraus, dass sich etwa einzelne Berufsgruppen auf die Vorsorge sowie die Behebung von Schäden spezialisierten, ja von derartigen Aufträgen sogar abhängig waren. Bis auf ganz wenige Ausnahmen, etwa die extremen Hochwasser von 1501, 1572 und 1598, wurden extreme Abflussereignisse somit nur selten als Katastrophe wahrgenommen und mussten daher nicht übernatürlich, etwa als Strafe Gottes, gedeutet werden (Rohr, 2004; Rohr, 2006b).

4. Ausblick: Überlegungen zum Nutzen kulturhistorischer Hochwasserforschung

Der Nutzen von historisch-hydrologischer und kulturgeschichtlich ausgerichteter Hochwasserforschung zu Flusssystemen in vorindustrieller Zeit erscheint erst auf den zweiten Blick evident. Zum einen sind historische Hochwasserdaten wichtige Indikatoren im Rahmen der Rekonstruktion historischer Klimaverläufe, wie das Beispiel der immer häufiger werdenden Eisstöße im 16. Jahrhundert zeigt. Gerade angesichts der laufenden Debatte über das tatsächliche Ausmaß des Klimawandels können durch die historische Hydrologie klimageschichtliche Befunde präzisiert bzw. modifiziert werden.

Zum anderen machen kulturgeschichtliche Studien den Blick auf den Menschen frei, der mit seinen Wahrnehmungs-, Deutungs- und Bewältigungsstrategien bei rein naturwissenschaftlichen Studien häufig etwas ausgeblendet wird. Vergleicht man beispielsweise historische Überschwemmungskulturen in unserem Raum mit der heutigen Gesellschaft, so wird deutlich, dass große Teile der Bevölkerung seit den großen Flussbegradigungen des 19. und 20. Jahrhunderts den direkten Bezug zu den Gefahren des Flusses für das natürliche Lebensumfeld des Menschen weitgehend verloren haben: Kleinere Hochwasser sind nicht mehr spürbar, wirklich verheerende, wie sie sich etwa zuletzt 1954 und 2002 im Donaauraum ereigneten, kommen überraschend, weil die Erinnerung an das letzte Extremereignis längst verblasst ist. Die Folge war in vielen Fällen eine Sorglosigkeit bei der Umwandlung von bedrohten Gebieten in Bauland. Im Angesicht des extremen Hochwassers führte die Unerwartetheit bei den Menschen zu einer Katastrophenwahrnehmung.

Es wäre daher an der Zeit, die heutige und zukünftige Bevölkerung wieder mehr an das Phänomen Fluss heranzuführen, jedoch weniger durch theoretisierende Ausstellungen als durch konkrete Anschauung. Geeignet dafür wären etwa renaturierte Flussabschnitte, an denen das Zusammenspiel von Hoch- und Niedrigwasser deutlich wird. Der Sonntagsausflug entlang des im Frühjahr überschwemmten Auenwalds könnte zur Bewusstseinsbildung über die Dynamik des Flusses beitragen.

5. Literatur

Böhm, O., Wetzel, K.-F. (2006) Flood history of the Danube tributaries Lech and Isar in the Alpine foreland of Germany, *Hydrological Sciences Journal* 51, 5, 784-798.

Deutsch, M., Böhner, J., Pörtge, K.-H., Rost, K. T. (2004), Untersuchungen historischer Hochwasserereignisse in Thüringen – dargestellt am Beispiel der Werra, *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband* 135, 11-32.

Deutsch, M., Pörtge, K.-H. (2002) Hochwasserereignisse in Thüringen (Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Schriftenreihe 63), Jena.

Deutsch, M., Grünewald, U., Rost, K. T. (2006) Historische Hochwassermarken – Ausgangssituation, Probleme und Möglichkeiten bei der heutigen Nutzung, in: Disse, M. et al. (Hg.), *Risikomanagement extremer hydrologischer Ereignisse. Beiträge zum Tag der Hydrologie 2006, 22./23. März 2006 an der Universität der Bundeswehr München* (Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 15.06, Band 1: Vorträge 1), Hennef, 59-70.

Gees, A. (1996) Analyse historischer und seltener Hochwasser in der Schweiz. Bedeutung für das Bemessungshochwasser (Geographica Bernensia, Reihe G: Grundlagenforschung 53), Bern.

Glaser, R. (1996) Beiträge zur Historischen Klimatologie in Mitteleuropa seit dem Jahr 1000 (masch. geowiss. Habilschrift Würzburg), Würzburg.

Glaser, R., Jacobeit, J., Deutsch, M., Stangl, H. (2002) Hochwässer als historisches Phänomen, in: *Katastrophe oder Chance? Hochwasser und Ökologie. Rundgespräch am 22. Oktober 2001 in München* (Rundgespräche der Kommission für Ökologie 24), München, 15-30.

Kresser, W. (1957) Die Hochwässer der Donau (Schriftenreihe des österreichischen Wasserwirtschaftsverbandes 32-33), Wien.

Mudelsee, M., Deutsch, M., Börngen, M., Tetzlaff, G. (2006) Trends in flood risk of the River Werra (Germany) over the past 500 years, *Hydrological Sciences Journal* 51, 5, 818-833.

Rohr, C. (2001) Mensch und Naturkatastrophe im Mittelalter. Tendenzen und Probleme einer mentalitätsbezogenen Umweltgeschichte des Mittelalters, in: Hahn, S., Reith, R. (Hg.), *Umweltgeschichte. Arbeitsfelder – Forschungsansätze – Perspektiven* (Querschnitte. Einführungstexte zur Sozial-, Wirtschafts- und Kulturgeschichte 8), Wien/München, 13-31.

Rohr, C. (2004) Überschwemmungen an der Traun zwischen Alltag und Katastrophe. Die Welser Traunbrücke im Spiegel der Bruckamtsrechnungen des 15. und 16. Jahrhunderts, *Festschrift 50 Jahre Musealverein Wels* (Jahrbuch des Musealvereins Wels 33), Wels, 281-328.

Rohr, C. (2006a) Measuring the frequency and intensity of floods of the Traun River (Upper Austria), 1441-1574, *Hydrological Sciences Journal* 51, 5, 834-847.

Rohr, C. (2006b) Naturerfahrung zwischen Alltag und Katastrophe. Studien zur Wahrnehmung, Deutung und Bewältigung von extremen Naturereignissen im Ostalpenraum (13.-16. Jahrhundert) (masch. phil. Habilschrift Salzburg), Salzburg [Druckfassung erscheint im Herbst 2006 unter dem Titel Extreme Naturereignisse im Ostalpenraum. Naturerfahrung im Spätmittelalter und am Beginn der Neuzeit].

Schwarzl, S. (1956) Die Hochwasserbedrohung Wiens. Elementarereignisse an der Donau im Rahmen der Klimaentwicklung (Wetter und Leben, Sonderheft 4), Wien.

Zisser, H. (1989) Die Hochwässer der Donau (masch. techn. Diplomarbeit Wien), Wien.

Anschrift des Verfassers:

Ao.Univ.Prof. Mag. Dr. Christian Rohr MAS
Fachbereich Geschichte, Universität Salzburg
Rudolfskai 42, A-5020 Salzburg
Email: christian.rohr@sbg.ac.at

HISTORISCHE ÜBERFLUTUNGEN AM KAMP

Heinz Wiesbauer

1. Einleitung

Die Hochwasserereignisse im August 2002 zählen zu den schlimmsten Katastrophen am Kamp. Die Flut hat sich innerhalb weniger Stunden ausgebreitet und eine Verwüstung hinterlassen, die ihresgleichen sucht. Was blieb, sind menschliches Leid, unfassbare Schäden und Stoff für die Ortschroniken.

Das Hochwasser hat uns gezeigt, welchen Überflutungsraum der Kamp im Extremfall beansprucht. Großräumige Regenfälle von über 200 mm in nur zwei Tagen sind zwar ein außergewöhnliches Ereignis, das statistisch gesehen nur etwa alle 1.000 Jahre vorkommt. Doch das Wetter hat in den letzten Jahren so manche Kapriole gezeigt und wird künftig vielleicht noch unberechenbarer. Deshalb ist es wichtig, die natürlichen Überflutungsgebiete bei der Nutzung unserer Landschaft zu beachten. Andernfalls sind gravierende Schäden vorprogrammiert.

Ein Blick in die Vergangenheit zeigt uns, dass dieses außergewöhnliche Ereignis keine singuläre Erscheinung war, sondern dass es mehrere vergleichbare oder sogar noch großflächigere Überflutungen gab. Da die wichtigste Hochwasserschutzmaßnahme in einer geordneten Siedlungsentwicklung liegt, die den Naturgefahren Rechnung trägt, ist die Aufarbeitung historischer Überflutungen von besonderem Interesse.

2. Quellen

Das kollektive Gedächtnis der Bevölkerung reicht meist nur wenige Jahrzehnte zurück. Im Vergleich dazu stellen Hochwassermarken an Gebäuden, Dorfchroniken und andere schriftliche Aufzeichnungen in Archiven gleichsam ein Langzeitgedächtnis unserer Gesellschaft dar.

Für die Auswertung historischer Hochwasserkatastrophen am Kamp kommen u.a. folgende Grundlagen in Betracht:

- Geomorphologische und pedologische Grundlagen
- Hochwassermarken an Gebäuden und andere stumme Zeugen (z.B. Pegel bei der Schlossmühle Grafenegg)
- Ortschroniken und Annalen
- Mühlenchroniken (z.B. Erhaltungsaufwand für Wehranlagen, Mühlkamp und andere Bauwerke der mehr als 20 Mühlen am Mühlkamp)
- Aufzeichnungen über den Erhaltungsaufwand von Brückenbauten und Straßen (z.B. über die Brücke bei Hadersdorf)
- Aufzeichnungen über wasserbauliche Instandhaltungsmaßnahmen (z.B. Abrechnungen über die Sanierung von Uferanbrüchen oder Dammerneuerungen)

- Plandarstellungen und Regulierungsprojekte (z.B. Projekt von Carl Adler Edler von Lilienbrunn)
- Wetteraufzeichnungen (z.B. Daten des Stiftes Klosterneuburg)

Im Folgenden werde ich vor allem auf die Aufzeichnungen des Wasserbauers Carl Adler Edler von Lilienbrunn eingehen, der für den unteren Kamp mehrere außergewöhnliche Überflutungen im Zeitraum zwischen 1780 und 1830 dokumentierte.

Folgt man den klimageschichtlichen Arbeiten von Glaser (2001) und Strömmer (2003), so war dieser Zeitraum vergleichsweise warm und trocken. Die Temperaturmittel der Frühjahrs- und Sommermonate lagen deutlich über dem langjährigen Schnitt, das Mittel der Niederschläge war deutlich niedriger als der langjährige Schnitt. Es handelt sich also um einen Zeitraum, der mit der heutigen Klimaentwicklung gewisse Ähnlichkeiten aufweist.

Die Planungen des Wasserbauers Lilienbrunn

Nach vier extremen Hochwasserereignissen in den Jahren 1780, 1799, 1803 und 1829 arbeitete der Wasserbauer Lilienbrunn für den Bereich zwischen Hadersdorf und der Mündung in die Donau Regulierungsmaßnahmen aus. Aus seiner Feder stammen detaillierte Aufzeichnungen über die Hochwasserschäden und Überflutungsflächen.

Als Grundlage für die Planung, aber auch für die Aufteilung der Projektkosten erfasste Lilienbrunn das gesamte Inundationsgebiet flussabwärts von Hadersdorf. Zu diesem Zweck bereiste er alle 26 von den Überflutungen betroffenen Gemeinden und rekonstruierte die Überflutungsflächen und die Schäden durch die unterschiedlichen Hochwasser. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Plänen und Protokollen dokumentiert.

Lilienbrunn arbeitete insgesamt vier Regulierungsvarianten für den unteren Kamp aus, die eine Begradigung und Verkürzung des Flusslaufes sowie die Errichtung von ausgedehnten Dammsystemen vorsahen. Obwohl keine dieser Varianten tatsächlich umgesetzt wurde, sind die Projektunterlagen von großem historischem Wert, da sie detaillierte Bestandserhebungen enthalten. In diesen Grundlagen finden sich auch Berechnungen über die Abflüsse des Katastrophenhochwassers von 1803 sowie Angaben über die erforderlichen Abflussquerschnitte, damit „das höchste seit 100 Jahren gewesene Wasser“ abgeführt werden kann.

Lilienbrunn war nicht nur Wasserbauer, sondern betätigte sich auch als Kartograph, als er das „Panorama der Donau von Linz bis Wien“ anfertigte, eine Eigenschaft, die er mit anderen Wasserbauern seiner Zeit teilte. Sein großes zeichnerisches Talent spiegeln auch die Planungsgrundlagen zur Kamp-Regulierung, insbesondere die Lagepläne und die Profildarstellungen, wider.

3. Hochwassergefährdung im unteren Kamptal

Bei Hadersdorf verlässt der Kamp die Tallandschaft und tritt in die weite Ebene des nördlichen Tullnerfeldes ein. Vor Durchführung flussbaulicher Eingriffe wies der

Fluss eine starke Dynamik auf und mäandrierte in weiten Bögen. Bei höheren Wasserführungen verlagerte er immer wieder sein Bett, indem er am Prallufer Material abgrub und dieses in langsam fließenden Zonen ablagerte. Von der Dynamik des Flusses war die gesamte Niederung zwischen dem Wagram und dem Gobelsberg betroffen. Noch heute lassen sich die starken Verlagerungen des Flusses anhand der Geländemorphologie und alter Flurnamen nachzeichnen. So befindet sich nahe der Ortschaft Wagram, also fernab des heutigen Kamp-Laufes, eine Flur mit der Bezeichnung „Alter Kamp Graben“. Auch der Mühlkamp ist vermutlich aus einer Laufverlagerung hervorgegangen und wurde erst in der Folge für die Belange der Wasserkraftnutzung adaptiert.

Am unteren Kamp waren die Überflutungsflächen sehr groß, da das nördliche Tullnerfeld äußerst flach ist. Häufige Hochwasser und geringe Flurabstände erschwerten die landwirtschaftliche Nutzung und beeinträchtigten die Lebensqualität in der Vergangenheit erheblich. Zudem hatte die Bevölkerung mit hygienischen Problemen (Sumpffieber) zu kämpfen.

Frühe Eingriffe zur Verbesserung des Hochwasserschutzes

Die ersten Hochwasserschutzmaßnahmen am Kamp lassen sich allenfalls bruchstückhaft anhand von Indizien rekonstruieren, da es darüber keine schriftlichen Aufzeichnungen gibt. So deuten einige Flurnamen auf weit zurückliegende Regulierungsmaßnahmen hin. Die an den Kamp grenzenden Fluren bei Brunn im Felde werden als „Dammäcker“ bezeichnet, jene am gegenüberliegenden Ufer als „Am Damm“. Da die Flurnamen dieser Gegend durchwegs älteren Datums (v.a. Früh- und Hochmittelalter) sind, kann davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei um sehr alte Hochwasserschutzmaßnahmen handelt.

Anfang des 19. Jahrhunderts wies der Kamp im Bereich zwischen Hadersdorf und Grafenwörth bereits ein mehr oder weniger geschlossenes Dammsystem auf (vgl. Lilienbrunn). Am orographisch rechten Ufer erstreckte sich dieses vom Gobelsberg bis Schlickendorf, am orographisch linken Ufer von Hadersdorf bis Grunddorf. Die flussabwärts liegenden Ortschaften waren im Einflussbereich der Donauhochwasser und hatten folglich keine Dämme. In einigen Bereichen deckt sich die Dammführung mit der heutigen Situation.

Ein besonderes Problem älterer Dammanlagen war ihr unkoordinierter Ausbau. Wurde ein Damm nur auf einer Seite des Flusses erhöht, führte dies beim nächsten Hochwasser zu Überflutungen am gegenüberliegenden Ufer. Vor diesem Hintergrund ist es leicht nachvollziehbar, dass die Gemeinden versuchten, sich in der Höhe und Stabilität ihrer Dämme gegenseitig zu überbieten, denn das Hochwasser sollte sich auf das jeweils andere Gebiet ergießen. Dass es dadurch zu massiven Konflikten zwischen den Ortschaften am linken und rechten Ufer des Kamp kam, belegen auch die Protokolle von Lilienbrunn (vgl. u.a. die Beschreibungen zu Brunn, Etsdorf, Grafenwörth).

Die Dämme konnten die Überflutungen bei kleineren Hochwassern vermindern, bei größeren Hochwassern kehrte sich ihre schützende Wirkung manchmal um, da das ausgeferte Wasser nicht mehr zurückströmen konnte. Lilienbrunn charakterisiert den aus wasserbaulicher Sicht unbefriedigenden Zustand des Flusses Anfang des 19. Jahrhunderts wie folgt: *„Wie er (Anm.: der Kamp) das Zöbinger Thal verlässt, tritt er in Ebenen ..., wo er besonders gegen Haindorf, Kammern und der Gemeinde Zeisselberg zu wüthen anfängt. Von der Hadersdorfer Brücke aber angefangen, ist der Kamp bis zu seiner Ausmündung in die Donau nicht nur in der Ebene, sondern was für die Bewohner der Gegend von 28 Gemeinden ... noch bitterer ist, durch irreguläre und äußerst zwecklose Baulichkeiten in seiner Sohle verlandet, und im Abflusse dergestalt gehemmt, daß er meistens austritt, die aufgeworfenen Dämme übersteigt und bricht, und so das rechte sowohl als auch linke Ufer verheerend unter Wasser setzt.“*

4. Historische Hochwasser

Systematische Aufzeichnungen der Hochwasserabflüsse existieren am Kamp seit 1914 (zunächst Lattenpegel, ab 1949 Schreibpegel; <http://geoinfo.lfrz.at>), davor wurde der Wasserstand allenfalls bei außergewöhnlichen Ereignissen festgehalten.

Die Daten über weiter zurückliegende Hochwasserabflüsse am Kamp sind äußerst bruchstückhaft. Zu den älteren Aufzeichnungen historischer Hochwasser zählt eine Eintragung in den Ratsprotokollen der Stadt Zwettl. Dieser ist zu entnehmen, dass am 4. März 1655 ein ähnlich hoher Wasserstand wie im Jahr 2002 aufgetreten war. Ein Warmwettereinbruch führte damals zu einem Eisstoß auf der Zwettl und am Kamp. Letzterer riss ein Drittel der Brücke im Stadtteil Syrnau weg und überflutete das Untere Tor (Moll, 2002). Da die Überflutungen durch einen Eisstoß ausgelöst wurden, kann angenommen werden, dass die damit verbundenen Abflüsse wesentlich geringer waren.

Ein anderes Dokument über historische Überflutungen am unteren Kamp liefert eine Karte aus dem Jahre 1699 (vgl. Abbildung 2). Diese wunderschöne Darstellung verdanken wir dem Umstand, dass der Zwettler Hofmeister die Hochwasser des Gschinzbaches (eines Kamp-Zubringers) über die Felder des Hadersdorfer Pfarrers ableitete. Dabei wurden auch die Kirche und der Markt überflutet, was erhebliche Schäden verursachte und Anlass für langjährige Streitigkeiten bot (vgl. Pich, 1947).

Die Chronologie der Hochwasserereignisse ließe sich anhand der Dorfchroniken und anderer schriftlicher Quellen fortsetzen. Diese zumeist „weichen Daten“ sind zwar aus historischer Sicht von großem Interesse, für die Rekonstruktion der Hochwasserabflüsse bilden sie jedoch in der Regel keine geeignete Grundlage.

Dass es über den unteren Kamp sehr aufschlussreiche Hochwasserdaten aus dem 18. und 19. Jahrhundert gibt, verdanken wir dem Umstand, dass Carl Adler Edler von Lilienbrunn für den Bereich zwischen Hadersdorf und der Mündung in die Donau mehrere Regulierungsvorschläge ausgearbeitet hat.



Abb. 1: Großflächige Überflutungen flussab von Hadersdorf beim HW 2002.



Abb. 2: Hochwasser bei Hadersdorf durch Ableitung des Gschnitzbaches (Quelle: Hofkammerarchiv, Kartensammlung O/123).



Abb. 3: Flusskarte von Lilienbrunn aus dem Jahre 1829 mit Hervorhebung des Inundationsgebietes und der Dämme (gelbe Linie entspricht etwa dem Überflutungsgebiet 1803, rote Linie zeigt die Lage der Dämme) (Quelle: NÖ Landesbibliothek, Kartensammlung BIII 110).

4.1 Die Hochwasser von 1799, 1803 und 1829

Ausgangspunkt für die geplanten Verbauungsmaßnahmen waren die katastrophalen Hochwasser in den Jahren 1799, 1803 und 1829. Gleichzeitig sollten auch hygienische Probleme (Sumpffieber) entschärft werden.

Aus heutiger Sicht ist die enorme Ausdehnung der Überflutungen von Interesse: Das Inundationsgebiet wurde im Westen von den Orten Brunn im Felde, Unterrohrndorf, Neustift an der Donau, Altweidling und Theiß begrenzt und erstreckte sich im Nordosten von Hadersdorf über Wagram am Wagram, Kollersdorf und Giggling bis an die Donau. Es umfasste eine Fläche von insgesamt 65 km², von denen 69 % als hochwertig („Felder, Häuser und Gärten“) und 31 % als geringwertig („Wiesen, Hutweiden, Auen und Gestrüpp“) eingestuft wurden.

Die Ausdehnung des Überflutungsgebietes zeigt Abbildung 3. Abgegrenzt wurde jenes Inundationsgebiet, das aus der Gesamtheit aller Überflutungen im Zeitraum 1780 bis 1829 resultiert. Eingeflossen sind in diese Betrachtung auch die Hochwasser des Gschinzbaches und der Lössgräben entlang dem Wagram. Innerhalb der großräumig ausgewiesenen Überflutungsräume waren nur wenige Bereiche wie das Schloss Grafenegg hochwasserfrei.

Die jeweilige Hochwassergefährdung spiegelt sich in der Flächennutzung wider: Selten überflutete Bereiche wurden in der Regel ackerbaulich genutzt, in häufig überfluteten Bereichen waren Wiesen oder Auenwälder ausgebildet. Angesichts der häufigen Hochwasser ist der große Anteil höherwertiger Nutzungen nördlich der Donauauen bemerkenswert, innerhalb des Inundationsgebietes gab es sogar ausgedehnte Weingärten. In den an die Donauauen angrenzenden Ortschaften dominierten hingegen Wiesen und Auen. Im Gegensatz zur heutigen Situation kann jedoch nicht von einem mehr oder weniger geschlossenen Auengürtel gesprochen werden, sondern von einer breiten Zone mit mosaikartig wechselnder Nutzungsstruktur.

Aus den Projektunterlagen von Lilienbrunn geht hervor, dass der Kamp jährlich zwei bis drei Mal und in gewitterreichen Jahren bis zu sieben Mal über die Ufer trat. Größere Hochwasser waren u.a. 1709, 1710, 1726, 1747, 1773, 1775, 1782, 1784, 1795, 1799, 1803, 1805, 1806, 1809, 1823, 1827, 1828 und 1829. Die Hochwassergefährdung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Überflutungsflächen am rechten Ufer

Die Gemeinde Brunn im Felde war durch zwei Dämme geschützt, die aber bei extremeren Hochwassern überronnen wurden und barsten. Auch lang andauernde, mittlere Hochwasser verursachten gravierende Schäden, da sie den Grundwasserspiegel erhöhten und die Häuser allmählich unter Wasser setzten. Da das Wasser nicht abfließen konnte und nur langsam versickerte, traten bei Mensch und Tier häufig Krankheiten auf.

Überstieg das Hochwasser die Dämme bei Brunn, so gelangten die Fluten auch nach Stratzdorf, Unterrohrndorf, Altweidling, Neuweidling und Theiß. Wesentlich

häufiger wurden aber die nahe am Kamp gelegenen Ortschaften Schlickendorf und Donaudorf überschwemmt. Führte auch die Donau Hochwasser, waren die Schäden in diesen Bereichen besonders gravierend.

Überflutungsflächen am linken Ufer

Der Markt Hadersdorf war durch mehrere Dämme geschützt, die den Ortskern umgaben. Besondere Gefahr ging neben dem Kamp auch vom Gschinzbach aus, insbesondere dann, wenn beide Gewässer gleichzeitig Hochwasser führten.

Südlich von Hadersdorf verläuft der so genannte „Brandmayer-Damm“. Größeren Hochwassern hielt dieser Damm nicht stand, so dass die Fluten in die angrenzenden Ortschaften strömten und große Schäden verursachten. So schwammen 1803 in Etsdorf die Kirchenstühle davon und der Müller von Walkersdorf musste für längere Zeit den Betrieb einstellen.

Obwohl der Kamp von ausgedehnten Dämmen begleitet wurde, waren die Ortschaften Sittendorf, Haitzendorf, Kamp, Grunddorf, Jettsdorf und Grafenwörth besonders hochwassergefährdet. Die Ortschaften St. Johann, Oberseebarn und Unterseebarn wurden neben den Hochwassern des Kamp auch von jenen der Donau geschädigt. Die östlich gelegenen Ortschaften Sachsendorf, Kollersdorf und Giggling wurden bei lokalen Gewitterereignissen von dem am Wagram abfließenden Wasser tangiert. Die Ortschaft Altenwörth liegt etwas höher und wurde folglich nur sehr selten überflutet.

Beim Hochwasser 1803 reichte das Überflutungsgebiet bis an den Wagram. Damals stand sogar der Garten des Schlosses Grafenegg teilweise unter Wasser, das höher gelegene Schloss war hingegen nicht betroffen. Nach Lilienbrunn war die Stabilität der Dämme flussabwärts von Hadersdorf für das Schicksal der unteren Gemeinden ausschlaggebend: *„Wenn aber die Dämme bei Diendorf brechen, so ist das Wasser so stark, dass es die Felder abträgt und sich ... an der Wagramer Grenze bis nach Grafenwörth ergießt.“* Da das Kamp-Gerinne durch Gehölze verklaust war und die Dämme am linken Ufer brachen, dürften gewaltige Wassermengen außerhalb des Damms abgeflossen sein. Auf diese Weise gelangte das Hochwasser auch in die Senke zwischen dem Wagram und dem Schloss Grafenegg, was nicht einmal beim Hochwasser 2002 der Fall war. Welche Rolle dabei auch die Abflüsse aus dem Lössgebiet gespielt haben, kann aus heutiger Sicht schwer beurteilt werden.

Genauere Beschreibungen der Überflutungsgebiete und der Hochwasserschäden aller betroffenen Ortschaften liefern die Protokolle Lilienbrunns (vgl. dazu auch Tabelle 1 und Wiesbauer, 2004).



Abb. 4: Planlich dokumentierte Hochwasserstände bei Schlossmühle Grafenegg (1803 = Höchststand, 1799 = $H_{1803} - 0,14$ cm, 2002 = $H_{1803} - 0,48$ cm, 1823 = $H_{1803} - 1,07$ cm, 1829 = $H_{1803} - 1,08$ cm).

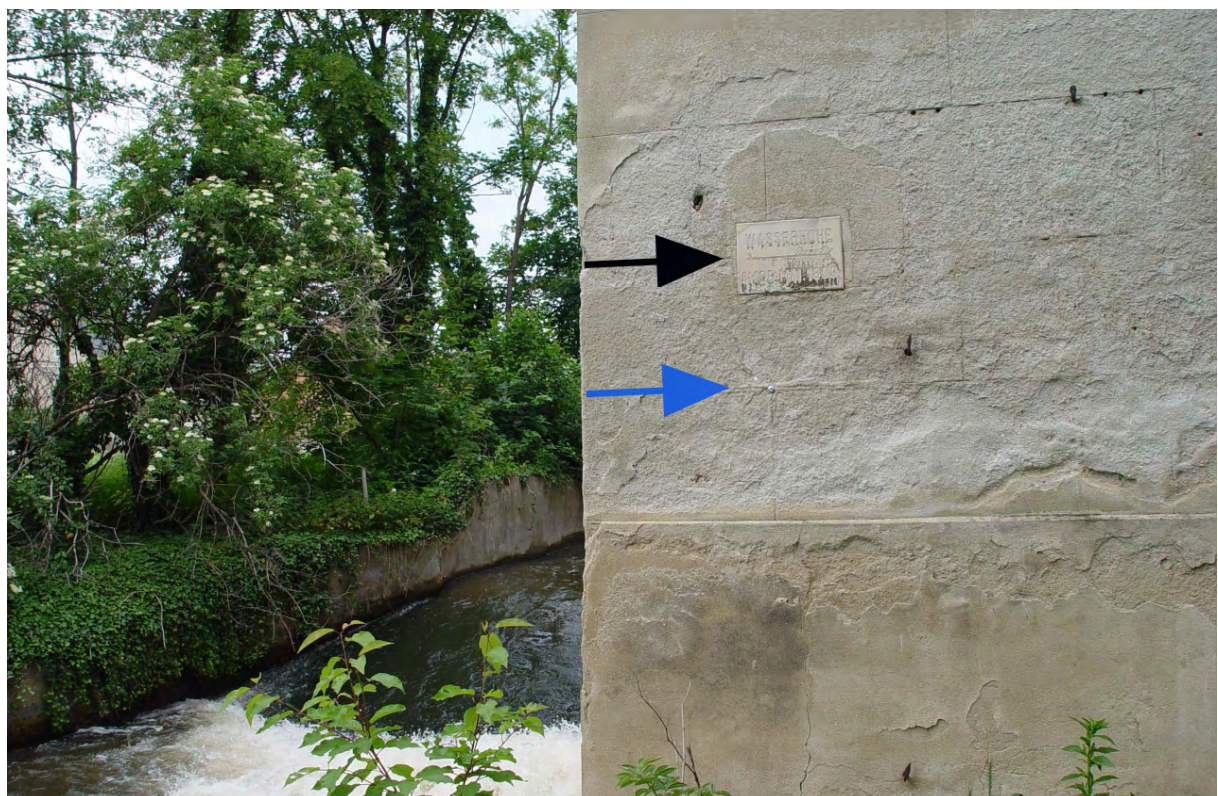


Abb. 5: Hochwassermarken 1803 bei Schlossmühle Grafenegg lag 48 cm über dem HW 2002.

Tab. 1: Erhebungsprotokolle zu den Gemeinden Brunn und Etsdorf, stellvertretend für die 26 im Überflutungsraum liegenden Gemeinden (Lilienbrunn 1829).

Brunn im Felde

Die Gemeinde Brunn im Felde ist durch zwei Dämme gegen den Austritt des Kampflusses gesichert, der erste beginnt an der Kremser-Straße und zwischen den Grenzen von Diendorf und Brunn und geht längs dieser Grenze bis dahin, wo die Gemeindegrenzen von Brunn, Grunddorf und Schlickendorf zusammenstoßen. Dann geht er noch bis Schlickendorf in eben dieser Höhe fort, allein erhalten wird er nur bis zur Zusammenkunft der oben beschriebenen Gemeindegrenzen von Brunn. Dieser Damm schützt daher die Gemeinden Gedersdorf, Rohrendorf etc., welche Gemeinden daher den Brunnern im Falle, dass der Damm gebrochen wird, etwas zum Herstellen helfen. Die Gemeinde erklärt, dass sie die Erbauung des Dammes nicht anzugeben wisse und dass derselbe vielleicht schon mehr als 500 Jahre steht. In den Jahren 1709, 1710, 1726, 1747, 1773, 1775, 1782, 1803, 1805, 1809, 1829 wurde der Damm an verschiedenen Stellen weggebrochen. Überstiegen wurden diese Dämme 1803 und 1829. Der zweite Damm besteht unmittelbar zum Schutz der Häuser, wo aber die Gemeinde angibt, dass wenn das Wasser groß ist und einige Tage anhält, sie in ihre Wohngebäude Wasser bekommen und bei dem Umstand, dass der Ort, wie auch das Niveau zeigt, das bei weitem tiefer liegt als die Felder, sie dasselbe nicht ableiten können, sondern von selbst wieder versickern muss und daher auch so viele Krankheiten in dieser Gemeinde herrschen.

Im Jahre 1782 war das Wasser so hoch, dass die Dämme brachen und überflutet wurden. Eine größere Anzahl der Häuser stürzte ein und 40 Stück Hornvieh sind ertrunken. Das Hochwasser von 1803 ist im Plane ersichtlich und nach Verschiedenheiten des Bodens 5 bis 8 Schuh hoch im Orte. 1829 war das Wasser um 1 1/2 Schuh tiefer als 1803. Durchschnittlich 2 bis 3 Mal im Jahr, aber auch 5 bis 6 Mal kommt Hochwasser. 1826 war es 9 Mal.

Für die Inundationsgrenze wurden die Pflöcke XXV, XXVII, XXVIII, XXIX, XXX, XXXI, XXXII, XXXIII geschlagen. Innerhalb dieser Grenze ist die Gemeinde ganz überschwemmt; und die wenigen höher liegenden Stellen und daher nie Wasser erhaltenden Raine in Bezug auf das Ganze als null empfunden. Das aus dieser Gemeinde strömende Wasser geht Richtung Stratzdorf und Schlickendorf. Die Gemeinde erklärt, dass sie früher durch die Austritte des Kampflusses gefährdet war, da nach dem Zuschuss der so genannten Wertbesitzer Dämme von den höchsten Stellen nicht bewilligt waren.

Im Jahre 1829 wurde laut hoher Entscheidung derselbe Damm auf eine Länge von 166 Klafter geschlossen und das früher durch diese offene Stelle strömende Wasser wurde abgehalten (...). Nun aber ist nicht nur diese Stelle geschlossen, sondern die Dämme sind auch bei weitem höher als früher, die so genannten Brandmayer Dämme sind eben auch verstärkt in das Niveau mit dem Sittendorfer Hauptdamm gelegt und bis zur Schinz

verlängert. Die bösen Folgen dieser Arbeiten wurden leider, wie es eine Abteilung der k.k. Wasserbau Direktion voraussagte, schon am 10. Juni 1829, wo der besagte Damm fertig geworden ist, fühlbar besonders für die Gemeinden Brunn und Stratzdorf. Die Folgen, nachdem dieser Müllnerdamm von der Schinz bis zur Hadersdorfer Brücke beendet ist, und alles durch die 36 Klafter lange Hadersdorfer Brücke und 18 Kl. lange Strasser Molde (...) zurückgestaut und auf die Brunner Dämme getrieben wird, kann man sich umso mehr denken. Obwohl das Wasser vom 10. Juni, wie es sich bei Zöbing zeigte, keines von den höchsten war, im Gegenteil zu den gewöhnlichen gehörte, überstieg es in Brunn die Hauptdämme.

Etsdorf

Das am 10. Mai 1829 eingetretene Hochwasser ist die Ursache der neuen Inundationsgrenze (...). In Folge eines 12-stündigen Regens vom 9. auf den 10. Mai stieg der Kamp und wurde durch den laut Entscheidung der hohen Hofkanzlei vom Mai 1829 von den Werkbesitzern des Kampbaches neu erbauten 166 Klafter langen Damm in seinem Abflusse gehindert und daher so hoch aufgestaut, dass er gleich wie im Jahre 1803 und 1805 die Brunner, Diendorfer und endlich auch den neuen Damm durchbrach und die Gegend Etsdorf, Kamp, Walkersdorf, Wagram, Winkl etc. nicht nur unter Wasser setzte, sondern besonders in der Marktgemeinde Etsdorf die Gründe bedeutend abtrug und daher auch die Früchte zugrunde richtete. (...)

Die Gemeinde erklärt, dass bei Hochwassern, die sich alle 8 bis 10 Jahre ereignen, die

vorzüglichsten 1799, 1803, 1827, 1828 waren, wogegen aber jenes von 1803 das höchste gewesen ist, welches so hoch war, dass die Stühle in der Kirche vom Wasser gehoben wurden. Die in dieser Gemeinde innerhalb der blauen Linie liegenden Gründe sind ganz überschwemmt und die hier und da herausragenden Wege oder Raine sind daher im Bezug auf das Ganze andere Terrain als null zu betrachten. Die beiden Müller Johann Liebl und Anton Springer erklären, dass der Große Kamp, wenn er eine Höhe von 5 Schuh über seinem gewöhnlichen Wasserstand erreicht, sich mit dem Kleinen Kamp vereint. Sie können dann tagelang nicht arbeiten, die Mühlen sind verschlammt und die Ware geht zugrunde. Ihre Zuschüsse zu dem neuen Damm haben damit auch die Grundstücke gesichert. Bei einer Regulierung sollen alle den Abfluss hemmenden Dämme beseitigt werden und der Damm am linken Ufer soll unbeschadet bleiben.

Die Gemeinde unterstützt den Antrag der Müller, denn die Mühlen sind sehr notwendig und können ohnedies im Sommer, wenn der Kamp geringen Wasserstand hat, nur beschränkt mahlen. Es ist auch zu befürchten, dass die ausgerissenen Läufe bei kommenden Wassern den ganzen Kamp aufnehmen werden und nicht nur seine Regulierungs-Trasse verheeren, sondern auch ein neues Bett schaffen werden. Diese Läufe und die der Gemeinde Diendorf gehörigen Querdämme sollen beseitigt werden.

4.2 Der Hochwasserabfluss von 1803

Lilienbrunn berechnete anhand des Abflussprofils im Bereich der Straßenbrücke von Hadersdorf den Hochwasserabfluss des Jahres 1803, den höchsten Abfluss in diesem Zeitraum. Er ermittelte zunächst die mittlere Fließgeschwindigkeit anhand des Chézy-Gesetzes, in das neben einem konstanten Faktor der Abflussquerschnitt, der benetzte Umfang und das Oberflächengefälle einfließen. Die mittels dieser Formel berechnete mittlere Fließgeschwindigkeit von 7,15 Fuß pro Sekunde (entspricht 2.26 m/s) multiplizierte er, der Kontinuitätsgleichung entsprechend, mit dem Abflussquerschnitt und erhielt so einen Hochwasserabfluss von 15.015 Kubik-Fuß pro Sekunde (entspricht 474 m³/s). Auf dieses „höchste seit 100 Jahren gewesene Wasser“ sollte der Kamp nach den Vorstellungen Lilienbrunns ausgebaut werden.

Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass diese vom französischen Ingenieur Antoine Chézy entwickelte Formel für sehr flache und sehr tiefe Gewässer ungenaue Ergebnisse liefert.

Eine Berechnung am Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie der TU Wien ergab für das Brückenprofil von Hadersdorf einen etwas größeren Abfluss. Auf Basis der Formel von Gauckler, Manning und Strickler liegt der Hochwasserabfluss von 1803 je nach Rauigkeitsbeiwert zwischen 550 und 590 m³/s (vgl. Tritthart, 2004).

Welche Wassermengen in diesem Bereich außerhalb dieses Profils abgeflossen sind, lässt sich nicht rekonstruieren. Auch bei Lilienbrunn finden sich dazu keine Angaben.

4.3 Vergleich der Hochwasser von 1803 und 2002

Das Hochwasser 1803 führte am unteren Kamp zu wesentlich großflächigeren Überflutungen als das Hochwasser 2002 (vgl. Abbildung 3, 6 und 7). Im Bereich der Schlossmühle Grafenegg übertraf der Pegelhöchststand des Hochwassers von 1803 jenen von 2002 um 48 cm. Anhand dieser Hochwassermarke ist nachvollziehbar, dass die Überflutung damals fast bis an den Wagram reichte.

Für die enorme Ausdehnung des Inundationsgebietes von 1803 waren u.a. folgende Faktoren ausschlaggebend:

- geringer Abflussquerschnitt des Kamp-Gerinnes
- erhebliche Abflusshindernisse im Vorland (Auen, Gehölzstreifen etc.) und im Kamp-Gerinne
- Rückstaueffekte im Mündungsbereich infolge der hohen Wasserführung der Donau
- Wirkung der Dämme (ausgeufertes Hochwasser konnte nicht mehr zurückströmen)
- Hochwasser aus dem angrenzenden Löss Einzugsgebiet (diese füllten bestehende Geländesenken und konnten nur langsam abfließen)

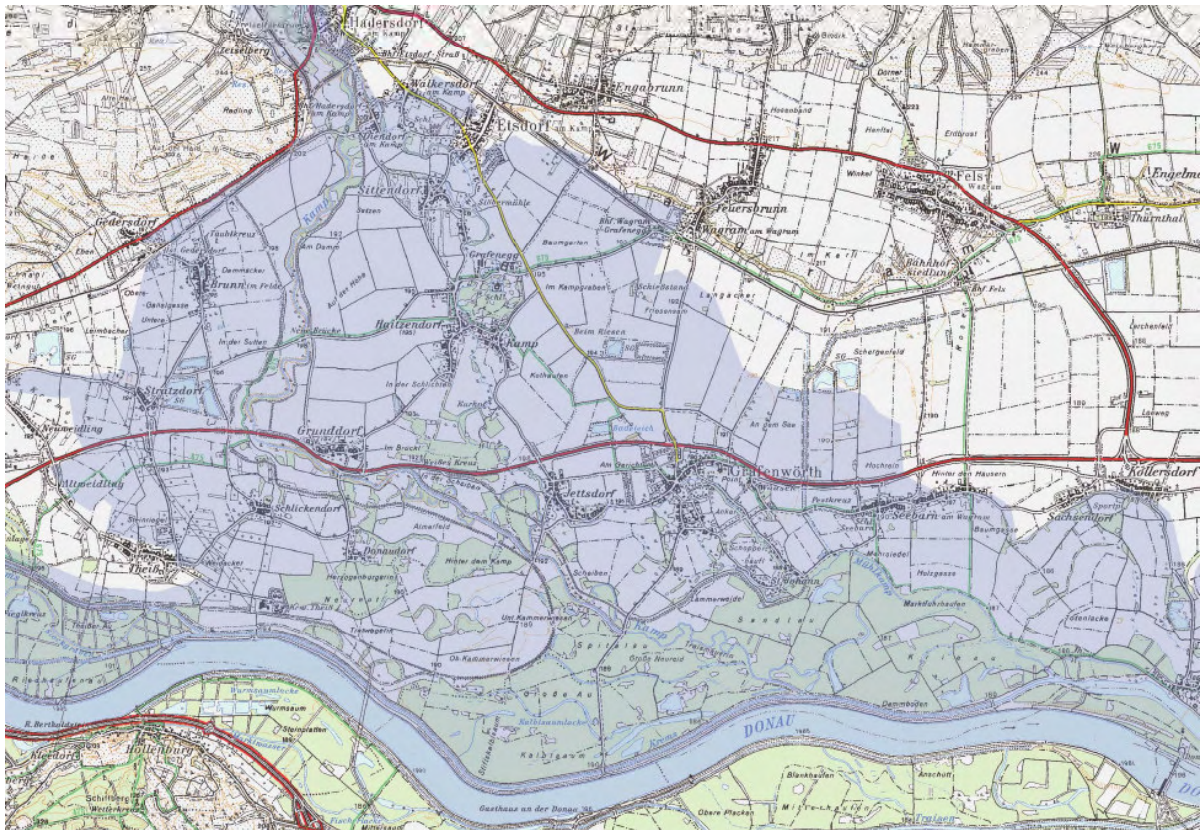


Abb. 6: Überflutungsfläche beim HW 1803.

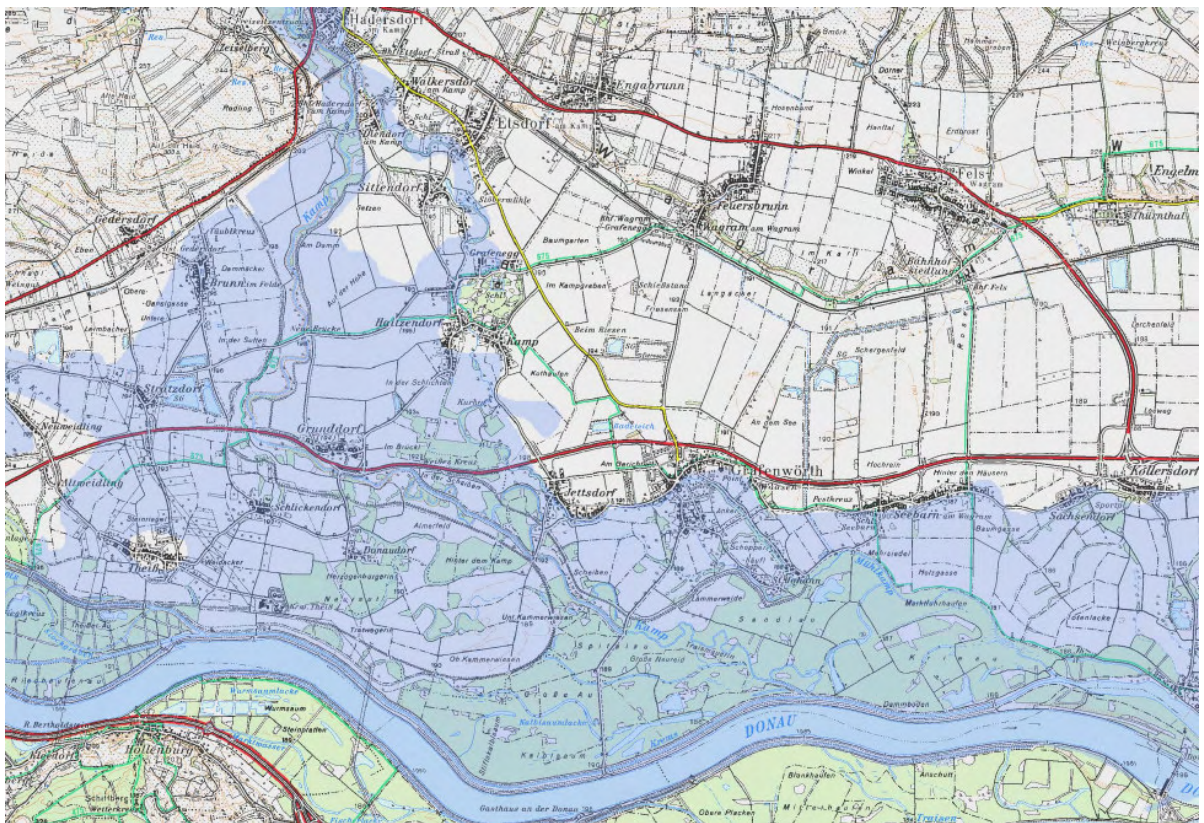


Abb. 7: Überflutungsfläche beim HW 2002.

5. Schlüsse aus den historischen Hochwasserereignissen

Die Analyse historischer Hochwasserereignisse ist ein wichtiger Beitrag für die Einschätzung der Jährlichkeit außergewöhnlicher Ereignisse. Die Beobachtung der Wasserstände bei Hochwasser beginnen für den Kamp Anfang des 20. Jahrhunderts. Für diesen Zeitraum gab es nur vergleichsweise kleine Hochwasserereignisse. Das größte Einzelereignis zwischen 1951 bis 2001 lag bezogen auf den Pegel Stiefern bei 360 m³/s (11.5.1951). Das HQ 100 ist auf Basis der Beobachtungsreihe 1951 bis 2001 mit 402,3 m³/s einzustufen (vgl. Godina, 2007).

Berücksichtigt man den Zeitraum 1951 bis 2004, also auch das Hochwasser 2002, so zeigt sich ein abweichendes Bild, da ein extremes Ereignis einfließt. Das HQ 100 liegt bei dieser Betrachtung nicht bei 402,3 m³/s, sondern bei 645,9 m³/s (vgl. Godina, 2007).

Ein statistisch besser abgesichertes Bild erhält man, wenn man die gesamten zur Verfügung stehenden Hochwasserwerte einbezieht. Die Analyse des Zeitraums 1801–2004 berücksichtigt mit den Jahren 1803, 1827 und 2002 außergewöhnliche Ereignisse und stützt sich dabei auf einen Betrachtungszeitraum von über zwei Jahrhunderten. Extremereignisse fallen dabei nicht ganz so stark ins Gewicht, so dass für die Wasserwirtschaft eine gute Grundlage gegeben ist. Das HQ 100 beträgt in diesem Fall 458,7 m³/s. Das Hochwasser 2002 mit einer Kubatur von 803,5 m³/s würde demnach im statistischen Mittel alle 490 Jahre auftreten (vgl. Godina, 2007). Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass der Hydrographische Dienst auch die historischen Daten von Lilienbrunn bei der Ermittlung der Hochwasserkennwerte einbezieht.

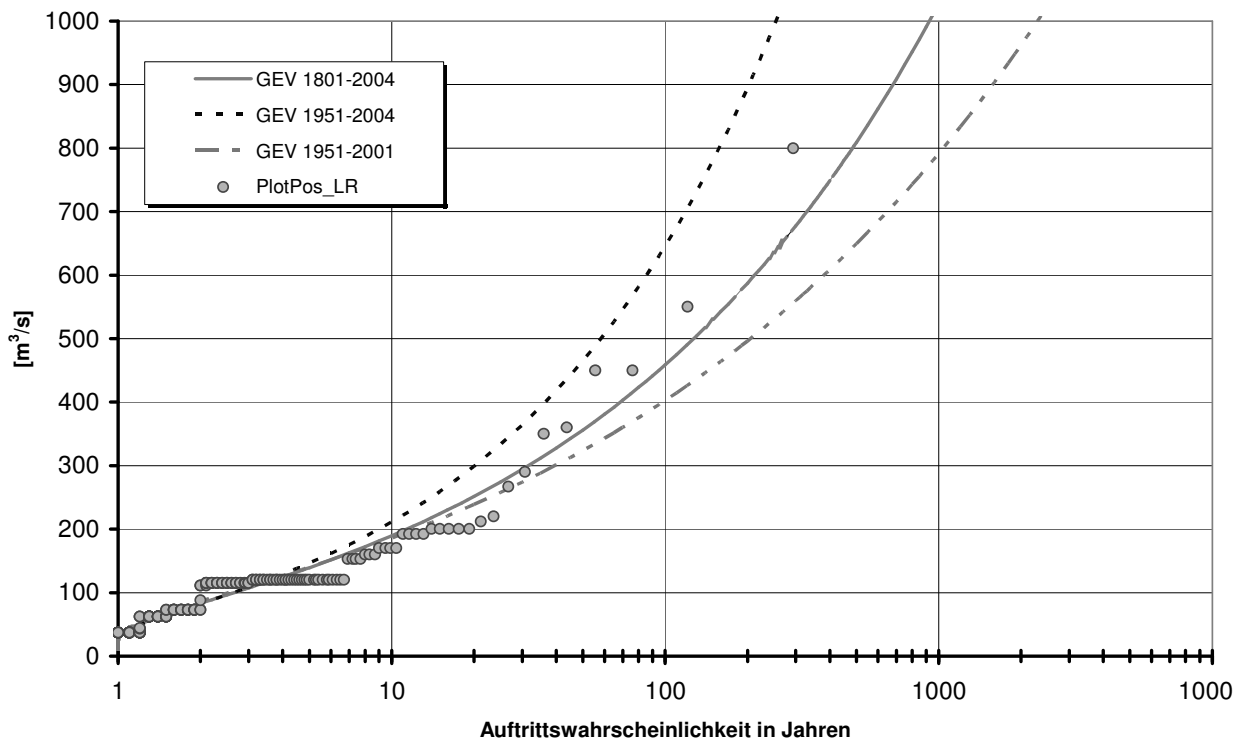


Abb. 8: Auftretswahrscheinlichkeiten der Hochwasser bei Pegel Stiefern (vgl. Godina, 2007).

Neben der fundierteren Risikobewertung liefern die historischen Hochwasserereignisse aber auch noch viele andere wichtige Hinweise:

- Die Karten von Lilienbrunn zeigen das tatsächliche Ausmaß des Inundationsgebietes (wesentlich größer als jenes von 2002) und liefern wichtige Hinweise über die Hochwassergefährdung bei Versagen technischer Einrichtungen (z.B. Dambruch).
- Die Protokolle zu den Hochwassererhebungen spiegeln regionale Probleme und Besonderheiten wider, etwa den langsamen Rückgang des hoch anstehenden Grundwassers in manchen Ortsteilen, hygienische Probleme oder die Verlagerung der Hochwassergefährdung infolge von Dambrüchen. Ferner beschreiben sie das Abflussverhalten bei Zusammentreffen extremer Hochwasser von Kamp und Donau.
- Die Häufigkeit und Größe der Hochwasser im Zeitraum zwischen 1780 und 1830 machen auch deutlich, dass wir im 19. Jahrhundert am Kamp längere Phasen ohne extreme Hochwasser hatten.

Noch eine persönliche Schlussbemerkung: Hochwassermarken an Gebäuden und Brücken sind wichtige Zeichen einer Hochwassergefährdung. Sie führen vor Augen, dass wir uns innerhalb der natürlichen Überflutungsgrenzen nicht allzu sicher fühlen dürfen und dass die Schadenspotenziale innerhalb dieser Zone zu minimieren sind. Wir sollten deshalb wieder achtsamer mit den Spuren ehemaliger Katastrophen umgehen und gegen das allzu schnelle Vergessen an markanten Stellen auch neue Hochwassermarken setzen.

6. Zusammenfassung

Nach mehreren Hochwasserereignissen in den Jahren 1780, 1799, 1803 und 1829 erstellte der k.k. Ingenieur Lilienbrunn für den Bereich zwischen Hadersdorf und der Mündung in die Donau ein Regulierungsprojekt. Er arbeitete insgesamt vier Varianten einer Kamp-Regulierung aus, die eine Begradigung und Verkürzung des Flusslaufes sowie die Errichtung von ausgedehnten Dammsystemen vorsahen. Obwohl keine dieser Varianten tatsächlich umgesetzt wurde, sind die Projektunterlagen von großem historischem Wert, da sie umfangreiche Bestandserhebungen enthalten.

Aus heutiger Sicht sind die großflächigen Ausuferungen des Hochwassers 1803 von Interesse. Es umfasst flussabwärts von Hadersdorf eine Fläche von insgesamt 65 km² und übertrifft die Überflutungsfläche des August-Hochwassers 2002 deutlich (20 %). Im Bereich der Schlossmühle Grafenegg war der Pegelhöchststand um 48 cm höher als 2002. Die enorme Ausdehnung hat mehrere Gründe: Zum einen war zum damaligen Zeitpunkt das Gerinne des Kamp nicht oder nur in wenigen Bereichen ausgebaut, zum anderen gab es in der Flussniederung viele Abflusshindernisse wie Auen und Remisen. Außerdem stauten die Donauhochwasser zurück und verminderten die Abflusskapazität des Kamp. Während die Hochwasser im Zeitraum 1780 bis 1830 durch Lilienbrunn sehr genau dokumentiert sind, finden sich in den Archiven über die nachfolgende Zeit nur wenige Hinweise. Auch in den Ortschroniken sind keine ähnlich gravierenden Hochwasserschäden vermerkt.

7. Literatur

- Filsmaier, J. (1993) Land am Manhart. Marktgemeinde Schönberg am Kamp, 280 S.
- Glaser, R. (2001) Klimageschichte Mitteleuropas. 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen, Darmstadt: Primus Verlag, 227 S.
- Godina, R. (2007) Schriftliche Mitteilung.
- Habersack, H., A. Petraschek und J. Bürgel (2004) Analyse der Hochwasserereignisse vom August 2002 – FloodRisk, Synthesebericht, BMLFUW, 181 S.
- Kresser, W. (1957) Die Hochwasser der Donau; Schriftenreihe des österreichischen Wasserwirtschaftsverbandes 32/33.
- Lilienbrunn, C. Adler Ed. v. (1829) Übersichtsplan des Kamp Flusses und seines Inundations Terrains von Hadersdorf bis zur Ausmündung in die Donau. Beilagen. Kartensammlung der NÖ Landesbibliothek. Sign.: B III 110.
- Lilienbrunn, C. Adler Ed. v. (1838) Panorama der Donau von Linz bis Wien, gezeichnet in Vogelperspektive. Wien.
- Moll, F. (2002) Übertragung des Textes „Wassernoth“, schriftliche Mitteilung.
- Pfister, Ch. (1999) Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496–1995). Bern; Wien u.a.: Haupt.
- Pich, J. (1947) Aus der Vergangenheit des Marktes Hadersdorf am Kamp, ein Heimatbuch. Horn. 333 S.
- Strömmer, E. (2003) Klima-Geschichte. Methoden der Rekonstruktion und Historische Perspektive; Ostösterreich 1700 bis 1830. Wien: Deuticke, 325 S.
- Tritthart, M. (2004) Schriftliche Mitteilung.
- Wiesbauer, H. (1999) Naturräumliche Grundlagen. Band 1. Gewässerbetreuungskonzept unterer Kamp. Im Auftrag der Abteilung Wasserbau des Amtes der NÖ Landesregierung und des BMLF.
- Wiesbauer, H. (Red.) (o.D.) Gewässerbetreuungskonzept unterer Kamp. Kurzfassung zum Projekt. Hrsg.: Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, Abteilung Wasserbau. St. Pölten, 44 S.
- Wiesbauer, H. (2004) Historische Überflutung am Kamp. Die Hochwasserereignisse von 1803–1829 am unteren Kamp, dargestellt anhand der Aufzeichnungen des Wasserbauers Carl Adler Edler von Lilienbrunn. Hrsg.: Amt der NÖ Landesregierung, Gruppe Wasser. St. Pölten, 32 S.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. Heinz Wiesbauer
Ingenieurkonsulent für Landschaftsplanung und Landschaftspflege
Kaunitzgasse 33/14, A-1060 Wien
Email: heinz.wiesbauer@utanet.at

EXTREME HOCHWASSER VERSTEHEN BEISPIELE AUS DER SCHWEIZ

Felix Naef

1. Einführung

Extreme Hochwasser sind zwar selten, ihre Auswirkungen können aber verheerend sein. Gegen welche Abflussmengen sollen nun Schutzmaßnahmen auslegt werden? Die Festlegung dieser Mengen ist eine zentrale Aufgabe der Ingenieurhydrologie. Sie stellt jedoch eine Herausforderung dar, der wir nicht immer gewachsen sind - zu viele Unbekannte beeinflussen diese Größe, zu begrenzt ist unser zeitlicher Horizont. Systematische Abflussmessungen gibt es erst seit weniger als 100 Jahren.

Die Frequenzanalyse, d.h. die statistische Auswertung von langjährigen Abflussmessungen, wird als zuverlässige Methode zur Abschätzung extremer Hochwasser (HQ100, HQ300) betrachtet. Aber oft treffen wir auf Situationen wie in Abbildung 1, in der sich das größte Hochwasser nicht wie gewünscht auf der Ausgleichsgeraden einordnet. Man spricht dann von einem Ausreißer und weiß nicht so recht, wie man damit umgehen soll. Ist hier ein extrem seltenes Hochwasser zufällig in die Messperiode gefallen? Oder reagiert das Einzugsgebiet bei großen Niederschlägen schärfer als bei häufigeren Ereignissen?

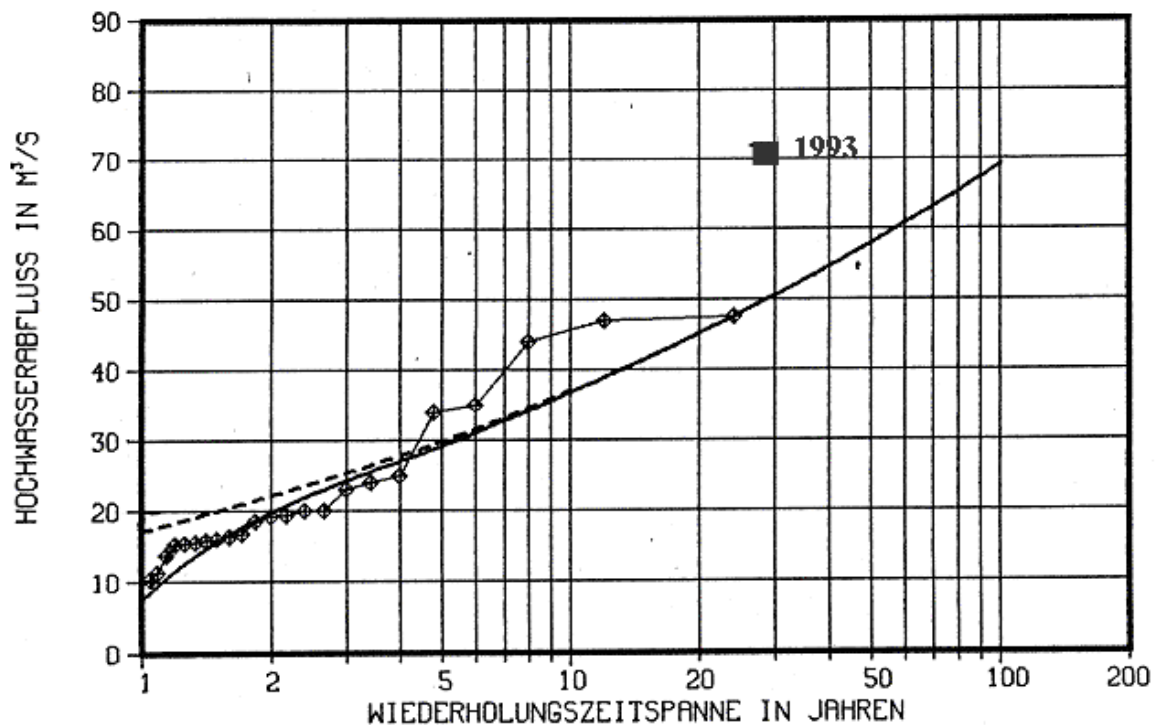


Abb. 1: Frequenzanalyse für die Saltina beim Pegel Brig, in die sich das Hochwasser 1993 nicht sinnvoll einordnen lässt.

Auch wenn eine Reihe keinen Ausreißer aufweist, kann das nächste Hochwasser eben einen solchen darstellen. Diese Betrachtungen lassen es ratsam erscheinen, Dimensionierungshochwasser nicht nur anhand einer statistischen Extrapolation festzulegen, sondern auf breite abgestützte hydrologische Untersuchungen. Im Folgenden werden einige Erfahrungen aus solchen hydrologischen Studien in schweizerischen Einzugsgebieten vorgestellt und einige Punkte herausgegriffen, die die Resultate entscheidend beeinflussen können, wie:

- Länge der Abflussmessungen und Berücksichtigung historischer Hochwasser,
- die Ungenauigkeit der Abflussmessungen,
- die Abflussbildung unter extremen Bedingungen.

2. Länge der Messreihen und historische Hochwasser

Eine längere hochwasserarme Periode endete im Jahr 1987, als der Alpenraum durch extreme Hochwasser betroffen wurde. Auch entlang der Reuss traten außergewöhnliche Schäden auf (Naef, 1991). Die Analyse der Abflussmessungen, die schon 1914 begannen, deutete auf ein seltenes Ereignis mit einer Wiederkehrperiode von 600 bis 1000 Jahren. Doch wie zuverlässig war dieser Wert? In Abbildung 2 sind die Wiederkehrperioden für gleitende 40 Jahresperioden ermittelt von 1914 bis 1953, 1915 bis 1954, etc. dargestellt für den an der Station Seedorf 1987 gemessenen Maximalabfluss von $735 \text{ m}^3/\text{s}$, sowie für den Abfluss von $800 \text{ m}^3/\text{s}$, wie er ohne Überflutungen und Damnbrüche aufgetreten wäre. Die extremen Schwankungen zwischen 800 und über 10.000 Jahren zeigen, dass eine Messreihe von 40 Jahren Dauer völlig ungenügend ist, um ein Ereignis wie 1987 einzuordnen, auch die gesamte Messreihe von 73 Jahren reicht dazu nicht aus. Lassen sich die Aussagen durch Kenntnisse von historischen Hochwassern verbessern? Für die Reuss wurden dazu Berichte aus verschiedensten Quellen bis zurück ins 15. Jahrhundert zusammengetragen. Die Häufigkeit der Hochwasser ist unterschiedlich. Zwischen 1828 und 1888 wurden 12 große Hochwasser erwähnt, die 40 Jahre zuvor und die Zeit von 1889 bis 1987 waren eher hochwasserarm. Während vor 1830 die Schilderungen der aufgetretenen Schäden nur eine grobe Einordnung der Hochwasser erlaubten, waren nach 1830 die Angaben über Wasserstände und die Planunterlagen so präzise, dass sich die Maximalabflüsse der Hochwasser 1834, 1839 und 1868 rekonstruieren ließen. Diese erreichten zwar nicht ganz die Größe des Ereignisses von 1987, übertrafen jedoch die anderen Hochwasser im 20. Jahrhundert.

Dank der historischen Untersuchungen waren nun die größten Hochwasser der letzten 200 Jahre bekannt. Auch wenn das Hochwasser 1987 das größte Ereignis blieb, war es nicht mehr singulär und konnte in der Frequenzanalyse eingeordnet werden (Abbildung 3).

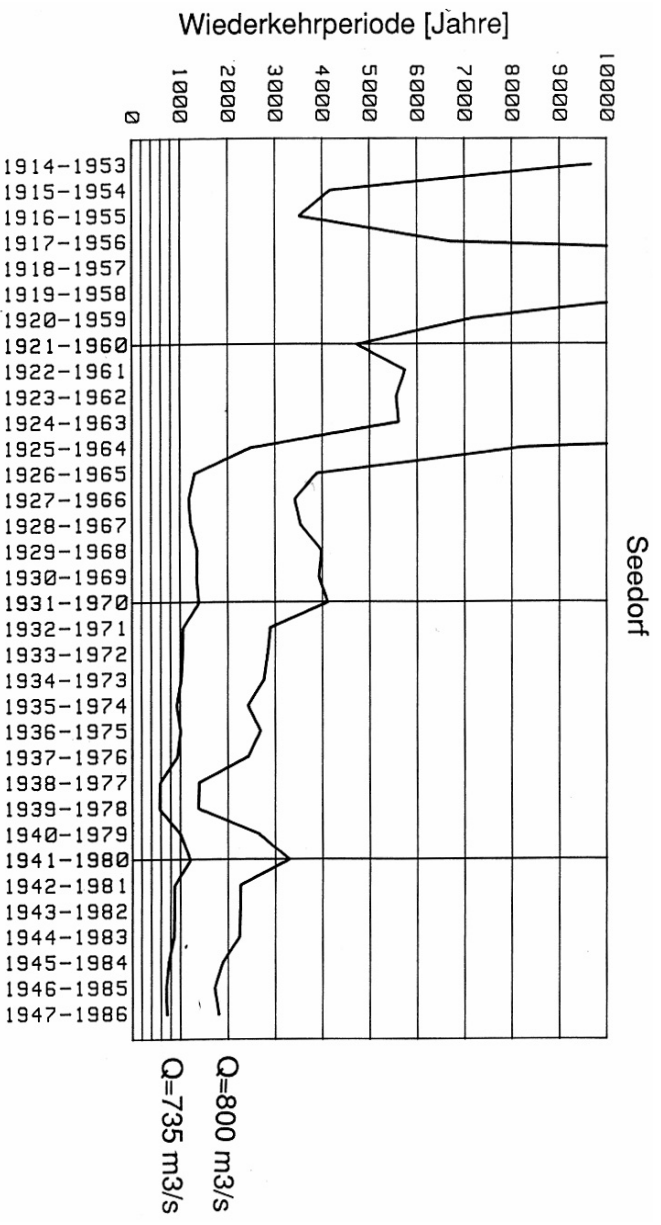


Abb. 2: Wiederkehrperiode des Hochwassers 1987 in der Reuss, bestimmt mit aufeinander folgenden 40-Jahresperioden. 735 m³/s wurden beim Pegel Seedorf gemessen, 800 m³/s hätte der Abfluss ohne Überflutungen betragen.

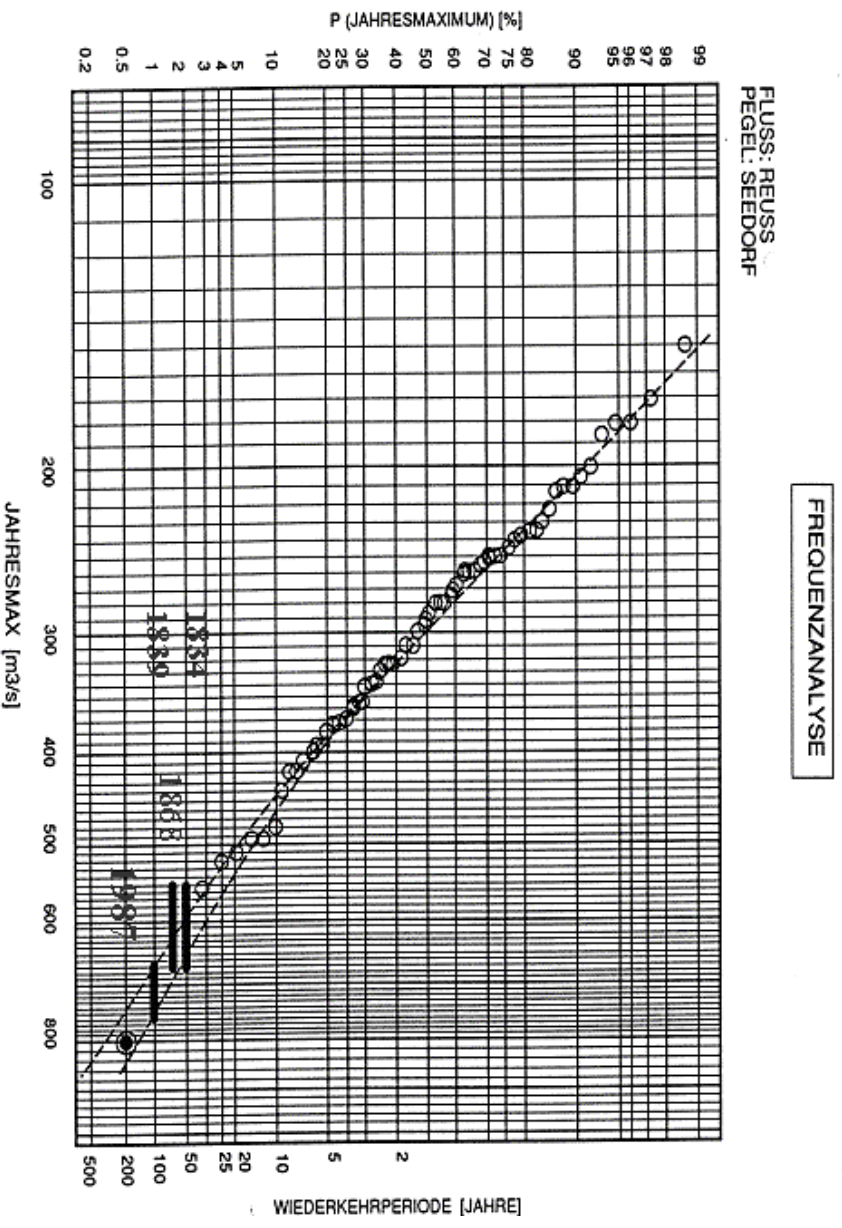


Abb. 3: Frequenzanalyse für die Reuss bei Seedorf. Werden die rekonstruierten historischen Hochwasser von 1834, 1839 und 1868 (Balken) berücksichtigt, lässt sich das Hochwasser 1987 (großer Punkt) einordnen.

Bei der Frequenzanalyse geht man davon aus, dass sich die Hochwasserhäufigkeiten im Laufe der Zeit nicht wesentlich verändern. Die Auszählung historischer Hochwasser in 9 schweizerischen Einzugsgebieten über die letzten 400 Jahre zeigt, dass die Hochwasser in der Vergangenheit nicht rein zufällig verteilt waren (Abbildung 4). In der Debatte über den Klimawandel werfen die über die Zeit schwankenden Häufigkeiten viele Fragen auf und stellen unter anderem auch das Konzept eines kontinuierlichen Trends in Frage.

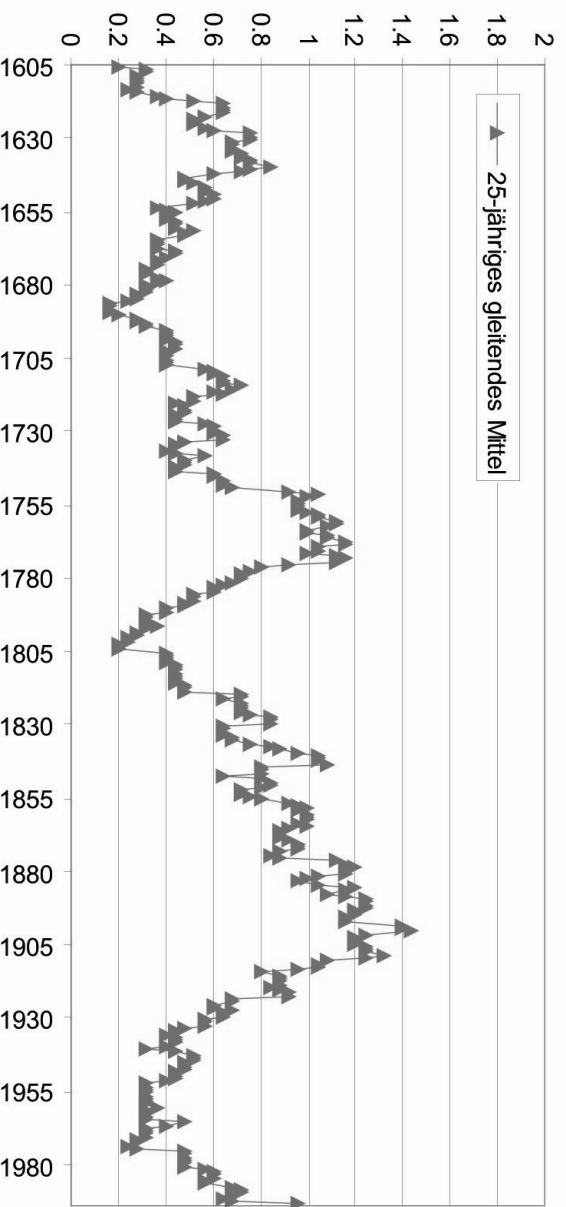


Abb. 4: Häufigkeit historisch verbürgter Hochwasser in 9 schweizerischen Einzugsgebieten in gleitenden 25-Jahresperioden.

3. Das Problem der Abflussmessung

Jedes Land betreibt ein Netz von Pegeln, die kontinuierlich Wasserstände an ausgewählten Flüssen registrieren. Diese Aufzeichnungen werden mit einer Wasserstand-Abflussmengenbeziehung (PQ-Beziehung) in Abflüsse umgerechnet und in Jahrbüchern publiziert. Aussagen über Hochwasserwahrscheinlichkeiten beruhen auf statistischen Auswertungen dieser langjährigen Abflussmessungen. Deren Genauigkeit wird kaum diskutiert. Unsere Erfahrungen zeigen, dass die Messungen bei Hochwasser, vor allem in kleineren und mittleren Einzugsgebieten, oft große systematische Fehler aufweisen. Ein Grund ist, dass die Eichmessungen, die zur Herleitung der PQ-Beziehung verwendet werden, nur bei kleinen und mittleren Abflüssen gemacht werden können; zur Bestimmung der extremen Abflüsse muss die PQ-Beziehung dann in Bereiche extrapoliert werden, in denen ganz andere hydraulische Bedingungen herrschen.

Solche Änderungen der hydraulischen Bedingungen zeigen sich eindrücklich in Modellversuchen beim Pegel Brig der Salina, die nach dem verheerenden Hochwasser 1993 durchgeführt wurden (Abbildung 5). Der beim Hochwasser zerstörte Pegel befand sich zwischen zwei Schwellen, die bei kleinen und mittleren Abflüssen für eine Beruhigung der Strömung sorgten. Ab 20 m³/s bildete sich jedoch zwischen den

Schwellen ein Wassersprung, der bei höheren Abflüssen wieder ausgeblasen wurde. Infolge der instabilen Verhältnisse konnten die Abflüsse zwischen 20 und 40 m³/s nicht eindeutig bestimmt werden, Abflüsse über 40 m³/s wurden wesentlich unterschätzt. Abbildung 6 zeigt wie unterschiedlich die Frequenzanalyse für die Saltina anhand der ursprünglichen und nach der aus den Modellversuchen hergeleiteten PQ-Beziehung ausfällt.

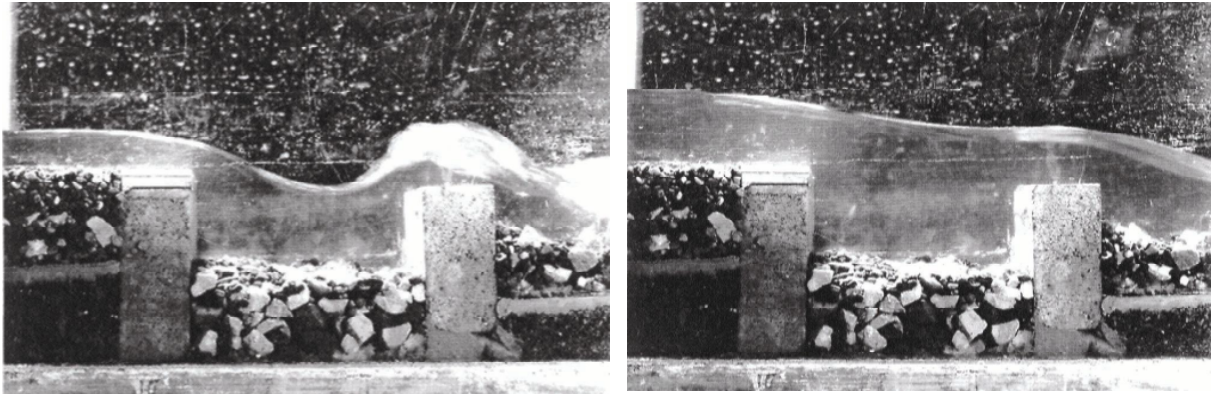


Abb. 5: Modellversuch beim Pegel Brig der Saltina. Bei einem Abfluss von 30 m³/s bildet sich beim Pegel ein Wassersprung aus (links), der bei höheren Abflüssen (rechts, 70 m³/s) wieder ausgeblasen wird.

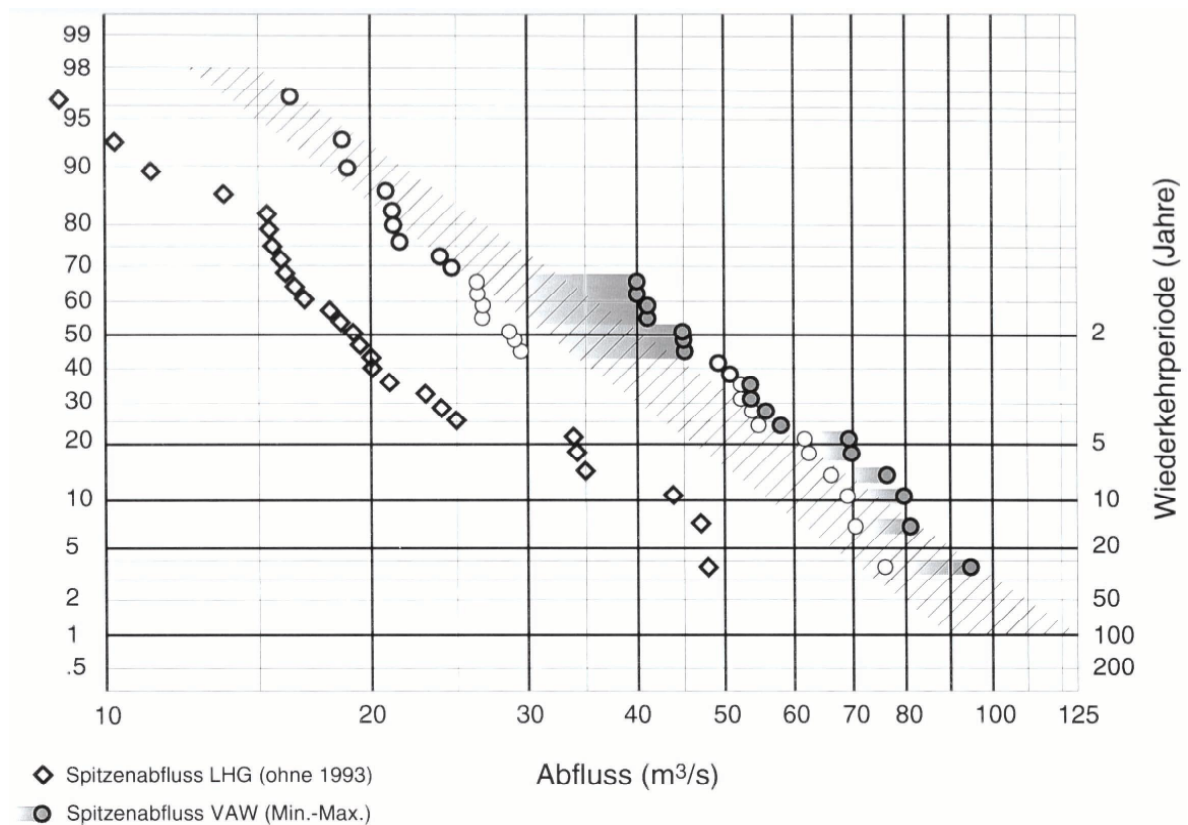


Abb. 6: Frequenzanalyse für die Saltina erstellt anhand der ursprünglichen PQ-Beziehung (Rhomben) und der mit den Modellversuchen (Kreise) ermittelten.

Beim Pegel Rümlang der Glatt, einem Fluss im Norden von Zürich mit einem Einzugsgebiet von 302 km^2 , gelang es über Jahrzehnte nicht, eine stabile PQ-Beziehung herzuleiten und daraus widerspruchsfreie Hochwasserabflüsse zu bestimmen. Die Glatt floss beim Pegel mit einem Gefälle von 0.5% durch ein fast lehrbuchartiges Trapezprofil über einen Absturz knapp unterhalb des Pegels. Erst nach einer aufwendigen Analyse der hydraulischen Situation konnten die Daten verwendet werden. Verschiedene Gründe waren für die Schwierigkeiten verantwortlich. Gut sichtbar ist der Einfluss der im Frühsommer im Fluss öfters auftretenden Verkrautungen auf den Wasserstand. Abbildung 7 zeigt links die Glatt bei der Pegelstelle ohne Verkrautung, rechts bei starker Verkrautung, beide Male bei Abflüssen von $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Dieser Effekt beeinflusste die PQ-Beziehung bis zu den höchsten Abflüssen.

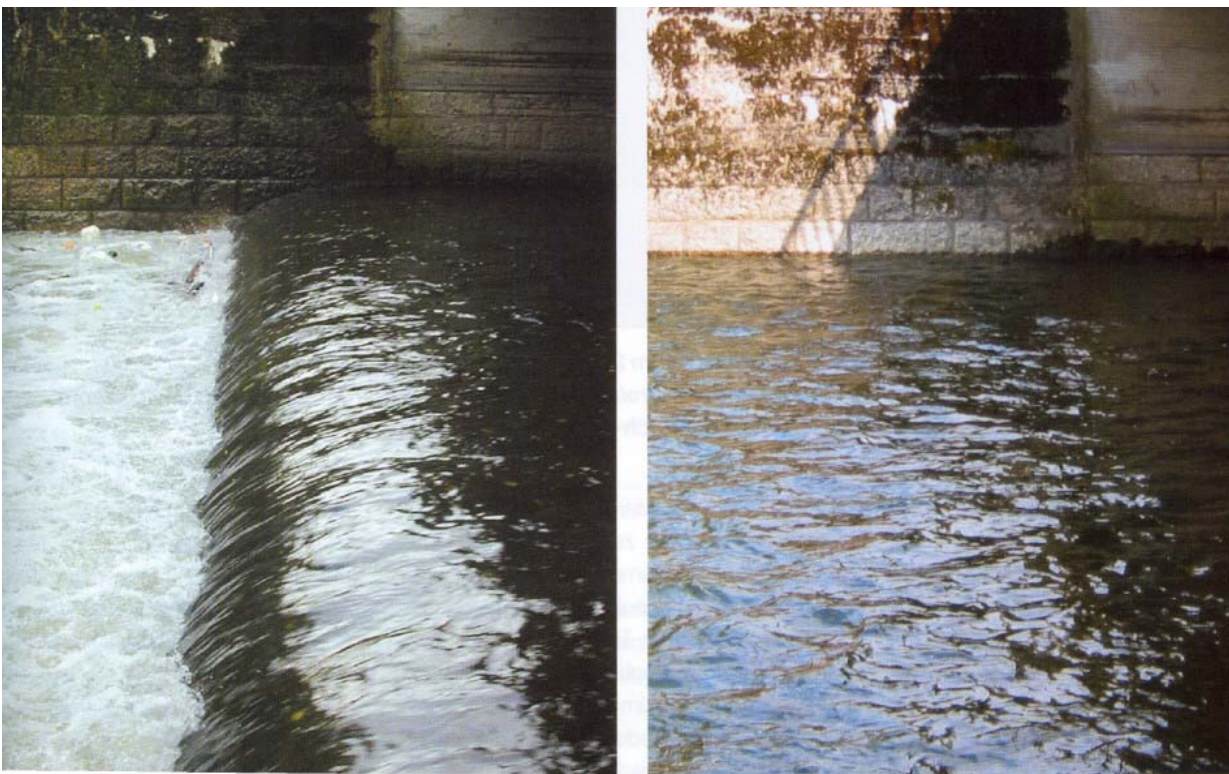


Abb. 7: Abfluss der Glatt beim Pegel Rümlang bei $5 \text{ m}^3/\text{s}$ zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Beim rechten Bild ist die Schwelle infolge der starken Verkrautung eingestaut.

Die Liste von problematischen Pegeln ist lang. Diese liegen nicht nur in der Schweiz oder im Gebirge. Die Schwierigkeiten beeinflussen vor allem den Extrapolationsbereich und führen zu Fehlern bei extremen Hochwassern. Viele Ungereimtheiten in Hochwasserstudien lassen sich darauf zurückführen. So ordnet sich das Hochwasser von 1993 an der Saltina in die übrigen Messungen ein, wenn die anhand der Modellversuche korrigierte PQ-Beziehung verwendet wird.

Ähnlich große Unsicherheiten ergeben sich bei der Niederschlagsmessung und der Ermittlung des Gebietsmittels. In Anbetracht der Relevanz dieser Probleme ist schwer

verständlich, warum meist nur die publizierten Daten verwendet werden, ohne den Einfluss der Messfehler auf die Resultate zu berücksichtigen. Heute können mit modernen Methoden verschiedenste physikalische Größen mit beinahe beliebiger Genauigkeit und Auflösung gemessen werden. Es ist zu hoffen, dass auch in der Hydrologie Verbesserungen erreicht werden. Allerdings bleiben die Probleme bei Verwendung der vorhandenen Messreihen bestehen und Überlegungen, wie die oben aufgeführten, bleiben unumgänglich.

4. Wie verhält sich ein Einzugsgebiet bei extremen Niederschlägen?

Die Reaktion von Einzugsgebieten auf große Niederschläge ist unterschiedlich. Speicherfähige Böden vermögen große Regenmengen zurückzuhalten, sie reagieren verzögert und gedämpft. Auf schwach entwickelten Böden über undurchlässigem Untergrund entwickelt sich dagegen sofort Abfluss. Maßgebend für die Reaktion eines Einzugsgebietes ist die Verteilung der speicherfähigen und rasch gesättigten Böden. Ist diese Verteilung unterschiedlich, reagieren auch benachbarte Gebiete verschieden, wie z.B. der Allenbach in den Berner Alpen. Die unterschiedliche Reaktionsweise der beiden gleich großen Teilgebiete spiegelt sich in der unterschiedlichen Kapazität der beiden Gerinne wieder, die die Gebiete entwässern (Abbildung 8).



Abb. 8: Die unterschiedlich ausgeprägten Gerinne, die die zwei gleich großen Teileinzugsgebiete des Allenbachs entwässern, spiegeln das unterschiedliche Abflussverhalten dieser beiden Gebiete wieder.

Soll die Reaktionsweise eines Gebietes verstanden werden, muss also die Verteilung der unterschiedlich reagierenden Teilflächen berücksichtigt werden (Naef et al., 1999). Neben der Speicherfähigkeit prägen Infiltrationsvermögen, Durchlässigkeit des Untergrundes, unterirdische Fließwege die Reaktionsweise der Böden. Große Fortschritte wurden in den letzten Jahren in der Einschätzung der Reaktionsweise von Böden erzielt. Da extreme Hochwasser nur alle 100 Jahre oder noch seltener auftreten, erfordert ihre Beobachtung ein Übermaß an Geduld. Unsere Erkenntnisse stützen sich deshalb auf Versuche mit künstlicher Beregnung auf Flächen von 60 m² mit unter-

schiedlichen Niederschlagsintensitäten (Scherrer et al., 2007). In einem weiteren Schritt wurden die Kenntnisse an einzelnen Profilen auf Einzugsgebiete übertragen in Form von Abflussprozesskarten (Schmocker-Fackel et al., 2007, Scherrer, 2007). In neuerer Zeit wurden Verfahren entwickelt zur Automatisierung der aufwendigen Kartierarbeiten der Abflussreaktionen. Damit lassen sich auch Abflussprozesskarten für größere Gebiete erstellen, wie etwa für den Kanton Zürich mit einer Fläche von 1730 km² (Naef et al., 2007).

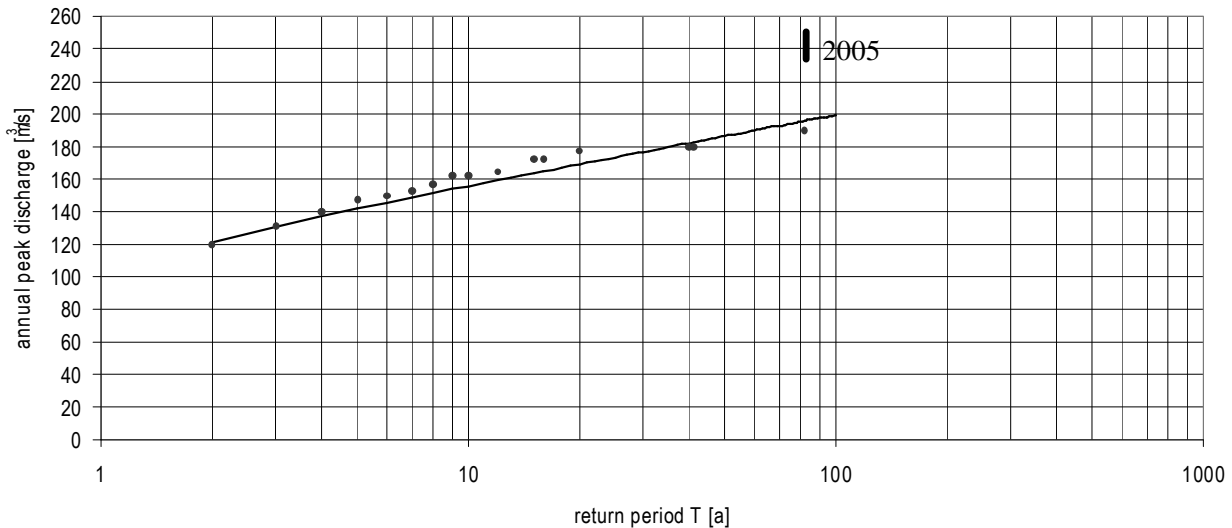


Abb. 9: Frequenzanalyse der Lütschine für den Pegel Gsteig, nach der das Hochwasser 2005 extrem selten ist. Es ist aber nur 20% größer als das 100jährige Hochwasser.

Abflussprozesskarten ermöglichen Einblicke in die Reaktionsweise von Einzugsgebieten und erleichtern die Extrapolation in Zustände, die bisher noch nicht aufgetreten sind. Von der Unwettersituation im August 2005 war neben vielen Einzugsgebieten auch die Lütschine betroffen. Die Lütschine entwässert die Hochgebirgsregion des Berner Oberlandes und führte das größte Hochwasser der Messperiode. Das Hochwasser lässt sich in einer Frequenzanalyse schlecht einordnen und hat nach Abbildung 9 einem mehrhundertjährigen Ereignis entsprochen. Das Frequenzdiagramm weist jedoch einige Besonderheiten auf, die zur Vorsicht mahnen. Die Ausgleichsgerade besitzt nur eine geringe Steigung: Das 20jährige Hochwasser unterscheidet sich vom 100jährigen nur um 10%. Dieser Unterschied liegt innerhalb der Genauigkeit der Abflussmessungen. Das HW2005 mit seiner hohen Jährlichkeit wiederum ist nur 20% größer als das 100jährige. Überraschend ist auch der geringe spezifische Abfluss von 0.6 m³/s. Trotz seiner Steilheit und ausgedehnten Felsflächen reagiert die Lütschine nur verzögert, da das Einzugsgebiet ein beträchtliches Retentionsvermögen besitzt. Zwar entleeren sich diese Speicher wieder innerhalb weniger Tage, sie sind aber in der Lage, die Abflussspitzen zu brechen. Ähnlich gedämpfte Reaktionen wurden in zahlreichen alpinen Einzugsgebieten beobachtet, so auch in der eingangs erwähnten Saltina. Während aber die Speicher in der Saltina beim Hochwasser von 1993 noch Reserven aufwiesen, näherten sie sich in der Lütschine 2005

ihren Kapazitätsgrenzen, wie die kartierten Abflussprozesse zeigten. Bei größeren Niederschlägen dürfte die Lütschine also schärfer reagieren und wesentlich größere Abflüsse aufweisen.

Ein Verständnis der Abflussprozesse ist unumgänglich, wenn auf extreme Hochwasser extrapoliert werden soll. In über 60 Hochwasserstudien haben sich dabei Abflussprozesskartierungen als zuverlässiges Werkzeug erwiesen.

Bei extremen Niederschlagsintensitäten können zusätzlich noch Änderungen im Abflussprozess auftreten, die schwer vorauszusagen sind und die Extrapolation erschweren. Das nach seiner Wiederkehrperiode extremste Ereignis, das mir bisher begegnet ist, ereignete sich 1985 in Schwarzenburg. Zuvor erreichten die Hochwasser im 11 km² großen, mit speicherfähigen Böden ausgestatteten Gebiet über Jahrzehnte spezifische Abflüsse von maximal 2 m³/s/km². 1985 erreichten die Abflüsse pro km² im oberen Einzugsgebiet 8 bis 10 m³/s. Diese Mengen ließen sich nicht allein durch Niederschlagsintensitäten und -mengen erklären, sondern bedingten auch einen Wechsel der maßgebenden Abflussprozesse. Obwohl die durchlässigen Böden nicht gesättigt waren, trat Oberflächenabfluss auf. Dieser Prozesswechsel lässt sich mit Abbildung 10 erklären, die den Sättigungsverlauf in den durchlässigen Böden am Schlüssberg darstellt, wie er bei Beregnungsversuchen mit unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten beobachtet wurde (Kienzler et al., 2007). Bei mittleren Intensitäten steht der ganze Boden als Speicher zur Verfügung, weil das Wasser durch Makroporen in die Tiefe geleitet wird und sich der Boden von der weniger durchlässigen Moränenoberfläche her nach oben sättigt. Bei hohen Intensitäten bildet sich nahe der Oberfläche beim Übergang zwischen dem A- und B-Horizont aufgrund geringer Durchlässigkeitsunterschiede eine gesättigte Zone. Nur wenig Wasser dringt in die tieferen Schichten und starker Oberflächenabfluss entsteht.

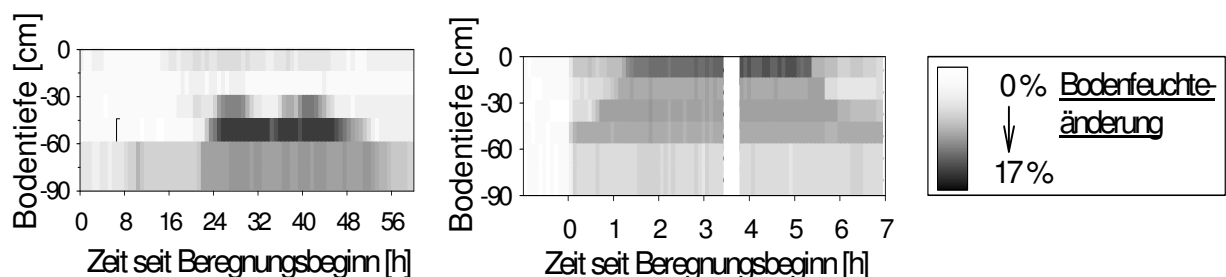


Abb. 10: Änderung der Bodenfeuchte bei Beregnungsversuchen auf durchlässigen Böden am Schlüssberg. Bei mittleren Intensitäten (links) dringt Wasser durch Makroporen in den Boden ein und sättigt ihn von unten her, bei hohen Intensitäten sättigt sich nur die oberste Bodenschicht und es entsteht Oberflächenabfluss.

5. Schlussfolgerungen

Die Kenntnis von Größe und Verlauf extremer Hochwasser ist für die Planung von Schutzmaßnahmen unerlässlich. Solche Ereignisse sind jedoch selten, so dass nur wenige und oft fehlerhafte Messungen und Beobachtungen zur Verfügung stehen. Zusätzlich sind bei großen Niederschlagsintensitäten oder -mengen Änderungen der

maßgebenden Abflussprozesse und damit des Gebietsverhaltens zu erwarten. Deshalb ist die Abschätzung dieser Hochwasser eine anspruchsvolle Aufgabe. Anhand von Beispielen aus der Schweiz wurde aufgezeigt, wie breit solche Untersuchungen angelegt sein müssen, um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten. Es wurde aber offensichtlich, dass auf dem Gebiet der Niederschlag- und Abflussmessungen, sowie im Bereich der Prozessforschung ein Forschungsbedarf besteht.

6. Literatur

Kienzler, P.M., F. Naef (2007) Subsurface storm flow formation at different hillslopes and implications for the "old water paradox". Hydrological Processes, in press, published online (www.interscience.wiley.com).

Naef, F. (1991) Hydrologie des Hochwassers vom 24./25. August 1987 in der Reuss. Ursachenanalyse der Hochwasser 1987, 57-59, Mitteilung des Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 4, EDMZ CH-3003 Bern.

Naef, F., S. Scherrer, Ch. Zurbrügg (1999) Große Hochwasser - unterschiedliche Reaktionen von Einzugsgebieten auf Starkregen. Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES) Blatt 5.7, EDMZ, CH-3003 Bern.

Naef, F., M. Margreth, P. Schmocker-Fackel, S. Scherrer (in press) Automatisch hergeleitete Abflussprozesskarten - ein neues Werkzeug zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. Wasser, Energie, Luft, CH-5401 Baden.

Scherrer, S., F. Naef, A. Faeh, I. Cordery (2007) Formation of runoff at the hillslope scale during intense precipitation. Hydrology and Earth System Sciences, 11, 907–922.

Scherrer, S. (2007) Hochwasserabschätzung als Synthese von Statistik, Historie und Abflussprozessen. In Gutknecht, D. (Hg.): Extreme Abflussereignisse. Dokumentation – Bedeutung – Bestimmungsmethoden. Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 206. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, 2007, 195-208.

Schmocker-Fackel, P., F. Naef, S. Scherrer (2007) Identifying runoff processes on the plot and catchment scale. Hydrology and Earth System Sciences, 11, 891–906.

Anschrift des Verfassers:

Felix Naef
Institut für Umweltingenieurwissenschaften
ETH Hönggerberg, CH 8093 Zürich
Email: naef@ifu.baug.ethz.ch

EREIGNISDOKUMENTATION IN WILDBÄCHEN – SYSTEMATIK UND MÖGLICHE ERGEBNISSE

Johannes Hübl

1. Einleitung

Der Umgang mit Naturgefahren in Gebieten mit hoher Reliefenergie erfordert eine sorgfältige Analyse und Bewertung der Gefahren (z.B. Hochwasser, Muren) und der Risiken. Dafür ist das Wissen, wann und wo welche Ereignisse in welcher Größenordnung auftraten, von grundlegendem Interesse. In vielen Fällen sind diese Informationen in entsprechenden Dokumenten in verschiedensten Archiven vorhanden, Ereignisse aus jüngerer Zeit aber auch lokalen Experten und Einwohnern geläufig. Wenn diese Informationsträger sterben oder wenn Mitarbeiter von Amtsstellen in Pension gehen, sind solche Dokumente dann oft kaum mehr zugänglich oder gar gänzlich verloren. All diesen Informationen ist gemeinsam, dass sie in unsystematischer Form an unterschiedlichen Orten abgelegt sind und eine systematische Bewertung in langfristiger oder überregionaler Hinsicht fehlt. Deshalb ist es unbedingt erforderlich, dass

- frühere Ereignisse soweit als möglich nachträglich aufgearbeitet werden (retrospektiver Ereigniskataster) und
- aktuelle Ereignisse sofort systematisch dokumentiert und die Aufzeichnungen in zugänglicher Form archiviert werden, wobei anschließend vertiefende Analysen durchgeführt werden sollen.

2. Methodik

Die generelle Aufgabe einer Dokumentation ist es, Angaben über ein Objekt zu erschließen. Das Objekt im Rahmen der Ereignisdokumentation stellt ein Ereignis dar, das als die Summe der Wirkungen von einem oder mehreren Prozessen definiert ist, die im räumlichen, zeitlichen und ursächlichen Zusammenhang stehen und deren Wirkungen bemerkbar sind, weil diese über das übliche Maß hinausgehen. Die strukturiert zu erfassenden Sachinhalte sollen quantitative Aussagen ermöglichen, sind jedoch zusätzlich mit einem Qualitätsmerkmal zu versehen. Dafür wird üblicherweise der MAXO Code (Naturgefahrenkommission Kanton St. Gallen et al., 1998) verwendet, der als Attribut dem Merkmal beigefügt wird. Dieser beschreibt, ob der Sachinhalt gemessen (M) oder geschätzt (A) wurde, der Wert unklar oder noch zu erheben (X), oder der Wert nicht bestimmbar ist (O).

Im Rahmen der Ereignisdokumentation sind nur die erkennbaren Tatbestände, ähnlich der Spurensicherung, möglichst kurz nach einem Ereignis zu erfassen, eine Interpretation und Analyse von „Spuren“ ist nicht Aufgabe der Ereignisdokumentation (Hübl et al., 2002).

Die Erhebungen vor Ort können in Form von Checklisten oder Formularen erfasst werden. Die Ablage der gewonnenen Daten erfolgt in einem digitalen Ereigniskataster (z.B. StorMe (Schweiz), ED30 (Südtirol), IAN (Bayern), WLK (Österreich)).

3. Systematik

3.1 Dokumentationsebenen

Ereignisse besitzen klar erkennbar einen Beginn und ein Ende. Ein Ereignis beginnt mit dem auslösenden Prozess und endet, wenn das Ausmaß jedes beteiligten Prozesses unter dem für den jeweiligen Prozess üblichen oder gewohnten Maß liegt.

In der obersten Dokumentationsebene werden die Ereignisse nach dem dominant bewegten Medium klassifiziert. Man unterscheidet folgende drei Gruppen von Ereignissen:

- Schnee
- Wasser
- Feststoffe

Diese Einteilung ermöglicht eine Vereinfachung der Dokumentationsarbeit und eine Reduktion des Aufwandes, ohne den Dokumentar von Beginn an auf einen Prozessstyp festzulegen. Es wird dadurch auch vermieden, bestimmte Merkmale und Beobachtungen nicht zu dokumentieren, weil diese für einen vordefinierten Prozess nicht zutreffen würden.

In der zweiten Dokumentationsebene werden die Ereignisse entsprechend ihrer Verlagerungsart in Prozessgruppen eingeteilt.

Ereignis Schnee:	stiebend fließend
Ereignis Wasser:	fluvial murenartig
Ereignis Feststoffe:	rutschend stürzend

In der dritten Dokumentationsebene werden schlussendlich die maßgeblichen Verlagerungsprozesse festgelegt, die sich an den in der Praxis bekannten Verlagerungsprozessen orientieren. Sie basieren auf der Ansprache von Phänomenen, die im Zuge eines Ereignisses beobachtbar sind und durch Prozesse hervorgerufen werden. Da verschiedene Phänomene sich in Form eines immer wieder auftretenden Verhaltens manifestieren, können die Prozesse durch Schlüssel-Phänomene („Stumme Zeugen“) charakterisiert werden. Deshalb ist es unabdingbar, dass die Spurensicherung im Gelände vordringlich jene Phänomene erfasst, die üblicherweise im Rahmen der Aufräum- und Sofortmaßnahmen verloren gehen.

3.2 Prozesse in Wildbächen

Verlagerungsprozesse in Wildbächen können sich, bezogen auf ein Querprofil, während eines Ereignisses ändern (Abbildung 1 oben). Entlang des Längsprofils können aber, bezogen auf den gleichen Zeitpunkt, unterschiedliche Verlagerungsprozesse vorherrschen (Abb. 1 unten).

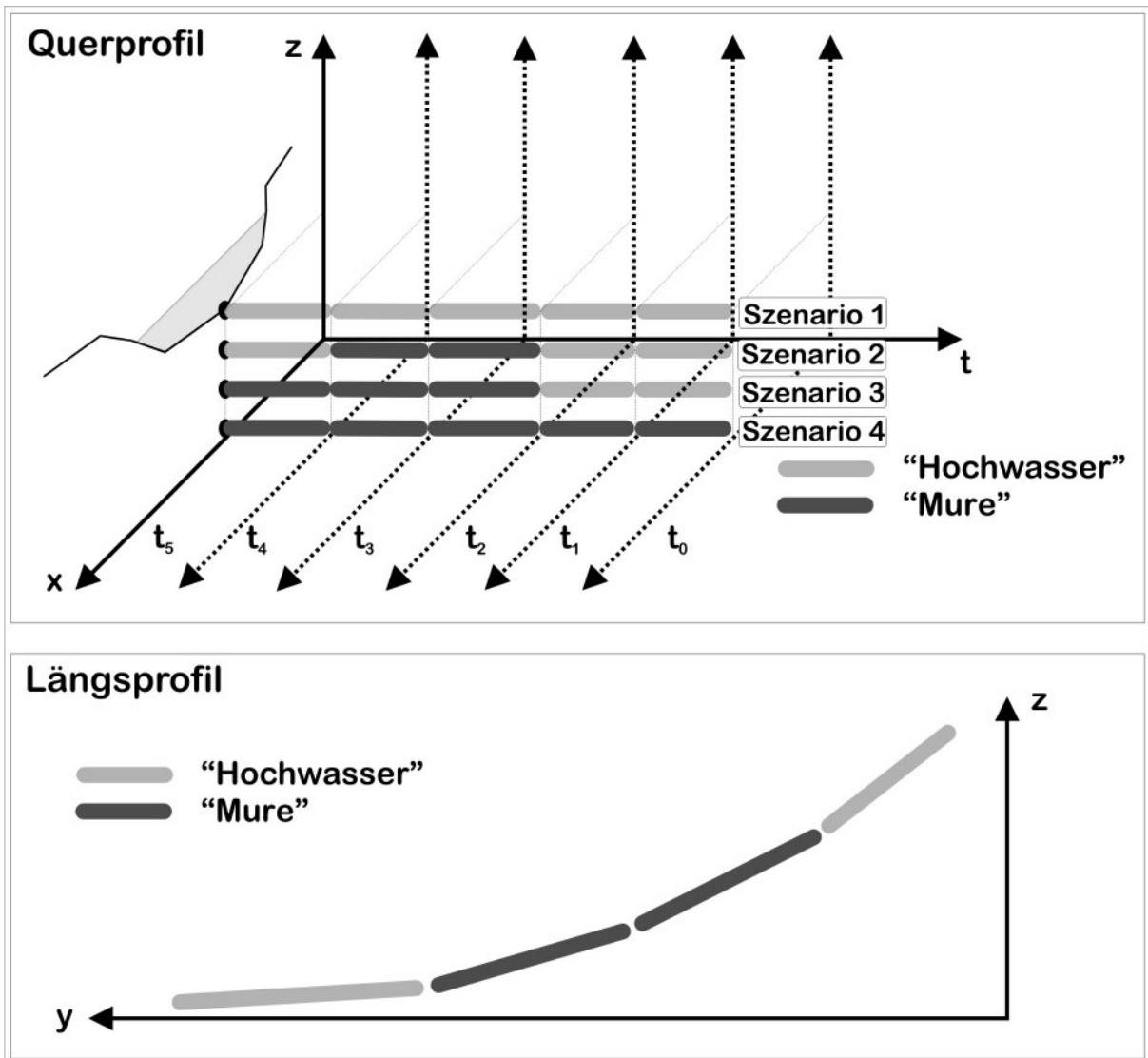


Abb. 1: Zeitliche und räumliche Veränderungen des Verlagerungsprozesses während dem Ereignis entlang eines Gerinnes.

Es ist aber nicht möglich, dass sich an einem Ort zur gleichen Zeit unterschiedliche Verlagerungsprozesse einstellen. Beim Aufeinandertreffen unterschiedlicher Verlagerungsprozesse an einem Ort zur gleichen Zeit (z. B. Zusammenfluss) tritt sofort ein neuer Verlagerungszustand (Prozess Routing) ein. Dieser kann innerhalb des Ereigniszeitraumes nur für kurze Zeit auftreten, hinterlässt aber meist die markantesten Spuren. Diese werden zur Bestimmung des ereignisrelevanten Verlagerungsprozesses in der Ereignisdokumentation herangezogen.

Für das „Ereignis Wasser“ können vier verschiedene Prozesse unterschieden werden (Abbildung 2).

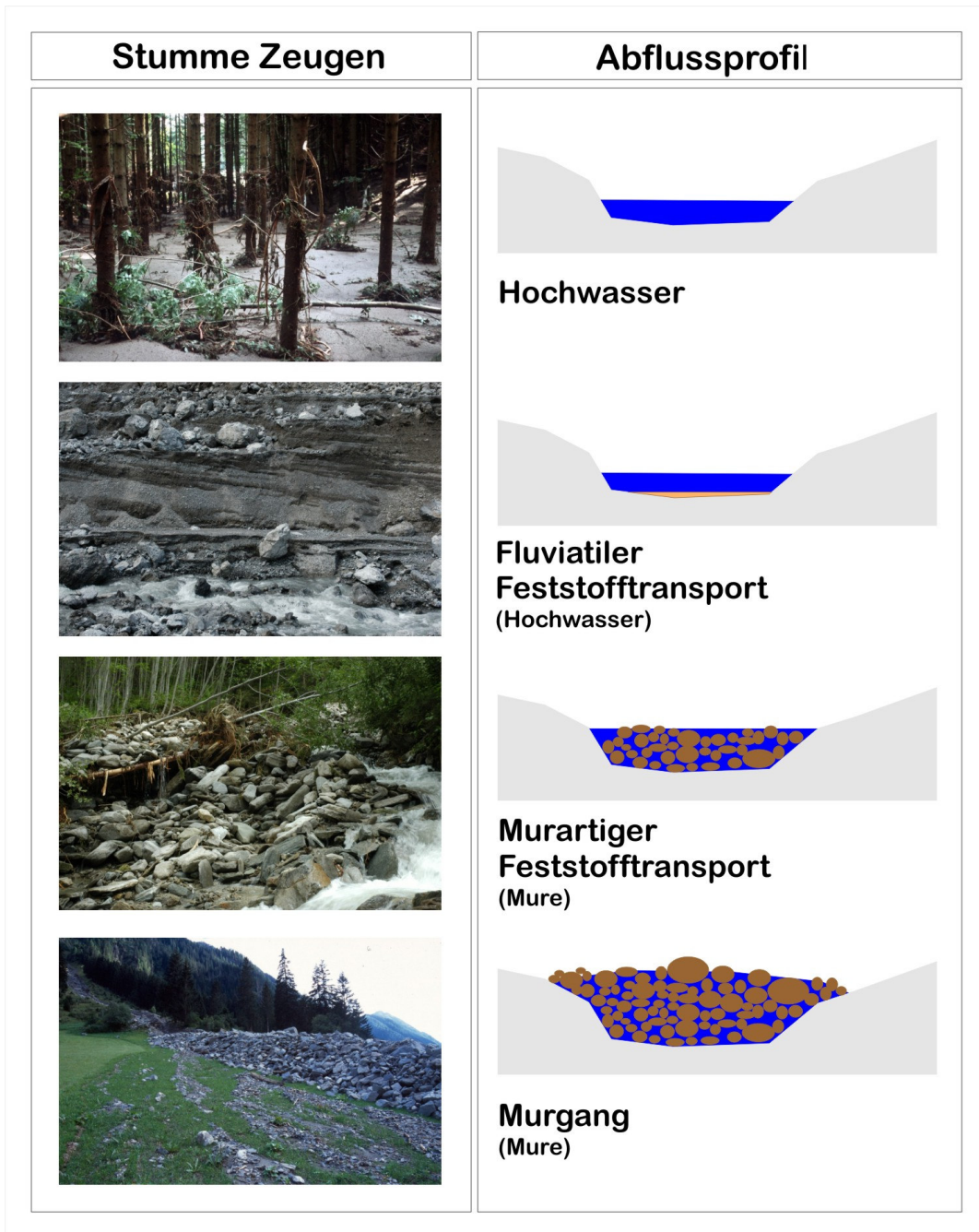


Abb. 2: Verlagerungsprozesse in Wildbächen.

Hochwasser

Hochwasser ist ein Abfluss mit zeitlich begrenzter hoher Wasserführung. Die mitgeführten Feststoffe sind durch ihre sehr geringe volumetrische Konzentration für die hydraulische Berechnung von untergeordneter Bedeutung. Während Schwebstoffe relativ homogen im Querprofil verteilt sind, wird das Geschiebe sohlennah verlagert. Die Dichte des Wasser-Feststoffgemisches ist im Vergleich zu Wasser nicht

signifikant erhöht und kann mit 1000 kg/m^3 angenommen werden. Möglicher Schaden entsteht primär durch Wasser und sedimentierte Schwebstoffe.

Fluviatiler Feststofftransport

Der fluviatile Feststofftransport zeichnet sich durch das Vorhandensein von einem merkbaren Feststofftransport, dem Schwebstoff- und dem sohlennahen Geschiebetransport, aus. Die dabei transportierten Korngrößen hängen von den zur Verfügung stehenden Korngrößen sowie den hydraulischen Belastungen infolge des Abflussvorganges ab. Die Dichte des Zweiphasen-Gemisches liegt unter 1300 kg/m^3 , die volumetrische Feststoffkonzentration erreicht Werte bis zu 20 Prozent. Die Geschwindigkeit des transportierten Geschiebes liegt unter der des turbulenten Wasserabflusses, das Fließverhalten ist newtonisch. Die Ablagerungen, sowohl im als auch neben dem Gerinne, bilden sich in Form von flachen Lappen und Fächern aus, wobei eine Sortierung des Geschiebes zu beobachten ist.

Murartiger Feststofftransport

Murartiger Feststofftransport leitet zu den Murgängen über. In der Fachliteratur wird diese Abflussform auch als stark geschiebeführendes Hochwasser, hyperkonzentrierter Abfluss oder Murgang bezeichnet. Die Feststoffe sind unabhängig von der Korngröße über den ganzen Abflussquerschnitt verteilt. Auch größere Kornfraktionen (Dezimeter) bewegen sich annähernd mit der Geschwindigkeit des Wassers. Die Dichte des Gemisches übersteigt zumeist 1300 kg/m^3 , wobei eine volumetrische Feststoffkonzentration zwischen 20 und 40 Prozent erreicht wird. Das Fließverhalten kann angenähert als newtonisch bezeichnet werden. Der theoretische Reinwasserabfluss ist mit einem Faktor zwischen 1,4 und 3,5 zu multiplizieren, um den Abfluss des Gemisches bestimmen zu können. Murartiger Feststofftransport tritt in alpinen Einzugsgebieten sehr häufig auf und wird in historischen Dokumenten zumeist als Mure bezeichnet. Als Ablagerungsformen (Übermuring) finden sich unsortierte und korngestützte Geröllbänke und Lappen, das Feinmaterial ist ausgeschwemmt. Die Ablagerungen sind bereits kurz nach dem Ereignis begehbar.

Murgang

Als Murgang (Rüfe, Murstoß) wird ein langsam bis schnell abfließendes breiartiges Gemisch von Wasser und Feststoffen bezeichnet, das in mehreren Schüben abgehen kann, einer bereits ausgebildeten Tiefenlinie folgt, eine typische Verlagerungsform sowie charakteristische Ablagerungen aufweist. Das Fließverhalten ist nicht newtonisch, die Dichte des Gemisches übersteigt 1700 kg/m^3 , wobei eine volumetrische Feststoffkonzentration über 40 % typisch ist. Die mittransportierten Feststoffe sind unabhängig von der Korngröße über den ganzen Abflussquerschnitt verteilt, der theoretische Reinwasserabfluss ist mit einem Faktor größer 3,5 zu multiplizieren, um den Abfluss des Gemisches bestimmen zu können. In den Ablagerungen (Murkopf, Murlappen, Murzungen, Murfirste oder Levees) lässt sich keine Sortierung der Feststoffe beobachten.

3.3 Erhebungsstandards

Durch die Festlegung unterschiedlicher Erhebungsstandards kann die Informationstiefe gesteuert werden. Sie ermöglichen die Aufarbeitung historischer Datenquellen, die Festlegung eines Basis-Standards und lassen auch genügend Platz für darüber hinaus gehende Erhebungen, die z.B. von Wissenschaftlern für spezielle Fragestellungen von Interesse sind. Eine Interpretation und Analyse von Daten ist nicht Aufgabe der Ereignisdokumentation. Einer Minimalanforderung für die Auswertung historischer Ereignisse entspricht der 3W-Standard, die Basisdokumentation erfolgt im 5W-Standard. Für Experten und Wissenschaftler ist der 5W+ Standard vorgesehen, der die Datengrundlage für vertiefende Analysen bereitstellen sollte. An die jeweiligen Erhebungsstandards ist auch das Anforderungsprofil an die Dokumentarin/den Dokumentar gekoppelt (Hübl et al., 2006).

3.3.1 3W-Standard

Die Datenlage von historischen Ereignissen ist im Allgemeinen sehr beschränkt. Je länger die Ereignisse zurückliegen, umso geringer ist der in der Regel vorliegende Informationsgehalt.

Trotzdem sollen diese Daten in die Ereignischronik eingebunden werden. Der Forderung nach einem einheitlichen, hohen Standard der Erhebung steht demnach der Verlust von Informationen, die den zeitlichen Untersuchungshorizont, wenn auch mit Einschränkungen, in die Vergangenheit ausweiten können, gegenüber. Vor allem in Hinblick auf langfristige Planungen wie z.B. die Gefahrenzonenplanung oder die Raumplanung bedeutet ein Außerachtlassen dieser Daten eine qualitative Einschränkung von Beginn an. Gleichzeitig muss auch hier dem Aufwand der Nutzbarmachung historischer Daten ein entsprechender Wissensgewinn gegenüber stehen. Insbesondere die Lesbarkeit und die Interpretation des „mundartlichen“ Vokabulars erfordern einen hohen Aufwand in der Verwendung der historischen Aufzeichnungen. Der Nutzen liegt in der Möglichkeit einer Implementierung dieser Dokumente in den Ereigniskataster. Dadurch wird ein leichter Zugang zu wesentlichen Informationsgehalten ermöglicht und einem größeren Publikum zugänglich gemacht. Die Definition eines „kleineren“ Standards erleichtert in diesem Sinne die Entscheidung auf bestimmte historische Dokumente zuzugreifen. Aus diesen Überlegungen darf jedoch keineswegs eine generelle Beschränkung der aktuellen Dokumentationsarbeit bzw. der Aufarbeitung historischer Dokumente abgeleitet werden.

Für die Informationsgewinnung sollte die Beantwortung folgender Fragen durchgeführt werden:

- Was hat sich ereignet?
- Wann hat es sich ereignet?
- Wo hat es sich ereignet?

Ad „was“?

Primär sind Angaben über das dominant bewegte Medium (Ereignis) ausreichend, so dass entweder Schnee, Wasser oder Feststoffe angeführt werden sollten. Sind weiterführende Informationen vorhanden, kann die Verlagerungsart (Prozessgruppe) bzw. der maßgebliche Prozess angegeben werden.

Ad „wann“?

Die relevanten Informationen im Zusammenhang mit dem Auftreten bzw. dem zeitlichen Ablauf des Ereignisses sind bei historischen Ereignissen zumindest die Angabe eines Jahres, bzw. wenn genauere Informationen vorhanden sind, auch die des Tages – zumeist wird die Tageszeit nicht mehr genau feststellbar sein, falls doch, ist diese Information abzulegen.

Ad „wo“?

Zur Referenzierung des Ereignisses wird ein so genannter Info-Punkt eingeführt, der sich etwa im Mittelpunkt des Schadensraumes befinden sollte. Dadurch ist in weiterer Folge eine Verschneidung mit den unterschiedlichen Einzugsgebieten möglich. Dieser Info-Punkt wird sich somit zumeist im Siedlungsraum befinden.

Sollten weitere Informationen zur Verfügung stehen, so können diese Daten ebenso abgelegt werden, um eine Annäherung an den 5W-Standard zu erreichen.

3.3.2 5W-Standard

Die sogenannte Basisdokumentation im 5W-Standard ist darauf ausgelegt, dass geschulte Personen diese Dokumentation durchführen können. Sie umfasst die wichtigsten Parameter zur zeitlichen und räumlichen Einordnung des Ereignisses, eine Verortung und grobe Ansprache von Schäden, sowie Informationen zu den am Dokumentationsvorgang beteiligten Personen.

Wichtig erscheint es, primär jene Phänomene und Merkmale eines Ereignisses festzuhalten, die während der Aufräumarbeiten verändert oder entfernt werden. Deshalb bedingt die Aufnahme eine straffe Organisation der Erhebung, eine schon im Vorfeld getroffene Auswahl von Hilfsmitteln und Geräten, sowie eine rasche Verfügbarkeit eines Dokumentars. Eine Minimierung des Zeitaufwandes für die Basisdokumentation ist ein wesentlicher Faktor. Deshalb ist es notwendig, den Dokumentaren Checklisten, schnell durchzuführende Messverfahren und dementsprechende Messgeräte zur Verfügung zu stellen. Weiters ist eine Schulung der die Ereignisdokumentation durchführenden Personen von größter Wichtigkeit um sicherzustellen, dass die Phänomene und deren Merkmale aufgenommen werden.

Zusätzlich zum 3W-Standard werden folgende Fragestellungen beantwortet:

- Wer hat die Ereignisdokumentation durchgeführt?
- Wie und warum kam es zur Auslösung des Ereignisses?

Ad „wer“?

Ein essentieller Bestandteil jeder Dokumentation ist die Information, wer die Aufnahmen durchgeführt hat und welche Informationsquellen benutzt wurde. Somit lassen sich auch Rückschlüsse auf die Qualität der Erhebungen ziehen.

Ad „wie“ und „warum“?

Die Beantwortung der Frage „wie“ soll Informationen zur Erhebung an sich bereitstellen.

Unter „warum“ werden Informationen zur Ereignisauslösung zusammengefasst. Darunter fallen unter anderem meteorologische Erscheinungen. Im Sinne der Ereignisdokumentation bezieht sich das „wie“ ausschließlich auf die Erhebung der Phänomene und die Konkretisierung der Merkmalsausprägungen. Als zusätzliche Informationen gelten Verweise auf Daten, die nicht im Basisstandard erhoben werden.

3.3.3 5W+ Standard

Die erweiterte Dokumentation von Ereignissen hat gegenüber der Basisdokumentation eine geringere Dringlichkeit. Sie wird zumeist von Personen durchgeführt, die im Bereich Naturgefahren tätig sind und über erweiterte Kenntnisse in der Ereignisdokumentation verfügen. Sie kann Tage bzw. Wochen in Anspruch nehmen, wobei trotzdem der Fokus auf Erhebungen von Daten liegt, die einer Veränderung unterworfen sind. Die erweiterte Dokumentation baut auf der Basisdokumentation auf und stellt dadurch gleichzeitig auch eine Qualitätskontrolle für die Basisdokumentation dar. Auch hier soll keine Interpretation der Daten stattfinden.

4. Ergebnisse - Beispiele

4.1 Auswertung der „Brixner Chronik“

Die „Brixner Chronik“ ist ein in Korent abgefasstes Manuskript, dessen Autor nach Stiny (1938) mit Dr. Georg Strele, dem Sektionsleiter der Wildbach und Lawinenverbauung in Tirol (1904-1923) angegeben wird, und eine „Chronik der Hochwasser- und Wildbachverheerungen, der Bergschlipfe, Muhrbrüche und Felsstürze in Tirol und Vorarlberg bis inclusive 1891“ darstellt. Die Hauptarbeit bei der Bearbeitung der Chronik ist die Aufteilung der 1280 Beschreibungen für Österreich in einzelne, aussagekräftige Datensätze (Abbildung 3).

Folgende Probleme traten bei der Datenaufbereitung auf:

- Es ist kein Gewässer angegeben oder das angeführte Gewässer existiert nicht.
- Keine Verortung auf Grund zu allgemeiner Beschreibung möglich.
- Datensätze führen keine Ortsangabe, die Beschreibung lässt jedoch einen Ort vermuten.
- Prozesse werden durch verschiedenste Begriffe bezeichnet.
- Ein Schaden in einem Ort wird durch mehrere Gewässer gleichzeitig verursacht (z. B.: Vorfluter und Wildbach).

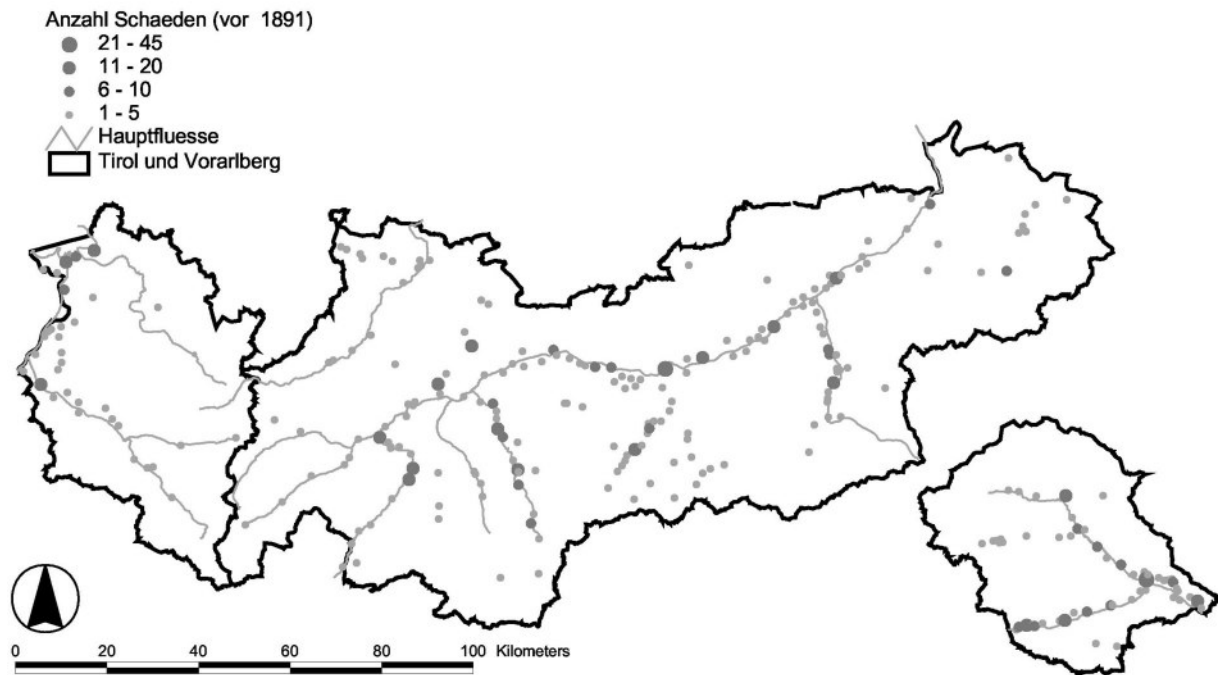


Abb. 3: Verortete Ereignisse in Tirol und Vorarlberg auf Basis der „Brixner Chronik“.

4.2 Ereignis am Enterbach 1969

Das Ereignis am Enterbach (12,2 km²) vom 26.7.1969 ist wohl eines der am ausführlichsten beschriebenen Wildbachereignisse in Österreich (Aulitzky, 1970, Pisch, 2002). Die Analyseergebnisse von Aulitzky beruhen einerseits auf Zeugenaussagen, andererseits auf Erhebungen vor Ort. Die Fließgeschwindigkeiten wurden aus der Kurvenüberhöhung, der Abfluss mit den aufgemessenen Querprofilen berechnet. Aulitzky gibt für das Ereignis einen Spitzenabfluss von fast 4000 m³/s mit einer Geschwindigkeit von bis zu 30 m/s an. Die für das Ereignis ermittelte Murenfracht lag bei rund 400.000 m³.

Da diese Angaben für einen Wildbach doch etwas hoch anmuten, wurde versucht (Hübl et al., 2007), mit Hilfe der vorhandenen Literatur eine erneute Abschätzung des Spitzenabflusses durchzuführen. Die Analyse beruht auf den Angaben der Augenzeugen und versucht, die Abflussgeometrien, den jeweiligen Prozesszeitraum und die Frachten miteinander in Beziehung zu setzen. Unter der Annahme, dass die Murenfracht aus rund 150.000 m³ Wasser und 250.000 m³ Geschiebe bestand, förderte die erste Welle etwa 150.000 m³, die zweite Welle weitere 100.000 m³ und der Nachlauf die restlichen 150.000 m³ auf den Ablagerungskegel. Die bei den Wellen aufgetretenen Spitzenabflüsse waren nur von kurzer Dauer (30 bis 60 Sekunden) und zeigten unterschiedliche Feststoffkonzentration. Da sich oberhalb des Ablagerungskegels eine rund 2 Kilometer lange Schluchtstrecke befindet ist anzunehmen, dass sich das Gerinne in der Schlucht verklauste und die darauf folgenden Verklauungsbrüche die zwei Wellen mit Abflüssen von rund 750 m³/s bzw. 1200 m³/s auslösten (Abbildung 4).

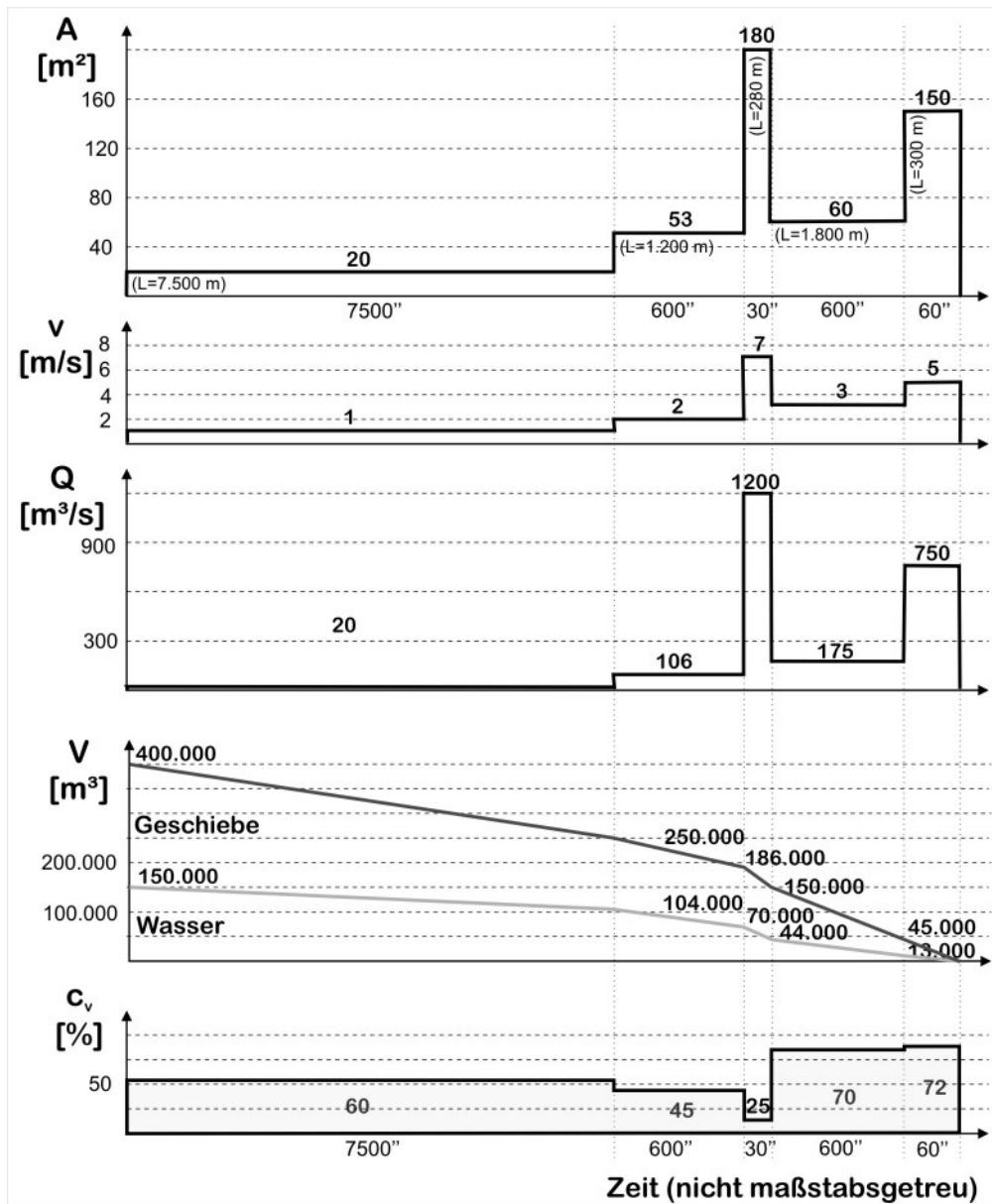


Abb. 4: Ereignis Enterbach 1969: Nachrechnung der Spitzenabflüsse (Hübl et al., 2007).

4.3 Ereignisdokumentation 2005 in Tirol

Am 22. und 23. August 2005 kam es nach langanhaltenden Niederschlägen in Nordtiroler und Vorarlberger Wildbacheinzugsgebieten zu zahlreichen Hochwasser- und Murenereignissen, die großen Schaden an Gebäuden und Infrastruktur verursachten. In einem ersten Durchgang sollten vom Institut für Alpine Naturgefahren (BOKU-Wien) die von den WLV-Gebietsbauleitungen in Tirol genannten Einzugsgebiete (63) im festgelegten 5-W Standard aufgenommen, und im Ereignisportal des Wildbach- und Lawinenkatasters eingetragen werden. Für ausgewählte Einzugsgebiete sollten diese Erhebungen in einem weiteren Schritt verfeinert werden (5W+ Standard).

Kennzeichnend für das Ereignis vom 22./23. August 2005 ist, dass nur wenige Einzugsgebiete mit typischen Murgängen reagiert haben, wobei die Größe dieser Einzugsgebiete unter 2 km² liegt. In den meisten Einzugsgebieten der betroffenen

Muren und murartige Feststofftransporte weisen die höchsten Abflusspenden auf und finden sich bei Abflusspenden über rund $5 \text{ m}^3/\text{s.km}^2$. Fluviatiler Feststofftransport und Hochwasser dominierte hingegen in den größeren Einzugsgebieten mit geringeren Abflusspenden.

Die Abflusspenden nehmen im Allgemeinen mit steigendem Tagesniederschlag (22. August 2005) zu. Ein Trend ist aber aus den vorliegenden Daten nicht abzulesen. Es zeigt sich nur deutlich, dass bei ähnlichen Niederschlagsverhältnissen murartige Transportprozesse und Murgänge ein weit höhere Abflusspende als Hochwässer und fluviatiler Feststofftransport aufweisen (Abbildung 6).

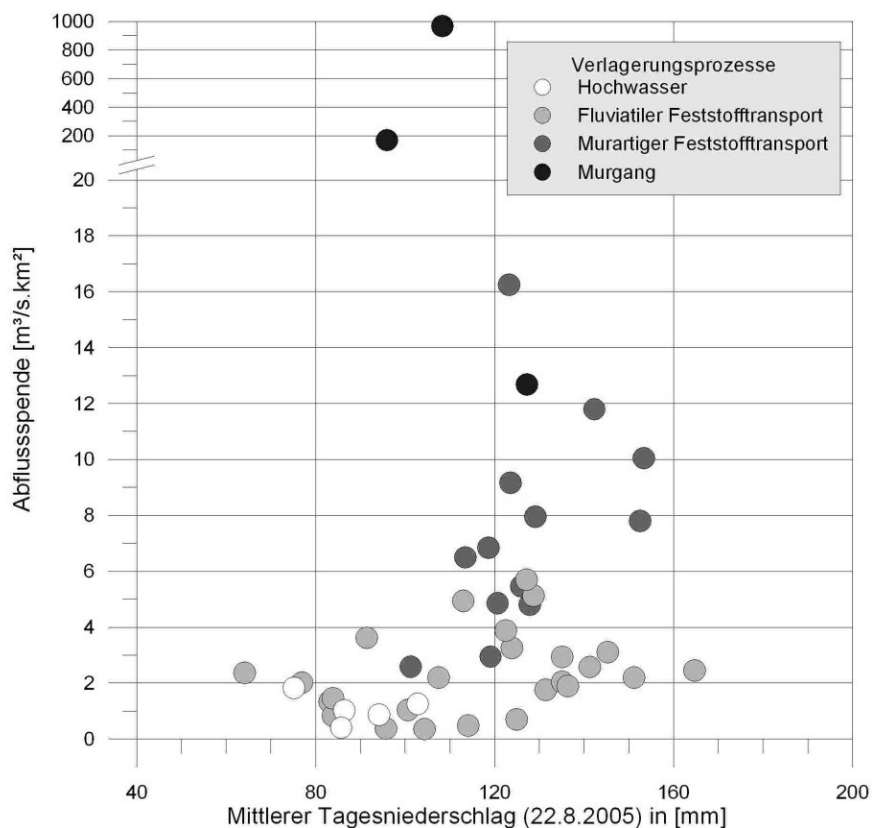


Abb. 6: Ereignisdokumentation Tirol 2005: Abflusspende, mittlerer Tagesniederschlag und Verlagerungsprozess (Hübl et al., 2006).

Eine mögliche Arbeitshypothese wäre, dass zur Berechnung feststoffreicher Abflüsse der theoretische Reinwasserabfluss mit einem Intensitätsfaktor zu multiplizieren ist, um den tatsächlichen Spitzenabfluss des Gemisches bestimmen zu können (Tabelle 1).

Tab. 1: Intensitätsfaktoren bei Verlagerungsprozessen in Wildbächen

Verlagerungsprozess	Vol. Feststoffkonzentration [-]	Intensitätsfaktor [-]
Hochwasser	0.00-0.05	1.00-1.05
Fluviatiler Feststofftransport	0.05-0.20	1.05-1.40
Murartiger Feststofftransport	0.20-0.40	1.40-3.50
Murgang	0.40-0.90	3.50-100.00

Ein ähnliches Bild erhält man, wenn man österreichweit erhobene Daten (1972-2000) (Datenquelle Bundesamt für Wald, BFW) auswertet (Abbildung 7).

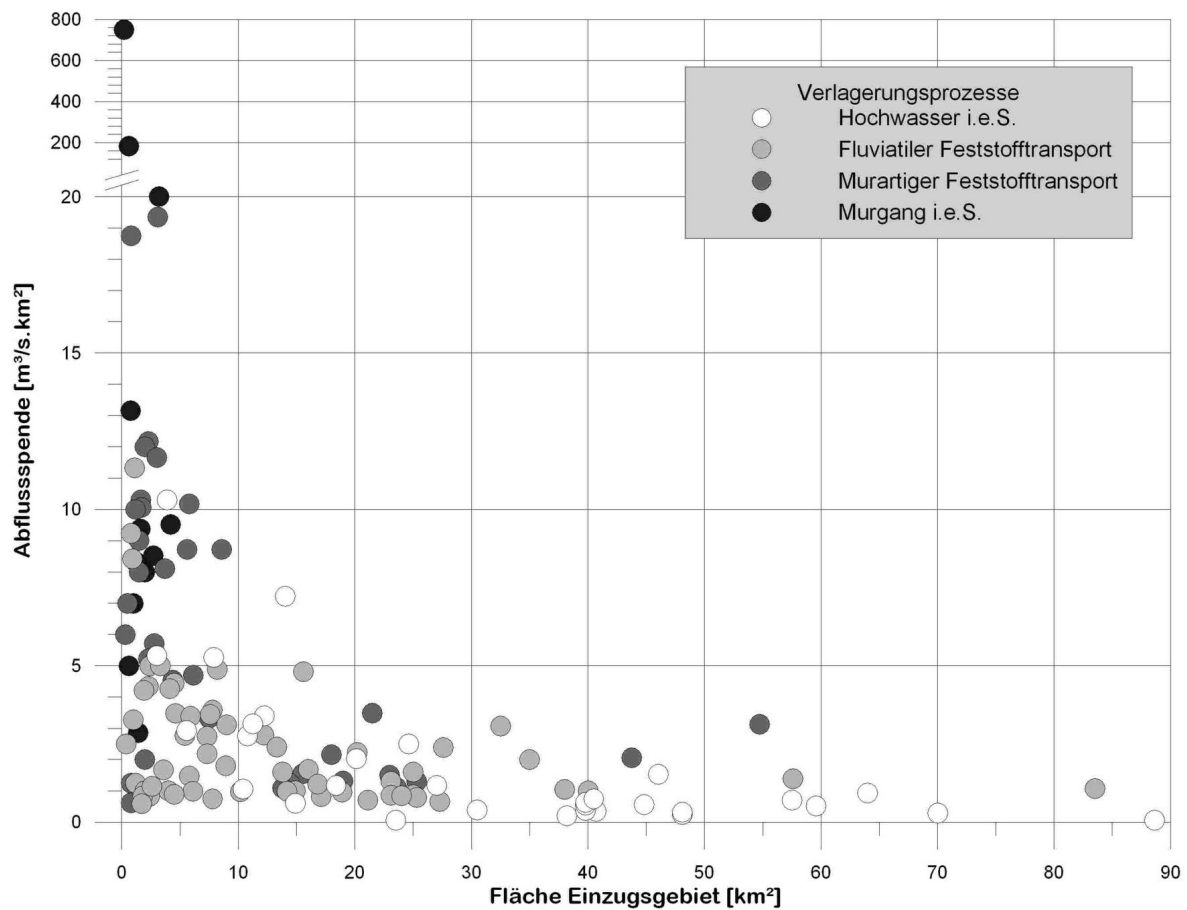


Abb. 7: Ausgewählte Wildbachereignisse von 1972 bis 2000: Abflussspende und Verlagerungsprozess (Datenquelle: BFW).

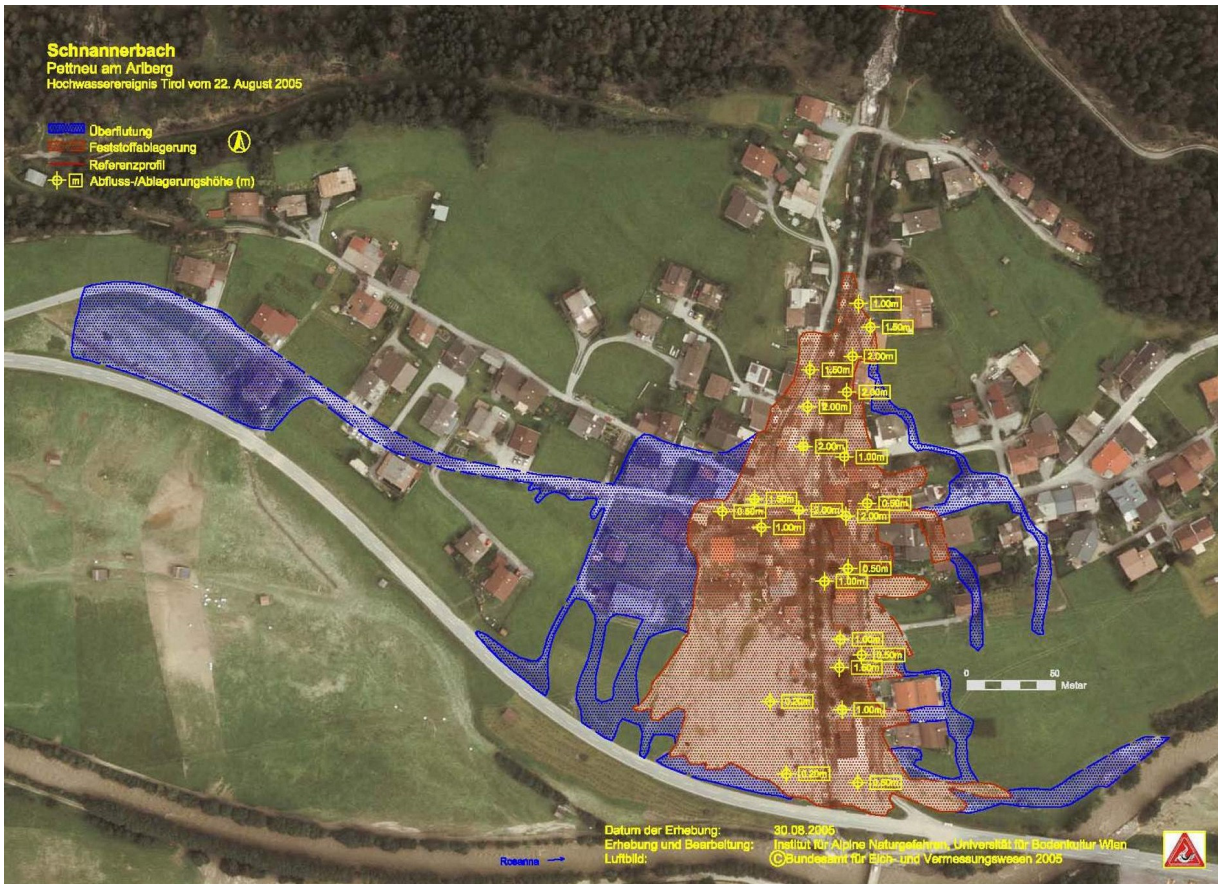


Abb. 8: Überschwemmungs- und Überschotterungsflächen des Schnannerbaches, Ereignis vom 22./23. August 2005 (Hübl et al., 2006).

Neben der Dokumentation von Referenzprofilen zur Bestimmung des Abflusses ist die georeferenzierte Aufnahme der Überschwemmungs-, Überschotterungs- und Übermurrungsflächen von größter Bedeutung (Abbildung 8). Stellt der berechnete Abfluss nur einen Hinweis zur Abschätzung der Größenordnung und Frequenz eines Ereignisses dar, ist die Aufnahme der von einem Ereignis betroffenen Flächen die Abbildung des real aufgetretenen Ereignisses. Gerade in Wildbacheinzugsgebieten können gleich große Abflüsse unterschiedliche Wirkungen hervorrufen und somit unterschiedlichste Flächen beaufschlagen. Durch die flächenhafte Kartierung ist die Vergleichbarkeit mit den ausgewiesenen Gefahrenzonen gewährleistet.

5. Schlussfolgerungen

Die Dokumentation von Naturereignissen (Wildbäche, Lawinen, Sturzprozesse, Massenbewegungen) nach festgelegten Standards stellt die wichtigste und einzige reale Beweissicherung über den Prozessverlauf dar, und bildet deshalb eine wertvolle Grundlage für Gefahrenzonenplanung, Projektierung, Einzelgutachten und Stellungnahmen. Diese Leistung soll daher als fester Bestandteil der Krisenbewältigung etabliert werden.

Die Dokumentation von Ereignissen muss möglichst unmittelbar nach dem Ereignis beginnen und effizient erfolgen, um ein größtmögliches Maß an Information zu

sichern. Grundvoraussetzung dafür ist die unmittelbare Verfügbarkeit von finanziellen und personellen Ressourcen und die Sicherstellung der organisatorischen und rechtlichen Rahmenbedingungen.

Die Spitzenabflüsse in Wildbächen liegen größtenteils über denen eines „normalen“ Hochwassers. Dies ist vor allem auf den Feststofftransport, aber auch auf Verklauungsbrüche zurückzuführen. Genauere Angaben dazu können aber erst nach Aufnahme und Analyse weiterer Ereignisse in Wildbächen zur Verfügung gestellt werden.

6. Literatur

Aulitzky, H. (1970) Der Enterbach am 26. Juli 1969. Versuch der Analyse eines Murganges als Grundlage für die Neuerstellung einer zerstörten Wildbachverbauung, Wildbach- und Lawinenverbau, Jg. 34, H. 1, S. 31-66

Hodel, H. und Lehmann, Ch. (2000) Mittlere Fließgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen – Welche Maximalwerte sind realistisch? Interpraevent 2000, Band 3, S. 155 – 165

Hübl, J., Kienholz, H. und Loipersberger, A. (2002) DOMODIS- Documentation of Mountain Disasters: State of the discussion in the European Mountain Areas, Schriftenreihe 1 der Int. Forschungsges. INTERPRAEVENT, Handbuch 1, Klagenfurt

Hübl, J., Ganahl, E., Bacher, M., Chiari, M., Holub, M., Kaitna, R., Prokop, A., Dunwoody, G. Forster, A., Kerschbaumer, M., Schneiderbauer, S. (2005) Dokumentation der Wildbachereignisse vom 22./23. August 2005 in Tirol, Band 1: Generelle Aufnahme (5W-Standard); IAN Report 109 Band 1, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur-Wien (unveröffentlicht)

Hübl, J., Habersack, H., Kienholz, H., Agner, P., Ganahl, E., Moser, M., Scheidl, Ch., Kerschbaumsteiner, W., Schmid, F. (2006) Disaster Information System of Alpine Regions (Interreg III B: DIS-ALP): Methodik Teil 1, IAN Report 101, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur-Wien (unveröffentlicht)

Hübl, J., Heiss, K., Brabec, S. (2007) Grundlagen zur Risikoanalyse am Enterbach und Pfonerbach, Tirol; IAN Report 104 Band 2: Enterbach; Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien (unveröffentlicht)

Jarrett, R. (1984) Hydraulics of high-gradient streams; J. Hydr. Eng., ASCE 110 (11), S. 1519-1539

Naturgefahrenkommission Kanton St. Gallen, Ingenieurbüro Bart St. Gallen (1998): Kantonaler Ereigniskataster Naturgefahren: Anleitung zur Spurensicherung des Kantons St. Gallen/Schweiz

Pisch, E. (2002) Dorfbuch Inzing, <http://www.pisch.at/Ernst/wissen/Dorfbuch/>

Rickenmann, D. (1996) Fließgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen, Wasser, Energie, Luft, 88 (11/12), S. 298-304

Rickenmann, D. und Weber, D. (2000) Flow resistance of natural and experimental debris-flows in torrent channels; Proc. of the 2nd Int. Conf. on Debris-flow Hazards Mitigation, Taiwan (Hrsg. Wieczorek, G., Naeser, N.), S. 245-254, Balkema

Stiny, J. (1938) Über die Regelmäßigkeit der Wiederkehr von Rutschungen, Bergstürzen und Hochwasserschäden in Österreich, Geologie und Bauwesen, Heft 2, S. 10-48

Strickler, A. (1924) Beiträge zur Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und offene Leitungen, Schweizerische Bauzeitung, Bd. 83, Nr. 23, S. 265-268

Anschrift des Verfassers:

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Johannes Hübl
Institut für Alpine Naturgefahren
Department Bautechnik und Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien
Peter Jordan Straße 82, 1190 Wien
Email: johannes.huebl@boku.ac.at

BEMESSUNGSHOCHWÄSSER KLEINER AUFTRETENSWAHRSCHEINLICHKEIT – ZUR ENTWICKLUNG EINES LEITFADENS ZUR ERMITTLUNG VON BEMESSUNGSHOCHWÄSSERN FÜR TALSPERREN

Dieter Gutknecht

1. Einleitung

Hochwasserentlastungsanlagen von Talsperren sind für extreme Abflüsse auszulegen. In den technischen Richtlinien und Normen werden die der Bemessung zugrunde liegenden Hochwasserwerte über die Wahrscheinlichkeit definiert, mit der das Auftreten eines solchen Ereignisses erwartet werden kann. Dem mit der Aufgabenstellung verbundenen Extremcharakter der zu bestimmenden Bemessungshochwässer entspricht es, dass für solche Ereignisse die jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit sehr klein gewählt wird, der Bemessungspraxis in Österreich folgend zum Beispiel über eine Wahrscheinlichkeit von 1/5000. Ähnliche Vorgaben gelten auch in anderen Ländern. So sieht die DIN 19700 in Deutschland zwei Belastungsfälle mit Werten von 1/1000 bzw. 1/10000 vor. In vergleichbarem Rahmen bewegen sich auch die Bemessungsanforderungen in anderen europäischen Ländern (Finnland, Frankreich, Großbritannien, Italien, Norwegen), wobei in manchen Ländern Differenzierungen nach dem Gefährdungspotenzial getroffen werden.

Für die Ingenieurpraxis bedeutet die Vorgabe solcher Bemessungswerte eine große Herausforderung. Ihrer Definition gemäß sind sie äußerst selten zu erwarten und damit auch kaum zu beobachten – Ausnahmen wie die extremen Ereignisse in manchen Gebieten bei den Hochwässern in den Jahren 2020 und 2005 bestätigen eher diese Regel. Bei der Bestimmung solcher Extremereignisse muss daher über den Bereich des Beobachtbaren hinaus extrapoliert werden. Die damit verbundenen „Hochrechnungen“ sind im Allgemeinen mit vielen Freiheitsgraden und großen Unsicherheiten verbunden. Dies lässt erwarten, dass je nach vorhandener Datenbasis und gewählter Bestimmungsmethode recht unterschiedliche Ergebnisse entstehen können.

Zu welcher unterschiedlichen Ergebnissen die Einschätzung von Bemessungswerten kommen kann, wurde deutlich in einer Studie, in der die Projektshochwässer der Hochwasserentlastungsanlagen von Talsperren und Dämmen in Österreich den HQ100-Schätzwerten für die Einzugsgebiete bis zur Sperrenstelle gegenübergestellt wurden (Abbildung 1). Das erhaltene Bild zeigt einen sehr großen Schwankungsbereich der Faktoren, der zum Teil weit die Verhältniszahl übersteigt, die sich aus einer einfachen Umrechnung entsprechend der Veränderung der Überschreitungswahrscheinlichkeit von 1/100 auf 1/5000 ergäbe. Würde nur dieser Aspekt allein als maßgebend angesehen werden, sollte der Quotient je nach gewählter Verteilung und Schiefe in einem Bereich zwischen 1,7 und 2,4 liegen. Die Werte für die Projekthochwässer liegen im Vergleich dazu im Mittel um einen Faktor 2 höher.

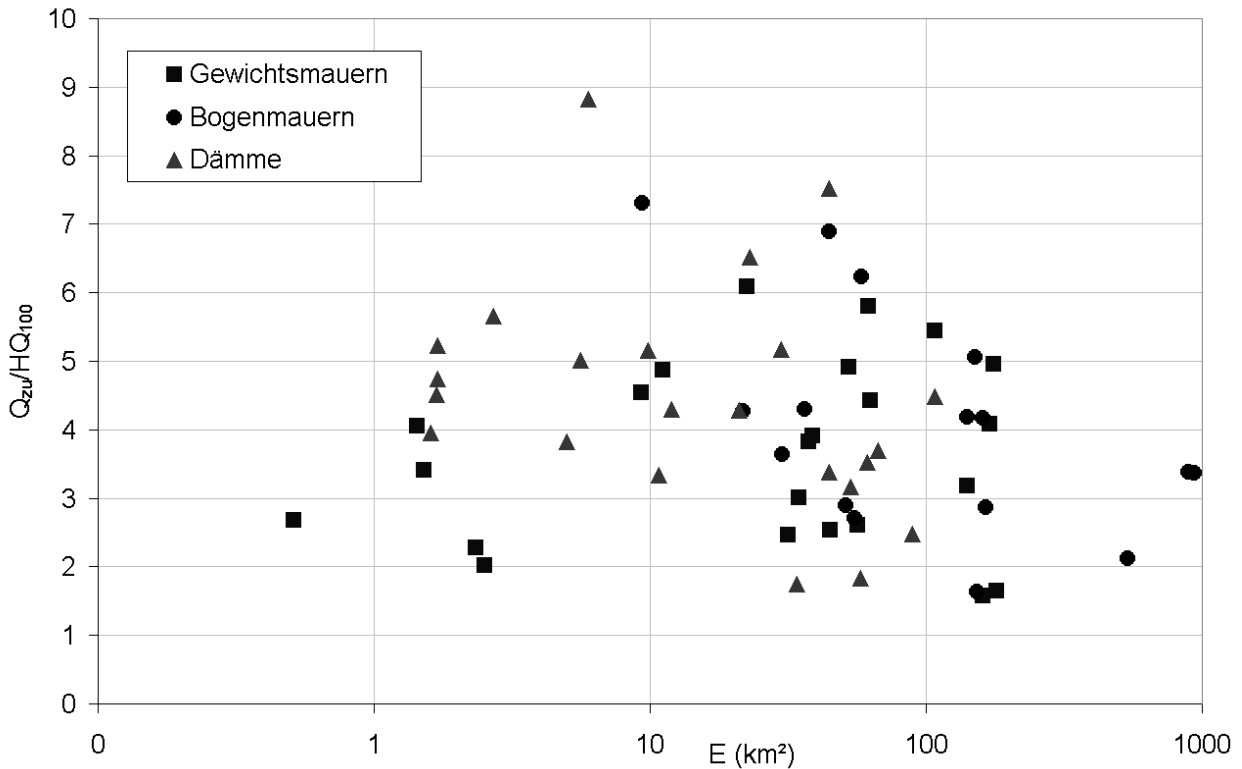


Abb. 1: Verhältniswerte zwischen Projektshochwasser und HQ100-Schätzwert.

Es ist evident, dass bei der Festlegung der Projektshochwasserwerte nicht nur statistische Aspekte, sondern auch andere Aspekte – z.B. Anlageverhältnisse, wahrscheinlich auch Gefährdungsmomente – Berücksichtigung fanden. Ohne Zweifel wurden auch verfügbare Angaben über die bisher beobachteten höchsten Hochwässer (HHW, HHQ) aus regionalen Betrachtungen mit einbezogen. Vielfach dürften auch Formeln wie die WUNDT-Formel (Wundt, 1950 bzw. 1965), die einen generellen Anhaltspunkt über „Rekordwerte“ geben, herangezogen worden sein. Von Einfluss dürfte auch gewesen sein, dass die ÖNORM B2400 den Begriff des „Rechnungsmäßig höchsten Hochwassers (RHHQ)“ enthielt, der definiert ist als „durch theoretische Überlegungen und Berechnungen ermittelter höchstmöglicher Wert“. Es ist anzunehmen, dass immer wieder bei der Wahl der Bemessungsgröße diese Definition als Richtschnur herangezogen wurde.

2. Zielsetzung des Leitfadens

Vor dem Hintergrund dieser Problemsituation soll mit der Entwicklung des Leitfadens eine Methodik zur Bestimmung der Bemessungs- und Nachweisgrößen vorgelegt werden, die eine nach einheitlichen Grundsätzen erfolgende Bearbeitung ermöglicht. Sie sollte so konzipiert sein, dass – so weit wie möglich – (i) auf die mit den verwendeten Daten und Methoden verbundenen Unsicherheiten eingegangen werden kann; (ii) der Unschärfbereich der Bemessungsgrößen nach Möglichkeit eingeengt wird; (iii) die Bestimmung der hydrologischen Bemessungsgrößen und ihrer Unsicherheit allein aufgrund der hydrologischen Gegebenheiten – Möglichkeit und

Wahrscheinlichkeit des Auftretens extremer Hochwässer einerseits, Unsicherheit und Unschärfe in der Berechnung als Folge unsicherer Daten und Modelle andererseits - erfolgt, andere Sicherheitsaspekte nicht in die hydrologischen Kenngrößen „gepackt“ werden sollten; (iv) die verbleibende unbekannte Rest-Unsicherheit über frei auf Basis einer Gesamtbetrachtung der Sicherheitsaspekte der Talsperre festzulegende Maße („Freibordreserve“, „Sicherheitsreserve“) abgefangen wird.

Mit dem zuletzt angeführten Aspekt wird dem Aspekt Rechnung getragen, dass die Frage der Sicherheit einer Talsperre von einer Vielzahl von Faktoren (betriebliche, wasserbaulich-konstruktive, Sperren- und Sperrenumgebung spezifische) mitbestimmt wird, die in die Überlegungen, wie mit einer möglichen Rest-Unsicherheit umgegangen werden soll, einzubeziehen sind.

Der Anwendungsbereich des Leitfadens betrifft alle Talsperren mit einer Höhe von mehr als 15m über Gründungssohle und alle Speicher mit einem Speicherinhalt von mehr als 500.000 m³. Eingeschlossen sind darin alle Arten von Nutzungen wie Wasserkraftnutzung, Trinkwasserversorgung, Hochwasserrückhalt, Beschneigung.

Der Leitfaden soll ferner einen Arbeitsbehelf für die routinemäßige Überprüfung von bestehenden Stauanlagen bereitstellen, die eine Vorbeurteilung nach einem rasch durchführbaren und einfach zu handhabenden „abgekürzten Verfahren“ im Rahmen der Prüftätigkeit der Behörde ermöglichen soll.

3. Konzeption der Sicherheitsnachweise

Das Konzept zum Nachweis der Hochwassersicherheit geht von der generellen Überlegung aus, dass die Hochwassersicherheit einer Talsperre sowohl von der Größe und Wahrscheinlichkeit eines möglichen Hochwasserereignisses als auch von den konstruktiven Merkmalen des Talsperrentyps – Staumauer oder Staudamm – und von der Art und Funktionsweise der Hochwasserentlastung abhängt. Die konstruktiven Merkmale der Sperre und das Förderverhalten der Entlastungsanlage bestimmen die Robustheit der Anlage und die Empfindlichkeit gegenüber Unsicherheiten in der Abschätzung der Bemessungshochwässer.

Für den Nachweis der Hochwassersicherheit sind daher im Leitfaden zwei Arten von Nachweisen vorgesehen, denen zwei verschiedene Lastfälle entsprechen: der Lastfall „Bemessungshochwasser (BHQ)“ und der Lastfall „Sicherheitshochwasser (SHQ)“. Der erste Belastungsfall bezieht sich auf das Abfuhrvermögen der Hochwasserentlastung. Das BHQ bezeichnet dabei jenen Hochwasserdurchfluss, auf den die Entlastungsanlage zu bemessen ist. Es wird in hydrologischer Hinsicht über einen Hochwasserscheitelabfluss mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{U}}(\text{BHQ}) = 2 \cdot 10^{-4}$ entsprechend einem Wiederkehrintervall von 5000 Jahren definiert. In sicherheitstechnischer Hinsicht bezeichnet das BHQ einen Lastfall, bei dessen Auftreten keine Schäden an den Entlastungsanlagen und an der Sperre auftreten dürfen und bei dem die volle Stand- und Betriebssicherheit gegeben sein muss. Der Nachweis für den Belastungsfall SHQ dient der Überprüfung der Sicherheit bei Überlastung (Überschreitung des Bemessungshochwasserzuflusses). Es entspricht demjenigen

Hochwasser, das die Anlage unter extremsten Bedingungen bewältigen muss. Unter hydrologischem Aspekt entspricht es dem international als „Probable Maximum Flood (PMF)“ („Vermutlich größtes Hochwasser“) bezeichneten Extremfall. In vieler Hinsicht gleicht es dem in früheren Regelwerken als RHHQ bezeichneten extremen Berechnungshochwasser.

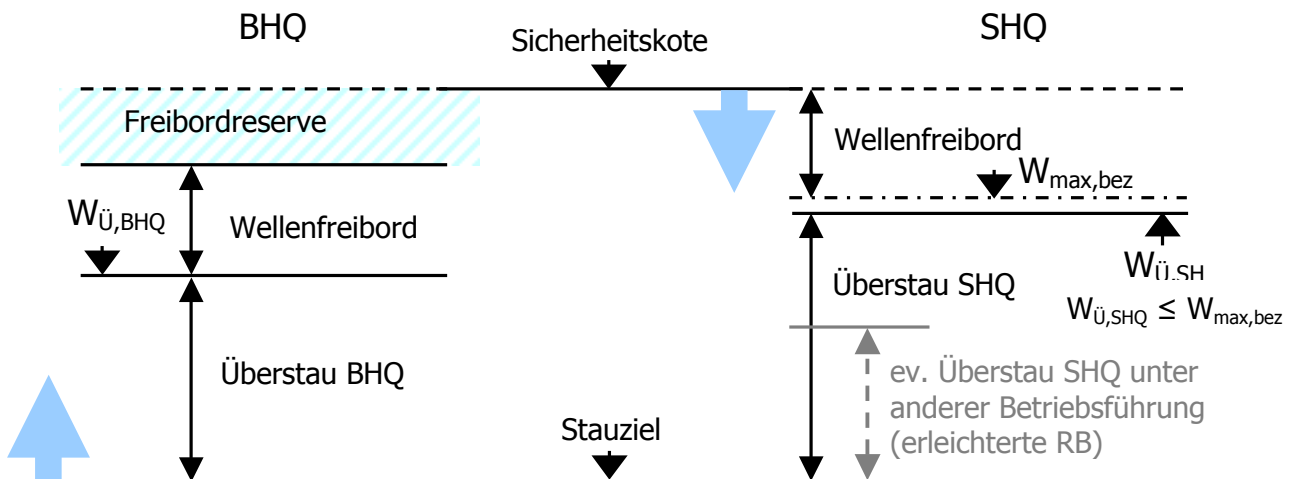


Abb. 2: Gegenüberstellung der Nachweise für die beiden hydrologischen Lastfälle BHQ und SHQ.

Die Vorgangsweise bei der Durchführung der beiden Nachweise zeigt Abbildung 2. Der Zielsetzung gemäß wird der Nachweis im Falle des BHQ ausgehend von der Stauzielkote über die durch Aufsummierung von Überstau und Wellenfreibord erhaltene Wasserspiegellage und die sich dabei einstellende Freibordreserve geführt. Im Falle des SHQ wird ausgehend von der durch die Anlagenverhältnisse bestimmten Sicherheitskote die maximal zulässige Wasserspiegellage $W_{\max,bez}$ im Stauraum nach Abzug des Wellenfreibordes von der Sicherheitskote bestimmt. Der Nachweis ist erbracht, wenn $W_{\dot{U},SHQ} \leq W_{\max,bez}$. Ist $W_{\max,bez} > W_{\dot{U},SHQ}$, so bezeichnet die entsprechende Differenz ein zusätzliches Sicherheitsmaß.

Die für die Anlagensicherheit bestimmende Größe ist hierbei die Sicherheitskote. Sie ergibt sich aus den konstruktiven Merkmalen der Anlagen und ist für Staumauern und Staudämme verschieden definiert. In der Führung des Sicherheitsnachweises kommt ihr die Rolle einer bei extremen Hochwasserereignissen kurzzeitig zulässigen Wasserspiegelhöhe zu, wobei nachzuweisen ist, dass beim Erreichen dieser Kote weder an den Bauwerken noch am umgebenden Gelände (inkl. Stauraum) Schäden entstehen, welche die Stand- und Betriebssicherheit der Anlage gefährden.

Im Belastungsfall BHQ bildet die Freibordreserve die Differenz zwischen der Sicherheitskote und der Wasserspiegellage, die sich aus der Aufsummierung von Stauziel, Hochwasser bedingtem Überstau und Wellenfreibord ergibt. Sie dient beim Bemessungsfall der Abdeckung der mit der Abschätzung des BHQ verbundenen Unschärfe und entspricht einem Überstau, der sich – unter Berücksichtigung der Speicherretention – bei der Abfuhr eines um diese Unschärfe vergrößerten Hochwassers einstellen würde.

4. Ermittlung des Bemessungshochwassers und des Sicherheitshochwassers

In Hinblick auf die Durchführung der Bearbeitungen zur Ermittlung der hydrologischen Kenngrößen für die beiden Nachweise werden im Leitfaden zwei nach Zielsetzung und Bearbeitungsaufwand verschiedene Verfahren unterschieden:

- Eine Bearbeitung nach einem detaillierten Verfahren;
- eine Bearbeitung nach einem abgekürzten Verfahren.

Im detaillierten Verfahren ist eine eingehende Analyse unter Anwendung eines kombinierten Ansatzes („Mehr-Standbeine“-Ansatz) durchzuführen, bei dem mehrere Methoden („Standbeine“) eingesetzt werden. Es kommt generell bei der Neuerrichtung von Anlagen zur Anwendung.

Das abgekürzte Verfahren ist vorgesehen als erste Verfahrensstufe bei der Überprüfung einer existierenden Anlage. Es ermöglicht eine mit geringem Aufwand durchzuführende Abschätzung der maßgebenden Hochwasserscheitel auf Basis von Testgrößen BHQ* und SHQ*. Bei positiver Beurteilung – die vorhandene Kapazität der Entlastungsanlage ist größer als die nach dem abgekürzten Verfahren ermittelte Testgröße BHQ* – kann von einer Bearbeitung in einem zweiten Schritt nach dem detaillierten Verfahren abgesehen werden. Bei negativer Beurteilung hat eine Bearbeitung nach dem detaillierten Verfahren zu erfolgen.

4.1 “Mehr-Standbeine“-Ansatz

Die Problematik der beträchtlichen Unsicherheiten bei der Bestimmung von Hochwasserabflüssen mit kleinen Wahrscheinlichkeiten hat dazu geführt, dass vermehrt Verfahren eingesetzt werden, bei denen mehrere Methoden miteinander kombiniert werden (z.B. Parmet et al., 1999; Chbab et al., 2006). In diese Richtung zielende Ansätze sind auch aus der Praxis in Österreich bekannt (Godina, 1998).

Der Grundgedanke bei diesem Ansatz besteht darin, den gesuchten Schätzwert nicht nur nach der Hochwasserstatistik, sondern auch nach anderen, „alternativen“ Methoden zu bestimmen und die erhaltenen Schätzwerte zu kombinieren. Durch geeignete Kombination sollte eine Eingrenzung des Unschärfebereichs des gesuchten Bemessungswertes möglich werden. Voraussetzung dafür ist, dass mit der parallelen Verwendung der verschiedenen Methoden und Modelle einander ergänzende Informationen eingetragen werden, unterschiedliche Daten genutzt werden, verschiedene Aspekte (Einflussfaktoren, Voraussetzungen etc.) ins Spiel gebracht werden (Abbildung 3). Die zum Einsatz kommenden Methoden sind in diesem Sinne die verschiedenen „Standbeine“, auf denen die Ermittlung des gesuchten Bemessungswertes aufbaut (Gutknecht et al., 2006).

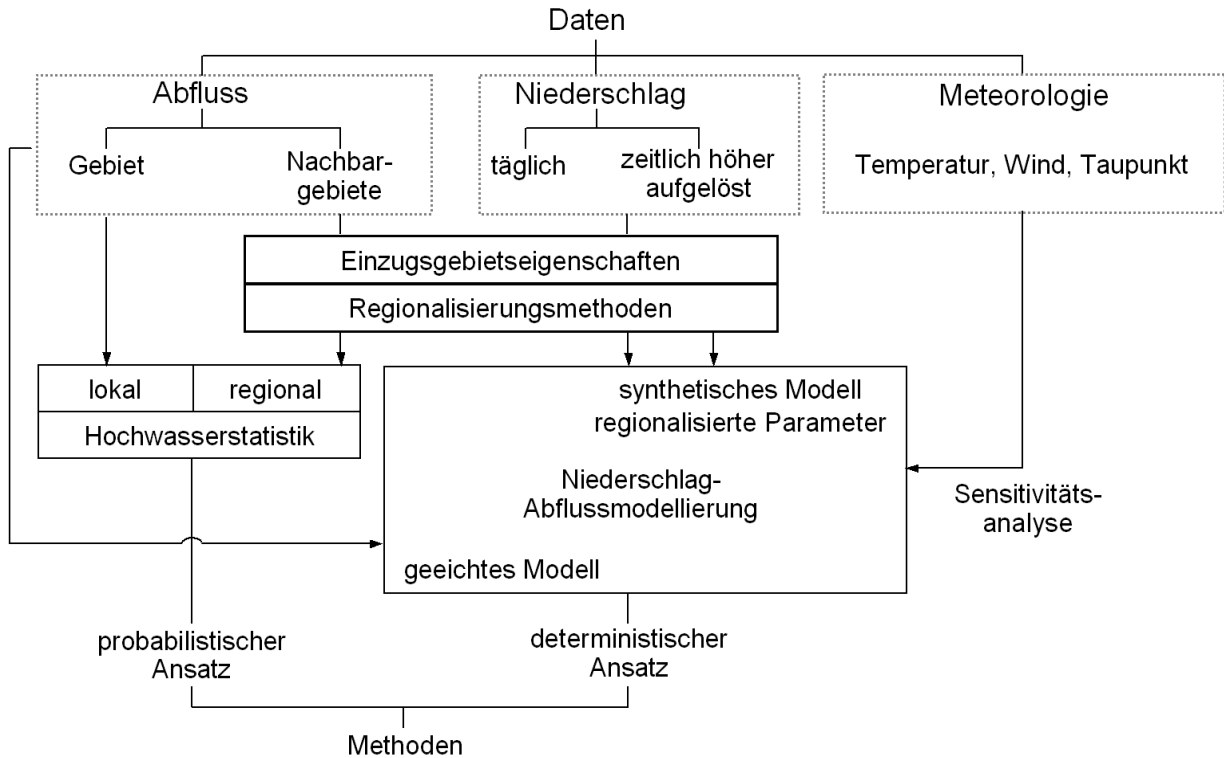


Abb. 3: Daten und Methoden im „Mehr-Standbeine“-Ansatz.

4.2 Ermittlung des Bemessungshochwassers nach dem detaillierten Verfahren

Im Leitfaden ist für die Ermittlung des Bemessungshochwassers nach dem detaillierten Verfahren die Durchführung voneinander unabhängiger Berechnungen nach den folgenden vier Methoden vorgesehen: Hochwasserstatistik / Regionale Hochwasserstatistik / Niederschlag-Abfluss-Modellierung / Gradex-Verfahren.

Der Bemessungswert wird aus den nach den verschiedenen Methoden erhaltenen Ergebnissen unter Abwägung der mit der jeweiligen Berechnungsmethode verbundenen Unsicherheiten ausgewählt. Als zusätzliches Beurteilungskriterium kann ein Vergleich mit den größten bisher beobachteten Extremwerten in der betreffenden Region („Hüllkurven“-Verfahren) herangezogen werden.

4.2.1 Hochwasserstatistik

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

Die Empfehlungen des Leitfadens umfassen dazu: (a) die Durchführung von Bearbeitungen auch für Pegelstationen der Region zum Vergleich; (b) die Ermittlung des HQ5000 nach den beiden Verteilungsfunktionstypen Gumbelverteilung (GUV) und Allgemeine Extremwertverteilung (AEV); (c) die Schätzung der Parameter nach der

Momentenmethode, für die GUV auch nach der L-Momenten-Methode; (d) die Ermittlung der 90-Prozent-Vertrauensbereiche.

Stärken: Die beobachteten Hochwasserdurchflüsse repräsentieren das „integrale“ Ergebnis aller zum Entstehen eines Hochwassers beitragenden Faktoren und zwar unter den im betrachteten Einzugsgebiet herrschenden spezifischen Bedingungen.

Schwächen: Die größte Unsicherheit ist mit dem Zufallscharakter der gerade vorliegenden Stichprobe verbunden („Sampling uncertainty“). Faktoren sind dabei die Kürze (zumindest relative Kürze im Vergleich mit dem Extrapolationsbereich) der vorhandenen Reihe; die Frage der Repräsentativität der Reihe (sind große, „extreme“ Ereignisse enthalten ?); die Gültigkeit der dem Verfahren zugrunde liegenden Voraussetzungen (Homogenität, Stationarität, Ergodizität).

4.2.2 Regionale Hochwasserstatistik

In diesem Schritt werden aus den Hochwasser-Durchfluss-Datenreihen von Stationen außerhalb des Gebietes die HQ5000-Schätzwerte bestimmt. Die Auswertung erfolgt über Regionalisierungsansätze in Form von Regressionsgeraden, Trendlinien oder geeignet gewählten Hüllkurven. Die Daten werden dabei bevorzugt in einem Hochwasserspendendiagramm gegen die Einzugsgebietsfläche (im doppelt-logarithmischen Maßstab) aufgetragen. Bei der Abschätzung des HQ5000-Wertes für das betrachtete Gebiet werden Ähnlichkeitsbetrachtungen angestellt. Als Merkmale können dabei das Niederschlagsregime, die Starkniederschläge, die Saisonalität der Hochwässer, der vorherrschende Hochwasser-Typ und Gebietseigenschaften wie Böden, Geologie, Gewässernetzdichte, Seeanteil etc. einbezogen werden. Im Vergleich mit der Situation im Untersuchungsgebiet soll daraus Aufschluss über die Ähnlichkeit bzw. die Unähnlichkeit im Abflussverhalten der einbezogenen Vergleichsgebiete erhalten werden. Schätzwerte von hydrologisch ähnlichen Gebieten erhalten stärkeres Gewicht bei der Übertragung auf den gesuchten Schätzwert für das Untersuchungsgebiet.

Stärken: Mit der Ausweitung der Stationsanzahl steigt die Wahrscheinlichkeit, auch längere Beobachtungsreihen auswerten zu können, und damit auch die Wahrscheinlichkeit, seltenere und größere Hochwässer mit erfassen zu können.

Schwächen: Mit der Vergrößerung der regionalen Basis nimmt aber andererseits auch die Wahrscheinlichkeit zu, dass andere, zusätzliche oder veränderte Faktoren auf die verwendeten Hochwasserwerte von Einfluss sind. Dies führt zu einer Zunahme der Streuung in den Beziehungen („größeres Rauschen“) und zu vergrößerter Unsicherheit. Unschärfe in der Aussage wird ferner in Zusammenhang mit der Wahl und der Bestimmung der regionalen Beziehung eingetragen. Große Bedeutung kommt deshalb einer zutreffenden Einschätzung bezüglich der Ähnlichkeit zu.

4.2.3 Niederschlag-Abfluss-Modellierung

Die Einbeziehung der Abflusssimulation über eine NA-Modellierung ermöglicht es, den Einfluss verschiedener Niederschlagsituationen und verschiedener Abflussbedingungen im Einzugsgebiet auf die Größe des gesuchten Bemessungshochwassers

zu untersuchen. Die Methode erfordert die Aufstellung eines NA-Modells und die Wahl des Bemessungsniederschlags.

Die Wahl des Modelltyps für das NA-Modell ist grundsätzlich frei. Der Aufgabenstellung entsprechend wird empfohlen, ein Modell auf Ereignisbasis („Ereignismodell“) und ein Modell mit wenigen Parametern zu wählen. Solche Modelle haben den Vorteil der einfacheren Modellbildung, der robusteren Schätzung der Parameterwerte, der leichteren Überprüfung der Modellanpassung an verschiedene Abflusszustände bei verschiedenen großen Ereignissen und der leichteren Interpretation der Ergebnisse.

Das Modell ist nach Möglichkeit an Daten aus dem Untersuchungsgebiet zu eichen. Sind solche Daten nicht vorhanden, ist das Modell an Abflussdaten in Nachbargebieten zu eichen und die Modellparameter auf Basis von Analogieschlüssen aus Parameteruntersuchungen zu übertragen.

Bei der Bestimmung der Modellparameter für die Berechnung des Bemessungshochwassers ist dem Umstand Rechnung zu tragen, dass sich das Gebietsverhalten bei Übergang von Normal- zu Extremereignissen in der Regel ändert. Zu erwartende veränderte Bedingungen gegenüber dem Eichereignis – wie z.B. Veränderung der zum Abfluss beitragenden Flächen, Verschiebung der Anteile der diversen Abflusskomponenten – sind in geeigneter Weise zu berücksichtigen.

Der Wahl des Bemessungsniederschlags kommt große Bedeutung zu. Wesentliches Element ist hierbei die Wahl der Überschreitungswahrscheinlichkeit. Sie wird hier zu $P_{\bar{U}} = 2 \cdot 10^{-4}$ angesetzt. Diese Wahl liegt auf der sicheren Seite. Die anderen Merkmale – Dauer, Intensität, zeitliche und räumliche Verteilung – des Niederschlags sollten in Entsprechung zu den meteorologischen Bedingungen, die in dem betrachteten Gebiet zu einem extremen Ereignis führen, gewählt werden.

Stärken: Die NA-Modellierung bietet die Möglichkeit, auf die Entstehungsbedingungen von Extremereignissen einzugehen. Dies betrifft sowohl das auslösende Niederschlagsereignis, insbesondere den Niederschlagstyp (konvektiver Niederschlag, advektiver Niederschlag, orographisch verstärkter Niederschlag), als auch die Vorgänge bei der Abflussentstehung, insbesondere auch das Zusammenwirken von Bodenfeuchtezustand des Einzugsgebiets bei Beginn des Ereignisses und Intensität, Dauer und Höhe des Niederschlags auf Größe und Stärke der Abflussreaktionen im Einzugsgebiet. Bei der Konzeption der entsprechenden Simulationsläufe kann das vorhandene Wissen um die Prozesse nutzbar gemacht werden. Durch geeignete Variation der Eingangsgrößen und der Modellparameter können Sensitivitätsstudien durchgeführt werden, die den Einfluss von abgeänderten Abflussbedingungen „sichtbar“ machen. Daraus kann ein plausibler Wertebereich abgeleitet werden, der den Unschärfbereich des Schätzwertes für das Bemessungshochwasser angibt.

Schwächen: Ein grundsätzlicher Schwachpunkt der hier vorgeschlagenen Vorgangsweise besteht darin, dass dem Wahrscheinlichkeitsmerkmal des Bemessungsereignisses über die Kombination einer deterministischen Abflussberechnung mit einem probabilistisch definierten Eingang nicht wirklich entsprochen wird. Offen ist,

wie nahe bzw. wie ferne die bei der Modellierung zu treffenden Annahmen über die Merkmale des Niederschlagsereignisses und über den Anfangsfeuchtezustand des Gebiets sich auf die Wahrscheinlichkeit des daraus berechneten Abflussereignisses auswirken. Die damit verbundene Unschärfe des Ergebnisses bildet daher auch den Haupteinwand gegen die Anwendung einer auf Einzelereignis-Simulation beruhenden Ermittlung von Bemessungshochwässern. Wenn trotz dieses Einwandes die Methodik hier vorgeschlagen wird, so deshalb, weil die oben angeführten Stärken zu einem wesentlichen Informationsgewinn im Rahmen des Gesamtkonzepts führen.

4.2.4 Gradex-Verfahren

Die Grundidee des Verfahrens besteht in der Kombination einer Niederschlagsstatistik mit einem deterministischen Niederschlag-Abfluss-Modell und einer Hochwasserstatistik. Dem Verfahren liegt die Konzeption zugrunde, dass im Einzugsgebiet bei einer bestimmten Jährlichkeit T_g eine maximale Speicherkapazität erreicht wird, bei der Sättigung entsteht. Ein Überschreiten dieser Grenzsituation bei einem extremen Niederschlag führt dazu, dass jeder zusätzliche Niederschlag zur Gänze in ein zusätzliches Abflussvolumen umgesetzt wird.

Die Anwendung des Verfahrens erfordert als Basis die statistische Auswertung der Jahresreihe der Hochwasserscheitel nach der traditionellen Methodik und die statistische Auswertung der maximalen jährlichen Niederschläge einer bestimmten Bezugsdauer H . Die weiteren Schritte betreffen die Umrechnung der Stationsniederschlagswerte in Gebietsniederschläge mittels eines Flächenabminderungsfaktors (ARF) und die Umrechnung der ermittelten Abflussvolumina in Scheitelabflüsse auf Basis eines Wertes r , der die zeitliche Dynamik der Abflussreaktion wiedergibt. Die Jährlichkeit T_g ist aufgrund einer hydrologischen Einschätzung des Gebiets zu bestimmen.

Stärken: Das Verfahren stellt ein einfaches und robustes Verfahren dar. Es ist auf die Abschätzung von Bemessungshochwässern mit gegebener Jährlichkeit hin konzipiert. Es hat eine einfache Struktur, die aber doch gewisse wesentliche Merkmale der Veränderung des Abflussprozesses bei Übergang zu extremen Ereignissen ansatzmäßig, wenn auch schematisch und überschlägig, berücksichtigt. Attraktiv aus Sicht der Anwendbarkeit ist auch der verhältnismäßig geringe Datenbedarf. Hier ist es vor allem die Einbeziehung von Tageswerten des Niederschlags (wenn H gleich 24 Stunden gewählt wird), für die in vielen Gebieten Reihen mit etwa 100 Jahren zur Verfügung stehen.

Schwächen: Eine systematische Untersuchung der Anwendbarkeit des Verfahrens hat gezeigt, dass sich große Unsicherheiten ergeben, wenn die Parameter des Verfahrens nur über vereinfachende Ansätze bestimmt werden (Merz et al., 1999). Dem empirischen Charakter der dem Verfahren zugrundeliegenden Beziehungen zufolge sind die Parameter r und ARF , und insbesondere auch die Jährlichkeit T_g für den Sättigungszustand des Gebiets, gebietspezifisch durch geeignete Auswertungen zu ermitteln.

4.2.5 Gegenüberstellung der Ergebnisse – Festlegung des BHQ

Zur Bestimmung des Bemessungshochwassers werden die Ergebnisse nach den verschiedenen Methoden miteinander verglichen. Die erhaltenen Schätzwerte werden dazu in einem Hochwasserspendendiagramm dargestellt. Als Maß für die Unschärfe der Schätzwerte dienen die aus den Berechnungen und Sensitivitätsstudien erhaltenen Vertrauensbereiche und Streubereiche. Zur Einschätzung der Berechnungsergebnisse unter regionalem Aspekt können Hüllkurven aus eigenen Erhebungen oder aus der Literatur (z.B. Wundt, 1950, 1965; Vischer, 1980; Klein et al., 2006) herangezogen werden. Als Bemessungswert ist sodann jener Wert auszuweisen, der sich nach Abwägen der Ergebnisse als der plausibelste ergibt.

Zusätzlich sind die Stärken und Schwächen der einzelnen Methoden unter Bezug auf die im betrachteten Gebiet gegebene spezifische Situation/Daten, Prozesse) gegenseitig abzuwägen. Besonderes Augenmerk ist auf den Informationsgehalt der jeweils einbezogenen Daten zu lenken. Die Beurteilung wird im Wesentlichen auf Basis von Expertenwissen zu treffen sein.

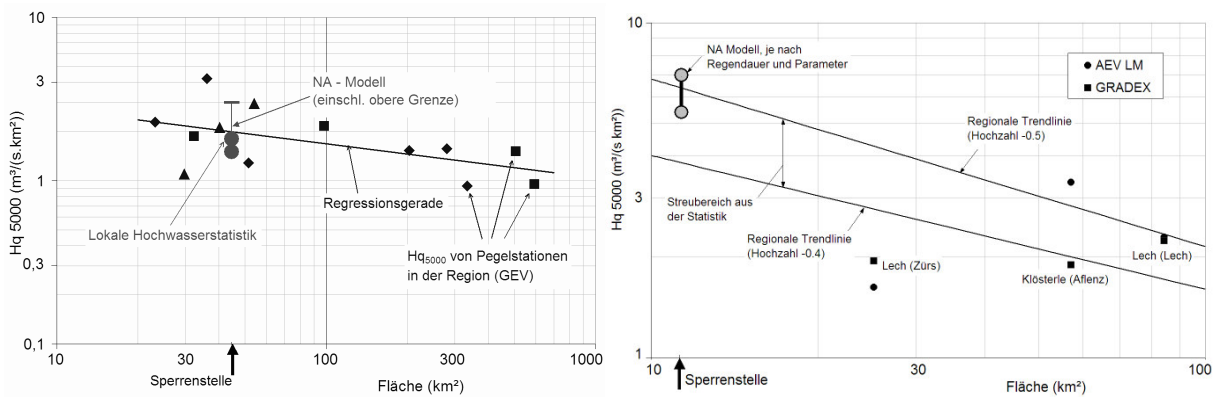


Abb. 4: Vergleich der Ergebnisse nach den verschiedenen Methoden.

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse zweier Bearbeitungen nach diesem Ansatz. In beiden Fällen handelt es sich um die Ermittlung des HQ5000 als Bemessungshochwasser für eine Hochwasserentlastungsanlage. Je nach Datenlage zeigen sich Unterschiede in den Unsicherheitsbereichen der verschiedenen Schätzungen und auch in der gegenseitigen Lage der einzelnen Schätzwerte. Die relative geringe Spannweite in den Ergebnissen der NA-Simulation ist auf die Ausrichtung der Berechnung auf den ungünstigsten Fall unter Berücksichtigung der Seeretention des Stauraumes zurückzuführen. Viel mögliche, aber zu kleineren Belastungen an der Entlastungsanlage führende Hochwassersituationen sind im Diagramm nicht mehr enthalten.

Im Beispiel der Abb. 4 rechts waren wegen der im Vergleich zu den Pegeln viel kleineren Einzugsgebietsfläche der Sperre die regionalen Verfahren nur ein grober Anhaltspunkt. Dies war einer der Aspekte, die dazu führten, dass bei der Zusammenschau der Methoden unter stärkerer Berücksichtigung des aus der NA-Simulation erhaltenen Wertes ein Bemessungswert gewählt wurde, der im oberen Bereich der

regionalen Trennlinie lag. Im Beispiel der Abb.4 links zeigten die NA-Simulationen, dass das Einzugsgebiet der Sperre im Vergleich zu den Nachbargebieten eine deutlich gedämpftere Abflussreaktion besitzt. Dies ist eine Information, die sich nicht direkt aus den anderen Methoden ableiten lässt. Unter Bedachtnahme darauf wurde ein Bemessungswert gewählt, der unter den regionalen Werten lag.

4.3 Ermittlung des SHQ

Die Basis zur Ermittlung des Sicherheitshochwassers bilden die im Rahmen der NA-Modellierung durchgeführten Sensitivitätsstudien. Durch eine Kombination von ungünstigen, aber dennoch plausiblen Bedingungen hinsichtlich des Niederschlags und der Modellparameter wird ein oberer Grenzwert abgeschätzt. Bei der Bestimmung des Bemessungsniederschlags sind solche Werte bzw. Methoden einzubeziehen, die auf eine Maximierung von Starkniederschlägen zurückgehen bzw. führen. In Österreich können dazu die maximierten Starkniederschläge nach Lorenz und Skoda (2001) herangezogen werden. Im Vergleich dazu sind auch PMP-Werte zu bestimmen, wofür Hinweise in DVWK (1983) und WMO (1985) enthalten sind. Neuere Entwicklungen gehen auch vom Einsatz meteorologischer Modelle zur Berechnung des PMP für das konkrete Gebiet aus, so z.B. die Vorgangsweise im CRUEX-Verfahren (Boillat und Schleiss, 2002) unter Nutzung eines an der EPF Lausanne entwickelten Programm-Codes (Montavan, 1996).

4.4 Bearbeitungsschritte im Abgekürzten Verfahren

Die Bearbeitungen im abgekürzten Verfahren umfassen die Ermittlung der beiden Testgrößen BHQ* und SHQ*. Diese beiden Größen orientieren sich an der inhaltlichen Definition des Bemessungs- bzw. des Sicherheitshochwassers als Richtwerte für das HQ5000 bzw. das PMF. Im gegenständlichen Fall werden sie so gewählt, dass die danach erhaltenen Werte im Vergleich mit einer detaillierten Bearbeitung auf der sicheren Seite liegen und dass sie im Durchschnitt die bisherigen Projektshochwasserwerte so abdecken, dass nach dem neuen Testverfahren etwa 50 Prozent der Werte in Abbildung 1 überschritten und 50 Prozent unterschritten werden.

4.4.1 Ermittlung der Testgröße BHQ*

Das Verfahren beruht auf einem Regionalisierungsansatz der einfachen Form

$$\text{BHQ}^* = c \cdot A^{0,6} \quad (1)$$

in dem A die Einzugsgebietsfläche und c einen Parameter bezeichnet, dessen Wert aus einer Karte am Flächenschwerpunkt des betrachteten Gebiets abgelesen werden kann (Abb. 5, Ausschnitt). Der Parameter deckt die folgenden Faktoren ab: (i) die räumlich variierende Größe der regionalisierten Hochwasserspende Hq_{100} ; (ii) die relative Vergrößerung des Hochwasserabflusses bei Übergang der Wahrscheinlichkeit von $P_{\bar{U}} = 1 \cdot 10^{-2}$ auf $P_{\bar{U}} = 2 \cdot 10^{-4}$; (iii) die mit der regionalen Übertragung verbundene hydrologische Unschärfe, die sich aus Abweichungen gegenüber dem lokalen hydrologischen Verhalten ergibt; (iv) die Einbeziehung eines Sicherheitsfaktors zur An-

passung des Verfahrens an die durch die Projektshochwässer vorgegebene Bestands-situation. Die so entstehenden Schätzwerte entsprechen damit im Durchschnitt etwa dem 3,7-fachen der regionalisierten Hochwasserspende Hq_{100} . Die Irrtumswahr-scheinlichkeit der Überschreitung für die Hq_{5000} -Schätzwerte liegt in der Gesamtbe-trachtung bei 0,5 Prozent und ist damit sehr klein gewählt.

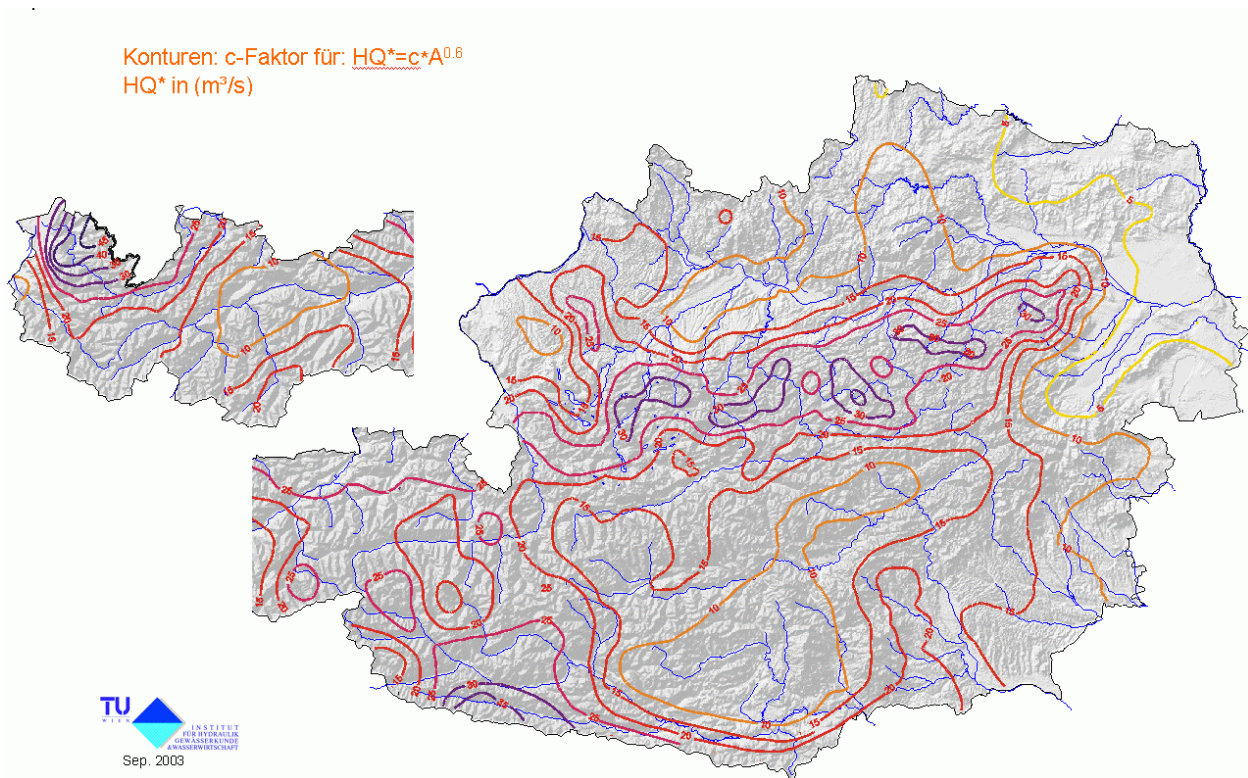


Abb. 5: Karte des Parameters c für das abgekürzte Verfahren.

Zur Abschätzung der Speicherretention wird die Annahme einer idealisierten Zufluss-welle (z.B. in Dreiecksform) empfohlen, deren Scheitelwert gleich dem BHQ^* ist und deren Anstiegszeit in analoger Weise zum Scheitel aus einer Regionalisierung auf Basis der Einzugsgebietsgröße und einer regional differenzierten Richtgröße t_0 gemäß

$$T_A = t_0 \cdot A^{0,35} \quad (2)$$

erhalten wird. Analog zu c ist auch t_0 einer Karte zu entnehmen, die auf Basis umfangreicher Auswertungen von Pegelbeobachtungen entwickelt wurde.

4.4.2 Ermittlung der Testgröße SHQ^*

Die Abschätzung des SHQ^* erfolgt über die Testgröße BHQ^* und einen Faktor a . Für den Faktor a wird ein Wert von $a = 1,3$ vorgegeben, wobei damit dem Umstand Rechnung getragen wird, dass das BHQ^* im Bereich der oberen Grenze des Schätz-wertes liegt. Die Anstiegszeit wird gleich der Anstiegszeit t_A des Bemessungs-hochwassers gewählt.

5. Diskussion

Jedes Konzept zur Ermittlung von Bemessungshochwässern steht unter der Anforderung (a) einerseits dem Sicherheitsbedürfnis zu entsprechen und (b) eine Vorgangsweise zur Berechnung der gesuchten hydrologischen Größen anzubieten, die sich auf Basis der gegebenen Beobachtungen und Datenlage auch realisieren lässt.

In Hinblick auf die Sicherheitsfrage hat jedes Konzept zu berücksichtigen, dass es eine absolute Sicherheit nicht gibt und immer ein Restrisiko verbleibt. Ein diesem Umstand Rechnung tragendes Konzept sollte von einer gesamthaften, umfassenden Risikoanalyse ausgehen. Das jüngst erschienene Buch „Hochwasserrisiken“ von B. Merz (2006) gibt hierzu eine hervorragende Zusammenschau und zwar sowohl in Hinblick auf die mit einer geeigneten Methodik verbundenen Aussagemöglichkeiten als auch in Hinblick auf die Anforderungen, um eine Lösung nach einer solchen Konzeption erarbeiten zu können.

Im Falle der Hochwassersicherheit von Talsperren stellt sich aber auch in ganz besonderer Weise die Frage nach dem tolerierbaren oder akzeptablen Risiko. Dazu ist in Österreich wohl von der Prämisse auszugehen, dass dort, wo Menschenleben betroffen sein könnte, die „größtmögliche“ Sicherheit gegeben sein müsste. In diesem Sinne wäre nachzuweisen, dass die Standsicherheit des Talsperrenbauwerks auch unter maximaler Belastung gegeben sein muss. Dem versucht die hier vorgestellte Konzeption mit dem Nachweis bezüglich des Sicherheitshochwassers unter den dabei gegebenen Vorgaben bezüglich der Randbedingungen aus hydrologischer und wasserbaulicher Sicht nachzukommen. Die auch hier nicht auszuschaltende, aber unbekannte, Rest-Unsicherheit ist – analog etwa zu den Vorgaben in DIN 19700 – durch begleitende Maßnahmen abzusichern.

Der Bemessungsfall – die für die Dimensionierung der Hochwasserentlastungsanlage maßgebende hydrologische Belastung – ist an die Vorgabe einer Wahrscheinlichkeit der Überschreitung geknüpft. Dies entspricht der Praxis in vielen Ländern, wobei je nach Einordnung in Gefährdungstufen Wahrscheinlichkeiten zwischen $p_{\bar{U}} = 1/1000$ bis $1/10000$ und auch noch kleiner, wenn eine größere Zahl von Todesopfern im Versagensfall zu befürchten wäre, vorgegeben werden (z.B. Angaben in Charles et al., 1998; Reißler, 1999; 2001). Aus theoretischer Sicht wird immer wieder – berechtigterweise – gegenüber einer solchen Konzeption geltend gemacht, dass die Ermittlung von Durchflussangaben so geringer Wahrscheinlichkeit sowohl unter methodischem Aspekt als auch aufgrund der unzureichenden Datenbasis zu völlig unzuverlässigen Ergebnissen führen würde (z.B. Schmitz und Seus, 1996; Dittrich et al., 2004). Mit dem hier vorgelegten Lösungsansatz wird versucht, diese Einwände aufzunehmen, indem bei der Herleitung der Schätzwerte für die Bemessungsgrößen besonderes Augenmerk auf das Zustandekommen der Werte gelenkt wird und der Einfluss der mit den verschiedenen Methoden verbundenen Schwächen durch Einbeziehung von zusätzlichen Informationen über die Prozesse zu reduzieren versucht wird. Die Hypothese ist dabei, dass durch Übergang von der bisher praktizierten, weitgehend „daten-getriebenen“ Methodik zu einer „prozess-bezogenen“, die Kenntnisse und das Verständnis über die Prozesse einbeziehenden Methodik eine Reduktion der

„Unzuverlässigkeit“ der Schätzungen erreicht werden kann. Den Hintergrund dafür bildet – nicht zuletzt in der Folge der großen Ereignisse der letzten 20 Jahre – das Entstehen einer Fülle von Information über Extremereignisse und eine Weiterentwicklung in den Methoden, die verstärkt die Schwächen der traditionellen Bearbeitung aufgegriffen hat. Ansatzpunkte zur besseren Absicherung der Ergebnisse der hydrologischen Bearbeitungen bilden in diesem Sinne die Einbeziehung von historischen Ereignissen, die bessere Abstimmung der NA-Modellierung auf Extremabflusssituationen und die Nutzung von Information über die Entstehungsbedingungen von Extremereignissen zur Definition von Szenarien. Beiträge dazu sind auch dem vorliegenden Band zu entnehmen.

6. Literatur

Boillat, J.-L., Schleiss, A. (2002) Determination de la crue extreme pour les retenues alpines par une approche PMP-PMF. *wasser, energie, luft – eau, energie, air* 94 (H.3/4), 107-116.

Chbab, E.H., Buiteveld, H., Diermase, F. (2006) Estimating exceedance frequencies of extreme river discharges using statistical methods and physically based approach. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 58 (H.3-4), 35-43.

Charles, J.A., Tedd, P., Skinner, H.D. (1998) The role of risk analysis in the safety management of embankment dams. In Tedd, P. (ed.): *The Prospect for Reservoirs in the 21st Century. Proc. 10th Conference BDS, Bangor 1998*. Thomas Telford, London. 1-12.

Dittrich, I., Münch, A., Wahren, A., Birke, H. (2004): Extreme Stauanlagenzuflüsse – Lehren aus dem Hochwasser 2002 in Sachsen. In Horlacher, H.-B., Martin, B. (Hg.): *Risiken bei der Bemessung und Bewirtschaftung von Fließgewässern und Stauanlagen. Dresdener Wasserbauliche Mitteilungen H.27, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Technische Universität Dresden, 2004, 47-62.*

DVWK (1983) Beiträge zur Wahl des Bemessungshochwassers und zum „vermutlich größten Niederschlag“. *DVWK Schriften* 62, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. Bonn, Verlag Paul Parey, Hamburg.

DVWK (1999) Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. *DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft* 251/1999. ATV-DVWK, Hennef, D.

Godina, R. (1998) Berechnung des Bemessungshochwassers. *Kursunterlagen: ÖWAV-TU Wien – Kurs Berechnung des Bemessungshochwassers. Technische Universität Wien, 1998.*

Gutknecht, D., Blöschl, G., Reszler, Ch., Heindl, H.(2006) Ein „Mehr-Standbeine“-Ansatz zur Ermittlung von Bemessungshochwässern kleiner Auftretenswahrscheinlichkeit. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 58 (H.3-4), 44-50.

Hoeg, K.(1996):Performance evaluation, safety assessment and risk analysis for dams. *International Journal on Hydropower and Dams* 3 (no.6), 51-58.

Kleeberg, H.-B., Schumann, A.H. (2001) Zur Ableitung von Hochwasserabflüssen geringer Überschreitungswahrscheinlichkeit. *Wasserwirtschaft* 91 (H.12), 608

- Klein, B., Schumann, A., Pahlow, M. (2006) Extreme Hochwasserereignisse an deutschen Talsperren (Extreme floods in German reservoirs). *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 50 (H.4), 162-168.
- Lorenz, P., Skoda, G. (2000) Bemessungsniederschläge kurzer Dauerstufen ($D < 12$ Stunden) mit inadäquaten Daten. *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich* Nr. 80, 1-24.
- Merz, B. (2006) Hochwasserrisiken. Grenzen und Möglichkeiten der Risikoabschätzung. E.Schweizerbarth'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart, 2006. 334 S..
- Montavan, C. (1996) Estimation des précipitations orographiques maximales probables par modélisation numérique. *Communication 5 Laboratoire de Constructions hydrauliques, Ecole Polytechnique de Lausanne*, 1996, 45-63.
- 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. In Gottschalk, L. et al. (eds.): *Hydrological Extremes: Understanding, Predicting, Mitigating*. IAHS Publ. 255, 269-272.
- Rißler, P.(1998) Risk assessment für Talsperren. In Köngeter, J. (Hg.): *Wasserwirtschaftliche Systeme – Konzepte, Konflikte, Kompromisse*. 28.IWASA Aachen 1998. Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft RWTH Aachen, *Mitteilungen* 115, 310-337
- Rißler, P.(2001) Die Hochwasserbemessung als Teil eines in sich schlüssigen Sicherheitskonzepts für Talsperren. *KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall*(11), 1689-1699.
- Schmitz, G.H., Seus, G.J. (1996) Ermittlung des Bemessungshochwassers auf der Basis hydrologischer und projektbezogener Daten. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* 45 (H.2), 79-84.
- Schumann, A. (2004) Das hydrologische Risiko bei der Bemessung und der Bewirtschaftungsplanung von Talsperren. In Horlacher, H.-B., Martin, B. (Hg.): *Risiken bei der Bemessung und Bewirtschaftung von Fließgewässern und Stauanlagen*. *Dresdener Wasserbauliche Mitteilungen* H.27, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Technische Universität Dresden, 2004, 33-46.
- Vischer, D. (1980) Das höchstmögliche Hochwasser und der empirische Grenzabfluss. *Schweizer Ingenieur und Architekt* 98 (H.40/80), 981-984.
- WMO(1986) Manual for estimation of probable maximum precipitation. World Meteorological Organisation. *Operational Hydrology Report No.1 WMO-No.332*, Geneva, 1986. 269 pp..
- Wundt, W. (1950) Die größten Abflußpenden in Abhängigkeit von der Fläche. *Wasserwirtschaft* 55 (H.2), 59-64.
- Wundt, W. (1965) Grenzwerte der Hochwasserspende und der mittleren Abflußspende in Abhängigkeit von der Fläche. *Wasserwirtschaft* 55 (H.1), 1-5

Anschrift des Verfassers:

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Dr.h.c. Dieter Gutknecht
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien
Email: gutknecht@hydro.tuwien.ac.at

RISIKOBASIERTE VERFAHREN ZUR HOCHWASSERBEMESSUNG VON STAUANLAGEN

– ÜBERSICHT ZUM LAUFENDEN RIMAX-PROJEKT –

Günter Meon, Markus Anhalt, Jürgen Ihringer, Johannes Höfer

1. Einleitung

Die Sicherheit respektive die Versagenswahrscheinlichkeit wasserwirtschaftlicher Anlagen im Hochwasserfall ist sowohl in der Fachöffentlichkeit als auch in den Medien ein seit Jahren aktuelles, zum Teil kontrovers diskutiertes Thema. Als "Versagen" wird ein unplanmäßiges und unkontrolliertes Überströmen des Absperrbauwerkes einer Stauanlage – Hochwasserrückhaltebecken, Talsperre, Staustufe – infolge extremer Hochwasserzuflüsse verstanden. Dieser Vorgang wird auch als hydrologisches Versagen bezeichnet. Wenn aus dem Überströmen ein Bruch mit entsprechender Flutwelle resultiert, ergeben sich in einem dichtbesiedelten Land wie Deutschland oder Österreich gravierende Folgen für die An- und Unterlieger. Die Verluste an Menschenleben und die ökonomischen Schäden waren bei weltweit aufgetretenem hydrologischen Versagen wasserwirtschaftlicher Anlagen mit Bruchfolgen in der Vergangenheit meist deutlich höher als bei einem "natürlichen" Katastrophenhochwasser in vergleichbaren Flussgebieten. Das hydrologische Versagen gilt als Hauptversagensart bei Stauanlagen.

Die deutsche DIN 19700 (2004) fordert zusätzlich zur vorschriftsmäßig durchgeführten "traditionellen", das heißt auf vorgegebenen Sicherheitsgraden basierenden Bemessung und Sicherheitsnachweisführung, auch erstmalig den Blick über die Bemessungs- und Nachweisgrenzen hinaus. So heißt es z.B. in Teil 10, Abschnitt 11: "Die verbleibenden Risiken für die Stauanlagensicherheit infolge des Überschreitens des Bemessungshochwasserzuflusses BHQ_2 ... sind zu bewerten und in Abhängigkeit von den lokalen Bedingungen durch flankierende konstruktive, bewirtschaftungsseitige und/oder organisatorische Maßnahmen ausreichend zu vermindern." In der DIN 19700 sind keine speziellen Methoden vorgegeben, wie die Bemessungshochwässer bis zum $HQ_{10.000}$ oder gar das PMF als "vermutlich höchstes Hochwasser" zu ermitteln sind. Der Begriff "Risiko" wurde nicht definiert, und es fehlen Angaben, wie im Detail die Risikobetrachtungen durchzuführen sind.

Im vorgestellten Vorhaben des BMBF-Förderschwerpunktes "RIMAX" wird zum einen die Umsetzung der neuen DIN 19700 mit zu entwickelnden wissenschaftlich basierten Verfahren für die Ermittlung extremer Abflüsse und für die Risikobetrachtungen unterstützt. Darüber hinaus soll eine Weiterentwicklung der traditionellen Bemessungsmethodik mit vorgegebenen Sicherheitsgraden in Richtung praxisgerechte "risikobasierte Bemessung" vorangebracht werden. Hierfür wird die hydrologische Bemessung einer geplanten Anlage oder die Sicherheitsüberprüfung einer bestehenden Anlage nicht nur als eine abgegrenzte Dimensionierungsaufgabe (traditionell), sondern mit Einbezug von Versagenswahrscheinlichkeiten der Anlage und von quantifizierten

Versagensfolgen (Schäden) durchgeführt. Eine solche risikobasierte Bemessung der Stauanlage benötigt ebenfalls synthetische Hochwasserzuflüsse hoher Jährlichkeiten.

Das Gesamtziel des Forschungsvorhabens ist somit die Erarbeitung eines Instrumentariums zur risikobasierten hydrologischen Bemessung geplanter und zur Sicherheitsbeurteilung bestehender Stauanlagen. Das Gesamtverfahren wird bis zur Risikobewertung modelltechnisch entwickelt und anhand von Beispielen illustriert werden.

2. Hochwasserrisikomanagement einer Stauanlage

Eine risikobasierte Bemessung oder Sicherheitsbeurteilung einer Stauanlage ist kein neues Verfahren, sondern wird in mehreren Ländern – insbesondere im anglophilen Raum – seit mehreren Dekaden konzeptionell diskutiert und zunehmend in der Bemessungspraxis umgesetzt, meistens jedoch nur fragmentarisch.

In Abbildung 1 ist in Anlehnung an Meon (1989), Reißler (1998) und Harms et al. (2004) der Ablauf einer risikobasierten Bemessung einer Stauanlage über die Stufen

- “Risikoanalyse“
- “Risikobewertung“

selbsterklärend dargestellt. Werden die Umsetzung von risikomindernden Maßnahmen in der Planung bzw. bei der Umgestaltung einer bestehenden Anlage sowie Monitoring-, Kontroll- und Kommunikationsaktivitäten für den Echtbetrieb miteinbezogen, spricht man vom “Risikomanagement der Stauanlage“.

Für die Integration in das Hochwasserrisikomanagement des betrachteten Flussgebietes werden Schnittstellen für die Interaktion identifiziert und bewertet, zum Beispiel der Einfluss der Hochwasservorhersage des Flussgebietes auf die Risikokenngrößen der Stauanlage oder der Abgaben der Stauanlage auf die Überflutung nach unterstrom. In einem umfassenden Hochwasserrisikomanagement eines Flussgebietes sind entsprechend Tabelle 1 die Ermittlung und die Handhabung des Risikos für die gesamte Spannweite schadensverursachender Hochwässer - natürliche und/ oder durch Bauwerksversagen beeinflusste - integrativ zu behandeln.

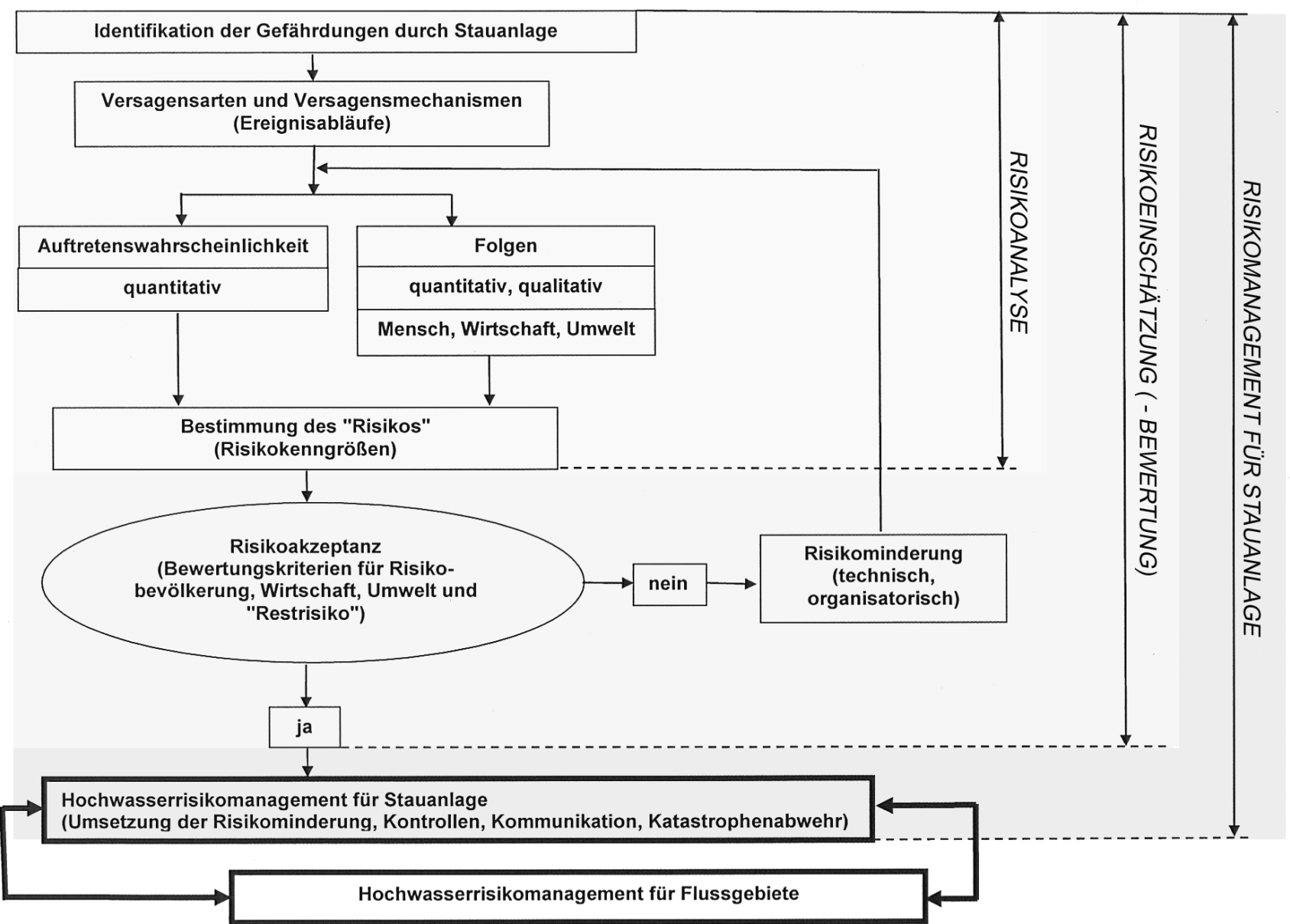


Abb. 1: Ablaufdiagramm für das Hochwasserrisikomanagement einer Stauanlage, in Anlehnung an Harms et al. (2004), Ribler (1998), Meon (1989).

Tab. 1: Bestandteile eines umfassenden Hochwasserrisikomanagements für ein Flussgebiet mit Einbindung der risikobasierten Bemessung von Stauanlagen

Hochwasser-Risikomanagement für Flussgebiete			
Ermittlung des Hochwasser-Risikos		Handhabung des Hochwasser-Risikos	
Bestandsaufnahme und Ursachenanalyse	Risikoanalyse und –Bewertung⁽¹⁾	Risikominderung	Weitergehende Vorsorge
Hydrometeorologische Bestandsaufnahme	Hochwasseranalyse und Auftretenswahrscheinlichkeit für schadensbringende Ereignisse	Natürlicher Wasserrückhalt (auf der Fläche, in Gewässern und Aue)	Flächenvorsorge (z.B. gesetzliche Überschwemmungsgebiete)
Ursachenanalyse zur HW-Entstehung	Wellenablaufberechnungen, Überflutungsräume, Schadensabschätzungen	Technischer HW-Schutz (HW-Rückhaltungen, lokale Maßnahmen, u.a.)	Verhaltensvorsorge (Hochwasservorhersage, Warnsysteme, Alarmpläne, u.a.)
Identifikation bestehender und zukünftiger Gefährdungen	Risikokenngrößen: Auftretenswahrscheinlichkeiten, kombiniert mit Schäden, liefern Schadenspotential und Gefährdungspotential für Menschen	Betrieb von Stauanlagen im Hochwasserfall unter Nutzung der Erkenntnisse aus der risikobasierten hydrologischen Bemessung	Bauvorsorge (hochwasserangepasstes Bauen, Leben und Wohnen)
	Risikobewertung einschl. Kosten-Nutzen-Betrachtungen	Katastrophenabwehr bei auftretendem Hochwasser	Risikovorsorge (Hochwasserversicherung)

⁽¹⁾ die Risikoanalyse und –bewertung wird für "natürliche" Hochwässer und für Hochwässer aus hydrologischem Versagen von Stauanlagen und flussbegleitenden Deichen durchgeführt.

3. Gesamtverfahren des Projektes

Das Gesamtverfahren ermöglicht es, die Bemessungsverfahren gemäß DIN 19700 durch eine Risikobewertung zu ergänzen, dass eine konsistente und transparente hydrologische Bemessung für geplante Stauanlagen bzw. eine Sicherheitsbewertung von bestehenden Anlagen gewährleistet ist. Das Verfahren ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Es enthält die folgenden 6 Module:

- Extreme synthetische Hochwasserganglinien
- Überströmwahrscheinlichkeiten
- Bruchwahrscheinlichkeit, Bruchablauf und Bruchwelle
- Wellenablauf und Überflutungsgrenzen
- Versagensfolgen (Menschen, Wirtschaft, Umwelt)
- Risikokenngrößen, Risikobewertung

Das Modul 1 wird von der Universität Karlsruhe erarbeitet. Die Module 2 bis 6 und das Gesamtverfahren werden von der Technischen Universität Braunschweig, die das Verbundvorhaben koordiniert, erstellt.

Es werden größtenteils vorhandene Modelle (Software) und Verfahren übernommen und, wo notwendig, weiterentwickelt. Das Gesamtverfahren wird exemplarisch auf zwei reale Flussgebiete mit Stauanlagen angewandt. Die Erarbeitung wird fachlich von den hochschulexternen Partnern "Ruhrverband" und "Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen" begleitet, die auch Projektgebiete und Daten zur Verfügung stellen. Im Vorhaben werden die Daten- und Modellunsicherheiten im Verfahrensablauf durchgehend abgeschätzt und der Einfluss der Unsicherheiten auf die Risikobewertung quantifiziert. Aus den Anwendungen wird eine Handlungsempfehlung abgeleitet. Das Vorhaben wird voraussichtlich im Frühjahr 2008 abgeschlossen werden.

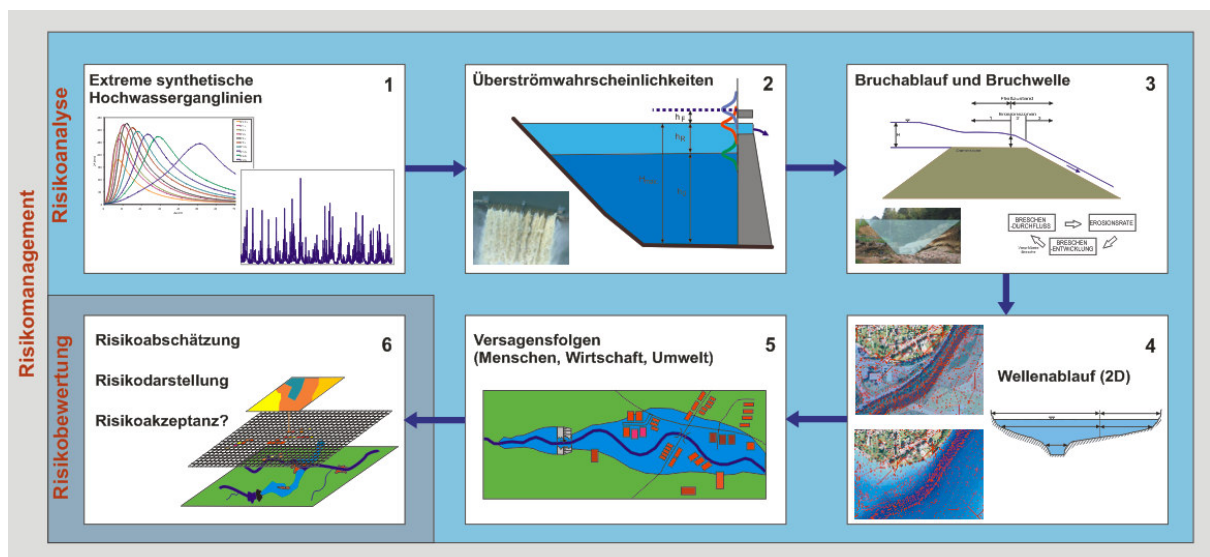


Abb. 2: Module des Vorhabens zur Durchführung einer Risikoanalyse und -bewertung für Stauanlagen

Aus den bislang vorliegenden Arbeiten zum Vorhaben werden nachfolgend die Module im Überblick beschrieben.

4. Ermittlung und Bereitstellung von extremen Bemessungsabflüssen

Im Rahmen des Moduls 1 wird ein Verfahren erarbeitet, mit dem sich extreme Abflussganglinien ermitteln lassen, die für das Gesamtverfahren zur risikobasierten hydrologischen Bemessung und Sicherheitsbeurteilung von Stauanlagen benötigt werden. Hierbei werden zwei Ansätze verfolgt, die abschließend zusammen geführt werden sollen. Es handelt sich um einen deterministischen und einen probabilistischen Ansatz.

Beim deterministischen Ansatz kommt ein am ehemaligen Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe (TH) entwickeltes und in der Praxis weit verbreitetes Flussgebietsmodell (FGM) zum Einsatz (Ihringer, 2003). Das zu betrachtende Einzugsgebiet kann, je nach Fragestellung, in nahezu beliebig viele Teileinzugsgebiete, für die jeweils der Niederschlags-Abfluss-Prozess getrennt erfasst und die Abflusskennwerte ermittelt werden, untergliedert werden. Der Abfluss aus ländlichen (Landknoten) und städtischen Teilgebieten (Stadtknoten) wird getrennt erfasst. Die Prozesse der Abflussbildung und -konzentration für die ländlichen Teilflächen können mit verschiedenen Ansätzen umgesetzt werden. Bewährt haben sich hierfür insbesondere die Ansätze nach Lutz (1984). Bei diesen Ansätzen werden Abflussbeiwert und Anstiegszeit der Einheitsganglinie anhand verschiedener Gebiets- und Ereigniskenngrößen abgeleitet. Für die städtischen Teilflächen wird der Abflussbeiwert, der dem Versiegelungsgrad entspricht, direkt angegeben. Abflusskonzentration und Kanalisationsabfluss zur Regentlastung werden mit der linearen Speicherkaskade abgebildet. Bauwerke der Stadtentwässerung wie Regenüberlaufbecken können berücksichtigt werden. Entlang von Gewässerstrecken kann der Einfluss von Hochwasserrückhaltebecken und die Wellenverformung infolge Fließzeit und Retention berücksichtigt werden. Für die Modellierung der Wellenverformung hat sich das Kalinin-Miljukov-Verfahren bewährt. In Bereichen mit großem Gefälle, zumeist im Oberlauf der Gewässer, empfiehlt sich der Ansatz einer reinen Translation.

Dieses FGM wird exemplarisch für die im Einzugsgebiet der Ruhr gelegenen Einzugsgebiete von Möhne- ($A_E \approx 430 \text{ km}^2$) und Henne-Talsperre (mit Beileitungssystem $A_E \approx 100 \text{ km}^2$) angewendet.

Da für die Flussgebietsmodellierung extreme Niederschläge zur Ermittlung von extremen Abflüssen benötigt werden, erfolgt auf verschiedene Arten eine Extrapolation der Niederschläge bis zur Jährlichkeit von 100 000 Jahren. Insbesondere die Abflüsse, die mit extrapolierten Niederschlägen aus KOSTRA-DWD 2000 (ITWH, 2005) ermittelt wurden, fügen sich gut in die Pegelstatistiken ein (Abbildung 3).

Neben den Abflussscheitelwerten wurden zusätzlich noch die Abflussfüllen, meist die entscheidende Belastungsgröße für Stauanlagen, betrachtet, die sich bei Berücksichtigung der verschiedenen Niederschlagsbelastungen ergeben. Aus den Abflussganglinien, die für verschiedene Niederschlagsdauern und Jährlichkeiten erzeugt wurden (Abbildung 4), lässt sich bezüglich Abflussscheitel und -fülle eine zweidimensionale Wahrscheinlichkeitsverteilung ableiten. Diese dient als Eingang für das Modul "Überströmwahrscheinlichkeiten".

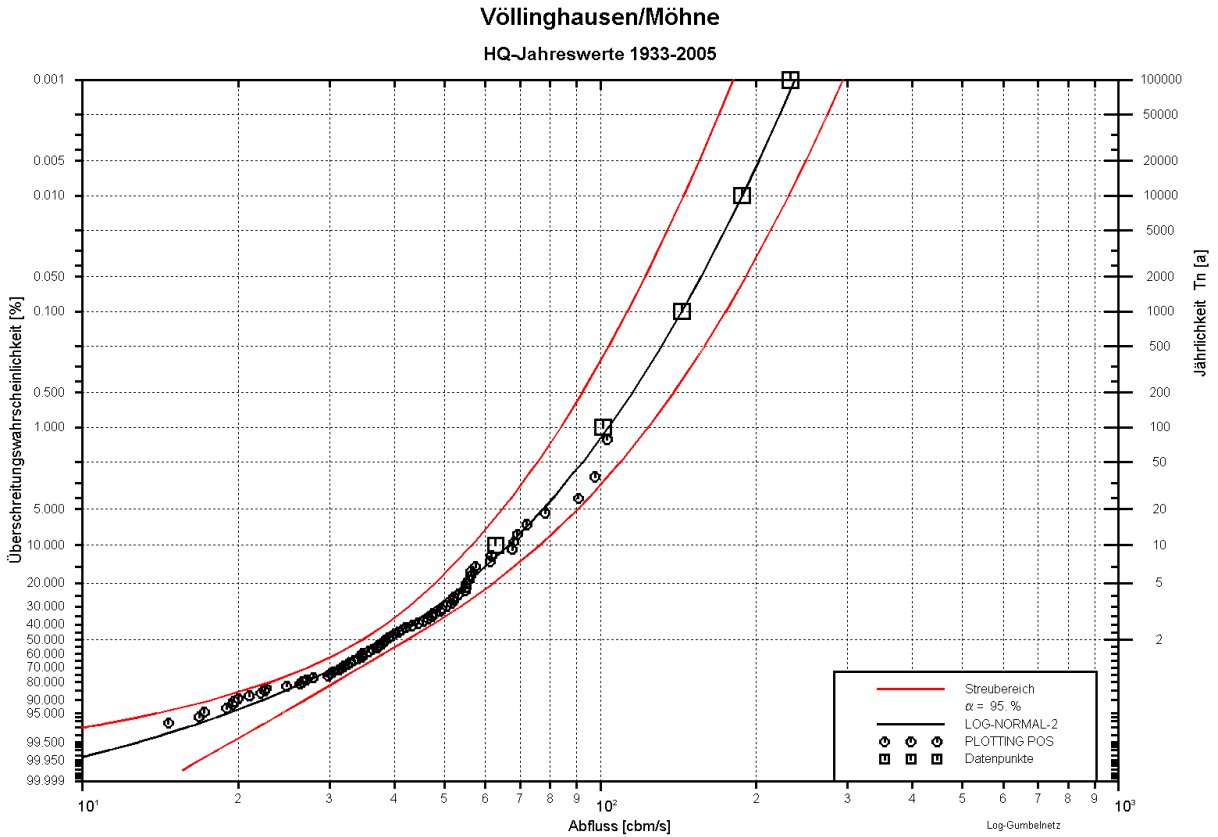


Abb. 3: Scheitelwerte des FGM (quadratische Symbole) im Vergleich zur Statistik am Pegel Völlinghausen/Möhne, der den Hauptzufluss zur Möhne-Talsperre erfasst.

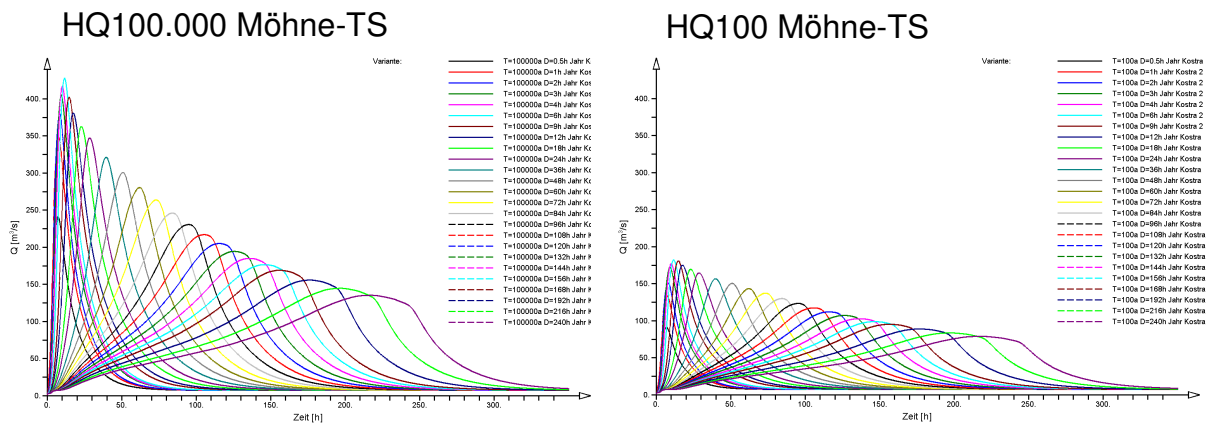


Abb. 4: Zuflussganglinien verschiedener Dauerstufen des Niederschlags in die Möhne-Talsperre.

Beim probabilistischen Ansatz erfolgt mit dem TREIBER-Modell (1975) eine Generierung von synthetischen Abflusszeitreihen. Mit den generierten Abflusszeitreihen sollen Langzeitsimulationen über mehrere 100.000 Jahre durchgeführt werden, um die Überströmwahrscheinlichkeiten der Talsperre zu ermitteln. Dieses Verfahren eignet sich im Gegensatz zum FGM eher für größere Einzugsgebiete, da

Tageswerte des Abflusses generiert werden. In Abbildung 5 ist das Grundkonzept des TREIBER-Modells dargestellt. An die gemessene Abflusszeitreihe werden iterativ eine Impulszeitreihe und eine variable, abflussabhängige Systemfunktion derart angepasst, dass die Impulszeitreihe mit der Systemfunktion möglichst gut zur gemessenen Abflusszeitreihe gefaltet werden kann. Diese Impulse stellen eine Art fiktiven Niederschlag dar. Anschließend wird die Impulszeitreihe statistisch analysiert. Es werden Parameter abgeleitet, um synthetische Impulszeitreihen mit den gleichen statistischen Eigenschaften zu generieren. Die Impulszeitreihen werden dann mit der variablen Systemfunktion zur generierten Abflusszeitreihe transformiert. Auf diese Weise lassen sich synthetische Abflusszeitreihen nahezu unbegrenzter Länge generieren. Die generierten Zeitreihen enthalten „extreme“ Hochwasserereignisse, die in dem begrenzten Beobachtungszeitraum möglicherweise noch nicht aufgetreten sind, jedoch aufgrund ihrer statistischen Eigenschaften durchaus auftreten könnten.

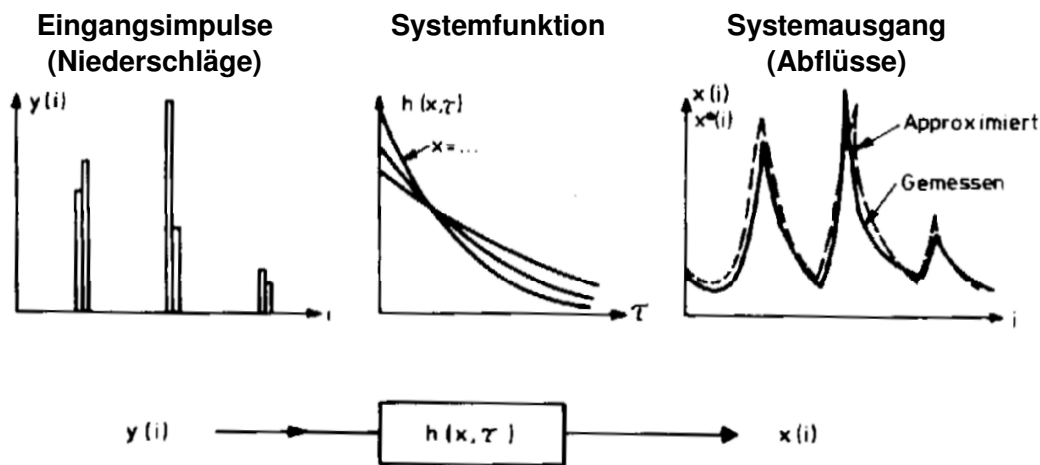


Abb. 5: Grundkonzept des TREIBER-Modells (Treiber, 1975).

Das Generierungsmodell wurde für die Möhne-Talsperre kalibriert. Danach wurden Abflusszeitreihen von insgesamt über 1.000.000 Jahren Länge generiert. Die Güte der generierten Zeitreihen konnte anhand einer Vielzahl statistischer Kriterien (Jahres- und Monatsscheitelwerte, Dauerlinie, etc.) nachgewiesen werden. Exemplarisch sind in Abbildung 6 die Jahresscheitelwerte der 46 gemessenen Jahre den generierten Jahresscheitelwerten als Plotting Positions im Wahrscheinlichkeitsnetz gegenübergestellt.

Im nächsten Arbeitsschritt sollen die deterministische und stochastische Betrachtungsweise zusammengeführt werden, um auch kleinere Einzugsgebiete betrachten zu können. Diese Zusammenführung kann eventuell über eine Volumenbetrachtung erfolgen.

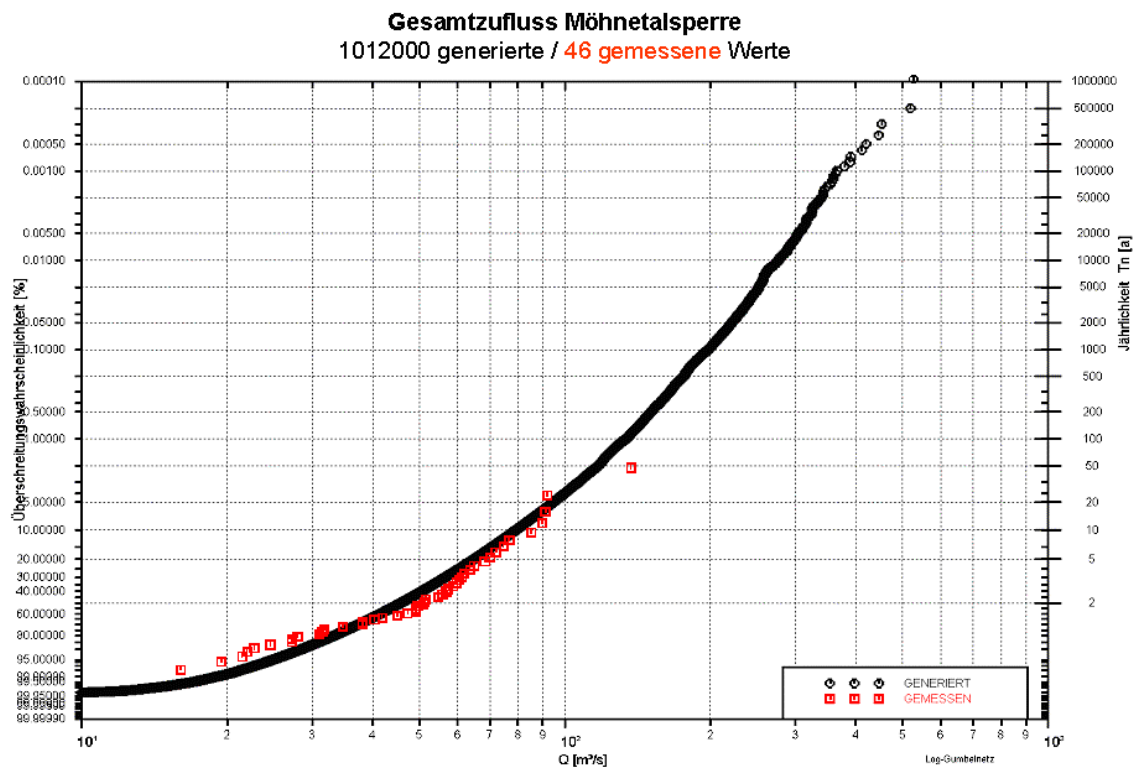


Abb. 6: Vergleich von gemessenen (quadratische Symbole) und generierten Jahresscheitelwerten (runde Symbole) an der Möhne-Talsperre.

5. Ermittlung der Überströmwahrscheinlichkeit

Im Vorhaben sind grundsätzlich drei Arten des hydrologischen Versagens zu unterscheiden. Zuerst ist der Fall zu betrachten, der zur Hochwassergefährdung der Unterlieger durch hohe Abflüsse über die Hochwasserentlastung führt. Bei der zweiten Versagensart kommt es zum Überströmen des Absperrbauwerkes ohne Bruchfolgen. Die dritte Versagensart stellt Überströmen mit Bruch des Absperrbauwerkes dar.

Die Modellierung der Überströmwahrscheinlichkeiten (Fall 2 und Fall 3) ist mit verschiedenen Ansätzen durchführbar. Ein einfacher Ansatz ist die analytische Lösung, bei der sich die Überströmwahrscheinlichkeit P_V aus direkter Integration der Wahrscheinlichkeitsdichten der Zufallsvariablen Belastung s (Zuflussvolumen) und Belastbarkeit r (zur Aufnahme der Welle aktuell verfügbarer Stauraum) nach folgender Grundgleichung berechnen lässt (Meon und Plate, 1989):

$$P_V = \iint f_{r,s}(r,s) \cdot dr \cdot ds \tag{1}$$

Pohl (1997) entwickelte ein Verfahren, das die Belastung und Belastbarkeit einer Stauanlage detaillierter als Meon und Plate (1989) berücksichtigt. Anstelle der analytischen Lösung wird eine Monte-Carlo-Simulation von Belastungen (parametrisierte Jahreshochwasserwelle, Windereignis) und Belastbarkeiten (Anfangswasserstand, Öffnung der Betriebsauslässe) mit einer Retentionsberechnung des Wellenablaufens im Speicher kombiniert. Der erhaltene maximale Wasserstand wird mit der Kronenhöhe verglichen. Ein Überschreiten gilt als Versagen. Die Über-

strömungswahrscheinlichkeit pro Jahr ergibt sich aus dem Verhältnis der Anzahl der Versagensfälle zum gesamten Simulationszeitraum. Für das Verfahren sind aus historischen Daten Wahrscheinlichkeitsdichten für die Kenngrößen des zufließenden Jahreshochwassers, die Öffnung der Betriebsauslässe, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Anfangswasserstand beim Eintreffen des Hochwassers vorab aufzustellen. Das Verfahren birgt eine gewisse Unsicherheit in der Generierung der Zuflusswellen, die aus den gezogenen Werten vorliegender Verteilungen des Jahreszuflussscheitels und der Wellenfülle zusammengesetzt werden. Das Verfahren wurde von Hable (2001) verfeinert.

Neben den genannten Methoden sind auch Verfahren einsetzbar, mit denen der Betrieb der Stauanlage über eine Langzeitsimulation nachgebildet werden kann, um dann aus der Anzahl der aufgetretenen Versagensfälle im Simulationszeitraum die Überströmungswahrscheinlichkeit abzuleiten. Dieses Verfahren wird derzeit im Projekt favorisiert. Hierzu werden anstelle der generierten Jahreshochwässer im Pohl-Verfahren die generierten Zeitreihen des Zuflusses in die Talsperre auf Tagesbasis mittels des TREIBER-Modells als Input verwendet und mit probabilistisch ermittelten Anfangswasserständen und Wellenauflaufhöhen infolge Wind kombiniert.

6. Modellierung der Breschenbildung und der Bruchwelle

Im Projekt werden zwei Grundtypen von Absperrbauwerken betrachtet: Staumauern und Staudämme. Staumauerkronen sind i.A. gegen einen Breschenbruch infolge Überströmung resistent. Bei Staumauern gilt es eher, die Wirkung des Überstaus auf die allgemeine Standsicherheit des Bauwerks in Betracht zu ziehen. Bei Staudämmen und Hochwasserrückhaltebecken aus Schüttmaterial, die unplanmäßig überströmt werden, besteht schon nach kurzen Überströmdauern die große Gefahr einer rückwärtsschreitenden Erosion, ausgehend von der luftseitigen Dammböschung. Daraus kann sich eine Anfangsbresche ausbilden und den Dambruch initiieren. Aus Versagensaufzeichnungen und Modellversuchen zur Überströmung wird in Anlehnung an Meon (1989) angestrebt, eine (konditionelle) Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Zustandekommen eines Dambruches in Abhängigkeit von der Dauer und Höhe der Überströmung zu entwickeln. Hierzu werden im Vorhaben die derzeit aktuellsten verfügbaren Daten ausgewertet.

Das Versagen durch Überströmen der Dammkrone mit Bruchfolgen hat bei Dämmen, die sachgerecht nach den gängigen Bemessungsvorschriften bemessen sind, eine äußerst geringe Wahrscheinlichkeit, ist aber bei der vorliegenden Fragestellung als mögliche Extremsituation von Bedeutung. Auch ist der Möglichkeit Rechnung zu tragen, dass z.B. Teile der Hochwasserentlastung verklaut sein können, was die Wahrscheinlichkeit eines Versagens erhöht. Zur Simulation eines Dambruches infolge Überströmens wurden mehrere in der Ingenieurpraxis und Wissenschaft vorhandene Modelle betrachtet. Innerhalb des Vorhabens wird auch ein eigenes Bruchmodell entwickelt, welches auf dem Modell von Meon (1989) aufbaut (siehe Abbildung 7). Es handelt sich um ein parametrisches Modell, das stochastische Ansätze zur Bestimmung der Anfangsbresche und des Dammmaterials beinhaltet. Die

Bruchwellen sind mit dem Modell auch in ihren Zufallseigenschaften und Unsicherheiten beschreibbar.

Neben dem o.a. Bruchmodell werden auch Methoden zur schnellen Abschätzung von Dammbrechwellen auf Eignung im Vorhaben geprüft (DEFRA, 2002).

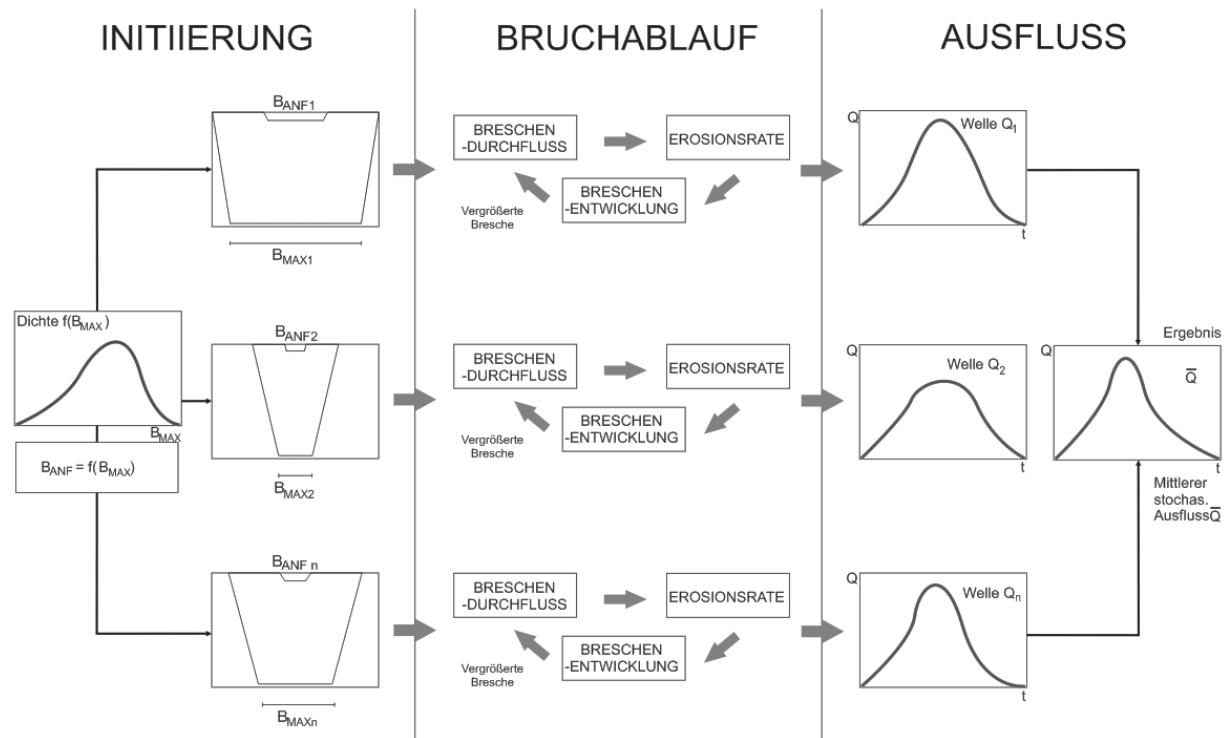


Abb. 7: Bruchmodell mit stochastischer Ausflussganglinie in Anlehnung an Meon (1989): für eine "theoretisch erreichbare Endbreschenform" aus einer Monte-Carlo-Simulation wird die Initialbresche vorgegeben. Daraus werden der Ausfluss und die Breschenentwicklung mittels physikalischer Ansätze berechnet. Aus zahlreichen simulierten Ausflüssen wird eine mittlere stochastische Ausflussganglinie abgeleitet.

7. Modellierung der Überflutung

Das Ablauen der Bruchwelle nach unterstrom lässt sich mittels eindimensionaler oder zweidimensionaler hydrodynamischer Modelle auf der Basis der de Saint-Venant-Gleichungen beschreiben. Eine Zusammenstellung verschiedener Modelle findet sich zum Beispiel im ICOLD-Bulletin 111 (1998).

Im Vorhaben kommt das zweidimensionale (2D) Modell MeadFlow für die hydrodynamische Simulation des Wellenablaufes zum Einsatz. MeadFlow ist ein Finite-Elemente-Modell. Es hat sich wegen seiner sehr kurzen Rechenzeiten, seiner Aussagekraft und seiner Stabilität für die Berechnung von Wasserspiegellagen und Überflutungsräumen auch in komplexen Flusslandschaften bewährt (Leismann und Meon, 2002).

Zur Bestimmung der Versagensfolgen werden die ermittelten hydrodynamischen Kenngrößen der Berechnungsknoten wie Fließtiefe, Fließgeschwindigkeit, Produkt aus

Fließtiefe und Fließgeschwindigkeit an das Modul Versagensfolgen übergeben. In Abbildung 8 sind Ergebnisse der Überflutungsmodellierung unterhalb der Möhnetalsperre für ein Bruchzenario mit einem maximalen Scheitelabfluss von $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ gezeigt.



Abb. 8: Überflutungshöhen und Strömungsvektoren, Bereich Niederense für Szenario $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Möhnetalsperre) aus 2D Modell MeadFlow

8. Ermittlung der Versagensfolgen

Die Ermittlung der Versagensfolgen ist der abschließende Schritt innerhalb der Risikoanalyse. Es wird grundsätzlich zwischen direkten Vermögensschäden, indirekten Vermögensschäden und nicht monetär bewertbaren Schäden unterschieden. Als direkte Vermögensschäden werden die Schäden an Gebäuden, Inventar, Hausrat, Infrastruktur, Gewässern, u.a. bezeichnet. Ökologische Schäden, sozioökonomische Schäden, physische und psychische Beeinträchtigungen von Personen können kaum monetär erfasst werden.

Im Vorhaben erfolgt neben der Ermittlung der direkten Vermögensschäden eine Abschätzung der gefährdeten und mit dem Verlust des Lebens bedrohten Personen. Eine Quantifizierung der gefährdeten Personen und potentiellen Todesfälle ist wichtig, da die Risikoakzeptanz im Wesentlichen hierauf ausgerichtet ist.

Nach einer ausführlichen Analyse der heutigen Möglichkeiten zur Schadensabschätzung (Buck, 2006) wird im Vorhaben mit Hilfe von geographischen Informationssystemen ein Werkzeug für die Schadensabschätzung des Gesamtverfahrens entworfen und auf die Beispielgebiete angewandt. Die eingesetzten Schadensfunktionen basieren auf vorhandenen Auswertungen, z.B. der HOWAS-Datenbank. Die Funktionen werden durch eigene Auswertungen von Schadensdaten des Elbehochwassers 2002 für Bereiche ergänzt, für die bislang noch keine Funktionen verfügbar waren, zum Beispiel für Brückenschäden (Abbildung 9).

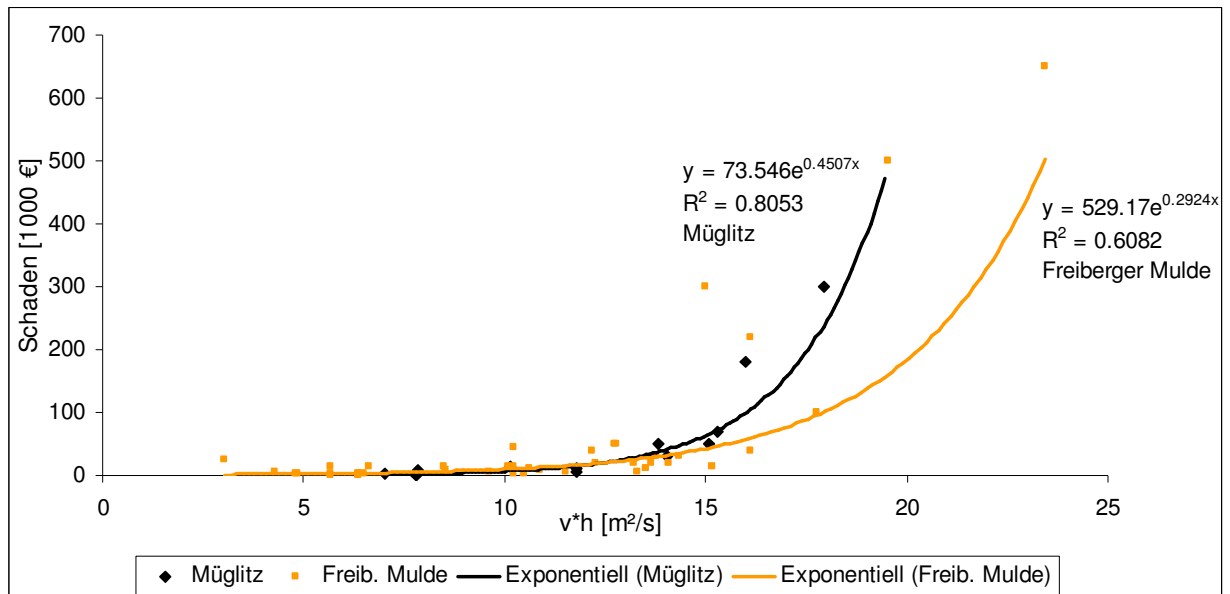


Abb. 9: Schadensauswertung für Brücken aus dem Hochwasser 2002 in Sachsen. Die Daten stammen von der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen.

9. Risikokenngrößen und Risikobewertung

In Anlehnung an nationale und internationale Vorgehensweisen im Zusammenhang mit wasserbaulichen Anlagen und anderen technischen Einrichtungen wird das Risiko als Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadens und dem daraus resultierenden Schaden ermittelt. Durch Integration über die gesamte Bandbreite aller möglichen Schadensereignisse bezüglich Auftretenswahrscheinlichkeiten und dazugehörigen Schäden der betrachteten Versagensart im Flussgebiet ergibt sich das jährliche Versagensrisiko (risk costs) oder Schadenspotential in der Einheit [€/Jahr].

Neben dem Risiko gelten als weitere Risikokenngrößen unter anderem die Versagenswahrscheinlichkeiten, die quantifizierbaren Schäden der Versagensereignisse, die Anzahl der gefährdeten Personen im Überflutungsgebiet sowie das Gefährdungspotential aus der Verknüpfung von Wahrscheinlichkeiten und gefährdeten Personen. Die Kenngrößen werden im Vorhaben auf ihre Eignung im Rahmen der Beispielanwendungen ermittelt, beurteilt und ggf. erweitert, zum Beispiel durch Einbezug der Lebensdauer der Anlage. Für Versagenswahrscheinlichkeiten und Gefährdungspotentiale gibt es in der internationalen Entwicklung erste Empfehlungen zu Risikoakzeptanzgrenzen, aufbereitet zum Beispiel von Reißler (1998). Das quantifizierte Versagensrisiko ist zum Vergleich von Projektvarianten, für eine Nutzen-Kosten-Betrachtung oder für eine Mehrkriterienbetrachtung verwendbar.

10. Zusammenfassung

Das vorgestellte, in Bearbeitung befindliche Forschungsvorhaben gehört zum BMBF-Förderschwerpunkt RIMAX. Es wird von den Universitäten Braunschweig und Karlsruhe bearbeitet. Die externen Projektpartner Ruhrverband und Landestals-

sperrungsverwaltung des Freistaates Sachsen begleiten das Projekt und stellen Daten für Beispielanwendungen zur Verfügung.

Das Gesamtziel des Forschungsvorhabens ist die Erarbeitung eines Instrumentariums zur risikobasierten hydrologischen Bemessung geplanter und zur Sicherheitsbeurteilung bestehender Stauanlagen. Das Gesamtverfahren wird bis zur Risikobewertung modelltechnisch entwickelt und anhand von Beispielen illustriert. Das Gesamtverfahren ermöglicht es, die Bemessungsverfahren gemäß DIN 19700 durch eine Risikobewertung zu ergänzen. Das Verfahren enthält die Module "extreme synthetische Hochwasserganglinien; Überströmwahrscheinlichkeiten; Bruchwahrscheinlichkeit, Bruchablauf und Bruchwelle; Wellenablauf und Überflutungsgrenzen; Versagensfolgen; Risikokenngrößen und Risikobewertung".

11. Literatur

Buck, W. (2006) Zweckorientierte Aufstellung von Wasserstand-Schadensfunktionen. In: Proceedings Internationale Konferenz "Strategien und Instrumente zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes", Institut für Wasserwirtschaft und Ökotechnologie, Hochschule Magdeburg.

DEFRA (2002) Reservoir Safety – Floods and Reservoir Safety Integration”, Research Contract, Final Report.

DIN 19700 (2004) Staunlagen. Beuth-Verlag, Juli 2004.

Hable, O. (2001) Multidimensional probabilistic design concept for the estimation of the overtopping probability of dams. Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft 37, Dissertation an der Technischen Universität Graz.

Harms, M. , Huber, N., Köngeter, J. (2004) Numerische Simulation der Flutwellenausbreitung im Risk Assessment Verfahren für Stauanlagen. In: Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 27, Institut für Wasserbau und THM der TU Dresden.

ICOLD (1998) Dam-Break Flood Analysis. International Commission on Large Dams, Bulletin 111, Paris.

Ihringer, J. (2003) Softwarepaket: Hochwasseranalyse und -berechnung – Anwenderhandbuch, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH).

ITWH (2005) Software KOSTRA-DWD 2000, Institut für technischwissenschaftliche Hydrologie GmbH, Hannover.

Leismann, M., Meon, G. (2002) Das Modell MeadFlow für die praxisgerechte 2D-Modellierung von Strömungen in Flusslandschaften, Wasserwirtschaft, Heft 6, 2002.

Lutz, W. (1984) Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Verwendung von Gebietskenngröße, Mitteilungen des Institutes für Hydrologie und Wasserwirtschaft der Universität Karlsruhe (TH), Heft 24.

Meon, G. (1989) Sicherheitsanalyse einer Talsperre für den Hochwasserfall. – Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe (TH), Heft 35.

Meon, G. , Plate, E. J.(1989) Zuverlässigkeit einer Talsperre für den Hochwasserfall, Wasserwirtschaft, Heft 7/8, 1989.

Pohl, R. (1997) Überflutungssicherheit von Talsperren, Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 11, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, TU Dresden.

Rißler, P. (1998) Risikoeinschätzung für Talsperren – Internationale Entwicklungen. – In: Wasser & Boden, 50/9, Parey-Verlag.

Treiber, B. (1975) Ein stochastisches Modell zur Simulation von Tagesabflüssen. – Mitteilungen des Institutes für Wasserbau III der Universität Karlsruhe (TH), Heft 5.

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. Günter Meon
Dipl.-Ing. Markus Anhalt
Leichtweiß-Institut für Wasserbau,
Abt. Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz
Technische Universität Braunschweig
Beethovenstr. 51 a, D-38100 Braunschweig
Email: g.meon@tu-bs.de, m.anhalt@tu-bs.de

Dr.-Ing. Jürgen Ihringer
Dipl.-Ing. Johannes Höfer
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung
Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Abt. Hydrologie
Universität Karlsruhe (TH)
Kaiserstr. 12, D-76128 Karlsruhe
Email: ihringer@iwg.uka.de, hoef@iwg.uka.de

DIE BEDEUTUNG VON EXTREMEN EREIGNISSEN IN DER RISIKOQUANTIFIZIERUNG

Bruno Merz und Annegret Thielen

1. Einleitung

Sicherheit vor Hochwasser und anderen Naturereignissen ist ein Bedürfnis der Gesellschaft, das in Konkurrenz zu anderen Bedürfnissen steht. In Anbetracht begrenzter Mittel stellt sich deshalb die Aufgabe einer optimalen Reduzierung des Risikos. Die Frage, ob eine Schutzmaßnahme gerechtfertigt ist, wird im Allgemeinen durch die Gegenüberstellung von Nutzen (z.B. verhinderte Schäden) und Kosten beantwortet. Aus der Palette möglicher Schutzmaßnahmen wird die Option mit dem besten Verhältnis von Nutzen und Kosten ausgewählt. Abbildung 1 zeigt schematisch den Vergleich verschiedener Schutzmaßnahmen in einem Aufwand-Risiko-Diagramm. Kosten (Aufwendungen zur Risikoreduktion) und Nutzen (Risikoreduktion) werden für jede Maßnahme bestimmt und in diesem Diagramm aufgetragen. Im Allgemeinen gilt das Prinzip des kleiner werdenden Ertrags: Eine große Reduktion des bestehenden Risikos kann schon durch kleine Aufwendungen erreicht werden, zusätzliche Maßnahmen werden immer uneffektiver. Optimale Maßnahmen sind solche, die das Ausgangsrisiko mit einem günstigen Nutzen-Kosten-Verhältnis ausreichend stark reduzieren.

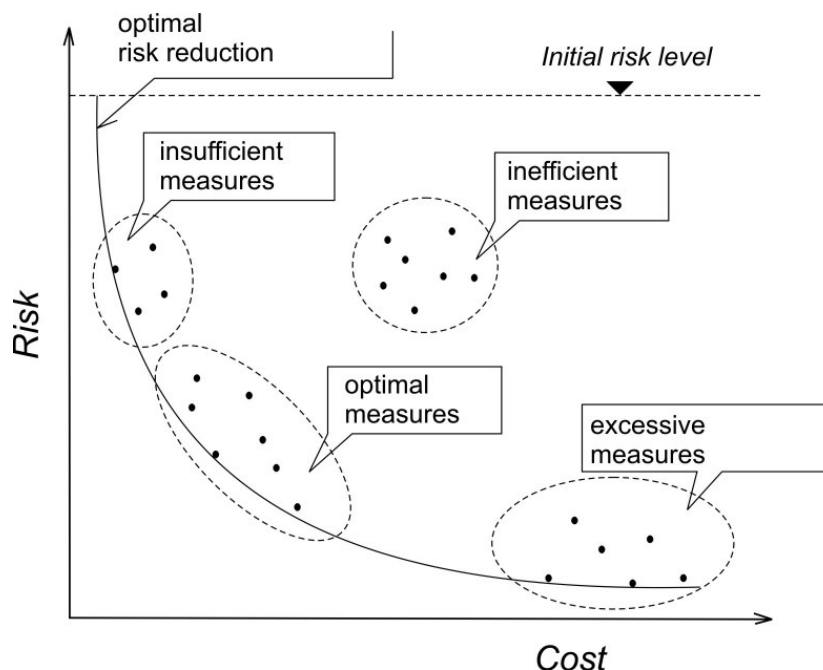


Abb. 1: Aufwand-Risiko-Diagramm zur Bewertung von Schutzmaßnahmen, verändert nach Einstein (1997).

Für solche Abwägungen von Nutzen und Kosten ist es notwendig, das Risiko sowie die Risikoreduktion durch Schutzmaßnahmen zu quantifizieren. Als Risikoindikator wird bei Kosten-Nutzen-Untersuchungen fast durchweg die Schadenserwartung ver-

wendet. In diesem Referat wird untersucht, welchen Beitrag extreme Hochwasser im Vergleich zu häufigeren Ereignissen zur Schadenserwartung bzw. zum Risiko leisten. Dieser Anteil wird mit der Bedeutung verglichen, die extreme Ereignisse für die Gesellschaft haben. Es zeigt sich, dass eine Diskrepanz zwischen der gesellschaftlichen Bedeutung von extremen Ereignissen und ihrem Beitrag zur Schadenserwartung besteht: Extreme Ereignisse sind aus gesellschaftlicher Sicht wichtiger als der Schadenserwartungswert impliziert.

2. Der Risikoindikator Schadenserwartung

In der Sicherheitswissenschaft beinhaltet der Begriff Risiko die beiden Aspekte Gefährdung und Vulnerabilität (Merz, 2006). Die Hochwassergefährdung beschreibt die Intensität (z.B. Wasserstand, Abfluss, überflutete Fläche) und die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Hochwassers. Die Vulnerabilität beschreibt die Auswirkungen eines Hochwassers auf die betroffenen Menschen, ihre Vermögenswerte und die Umwelt. Sie bestimmt, wie groß der Schaden bei einem bestimmten Ereignis ist. Die Überlagerung von Gefährdung und Vulnerabilität wird in der Risikoquantifizierung ausgedrückt als:

$$RI = P \times D \quad (1)$$

Das Risiko RI ergibt sich aus der Multiplikation von Wahrscheinlichkeit P und Schaden D . Diese Definition entstammt dem Feld der technischen Risikoabschätzung; sie wird auch als technisches Konzept des Begriffs Risiko bezeichnet.

Abbildung 2 zeigt die Übertragung dieses Begriffs auf die Hochwassersituation an einem Fluss. Die Wahrscheinlichkeit wird durch die Dichte- bzw. Verteilungsfunktion des Wasserstands h bzw. des Abflusses Q ausgedrückt. Der schraffierte Bereich entspricht der Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Wasserstands über der Schadensschwelle h_D . Ein Schaden tritt ein, sobald der Wasserstand h_D erreicht wird. Die Zunahme des Schadens mit dem Wasserstand wird durch die Schadensfunktion $D(h)$ beschrieben.

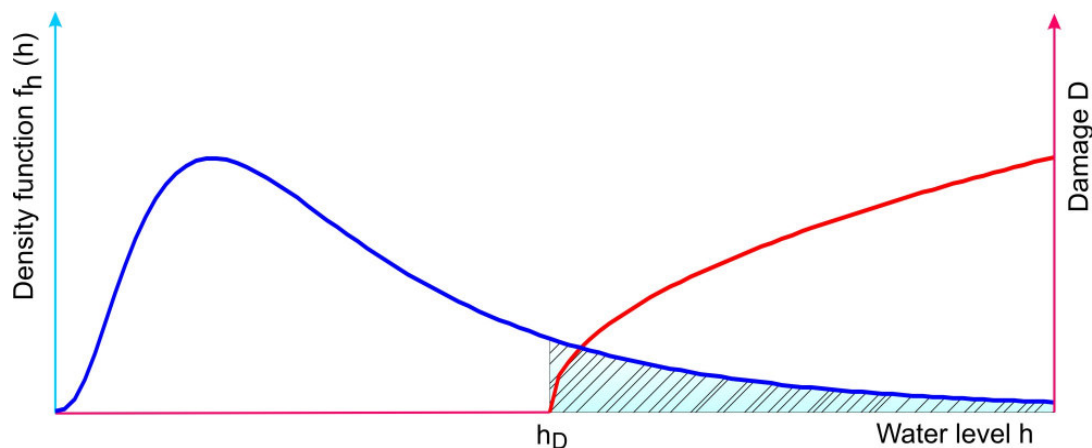


Abb. 2: Schadensfunktion $D(h)$ sowie Dichtefunktion des Wasserstands $f_h(h)$.

Traditionell wird das Risiko RI durch den Erwartungswert des Schadens $E\{D\}$ innerhalb eines Zeitintervalls Δt (üblicherweise 1 Jahr) zusammengefasst (z.B. Schmidtke, 2004). Dieser Schadenserwartungswert ergibt sich aus der Schadensfunktion $D(h)$ und der Dichtefunktion des Wasserstands $f_h(h)$:

$$RI = E\{D\} = \int_{h_D}^{\infty} f_h(h) D(h) dh \quad (2)$$

In der Hochwasserschutzplanung liegen Überflutungsszenarien und Schadensabschätzungen für einzelne Ereignisse vor. Deshalb ist Gl. 2 für den kontinuierlichen Fall durch den diskreten Fall (Gl. 3) zu ersetzen:

$$\begin{aligned} RI &= E\{D\} = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta P_i(h) \cdot D_i(h) \\ \Delta P_i &= |P_i - P_{i+1}| \\ D_i &= 0.5 (D(P_i) + D(P_{i+1})) \end{aligned} \quad (3)$$

Hierbei werden der Schaden D_i sowie die Eintrittswahrscheinlichkeit P_i für n verschiedene Szenarien berechnet.

3. Der Beitrag extremer Ereignisse zum Schadenserwartungswert

In diesem Kapitel wird untersucht, welchen Beitrag extreme Hochwasserereignisse zum Risiko leisten, wenn der Schadenserwartungswert als Risikoindikator verwendet wird. Zuerst wird ein konkretes Fallbeispiel betrachtet; danach wird eine verallgemeinerte Analyse durchgeführt.

3.1 Fallbeispiel Seckach/Kirnau

Das 260 km² große Einzugsgebiet von Seckach und Kirnau liegt östlich von Heidelberg, am Rande des Odenwalds im Südwesten Deutschlands. Im Dezember 1993 traten in nahezu allen Ortslagen katastrophale Überflutungen auf, die Schäden in Höhe von 25–30 Mio. DM verursachten. Erneute Überschwemmungen im Januar 1995, d.h. nur etwa ein Jahr später, gaben Anlass zu einer umfassenden Hochwasserschutzplanung. Hierfür wurden für verschiedene Jährlichkeiten Überschwemmungsszenarien berechnet und die direkten Schäden abgeschätzt. Diese waren die Basis für eine Kosten-Nutzen-Untersuchung der Hochwasserschutzplanung (Merz und Gocht, 2001).

Abbildung 3 zeigt die Schadenserwartungswerte RI für die Ortslagen im Einzugsgebiet von Seckach und Kirnau für die Situation ohne Hochwasserschutz sowie mit Hochwasserschutz. Die Größe der Tortendiagramme ist ein Maß für die Höhe von RI . Die Unterteilung gibt den Beitrag der Jährlichkeits-Intervalle zur Schadenserwartung RI an:

$$\Delta RI_i = \Delta P_i(h) D_i(h) \quad (4)$$

Es wird deutlich, dass RI vor der Umsetzung der Schutzmaßnahmen durch die häufigeren Ereignisse dominiert wird. In sieben von zwölf Ortslagen stammt der

größte Beitrag aus dem Intervall $HQ_{20} - HQ_{50}$, in vier von zwölf Fällen aus dem Intervall $HQ_{10} - HQ_{20}$. Die Ortslage Götzingen stellt einen Sonderfall dar. Da hier wegen der relativ weit vom Gewässer entfernt liegenden Bebauung erst bei größeren Hochwässern signifikante Schäden auftreten, kommt der größte Anteil aus dem Intervall $HQ_{50} - HQ_{100}$. Dieses Ergebnis bedeutet, dass eine große Risikoreduktion erzielt wird, wenn der Hochwasserschutz für vergleichsweise geringe Jährlichkeiten (d.h. das 20- oder 50-jährliche Hochwasser) ausgelegt wird. Extreme Ereignisse tragen nur wenig zum Schadenserwartungswert bei.

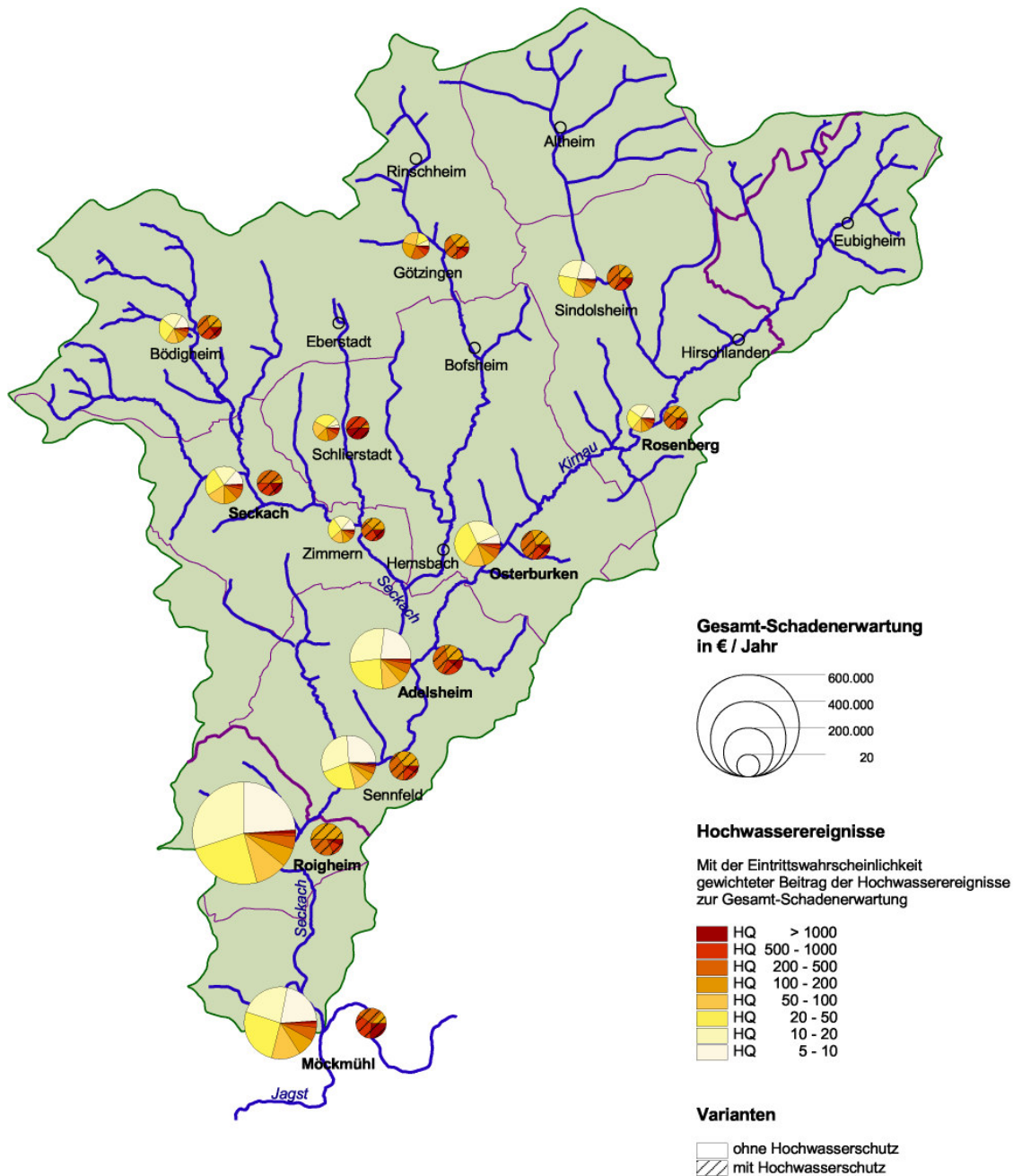


Abb. 3: Schadenserwartung RI [€/Jahr] für die Ortslagen im Einzugsgebiet von Seckach und Kirnau vor und nach Umsetzung von Hochwasserschutzmaßnahmen (Merz und Gocht, 2001).

3.2 Allgemeine Betrachtungen

Nun stellt sich die Frage, inwieweit das Fallbeispiel Seckach/Kirnaun typisch für den Anteil von extremen Hochwasserereignissen an der Schadenserwartung RI ist. Dieser Beitrag hängt von den Zusammenhängen zwischen Wasserstand h , Abfluss Q , Jährlichkeit T und Schaden D ab. Diese Beziehungen werden durch die Abflusskurve $h(Q)$, die Hochwasserhäufigkeitskurve $Q(T)$ bzw. $h(T)$, sowie die Schadensfunktion $D(h)$ bestimmt. Um ein breites Spektrum abzudecken, wurden verschiedene Annahmen für die genannten Funktionen getroffen. Darüber hinaus spielt die Schadensschwelle h_d eine Rolle. Diese wurde, wie im Einzugsgebiet von Seckach/Kirnaun, auf den 5-jährlichen Abfluss gesetzt. Im Folgenden wird das Zusammenspiel der verschiedenen Faktoren nur für Wasserstände, die die Schadensschwelle überschreiten, betrachtet.

An die AMS-Zeitreihen (Annual Maximum Series) von 56 Pegeln aus den verschiedenen Flussgebieten Deutschlands wurde jeweils die GEV-Verteilung angepasst. Abbildung 4 zeigt die mit dem Median der jeweiligen AMS-Reihe normierten Hochwasserhäufigkeitsfunktionen. Die wesentliche Eigenschaft, die den Beitrag zu RI festlegt, ist der Form-Parameter γ der GEV-Verteilung. Die Häufigkeitsfunktionen mit dem maximalen ($\gamma = 0.27$) und dem minimalen γ -Wert ($\gamma = -0.34$) der 56 AMS-Reihen repräsentieren jeweils ein extremes Verhalten. Diese beiden Funktionen wurden gemeinsam mit einer Funktion, die das mittlere Verhalten beschreibt ($\gamma = 0$), für die weitere Analyse verwendet (Abb. 4). Zur Vergleichbarkeit wurden die drei Häufigkeitskurven so skaliert, dass sie bei einer Jährlichkeit von 5 Jahren – dies entspricht der Schadensschwelle – den gleichen Abflusswert besitzen.

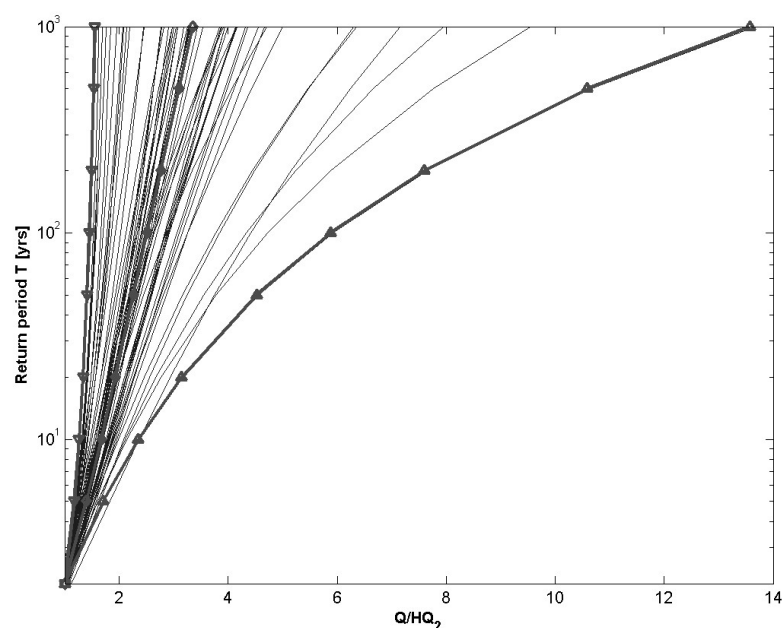


Abb. 4: Hochwasserhäufigkeitskurven von 56 Pegeln verschiedenster Einzugsgebiete in Deutschland. Der Abfluss Q wurde mit dem Median der jeweiligen AMS-Reihe HQ_2 normiert. Die markierten Kurven repräsentieren das mittlere sowie das extreme Verhalten.

Neben der Häufigkeitsfunktion beeinflusst die Form des Talquerschnitts den Schadenserwartungswert. Die in Deutschland verbreiteten Talformen können durch eine lineare oder durch eine konkave Talform angenähert werden. Lineare Talformen sind z.B. typisch für V-förmige Kerbtäler, konkave Formen für Muldentäler. Um das gesamte Spektrum abzudecken, wurde zusätzlich eine konvexe Talform berücksichtigt (Abbildung 5).

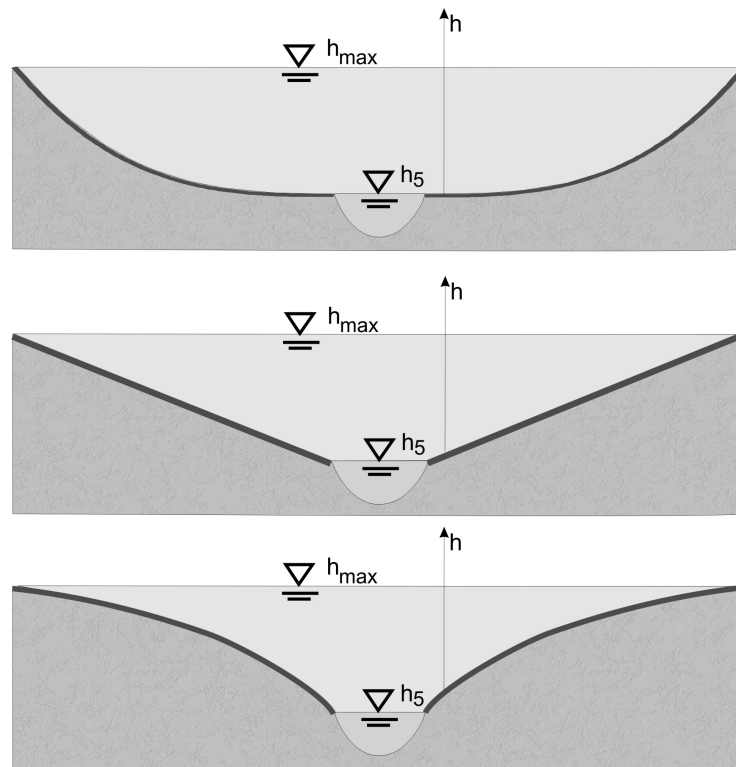


Abb. 5: Konkave, lineare und konvexe Talform.

Zur Erstellung von Abflusskurven wurde gleichförmiger, stationärer Abfluss angenommen. Mittels der Gaukler-Manning-Strickler-Gleichung wurde für jede Talform der Zusammenhang zwischen dem Abfluss außerhalb des Flussbetts und dem Wasserstand über der Schadensschwelle berechnet (Abbildung 6).

Die Schadensfunktion ergibt sich aus der Talform sowie aus der räumlichen Verteilung der Werte und der Schadensanfälligkeit. Es wurde angenommen, dass die Werte und die relative Schadensanfälligkeit gleichförmig verteilt sind. Bei Gemeinden mit ausgesprochener Hochwassererfahrung und einem ausgeprägter Hochwasserbewusstsein wäre zu erwarten, dass in Flussnähe geringwertige Nutzungen zu finden sind, und/oder die relative Schadensanfälligkeit niedriger ist. Hohe Werte und anfälligeren Objekte sollten weiter entfernt vom Fluss zu finden sein. Über diese Zusammenhänge sind den Autoren allerdings keine systematischen und aussagekräftigen Untersuchungen bekannt. Bei gleichförmiger Verteilung der Werte und Schadensanfälligkeit ist der Schaden proportional zur überfluteten Fläche und die Schadensfunktion ergibt sich vollständig aus der Talform (Abbildung 7).

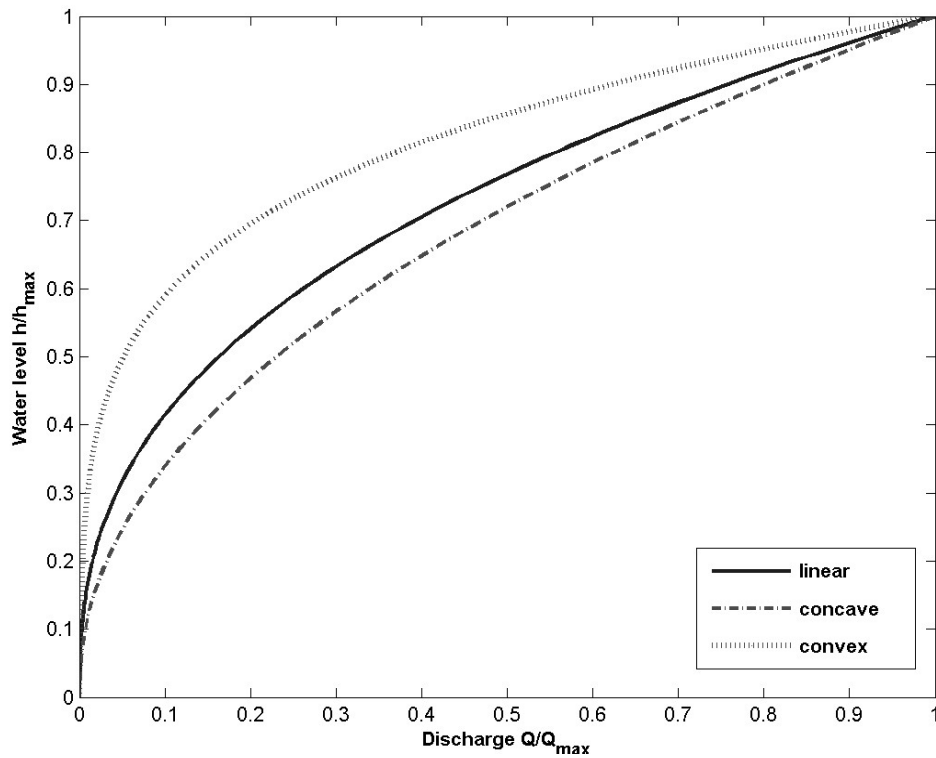


Abb. 6: Abflusskurven $h(Q)$ für den Bereich außerhalb des Flussbetts für die drei Typen von Talformen. Abfluss und Wasserstand sind normiert mit dem jeweils maximalen Wert.

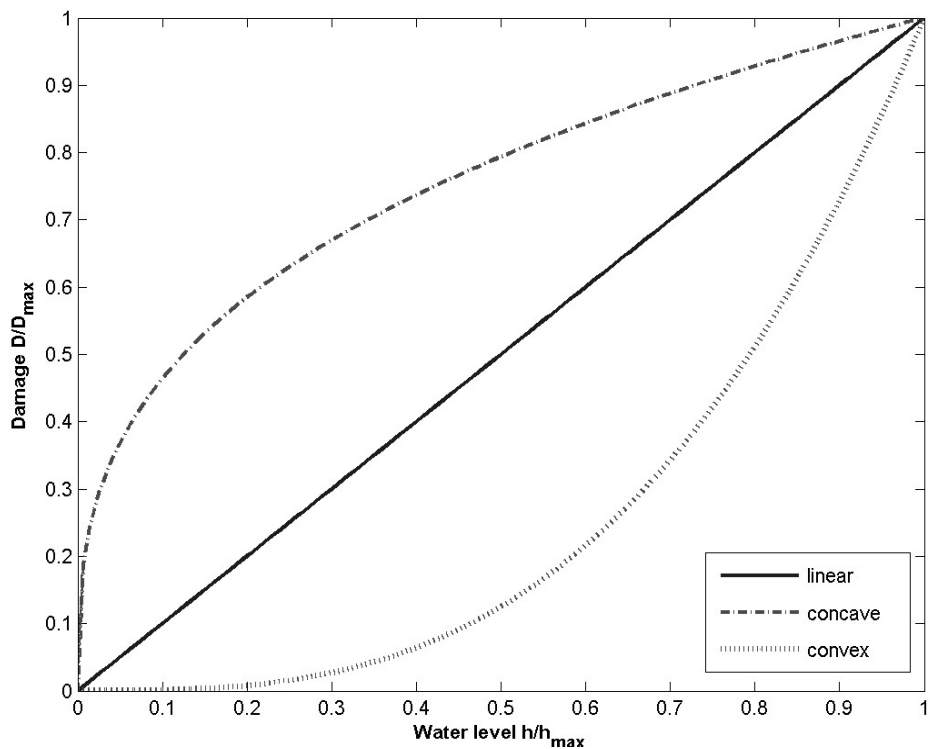


Abb. 7: Schadensfunktionen $D(h)$ für die drei Typen von Talformen. Schaden und Wasserstand sind normiert mit dem jeweils maximalen Wert.

Aus der Überlagerung von Abflusskurven, Schadensfunktionen und Hochwasserhäufigkeitskurven ergeben sich neun Fälle (3 Talformen x 3 GEV-Formen), für die $h(T)$ -Beziehungen in Abbildung 8 gezeigt sind. Hieraus lassen sich nach Gl. 4 die Beiträge der verschiedenen Jährlichkeitsintervalle zum Schadenserwartungswert berechnen (Abbildung 9). Abbildung 10 zeigt einen Vergleich dieser neun Fälle in Form einer kumulativen Darstellung. Hieraus ist deutlich zu erkennen, dass für die üblichen Talformen (linear und konkav) der dominante Beitrag zur Schadenserwartung aus den häufigeren Ereignissen resultiert. Im Mittel tragen Ereignisse im Intervall 5-10 Jahre 28% zum Schadenserwartungswert bei, die Ereignisse im Intervall 5-20 Jahre 60% und solche im Bereich 5-50 Jahre 82%. Extreme Ereignisse liefern hingegen viel geringere Beiträge, z.B. haben Ereignisse mit Jährlichkeiten größer als 500 Jahre einen Anteil von 2%, Ereignisse mit Wiederkehrintervall von mehr als 1000 Jahren lediglich 1%.

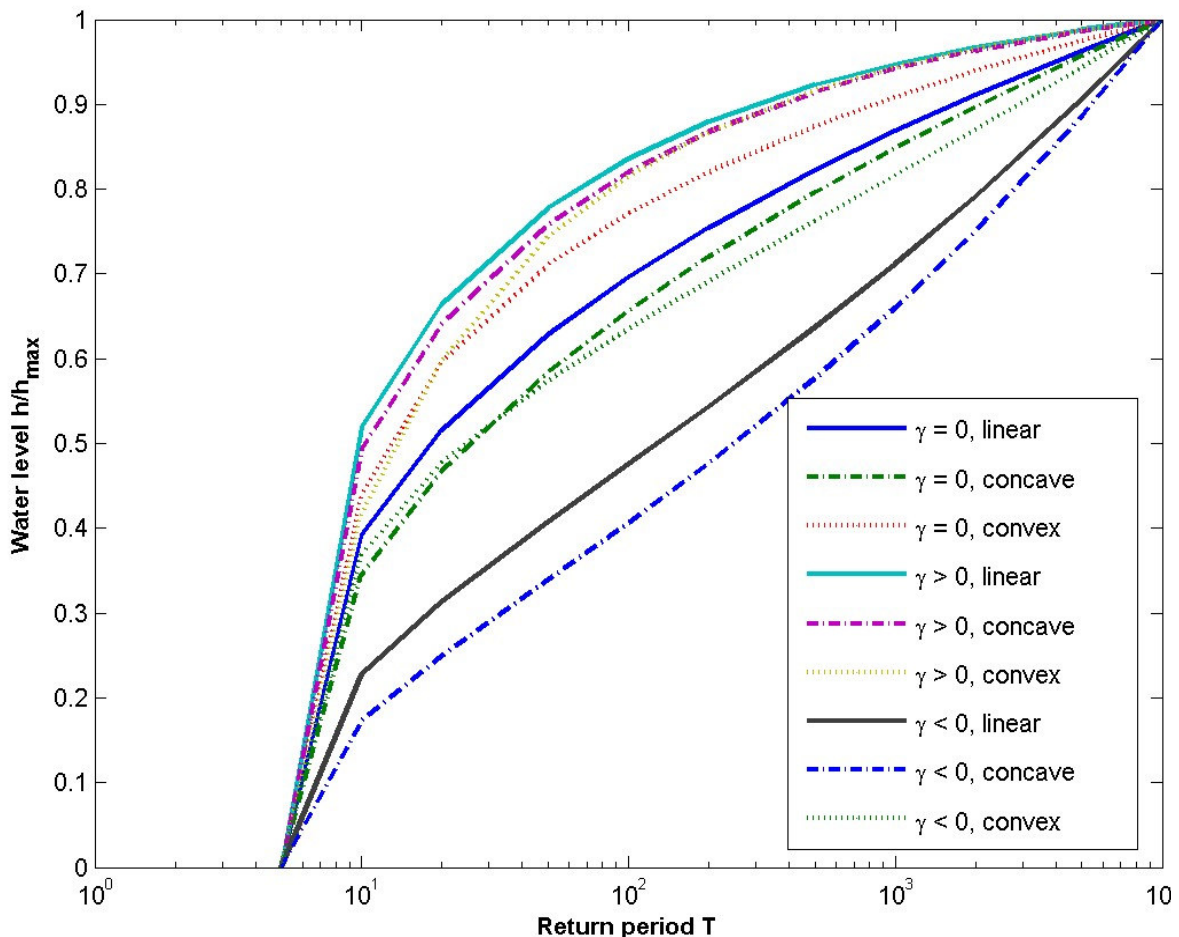


Abb. 8: Hochwasserhäufigkeitskurven $h(T)$ für die drei Typen von Talformen und die drei ausgewählten GEV-Verteilungen. Der Wasserstand ist normiert mit dem jeweils maximalen Wert.

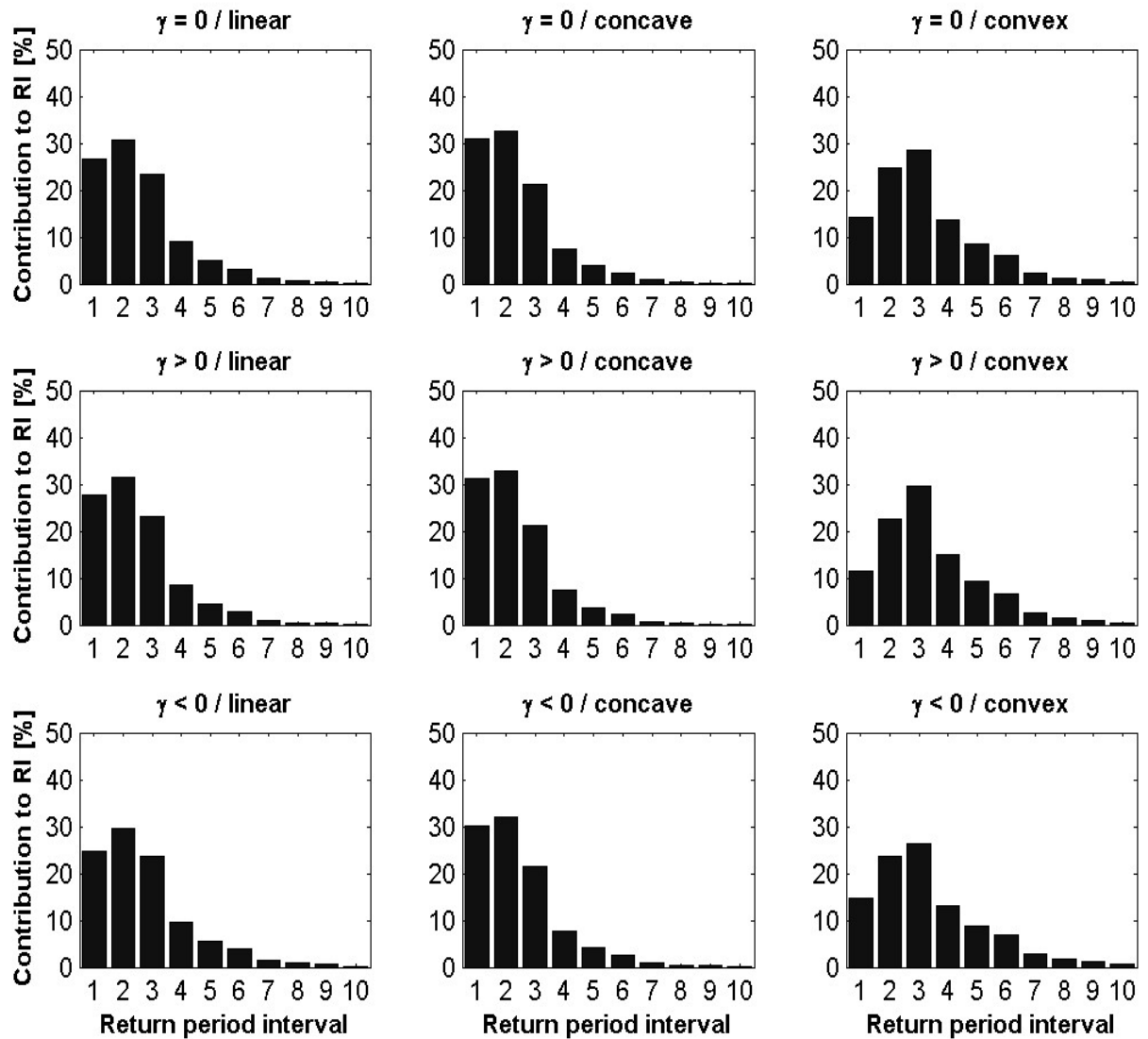


Abb. 9: Beitrag der Jährlichkeits-Intervalle zum Schadenserwartungswert für die drei Typen von Talformen und die drei ausgewählten GEV-Verteilungen. (Intervalle der Jährlichkeiten: 1: 5-10 / 2: 10-20 / 3: 20-50 / 4: 50-100 / 5: 100-200 / 6: 200-500 / 7: 500-1000 / 8: 1000-2000 / 9: 2000-5000 / 10: 5000-10000.

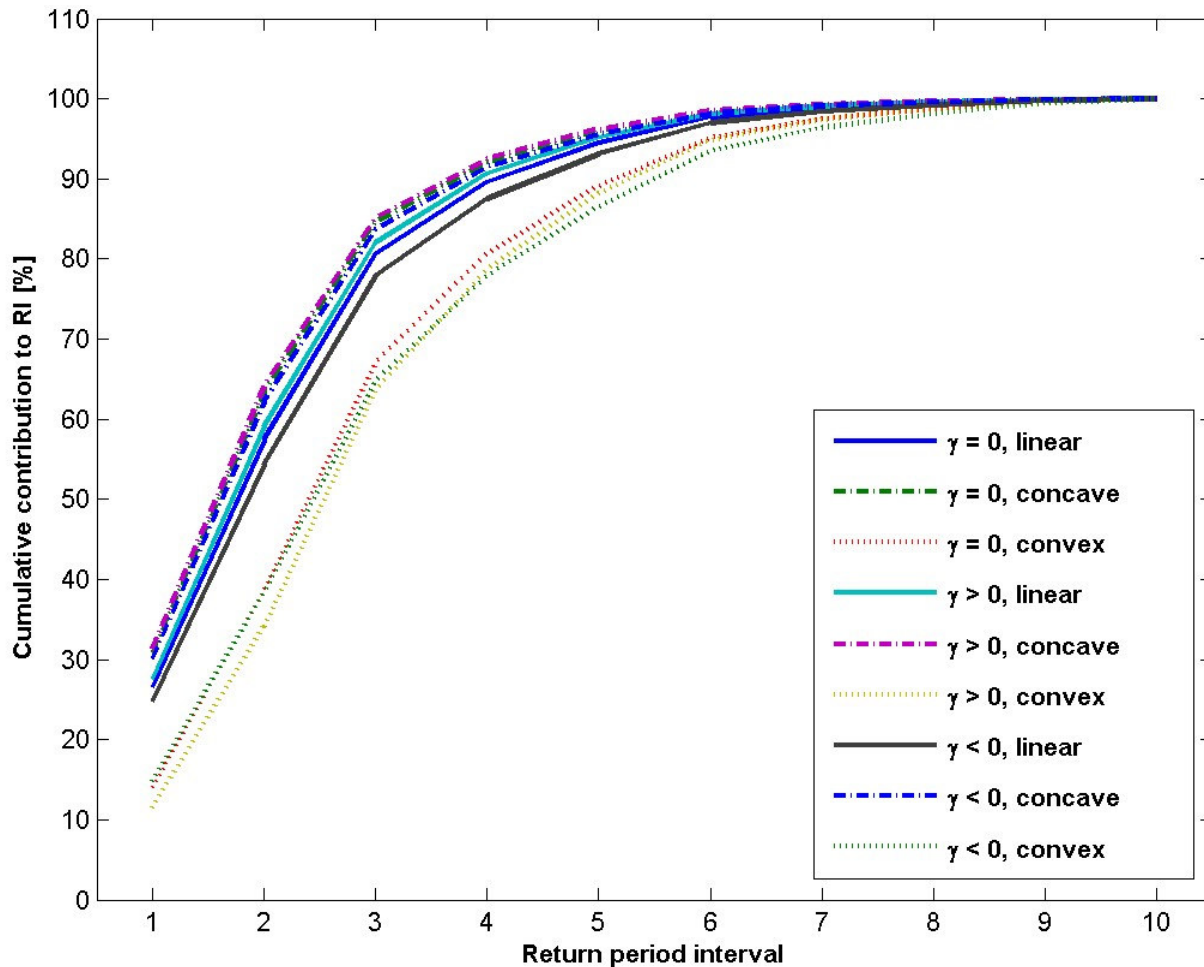


Abb. 10: Kumulativer Beitrag der Jährlichkeits-Intervalle zum Schadenserwartungswert für die drei Typen von Talformen und die drei ausgewählten GEV-Verteilungen. (Intervalle der Jährlichkeiten: 1: 5-10 / 2: 10-20 / 3: 20-50 / 4: 50-100 / 5: 100-200 / 6: 200-500 / 7: 500-1000 / 8: 1000-2000 / 9: 2000-5000 / 10: 5000-10000).

4. Gesellschaftliche Signifikanz von Extremereignissen

Das Fallbeispiel und die allgemeinen Betrachtungen haben gezeigt, dass der übliche Risikoindikator, die Schadenserwartung, durch die häufigeren Hochwasser dominiert wird; extreme Ereignisse spielen eine untergeordnete bzw. zu vernachlässigende Rolle. Dieses Ergebnis widerspricht jedoch der Erfahrung beim Umgang mit Naturrisiken. Gerade die extremen Ereignisse erhalten die Aufmerksamkeit der Gesellschaft. Oft werden aufwendige Schutzmaßnahmen erst nach Eintritt eines extremen Ereignisses geplant und umgesetzt. Kleinere Ereignisse mit vergleichsweise geringen Schäden aktivieren die Gesellschaft viel weniger – auch wenn die Schadenssumme vieler kleiner Ereignisse durchaus beträchtliche Größen annehmen kann.

4.1 Risikowahrnehmung

Die Wahrnehmung eines Schadensereignisses definiert die Bedeutung, die die Gesellschaft diesem Ereignis zuweist. Dementsprechend spielt die Risikowahrnehmung eine dominante Rolle in Entscheidungen über Schutzmaßnahmen.

Unterschiedliche Präferenzen für Entscheidungsalternativen sind verbunden mit einer unterschiedlichen Wahrnehmung des Risikos der Optionen (Slovic und Weber, 2002).

Die Forschung zur Risikowahrnehmung hat gezeigt, dass Risiken in der Bevölkerung sehr unterschiedlich wahrgenommen werden, d.h. soziale, politische, kulturelle und ökonomische Faktoren beeinflussen die Risikowahrnehmung (siehe z.B. WBGU, 1999). Wesentlich für die Risikobewertung ist der Kontext der riskanten Situation. Ein Risiko einer bestimmten Höhe kann in einem bestimmten Kontext akzeptiert, in einem anderen aber abgelehnt werden.

In einer der ersten psychometrischen Studien zur Wahrnehmung von Risiken kam Starr (1969) zu dem Schluss, dass freiwillige Risiken akzeptiert werden, die drei Größenordnungen größer sind als unfreiwillige Risiken. Seither gab es eine Reihe von psychometrischen Studien, die weitere Dimensionen zur Risikowahrnehmung ergänzten. Beispielsweise werden Risiken weniger akzeptiert, wenn:

- das Funktionieren der Risikoquelle nicht verstanden wird,
- die Risikoquelle nicht kontrollierbar erscheint,
- das Schadenausmaß katastrophalen Umfang annehmen kann,
- Risiken und Nutzen ungleich verteilt erscheinen,
- Risikofolgen irreversibel erscheinen,
- wenn die Risikoquelle oder die Schadensart unvertraut ist,
- keine eigenen schadensmindernden Handlungen möglich sind oder
- wenn die Informationsquellen nicht vertrauenswürdig erscheinen.

Menschen nehmen Risiken also als komplexes, mehrdimensionales Phänomen wahr. Deshalb spielt bei Risikoentscheidungen die Schadenserwartung häufig nur eine untergeordnete Rolle.

Es konnte gezeigt werden, dass diese Risikodimensionen untereinander korreliert sind. Beispielsweise sind „freiwillige Risiken“ eher „kontrollierbar“ und „gut bekannt“. Damit können die vielfältigen Risikodimensionen auf wenige übergeordnete Dimensionen reduziert werden. Die größte Bedeutung hat die Dimension „dread risk“ (Slovic und Weber, 2002). Damit sind Risiken bzw. Ereignisse gemeint, die Furcht verursachen, das Potential zu katastrophalen Folgen haben, irreversible Konsequenzen haben und bei denen die eigenen Kontrollmöglichkeiten als gering empfunden werden. Je größer das „dread risk“ eines Ereignisses ist, desto größer ist sein wahrgenommenes Risiko und desto stärker befürworten oder fordern Menschen Maßnahmen zur Risikoreduktion.

4.2 Warum sind extreme Ereignisse wichtiger für die Gesellschaft als der Schadenserwartungswert ausdrückt?

Ein Ereignis mit großen Auswirkungen wird intensiver wahrgenommen und anders bewertet als viele Ereignisse mit kleinen Schäden, d.h. viele kleine Risiken können

nicht unbedingt einem großen Risiko gleichgestellt werden, auch wenn beide Schadenssummen gleich sind. Diese Risikoaversion, die Abneigung gegen Risiken mit großen bzw. katastrophalen Folgen, lässt sich rational begründen:

- Die zeitliche und räumliche Konzentration von negativen Konsequenzen besitzt ein höheres Zerstörungspotenzial und erschwert überproportional die Erholungsfähigkeit (Resilienz oder Elastizität) der betroffenen Gesellschaft. Die Regeneration von großen Schadenereignissen ist schwieriger und dauert länger als jene aus einer Abfolge von vielen kleineren Ereignissen (Planat, 2000). Dies gilt vor allem, wenn Schwellenwerte überschritten werden, so dass das Gleichgewicht mit den Mitteln des betroffenen Systems nicht wiederhergestellt werden kann.
- Ereignisse mit großen Schäden besitzen Signalwirkung und ziehen häufig erhebliche Konsequenzen nach sich, beispielsweise in Form von veränderten Vorschriften und Gesetzen. Nach Katastrophen sind häufig Überreaktionen zu beobachten. Unter dem Eindruck der Schäden wird beispielsweise der unbeschränkte Einsatz von Mitteln zur Verhinderung zukünftiger Schadenereignisse gefordert. Die verantwortlichen Behörden müssen also ein Interesse haben, sehr gravierende Schadenereignisse zu vermeiden, z.B. durch den Einsatz von mehr Ressourcen als einem solchen Ereignis aufgrund seiner rein statistischen Bedeutung zustünde.
- In vielen Bereichen erfassen die heutigen Risikoquantifizierungen nur einen Ausschnitt der negativen Konsequenzen. Gerade im Hochwasserbereich beschränken sich Schadensabschätzungen häufig auf die direkten ökonomischen Schäden. Indirekte Schäden, also z.B. Unterbrechungen der Versorgung, der Produktion oder des Verkehrs auch außerhalb der direkt überschwemmten Flächen, oder intangible Schäden, also z.B. negative Auswirkungen auf die Gesundheit oder ökologische Schäden, werden im Allgemeinen nicht erfasst. Solche Schäden können jedoch eine dominierende Bedeutung haben, wie die wenigen Studien zu den sozialen Folgen von Hochwasser gezeigt haben. Eine Zusammenfassung solcher Studien ist in Merz (2006) zu finden. Extreme Ereignisse mit katastrophalen Folgen haben häufig überproportional stärkere indirekte und intangible Konsequenzen. Deshalb ist es vernünftig, solche Ereignisse möglichst zu vermeiden.

5. Folgerungen

Diese Analyse vergleicht die Bedeutung von extremen Hochwasserereignissen mit derjenigen von häufigeren Ereignissen. Die Bedeutung wird durch den Beitrag von Ereignissen zum Schadenserwartungswert, dem Risikoindikator schlechthin, ausgedrückt. Es zeigt sich anhand eines Fallbeispiels, aber auch anhand von allgemeinen Betrachtungen, dass der Schadenserwartungswert durch die häufigeren Ereignisse dominiert wird. Beispielsweise zeigen die allgemeinen Betrachtungen, dass unter typischen Bedingungen hinsichtlich der Talform, Hochwasserhäufigkeit und

Schadensverteilung Ereignisse im Intervall 5-10 Jahre 28% zum Schadenserwartungswert beitragen, Ereignisse im Intervall 5-20 Jahre 60% und solche im Bereich 5-50 Jahre 82%. Extreme Ereignisse haben nur einen sehr geringen Beitrag, z.B. 2% für Ereignisse mit Jährlichkeiten größer als 500 Jahre, und 1% für Ereignisse größer als 1000 Jahre.

Diesem Ergebnis werden die Folgerungen von Untersuchungen zur Risikowahrnehmung von extremen Ereignissen gegenübergestellt. Extreme Ereignisse, die mit katastrophalen Konsequenzen verbunden sind, werden von der Gesellschaft als sehr viel wichtiger wahrgenommen, als ihr Beitrag zum Schadenserwartungswert widerspiegelt. Für diese Aversion der Gesellschaft gegen extreme Ereignisse gibt es gute Gründe. Beispielsweise machen heutige Hochwasser-Risikoabschätzungen im Allgemeinen keine Aussagen zu Aspekten wie Irreversibilität oder gesundheitliche Auswirkungen. Weil der Schadenserwartungswert häufig nicht mit der Risikowahrnehmung der Gesellschaft übereinstimmt, ist die Verwendung des Schadenserwartungswerts als Risikoindikator zu überdenken.

6. Literatur

Einstein, H.H. (1997) Landslide risk – Systematic approaches to assessment and management. In: Cruden & Fell (eds), Landslide risk assessment, Balkema, Rotterdam, 25-50.

Merz, B. (2006) Hochwasserrisiken. Grenzen und Möglichkeiten der Risikoabschätzung. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 334 pp.

Merz, B. und Gocht, M. (2001) Risikoanalyse Seckach/Kirnaun, Teil II: Ermittlung von Schadenspotentialen. Nutzen-Kosten-Analyse. GeoForschungsZentrum Potsdam, 87 pp. (unveröffentlicht).

PLANAT (Nationale Plattform Naturgefahren) (2000) Bewertung von Naturgefahren. Umgang mit Katastrophenereignissen (Risikoaversion). Vorstudie, Ernst Basler & Partner AG, Zollikon, Schweiz, 63 pp. (unveröffentlicht).

Schmidtke, R.F. (2004) Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in Hochwasserschutzplanungen. Wasserwirtschaft, 9/2004, 16-20.

Slovic, P. und Weber, E.U. (2002) Perception of risk posed by extreme events. Proc. Conference 'Risk management strategies in an uncertain world', Palisades, New York, 12-13 April, 2002.

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen), (1999) Welt im Wandel: Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken, Jahresgutachten 1998. Springer-Verlag, Berlin, 378 pp.

Anschrift der Verfasser:

Bruno Merz
Annegret Thielen
GeoForschungsZentrum Potsdam
Telegrafenberg, D-14473 Potsdam
Email: bmerz@gfz-potsdam.de

KRITISCHE TROCKEN- UND NIEDERWASSERPERIODEN

Reinhold Godina und Franz Nobilis

1. Ab wann ist eine Trockenperiode kritisch?

Aus hydrographischen Beobachtungen abgeleitete Indikatoren helfen den Beginn, die Intensität und das Ende einer Trockenheit zu definieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass kein einzelner Indikator alle Zusammenhänge und Auswirkungen ausreichend beschreiben kann. Das ist eines der Probleme, warum politische Entscheidungsträger, Ressourcenplaner und die Öffentlichkeit Schwierigkeiten haben eine Trockenheit rechtzeitig zu erkennen und notwendige Handlungsalternativen abzuleiten. Das macht den Unterschied zu anderen wasserbedingten Naturgefahren. Um mit Trockenperioden verantwortungsvoll umgehen zu können, sind eindeutige Merkmale notwendig, die den Beginn, das Ausmaß und die Dauer einer Periode mit Wassermangel festlegen.

In einer Studie von Donald A. Wilhite, Michael H. Glantz aus den frühen 1980er Jahren wurden mehr als 150 publizierte Definitionen zum Thema Trockenheit zusammengefasst. Die Ansätze unterschieden sich nach Regionen, der jeweiligen Fragestellung und der wissenschaftlichen Disziplin von der sie bestimmt wurden. Generell wurden 4 grundsätzliche Kategorien festgestellt: Meteorologie, Hydrologie, Landwirtschaft und die Sozioökonomie. Die ersten drei Kategorien behandeln die Trockenheit als ein mit Parametern zu messendes Phänomen. Der sozioökonomische Ansatz betrachtet die Trockenheit als Relation von Angebot und Nachfrage, die durch ein Wasserdefizit beeinträchtigt wird und sich wie eine Welle durch sozioökonomische Systeme bewegt.

Die *meteorologische Trockenheit* ist normalerweise ein Ausdruck der Differenz des Niederschlags vom Normalwert über einem Zeitraum. Diese Definitionen sind in der Regel regionspezifisch und basieren auf einem Verständnis der regionalen Klimatologie. Die Vielfalt der meteorologischen Definitionen aus verschiedenen Ländern zu verschiedenen Zeiten zeigt, dass es ein Irrtum wäre, eine Definition der in einem Teil der Welt entwickelten Trockenheit auf einen anderen anzuwenden:

- Vereinigte Staaten (1942:) weniger als 2,5 mm Regen in 48 Stunden
- Großbritannien (1936): 15 aufeinander folgende Tage mit täglichen Niederschlagssummen von weniger als 0,25 mm
- Libyen (1964): jährlicher Niederschlagssumme kleiner als 180 mm
- Indien (1960): saisonaler Niederschlag, wenn er sich um mehr als das Doppelte von der mittleren Abweichung unterscheidet;
- Bali (1964): eine Periode von sechs, aufeinander folgenden, niederschlagsfreien Tage

Landwirtschaftliche Trockenheit tritt auf, wenn es nicht genug Bodenfeuchtigkeit gibt den Bedarf einer besonderen Ernte zu einer bestimmten Zeit zu decken. Die landwirtschaftliche Trockenheit hat ihre Ursache in der meteorologischen Trockenheit und wird noch vor der hydrologischen Trockenheit wahrgenommen. Die Landwirtschaft ist normalerweise der erste von der Trockenheit beeinflusste Wirtschaftssektor.

Hydrologische Trockenheit bezieht sich auf einem Mangel im Wasservorkommen in Oberflächengewässern und im Grundwasser. Gemessen wird dieser Mangel in der Regel als Abweichung des Abflusses in den Gewässern, des Wasserstandes in Seen und Speichern und in reduzierten Grundwasserständen. Dabei ist eine Zeitverschiebung zwischen dem reduzierten Niederschlag in einer Periode, den Abflüssen unter einem Schwellwert und dem Erreichen von kritischen Grundwasserständen zu berücksichtigen.

Sozioökonomische Trockenheit tritt auf, wenn die Wasserknappheit beginnt, die Bevölkerung individuell und kollektiv zu betreffen. Die Nachfrage kann durch das Angebot nicht mehr gedeckt werden und beeinträchtigt so die wirtschaftliche und soziale Entwicklung einer Region.

Jede Unterteilung bzw. Definition ist einschränkend und befasst sich eigentlich nur mit einem Teil des Phänomens. Die genannten Typen können auch überlappend sein oder als Kombination auftreten. Notwendig ist es, zwischen Aridität und Trockenheit im Sinne von "drought" zu unterscheiden. Aridität führt immer mehr oder weniger einen permanenten Klimazustand mit sich, gefolgt von entsprechenden sich ändernden Landformen. Trockenheit im Sinne von "drought" ist ein temporärer Zustand, der in Klimazonen auftritt, wo der Niederschlag gewöhnlich für alle Bedürfnisse ausreichend ist.

2. Hydrologische Trockenheit in Österreich – Definitionen und Parameter

Für Österreich sollte man im Sinne einer Gesamterfassung des Phänomens „hydrologische Trockenheit“ ausgehend von Untersuchungen zu den Niederschlagsverhältnissen, schrittweise auch solche zu den Niederwasser- und zu den Grundwasserverhältnissen hinzunehmen. Keinesfalls sollte der Begriff „Dürre“ in diesem Zusammenhang verwendet werden.

In Anpassung an die Verhältnisse und Problemstellungen auf nationaler Ebene in Österreich hat das Hydrographische Zentralbüro für seine Auswertungen in den Beiträgen zur Hydrographie Österreichs eine „Trockenperiode“ so definiert, dass Beginn und Ende einer solchen durch einen Tag ohne Niederschlag bzw. ohne messbaren Niederschlag gekennzeichnet sind, die Zeitspanne zwischen Beginn und Ende durch Tagesniederschlagssummen von größer gleich 0,2 mm (Schwellwert) nicht unterbrochen wird und erst ab einer Dauer von sechs Tagen als solche gezählt wird. Alternativ dazu kann man als kürzeste Dauer einer Trockenperiode einen Tag nehmen, an dem ein vorgegebener Schwellwert des Niederschlags unterschritten wird.

Zweifellos ist Trockenheit ein wiederkehrendes Phänomen und eine integrale, wenn auch irreguläre Komponente des gegenwärtigen Klimas. Trockenheit ist daher immer

aus verschiedenen Richtungen zu beschreiben, ohne jemals alle Gesichtspunkte gleichzeitig vollständig beleuchten zu können.

Fragen zu Niederwasser und Trockenheit müssen auch mit den gewässerkundlichen Basiskenngrößen (z.B. ÖNORM B 2400, 2003) punktuell sinnvoll zu beantworten sein. An einfachen hydrographischen Kenngrößen bieten sich dabei u.a. an:

- Niederschlagssummen unterschiedlicher Dauer im Verhältnis zu Reihenwerten;
- Auswertungen von Trockenperioden mit unterschiedlichen Schwellenwerten;
- Abflusskennzahlen wie NQ ; NQ_T ; MNQ ; MNQ_T ; NMQ_{nT} ; MQ_{Monat} ;
- Kennwerte aus der Dauerlinie wie $Q_{95\%}$;
- Niederwasserperioden unterhalb ausgewählter Schwellenwerte (z.B. $< MNQ_T$);
- Grundwasserstandskenngrößen wie NGW, MGW.

Als Kenngröße zur Beschreibung der Niedrigwasserverhältnisse ist dem Wert NMQ_{nT} gegenüber dem absolut tiefsten Tagesmittel bzw. geringsten Momentanwert der Vorzug zu geben. Das jährlich geringste Tagesmittel über n-Tage ist – vor allem im Niederwasserbereich, wo Messfehler relativ groß sein können – weniger fehleranfällig. Die Kenngröße NMQ_{nT} wird darüber hinaus auch in vielen Niedrigwasserstudien verwendet (Weingartner, 2007). Damit sollen für ein exemplarisch gewähltes Gebiet an ausgewählten Messstellen Aussagen über eine Zeitreihe und darin enthaltene Trockenjahre gemacht werden können.

Weiterführende Untersuchungsmethoden könnten sodann u.a. sein:

Anpassung von theoretischen Verteilungsfunktionen an die jeweils betrachteten Stichproben, auch u.U. unter Berücksichtigung von Erhaltungsneigungen;

- Extremwertstatistik;
- Zeitreihenanalysen bis hin zur Spektralanalyse;
- Regionalisierungsverfahren.

3. Extreme Trockenheit in Österreich

3.1 Trockenperioden

Eine umfassende Beschreibung der Trockenperioden in Österreich findet sich bei Nobilis (1985). Dort wird auch auf die im Phänomen enthaltene Erhaltungsneigung sowie auf die mathematische Darstellung solcher Folgen eingegangen. Für extreme Trockenperioden wird die Anwendung der generalisierten Extremwertverteilung (GEV) empfohlen. Die Homogenität dieser Reihen (SNEYERS-Test) sind zu prüfen und die Spektralanalyse zur Ermittlung von zyklischen Periodizitäten anzuwenden.

Der zunehmenden Bedeutung der Trockenheit für die Hydrologie und Wasserwirtschaft wurde auch im Hydrologischen Atlas von Österreich mit der Karte 2.9 (Dauer

von Trockenperioden) Rechnung getragen (Nobilis und Weilguni, 2003), dessen Entstehung von der Idee bis zum Produkt bei Fürst et al. (2005) beschrieben ist.

Untersuchungen über extreme Trockenperioden im Sinne der oben gegebenen Definition mit Schwellwert (0,2 mm) liegen für über 500 Stationen in Österreich vor (Nobilis, 1980). Für diese Stationen wurden, nach Flussgebieten differenziert, u.a. das absolute Maximum und der Mittelwert auf Jahresbasis bestimmt. In einer weiteren Untersuchung (Nobilis, 1985) erfolgte eine Ergänzung in Form von Auswertungen für die Vegetationsperiode (April bis September).

Für die mittleren extremen Trockenperioden im Jahr zeigte sich, dass die im Mittel längsten Dauern i.a. im Draugebiet mit über 25 Tagen auftreten. Die absolut längsten extremen Trockenperioden sind dort mit über 60 Tagen beobachtet worden. Bei Beschränkung auf die Vegetationsperiode zeigt sich ein augenfälliger Unterschied zum Kalenderjahr. Die längsten mittleren extremen Trockenperioden in der Vegetationsperiode treten mit einer Dauer von über 16 Tagen im Weinviertel und im Wiener Becken auf. Die absolut längsten sind in der Vegetationsperiode im Marchgebiet mit über 60 Tagen beobachtet worden, in anderen Gebieten erreichen sie maximal 40 Tage. Die Höhenabhängigkeit der extremen Trockenperioden ist nur schwach. Bei der extremwertstatistischen Untersuchung zeigte sich, dass bei einer Beobachtungsreihe von 70 Jahren die absolut längste Trockenperiode etwa einem 100jährigen Ereignis entspricht. Für Kalenderjahr/Vegetationsperiode ergaben sich z.B. für Murau 48/29 Tage, für Luggau 51/26 Tage und für Kremsmünster 42/26 Tage.

3.2 Trockenjahre

Auswertungen für die Zeit nach 1961 weisen folgende Besonderheiten auf: Betrachtet man die Jahresniederschlagssummen in Österreich seit 1961 in Prozent des Mittelwertes der Reihe 1961-1990, so fallen hier die Jahre 1971 und 2003 mit weniger als 85 % des Normalwertes besonders heraus. Das letztere wird in einem eigenen Kapitel detaillierter behandelt. Auf 1971 und einige andere Jahre wird im Folgenden kurz eingegangen:

1971: Die hydrographische Charakteristik weist unternormale Jahresniederschläge an fast allen Stationen aus. Betrachtet man die Monate, so zeigt sich im Mittel über alle Flussgebiete, dass lediglich im Juni ein schwach überdurchschnittliches Niederschlagsdargebot (118 %) und in den Monaten August und November genau 100 % gegeben waren, in allen anderen Monaten die Normalwerte wesentlich (Jänner mit 26 %, Oktober 37 %) oder beträchtlich (50 bis über 80 %) unterschritten wurden. Die Jahreskleinstabflüsse zeigten eine starke zeitliche Streuung. Einige Flüsse in den Niederungen in Niederösterreich und im Raab- und Rabnitzgebiet verzeichneten ihre Niederstabflüsse schon im August und September (March, Leitha). An der Mur und an der Drau traten sowohl der November als auch der März mit extremen Niederwasserführungen in Erscheinung. Die Jahresmittel der Grundwasserstände lagen in den erfassten Flachgebieten ausnahmslos unter den mehrjährigen Durchschnittswerten.

1983: Obwohl nicht auffällig in der Jahresniederschlagssumme von Österreich, war z.B. der Oktober/November in der Steiermark extrem trocken (NOBILIS, 1985). Für das Steirische Enns-, Mur- und Raabgebiet dauerte die längste Trockenperiode bis zu maximal 40 Tage. Dies bedeutete 10 bis über 50jährige Ereignisse.

1992/1993: Die Jahressummen der Niederschläge lagen 1992 und 1993 im üblichen Rahmen. Die jahreszeitliche Verteilung zeigte aber in diesen Jahren unterdurchschnittliche Niederschlagsmengen bis zum Herbst. Besonders betroffen war die Steiermark (Harum et al, 1995), wo Schäden in der Landwirtschaft durch die sehr niedrigen Grundwasserstände verursacht wurden. Neben den klimatischen Verhältnissen waren die örtlich geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse von größter Bedeutung, die mittleren Abflüsse und auch die $Q_{95\%}$ -Abflüsse an den Pegeln zeigten keine Auffälligkeiten.

3.3 Niedrigwasser an der Donau

Wie für keinen anderen Pegel in Österreich, gibt es eine vollständige Datenreihe der Durchfluss-Tagesmittelwerte der Donau bei Wien. Auf Grund des Abflussregimes war die Donau in den letzten 100 Jahren fast ausschließlich im Winter und im Herbst von Niedrigwasserführungen betroffen. Die Abbildung 1 zeigt die Periodendauer mit einer Unterschreitungsdauer des mittleren NMQ_{nT} der Jahre 1900-2003 unterschieden nach der Jahreszeit des Auftretens. Die längste Niedrigwasserperiode von 94 Tagen wurde im Herbst 1908 beobachtet. Mit 77 bzw. 76 Tagen folgen der Winter 1954 und der in ganz Europa bemerkenswerte Herbst 1947.

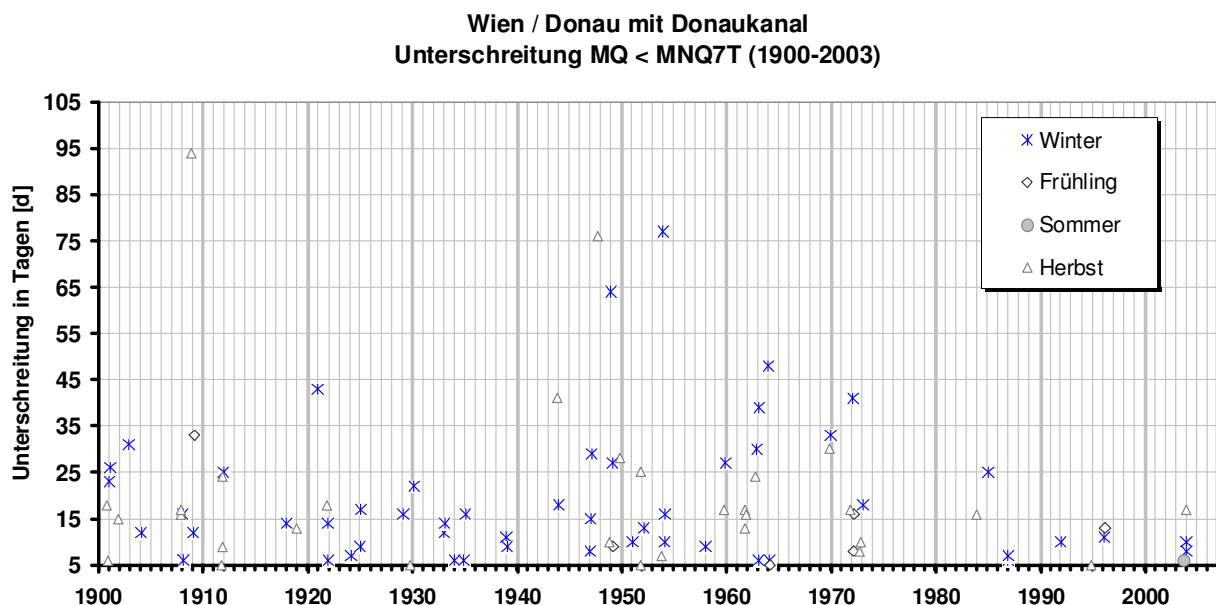


Abb. 1: Niedrigwasser an der Donau - Periodendauer der Unterschreitung des Schwellenwertes in Tagen

Der Frühling 1909 fällt mit einer Periode von 33 Tagen auf, die wenigen anderen Niederwasserführungen in dieser Jahreszeit unterschreiten den Schwellenwert selten länger als 15 Tage. Der Sommer 2003 kommt als erster Sommer mit einer Unterschreitung von 6 Tagen vor.

Die Niederwasserperioden in den Monaten Juli bis Dezember sind an der Donau stabiler und halten länger an als jene von Jänner bis Juni. Betrachtet man die Jahressganglinien der letzten 100 Jahre, so bestimmen die Jahre 1908, 1947 und 2003 die jeweils kleinsten in dieser Zeit gemessenen Tagesmittelwerte. Das Jahr mit dem niedersten Jahresmittelwert ($1402 \text{ m}^3/\text{s}$) war 1972. Im Jahr 1971 – jenes mit der geringsten Niederschlagssummen in Österreich seit 1951 – war das Jahresmittel am Pegel Wien/Donau mit $1430 \text{ m}^3/\text{s}$ nur unwesentlich größer, obwohl an keinem Tag in diesem Jahr ein Minimum der Aufzeichnungen seit 1900 beobachtet wurde.

3.4 Das extrem trockene Jahr 2003

Auf die außergewöhnliche Stellung des Jahres 2003 wurde bereits hingewiesen. Da die Trockenheit 2003 durch Ernteausschlag, durch Reduktion der Stromproduktion aus der Wasserkraft und durch Probleme in der Trinkwasserversorgung Schäden in der Größe der Hochwasserschäden 2002 verursacht hatte, hat die Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt (HZB) des BMLFUW einen umfassenden Bericht über die hydrometeorologischen und hydrologischen Besonderheiten dieses Jahres veröffentlicht (Eybl et al., 2005). Wesentliche Ergebnisse dieser Arbeit werden im Folgenden zusammengefasst.

3.4.1 Die hydrometeorologischen Verhältnisse 2003

Die Niederschlagssumme 2003 betrug weniger als 80% vom Normalwert 1961-1990. Im äußersten Osten um den Neusiedlersee und im Südosten um Bad Radkersburg war das Defizit mit Werten von 30 bis 50 % vom Normalwert noch größer. Die Niederschläge in Teilen Kärntens, Salzburgs und Tirols entsprachen – auf das Jahr bezogen – etwa den Normalwerten.

Die Niederschlagswerte in den Monaten Mai bis August, die etwa auf 25 bis 30 % der Landesfläche im Bereich der Normalwerte oder darüber lagen und im Rest des Landes bei etwa 70 %, haben kaum eine Minderung der Trockenheit bewirkt, da sie sich oft aus kurzzeitigen, intensiven Starkniederschlägen ergaben, die manchmal mehr Schaden (z.B. Vermurungen) als Nutzen (Auffüllen der Grundwasserspeicher) verursachten. Bei gleichzeitig hohen Temperaturen – wie sie im Sommer 2003 vorlagen – verdunstet der gefallene Niederschlag großteils unmittelbar und ist daher kaum nachhaltig Abfluss bildend.

Das Salzachgebiet, der Norden und Osten des Landes wurden im September normal bis leicht normal überregnet. Der Westen bis in das westliche Oberösterreich wies jedoch weiterhin ein Defizit an Niederschlag auf. Im Süden war der September trocken. So fielen im Draugebiet nur ca. 50 % des zu erwartenden Niederschlags. Erst der Oktober brachte Niederschlag, z.T. weit über dem Normalwert, der sich abmindernd auf das Niederschlagsdefizit auswirkte. Der November war bis auf den

Süden niederschlagsarm, ebenso der Dezember, der bis auf den Osten und Nordosten Österreichs, wo annähernd normale Niederschlagsmengen fielen, nur ca. 70 % der Normalwerte aufwies.

3.4.2 Abflussverhältnisse

Die lange Trockenheit im Jahr 2003 zeigte in allen Flussgebieten Österreichs Auswirkungen, die jedoch je nach Lage, Vorgeschichte, Einzugsgebietseigenschaften und Beeinflussungen unterschiedlich waren. Besonders betroffen waren die Gewässer im mittleren und südlichen Burgenland sowie in der südlichen und südöstlichen Steiermark. Dort wurden bereits seit 1999 Niederschlagsdefizite beobachtet, die in den Jahren vor 2003 zu extremen Niederwasserabflüssen und außergewöhnlich niederen Grundwasserständen führten. Angespannt war die Situation aber auch im nördlichen Flachgau, in Teilen des Innviertels und der Donauzwischen-einzugsgebiete, im Mühl- und Waldviertel, an den südlichen niederösterreichischen Donauzubringern sowie im Wienerwald. Einige kleinere Fließgewässer fielen sogar trocken.

Eine Abmilderung der Trockenheit gab es vor allem in jenen Einzugsgebieten, die durch Gletscher, hohe Grundwasserstände (z. B. Gebiete der Mattig sowie der unteren Leitha) und durch Speicherbewirtschaftung beeinflusst waren. Aber auch im sonst eher trockenen Weinviertel fiel die Trockenperiode im Jahr 2003 vergleichsweise weniger extrem aus.

In den alpinen, nicht vergletscherten Einzugsgebieten wurden die Abflüsse im Mai und Juni noch von der Schneeschmelze geprägt. Während der sich anschließenden Trockenperiode wurden in diesen Einzugsgebieten von Juli bis September vielfach die saisonal, teilweise auch die absolut niedersten Tagesmittelwerte seit Beobachtungsbeginn erreicht. Erst die Niederschläge im Herbst (September, oft erst im Oktober) führten wieder zu einer Anhebung des Abflussniveaus.

Die Abflüsse aus den vergletscherten Einzugsgebieten profitierten in den Sommermonaten von der starken Gletscherschmelze. Selbst die größeren Talflüsse wie Inn, Salzach oder Drau wiesen während des Höhepunktes der Trockenheit im August 2003 trotz des Niederschlagsdefizits Abflüsse im Bereich der langjährigen Mittelwerte auf. Die Auswirkungen waren zum Teil bis ins Alpenvorland spürbar.

Die nicht alpinen Einzugsgebiete im Norden, Osten und Süden Österreichs waren in der Regel von einer längeren und ausgeprägteren Trockenperiode betroffen. Sie begann vielfach ab April, im Süden und Südosten Österreichs sogar schon ab Jänner oder Februar und dauerte bis Jahresende an. Hier brachten die Niederschläge im Herbst keine Erholung der Abflusssituation. Häufig wurden die tiefsten Werte seit Beginn der Aufzeichnungen erreicht und unterschritten.

Die Besonderheit der Trockenheit 2003 wurde auch im Hydrologischen Atlas Österreichs berücksichtigt. Die Karte 5.8 zeigt eine regionalisierten, flächenhaften Darstellung der „Niederwasserspenden“ q₉₅%. Diese langjährigen Mittelwerte wurden mit dem Extremjahr 2003 verglichen (Laaha, 2007).

3.4.3 Einordnung des Niederwasserjahres 2003

Die Einordnung eines Niederwasserereignisses nach hydrologisch-statistischen Methoden ist ungleich schwieriger als die Einschätzung eines Hochwasserereignisses, das in der Regel zeitlich klar abgegrenzt und einem bestimmten Niederschlagsereignis zugeordnet werden kann. Die absoluten Niederwasserführungen an den Pegeln sind als Kenngröße nur bedingt heranzuziehen, da die Daten an kleinen Gewässern oft anthropogen beeinflusst sind und bei natürlichen Pegelprofilen der Fehler der Wasserstands-Durchflussbeziehung (Pegelschlüssel) im Bereich des absoluten Minimums der Wasserführung beträchtlich sein kann. Im Vergleich zu dokumentierten Hochwasserreihen gibt es für die Niederwasseranalyse weniger lange Zeitreihen mit zuverlässigen Daten. Zur statistischen Analyse wurde daher das NMQ_{7T} – das niedrigste arithmetische Mittel des Durchflusses an sieben aufeinander folgenden Tagen – verwendet.

Tab. 1: Auftrittswahrscheinlichkeit der NMQ_{7T} – Minima 2003 in Jahren.

Messstelle	Gewässer	NW-Regime	Land	NMQ_{7T}		NMQ_{7T}	
				[a]		[a]	
				Jahresreihe		August	
				von	bis	von	bis
Rattersdorf	Güns	So,Wi,He	Bgl	50	60		60
Dobersdorf	Lafnitz	So	Bgl		> 1000		> 1000
Heiligenbrunn	Strem	So	Bgl		150		150
Zell	Glan	So	Ktn	10	15	20	25
Brückl	Görtschitz	Wi	Ktn	15	20		> 100
Krottendorf	Lavant	Wi	Ktn		20	150	200
Federaun	Gail	Wi,He	Ktn	15	20	150	200
Gumisch	Gurk	Wi,So	Ktn		100	100	150
Zwettl	Kamp	So,He	Noe	10	15	75	100
Angern	March	So,He	Noe		100	100	125
Opponitz	Ybbs	He,Wi	Noe		60	75	100
Wien	Donau	Wi	Noe	2	5	80	100
Lilienfeld	Traisen	Wi,He	Noe	5	10	50	100
Obertraun	Traun	Wi,He	Ooe		< 5	75	100
Haging	Antiesen	Wi,So,He	Ooe	5	10	60	100
Pergern	Steyr	Wi,He	Ooe	5	10	150	200
Salzburg	Salzach	Wi	Sbg	1	5	20	50
Fluttendorf	Gnasbach	So	Stmk		100		> 100
Voitsberg	Kainach	Wi,So	Stmk	5	10		100
Bruck/Mur	Mur	Wi	Stmk		1	100	150
Leibnitz	Sulm	Wi,So,He	Stmk		10	25	50
Feldbach	Raab	Wi,So,He	Stmk	100	150	100	150
Liezen	Enns	Wi	Stmk	2	5		200
Innsbruck	Inn	Wi	Tir	3	5	5	10
Kennelbach	Bregenzrach	Wi,He	Vbg	30	40		> 1000

Die Wahrscheinlichkeitsanalyse wurde mit einem extremwertstatistischen Programm durchgeführt und dazu der Reziprokwert der NMQ_{7T} -Werte verwendet. Die Anpassung an eine theoretische Verteilungsfunktion erfolgte graphisch. Dabei zeigte sich, dass die Datenkollektive der untersuchten 21 Messstellen bis auf wenige Ausnahmen mit der „log Pearson III“ – bzw. mit der „generalisierten Extremwertverteilung GEV“ – extremwertstatistisch beschrieben werden konnten. Zur Berechnung wurden die vorhandenen Tagesmittelwerte der Reihe von 1951 bis 2003 verwendet. Betrachtet man die Ergebnisse der Berechnung mit der Jahresreihe (der kleinste NMQ_{7T} -Wert jedes Jahres, unabhängig vom Zeitpunkt seines Auftretens) so ergeben sich sehr unterschiedliche Jährlichkeiten von $n=1$ bis > 1000 Jahren (siehe Tabelle 1).

Bezogen auf den Monat August, in dem an den meisten Gewässern im Jahr 2003 der Höhepunkt der Trockenwetterperiode beobachtet wurde, liegt die Jährlichkeit der Niederwasserperiode 2003 hingegen in ganz Österreich in der Größenordnung zwischen $n=100$ und $n=200$. An zwei Pegeln – Dobersdorf/Lafnitz und Kennelbach/Bregenzerach – ist der NMQ_{7T} -Augustwert mit den genannten theoretischen Verteilungen nur sehr schwer einzuschätzen und als „Ausreißer“ bzw. als ganz seltenes Ereignis mit $n > 1000$ einzustufen.

3.4.4 Die Grundwasserverhältnisse 2003

2003 war für sämtliche österreichische Grundwassergebiete ein Jahr der Extreme. In fast allen Grundwassergebieten, mit Ausnahme jener in der Steiermark und des Burgenlandes, wurden in Folge des Hochwassers im August bzw. der intensiven Niederschläge im Herbst 2002 neue Maxima für den Monat Jänner gemessen, mancherorts auch noch für die Monate Februar und März. Andererseits wurden in ganz Österreich - je nach Gebiet unterschiedlich zwischen April und Dezember - neue Monatsminima oder Werte im Bereich der bisher gemessenen Monatsminima registriert. Die Ganglinie nahm oft nicht den üblichen jahreszeitlichen Verlauf, sondern zeigte zwischen den beiden Extremen ein kontinuierliches Absinken. Im Burgenland und in der Steiermark lagen zu Beginn des Jahres die Grundwasserstände infolge der seit 2001 anhaltenden trockenen Witterung meist unter dem langjährigen Mittelwert.

Lokal starke Niederschläge im Herbst führten in Tirol, in Kärnten, der Steiermark und dem Burgenland in Einzelfällen zu extremen, aber immer nur kurzfristigen Anstiegen. So waren die Grundwasserstände am Ende des Jahres nahezu flächendeckend wieder unterdurchschnittlich oder im Bereich des Minimums.

4. Trends bei extremen Niederwasserperioden

Im Zusammenhang mit der Frage Klimaänderung und deren Auswirkung auf hydrologische Kennwerte wurde die Entwicklung der NMQ_{7T} -Werte über den Zeitraum 1951 bis 2003 untersucht. Für die niedersten jährlichen NMQ_{7T} -Werte in jedem Monat wurde eine Trendanalyse durchgeführt.

Tab. 2: Ergebnisse der Trendberechnung, Signifikanzniveau 5% (---,+++), 10% (--,++) und 20% (-,+)

Messstelle	Gewässer	Land	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Rattersdorf	Güns	Bgl			-	--		--	--	-				
Dobersdorf	Lafnitz	Bgl			---			--	---	-			-	
Heiligenbrunn	Strem	Bgl	++									+++		
Brückl	Görtschitz	Knt	+				-	---	-					
Federaun	Gail	Knt				---	---	---	---	--	-			
Krottendorf	Lavant	Knt		-	--	--	---	---						
Zell	Glan	Knt		--	---	---	---	---	---	---	--			
Gumisch	Gurk	Knt			--	---	--	---	--	--				
Zwettl	Kamp	Noe						--	-					
Angern	March	Noe							--	--				
Singerin	Schwarza	Noe	+++	++	++						+++	+++	++	+
Dtsch.-Brod	Leitha	Noe											--	-
Opponitz	Ybbs	Noe		++	+			-	---	---				
Lilienfeld	Traisen	Noe	+	+	+		-		-	-				
Obertraun	Traun	Ooe	+++	+++	++		+++		--		+++		++	+++
Pergern	Steyr	Ooe							---	---		+		
Haging	Antiesen	Ooe				--	---	---	---	---	---	--		
Salzburg	Salzach	Sbg	++	++			+	---	---		+			+
Feldbach	Raab	Stmk		-	---	-			-			+		
Bruck	Mur	Stmk		++				---	-			+++	+++	+++
Leibnitz	Sulm	Stmk			---		--	---	---			+		
Voitsberg	Kainach	Stmk			---	--	---	---	-					
Fluttendorf	Gnasbach	Stmk												
Liezen	Enns	Stmk							--		++	++		
Innsbruck	Inn	Tir	+++	+++	+++	+++	+++					+++	+++	++
Steeg	Lech	Tir	+++	+++	+++		+++					+	+++	+++
Vent	Röfenache	Tir	+++	+++	+++	+	+++	+++	+++	+++			+++	+++
Kennelbach	Bregenzerache	Vbg			+	---		-	-					
Hainburg	Donau	WSD	++	+				-	---	---			+	
Wien	Donau	WSD	++	+				--	---	---			+	+

Die Neigung des linearen Trendverlaufes wurde durch den t-Test auf seine Signifikanz untersucht. Besonders an den Messstellen im Süden Österreichs (Kärnten und Steiermark) zeigt sich eine Abnahme der saisonalen Niederwasserabflüsse im Frühling und im Sommer. Eine Reduktion der NMQ_{7T} -Abflüsse ist aber auch an einigen Messstellen in Oberösterreich (Steyr und Antiesen) und an der Salzach zu erkennen. Die jährlichen NMQ_{7T} -Extremwerte zeigen keine derartig signifikante Reduktion im Verlauf der Untersuchungsperiode, was mit einem leichten Anstieg der Wasserführungen in den Winter- und Herbstmonaten erklärt werden kann.

Messstellen, deren Abflussregime durch Gletscher beeinflusst ist, zeigen ein wesentlich anderes Bild. Der Grund dafür ist der Anstieg der Lufttemperatur – vor allem in den Sommermonaten – und die damit verbundene erhöhte Gletscherschmelze, die für genügend Abfluss aus dem Einzugsgebiet auch bei niederschlagsfreien Perioden sorgt. Die Zunahme der Niederwasserabflüsse am Pegel Innsbruck/Inn, vor allem im Winter, zeigt, dass zusätzlich zum erhöhten Gletscherabfluss die Umlagerung der Abflüsse vom Sommer in den Winter durch den Speicherbetrieb das Niederwasserregime beeinflussen kann.

Betrachtet man die Donau, so zeigen die untersuchten Pegel Kienstock und Wien ein einheitliches Bild. Die NMQ_{7T} -Jahresminima ergeben einen signifikanten Anstieg, die Minima in den Monaten Juni, Juli und August eine ebenso signifikante Reduktion der Niederwasserführung, die durch eine mehr oder weniger starke Erhöhung im Winter kompensiert wird (siehe Abbildung 2). Tabelle 2 stellt die Ergebnisse der Trendberechnung für alle untersuchten Messstellen dar.

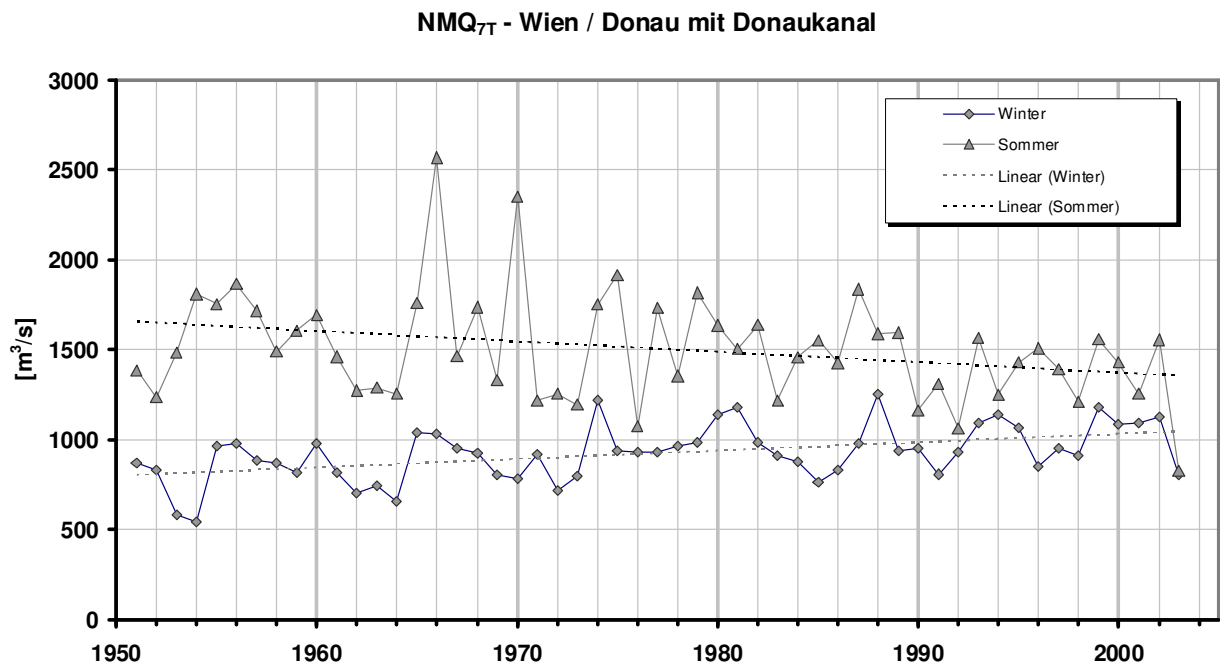


Abb. 2: Verlauf der NMQ_{7T} - Jahresminima am Pegel Wien / Donau

Diese Tendenz entspricht auch einem Ergebnis, dass im Hydrologischen Atlas Österreichs mit der 3. Lieferung 2007 enthalten ist. In drei Kartentafeln des HAÖ werden die saisonalen Trends in der Wasserbilanz, speziell für den Niederschlag, den Abfluss und die Speicheränderung behandelt (Fürst et al. 2007). Die Karten zeigen, dass deutliche jahreszeitliche und regionale Unterschiede im Trendverhalten festzustellen sind. Eine signifikante räumliche Grenze bildet der Alpenhauptkamm. Während die Niederschläge nördlich der Alpen insbesondere im Herbst stark zu- und im Sommer abnehmen, ist der Süden, speziell Kärnten, fast durchgehend von einer Abnahme der Niederschläge betroffen. Die Trends in den Niederschlägen erklären auch entsprechende Trends in den Abflüssen. Saisonale Verschiebungen zwischen den Veränderungen von Niederschlag und Abfluss werden durch Karten der Trends in der jahreszeitlichen Speicheränderung erklärt.

Auf Grund des Klimawandels wird erwartet, dass im Winter mehr Niederschläge in Form von Regen fallen werden. Dem entspricht bereits jetzt die Darstellung der saisonalen Trends im Abfluss, die zwar eine Zunahme der Abflüsse nördlich des Alpenhauptkammes im Winter zeigt aber in der Wasserbilanz im Winter einen Rückgang der gespeicherten Wasservorräte erkennen lässt. Die Abflüsse im Süden und Osten Österreichs, sowie im Weinviertel sind in den letzten 50 Jahren in allen Jahres-

zeiten weniger geworden. Die Abflüsse im Sommer haben sich - mit Ausnahme einiger Gebiete in Tirol und Niederösterreich - im gesamten Bundesgebiet leicht verringert.

Die Anzahl der Tage mit einer Unterschreitung eines vorgegebenen Schwellenwertes ist ein weiteres Merkmal zur Charakterisierung einer Trockenperiode. Um dazu eine Aussage machen zu können, wurde die Unterschreitungsdauer mit dem Schwellenwert $MNMQ_{7T}$ der Reihe 1951 bis 2003 an Pegeln der am stärksten von der Trockenheit 2003 betroffenen Gebiete bestimmt. Die Pegel in der Oststeiermark und im südlichen Burgenland zeigen in den Jahren 2001 bis 2003 ausgeprägte Niederwasserführungen, vor allem im Sommer 2001, im Winter 2001/2002 und vom April bis Dezember 2003, mit maximalen Unterschreitungsperioden im Sommer von über 40 Tagen. Die Maxima vor 2000 betragen in diesen Gebieten im Mittel 15 – 25 Tage. Zum Beispiel betrug am Pegel Dobersdorf/Lafnitz die mittlere maximale Dauer der Unterschreitung im Zeitraum 1951 bis 2000 7 Tage. Im Sommer 2001 und 2003 hingegen wurde der Schwellenwert an 54 bzw. 43 Tagen unterschritten. Die absolut längste beobachtete Periode ereignete sich im Winter 2001/2002 mit einer Dauer von 167 Tagen.

Die Abflüsse der Donau bei Wien unterschritten den Schwellenwert $MNMQ_{7T}$ vor 2003 an durchschnittlich 15 Tagen ausschließlich im Herbst und im Winter. Erstmals wurde dieser Schwellenwert 2003 auch im August an ca. 6 aufeinander folgenden Tagen unterschritten. Auffallend auch die Bregenzerache beim Pegel Kennelbach. In der Regel hat die Bregenzerache wie die Donau ein Herbst/Winter-Niederwasserregime. Der Schwellenwert im August 2003 wurde jedoch an 30 Tagen unterschritten. Die Gewässer des Alpenvorlandes – Traun, Enns, Ybbs und Traisen – zeigen keine auffälligen Abweichungen 2003 in der Dauer der Unterschreitung.

5. Trends bei extremen Trockenperioden

Für das steirische Mur-, Enns- und Raabgebiet liegen Ausarbeitungen bezüglich Trends bei den extremen Trockenperioden (1901-1980) bereits vor (Nobilis, 1985 und 1986): Die Kollektive von 48 Stationen (Schwellwert 0,2 mm Niederschlag) wurden mit den damals vorliegenden Daten mit dem SNEYERS-Test hinsichtlich Trend untersucht. Fasst man die Resultate für die Jahresserien zusammen, zeigt sich eine Tendenz zu kürzeren Perioden. Zwischen 1910 bis Mitte der Zwanzigerjahre findet man eine Tendenz zu längeren Perioden und dann bis 1940 eine solche zu kürzeren. Darauf folgend fluktuieren die Werte bis 1980. In der Vegetationsperiode war der Trend zu kürzeren Perioden, der nach 1950 begann, in einigen Fällen auf dem 5%-Niveau signifikant.

Im Hinblick auf die extremen Verhältnisse des Jahres 2003 wurden zusätzlich Untersuchungen an 24 Stationen (1971-2003) im Rheingebiet, im Inngebiet unterhalb der Salzach, dem Traun- und Ennsgebiet, dem Donaugebiet zwischen Enns- und March und dem March-, Rabnitz-, Raab-, Mur- und Draugebiet gemacht. Eine Untersuchung auf linearen Trend zeigte nur bei 10 Stationen signifikante Resultate (Schwellwert 0,2 mm). Untersuchungen für höhere Schwellenwerte (1 und 5 mm) ergaben rasch

wachsende Dauern und z.T. Resultate, die derzeit nicht interpretierbar sind. Lediglich bei 6 der untersuchten Stationen kann ein Trend zu kürzeren extremen Trockenperioden im Jahr oder in der Vegetationsperiode vermutet werden. Es sind dies Obertauern/Traun, Molln/Steyr, Zwettl-Edelhof/Kamp, Dürnkrot/Waidenbach (March), Hochstraß/Rabnitz und Maria Lankowitz/Teigitsch (Mur). Die längste Trockenperiode im Jahr 2003 an diesen Stationen war 14/14/18/20/18/34 Tage und in der Vegetationsperiode 10/10/15/12/12/13 Tage. Diese Werte für 2003 liegen verglichen mit den Reihenjährextremen mit 37/31/33/35/51/42 Tagen bzw. den Vegetationsperiodenextremen mit 28/17/33/31/44/20 Tagen zum Teil wesentlich darunter. Aus dieser Untersuchung kann jedenfalls die Bedeutung des Jahres 2003 nicht unterstrichen werden, auch die Wahl anderer Schwellwerte ließ keine bestätigenden Aussagen zu.

6. Internationale Aktivitäten zur Trockenheit

Die Meteorologische Weltorganisation hat sich schon seit Jahren mit der weltweiten Frage des Zusammenhangs zwischen Klima, Trockenheit und Versteppung beschäftigt (z.B. WMO, 1998). Diese Fragen, die im Hinblick auf die mögliche Versteppung eine eminent politische Bedeutung erlangen, haben die Europäer bis vor kurzem kaum interessiert. Die Meinung, auf unantastbaren „Wasserschlossern“ zu sitzen, musste in den vergangenen Jahren revidiert werden. Aktivitäten im Rahmen der WMO betrafen das Monitoring und die Einschätzung von Trockenheiten und Versteppungstendenzen sowie die Unterstützung in der Anwendung von meteorologischen und hydrologischen Daten für diesen Zweck. Eine der letzten Publikationen (WMO, 2000) beschäftigte sich ausschließlich mit Frühwarnsystemen für Trockenheit und dem Management dieser Größe. Hier finden sich Berichte und Untersuchungen betreffend die USA, Australien, Länder in Afrika und Südamerika, China, Indien und (erstmalig) von einem europäischen Land (Ungarn).

Die Trockenheiten, zuletzt 2003, die eine Reihe von Ländern in Europa betrafen, haben auch die volkswirtschaftlichen Verluste aufgezeigt und Initiativen zur Einschätzung und Bewertung von drought im Sinne extensiver Trockenheit unterstützt. Auf der Basis von FRIEND (Flow Regimes from International and Experimental Network Data) im Rahmen des Internationalen Hydrologischen Programms (IHP) der UNESCO konnten Studien betreffend die meteorologischen, hydrologischen und hydrogeologischen Aspekte (Demuth und Stahl, 2001) von extensiver Trockenheit durchgeführt werden. Speziell für Europa startete die EU ein Forschungsprogramm ARIDE (Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe). ARIDE verwendete Daten von über 5000 Abflussmessstellen in Europa. Ein entsprechendes drought model für Europa wurde entwickelt. Ziel ist ein elektronischer Drought Atlas, mit dem Trockenheit in diesem Sinn rasch eingeschätzt werden kann. Dazu kann auch WHYCOS der WMO verwendet werden, wo punktuell Daten über Satelliten aktuell als Basis verwendet werden können. Dieses WHYCOS, das weltweite Erfassungssystem des hydrologischen Kreislaufs, muss allerdings durch bestehende Netze verdichtet werden und ist auf Einzugsgebietsbasis konzipiert. Versuche zu einem

Danube-HYCOS sind schon einmal gescheitert, sollten aber auf Grund der aktuellen Dringlichkeit von der Arbeitsgruppe für Hydrologie von Europa bei der WMO wieder aufgenommen werden. In die Aktivitäten der UNESCO sind nämlich vor allem wissenschaftliche Institutionen eingebunden, zu betreiben sind solche Systeme aber von den operationellen hydrologischen Diensten, die im Rahmen der WMO zusammenarbeiten. WHYCOS erlaubt aktuell die Bestimmung verschiedener Trockenheitsindices, die mit einem dynamischen GIS namens ELECTRA die Visualisation der Gebiete, die in Europa von extensiver Trockenheit bedroht sind ermöglicht. Das ist die Basis für eine spätere Vorhersage des Phänomens. Auch ein sogenanntes „policy paper“ wurde im Hinblick auf drought von EurAqua entwickelt. Dies ist ein freiwilliger Arbeitskreis interessierter Institutionen im Rahmen der EU.

7. Zusammenfassung

Die Behandlung der Trockenheit im Sinn der meteorologischen Definition für "dry spell" hat eine lange Tradition in Österreich. Ebenso sind die Auswertungen des Hydrographischen Dienstes in Österreich ab 1893 geeignet, die hydrologischen Aussagen für eine Kennzeichnung im Sinne von "drought", die für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft bedrohlich sein kann, zu schaffen. Ein gutes Beispiel dafür ist das Jahr 2003 das nach vielen Merkmalen hin auf solche Aussagen analysiert wurde. Auch sind extremwertstatistische Aussagen über die Einschätzung der extremen Trockenperioden der Niederwasserkenngößen und zusätzlich solche über Niederwasserperioden bei vorgegebenem Schwellwert gemacht worden, die, nicht zuletzt auf Grund der extremen Schadenssummen in der Landwirtschaft, der Energiewasserwirtschaft u.a.m. die Einschätzung des Jahres 2003 im Sinne einer "regional hydrological drought" nahe legen. Trendanalysen bei den extremen Trockenperioden bis zum Jahr 2003 weisen auf eine Verkürzung dieser Perioden hin und lassen keine Aussagen über eine Zunahme der (meteorologischen) Trockenheit nach dieser Definition zu. Die Niedrigwasseranalysen ergeben am Beispiel des NMQ_{7T} Kennwertes seit Beobachtungsbeginn - vor allem an den Gewässern im Süden Österreichs - eine Abnahme der saisonalen Niederabflüsse im Frühling und im Sommer. Eine erste Analyse der Unterschreitungsdauer eines vorgegebenen Schwellenwertes zeigt, dass ebenfalls im Süden Österreichs die Trockenheit 2003 Niederwasserperioden verursacht hat, die bisher vor allem im Sommer noch nicht beobachtet wurden.

8. Literatur

Demuth, S, Stahl, K. (2001) Assessment of the regional impact of droughts in Europe. Fal Report to the European Union ENV-CT97-0553. Institut für Hydrologie, Universität Freiburg, Deutschland

Eybl, J., Godina, R., Lalk, P., Lorenz, P., Müller, G., Weilguni, V. (2005) Das Trockenjahr 2003. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich, Nr. 83, Wien, S.1-38.

- Fürst, J., Kling, H., Hörhan, Th.; Nachtnebel, H.P. (2007) Saisonale Trends im Niederschlag. BMLFUW (ed.) Hydrologischer Atlas Österreichs. 3.Lieferung. Kartentafel 2.11. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. ISBN 3-83437-250-7.
- Fürst, J., Kling, H., Hörhan, Th.; Nachtnebel, H.P. (2007) Saisonale Trends im Abfluss. BMLFUW (ed.) Hydrologischer Atlas Österreichs. 3.Lieferung. Kartentafel 5.10. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. ISBN 3-83437-250-7.
- Fürst, J., Kling, H., Hörhan, Th.; Nachtnebel, H.P. (2007) Saisonale Trends in der Wasserbilanz. BMLFUW (ed.) Hydrologischer Atlas Österreichs. 3.Lieferung. Kartentafel 7.3. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. ISBN 3-83437-250-7.
- Fürst, J., Nachtnebel, H.P., Nobilis, F. (2005) Der Hydrologische Atlas Österreichs: Von der Idee zum Produkt. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft, 57. Jg., H.5/6, S.79.
- Harum, I., Saurer, B., Stromberger, B., Stubenvoll, H., Suetter, G. (1995) Trockenperioden 1992 und 1993 in der Steiermark. Amt der Steirischen Landesregierung, Graz, 111 S.
- Laaha, G., Blöschl, G. (2007) Niederwasserspende. BMLFUW (ed.) Hydrologischer Atlas Österreichs. 3.Lieferung. Kartentafel 5.8. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. ISBN 3-83437-250-7.
- Nobilis, F. (1980) Extreme Trockenperioden im Jahr in Österreich. Arch.Met.Geoph.Biokl. Ser.B, 28, S.339-349.
- Nobilis, F. (1985) Trockenperioden in Österreich. Verband der wissenschaftlichen Gesellschaften Österreich (VWGÖ), Wien, 293 S.
- Nobilis, F. (1986) Extreme dry spells – periodicities and trends in alpine river basins. Third Int. Conf. on Statistical Climatology, June 23-27, Wien, 4 pp.
- Nobilis, F., Weilguni, V. (2003) Dauer von Trockenperioden. Karte 2.9 im Hydrologischen Atlas von Österreich, 1.Lieferung, BMLFUW, Wien
- Nobilis, F., Godina, R. (2006) Extreme Trockenheit in Österreich. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft, Heft 3-4, S.27-34.
- Weingartner, W, Pfister, Ch. (2007) Wie außergewöhnlich war das Niedrigwasser im Winter 2005/06? – Eine Hydrologisch-historische Betrachtung des Rheinabflusses in Basel. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 1, Februar 2007, S.22-27.
- WMO (1998): Climate, Drought and Desertification. WMO-No.869, Genf, Schweiz
- WMO (2000) Early Warning Systems for Drought Prardness and Drought Management (D.A.Wilhite, M.V.K.Sivakumar und D.A.Wood, editors). WMO/TD No.1037.Genf, Schweiz
- Wilhite, D.A.; Glantz, M.H.. (1985) Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International* 10:111–120.

Anschrift der Verfasser:

MR Dipl.-Ing. Reinhold Godina
Ao. Univ.Prof. Dr. Franz Nobilis
Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft,
Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt (HZB)
Marxergasse 2, A-1030 Wien
Email: wasserhaushalt@bmlfuw.gv.at

HOCHWASSER-BEMESSUNGSKENNGRÖSSEN IM BEHÖRDENVERFAHREN

Peter Lorenz

1. Einleitung

Je nach wasserwirtschaftlicher Zielsetzung werden für die Planung und Bemessung wasserwirtschaftlicher Bauwerke unterschiedliche Hochwasserkenngrößen benötigt (Tabelle 1 und Abbildung 1).

Tab. 1: Anwendung von Bemessungsgrößen.

Kenngröße	Anwendung
Hochwasserstand [m]*)	Deiche, Dämme, Entlastungen
Hochwasser-Scheitelabfluss [m ³ /s]*)	Wehre, Durchlässe
Abflusssummen, Abflussfülle [m ³ *)	HW-Rückhaltebecken, Talsperren, Schöpfwerke
Hochwasser-Dauer [h]	Deiche, Dämme
Hochwasser-Ganglinie	Steuerung von HW-Rückhaltebecken und Talsperren
Fließgeschwindigkeit, Schleppspannung, Fließrichtung	Planung (siehe auch Tab. 2)

*) Diese Kenngrößen werden durch Wahrscheinlichkeiten charakterisiert

In verschiedenen Rechtsnormen und technischen Richtlinien ist die Ausweisung von Hochwasserkenngrößen gefordert:

Wasserrechtsgesetz

Das Wasserrechtsgesetz 1959 in der geltenden Fassung (2006) legt fest:

§38 (3): „Als Hochwasserabflussgebiet ... gilt das bei 30-jährlichen Hochwässern überflutete Gebiet. Die Grenzen der Hochwasserabflussgebiete sind im Wasserbuch in geeigneter Weise ersichtlich zu machen.“

Daraus folgt, dass das WRG die Anschlaglinie eines HQ₃₀ oder HW₃₀ erfordert.

NÖ Raumordnungsgesetz

Das niederösterreichische Raumordnungsgesetz 1976 in der geltenden Fassung (2003) legt fest:

§15 (2): „Im Flächenwidmungsplan sind kenntlich zu machen 2. Flächen, für die auf Grund von Bundes- und Landesgesetzen Nutzungsbeschränkungen bestehen (... Überflutungsgebiete...)“

(3): „*Flächen, die auf Grund der Gegebenheiten ihres Standortes zur Bebauung ungeeignet sind, dürfen nicht als Bauland gewidmet werden, insbesondere 1. Flächen, die bei 100-jährlichen Hochwässern überflutet werden.*“

Daraus geht hervor, dass in den Flächenwidmungsplänen die Anschlaglinie eines HQ_{100} oder HW_{100} einzutragen ist.

Richtlinien für die Bundeswasserbauverwaltung

Die RiWa 1994 (technische Richtlinie gemäß § 3 (2) WBFG) legt fest:

Planungsgrundsätze:

„*Gefahrenzonenpläne haben die Art und das Ausmaß der Gefahren bei Hochwasserabflüssen einer 100-jährlichen Eintrittswahrscheinlichkeit darzustellen Die Anschlaglinie des HQ_{30} ist auszuweisen.*“

Rote Zone:

„... *Zum Einzelfall sind der Abgrenzung der Roten Zone zugrunde zu legen Kombination von Wassertiefe t (m) und Geschwindigkeit v (m/s)*“

„... *Fließgeschwindigkeit v (m/s) und Schleppspannung t (N/m^2) – Überschreitung der für die jeweiligen Boden- und Gelände verhältnisse zulässigen Grenzwerte ...*“

Die Überflutungsgrenzen HQ_{30} und HQ_{100} kommen auch bei der Beschreibung der Grundsatzkonzepte und Generellen Projekte sowie Projekte vor.

Daraus folgt, dass die RiWa sowohl die Anschlaglinien (bzw. Spiegelhöhen) eines HQ_{100} als auch eines HQ_{30} für die Erstellung der Pläne vorsieht. Darüber hinaus werden auch die Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten gefordert.

Versicherungen

Versicherungen zeigen in jüngster Zeit ein vermehrtes Interesse an den Ergebnissen hydraulisch – hydrologischer Berechnungen. Genaue Festlegungen, welche Erwartungen in Berechnungsergebnisse gesetzt werden, gibt es nicht. Man kann aber davon ausgehen, dass die schadensrelevanten Faktoren von Interesse sind. Dies sind Wassertiefe (z.B. Durchfeuchtung bzw. Überflutung in Gebäuden), Fließgeschwindigkeit und Fließrichtung (Anprall), Schleppspannung (Erosion, Abschwemmung), aber auch Ereignisdauer (Durchfeuchtung, Betriebsunterbrechung, Ersticken von Kulturen usw.).

Tab. 2: Forderung verschiedener Hochwasserkenngrößen

WRG, §38 (3):	HQ_{30} (HW_{30})	
NÖ ROG, §15 (2):	HQ_{100} (HW_{100})	
RiWa, Gefahrenzonen u. Planung	HQ_{30} , HQ_{100}	Fließgeschwindigkeit v [m/s], Schleppspannung t [N/m^2]
Risikobetrachtung	HQ_{300}	
Spezialplanung		Fließrichtung
Versicherung (zusätzlich)	HHQ	Dauer [h]

Zunächst fällt auf, dass im Wasserrechtsgesetz (WRG) und im Raumordnungsgesetz (ROG) nur von Hochwasser die Rede ist. Ob nun die Menge (HQ) oder der Wasserspiegel (HW) gemeint ist, geht aus dem Text nicht hervor. Wie die jüngsten Hochwasser an der Donau zeigten, sind die statistischen Risiken Q und W aber nicht ident, so dass zwangsläufig eine Interpretation stattfinden muss. Hier kann nur auf die RiWa Bezug genommen werden. Diese geht eindeutig von den Mengen Q aus.

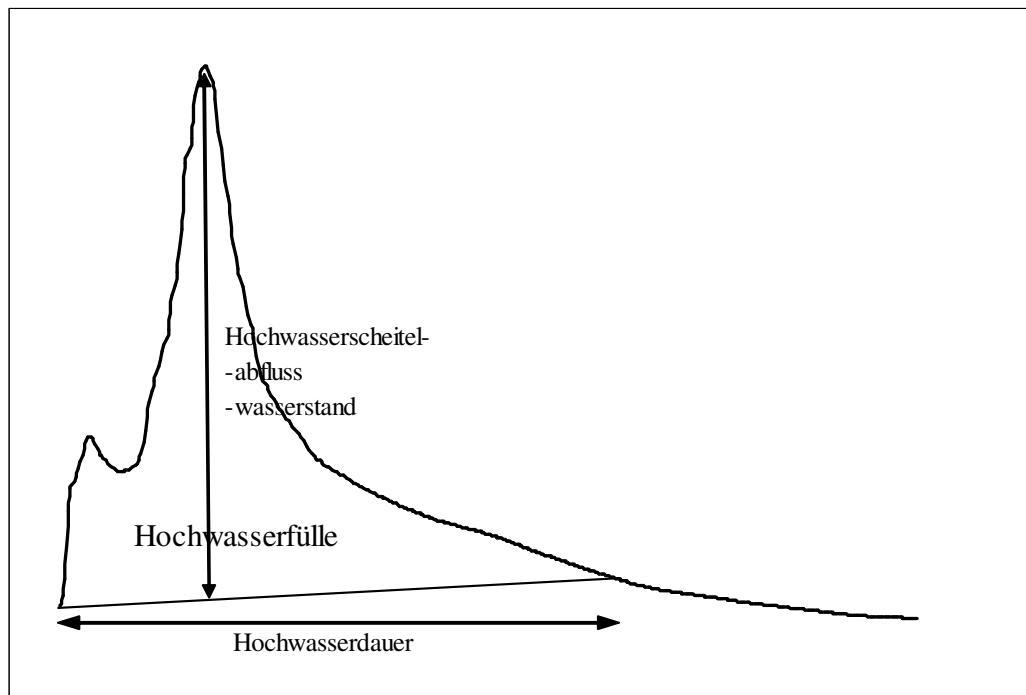


Abb. 1: Hochwasserkenngrößen.

2. Das Bemessungshochwasser

Bemessungshochwasser: Hochwasser, das einer Schutzmaßnahme zugrunde gelegt wird und bis wohin der Schutzgrad reicht. Bei Hochwasserschutzprojekten müssen Hydrographie und Wasserbau eng zusammenarbeiten. Die Bestimmung des Bemessungshochwassers läuft in mehreren Schritten ab:

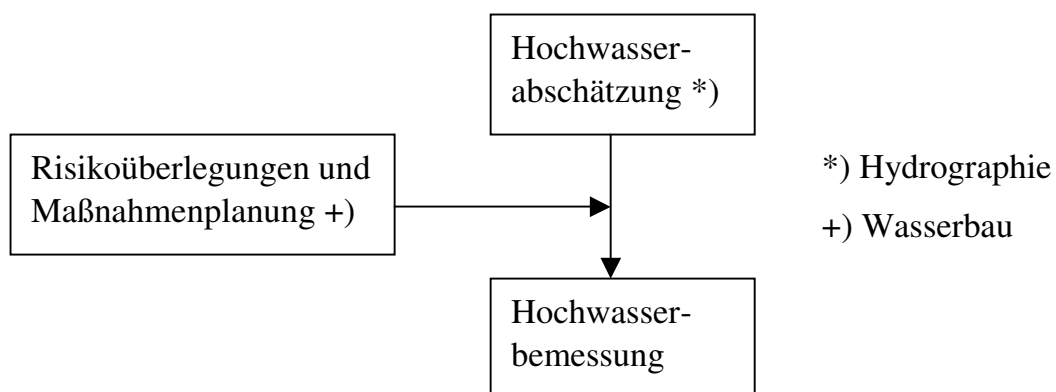


Abb. 2: Stellung der Hydrographie und des Wasserbaues bei der Hochwasserbemessung.

Die früher übliche Methode, den Wasserstand allein des höchsten bisher bekannten Hochwassers mit einem eventuellen Sicherheitszuschlag anzusetzen wird nicht mehr verwendet, weil dabei das Sicherheitsmaß bzw. das (Rest)Risiko nicht erkennbar ist.

Für die Festlegung des Bemessungshochwassers wird von der statistischen Auftretswahrscheinlichkeit eines bestimmten Hochwasserereignisses bzw. von der statistischen Wiederholungszeitspanne (Jährlichkeit) ausgegangen. Die Festlegung für Ereignisse von bestimmten Jährlichkeiten (HQ₃₀, HQ₅₀, HQ₁₀₀ etc.) stellt aus hydraulisch-hydrologischer Sicht eine willkürliche Definition dar, generell sind die Schutzbedürftigkeit des eingedeichten Bereichs (Leben und Gesundheit der Menschen, Sachwerte u.ä.), die Kosten der Maßnahmen sowie die Beeinflussung von Natur und Landschaft als Grundlage für die Wahl der Jährlichkeit entscheidend. Bei einem gewählten Wiederkehrintervall soll der Nutzen der Eindeichungsmaßnahme (Abwendung des Schadens) größer sein als ihre Kosten. Im Flussbau hat sich die Festlegung auf ein HQ₁₀₀ (Hochwassermenge mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren, Auftretswahrscheinlichkeit $n=0,01$) für den Schutz von Siedlungsgebieten etabliert.

2.1 Die Hochwasserabschätzung

Als Grundlage wasserwirtschaftlicher Projekte ist es notwendig, selten auftretende Hochwasser möglichst genau abzuschätzen. Darunter verstehen wir nicht nur die Quantifizierung von **Spitzenabfluss** oder **-fülle**, sondern auch die Ausweisung des zugehörigen **Vertrauensintervalls** (Abbildung 3).

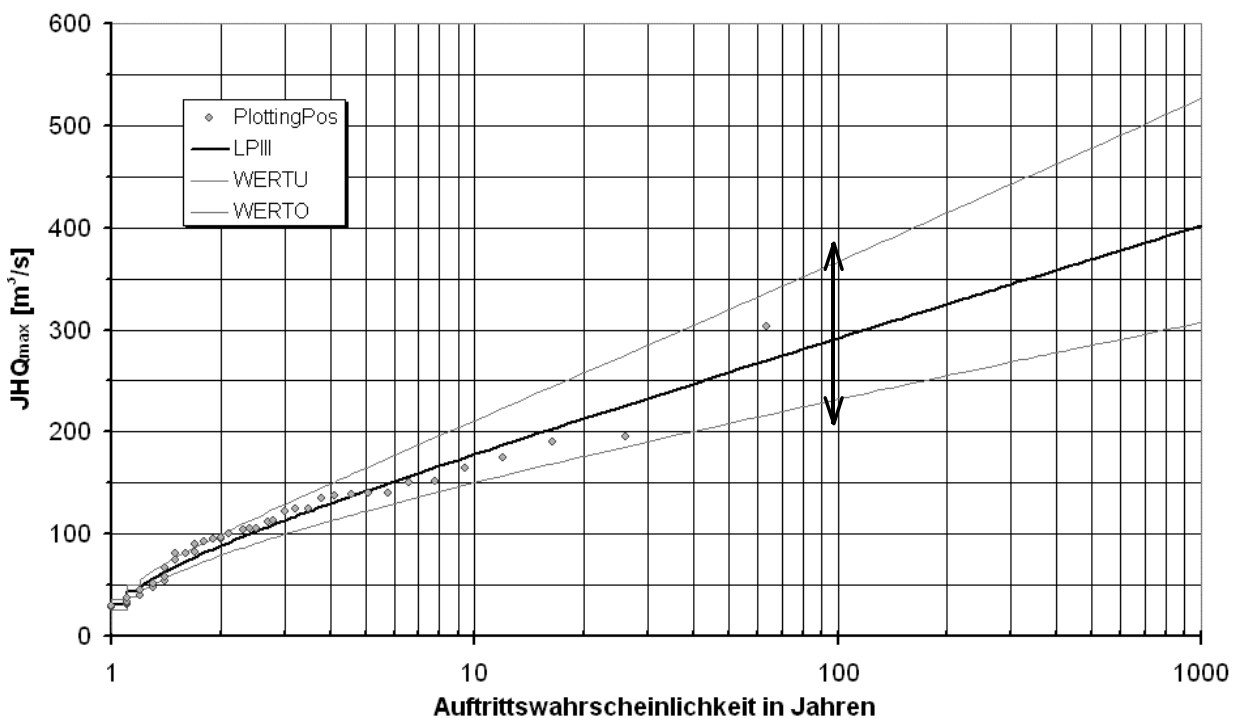


Abb. 3: Ergebnis Hochwasserstatistik mit Konfidenzintervallen.

Die dabei auftretenden Probleme ergeben sich aus folgenden Gesichtspunkten:

2.1.1 Das Datenproblem

Die Erfassung der Abflüsse an einem Gewässerabschnitt erfordert eine registrierende Wasserstandsaufzeichnung. Da eine direkte Erfassung der Abflussmenge nicht möglich ist, wird der Wasserstand mit Hilfe einer Wasserstands-Abflussbeziehung in Abflusswerte umgesetzt. Diese Beziehung beschreibt die hydraulische Situation und gilt nur für den jeweiligen Abflussquerschnitt. Sie kann nicht mit ausreichender Genauigkeit hydraulisch berechnet werden und wird daher aus den Fließgeschwindigkeitsmessungen (Einzelmessungen) ermittelt. In Folge des seltenen Auftretens von großen Hochwasserabflüssen fehlen in der Regel im Bereich hoher Abflusswerte Messungen. Man extrapoliert daher den Pegelschlüssel ohne den exakten Verlauf zu kennen. Erschwerend kommt hinzu, dass diese Beziehung infolge einer instabilen Sohle auch zeitlich veränderlich ist.

2.1.2 Das Skalenproblem

hinsichtlich der meteorologischen Ursachen

Je nach Größe des Einzugsgebietes können Niederschläge unterschiedlicher Ausprägung maßgeblich sein:

- für die Hochwasserentstehung in großen Einzugsgebieten ($> 50 \text{ km}^2$) sind lang anhaltende, großräumige Frontniederschläge ursächlich
- für kleinere Einzugsgebiete sind dagegen konvektive, d.h. kleinräumige Starkniederschläge mit hoher Intensität verantwortlich

hinsichtlich der hydrologischen Einflussfaktoren

Je größer das Einzugsgebiet ist, umso größer ist die vergleichmäßige Wirkung auf den Abfluss. Infolge der Laufzeit vom Abflussentstehungspunkt, der Struktur des Gewässernetzes und der abnehmenden Bedeutung von Flächen mit hoher Abflussbildung nimmt mit zunehmender Einzugsgebietsgröße die Hochwasserabflusspende bezogen auf die Fläche ab.

Die Hochwasserkennwerte sind daher nicht ohne weiteres von größeren (beobachteten) in kleinere (unbeobachtete) Einzugsgebiete übertragbar.

2.1.3 Das Extrapolationsproblem

In der Regel liegen Abflussreihen nur für kurze Zeiträume von 20 bis 30 Jahren vor. Beschränkt man die Extrapolationsmöglichkeit auf den zwei bis dreifachen Bereich der Reihenlänge (DVWK 1999) so wäre damit höchstens ein HQ_{100} -Wert zu ermitteln. Für wasserbauliche Bemessungsaufgaben sind aber gerade seltenere Ereignisse von Bedeutung. Für die Bemessung der Hochwasserentlastungsanlage von Talsperren ist zum Beispiel von einem Wiederkehrintervall von $T=5000$ Jahren auszugehen.

2.1.4 Das Ausreißerproblem

Die Länge von Abflussbeobachtungen ist in der Regel sehr unterschiedlich. Infolge des stochastischen Charakters der Hochwasserereignisse (der weitgehend unbekannt

ist) ist das Auftreten seltener, d.h. großer Ereignisse innerhalb kurzer Reihen sehr zufällig.

2.2 Risiko- und Restrisikobetrachtung

Für die Planungen ist weiters noch von wesentlicher Bedeutung, welche Auswirkungen ein über den Bemessungshochwasserwert hinausgehender Abfluss hat. Die (Rest)Risikobetrachtung untersucht Schadensabläufe und –ausmaß für größere Ereignisse und gibt mögliche Maßnahmen und Vorkehrungen für diesen Fall vor.

Zu unterscheiden sind Untersuchungen über **erhöhte Risiken** (Wassermengen, die über die Bemessungswassermenge hinausgehen) und über das **Restrisiko** (Versagen von Hochwasserschutzanlagen). Vorgeschlagen wird die Berechnung von HQ_{300} als in anderen Fällen schon eingeführte Größe. Damit liegen dann 3 Anschlaglinien vor (HQ_{30} , HQ_{100} , HQ_{300}).

3. Mögliche Ursachen für die Erhöhung des Bemessungshochwassers

In vielen Einzugsgebieten wurde in den letzten Jahren das Bemessungshochwasser neu festgelegt, z.B. weil größere Hochwasserereignisse in der jüngeren Vergangenheit aufgetreten waren. Dabei musste oft das gültige Bemessungshochwasser nach oben korrigiert werden.

Neben den bereits angeführten Problemen können folgende Aspekte für eine Neuberechnung maßgebend sein:

3.1 Direkte und indirekte anthropogene Beeinflussung

Bei den Ursachen für die Hochwasserereignisse werden heute gerne Themen wie Klimaentwicklung und Kulturlandschaftsveränderung genannt, wiewohl die statistische Aufarbeitung der Ereignisse bis dato kein eindeutiges Trendverhalten erkennen lässt. Extreme Niederschlags-Abflussereignisse sind seit Beginn entsprechender Aufzeichnungen dokumentiert und können in Frequenz und Ausmaß nicht unmittelbar der gegebenen Klimaentwicklung, die durch eine mittlere Erwärmung um rund 1°C in den letzten einhundert Jahren gekennzeichnet ist, zugeordnet werden. Die Erwärmung alleine bedingt allerdings eine höhere Wasseraufnahme in die Atmosphäre und damit ein höheres Niederschlagspotential.

Angesichts der Tatsache, dass der Mensch seit Beginn des 19. Jahrhunderts die Flussläufe stark verändert hat, stellt sich die Frage, ob die in letzter Zeit beobachteten Hochwasser hausgemacht sind. Die dabei viel zitierten Flussbegradigungen haben sicherlich eine beschleunigende Wirkung auf den Abfluss, was sich aber nicht notwendigerweise auf die Höhe der Abflussspitze auswirken muss. Die Überlagerung von Hochwasserwellen aus unterschiedlichen Flüssen kann sich auch im günstigen Sinne verschieben und die resultierende Gesamtwelle damit entzerren.

Unumstritten sind aber folgende Auswirkungen auf das Abflussgeschehen:

Retentionsraumverlust/Abflusshindernisse

Deutliche Auswirkungen hat jedoch der Wegfall von natürlichen Retentionsräumen. Durch den Siedlungsdruck der Bevölkerung und der Notwendigkeit landwirtschaftliche Nutzflächen zu gewinnen, sind im letzten Jahrhundert an jedem Fluss große Überflutungsflächen verloren gegangen.

Neben der Beschleunigung des Abflusses führt die Einengung des Hochwasserabflussbereiches auch zu höheren Wasserständen. Es ist daher davon auszugehen, dass sich heute beim Auftreten von extremen Ereignissen, ähnlich derer der vergangenen Jahrhunderte, deutlich höhere Wasserstände einstellen würden.

Versiegelung

Lassen sich Hochwasser in kleineren Einzugsgebieten noch durch präventive Maßnahmen im Bereich der Landnutzung beeinflussen, so sind extreme Hochwasser damit nicht mehr zu verhindern. Dies gilt vor allem für größere Einzugsgebiete wie an der Donau. So spielt der Versiegelungsgrad der Landschaft hier keine Rolle mehr, da extreme Hochwasser mit einer flächendeckenden Bodensättigung einhergehen (natürliche Versiegelung).

3.2 Neue Sicherheitsanforderungen

Neben der Erhöhung von Bemessungsabflüssen aufgrund klimatischer oder hydraulischer Gründe können sich auch die Sicherheitsanforderungen, z.B. an Talsperren, ändern.

3.3 Verbesserte Datenlage

Angesichts der stetigen Verlängerung der Beobachtungsreihen sowie der Verfügbarkeit von neueren Berechnungsmethoden ist eine Korrektur des Bemessungshochwassers nicht auszuschließen.

4. Zusammenfassung

Das Hochwassergeschehen kann unter verschiedenen Aspekten beschrieben werden: Anstiegszeit, Spitzenabfluss, Dauer des Ereignisses, Abflussvolumen u.a.. In der Praxis steht der Spitzenabfluss aber als wichtigste Bemessungsgröße eindeutig im Vordergrund. In der Zukunft werden jedoch Hochwasserfrachten und -ganglinien weiter an Bedeutung gewinnen.

Im weiteren sind Lücken bei der Hochwasserabschätzung und -bemessung in kleinen Einzugsgebieten vorhanden. Das hängt einerseits mit der schlechten Datenlage zusammen: Nur für wenige kleine Einzugsgebiete liegen genügend lange Messreihen vor. Andererseits ist die Hochwasserberechnung in kleinen Einzugsgebieten besonders schwierig, weil hier die positiven Effekte der räumlichen Ausmittelung weniger zum Tragen kommen.

Die Hochwasserbemessung wird sich also weiterentwickeln müssen. Auch ist die Harmonisierung der Bemessungspraktiken der Schutzwasserwirtschaft und der Wildbach- und Lawinenverbauung anzustreben.

5. Literatur

- BMLFUW (1994 u. 2006) Riwa-T, Technische Richtlinien für die Bundeswasserbauverwaltung. Wien.
- BWG (2003) Hochwasserabschätzung in den schweizerischen Einzugsgebieten, Bericht des BWG, Serie Wasser , Nr. 4, Bern.
- CHR/KHR Übersicht über Verfahren zur Abschätzung des Hochwasserabflusses (www.chr-khr.org) – Rheinkommission, Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Postbus 17, 8200AA Lelystad, NL.
- DVWK (1989) Merkblatt 209: Wahl des Bemessungshochwassers. Entscheidungswege zur Festlegung des Schutz- und Sicherheitsgrades. Hamburg
- DVWK (1999) Merkblatt 251, Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser.

Anschrift des Verfassers:

MR Dipl.-Ing. Peter LORENZ
BMLFUW, Abteilung VII 3
Marxergasse 2, A-1030 Wien
Email: peter.lorenz@lebensministerium.at

BESTIMMUNGSMETHODEN - ÜBERBLICK

Dieter Gutknecht

1. Einleitung

Das Auftreten von extremen Ereignissen in den Hochwasserjahren der letzten beiden Dekaden hat erneut und verstärkt die Aufmerksamkeit auf die Frage gelenkt, wie Bemessungsabflüsse kleiner Überschreitungswahrscheinlichkeit tatsächlich bestimmt werden können. Die Problematik besteht dabei darin, dass abweichend von üblichen Bemessungsaufgaben in diesem Fall über den Erfahrungsbereich, der durch Beobachtungen im Allgemeinen abgedeckt ist, hinaus extrapoliert werden muss. Zu den üblichen Unschärfen in den Berechnungsmethoden treten noch solche, die mit den Schwierigkeiten der Erfassung der Veränderung der Abflussprozesse bei Übergang zu extremen Bedingungen verbunden sind.

Im vorliegenden Beitrag wird zunächst kurz auf den methodischen Ansatz eingegangen, die in der Ingenieurpraxis üblicherweise zum Einsatz kommenden Verfahren durch die Einbeziehung von Zusatzinformation in Form von Daten über historische Ereignisse und in Form von Prozesskenntnis zu ergänzen. In Abschnitt 3 werden die einzelnen Methoden unter dem Aspekt der Ausrichtung auf die Bestimmung extremer Ereignisse unter Einbindung solcher Zusatzinformation dargestellt. Abschnitt 4 gibt einige Hinweise zu den Möglichkeiten der Gewinnung und der Umsetzung der zusätzlichen Informationsquellen und einen kurzen Ausblick auf weiterführende Konzeptionen.

2. Methodische Ansätze

2.1 Standard-Methoden

Bei der Ermittlung von Bemessungshochwässern kommen in der Ingenieurpraxis je nach Datenlage und Aufgabenstellung in der Regel eine oder mehrere der folgenden Methoden zur Anwendung:

- Eine statistische Analyse der Hochwasserabflüsse (in der Regel Hochwasser-Scheitelabflüsse HQ, in Ergänzung dazu teilweise auch Abflussvolumina) – „Hochwasserstatistik“, „Frequenzanalyse“, „Hochwasserwahrscheinlichkeitsanalyse“ – unter der Voraussetzung, dass HQ-Serien vorliegen;
- die statistische Abschätzung des gesuchten Hochwasserwertes aus HQ-Beobachtungen in Nachbargebieten über Regionalisierungsansätze, wenn im Untersuchungsgebiet keine Hochwasserabflüsse zur Verfügung stehen – „Regionale Hochwasserstatistik“;
- die deterministische Modellierung auf Basis von Niederschlägen und einem Niederschlag-Abfluss-Modell für das Einzugsgebiet zur Erzeugung von Hochwasserganglinien – „Niederschlag-Abfluss- (NA-) Modellierung“;

- die deterministisch-probabilistische Methode nach dem Gradex-Ansatz, die eine Abflussberechnung mittels eines NA-Modells mit einem probabilistischen Ansatz für den Niederschlag kombiniert – „Gradex-Methode“;
- die Abschätzung möglicher Größtwerte der zu erwartenden Hochwasserscheitel nach dem „Hüllkurven-Ansatz“.

Die letztgenannten beiden Ansätzen zielen ihrer Konzeption nach bereits auf die Abschätzung von Extremsituationen und die Ermittlung von maximalen HQ-Werten ab.

In der Praxis erfolgt die Ermittlung des gesuchten Bemessungshochwassers für einfache Dimensionierungsaufgaben in der Regel nach einer einzigen Methode, bevorzugt nach der statistischen Analyse der Hochwasserscheitel. Die damit verbundenen Unsicherheiten werden allerdings sehr groß, wenn die Bemessungssituation die Abschätzung sehr seltener Ereignisse verlangt. Für solche Fälle wurde traditionell eine Abschätzung über Hüllkurven bzw. über aus solchen abgeleiteten „Formeln“ versucht. Zur Verringerung der damit verbundenen Unsicherheit finden sich in der Literatur schon früh und immer wieder Empfehlungen zur Durchführung der Untersuchungen nach mehreren Methoden (siehe z.B. Hansel, 1970; BWG, 2003) bzw. zur Einbeziehung von Kenntnissen über die Abflussprozesse (siehe z.B. Potter, 1987). Zwei Aussagen aus den hier angeführten Quellen mögen dies aufzeigen:

„ ... Die Bemessung von Anlagen muss im eigentlichen Sinne des Wortes ingenieurmäßig erfolgen. Die Anwendung nur eines Extrapolationsverfahrens ist nicht empfehlenswert ... „ (Hansel, 1970, S.263) und

„ ... Acceptable solutions to each of these important problems require a marriage of statistical methods and an improved understanding of the flood process ...” (Potter, 1987, p.117).

In der Zwischenzeit seit diesen Aussagen sind viele Studien und Arbeiten durchgeführt worden, die den Intentionen dieser Aussagen entsprechen. Ihnen gemeinsam ist die Hypothese, dass sich die Unschärfe in den Berechnungen der gesuchten Extremabfluss-Schätzwerte einerseits durch Kombination der Ergebnisse nach verschiedenen Methoden und andererseits durch Einbindung von Wissen um die bei der Entstehung und dem Ablauf von Extremereignissen wirksamen und dominanten Prozesse reduzieren ließe. Eine Stütze für eine diesbezügliche Erweiterung der bisherigen Vorgangsweise bei der Hochwasser-Schätzung bildet die Fülle von Information, die einerseits bei der Analyse der letzten großen Hochwässer entstanden ist und andererseits mit der Weiterentwicklung der Methoden verbunden ist. Ansatzpunkte zur besseren Absicherung der Ergebnisse der hydrologischen Bearbeitungen stellen in diesem Zusammenhang die Einbeziehung von historischen Hochwässern in die Untersuchungen, die Nutzung von Informationen über die Entstehungsbedingungen von Extremereignissen und die prozess-orientierte Modellbildung in der NA-Modellierung dar.

2.2 Ergänzende Ansätze

2.2.1 Kombiniertes Ansatz

Der Ansatz geht davon aus, dass durch den parallelen Einsatz verschiedener Methoden und Modelle einander ergänzende Informationen eingetragen werden, unterschiedliche Daten genutzt werden, verschiedene Aspekte (Einflussfaktoren, Voraussetzungen etc.) ins Spiel gebracht werden. Der gesuchte Schätzwert ist dabei durch „Kombination“ der nach den einzelnen Methoden erhaltenen Schätzwerte zu bilden. Dies kann durch Gewichtung der Aussagen unter Berücksichtigung der folgenden Aspekte geschehen: Zuverlässigkeit der Unterlagen und Daten; Zutreffen der zugrundeliegenden Annahmen; Erfüllungsgrad der Voraussetzungen; Abwägen der Unsicherheiten. Die Ableitung des gesuchten Bemessungswertes kann – je nach Maßgabe der vorhandenen Information – in qualitativer Weise über eine Plausibilitätsprüfung oder in quantitativer, formalisierter Form unter Einsatz von Simulationsrechnungen und unter Verwendung von Bayes'schen Methoden oder Fuzzy-Techniken erfolgen. Aus der Kombination der Schätzwerte nach den verschiedenen Methoden sollte sich eine Eingrenzung des gesuchten Bemessungswertes ergeben.

Anwendungen dieses Ansatzes finden sich bereits in früheren Arbeiten, die die Einbeziehung von regionaler Information oder von Expertenwissen zum Ziel hatten (Wood and Rodriguez, 1974; Kirnbauer, 1981). Ausgelöst durch die Frage nach der Bestimmung von sehr seltenen Ereignissen fand der Ansatz neue Beachtung, so u.a. in den Planungsüberlegungen für den Hochwasserschutz am Rhein (Parmet et al., 1999; Chbab et al., 2006) und in der Studie Alpenrhein (IRKA, 2003). In Gutknecht et al. (2006) wird diesem Konzept folgend ein „Mehr-Standbeine“-Ansatz zur Ermittlung von Bemessungshochwässern kleiner Überschreitungswahrscheinlichkeit vorgestellt. Über Umsetzungen des Ansatzes in Abstimmung auf bestimmte Fragestellungen bzw. bestimmte Situationen berichten die Beiträge Meon et al. (2007), Merz (2007), Naef (2007) und Scherrer (2007) in diesem Band.

2.2.2 Einbeziehung von historischen Ereignissen

Informationen über historische Hochwässer bilden eine wertvolle Hilfe zur Überwindung der Unsicherheit, die mit der Kürze der Hochwasserdatenreihen zusammenhängt. Bekannte Höchstwerte aus der Vergangenheit dienen zunächst als Anhaltspunkt, mit welcher Größenordnung grundsätzlich gerechnet werden muss, wenn eine Anlage auf extreme Situationen zu bemessen ist. Als Beispiel möge das Hochwasser 1501 an der Donau dienen, das in die Überlegungen zum Ausbau des Hochwasserschutzes für die Stadt Wien miteinbezogen wurde. Ihre Einbindung in die Hochwasserstatistik hilft, den Verlauf der Verteilungsfunktion im Bereich großer Abflüsse besser definieren zu können und die Unsicherheit im Extrapolationsbereich zu reduzieren (siehe dazu u.a. Fügner und Schirpke, 1986; Schiller, 1986).

Andererseits bildet Information über bekannte Hochwässer der Vergangenheit vielfach erst die Basis, aufgetretene Extremhochwässer annähernd zutreffend bezüglich ihrer Wahrscheinlichkeit einschätzen zu können (z.B. Naef, 2007).

2.2.3 Einbeziehung von Prozess-Wissen

Viele Studien der letzten Zeit belegen, dass durch die Einbeziehung von zusätzlicher Information über die Prozesse die Aussagekraft von Extremereignisabschätzungen stark gesteigert werden kann. Wesentliche Anhaltspunkte bilden dabei Informationen über den Ereignistyp aus meteorologischer und hydrologischer Sicht, Kenntnisse über die Charakteristika des das extreme Ereignis auslösenden Niederschlagsereignisses und eine richtige Einschätzung der Abflussentstehungsbedingungen und der entstehenden Abflussreaktionen (Gutknecht, 1994). Von Bedeutung ist es dabei, dass die Unterschiede in der Entstehung und in den Abläufen der Extremereignisse gegenüber den Verhältnissen bei „normalen“ Ereignissen aufgedeckt und berücksichtigt werden.

Das vorhandene Wissen um die Prozesse kann an verschiedenen Stellen in die Bearbeitung einfließen:

- Bei der Definition des auslösenden Ereignisses
 - welche meteorologische Situation führt im betrachteten Gebiet unter welchen Umständen zu einem Extremereignis?
 - Welche Merkmale hat dieses Ereignis – Größe, Intensität, Dauer, Ausdehnung, Organisation in mehreren Intensivphasen, Blöcken?
 - Ist mit einer Folge von Niederschlagsereignissen zu rechnen?
 - Welcher Hochwassertyp herrscht bei großen Hochwässern vor?
 - Welche Vorwetter-Situation ist anzunehmen, gibt es die Möglichkeit einer ungünstigen Kombination?
 - Informationen über diese Merkmale und Zustände ermöglichen auch die realitätsbezogene Definition von Szenarien, mit denen die Auswirkung unterschiedlicher Bedingungen auf die Bemessungsgröße untersucht werden kann.
- Bei der Definition der Modellstruktur
 - welche und wie viele unterschiedliche Abflussreaktionen sind zu berücksichtigen?
 - Wie verändern sich die Abflussvorgänge mit der Größe des Ereignisses?
 - Welche Detaillierung nach den Abflussprozessen ist notwendig?
- Durch Gruppierung der Daten, z.B. der Reihe der HQ-Werte, nach solchen Merkmalen, die als Indikatoren für Prozesseigenschaften wirken können wie z.B. die Saisonalität oder der Hochwassertyp („Grob-Klassifizierung“ der Daten), und getrennte Analyse der nach diesen Merkmalen gruppierten Daten und anschließende Kombination der Ergebnisse.

Gemeinsamer Hintergrund dieser verschiedenen Formen der Einbindung von „Vor“-Wissen um die Prozesse ist die Erkenntnis, dass bei verschiedenen Ereignissen und in verschiedenen Phasen eines Prozesses jeweils bestimmte Einflussfaktoren und Teilprozesse dominant werden und den Charakter des ablaufenden Prozesses und die dabei auftauchenden Phänomene in einer charakteristischen Weise prägen („Dominant

Processes Concept“). Eine darauf abgestimmte Methodik sollte daher auch dazu beitragen, die verwendeten Methoden zuverlässiger und aussagekräftiger zu machen.

3. Methoden – Überblick

3.1 Hochwasserstatistik

Die Auswertung der beobachteten Hochwasserabflüsse – in der Regel die Jahreshöchstwerte des Abflusses – bildet die traditionelle Vorgangsweise zur Ermittlung von Bemessungshochwässern. Dazu werden Verteilungsfunktionen gewählt, die an die beobachteten Werte angepasst werden. Üblicherweise gelingt diese Anpassung in dem durch die Beobachtungen abgedeckten Bereich sehr gut, die Unterschiede zwischen den verschiedenen Verteilungsfunktionen sind klein. Dies gilt allerdings nicht mehr für den Extrapolationsbereich. Je nach Zusammensetzung des Datenkollektivs und je nach mathematischer Struktur der Verteilungsfunktion können recht unterschiedliche Extrapolationen entstehen, die umso stärker voneinander abweichen, je weiter in den nicht durch Beobachtungen abgedeckten Bereich hinaus extrapoliert werden muss.

Im Zusammenhang mit der Ermittlung von seltenen und extremen Hochwasserabflüssen kommt damit den folgenden Fragen besondere Bedeutung zu: Wie ist die Aussagekraft der vorliegenden Stichprobe einzuschätzen? Gesichtspunkte sind hierbei die Länge der Beobachtungsreihe, der Informationsgehalt des durch die Beobachtungen erfassten Zeitfensters, das Auftreten oder Fehlen von großen sowie von außerordentlich großen Ereignissen („Ausreißern“) in der Stichprobe und die Frage der Homogenität des Hochwasserkollektivs.

Rolle des Zeitfensters

Von Analysen langer Beobachtungsreihen von Hochwasserabflüssen her ist bekannt, dass innerhalb dieser langen Reihen immer wieder kürzere Zeitabschnitte festzustellen sind, in denen größere Hochwässer scheinbar „gebündelt“ auftreten, während dann durch Jahrzehnte hinweg keine großen Ereignisse zu verzeichnen sind. Auf dieses Phänomen gehen schon frühere Arbeiten ein, so etwa Liebscher (1970) für den Rhein oder Schreiber (1970) für österreichische Flüsse. In einer Arbeit aus jüngerer Zeit weist Schumann (2004) auf diesen Effekt bei Variation der Bezugszeitspanne der Stichprobe hin. Entsprechende Beobachtungen sind auch zu machen, wenn historische Ereignisse in die Untersuchungen einbezogen werden wie etwa in Naef (2007) und Scherrer (2007). Anhand solcher Untersuchungen lässt sich feststellen, dass die Unterschiede in den berechneten Bemessungsabflüssen, die sich bei Verwendung unterschiedlicher Zeitfenster ergeben, deutlich größer sein können, als etwaige Unterschiede zufolge der Wahl verschiedener Verteilungsfunktionen. Für die Praxis ergibt sich daraus die Aufgabe, Information über die Aussagekraft der vorliegenden Stichprobe zu beschaffen. Als Möglichkeiten bieten sich Vergleiche mit Stationen mit längeren Datenreihen auf regionaler Basis an.

Umgang mit Ausreißern

Auf die Frage des Umgangs mit Ausreißern geht der Beitrag von Merz (2007) in diesem Band gesondert ein. An einigen Beispielen wird darin gezeigt, dass es der Einbeziehung zusätzlicher Information – regionaler oder historischer – bedarf, um zu stichhaltigen Aussagen zu kommen.

Homogenität der Stichprobe – Anwendung gemischter Verteilungen

In Zusammenhang mit der Notwendigkeit, den „Schwanz“ der Verteilungsfunktion richtig einzuschätzen, kommt auch die Frage auf, ob dieser Bereich der gleichen Verteilungsfunktion genügt wie der durch die beobachteten kleineren Hochwässer abgedeckte Kernbereich. Hinweise auf die Existenz von gemischten Prozessen lassen sich aus den Ergebnissen von statistischen Untersuchungen gewinnen (z.B. Rossi et al., 1984; Vevjevich, 1987). Für die Annahme zusammengesetzter oder gemischter Verteilungen spricht aber auch der Umstand, dass die Hochwässer einer Stichprobe mitunter ganz verschiedene Entstehungsbedingungen besitzen und somit verschiedenen Prozessen entstammen. Es liegt nahe, Kollektive nach Sommer- und Winter-Hochwässern oder nach Hochwassertypen (z.B. nach Blöschl et al., 2000) zu unterscheiden. Eine andere Ursache für Inhomogenitäten kann in der Wirkung von Überflutungsgebieten und von Hochwasserrückhaltebecken liegen. Qualitative Überlegungen zu möglichen Situationen finden sich dazu u.a. in Ludwig (1979). Die praktische Durchführung der Hochwasserschätzung kann dann nach einem der in der Literatur gegebenen Ansätze erfolgen (z.B. Gemischte Extremwertverteilung Typ1 in DVWK (1999a) oder in Alila and Mtiraouni (2002)).

Einbindung historischer Ereignisse

Ein wesentliches Element der Erweiterung der Informationsbasis in Richtung großer und extremer Hochwässer ist die Einbeziehung von historischen Hochwässern. Ein einfaches Verfahren zur näherungsweise Einschätzung der Häufigkeit historischer Ereignisse über eine Einordnung der verschiedenen Ereignisse in einen mit dem Zeitpunkt des Auftretens verknüpften Bezugszeitraum gibt Krause (1969). Eine systematische Behandlung der historischen Werte wird im Rahmen des in DVWK (1999a) gegebenen Ansatzes möglich. Er beruht auf einer Verknüpfung des Datenkollektivs aus dem Zeitraum der Pegelaufzeichnungen mit dem Datenkollektiv der historischen Ereignisse aus dem historischen Zeitraum. Da für den historischen Zeitraum keine geschlossenen Beobachtungen, sondern nur einige große Einzelereignisse vorliegen, muss ein Schwellenwert definiert werden, ab dem Ereignisse im Gesamtzeitraum unter die Klassifikation „historisches Ereignis“ fallen. In einer jüngst erschienenen Arbeit analysiert Schumann (2007) die Rolle der Wahl dieses Grenzwertes.

3.2 Methoden auf Basis Regionalisierung

Regionale Methoden beziehen in Ergänzung zur lokalen Datenreihe Information von beobachteten Hochwässern in anderen Einzugsgebieten ein. Im Falle der Bestimmung von Bemessungshochwässern für Talsperren werden z.B. die HQ5000-Schätzwerte an

den Stationen in der Region ermittelt. Zum visuellen Vergleich werden die Ergebnisse in einem Hochwasserspendendiagramm (H_q5000 gegen die Einzugsgebietsfläche A_E im doppelt-logarithmischen Maßstab) eingetragen. Die Bewertung der Aussagekraft für das Untersuchungsgebiet erfolgt über eine Einstufung der Ähnlichkeit der zu vergleichenden Gebiete mit der Situation im Untersuchungsgebiet nach einer Reihe von meteorologischen, hydrologischen und gebietsbezogenen Faktoren. Dies kann direkt anhand von Daten aus den betreffenden Gebieten geschehen und/oder anhand von generellen Informationen z.B. in Übersichtsdarstellungen in einschlägigen Atlanten etc.

Informationen zu hochwasserrelevanten Merkmalen für den Gebietsvergleich

Gute Anhaltspunkte bieten die entsprechenden Themenkarten des Hydrologischen Atlas Österreichs (HAÖ). Zum Niederschlag liegen etwa Karten zu den Themen Jahresniederschlagshöhe (Skoda und Lorenz 2003), Extreme beobachtete Tagesniederschläge (Nobilis und Weilguni, 2003), Konvektive Starkniederschläge – Niederschlag in 15, 60 bzw. 180 Minuten (Lorenz und Skoda, 2003) vor. In Hinblick auf den Hochwasser-Typ liefern die Karten Normierte mittlere Hochwasserspende (Merz und Blöschl, 2003d) und die Teilkarten Jahreshöchsthochwässer und maximaler jährlicher Tagesniederschlag (Merz und Blöschl, 2003c, 2003e) zur Saisonalität des Auftretens der Ereignisse erste wichtige Anhaltspunkte. Für eine Einschätzung der Vorbedingungen bei einem Ereignis kann den Karten 5.7 zur Wasserbilanz (Kling et al., 2005) und 7.2 zur saisonalen Wasserbilanz (Kling et al., 2007) erste Information entnommen werden. Auskünfte über das Hochwasserregime und die Abflussbildung geben die Karten zur normierten mittleren Hochwasserspende und zum Abflussbeiwert (Merz et al., 2003d; 2007). Auf dieser Basis können Vergleiche bezüglich der Prozesse, die an der Hochwasserentstehung beteiligt sind, angestellt werden.

Eine Ergänzung dazu bilden die auch sonst vielfach bei einer Regionalisierung verwendeten Parameter der Gebietseigenschaften wie Böden, Landnutzung, Geologie, Topographie und Gewässernetzdichte (Karte 5.2; Fürst, 2003). Über Bodenart und Bewuchs kann versucht werden, die Infiltrationseigenschaften und die Speicherkapazität des Bodens abzuschätzen. Anhand von geologischen und hydrogeologischen Karten lassen sich die Gebiete bezüglich der Wasserwegigkeit des Untergrundes und der Versickerungseigenschaften vergleichen.

Von einem solchen Vergleich über Einflussfaktoren wird im vorliegenden Fall, in dem es um die Einschätzung von Extremwerten geht, mehr Aussagekraft erwartet als von einem Vergleich direkt auf Basis von Verteilungsfunktionen wie z.B. im Falle der Index Flood-Methode. Wie Merz und Blöschl (2003a, b) zeigen konnten, ergeben sich bei Österreich weiten Untersuchungen ausgeprägte räumliche Differenzierungen in allen Merkmalen von Hochwässern, wenn die Saisonalität und andere Prozessmerkmale zur Differenzierung der Hochwasserkollektive und der daraus abgeleiteten Hochwasserwahrscheinlichkeiten herangezogen werden.

Konzeption der Vergleiche

Die Vergleiche können in zwei Richtungen orientiert werden: (a) Zusammenfassung all jener Gebiete, die „ähnlich“ sind, und (b) Markierung jener Gebiete, die sich aufgrund wesentlicher Merkmale stark vom Untersuchungsgebiet unterscheiden, d.h. stark „unähnlich“ sind. Im ersten Fall, in dem die Gruppenbildung auf die spezifische Situation des Untersuchungsgebiets abgestellt ist („focused pooling“), kann der gesuchte Wert direkt aus den vorhandenen Hochwasserspenden – nach geeigneter Gewichtung z.B. nach der Aussagekraft der verschiedenen Reihen (siehe auch 3.1) – ermittelt werden. Im zweiten Fall können die Ergebnisse der unähnlichen Gebiete dazu verwendet werden, obere und untere Grenzen für den gesuchten Wert zu definieren, wenn aus dem Vergleich klar wird, dass Werte von der Größe des im – unähnlichen – Gebiet aufgetreten Hochwassers gänzlich unwahrscheinlich für das Untersuchungsgebiet sind. Als Beispiele mögen Gebiete mit signifikantem Seeanteil dienen. Sie weisen kleinere Hochwasserspenden auf als Gebiete ohne Seeanteil. Ähnliches könnte gelten für Gebiete mit großen Grundwasservorkommen.

3.3 Niederschlag-Abfluss- (NA-) Modellierung

Die Simulation auf Basis eines NA-Modells bietet die Möglichkeit, die Auswirkung verschiedener Annahmen über die Entstehungsbedingungen auf die Größe eines Ereignisses zu untersuchen. Die Untersuchung liefert dabei nicht nur den Hochwasserscheitel, sondern auch das Abflussvolumen und die Hochwasserganglinie. Das Ergebnis der Berechnungen wird bestimmt durch die Vorgabe des Bemessungsniederschlags und die Annahmen über die Anfangsbedingungen zu Beginn des Ereignisses. Einer zutreffenden Wahl dieser Größen kommt daher große Bedeutung zu. Von Einfluss auf das Ergebnis ist ferner die Wahl des Abflussmodells und die Wahl der Modellparameter. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zur Eichung von Abflussmodellen in der Regel nur Beobachtungen von kleineren Hochwässern zur Verfügung stehen. Im Vergleich zu sonstigen Abflussuntersuchungen wird daher mehr Augenmerk auf die Bestimmung der angeführten Modell-Eingangsgrößen und Modellparameter zu legen sein. Zu beachten ist dabei die Abstimmung aller Annahmen und Vorgaben auf die Verhältnisse bei Extremabflüssen.

3.3.1 Bemessungsniederschlag

Überschreitungswahrscheinlichkeit

Die erste wesentliche Entscheidung bei der Wahl des Bemessungsniederschlags bildet die Wahl der Überschreitungswahrscheinlichkeit. Im Leitfaden zur Ermittlung von Bemessungshochwässern für Talsperren wurde sie gleich der Wahrscheinlichkeit des Abflusses angesetzt. Dies entspricht einer vielfach geübten Praxis (siehe z.B. Ihringer und Höfer, 2006) und ist in Einklang mit üblichen Ansätzen wie z.B. in DVWK (1999b), Institute of Hydrology (1999), Verworn (2006). Auswertungen von Beobachtungen deuten allerdings darauf hin, dass „die Jährlichkeit eines Hochwassers sich ganz wesentlich von der Jährlichkeit des auslösenden Niederschlages unterscheiden (kann) und dieser Unterschied zum großen Teil auf die unterschiedliche Abfluss-

bereitschaft von Einzugsgebieten zurückzuführen (ist)“ (Blöschl et al., 2003b), ähnlich auch z.B. Naef et al.(2005). Bei der Bewertung der Ergebnisse der damit durchgeführten Abflussberechnungen ist daher zu berücksichtigen, dass die so getroffene Annahme „auf der sicheren Seite“ liegt.

Als weitere Merkmale des Bemessungsniederschlags sind die Niederschlagshöhe, die Niederschlagsdauer und die zeitliche und die räumliche Verteilung in Abstimmung auf die Aufgabenstellung zu wählen.

Informationsquellen

Zur Bestimmung der Merkmale Höhe und Dauer kann von mehreren Informationsquellen ausgegangen werden. (a) Statistische Auswertungen von Niederschlagsbeobachtungen an registrierenden Stationen. Der in der Ingenieurpraxis üblichen Darstellung nach geben sie einen Zusammenhang zwischen der Niederschlagshöhe (bzw. Intensität) und der Dauer sowie der Jährlichkeit. Ergebnisse von Österreich weiten systematischen Auswertungen dieser Art liegen als ÖKOSTRA- bzw. - aus jüngster Zeit - als HAÖSTRA-Werte vor (Weilguni, 2007). Liegt Material von noch nicht ausgewerteten Stationen vor, können entsprechende Auswertungen nach den für ÖKOSTRA verwendeten Auswerterichtlinien (siehe Weilguni, 2007) durchgeführt werden. Angaben auf dieser Basis zeichnen sich durch die systematische Vorgangsweise bei ihrer Ermittlung aus. (b) Starkniederschlag-Daten aus den Jahrbüchern des Hydrographischen Dienstes. Sie beruhen zum Teil auf Mitteilungen der Stationsbeobachter und zum Teil auf Erhebungen anhand der Registrierungen. Sie sind dem Charakter nach daher heterogen, es fehlt ihnen daher auch die theoretische Basis für geschlossene statistische Auswertungen. Andererseits enthalten sie doch wertvolle Information in dem Sinne, dass an ihnen erkennbar wird, welche Niederschlagshöhen bzw. Intensitäten auf jeden Fall schon einmal beobachtet wurden. Sie lassen daher eine Schlussfolgerung in Richtung Extremwerte zu in der Art, dass etwaige Höchstwerte nur noch größer, nicht jedoch kleiner sein werden. Sie können daher für Grenzwert-Betrachtungen herangezogen werden. Eine Zusammenfassung aller in den Jahrbüchern von 1948 bis 1993 enthaltenen Starkniederschlag-Daten liegt in der Arbeit von Gutknecht und Watzinger (1996) vor. (c) Eine wertvolle Quelle zu Niederschlägen größerer Dauer – diese sind für Großereignisse und für Bemessungssituationen mit größeren Verzögerungszeiten (Retentionen) häufig die maßgebenden – bilden die in den Hydrographischen Jahrbüchern für alle Niederschlagsstationen ausgewiesenen maximalen jährlichen Tagesniederschläge. Dazu liegen in vielen Stationen Angaben über zum Teil lange Zeitreihen vor, die eine Auswertung in Richtung seltener Ereignisse verlässlicher machen. (d) HAÖ-Modellniederschläge (Lorenz und Skoda, 2000; 2003; Weilguni, 2007). Sie beruhen auf Modellrechnungen mit einem meteorologischen Modell für konvektive Niederschläge, das mit maximierten, aber für Mitteleuropa plausiblen Anfangs- und Randbedingungen (z.B. labile Luftschichtung, hohe Einstrahlungswerte, hohe Temperaturen und Wasserdampfgehalte, geeignete zeitliche Tendenzen dieser Größen) Modellniederschläge berechnet und das mit den Ergebnissen von extremwertstatistisch ausgewerteten Messstellendaten kalibriert wurde. Angaben liegen für Dauerstufen kleiner bzw. gleich 12 Stunden und für Jährlichkeiten

bis 100 vor. Sie sind bei den Dienststellen des Hydrographischen Dienstes und bei der Abteilung VII/3-Wasserhaushalt (HZB) im BMLFUW zu erhalten. Für die Dauerstufen 15, 60 und 180 Minuten und die Jährlichkeiten 2, 10, 50 und 100 sind Angaben den Karten 2.5 bis 2.7 des HAÖ zu entnehmen. (e) Angaben über Extremereignisse – im In- und Ausland – aus speziellen Auswertungen im Gefolge von außerordentlichen Ereignissen. Sie bilden die Basis für Vergleiche bei der Frage nach den größtmöglichen, den vermutlich größten und ähnlich definierten Grenzwerten („Rekord-Werte“). Wesentliches Element bei der Frage der Einbeziehung solcher Daten bildet die Frage der Übertragbarkeit solcher Beobachtungen auf das Untersuchungsgebiet. Die Entscheidung darüber ist über eine Prüfung der Vergleichbarkeit der Entstehungsbedingungen solcher Ereignisse zu treffen. Sie wird in der Regel unter Einbeziehung einer Meteorologischen Expertise erfolgen.

Vorgangsweise bei der Festlegung des Bemessungsniederschlags

Ausgehend von der Möglichkeit der Nutzung dieser verschiedenen Datenquellen wird im Leitfaden folgende Vorgangsweise bei der Festlegung der Bemessungsniederschläge vorgeschlagen: (i) Definition der maßgebenden meteorologischen Situation für das Auftreten von extremen Niederschlägen im Gebiet. Anhaltspunkte dazu bieten die meteorologischen Analysen von außerordentlichen Ereignissen - z.B. 2002 und 2005 in Österreich (Godina et al., 2003; BMLFUW, 2004) – und vergleichende Auswertungen solcher Ereignisse in Hinblick auf ihre meteorologische Genese (z.B. Grebner und Grubinger, 2004; Steinbrich et al., 2005; Tetzlaff et al., 2001). Aus dieser Definition ergeben sich vielfach bereits wesentliche Anhaltspunkte für die Wahl der Ereignismerkmale Niederschlagsdauer (kurz bei lokalen Starkregen, lang bei zyklonal- bzw. fronten-gebundenen Niederschlägen), Intensität, zeitliche und räumliche Verteilung (Ausdehnung und Bewegung der Niederschlagsfelder). (ii) Analyse der größten hochwasserauslösenden Niederschlagsereignisse im Einzugsgebiet bzw. in der Region in Hinblick auf die Merkmale: Zeitpunkt des Auftretens (Jahreszeit), Dauer, Höhe, Intensität, räumliche Ausbreitung, zeitlicher Verlauf. (iii) Erhebung von Angaben über Bemessungsniederschläge auf Basis statistischer Analyse – etwa nach den Punkten (a), (b) und (d) der obigen Aufstellung. In Anlehnung an eine lang geübte Praxis können für längere Dauerstufen auch Vergleichswerte durch Extrapolation der Kreps-Schimpf-Kurven (Kreps und Schimpf, 1965) ermittelt werden. (iv) Gegenüberstellung der aus den statistischen Angaben und den Modellniederschlägen resultierenden Werte – in Weilguni (2007) werden dazu aus einer Kombination ermittelte $h_{N\text{-optimiert}}$ – Werte vorgeschlagen – und den beobachteten Extremwerten in der Region (als Beispiel siehe u.a. Abb. 2 in Gutknecht et al.(2006)). Die endgültige Wahl des Bemessungsniederschlags wird je nach Datensituation aus einer geeigneten Gewichtung der Aussagekraft der nach den verschiedenen Methoden hergeleiteten Werte getroffen. Da in der Regel Eindeutigkeit nicht zu erwarten ist, kann die Bandbreite der erhaltenen Angaben auch zur Ermittlung eines Unschärfereiches verwendet werden, der für Sensitivitätsuntersuchungen herangezogen werden kann.

Zeitliche Verteilung

Die Wahl der zeitlichen Verteilung ist im Zusammenhang mit der Wahl des maßgebenden Ereignisses zu sehen. Kurze, konvektive Ereignisse weisen ihre maximale Intensität häufig im 1. oder 2. Viertel der Regendauer auf, länger dauernde Regen enthalten oft mehr als einen Regenblock, wobei sich das Maximum mit zunehmender Regendauer vielfach gegen Ende des Regens hin verschiebt (Huff, 1969; Gutknecht, 1982). Von Extremereignissen ist auch die Einlagerung von kurzen, sehr intensiven Starkregen innerhalb des Ereignisses bekannt. Die Wahl des Modellregens kann von solchen Erfahrungen ausgehen. Wurden im Gebiet oder in der Umgebung bzw. Region bereits „außerordentliche“ Ereignisse beobachtet, so bietet sich an, die dabei aufgetretenen Verteilungen auch für das Bemessungsereignis zu übernehmen, z.B. über affine Verzerrung. Der Vorteil der Wahl einer beobachteten Verteilung kann darin gesehen werden, dass in ihr die meteorologischen Verhältnisse in der Region implizit zum Ausdruck kommen. Wird keine realistische Nachbildung des Niederschlagsgeschehens angestrebt, kann auch von den häufig verwendeten, mehr schematisch konstruierten Modellregen wie gleichverteilten, anfangs- bzw. endbetonten Verteilungen ausgegangen werden. Gleichverteilte Regen liefern im Vergleich zu variablen Regen immer den Kleinstwert der berechneten Abflüsse und können in diesem Sinne zur Ermittlung der unteren Grenze der möglichen Abflüsse herangezogen werden.

Räumliche Verteilung

Zur Einbeziehung der räumlichen Verteilung bestehen zwei Optionen: (a) die Aufbereitung einer maßgebenden Verteilung auf Basis einer Auswertung von Isohyetenkarten beobachteter Ereignisse, oder (b) die Umrechnung von Punktniederschlägen auf Gebietsniederschläge über Flächen-Abminderungsfaktoren. Im Falle von (a) ergibt die Auswertung der Niederschlagsverteilungen von beobachteten Extremereignissen auch Auskunft über die Lage und Ausdehnung von Regenzentren. Dies kann herangezogen werden zur Entwicklung von Szenarien, in denen die Auswirkung von Verlagerungen des Zentrums bzw. der Zentren studiert werden kann (z.B. IRKA, 2003). In vielen Fällen ist bereits eine Darstellung auf Basis von Tagesniederschlägen sehr aufschlussreich. In der Veränderung der Regenhöhe mit der Distanz vom Zentrum spiegelt sich der Charakter des Niederschlagsereignisses wider (lokal konvektiv; advektiv; orographisch verstärkt etc.). Im Falle (b) kommen diese Unterschiede in der Form und der Stärke der Abnahme-Tendenz in den Höhe-Flächen-Dauer-Kurven zum Ausdruck. Ihnen kann auch der Flächenabminderungskoeffizient, definiert als Quotient zwischen der Niederschlagshöhe bei einer bestimmten Bezugsfläche und der Niederschlagshöhe im Zentrum, entnommen werden. Ist eine Ermittlung dieser Koeffizienten auf Basis von Ereignisdaten nicht möglich, kann in Annäherung auf die in der Literatur gegebenen Abminderungsfunktionen zurück gegriffen werden (Hershfield, 1968; Gutknecht, 1982; Watzinger, 1997). Wesentlicher Aspekt ist hierbei eine Differenzierung nach dem Ereignis-Typ. Als Indikator kann die Regendauer dienen.

PMP (Probable Maximum Precipitation) für Sicherheitshochwässer

Niederschläge für den Fall des Sicherheitshochwassers sind definitionsgemäß im Bereich des PMP zu wählen. Zur Ermittlung liegen einige methodische Anleitungen vor (DVWK, 1983; WMO, 1986). Wesentliche Bestimmungsstücke bilden dabei (a) beobachtete extreme Niederschlagsereignisse in der Region und (b) langjährige Aufzeichnungen der Taupunkte der Luft in Oberflächennähe. Von der Eignung der vorhandenen Daten zu diesen Merkmalen hängt sehr wesentlich das Ergebnis der Berechnungen ab. Die Bearbeitung sollte daher eine sorgfältige Analyse dieser Daten beinhalten.

Zu Vergleichszwecken stehen in Österreich mit den Modellniederschlägen nach Lorenz und Skoda (h_N Modell-Maximierung nach Weilguni, 2007) bei Wahl großer Jährlichkeiten wie z.B. $T = 5000$ aufgrund der Annahmen bei der Modellierung Angaben zur Verfügung, die vielfach in der Größenordnung maximierter Werte liegen dürften. In Deutschland bilden die vom Deutschen Wetterdienst erarbeiteten „Maximierten Gebietsniederschlagshöhen in Deutschland“ eine entsprechende Basis (DVWK, 1997; Stalman et al., 2004). Anwendungen dieser Werte bei konkreten Planungen beschreiben u.a. Dittrich et al. (2004) und Lohr und Winkler (2004).

3.3.2 Niederschlag-Abfluss- (NA-) Modell

Modelltyp

Bei der Wahl des Modelltyps kann heute zwischen einer überaus großen Zahl von Modellen gewählt werden. Aus theoretischer Sicht kann zwischen Ereignis-Modellen und kontinuierlichen Modellen, zwischen kompakten Modellen, teil-gegliederten Kompakt-Modellen und flächen-detaillierten Modellen unterschieden werden. Tatsächlich wird die Wahl sehr oft aufgrund von praktischen Erwägungen getroffen werden wie Datenlage, Verfügbarkeit der Software, Vertrautheit mit der Software und dem Modell.

Unbedingt in die Entscheidung über das zu wählende Modell sollte der Aspekt mit einfließen, inwieweit bei Anwendung des Modells dem Umstand Rechnung getragen werden kann, dass sich das Gebietsverhalten bei Übergang von Normal- zu Extremereignissen in aller Regel ändert (Gutknecht, 1994). Extremereignisse sind durch die Begriffe „höher“, „schneller“ und „länger/weiter“ charakterisiert. Die Größe übersteigt das bisher Beobachtete, die Dynamik der Vorgänge nimmt zu, die Ausdehnung des Bereiches, in dem sich das Ereignis auswirkt, nimmt zu. Bei der Modellierung ist dies in zweifacher Richtung zu berücksichtigen: (a) Eignung des Modells von der Modellstruktur her zur Wiedergabe der Veränderung in den Abflussvorgängen wie z.B. Veränderung der zum Abfluss beitragenden Flächen, Verschiebung der Anteile der diversen Abflusskomponenten, etc.; (b) Einbeziehung unterschiedlich großer Ereignisse bei der Modelleichung, um die Auswirkungen der Veränderungen im Abflussprozess auf die Modellstruktur und die Modellparameter zu erfassen.

Modellstruktur – Gliederung in der Fläche und nach der Vertikalen

In Hinblick auf den Aspekt (a) ist zunächst zwischen flächen-detaillierten Modellen und einfacheren Konzeptmodellen unter den Aspekten Gliederung in der Fläche und Gliederung in der Vertikalen zu unterscheiden. Flächen-detaillierte Modelle können auf Basis einer Rasterteilung, einer Teilung nach hydrologisch ähnlichen bzw. ähnlich reagierenden Gebietsflächen und einer Teilung nach Untergebieten konzipiert werden. Konzeptmodellen liegt häufig eine Unterteilung nach Untergebieten zugrunde. Flächen-detaillierte Modelle können daher eine feinere Auflösung nach den Gebietsmerkmalen aufweisen und sie würden sich von daher aufgrund der heute gegebenen GIS-Informationen und der Computerleistungen her anbieten. Dem steht entgegen, dass häufig die Daten fehlen, um eine der hohen räumlichen Auflösung entsprechende differenzierte Kalibrierung der vielen Parameter durchführen und das Modell auch an „internen“ Punkten des Einzugsgebiets eichen zu können und dass die Modellentwicklung aufwändig ist. Konzeptmodelle enthalten weniger Parameter und sind deshalb leichter zu eichen und auch leichter in Hinblick auf die Rolle der Parameterwerte zu kontrollieren. Die Parameterwerte lassen sich allerdings nicht ohne weiteres bestimmten Abflussvorgängen zuweisen, wenn nicht auch im Konzeptmodell eine gewisse Differenzierung in der Fläche vorgenommen wird. Sie hat sich an den Abflussreaktionstypen – z.B. sehr schnell, schnell, mäßig, langsam, sehr langsam – zu orientieren. Eine Möglichkeit dazu bietet die Konzeption der hydrologisch ähnlichen bzw. homogenen Gebiete, wobei hier als Kriterium eine **Ähnlichkeit in der Abflussreaktion** auf verschiedene Niederschläge maßgebend ist.

Ansätze in dieser Richtung sind im Zusammenhang mit dem Bestreben, eine prozessorientierte Einzugsgebietsmodellierung zu entwickeln, entstanden und für die Ingenieurpraxis aufbereitet worden. Als Beispiel möge die direkt auf Abflussreaktionen abstellende Konzeption in der Praxishilfe „Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten“ (BWG, 2003) dienen, die in Kapitel 4.1 eine Vorgangsweise zur NA-Modellierung beschreibt, die eine Gebietsunterteilung nach verschieden schnell und stark reagierenden Flächen vorsieht. Sie entspricht der in Naef et al. (1998) bereits vorgestellten Typisierung der Abflussbildungsprozesse (Blatt 5.7 in HADES, Hydrologischer Atlas der Schweiz). Für die Einstufung der Gebietsflächen nach den verschiedenen Abflussreaktionen steht eine Entscheidungshilfe in Form eines Prozessbeurteilungsschemas (PBS) zur Verfügung (siehe auch Scherrer, 2007).

Einen neuen Weg zur Einbeziehung von Prozessinformation beim Einsatz eines flächengegliederten Abflussmodells auf Rasterbasis beschreiben Reszler et al. (2006). Er besteht in einer Modellentwicklung in fünf Schritten, die vom Setzen von *a priori* Parameterwerten für geeignet gewählte Hydrotöpfe ausgehend über eine Methodik, die unter Nutzung verschiedener Datenformen die dynamischen Eigenschaften der Abflussganglinien bei unterschiedlichen Ereignissen zu erfassen versucht („spektrale Entmischung“), zu simulierten Mustern einer Reihe von Prozessmerkmalen führt, die anhand der simulierten Verteilungsmuster auf ihre Plausibilität hin kontrolliert werden können.

Eine Orientierung an Abflussbildungsprozessen ist aber auch bei Anwendung von Konzeptmodellen möglich, wenn die Definition der Untergebiete in Anlehnung an das Hydrotop-Konzept erfolgt. Als Beispiel kann die Struktur eines Konzeptmodells mit mehreren Speichern und einem Abflussbeiwertansatz dienen, wobei die Speicher so definiert werden, dass sie verschiedenen raschen Abflussreaktionen entsprechen (siehe z.B. Abb. 3 in Gutknecht et al., 2006). Diese Modellkonzeption erlaubt über die Variation des Abflussbeiwertes und der Parameter der Speicher bzw. Speicherkaskaden sowie der Belastungsaufteilung zwischen den verschiedenen Komponenten in Relation zu einer Veränderung der Größe der Abflüsse eine Berücksichtigung des stark nicht linearen Verhaltens des Abflussbildungsprozesses.

Modellparameter und Kalibrierung

Die Bereitstellung eines NA-Modells für die Berechnung von extremen Hochwässern steht vor der Schwierigkeit, das – abgesehen von Ausnahmefällen – keine Beobachtungsdaten von solchen Ereignissen vorliegen. Der Schwerpunkt der Modellerstellung verlagert sich damit von der Modelleichung zur Vor-Definition der Modellparameter auf Basis vorhandenen Wissens über das Modell und die Modellparameter, insbesondere in Hinblick auf die hydrologische Interpretierbarkeit der Modellparameter. Zwei Aspekte sollen hier angeführt werden: (1) Das Modell sollte wenn möglich an Daten von verschiedenen großen Ereignissen geeicht und getestet werden, um die Aussagekraft der erhaltenen Modellparameter für den Fall der Extrapolation bei Anwendung des Modells auf Extremsituationen abschätzen zu können. (2) Das Modell und damit auch die Art der Modellparameter sollte so gewählt werden, dass eine Vorstellung über die Größe der Parameterwerte unter hydrologischer Interpretation gewonnen werden kann. Als Beispiel zu diesem Punkt kann etwa die Interpretierbarkeit des Abflussbeiwerts angeführt werden. Er kann abweichend von der üblichen Darstellung auch als Anteil der zum Abfluss beitragenden Gebietsteile interpretiert werden, der sich mit einer Veränderung der Größe eines Ereignisses ebenfalls verändern kann. Diese Veränderung ist leicht nachvollziehbar anhand von Beobachtungen von verschiedenen großen Ereignissen.

Anfangsbedingungen

Erfolgt die NA-Modellierung auf Basis eines Ereignis-Modells, so sind Annahmen über den Feuchtezustand des Einzugsgebiets bei Ereignisbeginn zu treffen und die betreffenden Parameter entsprechend zu setzen. Gewisse Hinweise für eine plausible Wahl dieser Größen sind aus den Informationen über den maßgebenden Hochwassertyp und seine Merkmale bezüglich Zeitpunkt des Auftretens im Jahresverlauf, Einfluss von Schneeschmelze etc. zu gewinnen, da alle wesentlichen Einflussfaktoren auf die Vorbefeuchtung sehr stark von der Wasserbilanz abhängen und damit einen saisonalen Verlauf haben. Wenn Abflussbeobachtungen vorliegen, bietet sich an, eine Auswertung in Hinblick auf Vorregenindex, Bodenfeuchtespeicher-Inhalt und dergleichen durchzuführen und etwaigen Zusammenhängen zwischen den Vorereignisbedingungen und dem Ereignis selbst nachzugehen.

Eine schwieriger zu beantwortende Frage ist die nach dem möglichen Auftreten einer Abfolge von Ereignissen. Erfahrungen wie die beim Augsthochwasser 2002 im Kamp- und im Donaugebiet lehren, dass durch das Auftreten eines ersten Ereignisses die Abflussbeiwerte für das in einem Abstand von einer Woche folgende Ereignis stark angehoben wurden. Systematische Erhebungen über solche Situationen liegen nicht vor. Im gegebenen Fall müssten diesbezüglich eigene Untersuchungen angestellt werden.

Ereignismodell versus kontinuierliche Simulation

Die Schwierigkeiten mit der Notwendigkeit der Definition von Anfangsbedingungen bilden ein Argument für die Anwendung eines NA-Modells, mit dem das Abflussgeschehen über einen entsprechend langen Zeitraum (10.000 Jahre, 100.000 Jahre etc.) kontinuierlich simuliert wird. Aus der so gewonnenen sehr langen Zeitreihe können dann alle Ereignisse über einem gewissen Schwellenwert nach statistischen Methoden in Hinblick auf den gesuchten Bemessungswert ausgewertet werden. Alle Zusammenhänge zwischen Vorwetter und Ereignis bzw. zwischen aufeinander folgenden Ereignissen sind implizit in dieser Zeitreihe erfasst. Anwendungen dieses Ansatzes finden sich zum Beispiel in Consuegra et al. (1998) und BWG (2003, Kap.4.2). Den Vorteilen dieses Ansatzes steht aber auch gegenüber, dass als Vorarbeiten zur Anwendung des Ansatzes aufwändige Arbeiten zur Aufstellung des Modells zur Generierung der kontinuierlichen Reihe der Niederschläge vorausgehen müssen.

3.4 Gradex-Verfahren

Die Grundidee des Gradex-Verfahrens besteht in der Kombination einer Niederschlagsstatistik mit einem deterministischen Niederschlag-Abflussmodell und einer Hochwasserstatistik. Als Eingangsgrößen dienen die Jahresreihe beobachteter Hochwasserscheitel für das gegebene Gebiet, eine Jahresreihe beobachteter maximaler jährlicher Niederschläge der Dauer H von einer für das Gebiet repräsentativen Station, der Flächenabminderungsfaktor für den Gebietsniederschlag, eine die zeitliche Dynamik der Gebietsreaktion und der hochwasserauslösenden Niederschläge beschreibender Parameter r sowie die Jährlichkeit T_g , ab der Sättigung des Gebiets angenommen werden kann. Die Bezugsdauer H ist womöglich in der gleichen Größenordnung wie die Konzentrationszeit des Gebiets zu wählen, doch kann auch näherungsweise eine Bezugsdauer von $H = 24$ Stunden gewählt werden, um Reihen maximaler Tagesniederschläge verwenden zu können. Der Parameter r ist durch Auswertung beobachteter Abflusswellen des Untersuchungsgebiets zu bestimmen, und zwar als das Verhältnis zwischen Scheitelabfluss und dem mittleren Abfluss über die Dauer H , wobei er besonders auf große Ereignisse abgestimmt wird. Die Jährlichkeit T_g wird auf Basis einer hydrologischen Einschätzung des Gebiets gewählt. Der Vorteil des Gradex-Verfahrens gegenüber der Hochwasserstatistik alleine besteht darin, dass für die kleinen Auftretenswahrscheinlichkeiten zusätzliche Information aus dem Niederschlag verwendet wird, für den oft längere Reihen als für den Abfluss vorliegen.

3.5 Hüllkurven

Hüllkurven stellen ein schon früh verwendetes und bewährtes Instrument der Ingenieurpraxis dar. Sie begrenzen definitionsgemäß die bisher beobachteten höchsten Hochwasserscheitelabflüsse einer Region und geben nach Vischer (1980) einen „empirischen Grenzwert“ an.

Die Stärke dieser Konzeption besteht darin, dass die darin aufgenommenen Werte tatsächlich die gegenwärtig obere Begrenzung aller bisher beobachteten Ereignisse bilden und dass dadurch ein Bild entsteht, was an Extremwerten bereits tatsächlich aufgetreten ist. Hüllkurven ermöglichen ferner durch Vergleich der Werte von verschiedenen Gebieten eine Anschätzung, wie unterschiedliche Entstehungsbedingungen und Gebietseigenheiten – insbesondere Meteorologie, Orographie, Wasserbilanz, vorherrschender Hochwassertypus – die Größenordnung von Extremen beeinflussen. Sie ermöglichen auch ein „Ausschließen“ von Werten einer bestimmten extremen Größe, wenn aufgezeigt werden kann, dass diese Werte nur unter Bedingungen entstanden sind, die im Untersuchungsgebiet ausgeschlossen werden können.

Die Schwäche von Hüllkurven besteht darin, dass ihre Aussagekraft sehr stark davon abhängt, ob in den die Lage der Grenzkurve bestimmenden Höchstwerten auch tatsächlich Werte von außerordentlichen, extremen Ereignissen enthalten sind. Dies kann umso eher erwartet werden, je länger die Datenreihen sind und je größer die betrachtete Region ist.

Eine Sichtung und Bewertung des Basismaterials ist daher ein notwendiger Bestandteil einer Anwendung der Methode. Eine Hilfestellung kann dabei der Vergleich mit den in der Literatur gegebenen Hüllkurven sein (Klein et al., 2006).

4. Einbindung von Zusatzinformation

Zielsetzung der Einbindung von Zusatzinformation ist es, die Unsicherheiten in der Bestimmung der extremen Hochwasserabflüsse durch Ausweitung des Informationsgehalts in den Untersuchungen zu reduzieren. Diese Ausweitung kann zeitlich – etwa durch Einbindung von Information von Extremereignissen der Vergangenheit –, räumlich – durch Einbeziehung von Information über extreme Abflüsse und Abflussbedingungen an anderen Stellen – oder prozess-bezogen – durch Einbringen von Information über die Merkmale, Einflussfaktoren und Entstehungsbedingungen von Extremsituationen erfolgen. Darauf ausgerichtete Untersuchungen zielen darauf ab, zu einem Verständnis um die bei extremen Ereignissen dominanten Einflüsse zu kommen.

Die Methoden der Einbindung können direkt sein, so wenn die Hochwasserstatistik um die Daten von historischen Hochwässern erweitert wird, oder indirekt, wenn Wissen um die Merkmale, Eigenheiten und Prozessabläufe von Extremereignissen in die Untersuchungen z.B. über die Definition von Szenarien, aber auch über die Abstimmung der Modelle auf extreme Abflusssituationen genutzt wird.

Um diese Möglichkeit nutzen zu können, sind in der Regel entsprechende Vorarbeiten zu leisten, um die gewünschte Information zu beschaffen. Dies ist mit großem Aufwand verbunden, wenn die Information erst erhoben werden muss. Eine wichtige Rolle kommt daher den verfügbaren Informationsquellen zu.

4.1 Historische Ereignisse

Informationsquellen über historische Ereignisse stellen in erster Linie Archive und Chroniken sowie Hochwassermarken dar. Die Entwicklung in jüngerer Zeit hat dazu eine Reihe von Studien an großen, aber auch an kleinen Flüssen gebracht, in denen eine Aufarbeitung der Archive erfolgte. Beispiele sind dazu auch die Arbeiten von Grünewald, Rohr, Wiesbauer, Naef und Scherrer in diesem Band. Eine Zusammenfassung (Brazil and Kundzewicz, 2006) über solche Studien ist in dem Schwerpunkt-Heft „Historical Hydrology“ des Hydrological Sciences Journal (Vol.5, 2006) enthalten.

Informationsgehalt

Die in historischen Dokumenten enthaltenen Informationen erlauben vielfach nicht eine genaue Quantifizierung der Ereignisse, sie können aber dazu beitragen, zumindest eine „Grob“-Einschätzung nach der Größe des Ereignisses etwa nach dem Muster „sehr groß/groß/mittel/klein“ (z.B. Scherrer, 2007) durchführen zu können. Wichtige zusätzliche Informationen stellen Merkmale wie der Zeitpunkt des Auftretens oder die Entstehungsbedingungen (meteorologische Situation, auslösende Niederschläge, Vorwetter) dar, aber auch Informationen über den Ablauf des Ereignisses und die Schadenssituation. Informationen dieser Art können angebunden werden an aktuelle Unwetterchroniken wie z.B. die jährlichen Berichte zu den Unwetterschäden in der Schweiz (Röthlisberger und Keller, 1980 und folgende).

Erkenntnisgewinn

Die Einführung von (rekonstruierten) Hochwasserwerten von historischen Ereignissen in die Hochwasserstatistik kann wesentlich dazu beitragen, den Verlauf der Verteilungsfunktion im Extrapolationsbereich abzusichern. Von Interesse ist dabei, inwieweit die Einbindung der Extremhochwasserwerte die Verteilungsfunktion der Reihe ohne Zusatzinformation bestätigt bzw. verändert und welchem Hochwassertyp die zusätzlichen Extremwerte zuzuordnen sind (z.B. Schiller, 1986; IKRA, 2003).

Eine grundlegende Voraussetzung für die Durchführung dieser Analysen ist allerdings, dass die Durchflüsse der historischen Ereignisse zutreffend abgeschätzt werden konnten. Die Rekonstruktion der Durchflüsse beruht auf der Kenntnis des Profils, der richtigen Höhenübertragung des Wasserstandes, der Einschätzung des Gefälles, vor allem aber der Rauheit (Cameron, 2007) sowie, wie Naef (2007) aufzeigt, der richtigen Einschätzung der Abflusssituation und der Fließzustände. Zusätzlich Aspekte bilden die Gerinnegeometrie und die Frage des Auftretens von Ausuferungen. Mit der Rekonstruktion historischer Extremabflüsse sind daher viele Unsicherheitsmomente verknüpft. Um zuverlässige Angaben zu bekommen, sind in der Regel aufwändige zusätzliche Untersuchungen durchzuführen.

4.2 Prozessinformation

Mit der Einbeziehung von „prozess-bezogener“ Information wird versucht, kausale Zusammenhänge in die Ermittlung von Extremabflüssen einzubringen. Analog zur Situation bei der historischen Information kann auch hier die Einbindung direkt oder indirekt geschehen. Im Falle der direkten Einbindung wird das Wissen über den Abflussprozess über die Konzeption der Abflussmechanismen und Abflussbildungstypen eingebracht. Im Falle der indirekten Einbindung kann dies über eine „Grob“-Klassifikation auf der Basis von Abflussregime-, Wasserbilanz- und Hochwassertyp-Kategorien geschehen.

Informationsquellen

Auf Unterlagen über die Indikatoren Wasserbilanz, Abflussregime und Niederschlagsregime wurde bereits in den Kapiteln 3.2 und 3.3.1 im Zusammenhang mit der Frage der Übertragung von Information zwischen Gebieten hingewiesen. Eine Grob-Klassifikation über Hochwassertypen ermöglicht in Ergänzung dazu eine Unterscheidung des Hochwasserregimes auf Ereignisbasis. Blöschl et al. (2000) unterscheiden dabei in Hochwässer zufolge langer Niederschläge, Hochwässer zufolge kurzer Niederschläge, Hochwässer aufgrund von Gewittern, Regen-auf-Schnee-Ereignisse und Schmelzhochwässer. Wie die Untersuchungen zeigten, weisen die statistischen Eigenschaften der nach diesen Prozesstypen differenzierten Hochwasserkollektive deutliche Unterschiede auf (Blöschl et al., 2005).

Für die direkte Form der Einbindung muss Information auf Ereignisbasis erhoben werden. Liegen Abflussbeobachtungen vor, so bietet sich die Auswertung der Ereignisabflussganglinien an. Im Verlauf des absteigenden Astes der Ganglinien bilden sich die verschiedenen Abflussreaktionstypen – sehr rasche bzw. rasche / mäßige / langsame bzw. sehr langsame Reaktion – ab. Aus den Rückgangskoeffizienten kann auf die Speicherparameter geschlossen werden. Bei Analyse verschieden großer Ereignisse kann der Frage nachgegangen werden, ob und in welcher Weise sich die Anteile der Abflusskomponenten mit der Ereignisgröße verschieben und daraus z.B. bei Anwendung eines Parallel-Speicher-Modells die Veränderung in der „Belastungsaufteilung“ für die einzelnen Speicherkomponenten erhoben werden. Die Ganglinienanalyse führt damit zur Entwicklung einer „Vorstellung“ vom Abflussprozess, von der ausgehend das Abflussmodell konzipiert wird.

Ergänzt werden kann die Analyse über Einbeziehung von „Vor“-Wissen um die Abflussbildungstypen, wie sie etwa in Naef et al. (1998) und Scherrer (2007) beschrieben werden. Eine Übersicht über die wesentlichen Abflussbildungsprozesse bietet auch das Heft „Abflussbildung“ (Bronstert, 2005) in dem eine Darstellung der Prozesse Infiltrationsüberschuss, Sättigungsüberschuss, Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss gegeben wird. Über die Dynamik der Abflussreaktion lässt sich hierbei ein Bezug zu den direkt aus Feldversuchen abgeleiteten Abflusstypen herstellen.

Ein wichtiges Element der Modellbildung nach dieser Konzeption ist die Erhebung von Information über die Abflussprozesse im Rahmen einer Gebietsbegehung. Hinweise auf die Rolle und zur Durchführung einer solchen Feldbegehung finden sich

z.B. auch in den Anweisungen in BWG (2003, Kap.5) und in Gutknecht und Kirnbauer (1996). In dieser Arbeit wird eine Zusammenstellung der Faktoren gegeben, die bei einer prozess-orientierten Gliederung des Einzugsgebiets berücksichtigt werden sollten: Geologischer Aufbau und Geomorphologie - als Hinweise auf Versickerungs- („Nähr“-), Transport- und Austritts- („Zehr“-) Gebiete des Abflusses; Boden-Vegetations-Komplex in Zusammenwirkung mit Exposition, Seehöhe - als bestimmende Faktoren für den Bodenwasserhaushalt; Topographie, Hangneigung und Hangneigungsverlauf - als maßgebend für die Ausbildung des Landflächenabflusses (Oberflächenfließen, Sättigungsflächenabfluss, oberflächennaher Bodenabfluss). Durch die Einbeziehung der geologischen und hydrogeologischen Informationen kann auch ein unterschiedlicher Untergundaufbau in den verschiedenen Teilen des Einzugsgebietes Eingang in die Modellkonzeption finden. Ein gutes Beispiel dafür gibt die jüngst erschienene Arbeit von van den Bos et al. (2006).

Anleitungen zur Interpretation und Umsetzung der Feldbeobachtungen enthalten u.a. Naef et al. (1998), Löhmannsröben (2002), Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2000), Scherrer et al. (2002) und Markart et al. (2004).

4.3 Szenarienbildung

Bei der Berechnung von Extremereignissen sind immer eine Reihe von Annahmen zu treffen, unabhängig davon, welche Methode gewählt wird. Aus der Unschärfe bei diesen Annahmen resultiert eine Unsicherheit im Ergebnis. Um die Unschärfe des Ergebnisses erkennbar zu machen, können Vergleichsberechnungen mit verschiedenen Varianten in Hinblick auf die Annahmen durchgeführt werden.

Betreffen diese Varianten auch die Ausgangsannahmen bei der Definition des Bemessungsereignisses, dann können diese Varianten als „Szenarien“ eingeführt werden. Die Vorgabe von gewissen Szenarien ist immer auch bei der Planung von Untersuchungen zur Maximierung der Abflüsse notwendig.

Typische Problemstellungen betreffen in diesem Zusammenhang die Definition des maßgebenden Niederschlagsereignisses und die Annahmen über die Kopplung von Vorwetter und Ereignis. Im Falle des Niederschlagsereignisses kommt dem Muster der Überregnung des Gebietes große Bedeutung zu, insbesondere in Hinblick auf die Lage des Niederschlagszentrums bzw. des Auftretens von mehreren Zentren. In der Regel lassen sich durch Analyse der Niederschlagsverteilung bei beobachteten (oder auch historischen) Ereignissen Anhaltspunkte für die Zentrierung des Niederschlagsfeldes finden. Durch Variation der Lage kann die Auswirkung auf das Abflussereignis studiert werden. In IRKA (2003) werden in dieser Hinsicht z.B. zwei als wesentlich erkannte Muster, eine Nord- und eine Südanströmung und eine Schwerpunktverlagerung, durch Verschiebung der Zentren an andere Punkte des Einzugsgebiets, z.B. in Schwerpunkte von Teileinzugsgebieten im Oberlauf bzw. im Unterlauf untersucht. Ebenso werden verschiedene Annahmen über den Vorniederschlag mit verschiedenen Ereignisniederschlägen kombiniert, um die Auswirkung auf das Berechnungsergebnis angeben und eine Beurteilung der daraus entstehenden Abflusssituation vornehmen zu können. Weitere Fragestellungen wären die Frage nach dem

Auftreten von mehrgipfligen Ereignissen und die Frage nach der Wirkung einer Abfolge von Ereignissen.

Die Bildung von Szenarien dieser Art ist nicht leicht, weil im Allgemeinen die Grundlagen für eine zutreffende Wahl nicht direkt oder zumindest nicht direkt aufbereitet zur Verfügung stehen. Ähnlich wie in den beiden vorangegangenen Punkten ist auch hier mit der Notwendigkeit, entsprechende Vorarbeiten durchführen zu müssen, zu rechnen. Aus theoretischer Sicht ergibt sich auch die Frage der Bedingungen für eine Übertragung von Information. Alle diesbezüglichen Annahmen sollten durch Prozessinformation abgesichert werden.

5. Ausblick

Die in diesem Beitrag vorgestellten Methoden haben den Rahmen einer auf ein „Ereignis“ abgestellten Simulation nicht verlassen. Wiederholt ist sichtbar geworden, dass bei einer solchen Definition der Bemessungsaufgabe Fragen offen bleiben, die mit der Einbettung des Ereignis in einen gesamten zeitlichen Ablauf zusammenhängen. So weisen auch z.B. Schumann (2004) und Dittrich et al. (2004) auf die Grenzen in der Anwendung von deterministisch definierten Lösungswegen hin.

Als weiterführende Methoden können unter diesem Aspekt Methoden auf Basis der Monte Carlo-Simulation angesehen werden. Möglichkeiten der Erweiterung des Spektrums der Bearbeitungen auf Basis von stochastischer Simulation zeigen etwa die Arbeiten von Consuegra et al. (1998) im Rahmen des Projektes CONSECRU für die obere Rhone, in der durch „Multi-Ereignis-Simulation“ über die Erzeugung von Niederschlags- und Abflussreihen eine erweiterte Basis für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit der Bemessungswerte geschaffen wird. Auf der Generierung einer langen Zeitreihe von Gebietsniederschlägen beruht auch die Vorgangsweise im Projekt „Model Instrumentation Rhine“ (Chbab et al., 2006 und Literatur darin).

Ein anderer interessanter Weg eröffnet sich mit der Methodik der abgeleiteten Verteilungsfunktion (Sivapalan et al., 2005; Blöschl, 2007).

6. Literatur

Alila, Y., Mтираoui, A. (2002) Implications of heterogeneous flood-frequency distributions on traditional stream-discharge prediction techniques. *Hydrological Processes* 16, 1065-1084. DOI: 10.1002/hyp.346

Andre, S., Boillat, J.-L. (2002) Schaffung eines Rückhaltevolumens im Stausee Mattmark für den Hochwasserschutz. In Minor, (Hg.): *Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau*. Mitteilungen 175 VAW ETH Zürich, Band 1, 509-518

Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2000) *Geländeanleitung zur Abschätzung des Abfluß- und Abtraggeschehens in Wildbacheinzugsgebieten*. Materialien Nr. 87 (März 2000), 111 S.

Blöschl, G., Piock-Ellena, U., Merz, R. (2000) *Abflusstypen-Klassifizierung als Basis für die Regionalisierung*. Endbericht Projekt HÖ-12 an Österreichische Akademie der Wissenschaften. Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, Technische Universität Wien, 2000.

- Blöschl, G., Merz, R., Parajka, J., Reszler, Ch. (2004) Analyse regionaler Abflussbeiwerte in Österreich. Bericht im Rahmen BMLFUW Projekt FloodRisk. Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft. Technische Universität Wien, September 2004, 66 S.
- Blöschl, G., Merz, R., Laaha, G., Parajka, J., Skoien, J. (2005) Regionale hydrologische Untersuchungen in Österreich. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich nr.83, 83-98.
- Blöschl, G. (2007) Einsatz von Simulationsmethoden bei der Bestimmung extremer Abflüsse. In Gutknecht, D. (Hg.): Extreme Abflussereignisse. Dokumentation – Bedeutung – Bestimmungsmethoden. Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 206. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, 2007, 227-246.
- BMLFUW (2004) Analyse der Hochwasserereignisse vom August 2002 – FloodRisk. Synthesebericht. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien 2004, 181 S.
- Boillat, J.-L., Schleiss, A. (2002) Determination de la crue extreme pour les retenues alpines par une approche PMP-PMF. wasser, energie, luft – eau, energie, air 94 (H. 3/4), 107-116.
- Brazdil, R., Kundzewicz, Z. (2006) Historical hydrology – Editorial. Hydrological Sciences Journal 51(5), 733-764.
- Bronstert, A. (Hg.) (2005) Abflussbildung – Prozessbeschreibung und Fallbeispiele. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 13.05, Hennef, 2005.
- BWG (2003) Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten. Praxishilfe. Bundesamt für wasser und Geologie, Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 4, Bern 2003, 117 S.
- Cameron, D. (2007) Flow, frequency, and uncertainty estimation for an extreme historical flood event in the Highlands of Scotland, UK. Hydrological Processes 21, 1460-1470. DOI : 10.1002/hyp.6321
- Chbab, E.H., Buiteveld, H., Diermanse, F. (2006) Estimating exceedance frequencies of extreme discharges using statistical methods and physically based approach. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 58 (3-4), 35-43.
- Consuegra, D., Niggli, M., Musy, A. (1998) Concepts methodologiques pour le calcul des crues – Application au bassin versant superieur du Rhone. wasser.energie.luft – eau.energie.air (H. 9/10), 223-231.
- Dittrich, I., Münch, A., Wahren, A., Birke, H. (2004) Extreme Stauanlagenzuflüsse – Lehren aus dem Hochwasser 2002 in Sachsen. In Horlacher, H.-B., Martin, B. (Hg.): Risiken bei der Bemessung und Bewirtschaftung von Fließgewässern und Stauanlagen. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen H.27, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Technische Universität Dresden, 2004, 47-62.
- DVWK (1983) Beiträge zur Wahl des Bemessungshochwassers und zum “vermutlich größten Niederschlag”. DVWK Schriften H. 62. Kommissionsvertrieb Paul Parey, Hamburg und Berlin.

- DVWK (1997) Maximierte Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland. DVWK-Mitteilungen Heft 29, Bonn.
- DVWK (1999a) Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. DVWK Merkblatt 251. ATV-DVWK, Hennef.
- DVWK (1999b) Einsatz von Niederschlag-Abfluss-Modellen zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen. DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft 251. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. Bonn, Verlag Paul Parey, Hamburg.
- Fügner, D., Schirpke, H. (1986) Neue Ergebnisse der Hochwasserberechnung für den Elbestrom in Dresden. Wasserwirtschaft – Wassertechnik (8/1986), 189-191.
- Fürst, J. (2003) Gewässernetzdichte. HAÖ Karte 5.2.
- Godina, R., Lalk, P., Lorenz, P., Müller, G., Weilguni, V. (2003) Die Hochwasserereignisse im Jahr 2002 in Österreich. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich Nr. 82, 1-39.
- Grayson, R., G. Blöschl, A. Western and T. McMahon (2002) Advances in the use of observed spatial patterns of catchment hydrological response. Advances in Water Resources 25, 1313-1334.
- Grebner, D., Grubinger, H. (2004) Charakteristiken alpiner Niederschlagssysteme. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 56 (H. 3-4), 51-58.
- Gutknecht, D. (1982) Zur Ermittlung der zeitlichen und räumlichen Verteilung von Niederschlägen anhand von Standardbeobachtungsdaten. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich Nr. 50, 1-26.
- Gutknecht, D. (1994) Extremhochwässer in kleinen Einzugsgebieten. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 46, H.3/4, 50-57.
- Gutknecht, D. (1996) Abflusentstehung an Hängen – Beobachtungen und Konzeptionen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 48, H.5/6, 134-144.
- Gutknecht, D. und Kirnbauer, R. (1996) Abflusentstehung – Einflußfaktoren und Konzeption. In Markert, B. (Hg.): Wasser im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. Festschrift Prof. G. Peschke, IHI-Schriften Heft 6, Internationales Hochschulinstitut Zittau, 1996, 182-191.
- Gutknecht, D., Watzinger, A. (1996) Aufbereitung und Basisanalyse der Starkregendaten aus den Hydrographischen Jahrbüchern 1948-1993. Technischer Bericht, Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, Technische Universität Wien. (In digitaler Form: BMLFUW (HZB)).
- Gutknecht, D., Blöschl, G., Reszler, Ch., Heindl, H. (2006) Ein „Mehr-Standbeine“-Ansatz zur Ermittlung von Bemessungshochwässern kleiner Auftretenswahrscheinlichkeit. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 58 (H. 3-4), 44-50.
- Hansel, N. (1970) Zur Bestimmung maximaler Hochwasserdurchflüsse durch regionale Betrachtungen. Wasserwirtschaft-Wassertechnik 20 (H. 8), 259-263.
- HAÖ (Hydrologischer Atlas Österreichs). Herausgeber: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien. 1.Lieferung 2003; 2. Lieferung, 2005; 3. Lieferung, 2007.

- Hershfield, D.M. (1968) Rainfall input for hydrologic models. IAHS Publ. 78, 177-188.
- Huff, F.A. (1967) Time distribution of rainfall in heavy storms. Water Resources Research 3 (4), 1007-1019
- Ihringer, J., Höfer, J. (2006) Räumliche Niederschlagsverteilung als Input für N-A-Modelle für größere Einzugsgebiete. In H.-B. Kleeberg (Hg.): Niederschlag – Input für hydrologische Berechnungen. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 14.06, Hennef, 123-140.
- Institute of Hydrology (1999) Flood Estimation Handbook. Volume 4: Restatement and application of the Flood Studies Report rainfall – runoff method; procedures for flood frequency estimation. Institute of Hydrology, Crowmarsh Gifford, Wallingford, 1999.
- IRKA (International Regierungskommission Alpenrhein) (2003) Hydrologie Alpenrhein. IRKA Projektgruppe Flussbau. Zusammenfassender Bericht. St. Gallen, Dezember 2003, 36 S.
- Kirnbauer, R. (1981) Zur Ermittlung von Bemessungshochwässern im Wasserbau. Wiener Mitteilungen Wasser.Abwasser.Gewässer, Band 42.
- Klein, B., Schumann, A., Pahlow, M. (2006) Extreme Hochwasserereignisse an deutschen Talsperren. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 50 (H. 4), 162-168.
- Kling, H., Nachtnebel, H.P., Fürst, J. (2005) Mittlere jährliche Abflusshöhe. HAÖ Karte 5.7.
- Kling, H., Nachtnebel, H.P., Fürst, J. (2007) Saisonale Wasserbilanz. HAÖ Karte 7.2.
- Kölla, E. (1986) Zur Abschätzung von Hochwassern in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessungen. Mitteilungen Versuchsanstalt für wasserbau, Hydrologie und Glaziologie ETH Zürich Nr.87, Zürich 1986.
- Krause, R. (1969) Untersuchungen historischer Hochwasserereignisse zur Verbesserung der Genauigkeit der Ermittlung statistischer Hochwässer. Wasserwirtschaft-Wassertechnik 19, (H.1), 20-23.
- Kreps, H., Schimpf, H. (1965) Starkregen und Starkregenstatistik. Mittelungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich Nr. 42.
- Liebscher, H.J. (1970) Hochwasserwahrscheinlichkeit. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 14 (H. 4), 103-110.
- Lohr, H., Winkler, U. (2004) Ermittlung von extremen Abflüssen und Bemessung für die Talsperre Malter nach dem Augusthochwasser 2002. In Horlacher, H.-B., Martin, B. (Hg.): Risiken bei der Bemessung und Bewirtschaftung von Fließgewässern und Stauanlagen. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen H.27, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Technische Universität Dresden, 2004, 75-84.
- Lorenz, P., Skoda, G. (2000) Bemessungsniederschläge kurzer Dauerstufen ($D < 12$ Stunden) mit inadäquaten Daten. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich Nr. 80, 1-24.
- Lorenz, P., Skoda, G. (2003) Konvektive Starkniederschläge – Niederschlag in 15, 60 und 180 Minuten. HAÖ, Blätter 2.5, 2.6, 2.7.

- Löhmannsröben, R. (2002) Die Bedeutung des Bodens im Zusammenhang mit der hydrologischen Regionalisierung. In Gutknecht, D. (Hg.): Niederschlag-Abfluss Modellierung. Simulation und Prognose. Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 164. Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft Technische Universität Wien, September 2002, 201-213.
- Ludwig, K. (1979) Zusammengesetzte Häufigkeitsverteilungen. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 23 (H. 3), 57-60.
- Lutz, W. (1984) Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Verwendung von Gebietskenngrößen. Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft H. 24. Universität Karlsruhe.
- Markart, G., Kohl, B., Sotier, B., Schauer, T., Bunza, G., Stern, R. (2004) Provisorische Kartieranleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden- und Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen. Bundesamt und Forschungszentrum Wald, BFW-Dokumentation 3/2004.
- Meon, G., Anhalt, M., Ihringer, J., Höfer, J. (2007) Risikobasierte Verfahren zur Hochwasserbemessung von Stauanlagen – Übersicht zum laufenden RIMAX-Projekt. In Gutknecht, D. (Hg.): Extreme Abflussereignisse. Dokumentation – Bedeutung – Bestimmungsmethoden. Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 206. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, 2007, 101-116.
- Merz, R. (2007) Hochwasserstatistik – Das Ausreißerproblem. In Gutknecht, D. (Hg.): Extreme Abflussereignisse. Dokumentation – Bedeutung – Bestimmungsmethoden. Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 206. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, 2007, 181-194.
- Merz, R., Blöschl, G. (2003a): A process typology of regional floods. Water Resources Research 39(12), 1340, doi:10.1029/2002WR001952, 2003.
- Merz, R., Blöschl, G. (2003b) Regionale Verteilung der Hochwasserwahrscheinlichkeiten in Österreich. Mittlungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich Nr. 82, 69-82.
- Merz, R., Blöschl, G. (2003c) Saisonalität hydrologischer Größen in Österreich. Mittlungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich Nr. 82, 41-58.
- Merz, R., Blöschl, G. (2003d) Normierte mittlere Hochwasserspende. HAÖ Karte 5.4.
- Merz, R., Blöschl, G. (2003e) Saisonalität von Niederschlag und Abfluss. HAÖ, Karte 5.3.
- Merz, R., Blöschl, G., Parajka, D., Reszler, Ch. (2004) Analyse regionaler Ereignisabflussbeiwerte in Österreich. Technischer Bericht an das BMLFUW. Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, Technische Universität Wien.
- Merz, R., Blöschl, G., Parajka, D. (2006) Raum-zeitliche Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich. Hydrologie und wasserbewirtschaftung 50, (H. 1), 2-11.
- Merz, R., Blöschl, G. (2007) Ereignisbezogene Abflussbeiwerte. HAÖ Karte 5.9.

- Naef, F. (2007) Extreme Hochwasser verstehen - Beispiele aus der Schweiz. In Gutknecht, D. (Hg.): Extreme Abflussereignisse. Dokumentation – Bedeutung – Bestimmungsmethoden. Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 206. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, 2007, 59-68.
- Naef, F., Scherrer, S., Zurbrügg, C. (1998) Grosse Hochwasser – Unterschiedliche Reaktionen von Niederschlägen. Hydrologischer Atlas der Schweiz HADES, Blatt 5.7.
- Nobilis, F., Weilguni, V. (2003) Extreme beobachtete Tagesniederschläge. HAÖ, Karte 2.8.
- Parmet, B., Buishand, T.A., Brandsma, T., Mülders, R. (1999) Design discharge of the large rivers in the Netherlands. towards a new methodology. In: Hydrological extremes: understanding, predicting, mitigating. IAHS Publ. 255, 269-272.
- Potter, K.W. (1987) Research on flood frequency analysis:1983-1986. Reviews of Geophysics vol.25, no.2, 113-118.
- Reszler, Ch., Komma, J., Blöschl, G., Gutknecht, D. (2006) Ein Ansatz zur Identifikation flächendetaillierter Abflussmodelle für die Hochwasservorhersage. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 50 (H. 5), 220-232.
- Rossi, F., Fiorentino, M., Versace, P. (1984) Two-component extreme value distribution for flood frequency analysis. Water Resources Research 20 (7), 847-856.
- Scherrer, S. (2007) Hochwasserabschätzung als Synthese von Statistik, Historie und Abflussprozessen. In Gutknecht (Hg.): Extreme Abflussereignisse. Dokumentation – Bedeutung – Bestimmungsmethoden. Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 206, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, 195-208.
- Scherrer, S., Demuth, N., Meuser, A. (2002) A procedure for the identification of dominant runoff processes by field investigations to delineate the relevant contributing area for flood modelling. In Spreafico and Weingartner (eds.): International Conference on Flood Estimation. Conference Proceedings. CHR/KHR Report II-17, Lelystad, NL, 2002. 219-228.
- Schnatter, S., Kirnbauer, R. (1983) Hydrologische Statistik – Hochwasserwahrscheinlichkeit. Hochschulkurs. Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft & Außeninstitut der Technischen Universität Wien. 88 S., Anhänge.
- Schreiber, H. (1970) Über Methoden zur Berechnung der n-Jährlichkeit von Hochwässern. Österreichische Wasserwirtschaft 22 (H. 5/6), 138-153.
- Schumann, A. (2004): Das hydrologische Risiko bei der Bemessung und der Bewirtschaftungsplanung von Talsperre. In Horlacher, H.-B., Martin, B. (Hg.): Risiken bei der Bemessung und Bewirtschaftung von Fließgewässern und Stauanlagen. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen H.27, Institut für Wasserbau und Technische Hydro-mechanik, Technische Universität Dresden, 2004, 33-46.
- Schumann, A. (2007) Anwendung partieller wahrscheinlichkeitsgewichteter Momente zur Berücksichtigung historischer Ereignisse bei der Extremwertstatistik. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 51 (H.2), 73-81.

Sivapalan, M., Blöschl, G., Merz, R., Gutknecht, D. (2005) Linking flood frequency to long-term water balance: Incorporating effects of seasonality. *Water Resources Research* Vol. 41, W06012, doi: 10.1029/2004WR003439, 2005.

Skoda, G., Lorenz, P. (2003) Mittlere Jahresniederschlagshöhe. HAÖ Karte 2.2.

Stalman, V., Draschoff, R., Günther, T., Pfister, A., Prellberg, D., Verworn, H.-R., Malitz, G. (2004) Das Niederschlagsregelwerk für die Deutsche Wasserwirtschaft. *Wasserwirtschaft* 10/2004, 8-27.

Steinbrich, A., Uhlenbrook, S., Teich, T., Kolokotronis, V. (2005) Raum-zeitliche Zusammenhänge zwischen Großwetterlagen und Starkniederschlägen in Baden-Württemberg. *Wasserwirtschaft*, 11/2005, 14-19.

Tetzlaff, G., Börngen, M., Raabe, A. (2001) Extreme Niederschlagsereignisse. In Köngeter (Hg.): 31.IWASA Symposium Aachen 2001: Wasser. Katastrophe. Mensch. Mitteilung 124, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft RWTH Aachen, 13-26

van den Bos, R., Hoffmann, L., Juilleret, J., Matgen, P., Pfister, L. (2006) Regional runoff prediction through aggregation of first-order hydrological process knowledge: a case study. *Hydrological Sciences Journal* 51(6), 1021-1038.

Verworn, H.-R. (2006) Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags. In H.-B. Kleeberg (Hg.): Niederschlag – Input für hydrologische Berechnungen. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Heft 14.06, Hennef, 173-185.

Vischer, D. (1980) Das höchstmögliche Hochwasser und der empirische Grenzabfluss. *Schweizer Ingenieur und Architekt* 40.

Watzinger, A. (1997) Investigation of some heavy floods in small alpine catchment areas in Austria. In Leavesley, G.H., Lins, H.F., Nobilis, F., Parker, R.S., Schneider, V.R., van de Ven, F.H.M. (1997): *Destructive Water: Water-Caused Natural Disasters, their Abatement and Control*. IAHS Publ. no. 239, 67-76.

Weilguni, V. (2007) Bemessungsniederschläge. Starkniederschlagsauswertung beim Hydrographischen Dienst. In Gutknecht, D. (Hg.): *Extreme Abflussereignisse. Dokumentation – Bedeutung – Bestimmungsmethoden*. Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 206, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, 2007, 209-226.

WMO(1985) Manual for estimation of probable maximum precipitation. World Meteorological Organisation. *Operational Hydrology Report No.1 WMO-No.332*, Geneva, 1986. 269 pp.

Wood, E.F., Rodriguez-Iturbe, I. (1974): Bayesian inference and decision making for extreme hydrologic events. *Water Resources Research* 10 (4), 696-704.

Anschrift des Verfassers:

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.Dr.h.c. Dieter Gutknecht
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien
Karlplatz 13, A-1040 Wien
Email: gutknecht@hydro.tuwien.ac.at

HOCHWASSERSTATISTIK – DAS AUSREISSERPROBLEM

Ralf Merz

1. Einleitung

Für eine Vielzahl wasserwirtschaftlicher Planungs- und Bemessungsaufgaben werden Angaben über maßgebende Hochwasserabflüsse benötigt. Das traditionelle Verfahren der Bestimmung von Hochwasserabflüssen einer bestimmten Wahrscheinlichkeit ist die Hochwasserstatistik. Hierbei werden aus den beobachteten Hochwasserscheiteln die statistischen Momente berechnet um daraus, nach Wahl der Verteilungsfunktion, Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeiten zu ermitteln.

Ein vielfach bekanntes Problem der Hochwasserstatistik stellen Ausreißer dar, d.h. beobachtete Hochwasserereignisse, die auffällig größer sind als die übrigen Abflussbeobachtungen. Solche extreme Ereignisse beeinflussen in der Regel die Hochwasserstatistik sehr und bedürfen daher einer gesonderten Vorgehensweise. Im folgenden Beitrag wird ein Konzept vorgestellt, um Hochwasserwahrscheinlichkeiten statistisch unter besonderer Berücksichtigung von Ausreißern zu berechnen.

2. Methode

Ausreißer sind extreme Abflüsse, die deutlich von den übrigen beobachteten Daten abweichen. Zur Bestimmung, ob ein Ereignis ein Ausreißer ist, können die Abflussereignisse mit kritischen Schwellenwerten x_{krit} (DVWK, 1999) verglichen werden.

$$x_{krit} = \bar{x} + w_{n,\alpha} \cdot s \quad (1)$$

wobei \bar{x} der Mittelwert und s die Standardabweichung der Datenreihe ist. $w_{n,\alpha}$ ist abhängig vom Stichprobenumfang n und der Irrtumswahrscheinlichkeit α und ist in DVWK (1999) tabelliert. Gilt für den Maximalwert HQ_{max}

$$\ln HQ_{max} > x_{krit} \quad (2)$$

so ist dieser mit einer Sicherheit $1-\alpha$ als Ausreißer anzusehen.

Die Entscheidung, welche Vorgangsweise zur Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten gewählt wird, sollte jedoch nicht nur auf dieser statistischen Überprüfung der Ausreißerwahrscheinlichkeit gründen, sondern vielmehr den Einfluss solcher extremer Abflussbeobachtungen auf die Hochwasserstatistik berücksichtigen. In Abbildung 1 ist der Einfluss von Ausreißern auf die Ergebnisse der Hochwasserstatistik am Beispiel des Ereignisses 2005 am Pegel St. Anton / Rosanna dargestellt. In Abb. 1 links ist die statistische Auswertung der Daten ohne das Ereignis 2005 dargestellt. Als Beispiele für die Anpassung an die empirischen Wahrscheinlichkeiten (Plotting Positions) sind die Gumbelverteilung, die Allgemeine Extremwertverteilung (AEV) und die AEV unter Verwendung der L-Momente eingezeichnet. In Abb. 1 rechts ist die Auswertung unter Verwendung des Ereignisses 2005 dargestellt. Die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven unter Berücksichtigung von 2005 steigen

deutlich stärker an. Dies wirkt sich besonders auf die Schätzung höherer Jährlichkeiten aus. So beträgt der statistisch ermittelte 100-jährliche Abfluss für den Fall links je nach Verteilungsfunktion zwischen 90 und 100 m³/s. Das Ereignis 2005 hätte eine rechnerische Jährlichkeit von 5000 oder mehr Jahren. Wird jedoch das Ereignis 2005 berücksichtigt, so ergibt sich ein 100-jährlicher Abfluss zwischen 148 und 164 m³/s. Der Abfluss des Ereignisses 2005 hat nun eine Jährlichkeit von über 100 bis 1000 Jahren.

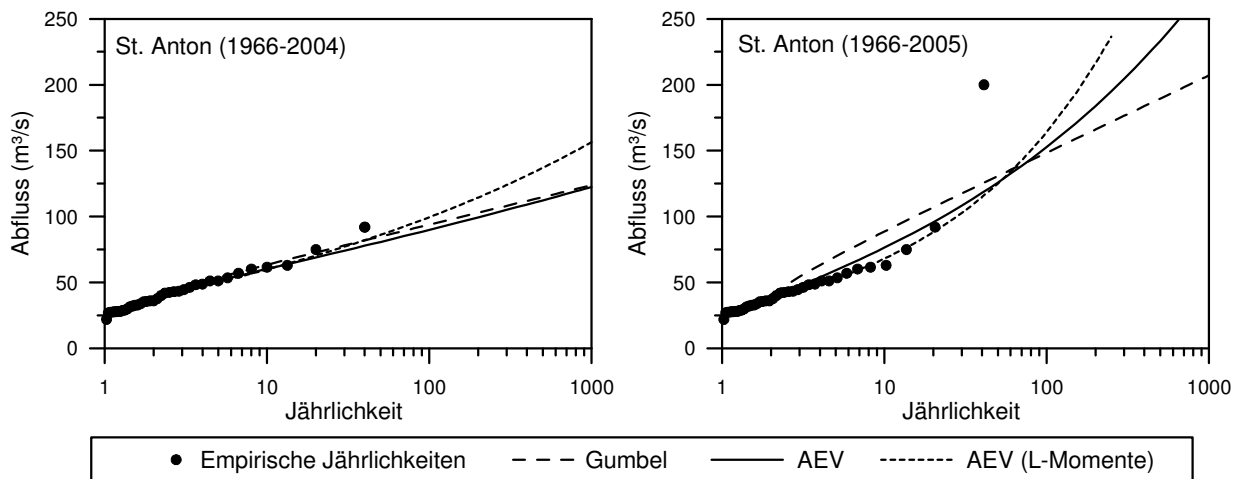


Abb. 1: Einfluss von Ausreißern auf die Hochwasserstatistik am Beispiel des Pegel St. Anton am Arlberg (Rosanna). Links: Statistische Auswertungen ohne das Extremereignis 2005 (Zeitreihe 1966 bis 2004). Rechts: Auswertungen mit Ereignis 2005 (Zeitreihe 1966 bis 2005).

Das Beispiel zeigt deutlich, dass bei Kollektiven, bei denen der Größtwert des Abflusses wesentlich größer als die anderen Werte ist (Ausreißer), die Einschätzung der Jährlichkeit des Größtwertes entscheidend für die Wahl der Lage der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve ist. Vereinzelt wird daher das Entfernen von Ausreißern aus der Stichprobe diskutiert. Dies ist sehr kritisch zu betrachten und wohl nur in sehr wenigen Fällen zulässig. Gerade Ausreißer zeigen, welche extremen Abflüsse in einem Einzugsgebiet auftreten können und stellen eine wichtige Informationsquelle bei der Ermittlung von Hochwasserabflüssen dar. Auch ist in vielen Fällen, wie z.B. im Paznauntal oder im Kampgebiet, eine Hochwasserbemessung ohne Berücksichtigung der beobachteten Extremereignisse aus gesellschaftlichen und politischen Gründen nicht praktikabel. Andererseits sollte dem Ausreißer nicht automatisch eine empirische Wahrscheinlichkeit (Plotting Position) zugewiesen werden, da hiermit dem Ausreißer i.d.R. ein zu großes Gewicht beigemessen wird. Eine Voraussetzung statistischer Analysen ist die Repräsentanz der Stichprobe, d.h. es wird angenommen, dass der Beobachtungszeitraum repräsentativ für das langfristige Abflussverhalten ist. Werden im Beobachtungszeitraum extrem große Hochwasserabflüsse registriert, so ist die Repräsentanz der Stichprobe vielfach nicht mehr gegeben. Es ist nicht anzunehmen, dass in einem gleich langen anderen Beobachtungszeitraum auch ähnlich extreme Ereignisse beobachtet werden. So wird die empirische Jährlichkeit des größten

Ereignisses 2005 in der 40 jährigen Reihe am Pegel St. Anton je nach Formel der Plotting Positions zwischen 41 und 80 Jahren berechnet (DVWK, 1999). Viele Ausreißer, so auch das Ereignis 2005, haben jedoch weit größere Jährlichkeiten, mitunter von mehreren hundert Jahren.

Welche Gewichtung dem Ausreißer zugemessen werden sollte, kann jedoch nicht nur allein durch statistische Analysen beurteilt werden. Hierzu ist in der Reihe der beobachteten Hochwasserabflüsse zu wenig Information enthalten. Es ist vielmehr notwendig die im Hochwasserkollektiv enthaltene Information durch zusätzliche Informationen systematisch zu erweitern. Der Wortwahl von Grünewald (2006) folgend können Zusatzinformationen in zeitliche, räumliche und kausale Informationserweiterung unterschieden werden. Eine zeitliche Informationserweiterung ist möglich, indem man die Reihe der beobachteten Abflussscheitel in einen Bezug zur längeren hydrologischen Geschichte des Gebietes setzt. Information wird räumlich erweitert, indem man die Reihe der beobachteten Abflussscheitel in einem Gebiet mit denen in Nachbargebieten in Bezug setzt. Eine kausale Informationserweiterung erfolgt, indem man die Reihe der beobachteten Abflussscheitel mit den Prozessen der Hochwasserentstehung in Bezug setzt. Da ein Ausreißer immer nur in Bezug auf die beobachtete Reihe gesehen werden kann, geben Zusatzinformationen nicht nur Hinweise auf die Einschätzung des Ausreißers, sondern natürlich auch auf das gesamte Hochwasserverhalten.

Damit die Information möglichst umfassend erweitert wird, sollten unterschiedliche Daten und unterschiedliche Methoden kombiniert werden. Ein ähnlicher Kombinationsansatz verschiedener Methoden wird im „Mehr-Standbeine“-Ansatz zur Ermittlung von Bemessungshochwässern kleiner Auftretenswahrscheinlichkeiten von Gutknecht et al. (2006) vorgeschlagen. Einige Aspekte lassen sich dabei gut formalisieren, andere hingegen bedürfen einem gewissen Maß an Experteneinschätzung. Die Schätzung der Hochwasserwahrscheinlichkeit erfolgt dann schließlich durch eine Kombination von Hochwasserstatistik und Zusatzinformationen.

Im folgenden werden nun mögliche Zusatzinformation und ihre Wirkung auf die Einschätzung der Hochwasserwahrscheinlichkeit vorgestellt. Abschließend wird auf die Schätzung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten durch Kombination von Statistik und Zusatzinformation eingegangen.

2.1 Zeitliche Zusatzinformationen

Das Hochwasserverhalten in Gebieten ist ein zeitlich dynamischer Prozess. Es gibt Perioden mit überdurchschnittlich großen Hochwasserereignissen und Perioden in denen über längere Zeit nur kleinere Hochwasserereignisse beobachtet werden. Beispiele von Gruppen von Hochwasserjahren in Österreich sind die Extremereignisse der letzten Jahre, die Hochwässer der Jahre 1954 bis 1959 und 1897 bis 1899 im Donaeinzugsgebiet und die Jahre 1965 und 1966 in Kärnten. Der Wechsel von hochwassereichen und hochwasserarmen Perioden wurde in vielen Ländern über viele Jahrhunderte beobachtet und wird oft als “Noah und Joseph Effekt” (Mandelbrot and Wallis, 1968) bezeichnet. Durch die Gruppierung von hochwasserreichen und hoch-

wasserarmen Jahren besteht die Möglichkeit, dass eine Datenreihe von z.B. 40 Jahren keine großen Hochwässer enthält, obwohl in der Zukunft große Hochwässer zu erwarten sind. Auch der umgekehrte Fall von überdurchschnittlich großen Hochwässern im Datensatz ist möglich. Fällt nun eine Beobachtungsreihe in einen hochwasserarmen Zeitraum, so können die aus den Beobachtungsreihen abgeleiteten Hochwasserkenngrößen das Hochwasserverhalten vielfach unterschätzen. Einzelne größere Hochwasserereignisse erscheinen in einer solchen hochwasserarmen Periode als extreme Ereignisse. Durch einen Vergleich mit Nachbarstationen mit längeren Beobachtungszeiträumen, kann das Auftreten von hochwasserarmen oder hochwassereichen Perioden berücksichtigt werden. Dabei wird versucht Hochwasserereignisse der beiden Stationen in Deckung zu bringen um abschätzen zu können, wie sich das kurze Zeitfenster in das längere Bild einordnet.

Als Beispiel ist in Abbildung 2 (oben) die beobachteten jährlichen Hochwasserspitzen am Pegel Sturmmühle am Klambach aufgezeigt. Die maximal beobachteten Abflussspitzen im Zeitraum 1961 bis 2001 betragen weniger als 30 m³/s, während 2002 eine Spitzenabfluss von über 60 m³/s beobachtet wurde. Das Hochwasserereignis 2002 erscheint hier als Ausreißer. Wird diese Zeitreihe jedoch mit der längeren Zeitreihe des benachbarten Pegels Haid an der Naarn (Abb. 2, unten) verglichen, so ergibt sich ein anderes Bild. In der Periode 1961 bis 2001 wurden auch am Pegel Haid nur kleinere Hochwässer beobachtet, während vor 1961 auch viele größere Hochwässer beobachtet wurden. Das Ereignis 2002 hatte zwar auch am Pegel Haid die bisher größte beobachtete Abflussspitze, es erscheint aber im Vergleich zu der gesamten Reihe weniger extrem, als am Pegel Sturmmühle. Es ist nun anzunehmen, dass auch am Pegel Sturmmühle vor 1961 größere Hochwässer aufgetreten sind und die Beobachtungsreihe mit einer hochwasserarmen Periode zusammengefallen ist.

Eine weitere Möglichkeit zur Einordnung von Ausreißern ist die Auswertung historischer Hochwasserereignisse. In vielen Gebieten Österreichs liegen Informationen über historische Hochwässer vor. Art und Umfang der Informationen können sehr unterschiedlich sein. Neben Berichten in Archiven und Chroniken, die vielmals nur sehr ungenaue und unsichere Rückschlüsse auf historische Abflussmengen zulassen, können Hochwassermarken und Photographien herangezogen werden, um näherungsweise das Ausmaß der Überschwemmung einzuschätzen und eine Reihung der Jährlichkeiten historischer Hochwässer und der größten Hochwässer des Kollektivs zu ermöglichen. Für einige Flussgebiete liegen schon detaillierte Untersuchungen von historischen Hochwässern vor (z.B. Wiesbauer, 2007; Rohr, 2007). Durch die Auswertung historischer Hochwässer lässt sich dem Ausreißer ein längerer Beobachtungszeitraum zuordnen. Neben den n Jahren mit Pegelbeobachtungen liegt dann ein weiterer Zeitraum n_h vor, der bis zum ältesten, noch auswertbaren historischen Hochwasser zurückreicht (Grünwald, 2007) Hierdurch kann die Einschätzung der Jährlichkeit des Ausreißers deutlich verbessert werden.

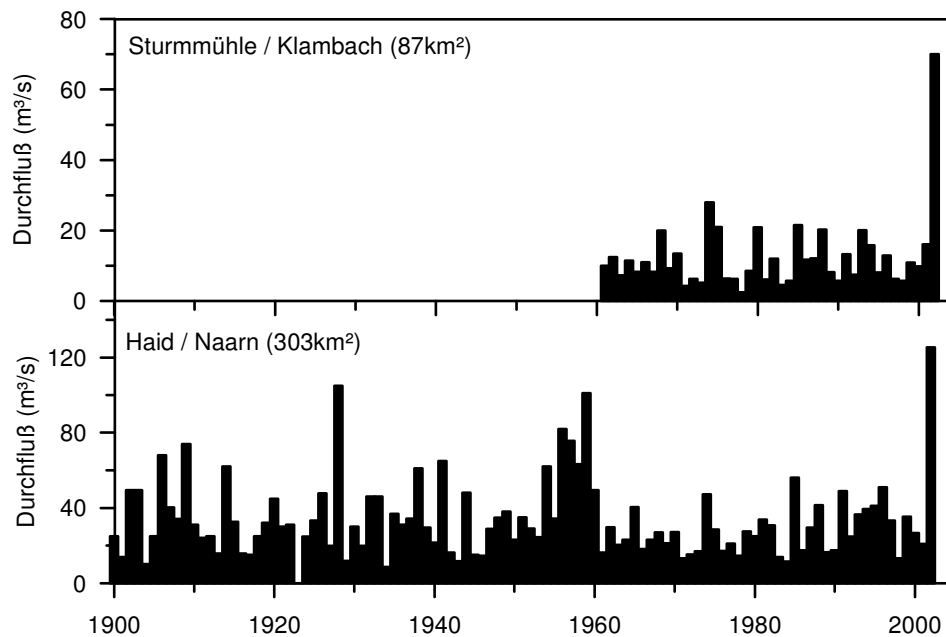


Abb. 2: Einordnung des Zeitfensters der Hochwasserbeobachtungen im Vergleich zu Nachbarstationen zur Einschätzung von Ausreißern.

2.2 Räumliche Zusatzinformationen

Zur räumlichen Informationserweiterung werden die Reihen der beobachteten Abflussscheitel in einem Gebiet mit denen in Nachbargebieten in Bezug gesetzt. Ein mögliches Konzept ist die Gruppierung (oder Pooling) von Gebieten in „homogene“ Regionen, in denen ein einheitliches Hochwasserverhalten angenommen wird. Die Idee des Ansatzes ist es, fehlende Information in der Zeit durch räumliche Information zu ersetzen. Werden etwa zehn 50-jährige Reihen zusammengefasst, so sollte dies (unter Annahme der Homogenität der Gruppe und statistischer Unabhängigkeit) einem Kollektiv von 500 Jahren entsprechen. In einem so „verlängerten“ Kollektiv sollte mehr Information enthalten sein, um die Jährlichkeit eines Ausreißers zu beurteilen.

Hierauf beruht auch die Idee die Jährlichkeit von Ausreißern durch regionale Hüllkurven der größten beobachteten Hochwasserabflüsse einzuschätzen. In Abbildung 3 sind die größten beobachteten Abflüsse unterschieden in vier Regionen dargestellt. Region 1 (Alpine Gebiete) umfasst einen Gürtel vom Montafon bis zum Ötzerland und Mariazeller Land. Region 2 (Alpennordrand) beinhaltet die Gebiete in den Staulagen am Alpennordrand, beginnend vom Bregenzer Wald bis zum Salzkammergut und Teile Oberösterreichs. Kärnten und Teile der Steiermark liegen in Region 3 (Südl. Österreich), während in Region 4 (Ostösterreich) die Gebiete vom Mühlviertel bis zum Burgenland liegen. Für jeden Pegel ist der größte beobachtete Hochwasserabfluss als schwarzer Punkt dargestellt. Zu einer besseren Einschätzung der für Österreich bedeutsamen Ereignisse August 2002 und August 2005, wurden diese Ereignisse besonders gekennzeichnet. Hat das Hochwasserereignis 2002 den größten Abfluss in der Beobachtungsreihe, so wird dieser Wert als Kreuz dargestellt. Wurde 2005 der größte Abfluss beobachtet, so wurde dies als x eingezeichnet. Alle Regionen zeigen eine sehr weite Streuung. So unterscheiden sich die Beobachtungs-

werte für ein Gebiet von ca. 100 km² mit mehr als einer Zehnerpotenz. Die größten beobachteten Hochwasserabflüsse der Ereignisse 2002 und 2005 liegen eher am oberen Rand der Werte Ostösterreichs. Dies unterstreicht den außerordentlichen Charakter beider Ereignisse. Jedoch wurden auch in anderen Jahren in der Region Abflüsse ähnlicher Größenordnungen beobachtet. Die rechnerisch ermittelte Jährlichkeit des Ereignisses 2005 in St. Anton von über 5000 Jahren (Abb. 1, links) dürfte daher zu groß sein. Eine Jährlichkeit von mehreren hundert Jahren (Abb. 1, rechts) dürfte hier eher plausibel sein.

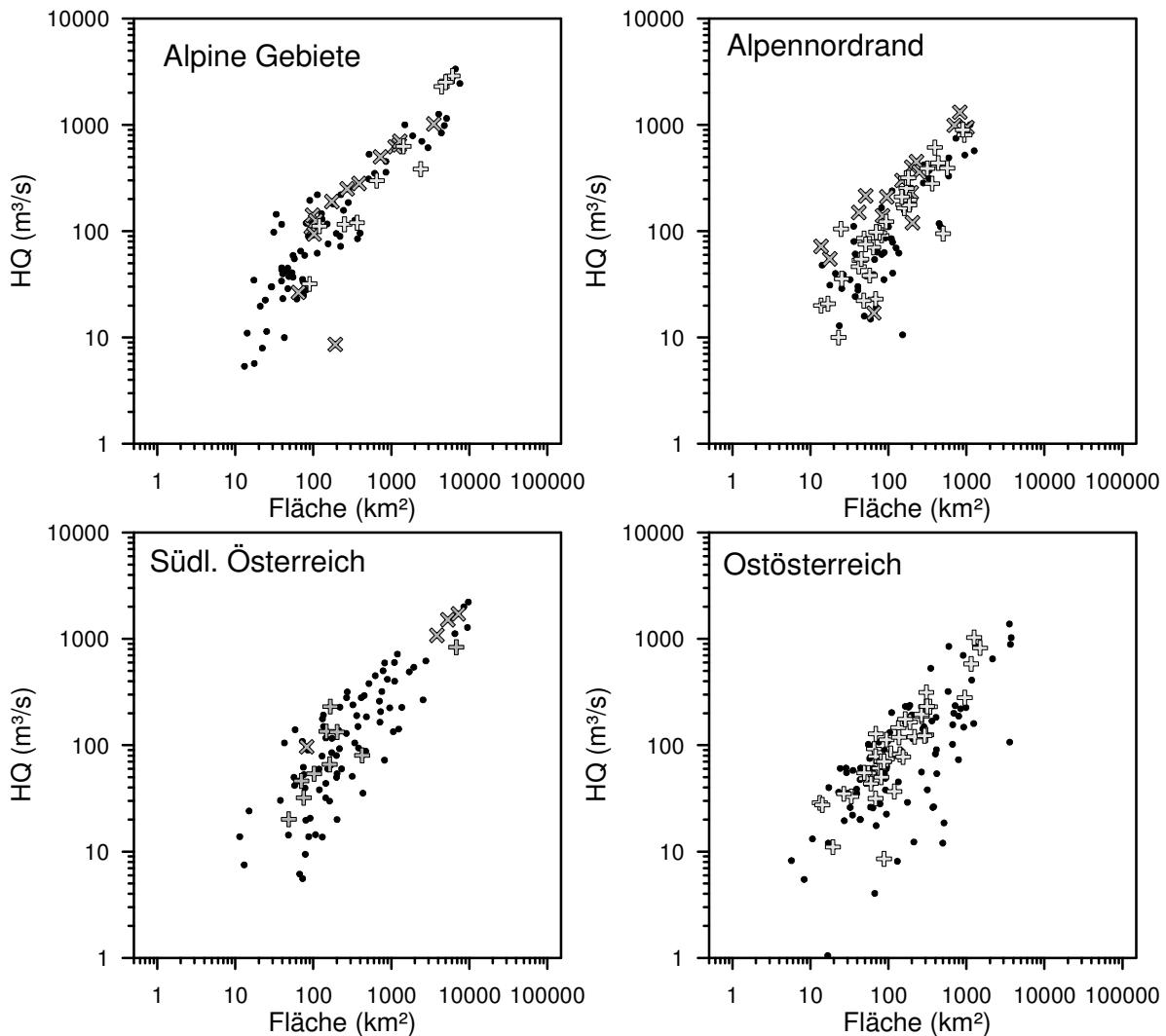


Abb. 3: Regionale Hüllkurven maximal beobachteter Hochwasserabflüsse. Punkte: Max. beob. Abfluss; Kreuze: Hochwasserabfluss des Ereignisses 2002; x: Hochwasserabfluss des Ereignisses 2005.

Neben der regionalen Betrachtung der größten Werte (Hüllkurve) ist es zu einer besseren Einschätzung der Hochwahrscheinlichkeiten hilfreich, die statistischen Eigenschaften aller beobachteten Hochwasserabflüsse in Nachbargebieten anzusehen, z.B. mit Hilfe regionaler Spendendiagramme. In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl von Regionalisierungsverfahren entwickelt um in Gebieten ohne Abflussbeobachtungen Hochwasserabflüsse zu bestimmen, wie z.B. Mehrfachregressionen,

Gruppierungsverfahren oder geostatistische Verfahren. Die meisten dieser Regionalisierungsverfahren können auch zur räumlichen Informationserweiterung eingesetzt werden. Einen Überblick über Regionalisierungsverfahren statistischer Hochwasserkenngrößen ist in Merz (2006) zu finden.

2.3 Kausale Zusatzinformation

Eine kausale Informationserweiterung erhält man, in dem man die beobachteten Hochwasserabflüsse in Hinblick auf ihre Entstehungsprozesse analysiert.

Eine wichtige Informationsquelle ist die Analyse der hydrologischen Situation beim Extremereignis, wie z.B. die Ereignisdokumentation 2005 von Godina et al. (2005) oder die Dokumentation des Ereignisses 2002 im Kamptal von Gutknecht et al. (2002). Hier wird detailliert auf die besondere meteorologische und hydrologische Situation der Ereignisse eingegangen. Durch die Kenntnis der Prozesse, welche zu einem Extremereignis führen, kann die Eintrittswahrscheinlichkeit besser abgeschätzt werden.

Eine weiteres Beispiel für eine kausale Informationserweiterung ist die Einbeziehung des Niederschlagsverhaltens. Dies kann durch Anwendung eines Niederschlag-Abflussmodells erfolgen. Ein einfaches und robustes Niederschlag-Abflussmodell zur Abschätzung von Bemessungshochwässern mit gegebener Jährlichkeit ist das Gradex Verfahren (Guillot, 1972; Merz et al., 1999). Das Gradex-Verfahren ist eine Kombination von Niederschlagsstatistik und Hochwasserstatistik. Für kleinere Jährlichkeiten werden die Hochwasserwerte aus der Statistik der Abflussbeobachtungen berechnet. Für Hochwässer einer festgesetzten Jährlichkeit T_g wird angenommen, dass das Einzugsgebiet seine maximale Speicherkapazität erreicht hat und jeder zusätzliche Niederschlag (d.h. mit einer Jährlichkeit größer T_g) gänzlich zu einem zusätzlichen Abflussvolumen beiträgt. Hierdurch kann die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve für Jährlichkeiten größer T_g parallel zur Wahrscheinlichkeitskurve des Niederschlags angenommen werden. Dies ist besonders in Gebieten mit kurzen Reihen von Abflussbeobachtungen, aber langen Reihen von Niederschlagsbeobachtungen, attraktiv. In Abb. 4 ist die Anwendung des Gradex-Verfahrens für den Pegel St. Anton am Arlberg, unter Verwendung der Niederschlagsdaten der Station Gaschurn gezeigt. Durch Einbeziehung von Niederschlagsinformation durch das Gradex-Verfahrens beträgt die Jährlichkeit vom Ereignis 2005 etwa 1000 Jahre (Abbildung 4, Gradex).

Neben dem Niederschlag als treibender Prozess der Hochwasserentstehung, ist die Abflussbildung ein wichtiger Faktor der Größe des Hochwasserabflusses. In einer vorangegangenen Studie (Merz et al., 2006) wurden die Abflussbeiwerte von ca. 50000 Ereignissen in 326 österreichischen Einzugsgebieten mit einer Flächen von 80 bis 10000 km² für den Zeitraum 1981-2001 ausgewertet. Flächendeckende Gebietsniederschläge wurden in einer stündlichen Auflösung ermittelt und Schneerückhalt und Schneeschmelze wurden berücksichtigt. Durch Basisabflussabtrennung und Ereignisabtrennung wurden Ereignisabflusshöhen aus stündlichen Abflussdaten bestimmt und mit den Ereignisniederschlagshöhen verglichen.

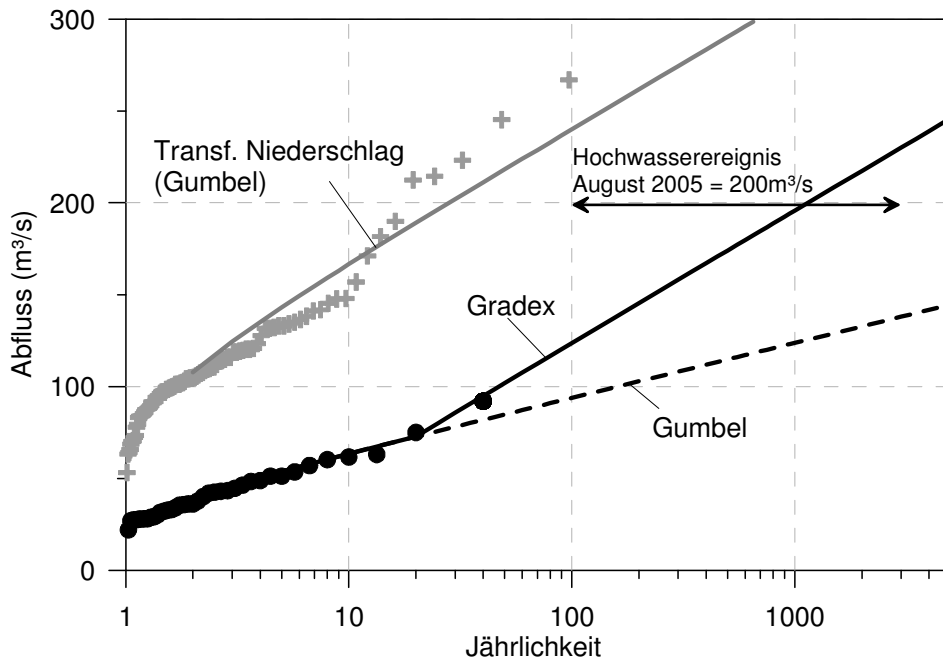


Abb. 4: Gradex Verfahren für den Pegel St. Anton am Arlberg (130 km²). Der in m³/s umgerechnete Niederschlag der Station Gaschurn ist in grau gezeichnet. Im August 2005 wurde in St. Anton ein Hochwasserabfluss von etwa 200 m³/s gemessen.

Die Auswertungen zeigen große regionale Unterschiede der Abflussbeiwerte in Österreich, die auf eine zentrale Rolle der Bodenfeuchte für die Größe des Abflussbeiwertes hindeuten. In den niederschlagsreichen und damit sehr feuchten Regionen am Alpennordrand sind die Abflussbeiwerte meistens sehr hoch, während im niederschlagsarmen Osten deutlich kleinere Abflussbeiwerte auftreten. Unter den ausgewerteten Abflussereignissen waren 3032 Hochwasserereignisse mit dem größten jährlichen Scheitelwert. Ein Vergleich zeigt, dass die Form der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve eng mit der Größe der Abflussbeiwerte zusammenhängt. In den niederschlagsreichen Gebieten sind die Abflussbeiwerte der Hochwässer in der Regel sehr hoch. Diese deuten auf eine stetig hohe Abflussbereitschaft der Gebiete hin. Große Hochwässer unterscheiden sich somit von kleineren Hochwässern nur durch die Größe des Niederschlages und es ist mit einer eher kleineren Steigung der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve zu rechnen. In trockeneren Gebieten sind die Abflussbeiwerte meistens klein. Große Abflussbeiwerte sind selten, können aber auftreten. Große Hochwässer können sich somit von kleineren Hochwässern nicht nur durch die Größe des Niederschlages unterscheiden, sondern auch durch einen wesentlich größeren Abflussbeiwert. Für solche Gebiet ist mit einer wesentlich größeren Schiefe der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve zu rechnen. In Abbildung 5 ist der Zusammenhang zwischen der Schiefe (CS) der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve und den mittleren Abflussbeiwerten von Hochwasserereignissen dargestellt. Abb. 5 zeigt eine deutliche Tendenz von größeren Schiefen in Gebieten mit kleineren Abflussbeiwerten.

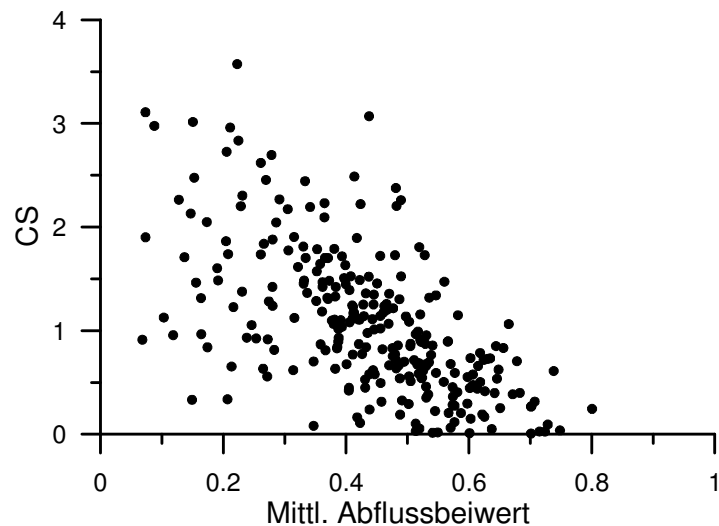


Abb. 5: Schiefe (CS) österreichischer Hochwasserkollektive in Abhängigkeit von mittleren Abflussbeiwerten.

Abbildung 6 zeigt beispielhaft die empirischen Hochwasserwahrscheinlichkeiten und dazugehörige Abflussbeiwerte für das niederschlagsreiche Gebiet St. Anton an der Rosanna und das trockene Gebiet Schützen an der Wulka. Das niederschlagsreiche Gebiet St. Anton hat stetig hohe Abflussbeiwerte und eine eher flache Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve. In Schützen hingegen steigen die Abflussbeiwerte mit größerer Jährlichkeit an und die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve steigt sehr steil an.

Eine weitere mögliche kausale Informationsquelle ist die Hochwassertypologie von Merz und Blöschl (2003). Hier wurden 11518 Hochwasserereignisse in Österreich in Hinblick auf ihre Entstehungsmechanismen untersucht und in fünf Typen klassifiziert: Hochwässer zufolge langer Niederschläge, Hochwässer zufolge kurzer Niederschläge, Hochwässer aufgrund von Gewittern, Regen-auf-Schnee Ereignisse und Schneeschmelzhochwässer. Die statistischen Eigenschaften der Hochwasserkollektive, aufgliedert nach Prozesstypen, zeigen deutliche Unterschiede. Bei Einzugsgebieten mit häufigen Gewittern ist eine große Schiefe zu erwarten, bei Einzugsgebieten mit einem großen Anteil an Schneeschmelzhochwässern sind die Variationskoeffizienten und Schiefen eher kleiner.

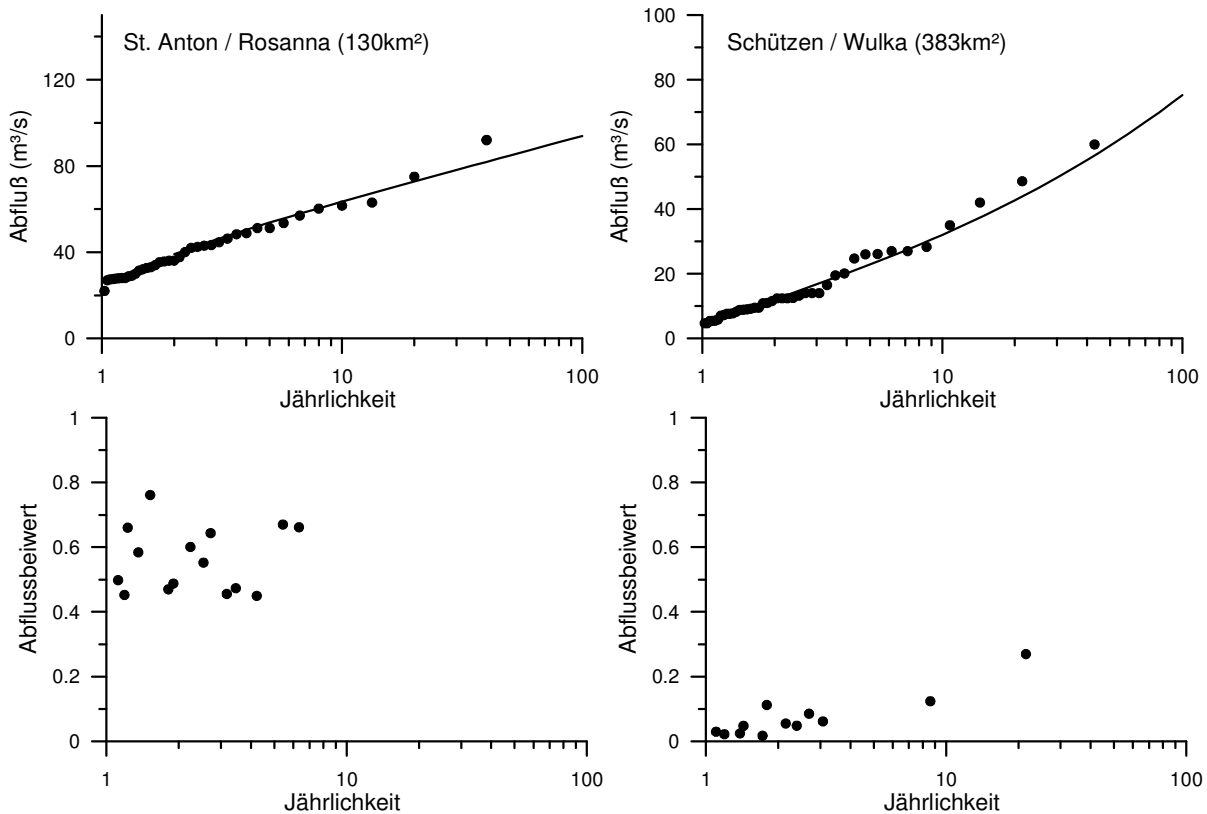


Abb. 6: Empirische Jährlichkeiten (oben) und Abflussbeiwerte (unten) für zwei Pegel: Links: Rosanna bei St. Anton; Rechts: Wulka bei Schützen.

Eine wichtige kausale Zusatzinformation zur Verbesserung der Schätzung ist die lokale Gebietskenntnis. Durch den Hydrologischen Atlas von Österreich (BMLFUW, 2007) liegen flächendeckend für Österreich digitale Informationen über Geologie, Boden, Landnutzung, Topographie, Klima und anthropogene Eingriffe vor, die Hinweise auf unterschiedliches Verhalten geben können. Karten dieser hydrologisch relevanten Informationen sind eine wertvolle Hilfe bei der Experteneinschätzung des Hochwasserrisikos. Wichtiger sind jedoch die Einschätzungen des hydrologischen Verhaltens auf Basis persönlicher Gebietskenntnis durch Begehungen und von Detailstudien. Dadurch kann eine Reihe lokaler Besonderheiten erfasst werden, die nicht in regionalen Karten digitaler Gebietseigenschaften sichtbar sind. Beispielsweise können Morphologie und Bewuchs Informationen über das hydrologische Verhalten eines Gebietes geben, so deutet z.B. ein bemooster Gewässerlauf eher auf langsame Abflussreaktionen und damit kleine Hochwasserspanden hin, während Erosionstätigkeit auf schnelle Abflussreaktionen und damit große Hochwasserspanden schließen lässt.

2.4 Kombination von Statistik und Zusatzinformationen

Die Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten sollte immer eine Kombination von Statistik und Zusatzinformation sein. Je nach Reihenlänge und Zuverlässigkeit der Abflussbeobachtungen sollte die Bedeutung von Statistik und Zusatzinformationen bei der Schätzung variiert werden. Da die verschiedenen Zusatzinformationen in Art und Qualität unterschiedlich sind, wird hier kein formelles

Verfahren zur Kombination vorgeschlagen. Vielmehr sollten alle einzelnen Befunde kombiniert und die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve – nach Abwägung aller Informationen und ihrer Unsicherheiten – manuell aufgrund der hydrologischen Experteneinschätzung festgelegt werden.

Die Kombination von Statistik und Zusatzinformationen zur Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten wird am Beispiel des Pegels St. Anton an der Rosanna kurz dargestellt. Die Hochwässer im August 2005 wurden durch eine Vb-ähnliche Wetterlage ausgelöst, in der feuchtwarme Luft von der Adria nach Österreich gelangte und hier auf kalte Luft aus einer nord-westlichen Anströmung traf. Diese Wetter-situation ist im Sommer in Österreich recht häufig und hat schon in der Vergangenheit immer wieder zu Hochwässern geführt. Ausschlaggebend für die extremen Niederschläge in Tirol und Vorarlberg war jedoch die Verstärkung durch eine starke Nordanströmung und Staueffekte. Dies führte zu langanhaltenden, teils sehr intensiven Niederschlägen. Es kam zu einer flächendeckenden Überregnung ganzer Gebiete. Aufgrund vorangegangener Niederschläge waren die Bodenspeicher aufgefüllt und der ganze Niederschlag wurde abflusswirksam. Die Gletscher hatten aufgrund fehlender Altschneedecken nur eine geringe Rückhaltefähigkeit. Die extremen Abflüsse in St. Anton sind also auf eine Kombination sich verstärkender Faktoren zurückzuführen. In Abb. 1 sind die statistischen Auswertungen jeweils mit und ohne Berücksichtigung des Ausreißers 2005 dargestellt. Eine Einschätzung der Jährlichkeit des Ereignisses 2005 von mehr als 5000 Jahren (Abb. 1, links) dürfte zu hoch sein. Eine Jährlichkeit von mehreren hundert Jahren (Abb. 1, rechts) ist aufgrund der meteorologische Situation plausibler, was auch durch die Anwendung des Gradex-Verfahrens bestätigt wird (Abb. 4).

In Abbildung 7 ist die räumliche Verteilung der auf eine hypothetische Gebietsfläche von 100 km² normierten mittleren jährlichen Hochwasserspende dargestellt. Der mittlere Jahresniederschlag wurde farblich hinterlegt, wobei dunklere Farben einen höheren Jahresniederschlag darstellen. Es zeigt sich ein enger Zusammenhang zwischen mittlerer Hochwasserspende und Jahresniederschlag, mit größeren Spenden in Vorarlberg und am Alpennordrand. Nach Westen hin sind die Niederschläge geringer und damit treten auch geringere mittlere Hochwasserspenden auf. Das beobachtete mittlere Jahreshochwasser in St. Anton ordnet sich hier gut in das regionale Bild ein. Ähnliche Überlegungen sind für die höheren Momente der Hochwasserverteilung anzustellen, so ist z.B. aufgrund des Ausreißers die Schiefe der Beobachtungsdaten sehr hoch. Nicht durch Ausreißer beeinflusste Beobachtungsreihen in der Region zeigen aber deutlich geringere Schiefen. Auch die konstant hohen Abflussbeiwerte (Abb. 6, links) deuten auf stetig hohe Abflussbereitschaft und damit kleinere Schiefen hin. Für die Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit wurde daher die Schiefe von 4.16 auf 1.2 verringert.

In Abbildung 8 sind die beobachteten Hochwasserabflüsse und die gewählte Verteilungsfunktion dargestellt. Es wurde hier die Allgemeine Extremwertverteilung gewählt, wobei die Momente eben nicht durch Anpassung an die Plotting Positions, sondern durch Analyse der Zusatzinformationen festgelegt wurden.

Die Wahl der Verteilungsfunktion ist nur dann wichtig, wenn die Verteilungsfunktion an die beobachteten Daten angepasst wird. Hiermit sind die Parameter der Verteilung gegeben und nur der Verteilungstyp beeinflusst den Wert des Hochwasserabflusses bei gegebener Jährlichkeit. Lässt man jedoch aufgrund der Zusatzinformation eine hydrologisch plausible Abweichung der gewählten Verteilung von den Beobachtungsdaten zu, so hat die Bestimmung der Parameter der Verteilung eine viel größere Bedeutung. Mit den hier gewählten Momenten hat das Ereignis 2005 eine Jährlichkeit von etwa 700 Jahren.

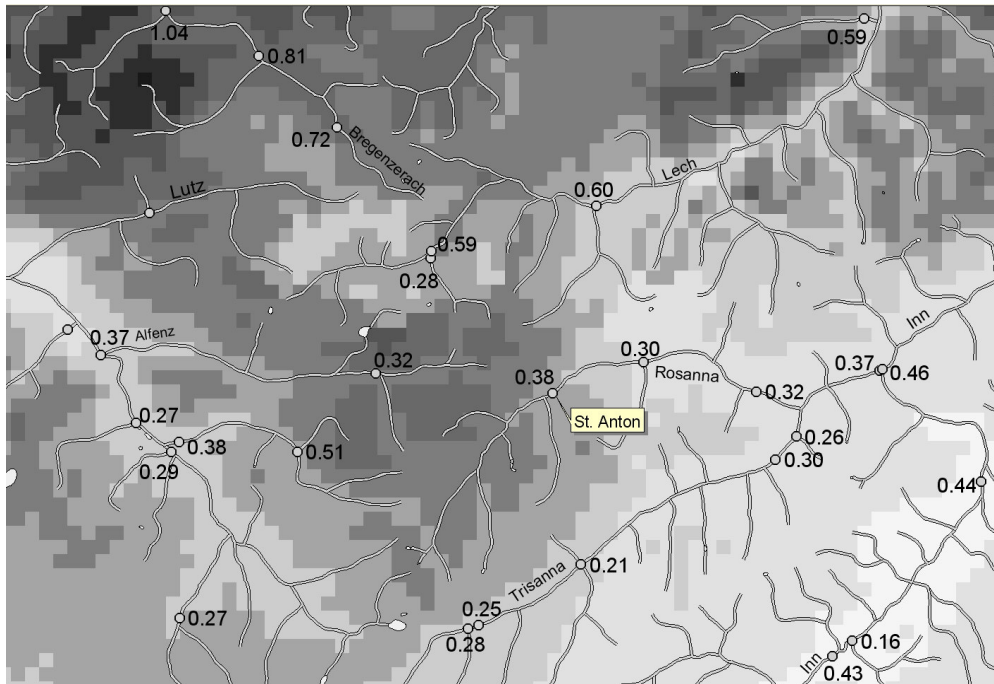


Abb. 7: Räumliche Verteilung der auf eine hypothetische Gebietsfläche von 100 km² normierten mittleren jährlichen Hochwasserspense. Das graue Raster ist der Jahresniederschlag, dunkle Werte sind größer als die hellen Werte.

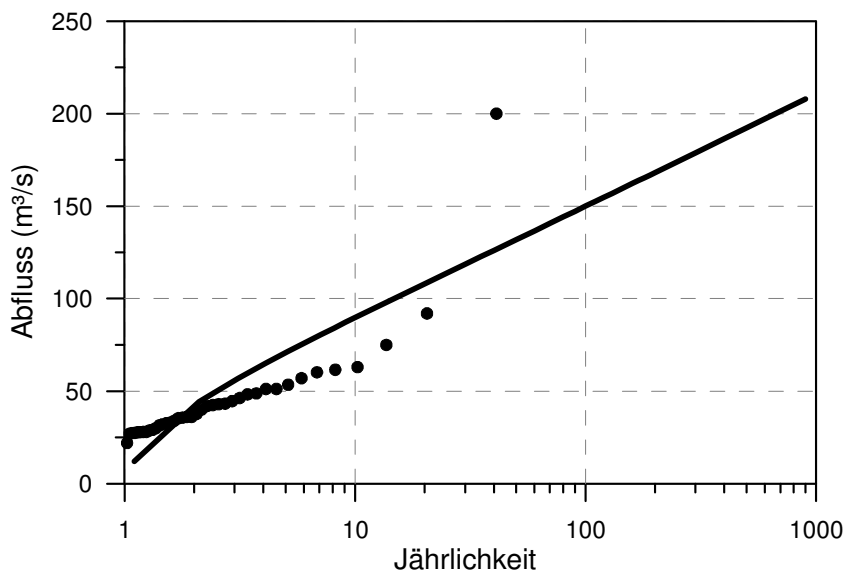


Abb. 8: Beobachtete Hochwasserabflüsse (Plotting Positions) und gewählte Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve für den Pegel St. Anton.

3. Schlussfolgerungen

Ausreißer beeinflussen sehr die statistischen Auswertungen von Hochwasserkollektiven. Eine sinnvolle Einschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit solcher extremer Ereignisse ist daher für die Güte der statistisch ermittelten Hochwasserabflüsse von besonderer Bedeutung. In der Reihe des beobachteten Hochwasserkollektives ist aber zu wenig Information enthalten, um die Wahrscheinlichkeit der Extremwerte aufgrund statistischer Analysen einschätzen zu können. Hierzu bedarf es einer hydrologisch sinnvollen Informationserweiterung. Im vorliegenden Beitrag wurden mögliche Zusatzinformationen und ihre Kombination zu einer besseren Schätzung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten aufgezeigt.

Die Sichtweise dieses Beitrages lag auf der Einschätzung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten in Gebieten, in denen ein Extremereignis schon beobachtet wurde, d.h. eine Post-Ausreißer-Abschätzung. Für den Hydrologen stellt sich jedoch immer die Frage, ob in einem Gebiet nicht auch ein extremes Ereignis auftreten könnte, es bisher nur noch nicht beobachtet wurde. Auch in einer solchen Pre-Ausreißer-Abschätzung ist das vorgestellte Konzept hilfreich. Dies gilt besonders für jene Gebiete, die ähnlich dem Ausreißerproblem, statistisch schwer zu fassen sind, z.B. Gebiete mit kurzen Reihen oder instationäre Reihen.

4. Danksagung

Für finanzielle Unterstützung im Rahmen eines APART [AUSTRIAN PROGRAMME FOR ADVANCED RESEARCH AND TECHNOLOGY] Stipendium wird der Österreichischen Akademie der Wissenschaften gedankt.

5. Literatur

BMLFUW (2007) Hydrologischer Atlas Österreich (HAÖ), 3. Lieferung. Österreichischer Kunst und Kulturverlag und Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

DVWK (1999) Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas und Wasser, Bonn, (DVWK-Merkbl. zur Wasserwirtschaft; H 251).

Godina, R., Lalk, P., Lorenz, P, Müller, G. & Weilguni, V. (2005) Das Hochwasser in Österreich vom 21. bis 25. August 2005, Lebensministerium, Wien.

Grünewald U. (2006) Persönliche Mitteilung

Grünewald, U. (2007) Zur Einbeziehung historischer Extremereignisse – Erfahrungen aus dem Elbegebiet. In Gutknecht, D. (Hg.): Extreme Abflussereignisse. Dokumentation – Bedeutung – Bestimmungsmethoden. Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 206. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, 2007, 7-16.

Guillot, P. (1972) Application of the Method of Gradex, in: Schulz E.F., Koelzer V.A. and Mahmood K. (Ed.), Floods and Droughts, Proceedings of the Second International

Symposium in Hydrology, Fort Collins, Colorado, USA, *Water Resources Publications*, 44-49.

Gutknecht, D., Blöschl, G., Reszler, Ch. & Heindl, H. (2006) Eine „Mehr-
Standbeine“-Ansatz zur Ermittlung von Bemessungshochwässern kleiner
Auftrittenswahrscheinlichkeit, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 58(3-4),
S. 44-50.

Gutknecht, D., Resler, Ch. & Blöschl, G. (2002) Das Katastrophenhochwasser vom 7.
Augusts 2002 am Kamp – eine erste Einschätzung, *e&i elektrotechnik und
informationstechnik*, 119(12), p-411-413.

Mandelbrot, B.B. & Wallis, J.R. (1968) Noah, Joseph, and Operational Hydrology,
Water Res. Res. 4(5), 909-918.

Merz R. & Blöschl, G. (2003) A process typology of regional floods. *Water Resources
Research*, VOL. 39, NO. 12, 1340, doi:10.1029/2002WR001952

Merz, R. (2006) Regionalisierung von statistischen Hochwasserkenngößen. Wiener
Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Methoden der hydrologischen
Regionalisierung, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien, S. 109-
130.

Merz, R., Blöschl, G. & Piöck-Ellena, U. (1999) Zur Anwendbarkeit des Gradex-
Verfahrens in Österreich. *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft*, 51, Heft 11/12, pp.
291-305.

Merz, R., Blöschl, G. & Parajka, J. (2006) Spatio-temporal variability of event runoff
coefficients. *J. Hydrol.*, 331, doi:10.1016/j.hydrol.2006.06.008.

Rohr, Ch. (2007) Historische Hochwasserforschung: Die Überschwemmungen an der
Traun im 15. und 16. Jahrhundert. In Gutknecht, D. (Hg.): Extreme Abflussereignisse.
Dokumentation – Bedeutung – Bestimmungsmethoden. Wiener Mitteilungen Wasser-
Abwasser-Gewässer, Band 206. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie,
Technische Universität Wien, 2007, 29-42.

Wiesbauer, H. (2007) Historische Überflutungen am Kamp. In Gutknecht, D. (Hg.):
Extreme Abflussereignisse. Dokumentation – Bedeutung – Bestimmungsmethoden.
Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 206. Institut für Wasserbau
und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, 2007, 43-58.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Ralf Merz

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien

Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien

Tel: +43 1 58801 22312

Fax: +43 1 58801 22399

Email: merz@hydro.tuwien.ac.at

HOCHWASSERABSCHÄTZUNG ALS SYNTHESE VON STATISTIK, HISTORIE UND ABFLUSSPROZESSEN

Simon Scherrer

1. Einleitung

Für die Dimensionierung von Hochwasserschutz-Maßnahmen oder die Auslegung von Entlastungsbauwerken an Stauanlagen sind hydrologische Grundlagen erforderlich, die Auskunft über die Größe von seltenen Hochwasserabflüssen geben. Die Größe der abgeschätzten Abflüsse hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Baukosten.

Da jedes Einzugsgebiet aber auch jede Problemstellung - vergleichbar mit einem Fingerabdruck - einzigartig ist, steht der mit einer Hochwasserabschätzung betraute Bearbeiter vor der Herausforderung, die wesentlichen Eigenheiten des Gebiets in kurzer Zeit zu erfassen und wichtige Entscheidungen hinsichtlich Anteil des abfließenden Niederschlags, maßgebende räumlich-zeitliche Niederschlagsverteilungen, etc. zu treffen. Oft liegen zwischen den, mit unterschiedlichen Schätzmethoden, ermittelten Resultaten große Unterschiede. Lässt sich diese Unsicherheit mit geeigneten Untersuchungen eingrenzen?

Der vorliegende Artikel stellt eine Vorgehensweise vor, wie mit gezielten Untersuchungen der Hochwassergeschichte und die bei Hochwasser ablaufenden Abflussprozesse wesentliche Erkenntnisse gewonnen werden und wie sich damit der große Unsicherheitsbereich von Hochwasserabschätzungen deutlich verringern lässt.

2. Erkenntnisgewinn durch die Erkundung historischer Hochwasser am Beispiel Vordere Frenke

2.1 Ausgangslage

Abschätzungen seltener Hochwasser erfolgen oft durch statistische Analysen. Viele Abflussmessstellen wurden in den letzten 25 bis 50 Jahren eingerichtet, lange Messreihen reichen knapp 100 Jahre zurück. Abbildung 1 zeigt das Frequenzdiagramm mit den Jahreshochwassern (1931 - 1951; 1975 - 2006) der Vorderen Frenke im schweizerischen Falten- und Tafeljura (20 km südlich von Basel), ein Mittelgebirgs-Einzugsgebiet mit ca. 45 km² Fläche. Das 100jährige Hochwasser würde – verlässliche Abflussmessungen vorausgesetzt - gemäß dieser Statistik bei ca. 25 – 30 m³/s liegen.

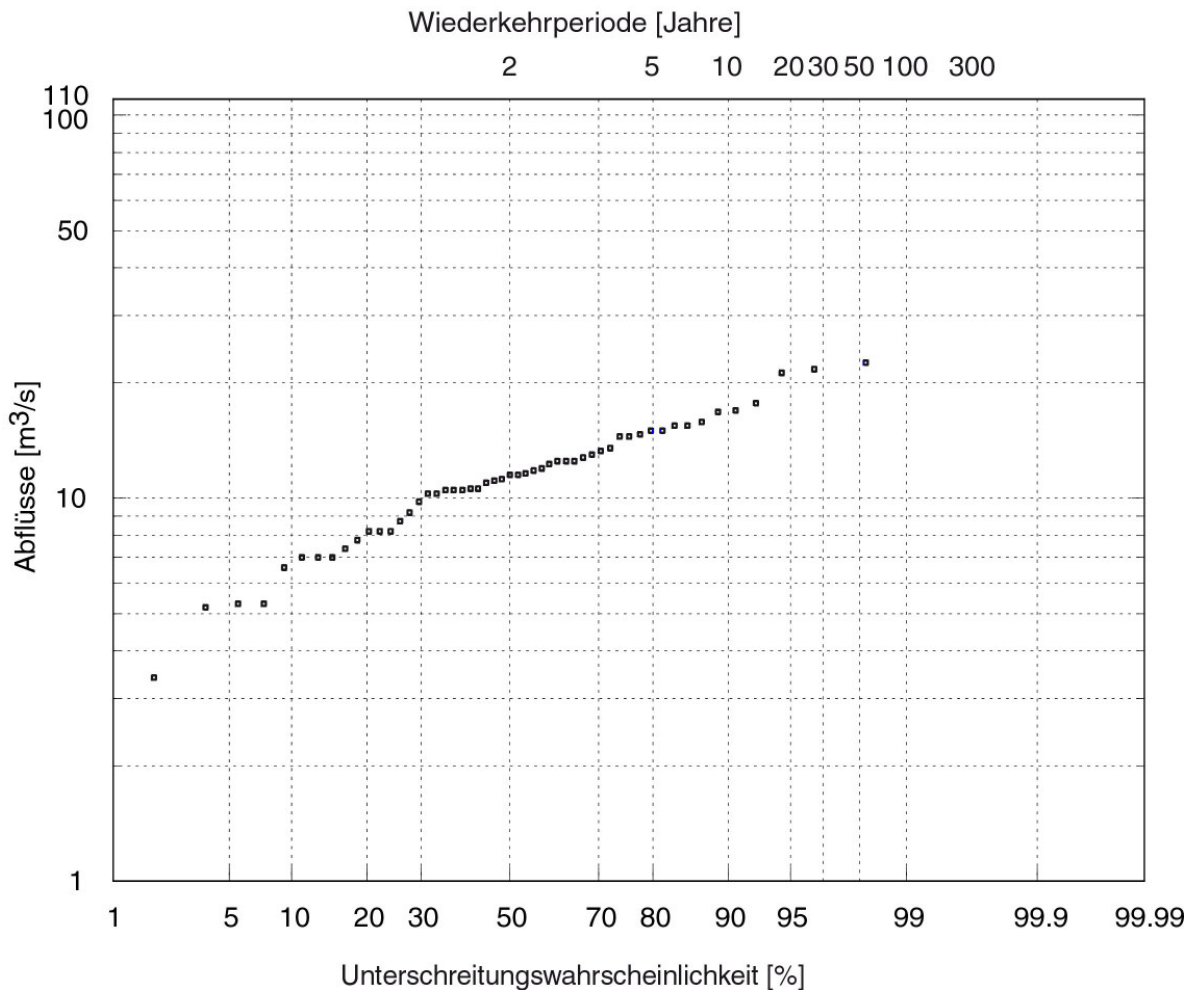


Abb. 1: Frequenzdiagramm der Vorderen Frenke (Einzugsgebietsfläche: 44.4 km²). Die Vordere Frenke liegt im Jura-Mittelgebirge, ca. 20 km südlich von Basel. Eingezeichnet sind die Jahresmaxima von 1931 – 1951 und 1975 – 2006. Das 100jährige Hochwasser lässt sich auf etwa 25 – 30 m³/s extrapolieren.

2.2 Historische Erkundungen

Ziel der Erkundung ist, Hinweise über Häufigkeit, Schäden, Größe, Verlauf, auslösende Niederschläge, etc. von vergangenen Ereignissen zusammenzutragen. Beim vorliegenden Beispiel wurden verschiedene Quellen gesichtet und ausgewertet (z. B. Röthlisberger (1981): Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz; Zeitungsarchive; Dorfchroniken; Versicherungsakten, etc.). Anhand der Schilderungen wurde versucht, aus den Hinweisen Informationen über die Größe der Abflussspitzen zu erlangen (klein, mittel, groß, sehr groß). Abbildung 2 zeigt auf einem Zeitpfeil die aus den Quellen ermittelten Hochwasser. Erste Informationen stammen vom verheerenden Hochwasser aus dem Jahre 1629. Vom 17. und 18. Jh. konnten nur wenige Informationen ermittelt werden, im 19. und 20. Jh. nimmt die Informationsdichte wesentlich zu. 1830, 1881, 1896 und 1926 ereigneten sich große bis sehr große Hochwasser an der Frenke.

Historische Hochwasser an der Vorderen Frenke

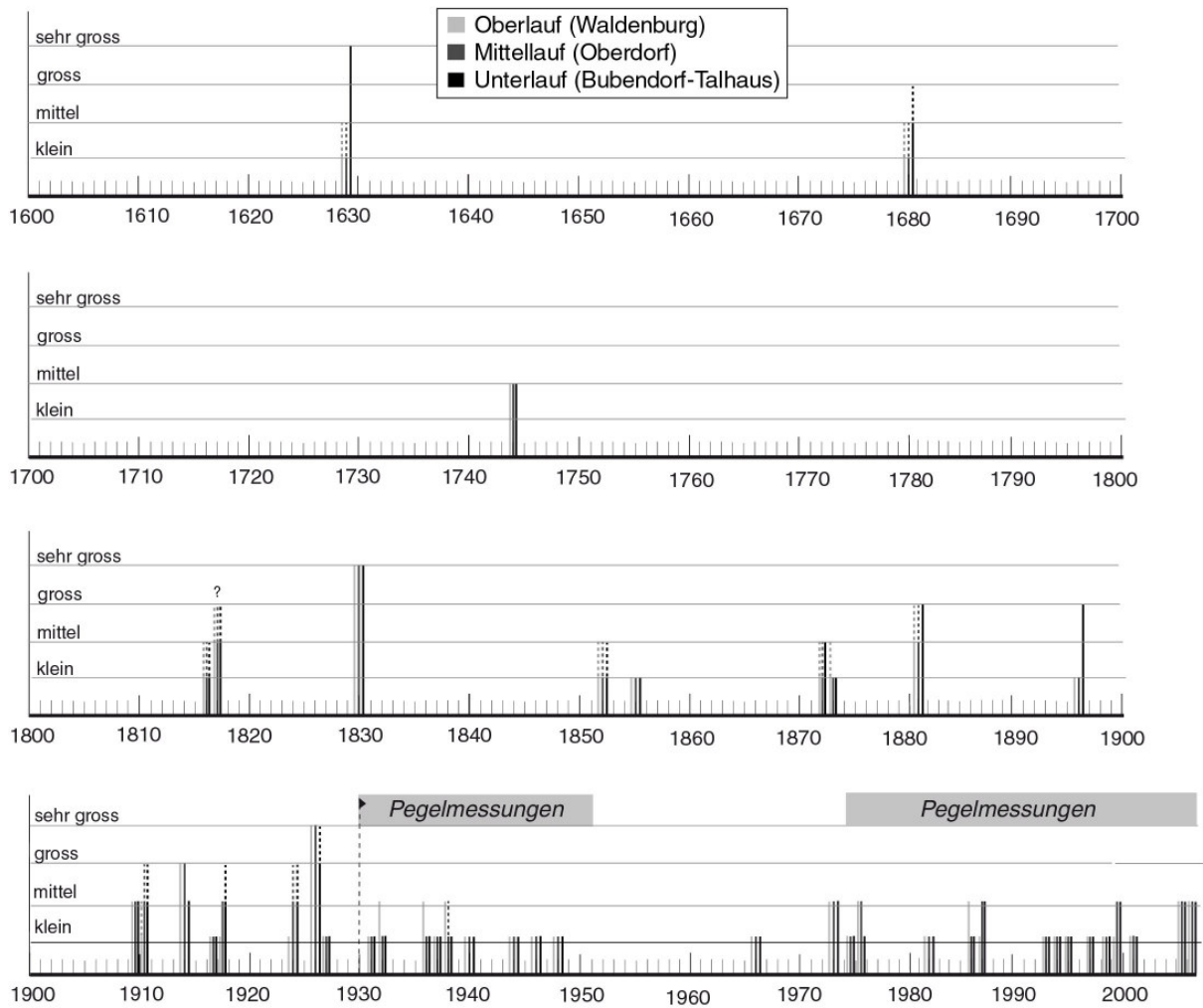


Abb. 2: Zeitliche Verteilung der historischen Hochwasser seit 1629 an der Vorderen Frenke. Die verschiedenen Säulen verweisen auf den Ober-, Mittel und Unterlauf. Die Hochwasser wurden anhand der ermittelten Informationen nach der Größe charakterisiert.



Hochwassermarke
16.7.1830

Abb. 3: Die Markierung des Hochwassers vom 16. Juli 1830 (Mittellauf) an einem alten, an der Frenke gelegenen Haus in Niederdorf. Die hydraulische Abschätzung ergab eine Abflussspitze im Bereich von ca. 60 bis 110 m³/s.

Interessant sind die Phasen mit unterschiedlicher Häufigkeit von Hochwassern. In der Periode zwischen 1930 und 1972, worin ein Teil der Messperiode liegt, gab es keine oder nur kleine Hochwasser, während zwischen 1910 und 1930 einige große bis sehr große Ereignisse verzeichnet sind.

Das Hochwasser 1830 war verheerend (Abflussspitze: 60 – 110 m³/s), zerstörte oder beschädigte 119 Häuser im Tal und forderte 19 Todesopfer. Es wurde durch ein extremes Gewitter ausgelöst. Die Abflussspitzen der Hochwasser von 1830 (Abbildung 3), 1881 (Abflussspitze: ca. 30 – 50 m³/s) und 1926 (mindestens 40 m³/s) ließen sich anhand von Hochwassermarken oder Fotos abschätzen.

Folgende Schlüsse lassen sich aus den Erkundungen der historischen Hochwasser ziehen:

- Die Erkundung historischer Hochwasser lässt 200 bis 400 Jahren zurückblicken. Die größten Hochwasser in dieser Zeitspanne wurden an der Frenke (1629, 1830, 1926) von Gewittern ausgelöst. Für die Größe des Einzugsgebiet (44 km²) ist dies überraschend.
- Die Abflussspitzen der größten Ereignisse ließen sich dank Hochwassermarken und Fotos abschätzen. Diese Höchstwerte sind wesentlich höher als die im 20. Jahrhundert gemessenen Abflüsse und lassen folglich das Frequenzdiagramm (Abb. 1) in einem neuen Licht erscheinen.

3. Beurteilung der Abflussreaktion eines Einzugsgebiets anhand der maßgebenden Abflussprozesse

3.1 Abflussbildungsprozesse

Die Beurteilung der relevanten Abflussbildungsprozesse ist eine wichtige Voraussetzung bei der Hochwasserabschätzung¹. Es geht im Wesentlichen um die Frage, wie groß der Anteil des Niederschlages ist, der während des Hochwassers abfließt. Es wird aufgezeigt, wie unterschiedlich die Abflussbildung auf natürlichen Flächen sein kann.

Wie viel Niederschlag abfließt, wird wesentlich vom Rückhaltevermögen der Böden bestimmt. Je nach Schluckvermögen der Böden wird mehr oder weniger Wasser gespeichert und mit mehr oder weniger starker Verzögerung wieder in die Bäche abgegeben. Auf kaum durchlässigen Böden entsteht aufgrund von Infiltrationshemmnissen rasch Oberflächenabfluss. Sehr durchlässige Böden müssen hingegen erst gesättigt werden, bis Oberflächenabfluss oder Abfluss im Boden entsteht. Je nach Art der Böden werden also unterschiedliche Abflussprozesse in Gang gesetzt, die entscheiden, ob sofort Abfluss entsteht oder erst nach ergiebigeren Niederschlägen.

¹ Die Ausführungen stammen in gekürzter Form aus Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten, Praxishilfe. Hrsg.: Bundesamt für Wasser und Geologie BWG (2003), Bericht Nr. 4.

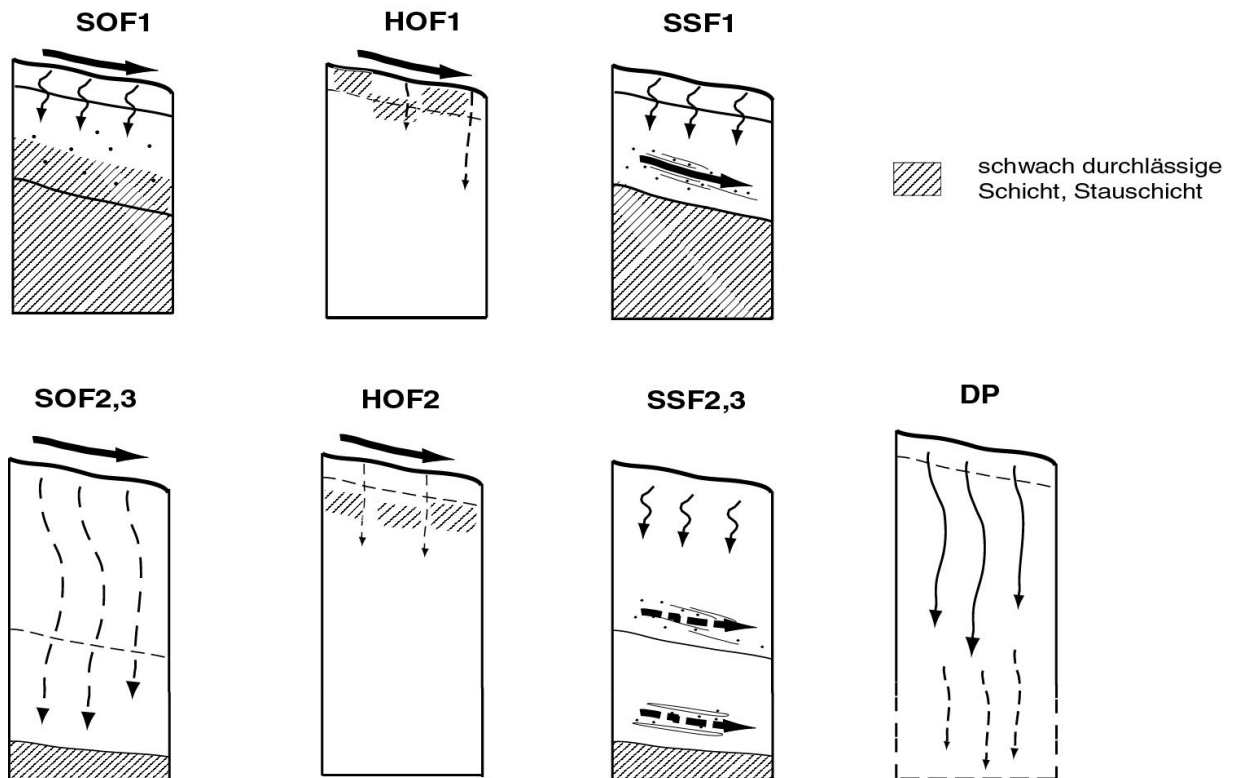


Abb. 4: Die wichtigsten Abflussprozesse anhand schematischer Bodenprofile. HOF = Hortonian Overland Flow (Oberflächenabfluss aufgrund von Infiltrationshemmnissen); HOF1 rasch, HOF2 leicht verzögert. SOF = Saturated Overland Flow (gesättigter Oberflächenabfluss); SOF1 rasch, SOF2 leicht verzögert, SOF3 stark verzögert. SSF = Subsurface Flow (Abfluss im Boden), SSF1 leicht verzögert, SSF2 verzögert, SSF3 stark verzögert. DP = Deep Percolation (Tiefensickerung).

Oberflächenabfluss aufgrund von Infiltrationshemmnissen (Hortonian Overland Flow, HOF) wird auf Böden und Oberflächen beobachtet, die verdichtet oder wasserabstoßend sind und deshalb nur schwach durchlässig sind.

Gesättigter Oberflächenabfluss (Saturation Overland Flow, SOF) tritt nach Sättigung des Bodens auf. Auf flachgründigen oder feucht-nassen Böden mit geringem Speichervermögen ist dies besonders rasch der Fall. Man unterscheidet zwischen rasch gesättigtem Oberflächenabfluss (SOF1), verzögertem (SOF2) oder stark verzögertem Oberflächenabfluss (SOF3). Dies gilt analog bei den anderen Abflussprozessen.

Abfluss im Boden (Sub-Surface Flow SSF) tritt auf, wenn über einer Stauschicht im Boden hoch durchlässige Schichten liegen oder Makroporen dem Wasser ein rasches laterales Fließen ermöglichen. Ist der Boden gut durchlässig und liegt er über durchlässigem geologischem Untergrund, kann über die Tiefensickerung (Deep Percolation DP) viel Wasser in Boden und Geologie eindringen und gespeichert werden, ohne dass Abfluss entsteht. Weitere Faktoren beeinflussen die Abflussbildung: Die Vorgeschichte (Niederschläge der letzten Tage vor dem Hauptereignis) und gleichzeitige Schneeschmelze kann beispielsweise die Abflussreaktion eines Einzugsgebietes verschärfen.

3.2 Wie unterschiedlich wirken verschiedene Abflussprozesse?

Bei Beregnungsversuchen an natürlichen Hängen von 60 m² Größe wurden die Abflussprozesse untersucht (Scherrer, 1996; Naef et al., 1998). Der Versuchsaufbau und die wichtigsten Resultate sind im Scherrer et al. (2007) dargestellt. Abbildung 5 zeigt die Abflussreaktion der 18 untersuchten Standorte auf intensive Niederschläge (50-100 mm/h). Vier Standorte mit typischen Abflussreaktionen werden im Folgenden näher beschrieben.

Hortonscher Oberflächenabfluss (HOF) wurde im Gebiet des Gotthard-Pass (Alpen) beobachtet. Der mächtige, schwach zersetzte, makroporenarme Auflagehumus wirkte als Infiltrationsbarriere, so dass kaum Wasser infiltrierte und nahezu 90% des Niederschlags oberflächlich abfloss. Auf dem flachgründigen, durchlässigen Braunerdeboden an einem Steilhang in Willerzell (Voralpen) am Sihlsee infiltrierte hingegen sämtliches Wasser und floss, gestaut vom Sandsteinfels, leicht verzögert lateral im Boden ab (SSF2). Ebenfalls über Sandsteinfels wurde in Therwil (Flachland) eine tiefgründige, makroporenreiche Braunerde beregnet. Hier entstand jedoch stark verzögerter Oberflächenabfluss, da sich der Boden nur langsam sättigte (SOF3) und über eine Stunde lang sämtliches Wasser infiltrierte. Auf der Braunerde über verkarstem Kalkstein in Blauen (Jura) infiltrierte während Stunden sämtliches Wasser in den Boden und sickerte in den klüftigen Kalksteinfels weiter, ohne dass Abfluss entstand. Selbst bei längeren Niederschlägen tragen also die Standorte in Therwil und Blauen kaum zum Abfluss bei.

Der standortgebundene Abflussprozess bestimmt also, wieviel Abfluss entsteht. Kann man die dominanten Abflussprozesse eines Einzugsgebietes räumlich festlegen, so lässt sich entscheiden, ob das Gebiet bei Starkniederschlägen sofort, leicht verzögert oder stark verzögert reagiert und wie groß der resultierende Abfluss in etwa ist. Die Auswertung der Beregnungsversuche hat gezeigt, dass „Schlüsselstellen“ darüber entscheiden, welcher Abflussprozess sich einstellt.

Abbildung 6 zeigt ein anhand dieser Erkenntnisse entwickeltes Prozess-Beurteilungsschema (PBS) für Wieslandböden. Das PBS hilft, den dominanten Abflussprozess an einem Standort herzuleiten (Scherrer & Naef, 2002; Scherrer, 2006)². Es ist in Anlehnung an ein Bodenprofil in Oberfläche, Ober- und Unterboden und geologischen Untergrund gegliedert. Die Darstellung gilt für einen von Stau- oder Hangwasser unbeeinflussten Boden.

Betrachtet man mehrere Standorte an einem Hang, so treten verschiedene Prozesse gleichzeitig auf. Mit Überlegungen aus der „Hillslope Hydrology“ kann die gegenseitige Beeinflussung der Abflussprozesse beurteilt werden (Scherrer, 2006).

² Für alpine Boden- und Vegetationseinheiten haben Markart et al. (2004) eine Geländeanleitung erstellt, welche den Oberflächenabflussbeiwert bei Gewitterregen abschätzen lässt.

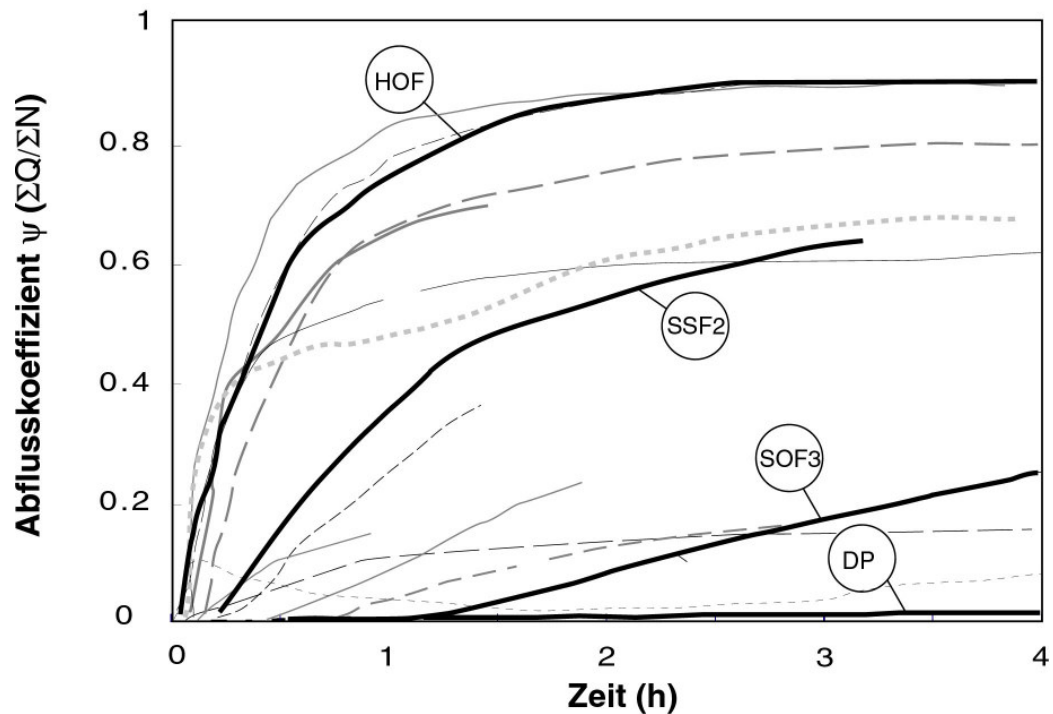


Abb. 5: Berechnungsversuche an Hängen von 60m² Fläche. Der Verlauf der Volumenabfluss-Koeffizienten ($\Psi = \Sigma Q / \Sigma N$) der 18 Hangstandorte. Mit schwarz ausgezogener Linie eingetragen sind die Standorte, die von bestimmten Abflussprozessen dominiert wurden (HOF = Hortonscher Oberflächenabfluss; SOF3 = sehr verzögerter Oberflächenabfluss als Folge der Bodensättigung; SSF2 = verzögerter Abfluss im Boden; DP = Tiefensickerung).

3.3 Wie wirken sich Abflussprozesse im Einzugsgebiet der Vorderen Frenke aus?

Einzugsgebiete reagieren unterschiedlich auf Starkregen. Die beobachteten unterschiedlichen Reaktionsarten lassen sich vor allem auf Unterschiede in der Speicherfähigkeit der Böden zurückführen. Wenn in einem Gebiet die Abflussprozesse SOF1 und HOF flächenmäßig dominieren, verläuft die Abflussbildung bei Starkregen schneller als in Gebieten mit verzögerten Abflussprozessen (SOF2, 3, SSF2, 3, DP). Mit Hilfe von geologischen und pedologischen Karten und Untersuchungen im Gelände kann ein Einzugsgebiet nach Abflussprozessen kartiert werden und in unterschiedliche Reaktionsweisen (schnell, leicht verzögert, verzögert, stark verzögert und sehr stark verzögert beitragende Flächen, sog. Abflusstypen) gegliedert werden. Aus Anteil und räumlicher Verteilung dieser Flächen ergeben sich Hinweise, wie und auf welche Art sich der Niederschlag (Gewitter, Landregen) auf das Einzugsgebiet auswirkt. In BWG (2003) sind verschiedene Beispiele aufgeführt.

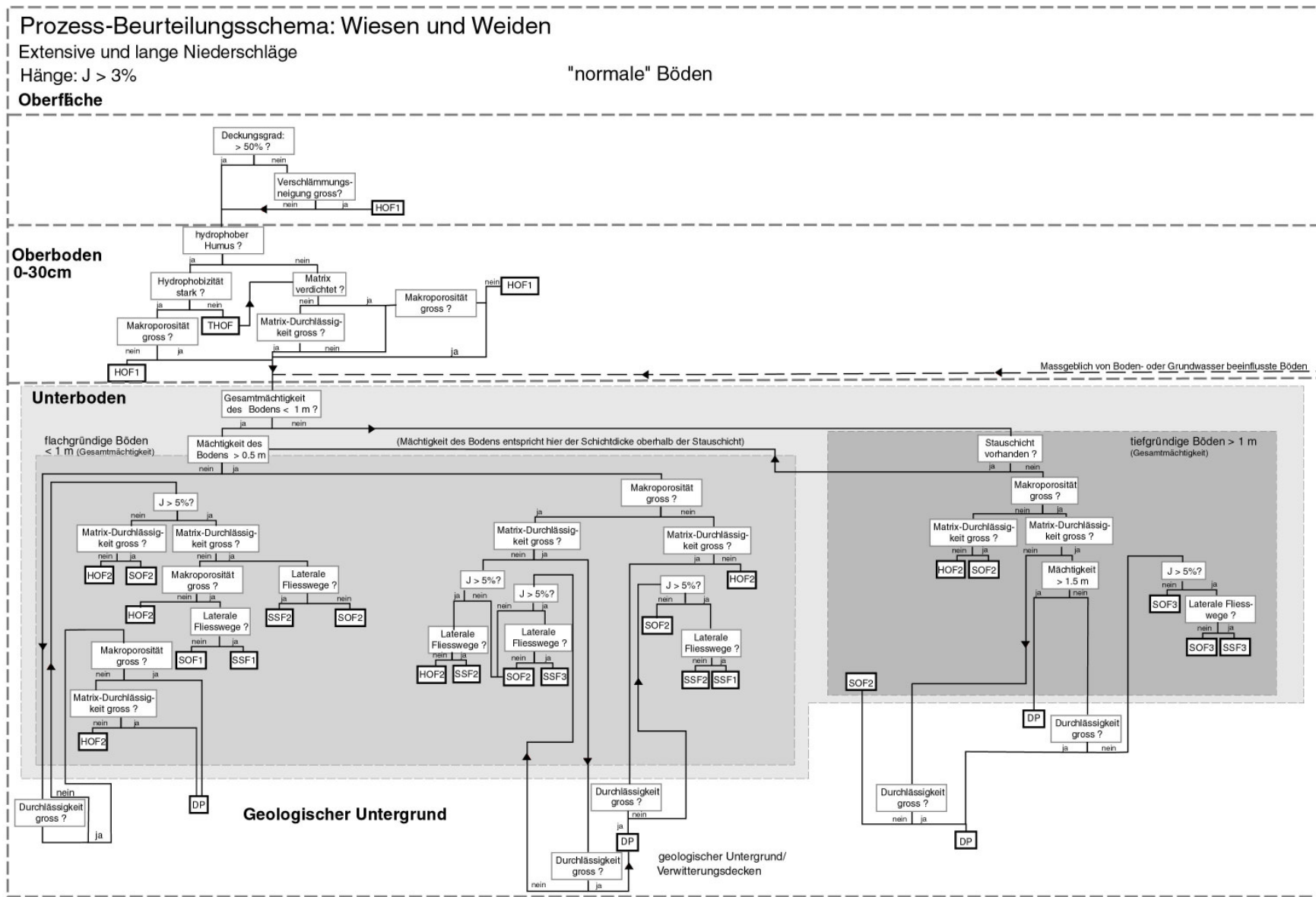


Abb. 6: Prozessbeurteilungsschema (PBS) für die Herleitung des dominanten Abflussprozesses unter Berücksichtigung der Schlüsselstellen. Die Beurteilung der einzelnen Kriterien geht auf Scherrer (2006) zurück.

Der Südteil des Einzugsgebiets der Vorderen Frenke liegt im Faltenjura, der mittlere und nördliche Teil im Tafeljura. Während der Faltenjura eine komplexe Tektonik aufweist mit Faltenachsen in West-Ost-Richtung, und verschiedenen Brüchen und Verschiebungen, besteht der Tafeljura aus ziemlich horizontal liegenden Schichten, die durch Brüche in Hoch-, Hang- und Grabenbereiche zerlegt wurden. Mesozoische Kalke, Mergel und Tone bilden den Untergrund, die im Nordteil teilweise von Sandsteinen (Süßwassermolasse) überlagert sind. Da die Kalke zu einem großen Teil klüftig, teilweise gebankt und verkarstungsfähig sind, sind diese Gesteinsschichten und die daraus entstandenen sandig-lehmigen bis sandig-siltigen Böden durchlässig bis teilweise sogar hochdurchlässig. Dominierend sind im Einzugsgebiet normal durchlässige Braunerdeböden. Von wechselnder Durchlässigkeit sind die Mergelschichten und die darauf entstandenen lehmigen bis tonigen Böden. Zeitweise weisen sie Stauwasser auf. Während im südlichen Faltenjura solche Böden verbreitet sind, konzentrieren sie sich im Tafeljura nur auf Muldenlagen und entlang der Bäche.

Aufgrund der vorliegenden Informationen wurde anhand des in Abbildung 6 dargestellten Schemas das Einzugsgebiet nach Abflussprozessen beurteilt. Abbildung 7 zeigt die Kartierung des Einzugsgebiets der Vorderen Frenke nach der Abflussbereitschaft, wobei Prozesse mit ähnlicher Abflussreaktion in einem Abflusstyp zusammengefasst sind. Dem Abflusstyp 1 (rasch und stark beitragend) gehören 0.7% der Gebietsfläche an, dem Abflusstyp 2 (leicht verzögert beitragend) 9.7%, dem Abflusstyp 3 (verzögert beitragend) 33.5%, dem Abflusstyp 4 (stark verzögert beitragend) 51% und dem Abflusstyp 5 (sehr stark verzögert) 5.1% an. Mehr als die Hälfte des Einzugsgebiets reagiert stark bis sehr stark verzögert auf Starkniederschläge. Es ist daher eine mäßige Abflussreaktion des Gebiets auf Dauerregen zu erwarten. Bei intensiven Gewitterregen treten auf Flächen der Abflusstypen 1 - 3 Oberflächenabflüsse auf.

Zum Vergleich wurde in Abbildung 8 ein Einzugsgebiet dargestellt, das größere Flächenanteile mit Abflusstyp 1 - 3 aufweist und daher wesentlich stärker auf Starkregen reagiert als die Vordere Frenke.

Folgende Schlüsse lassen sich aus der Beurteilung der Abflussreaktion ziehen:

- Der Aufbau des Bodens bestimmt die Abflussreaktion auf Starkniederschläge. Während Böden mit günstigem Aufbau in der Lage sind, sämtliches Wasser zu speichern, fließt bei anderen ein Großteil des Niederschlags ab.
- Diese Unterschiede lassen sich auf unterschiedliche Abflussprozesse zurückführen. Welcher Abflussprozess ausgelöst wird, hängt von verschiedenen Schlüsselstellen im Boden ab.
- Um zu verstehen, auf welche Weise große Hochwasser in einem Gebiet entstehen, sind gebietsspezifische Kenntnisse der Abflussprozesse nötig. Es müssen weitere Aspekte wie die Vegetation, die Gewässernetzdichte, die Geomorphologie, die Geologie und letztendlich die räumliche und zeitliche Niederschlagsverteilung mitberücksichtigt werden.

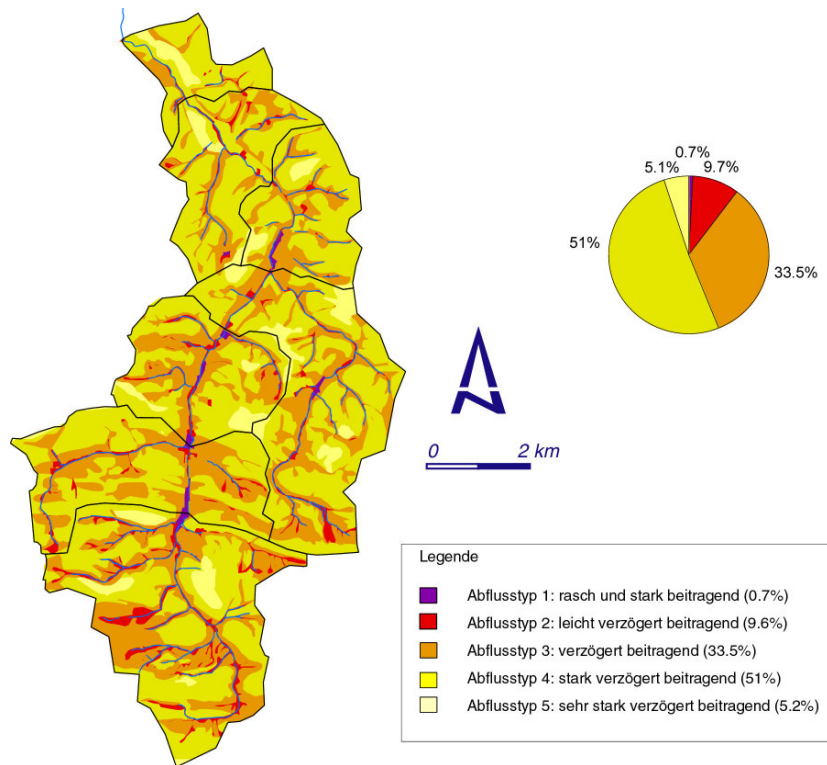


Abb. 7: Einzugsgebiet der Vorderen Frenke (Jura, Schweiz). Die Abflusstypen 1 – 5 beschreiben die zu erwartende Abflussreaktion der Teilflächen. Abflusstyp 1 – 3 (rasch bis verzögert beitragend) machen 44% der Einzugsgebietfläche aus, über 50% des Einzugsgebiets reagiert stark bis sehr stark verzögert. Das Einzugsgebiet der Vorderen Frenke reagiert mäßig auf Starkniederschläge.

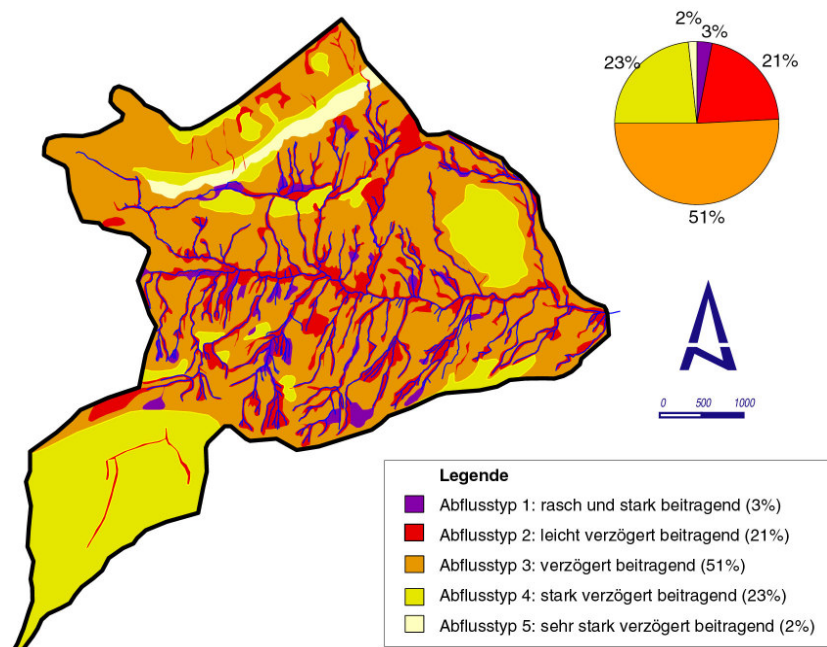


Abb. 8: Zum Vergleich die Abflussreaktion eines stärker reagierenden Einzugsgebiets (Simmi, Einzugsgebiet im St. Galler Rheintal, Schweiz, ein Gebiet aus vorwiegend Flysch und wenig Kalk). Abflusstypen 1 – 3 (rasch bis verzögert reagierend) machen 75% der Gebietsfläche aus, 25% der Flächen reagieren stark bis sehr stark verzögert (Scherrer AG, 2004). Das Einzugsgebiet der Simmi reagiert wesentlich heftiger auf Starkniederschläge als das der Vorderen Frenke.

- Die Abflussreaktion ganzer Einzugsgebiete hängt vom Flächenanteil und der räumlichen Lage der verschiedenen reagierenden Teilflächen ab. Je nach Anteil und Verteilung sind unterschiedliche Niederschläge für die Entstehung großer Hochwasser entscheidend. Wie diese Faktoren zusammenspielen, kann mit Niederschlag-Abfluss-Modellen untersucht werden.
- Das Einzugsgebiet der Vorderen Frenke reagiert dank seinem großen Anteil an stark bis sehr stark verzögert beitragenden Flächen mäßig auf längere Starkniederschläge. Intensive Gewitterregen hingegen, die nur Teile des 44 km² großen Einzugsgebiet treffen, führen auf den Flächen des Abflusstypen 1 – 3 zu Oberflächenabfluss.

4. Niederschlag-Abflussmodell

Der zentrale Teil des hier angewendeten Niederschlag-Abflussmodells QAREA³ (Abbildung 9) bilden die Abflusstypen (a). Jedem Abflusstyp wird eine Abflussreaktionskurve (b) zugeordnet, die von Beregnungsversuchen (Abb. 5) stammen. Diese beiden Elemente bestimmen den abfließenden Teil des Niederschlags und damit die wichtigsten Parameter des Modells. Die Laufzeiten im Gerinne und auf den Flächen werden mit Isochronen nachgebildet (c).

Zur Verifizierung des Modells und der Prozessvorstellung werden vergangene Hochwasser nachgerechnet. Bildet das Modell die Abflüsse befriedigend nach, kann mittels Szenarien (d) die Reaktion des Gebiets auf seltene meteorologische Situationen untersucht werden. Damit können die maßgebenden Fälle ermittelt werden. Bildet das Modell die Abflüsse gemessener Hochwasser hingegen nicht befriedigend nach, wird die Beurteilung der Abflussreaktion (Abflusstypen) und damit das Prozessverständnis überprüft. Die Bestimmung wichtiger Modellparameter unabhängig vom Kalibrierprozess verbessert die Abflussberechnungen mit einem Niederschlag-Abfluss-Modell.

³ Das Niederschlag-Abfluss-Modell wurde am Institut für Hydromechanik (heute: Institut für Umweltwissenschaften) der ETH Zürich entwickelt.

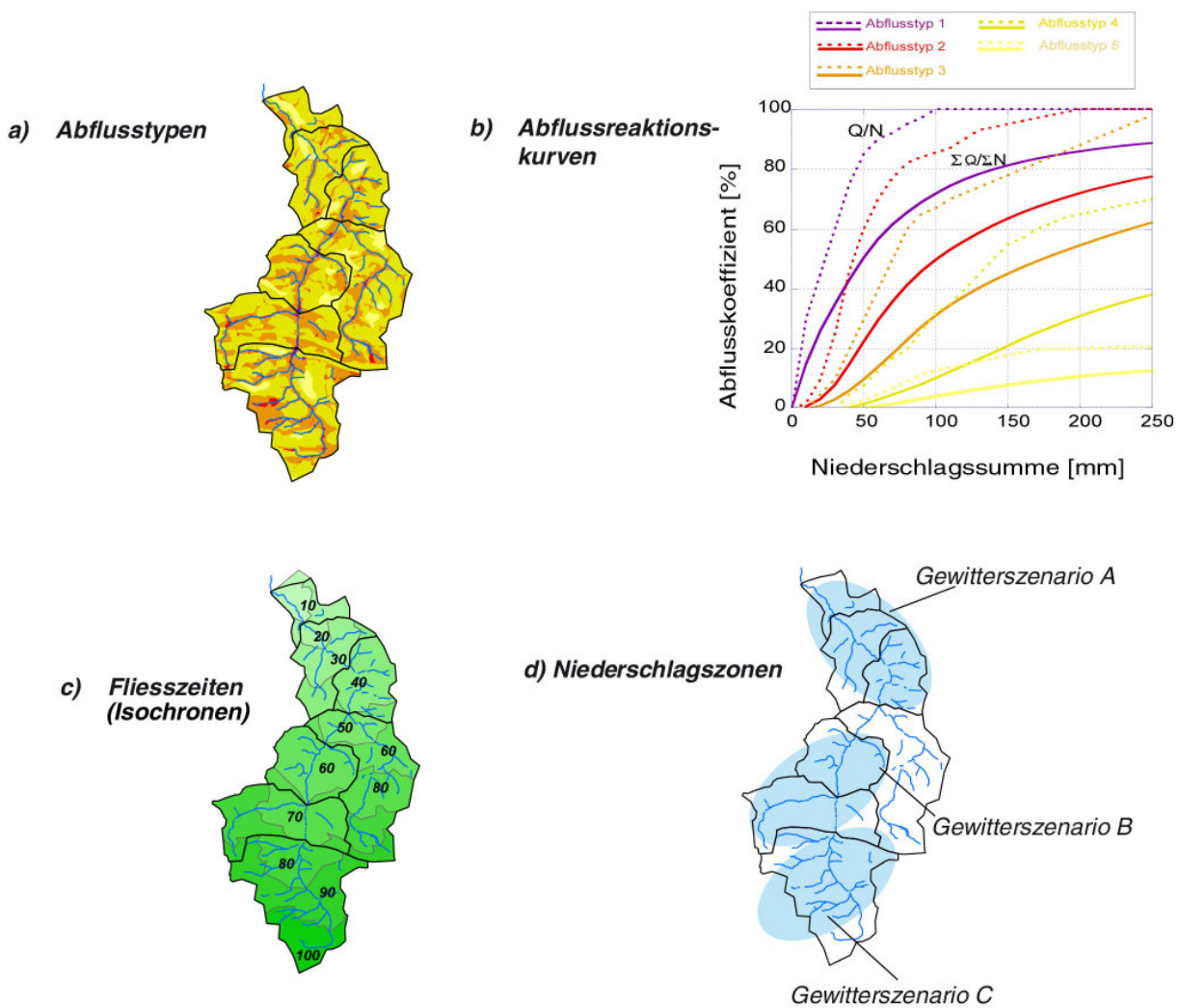


Abb. 9: Die Grundlagen des Niederschlag-Abfluss-Modells QAREA: a) Abflusstypen, b) Abflussreaktionskurven, c) Fließzeiten (Isochronen), d) Niederschlagszonen (Gewitterniederschläge, Szenario A - C).

5. Synthese

Die Erkundung historischer Hochwasser (Kap. 2) und die Beurteilung der Abflussreaktion (Kap. 3) sind zwei voneinander unabhängige Untersuchungen, die zu einem Gesamtbild zusammengeführt werden. Die historischen Hochwasser verlängern die Beobachtungsperiode, die Untersuchung der Abflussreaktion gibt Auskunft darüber, wie das Gebiet reagiert, wenn seltene Niederschläge auftreten. Ein mathematisches Niederschlag-Abfluss-Modell ermöglicht es, die Erkenntnisse der Abflussreaktion zu quantifizieren. Abbildung 10 zeigt das Frequenzdiagramm als Synthese dieser Untersuchungen. Es wird ergänzt mit den eingeordneten historischen Hochwassern (graue Kästchen) und den Modellrechnungen (strichlierte Kästchen):

Das Hochwasser von 1830 war im mittleren bis unteren Teil des Einzugsgebiets nicht einzigartig, möglicherweise war das Ereignis von 1629 in einer ähnlichen Größenordnung. Dem Hochwasser von 1830 wird eine Wiederkehrperiode von 200 bis 400 Jahre zugeordnet. Das Hochwasser 1926 liegt hinter 1629 und 1830 auf dem dritten Rang (ca. 130jährlich), das Hochwasser von 1881 auf Rang 4 bis 5 (80 – 100jährlich).

Die Berechnungen mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell decken sich gut mit den Erkundungen der historischen Hochwasser, was ein konsistentes Gesamtbild ergibt. Eine rein statistische Herleitung des 100jährigen Hochwassers ergäbe wesentlich tiefere Werte.

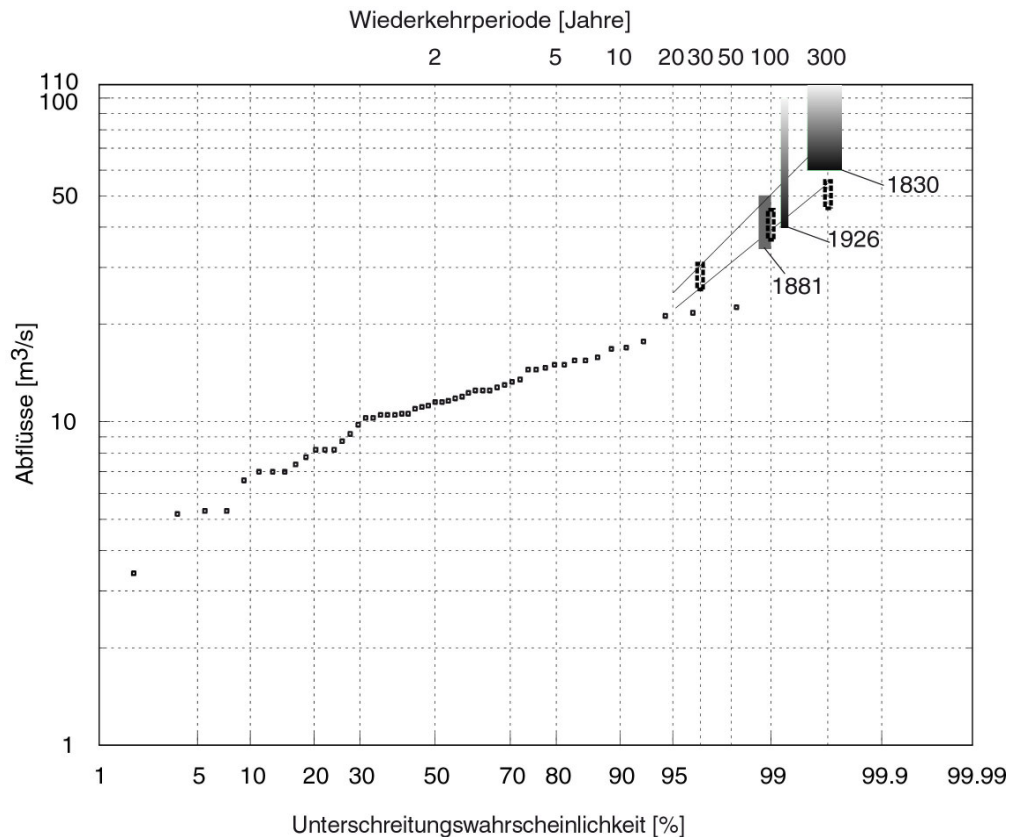


Abb. 10: Das Frequenzdiagramm des Pegels Frenke-Talhaus mit den Jahreshochwassern (1931 – 1951 und 1975 – 2006). Ebenfalls eingetragen sind die aufgrund der historischen Untersuchungen eingeordneten Hochwasser von 1830, 1881 und 1926, sowie die mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell berechneten Abflüsse (strichlierte Kästchen). Aufgrund dieser Untersuchungen liegt das HQ100 zwischen 37 – 50 m³/s.

6. Schlussfolgerung

Die Abschätzung seltener Hochwasserabflüssen weist i.d.R. eine große Unsicherheit auf. Sind verlässliche Abflussmessungen verfügbar und die Messreihen ausreichend lang, lassen sich die maßgebenden Abflüsse statistisch abschätzen. Oft sind die Messperioden jedoch zu kurz, um auf seltene Ereignisse zu schließen. Eine Erweiterung der Beobachtungen durch Erkundung historischer Hochwasser gibt Einblick in die Hochwassergeschichte eines Gewässers. Sie zeigt auf, wann und weshalb große Hochwasser stattfanden und wann Perioden mit vielen oder wenigen Hochwassern auftraten. Sie offenbart auch, ob die vorliegende Messperiode repräsentativ für eine Abschätzung ist.

Mit einer Kartierung der Abflussprozesse kann beurteilt werden, wie stark die Flächen eines Einzugsgebiets zum Hochwasser beitragen. In Kombination mit einem Niederschlag-Abfluss-Modell lässt sich diese Reaktion quantifizieren und Aussagen herleiten, wie das Gebiet auf seltene Niederschlagsereignisse reagiert.

Das vorgestellte Beispiel zeigt, wie stark das Einzugsgebiet der Vorderen Frenke in der Vergangenheit auf Starkniederschläge reagierte und dass trotz der ansehnlichen Größe des Gebiets Gewitter die größten Abflüsse auslösten. Eine auf gemessenen Abflüssen basierte Statistik hätte die Reaktionsweise des Gebiets unterschätzt. Der vorgestellte Ansatz, der verschiedene Methoden kombiniert, verleiht Hochwasserabschätzungen mehr Verlässlichkeit.

7. Literatur

Markart, G. Kohl, B., Sotier, B., Schauer, T., Bunza, G., Stern R. (2004) Provisorische Kartieranleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden- und Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen. Bundesamt und Forschungszentrum für Wald, BFW-Dokumentation 3/2004.

Naef, F., Scherrer, S., Zurbrügg, C. (1998) Große Hochwasser – Unterschiedliche Reaktionen von Niederschlägen. Hydrologischer Atlas der Schweiz HADES, Blatt 5.7.

Röthlisberger, G. (1981) Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz. Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Nr. 330.

Scherrer, S. (1996) Abflussbildung bei Starkniederschlägen – Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 147.

Scherrer AG (2004) Hydrologie und Hydraulik des Werdenberger Binnenkanals. Auftraggeber: Baudepartement des Kantons St.Gallen, Tiefbauamt / Werdenberger Binnenkanal Unternehmen.

Scherrer AG (2006) Hochwasserabflüsse an der Vorderen Frenke. Auftraggeber: Tiefbauamt des Kantons Basel-Landschaft, Geschäftsbereich Wasserbau.

Scherrer, S., Naef, F. (2003) A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland, Hydrol. Processes, 17, 391–401.

Bundesamt für Wasser und Geologie, BWG (2003) Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten, Bericht Nr. 4. Kap. 3: Grundlagen zu den Abflussbildungsprozessen von den Autoren S. Scherrer und F. Naef.

Scherrer, S. (2006) Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. Hrsg. Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht, Rheinland-Pfalz, Wasserwirtschaft.

Scherrer, S., Naef, F., Faeh, A., Cordery, I. (2007) Formation of runoff at the hillslope scale during intense Precipitation. Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 907–922. www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/907/2007/

Anschrift des Verfassers:

Dr. Simon Scherrer

Scherrer AG - Hydrologie + Hochwasserschutz

Stockackerstrasse 25, CH – 4153 Reinach

Email: scherrer@scherrer-hydrol.ch; www.scherrer-hydrol.ch

BEMESSUNGSNIEDERSCHLÄGE STARKNIEDERSCHLAGSAUSWERTUNG BEIM HYDROGRAPHISCHEN DIENST

Viktor Weilguni

1. Einleitung

Bemessungsniederschläge werden im Allgemeinen durch die Angabe der Niederschlagsdauer und einem Wahrscheinlichkeitsmaß charakterisiert. Als Wahrscheinlichkeitsmaß wird üblicherweise die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Niederschlagswert bestimmter Dauer erreicht oder überschritten wird – die so genannte Überschreitungswahrscheinlichkeit - verwendet. Ihre Abschätzung erfolgt mit Hilfe der Extremwertstatistik durch Anpassung einer Verteilungsfunktion an die Stichprobe extremer Niederschlagsereignisse. Der Reziprokwert der Überschreitungswahrscheinlichkeit wird auch als Jährlichkeit, Wiederkehrzeit oder Wiederkehrintervall bezeichnet. Diese Wahrscheinlichkeitsangaben sind aber auch direkt aus dem Datensatz (Stichprobe) als empirische Eintrittswahrscheinlichkeiten, den so genannten Plotting Positions, ableitbar.

Die Ermittlung von Bemessungsniederschlägen erfolgt beim Hydrographischen Dienst über einen extremwertstatistischen Ansatz, mit Hilfe von Modellrechnungen eines deterministischen Modells und auch durch Kombination dieser beiden Modellansätze.

Als extremwertstatistischer Ansatz wird die Methode ÖKOSTRA (Österreichische koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und – Auswertung) angewendet (ATV-A121, 1985, ÖKOSTRA-93, 1992, Hammer, 1993). Das deterministische Modell ist ein meteorologisches Niederschlagsmodell, das ab 1997 an der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik zur Vorhersage von konvektiven Niederschlägen eingesetzt wurde. Die Ergebnisse aus den Modellrechnungen wurden erstmals im Jahr 2000 veröffentlicht (Lorenz P., Skoda G., 2000) und 2003 auch im Hydrologischen Atlas von Österreich zur Erstellung der Kartenblätter „Konvektive Starkniederschläge“ verwendet (HAÖ, 2003). Als weitere Methode steht nun auch ein kombinierter Ansatz zur Verfügung, HAÖSTRA (Hydrologischer Atlas Österreichs und Österr. Starkniederschlagsregionalisierung und – Auswertung (BMLFUW, 2006)). Bei diesem Ansatz werden die extremwertstatistisch ausgewerteten Messstellendaten räumlich interpoliert und anschließend mit den HAÖ- Modelldaten dauerstufenabhängig gewichtet.

2. ÖKOSTRA - Extremwertstatistischer Ansatz

Die Methode basiert auf dem Verfahren, das im Regelblatt ATV-A121 beschrieben wird. Als Erweiterung wird zusätzlich eine Modifikation beim Dauerstufenausgleich der Verteilungsparameter verwendet - OWUNDA (Optimierter W, U Niederschlagsdauerstufenausgleich). W und U sind die Parameter der Verteilungsfunktion, die an die Stichprobe jeder Dauerstufe angepasst wird.

Die Ableitung der Stichprobe (Serien), an welche die Anpassung von Verteilungsfunktionen erfolgt, kann auf 2 Arten durchgeführt werden, als jährliche Serie und partielle Serie. Die jährliche Serie enthält pro Kalenderjahr nur einen Wert, den jeweils größten Wert im Jahr. Im Gegensatz dazu werden bei der partiellen Serie alle Werte über einem Grenzwert herangezogen. Dieser Grenzwert wird mit Hilfe der Anzahl der besetzten Jahre des Niederschlagsdatensatz ermittelt und als der Wert festgelegt, der von 2,5 mal Anzahl der Jahre an Daten überschritten wird. Dabei ist für jede Dauerstufe nur ein Wert pro Tag zugelassen, um die Unabhängigkeit der Daten zu gewährleisten.

Tab. 1: Verwendete Dauerstufen mit empirischen, multiplikativen Korrekturfaktor

Minuten	Stunden	Tage	Korrekturfaktor
5		1	1,14
10	2	2	1,07
15	3	3	1,04
20	4	4	1,03
		5	1,03
30	6	6	1,02
45	9		1
60	12		1
90	18		1

Als Ausgangsdaten zur Bestimmung der Serien werden 5 Minuten-, 1 Stunden-, und 1 Tagessummen des Niederschlags verwendet. Durch diese starre Blockung der Daten in Grundintervalle ist es wahrscheinlich, dass Niederschlagsereignisse auf verschiedene Grundintervalle aufgeteilt und dadurch als kleinere Niederschlagswerte als ohne Blockung in die Serie aufgenommen werden. Daher werden die so ermittelten Werte mit einem empirischen Korrekturfaktor erhöht (multipliziert). Dieser Korrekturfaktor ist davon abhängig, wie viele Grundintervalle in der betrachteten Dauerstufe enthalten sind. Insgesamt werden 21 Dauerstufen für die Auswertung verwendet siehe (Tab. 1). Entsprechend der Empfehlung in ATV-A121 wird die jährliche Serie dann als Stichprobe herangezogen, wenn deren Länge größer/gleich 20 Jahre ist und Aussagen für Wiederkehrzeiten größer/gleich 5 Jahre benötigt werden.

Abhängig vom Typ der verwendeten Serie ist auch die Verteilungsfunktion, die an die Stichprobe angepasst wird. Es gibt keine Wahlmöglichkeit! An die partielle Serie wird immer die Exponentialverteilung

$$h_N(D,T) = u_p(D) + w_p(D) \ln(T), \tag{1}$$

und an die jährliche Serie immer die Extremal I Verteilung (die Gumbel Verteilung)

$$h_N(D, T^*) = u_j(D) + w_j(D) (-\ln(\ln(T^*/(T^*-1)))) \quad (2)$$

angepasst.

h_N ist die Niederschlagssumme bestimmter Dauer D und Jährlichkeit T bzw. T^* der partiellen bzw. jährlichen Serie. u_p , w_p bzw. u_j , w_j sind die Parameter der Verteilungsfunktionen. Die Anpassung der Verteilungsfunktionen, d.h. die Bestimmung der Parameter u und w erfolgt für jede Dauerstufe getrennt mit Hilfe einer linearen Regression an die Serienwerte. Dazu ist es erforderlich, den Stichprobenwerten eine geschätzte Wiederkehrzeit, eine Plotting-Position zuzuordnen. Als Plotting-Position-Formel, wird

$$T = (L+0.2)/(k-0.4) M/L \quad (3)$$

verwendet. Dabei ist M die Länge der Messreihe in Jahren, L die Gesamtanzahl der Ereignisse in der Serie und k der Laufindex ($k = 1$ für den größten Wert der Serie).

Ein Vergleich des Verlaufs der Verteilungsparameter über alle Dauerstufen zeigt, dass vor allem der Verteilungsparameter w , der für den Anstieg der Niederschlagswerte mit der Jährlichkeit verantwortlich ist, stark streuen kann (siehe Abb. 1). Daher ist es sinnvoll und notwendig, einen Ausgleich der Verteilungsparameter über alle Dauerstufen durchzuführen, um ein widerspruchsfreies Ergebnis zu erhalten. Dadurch wird sichergestellt, dass der Ergebnisniederschlag mit länger werdender Dauer und größer werdender Jährlichkeit auch zunimmt.

Für den Ausgleich der Parameter u und w über die Dauerstufen stehen bei ÖKOSTRA zwei Methoden zur Verfügung. Jene, die in ATV-A121 verwendet wird, und zusätzlich die Methode OWUNDA. Der Dauerstufenausgleich nach der ATV-A121 teilt den gesamten Dauerstufenbereich in 3 Teilbereiche. Innerhalb jedes Dauerstufenteilbereichs wird an die Werte der Verteilungsparameter eine Gerade angepasst. Dabei können sowohl die Verteilungsparameter als auch die Niederschlagsdauer oder nur die Niederschlagsdauer logarithmiert verwendet werden. Abschließend werden die angepassten Geraden noch gedreht, um an den Bereichsübergängen Sprünge zu vermeiden. Letztendlich wird jene Anpassung gewählt, die den kleinsten Variationskoeffizienten aufweist (siehe Abbildung 1). Diese Ausgleichsmethode wurde für ÖKOSTRA automatisiert. Das bedeutet, dass die Bereichsgrenzen nicht mehr vorgegeben werden müssen, sondern anhand des kleinsten Variationskoeffizienten aus allen möglichen Kombinationen von Bereichsgrenzen und Parametertransformationen (logarithmiert, nicht logarithmiert), automatisch bestimmt werden. In Abb. 1 sind die Auswirkungen der Ausgleichsrechnung für die Verteilungsparameter u (links) und w (rechts) dargestellt. Die beste Anpassung, jene mit dem kleinsten Variationskoeffizienten, wurde für die Bereichsgrenzen 6 Stunden und 1 Tag erhalten, wobei sowohl die Dauerstufen als auch die Verteilungsparameter logarithmiert verwendet wurden.

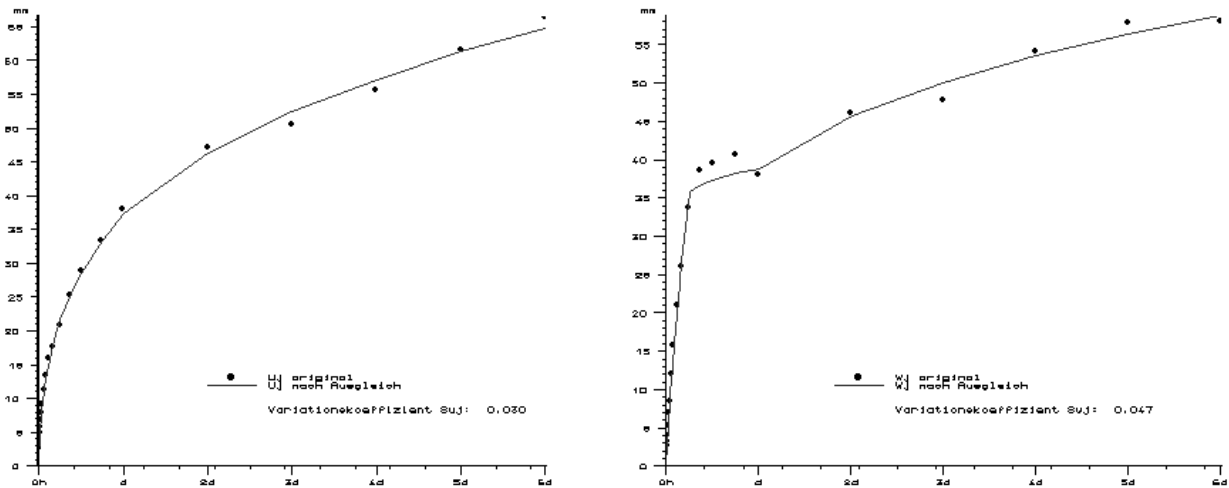


Abb. 1: Ausgleich der Verteilungsparameter u (links) und w (rechts) für eine jährliche Serie nach der Methode ATV-A121. Bereichsgrenzen 6 Stunden und 1 Tag; Dauerstufen und Verteilungsparameter logarithmiert.

Im Gegensatz zum Dauerstufenausgleich nach ATV-A121 unterscheidet OWUNDA keine Dauerstufenteilbereiche (Hammer, 1993). Bei OWUNDA werden über den gesamten Dauerstufenbereich Funktionen angepasst - auch nicht lineare Funktionen - und wiederum jene mit dem kleinsten Variationskoeffizienten als beste Anpassung gewählt.

Folgende Funktionen werden untersucht

- a) $y = a + b x$
- b) $y = a e^{b x}$
- c) $y = a + b \ln x$
- d) $y = a x^b$
- e) $y = a + b x + c x^2$
- f) $y = a + b x + c x^2 + d x^3$
- g) $y = a + b x + c x^2 + d x^3 + e x^4$
- h) $y = a + b x + c x^2 + d x^3 + e x^4 + f x^5$
- i) $y = x/(b + a x)$
- j) $y = a x e^{b x}$
- k) $y = a x e^{b x^2}$

Dabei können sowohl die Verteilungsparameter als auch die Dauerstufen logarithmiert oder nicht logarithmiert verwendet werden. Folgende Bedingungen müssen jedoch erfüllt sein, um ein widerspruchsfreies Ergebnis zu erhalten: u , d.h. der Niederschlag mit Jährlichkeit 1, muss mit zunehmender Dauer streng monoton wachsen und der Ergebnismiederschlag $h_N(D,T)$ muss in Abhängigkeit von der Dauerstufe mit

zunehmender Jährlichkeit monoton wachsen. In Abb. 2 sind die Dauerstufenausgleichskurven für die Verteilungsparameter u (links) und w (rechts) dargestellt. Dabei wurden die Ausgleichsfunktionen

$$u_j: \ln(u) = 0,655851 \ln(D) \exp(-0,0391713 \ln(D))$$

$$w_j: w = D / 6,121331 + 0,0171165 D$$

verwendet. Im Vergleich zum Ausgleich nach ATV-A121 (Abb. 1) zeigt der OWUNDA- Ausgleich einen „glatten“ Verlauf, in diesem Beispiel jedoch für w für Dauerstufen ab einem Tag, eine stärkere Abweichung der Ausgleichsfunktion von den originalen Verteilungsparametern.

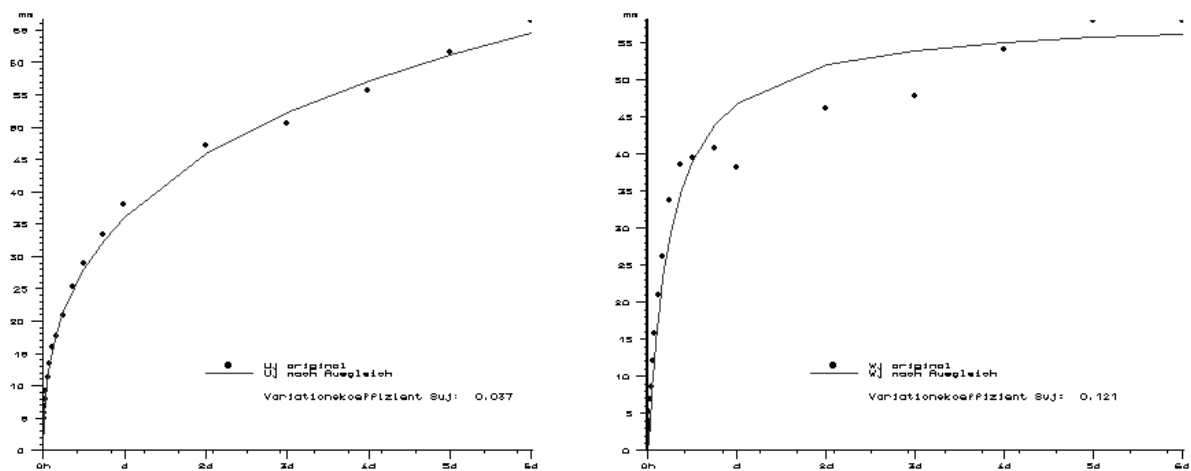


Abb. 2: Ausgleich der Verteilungsparameter u (links) und w (rechts) für eine jährliche Serie nach dem Methode OWUNDA.

Welche Anpassung gewählt wird, entscheidet wieder die Größe des Variationskoeffizienten. Jene Ausgleichsmethode ist zu verwenden, deren Variationskoeffizienten (sowohl u als auch w) kleinere Werte annehmen. Eine subjektive Entscheidung eines Sachbearbeiters ist nicht notwendig.

2.1 Kritik

Bei der Beurteilung der Ergebnisse aus ÖKOSTRA- Auswertungen sind grundsätzlich all jene Kriterien zu hinterfragen, die auch bei jeder anderen extremwertstatistischen Methode überprüft werden müssen, wie z.B. Stichprobenlänge, Auftreten von Datenausreißern, Wahl der passenden Verteilungsfunktion, Unabhängigkeit der Stichprobenwerte, Auftreten von Inhomogenitäten innerhalb des Datensatzes, u.s.w.

Speziell für Niederschlagsdaten kommen noch weitere Punkte zur Beurteilung hinzu, die auf die räumlichen Struktur des Niederschlagsprozesses und die verwendeten Messsysteme zurückzuführen sind. Das wären:

ungünstige Messnetzgeometrie: z.B. (zu) geringe Messnetzdicke; Starkniederschläge fallen „in der Umgebung“ des Beobachtungspunktes und werden nicht, oder mit zu geringen Werten erfasst (vor allem für kurze Dauern).

Meteorologische Gründe am Standort der Messstelle: Wind- und Verdunstungsfehler.

Technische Mängel an Geräten: Messsystembedingte Fehler wie z.B. hohe Intensitäten können nicht mehr aufgezeichnet werden. Daher geht ein Teil des Niederschlags verloren.

Wartungsmängel: z.B. Verstopfung des Zulaufs bei Wippen, daraus resultiert ein gänzlich fehlendes oder zumindest eine Abschwächung von einzelnen Starkniederschlagsereignissen.

Die oben angeführten Ursachen haben unterschiedliche Auswirkungen in den einzelnen Dauerstufen und Wiederkehrperioden. Daher ist es derzeit nicht möglich, eine „allgemein gültige Korrekturformel“ anzugeben. Durch die oben angeführten Gründe ist zu erwarten, dass die ÖKOSTRA-Methode der Tendenz nach eher zu geringe Schätzwerte des Niederschlags für eine bestimmte Jährlichkeit liefert.

Speziell für ÖKOSTRA sind folgende Kritikpunkte zu erwähnen:

(+) Dauerstufenausgleich ist notwendig um ein widerspruchsfreies Ergebnis zu erhalten. (–) Dauerstufenausgleich kann die Ergebnisse für einzelne Dauerstufen (stark) verändern.

(+) Objektives Ergebnis ohne Entscheidungen des Sachbearbeiters. (–) Keine Wahlmöglichkeit bei den verwendeten Verteilungsfunktionen.

(+) Ausreißer werden nicht stark berücksichtigt (2-parametrische Verteilung). (–) keine gute Anpassung an die Stichprobe.

3. Deterministischer Ansatz – HAÖ- Modellniederschläge

Ein gänzlich anderer Ansatz, um extreme Niederschläge (Starkniederschläge, Bemessungsniederschläge) für Dauerstufen bis zu 12 Stunden zu erzeugen, verwendet ein physikalisches, meteorologisches Modell. Diese Auswertungsmethode (Lorenz und Skoda, 2000) ist seit dem Jahr 2000 beim Hydrographischen Dienst im Einsatz und wurde 2003 auch im Hydrologischen Atlas von Österreich zur Erstellung der Kartenblätter „Konvektive Starkniederschläge“ verwendet (HAÖ, 2003).

Kurz zusammengefasst wird folgender Weg beschritten: Ein geeignetes meteorologisches Modell wird zunächst mit Testbeobachtungen (extremwertstatistischen Auswertungen) kalibriert. Anschließend berechnet man - unabhängig von Messdaten - die gesuchten extremen Niederschlagswerte mit sehr hoher räumlicher Auflösung. Eine notwendige räumliche Glättung der Felder ist über eine Polynom-Regression mit der Seehöhenabhängigkeit zu erreichen. Dieses räumlich geglättete Niederschlagsfeld wird als Eingangsgröße h_N in die Gleichung für die Exponentialverteilung – wie bei der extremwertstatistischen Auswertung partieller Serien – verwendet, woraus sich im

weiteren Anpassungskonstanten ergeben, welche das Auftreten maximaler konvektiver Niederschläge flächendeckend beschreiben.

Das zugrunde liegende Modell wurde zwischen 1991 und 1997 entwickelt und wurde ab 1997 an der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik zur Vorhersage von konvektiven Niederschlägen eingesetzt. Es ist ein instationäres, orographisch- konvektives Modell (OKM) und berechnet den lokalen orographisch- thermischen Antrieb konvektiver Wolken- und Niederschlagsbildung über komplexem Gelände bei gleichzeitiger Interaktion mit den großräumigen synoptischen Feldern (Haiden und Pichler, 1997). Für die Berechnung ist ein hochauflösendes digitales Geländemodell notwendig, um die für die orographische Niederschlagsverstärkung entscheidenden Geländeparameter wie Anstieg und Höhenlage zu ermitteln. Die Gitterdistanzen betragen ungefähr 1,5 km x 1,4 km.

Um typische, konvektive Niederschläge auf synoptischem Weg zu berechnen, wurde mit der Anfang 1998 gültigen Modellversion von OKM eine große Zahl von Testläufen durchgeführt. Es wurde darauf geachtet, Ereignisse nahe dem obersten, in Mitteleuropa noch auftretenden Intensitätsbereich zu simulieren. Im Rahmen der Modellphysik zulässige, als „extrem“ angenommene Anfangs- und Randwerte (Labile Luftschichtung, hohe Einstrahlungswerte, hohe Temperaturen und Wasserdampfgehalte, geeignete zeitliche Tendenzen dieser Größen, etc.) produzieren Modellniederschläge verschiedener Intensität und Andauer. Die Modellergebnisse wurden auf dem Umweg modifizierter Anfangsbedingungen an punktuell verfügbare Auswertungsergebnisse aus Regionen mit langen Beobachtungsreihen angepasst. Damit ist sichergestellt, dass das meteorologische Modell dort annähernd vergleichbare Resultate mit der Beobachtung liefert. Fehlbeträge an den Beobachtungsstellen durch Messfehler wurden mittels einer generellen Anhebung im Ausmaß von 5% berücksichtigt. Diese Kalibrierung erfolgte mittels Minimierung der mittleren Abweichungen von Modellniederschlag (am hochauflösenden Rechengitter) und ausgewerteten Beobachtungsdaten (1971 – 1990) der Messstellen Bregenz, Kufstein, Salzburg, Weißenbach (Attersee), Wien - Hohe Warte, Karl, Liezen, Reichenfels und Lienz. Am Ende kristallisierten sich physikalische Anfangsbedingungen heraus, welche im OKM für Österreich bei den Dauerstufen 2 Stunden bzw. 4 Stunden einen mutmaßlichen dreißigjährigen und fünfundsiebzigjährigen Niederschlag $P_{max}(D,T)$ lieferten.

Die maximale Modell-Niederschlagsrate P_{max} ist diejenige, die zum Zeitpunkt der Auslösung im Zentrum der konvektiven Wolken-Zelle herrscht. Sie gibt für jeden Punkt an, welche Niederschlagsintensitäten dort in dem Fall, dass Gewitterzellen mit ihrem Kern genau über den Punkt ziehen, zu erwarten sind. P_{max} stellt somit eine Art Maximalabschätzung dar. Sie wird im OKM durch vertikale Integration der feuchtadiabatischen Kondensationsrate über die vertikale Mächtigkeit der Wolke

$$P_{max} = \sum_{z=z_{LCL}}^{z=z_{TOP}} w(z)_z \cdot \rho(z)_z \cdot \left(-\frac{\delta r_s(z)}{\delta z} \right)_z \quad (4)$$

abgeschätzt. Dabei ist $w(z)$ das im „open parcel“ - Modell berechnete Vertikalgeschwindigkeitsprofil, $\rho(z)$ ein mittleres Dichteprofil und $\delta r_s(z)/\delta z$ die Abnahme des Sättigungsmischungsverhältnisses mit zunehmender Höhe bei feuchtadiabatischer Hebung. z_{TOP} bezeichnet die Höhe der jeweiligen Cumulus-Tops, z_{LCL} das Niveau der entsprechenden Hebungskondensationsniveaus. Es wird weiters angenommen, dass die Niederschlagsintensitäten der einzelnen konvektiven Wolkenzellen unter langsamer räumlicher Verlagerung mit der Zeit exponentiell abnehmen. Durch zeitliches Aufsummieren der Niederschlagsintensitäten P_{max} , werden die gesuchten extremen konvektiven Niederschlagswert $P_{max}(D,T)$ [mm] erhalten.

Die zugehörigen Felder zeigen regional sehr raue Strukturen, die dort überwiegend durch isolierte, extreme Spitzenwerte zustande kommen. Deren Dämpfung erscheint für die Praxis sinnvoll. Dies geschieht, indem $P_{max}(D,T)$ an jedem Gitterpunkt mit den gleichzeitig bekannten - innerhalb eines Quadrates von 50 km Seitenlänge liegenden – Topographiedaten mit einer Polynom-Regression dritten Grades in Beziehung gebracht wird. Diese so ausgeglichenen Niederschlagswerte dienen in der Folge als Eingangsgrößen h_N in Gleichung (6).

$$F(z) = c_0 + c_1z + c_2z^2 + c_3z^3 \quad (5)$$

Unter der Annahme, dass die im Rahmen von ÖKOSTRA für partielle Serien verwendeten Zusammenhänge zwischen Niederschlagsmenge, Andauer und Eintrittswahrscheinlichkeit in ihrer einfachsten mathematischen Form für das ganze Bundesgebiet Gültigkeit haben, kann die Niederschlagshöhe h_N als Funktion der Dauerstufe D und der Wiederkehrzeit T in der Form

$$h_N(D,T) = u(D) + w(D) \ln T \quad (6)$$

ausgedrückt werden. Für die einfach-logarithmische Gestalt von $u(D)$ und $w(D)$, in der Form

$$u(D) = a_u + b_u \ln D \quad \text{und} \quad w(D) = a_w + b_w \ln D \quad (7)$$

werden die Anpassungskonstanten a_u , b_u , a_w und b_w mittels der Gleichungen (6) und (7) am feinmaschigen OKM – Gitter berechnet und repräsentieren somit Flächeneinheiten von etwa 2 km². Anschließend werden die Rechenergebnisse auf ein gröberes Gitter (ca. 6 km x 6 km) übertragen, das bereits für die Berechnung von Gebietsniederschlägen verwendet wurde. Erstens, um eventuelle Verknüpfungen mit den dort angestellten Überlegungen zu erleichtern und zweitens, um hochfrequente Fluktuationen zu dämpfen.

Es darf nicht vergessen werden, dass die abgeleiteten Koeffizienten nur im Rahmen jener Zeiträume Gültigkeit haben, in denen die physikalischen Voraussetzungen des meteorologischen Modells Gültigkeit haben. Das war für die Dauerstufe D bis maximal ein halber Tag und für die Wiederkehrzeit T höchstens 100 Jahre. Sollte eine Extremwertabschätzung mit einer Wiederkehrzeit von $T > 100$ [Jahre] erwünscht sein, besteht eine formale Möglichkeit der Erweiterung von T auf Werte über 100 Jahre

mittels Potenzansatz. Dazu berechnet man gemäß Gleichung (6) $h_N(D, T=100)$ und bildet für $T > 100$ Jahre

$$h_N(D, T > 100) = \frac{h_N(D, T = 100)}{1.48} \cdot T^{0.085} \quad (8)$$

Bei der Verwendung dieser Erweiterung muss man sich aber im Klaren sein, dass wesentliche Voraussetzungen - nämlich die Stationarität des Niederschlagsklimas bzw. die Homogenität beobachteter Niederschlagsreihen - nicht mehr erfüllt sind. Mit Hilfe der Gleichungen (4) bis (7) (bzw. bis (8)) ist eine für Bemessungszwecke geeignete Kenngröße $h_N(D, T)$ für Starkniederschläge bestimmbar. Dieser Ergebnismesswert $h_N(D, T)$ charakterisiert Extremwerte konvektiver Niederschläge mit meteorologisch maximierten Obergrenzen. Dabei handelt es sich jeweils um einen Erwartungswert aus dem betrachteten Gebiet von zirka 6 km mal 6 km. Der Betrag dieser konvektiven, etwa 2 km² ausgedehnten Quasi-Punkt-Niederschlagsmengen wird implizit bis zu einer Radialentfernung von zirka 25 km durch die umgebende Topographie geprägt.

Da extreme Niederschlagsereignisse mit dem konventionellen Stationsnetz im Allgemeinen nur mangelhaft erfasst werden, zeigen beim Datenvergleich der Modellniederschläge mit extremwertstatistisch ausgewerteten Niederschlagsmessstellendaten, die Modellniederschläge merklich höhere Werte. In folgenden 3 Tabellen (2, 3 und 4) sind die Auswertungen nach einigen Methoden miteinander verglichen. Das K-Kriterium geht auf Kreps und Schimpf, 1965 und auf Schimpf, 1970 zurück. In der Zeile ÖKOSTRA – sind die extremwertstatistischen Messstellenauswertungen angeführt und die Zeile HAÖ enthält die aus den HAÖ- Karten (ca. 6km x 6km) entnommenen Erwartungswerte extremer Niederschläge. Die einhüllende Kurve der Niederschlagsrekorde (z.B. Wiesner, 1970) lautet

$$h_{N, \text{Rekord}} = 50.54 D^{0.5} \quad (9)$$

mit h_N [mm], D [Minuten] und $T \rightarrow \infty$.

Leere Felder sind nicht sinnvoll bzw. nicht verfügbar; das K-Kriterium ist für Dauerstufen unter 30 Minuten nicht definiert.

Tab. 2: Zwettl-Edelhof / 107581 – Niederösterreich; Dauerstufe $D = 15$ Minuten.

Jährlichkeit T	T=2	T=10	T=50	T=100	T → ∞	Reihe
M e t h o d e						1987-2000
K25 – Kriterium						
ÖKOSTRA	11.6	16.9	21.7	23.6	-	
HAÖ	18.6	33.9	49.1	55.6	-	
$h_{N \text{ Rekord}}$	-	-	-	-	196	
Größter Messwert						20,5

Tab. 3: Reutte / 101238 – Tirol; Dauerstufe D = 60 Minuten.

Jährlichkeit T	T=2	T=10	T=50	T=100	T → ∞	Reihe
M e t h o d e						1942-2000
K35 – Kriterium	19.5	30	39	42	-	
ÖKOSTRA	19.1	31.2	41.8	46.3	-	
HAÖ	37.5	72.5	107.4	122.5	-	
h_N Rekord	-	-	-	-	392	
Größter Messwert						50,6

Tab. 4: Kroatisch Minihof / 110627 – Burgenland; Dauerstufe D = 180 Minuten.

Jährlichkeit T	T=2	T=10	T=50	T=100	T → ∞	Reihe
M e t h o d e						1985-1994
K25 – Kriterium	22.5	32	41	44	-	
ÖKOSTRA	23.1	37.2	49.5	54.8	-	
HAÖ	37.6	67.1	96.7	109.4	-	
h_N Rekord	-	-	-	-	678	
Größter Messwert						49,1

3.1 Kritik

Das deterministische Modell (HAÖ- Modell) liefert

(+) flächendeckend Auswertung, unabhängig von Messwerten, und

(–) eine starke Überschätzung im Vergleich zu extremwertstatistischen Messstellen-
auswertungen.

(+) Schadensaufnahmen nach extremen Naturereignissen z.B. Murenabgänge in
unbeobachteten Einzugsgebieten „bestätigen“ die hohen Werte.

(–) Anfangs und Randbedingungen sind regional nicht differenziert.

4. Kombiniertes Ansatz – HAöSTRA

Wie oben bereits beschrieben, zeigt ein Vergleich zwischen HAÖ- und ÖKOSTRA-
Auswertungen an den Messstellen, dass großteils die HAÖ-Modellauswertungen
größere Niederschlagswerte liefern als jene aus dem extremwertstatistischen Modell
(siehe Tab. 2, 3 und 4), das aber nicht gleichmäßig über alle Dauerstufen und Jährlich-
keiten. Für die Praxis bedeutet das, dass große Unterschiede zwischen den

verschiedenen Auswertungsmethoden auftreten und damit Unsicherheiten, welche Auswertung verwendet werden soll. Darüber hinaus stehen regionalisierte extremwertstatistische Messstellenauswertungen für Routineauswertungen beim Hydrographischen Dienst – abgesehen von älteren Auswertungen z.B. nach Kreps und Schimpf (1965) – nicht zur Verfügung.

Um diese Auswertungsdefizite (teilweise) zu beheben, wurde in einem ersten Schritt in einem Projekt im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), das von der Technischen Universität Graz – Prof. Kainz – geleitet wurde (Forschungsbericht BMLFUW 2006), für Siedlungsgebiete mit mehr als 5000 Einwohnern und für Dauerstufen bis 12 Stunden – entsprechend dem Gültigkeitsbereich des HAÖ- Starkniederschlagsmodells – eine Regionalisierung der extremwertstatistischen Messstellenauswertungen und eine Kombination der Ergebnisse des HAÖ-Niederschlagsmodells und von ÖKOSTRA durchgeführt. Die Einschränkung auf die größeren Siedlungsgebiete war auch insofern hilfreich, da sich diese im Allgemeinen weder in großen Höhenlagen befinden, noch sehr weit von Messstellen entfernt liegen und daher angenommen werden konnte, dass eine Interpolation der Niederschlagsauswertungen ohne große Schwierigkeiten durchzuführen wäre.

Für dieses Projekt wurden alle im Jahr 2005 verfügbaren und überprüften digitalen Datensätze mit zeitlich hoch aufgelösten Niederschlagsdaten mit über 10 Jahren Beobachtungsdauer, das waren insgesamt 221 Messstellen, extremwertstatistisch nach ÖKOSTRA ausgewertet.

Da der Datenumfang in den meisten Fällen aus statistischer Sicht sehr gering war (< 20 Jahre), fiel die Wahl auf die Verwendung der partiellen Serie und daher auf die Anpassung der Exponentialverteilung. Das war auch mit dem Vorgehen bei der Bestimmung der Abhängigkeit des Niederschlags von der Jährlichkeit im HAÖ-Modell kompatibel. Dabei wurden entsprechend den ÖKOSTRA- Vorschriften die Werte der partiellen Serie mit einem empirischen Korrekturfaktor erhöht, um die starre Blockung der Grunddatenzeitreihen bei der Erstellung der Serien (teilweise) zu kompensieren. An die Werte der Serien wurde anschließend für jede Dauerstufe zwischen 5 Minuten und 6 Tagen mit Hilfe eines Regressionsansatzes die Exponentialverteilung angepasst und danach ein Dauerstufenausgleich durchgeführt, um ein widerspruchsfreies Ergebnis zu erhalten. Welche Methode für den Dauerstufenausgleich (ATV-A121 oder OWUNDA) letztendlich zum Einsatz kam, wurde durch den kleineren Variationskoeffizienten entschieden.

Die räumliche Interpolation der extremwertstatistisch nach ÖKOSTRA ausgewerteten Niederschlagsdaten erfolgte unter Zuhilfenahme der räumlichen Verteilung der Niederschläge aus dem HAÖ-Modell. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die räumliche Verteilung der HAÖ- Niederschläge jener der ÖKOSTRA- Niederschläge entspricht, und dass eine Maßzahl, die den Zusammenhang zwischen ÖKOSTRA- und HAÖ- Feld an den Messstellen beschreibt, zwischen den Messstellen abstandsgewichtet interpoliert werden kann und somit z.B. keine Abhängigkeiten vom Relief (z.B. Geländehöhe) aufweist. Als Maßzahl bot sich der Quotient zwischen

ÖKOSTRA- und HAÖ-Wert an. Dazu wurden die HAÖ-Gitterpunktwerte auf den Messstellenort interpoliert (invers-quadratisch), der Quotient gebildet und dieser wiederum auf die Gitterpunkte des HAÖ-Gitters (6km mal 6km) interpoliert (invers-quadratisch). Dabei kamen immer nur die drei nächstgelegenen Messstellen zum Einsatz, um nicht zu weit entfernte Messstellen mit einzubeziehen. An jedem Gitterpunkt existierten danach – pro Jährlichkeit und Dauerstufe – zwei Werte, der HAÖ-Wert und zusätzlich der interpolierte Quotient. Mit diesen Daten konnte der interpolierter ÖKOSTRA-Wert für jeden Gitterpunkt rückgerechnet werden.

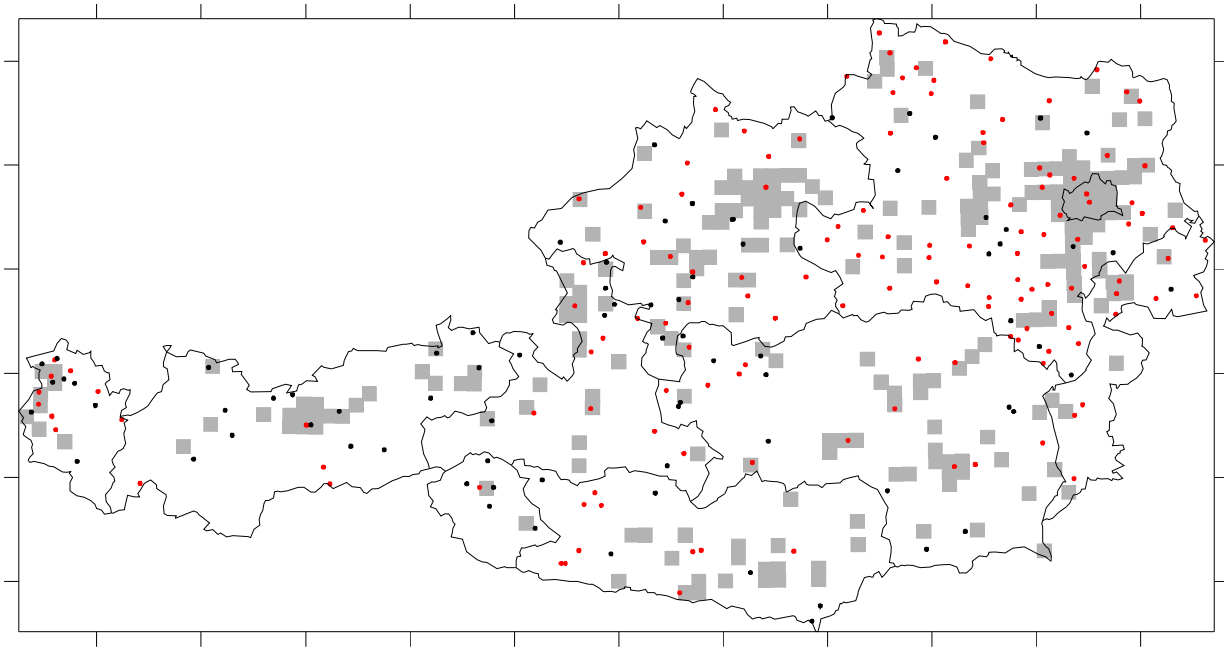


Abb. 3: Siedlungsgebiete mit mehr als 5000 Einwohnern und Messstellen mit Datenlängen von mindestens 20 Jahren (schwarz) und jene mit Datenlängen zwischen 10 und 20 Jahren (rot).

Da die Dichte der Messstellen mit zumindest 20 Jahren an Daten gering war und sich zeigte, dass in einigen der dicht besiedelten Gebiete keine Messstellen vorkamen bzw. die nächsten Messstellen erst relativ weit entfernt lagen, wie das z.B. für den Raum Wien und Graz der Fall war (siehe Abbildung 3), wurden auch Messstellen mit zumindest 10 Jahren an Daten für die Interpolation herangezogen. Da den Auswertungsergebnissen der Messstellen mit kurzen Datenreihen nicht die gleiche statistische Sicherheit wie jenen abgeleitet aus den längeren Reihen zugeordnet werden kann, wurden diese Werte mit einem geringeren Gewicht für die Interpolation nutzbar gemacht. Dies geschah, in dem zwei interpolierte ÖKOSTRA- Felder berechnet wurden, eines erzeugt mit Messstellen, die Daten von mindestens 20 Jahren enthielten, und ein zweites, abgeleitet mit Messstellen mit mindestens 10 Jahren an Daten. Das endgültige Ergebnissfeld der ÖKOSTRA- Regionalisierung ergab sich aus der gitterpunktweisen gewichteten Mittelbildung der beiden ÖKOSTRA- Teilfelder, unterschiedlicher Datenlängen. Dabei wurde dem Feld abgeleitet aus den längeren Datenreihen das Gewicht 0.67 und dem anderen Feld das Gewicht 0.33 zugeordnet.

Testrechnungen ergaben, dass diese Verteilung der Gewichte einen geeigneten Kompromiss zwischen fehlender statistischer Sicherheit und zusätzlichen Informationsgewinn darstellt.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die Auswirkungen der Interpolation der ÖKOSTRA-Messstellenauswertungen ohne und mit Verwendung der HAÖ- Modell- Informationen.

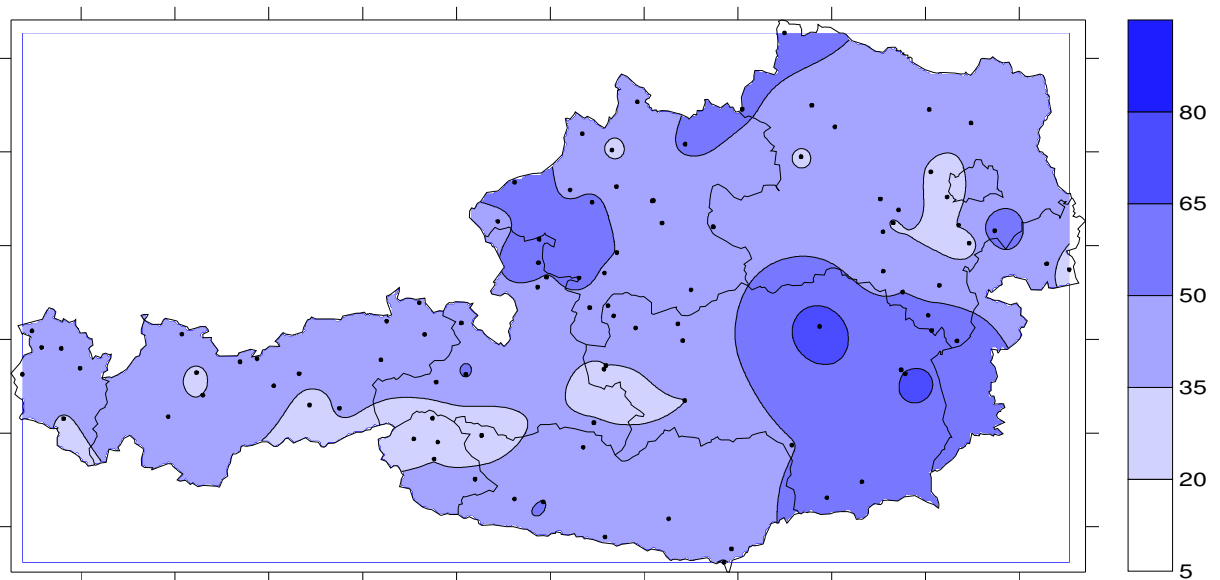


Abb. 4: ÖKOSTRA- Interpolation (Kriging) ohne HAÖ- Modell- Informationen; Dauer: 1 Stunde; Jährlichkeit: 100.

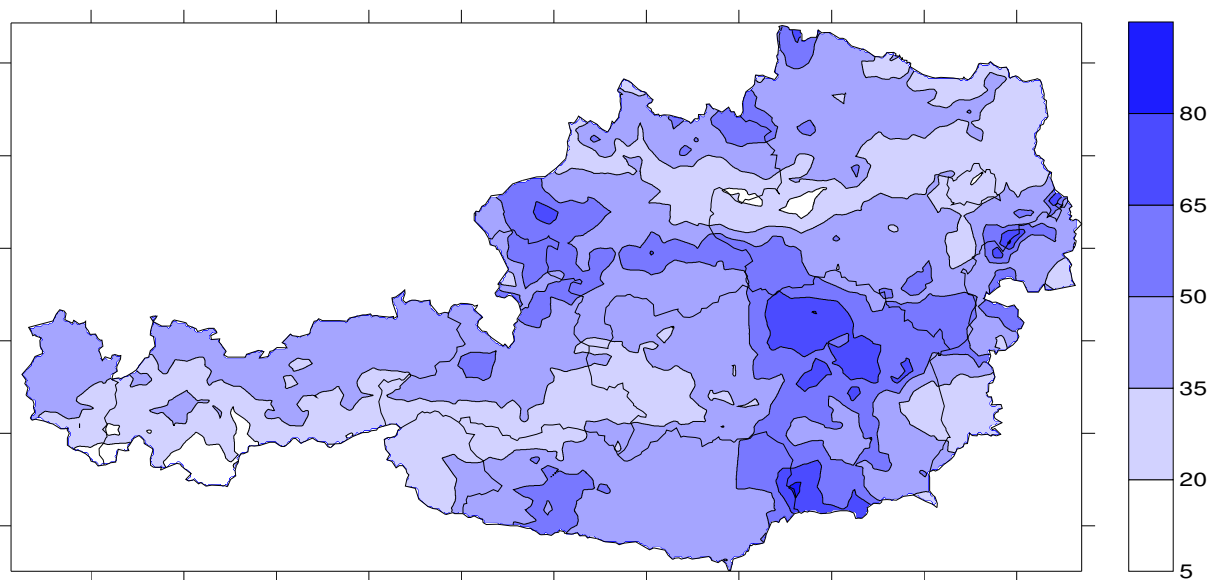


Abb. 5: ÖKOSTRA- Interpolation mit HAÖ- Modell- Informationen; Dauer: 1 Stunde; Jährlichkeit: 100.

Durch diese Interpolation der ÖKOSTRA-Stationsauswertung auf das HAÖ-Gitter sind nun an den Gitterpunkten zwei Niederschlagswerte für jede Dauerstufe und Jährlichkeit vorhanden: Ein Niederschlagswert aus meteorologischen Modellrechnungen mit meteorologisch maximierten Obergrenzen, der HAÖ-Wert ($h_{N \text{ Modell-Maximierung}}$) und der interpolierte ÖKOSTRA-Wert ($h_{N \text{ ÖKOSTRA-Stationsinterpolation}}$). Durch den Interpolationsvorgang bleiben grundsätzlich die Eigenheiten der Messstellenauswertungen erhalten, d.h. dass diese vermutlich zu geringe Niederschlagswerte für eine bestimmte Jährlichkeit im Vergleich zu den „wahren Bemessungswerten“ liefern (siehe Kritik an der ÖKOSTRA-Methode).

Somit steht für die Bestimmung von Bemessungsniederschlägen eine Bandbreite an Ergebnissen zur Verfügung: Es gibt eine Untere Schranke - überwiegend bei statistischer Behandlung unkorrigierter Niederschlagsmessungen, $h_{N \text{ ÖKOSTRA-Stationsinterpolation}}$ - sowie eine Obere Schranke - überwiegend aus meteorologisch maximierten Niederschlags-Modellen, $h_{N \text{ Modell-Maximierung}}$.

Mittels einer begründeten Gewichtung der beiden Datensätze wurde für die dicht besiedelten Gebiete Österreichs zunächst eine Einengung der jeweiligen Bandbreite durchgeführt. Dadurch gelangt man, ausgehend von Messstellenauswertungen gemäß ÖKOSTRA über eine modellunterstützte Gewichtung zum „mutmaßlich wahren Bemessungswerten“ $h_{N\text{-optimiert}}$ (Gleichung 10)

$$h_{N\text{-optimiert}} = A \cdot h_{N \text{ ÖKOSTRA-Stationsinterpolation}} + B \cdot h_{N \text{ Modell-Maximierung}} \quad (10)$$

Für die Gewichte $0 \leq A \leq 1$ und $0 \leq B \leq 1$ gilt: $A + B = 1$. Konkret wurde das Gewicht B (entspricht der Gewichtung des HAÖ- Modellanteiles) – nach Durchrechnung mehrerer Varianten - für die Dauerstufen D auf die Werte der Tabelle 5 gesetzt.

Tab. 5: Gewicht B für den HAÖ- Modellanteil und verschiedenen Dauerstufen.

Dauerstufen	B	Dauerstufen	B
5 Minuten	0.56	90 Minuten	0.40
10 Minuten	0.52	2 Stunden	0.39
15 Minuten	0.50	3 Stunden	0.36
20 Minuten	0.48	4 Stunden	0.35
30 Minuten	0.46	6 Stunden	0.32
45 Minuten	0.44	9 Stunden	0.30
60 Minuten	0.42	12 Stunden	0.29

Auf diese Weise kann man mittels Gleichung (10) eine gewisse Symmetrie im Kontrollband herstellen und trägt der größeren Fehleranfälligkeit bei der Messstellenauswertung bei den kurzen Dauerstufen Rechnung. $h_{N\text{-optimiert}}$ stellt somit einen

Ausgleich zwischen den Ergebnissen der extremwertstatistischen Messstellenauswertung und dem meteorologischen Modellwerten dar, der einem „wahren“, praxis-tauglichen Bemessungswert nahe kommen soll. Die auf diese Weise berechneten Bemessungswerte des Niederschlags wurden ihrerseits nach den Vorgaben von ÖKOSTRA einem statistischen Ausgleich unterzogen (Exponentialverteilung wurde angepasst) und schlussendlich als „Bemessungsniederschläge h [mm] für die Siedlungswasserwirtschaft“ definiert – es zeigt sich, dass durch diesen Glättungsschritt kaum Information verloren geht. Lediglich die Dauerstufe 5 Minuten und/oder die Jährlichkeit 1 Jahr ist davon geringfügig betroffen.

Als Projektergebnis liegen die Bemessungsniederschläge für die Siedlungswasserwirtschaft für die 247 Flächenmittelpunkte in Tabellenform für Dauerstufen von 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90 Minuten, bzw. 2, 3, 4, 6, 9, 12 Stunden und Jährlichkeiten von 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 und 100 Jahre vor. Diese Ergebnistabellen enthalten zusätzlich als Obere Werte die Niederschlags-Maximierung nach dem HAÖ-Modell sowie als Untere Werte die Ergebnisse der ÖKOSTRA-Stationsinterpolation, wodurch die jeweilig mögliche Bandbreite von Bemessungswerten zum Ausdruck kommt. Als weitere Vereinfachung bei der Anwendung werden spezifische Schätzformeln für die Parameter $U(D)$ und $W(D)$ angeführt. $U_{\text{approx}}(D)$ und $W_{\text{approx}}(D)$ dürfen jedoch nur zwischen den Dauerstufen $D = 5$ Minuten und $D = 720$ Minuten verwendet werden.

4.1 Kritik

(+) Regionalisierte ÖKOSTRA-Messstellenauswertung sind für die größeren Siedlungsgebiete verfügbar und zusätzlich noch Bemessungsniederschläge, die einen Ausgleich der unterschiedlichen im Routineeinsatz befindlichen Methoden darstellen.

(-) nur bis 12 Stunden verfügbar und nur für die großen Siedlungsgebiete.

Als Weiterführung dieses Projekts wird derzeit an der Erweiterung für Gesamtösterreich und für Dauerstufenbereiche über 12 Stunden hinaus gearbeitet. Dazu wurden an der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik analoge Modellsimulationen mit der zuletzt verfügbaren Version von ALADIN-Austria (=feinmaschiges meteorologisches Vorhersagemodell) für die Dauerstufen $D \geq 1$ Stunde und Wiederkehrperioden von etwa $10 \leq T \leq 50$ Jahre durchgeführt. Dabei waren wieder die Anfangs- und Randwerte sowie die Parameter einiger Prozessabläufe nach meteorologischen Gesichtspunkten schrittweise zu maximieren (Haiden et al., 2006). Die vorliegenden Modellergebnisse und zusätzlich Informationen über die räumliche Verteilung von Blitzhäufigkeiten werden dazu verwendet, um eine Entsprechung der HAÖ-Modelldaten für längere Dauerstufen (≥ 12 Stunden) zu erstellen. Darüber hinaus werden auch extremwertstatistische Auswertungen von Tagesniederschlagssummen für Dauerstufen von 1 bis 6 Tage herangezogen, um für Dauerstufen ab einem Tag eine starke räumliche Verdichtung der Stützstellen, die zur Interpolation verwendet werden können, zu erreichen. Das Ziel ist, dass an jedem Gitterpunkt Niederschlagswerte die eine vermeintlich „obere“ (HAÖ- bzw. ALADIN-Modell) - und „untere“ (ÖKOSTRA)-Schranke beschreiben, und ein ausgeglichener Wert - HAÖSTRA für Dauerstufen von 5 Minuten bis 6 Tage verfügbar sind.

5. Zusammenfassung

Für operationelle Niederschlagsauswertungen stehen nun beim Hydrographischen Dienst drei Methoden zur Verfügung, mit denen Bemessungsniederschläge abgeleitet werden können. Das sind: Extremwertstatistische Auswertungen nach ÖKOSTRA, Ergebnisse aus deterministischen Niederschlagsmodellrechnungen - HAÖ-Modellniederschläge - und eine Kombination aus beiden Methoden, HAöSTRA.

Bei HAöSTRA wurde - mit neuem umfangreicherem Datenmaterial (in Erweiterung von Kreps und Schimpf - K- Auswertungen (1965)) - eine Regionalisierung der extremwertstatistischen Messstellenauswertungen durchgeführt, wodurch es in naher Zukunft für Gesamtösterreich möglich sein wird, Bemessungsniederschläge, die einen Ausgleich zwischen den Ergebnissen der unterschiedlichen Verfahren darstellen, und eine Art von Kontrollband anzugeben, innerhalb dessen der Erwartungswert der Bemessungswerte zu liegen kommen sollte.

6. Literatur

ATV (1985) Niederschlag- Starkregenauswertung nach Wiederkehr und Dauer, ATV-A121, vormals DVWK 124

BMLFUW (2006) Bemessungsniederschläge in der Siedlungswasserwirtschaft, Forschungsbericht BMLFUW 2006

Haiden T., Pichler R. (1997) IDNDR - Mesoskaliges Kurzfrist-Vorhersagemodell. Projektteil: Analytisch-numerische Simulation extremer Niederschlagsereignisse im mesoskaligen Bereich. Aus: SKODA G. (Ed.): IDNDR-Tätigkeitsberichte zu den Phasen I bis VII (1991 bis 1997), Abschließender Bericht zu Phase VII. IMG der Universität Wien.

Haiden, T., Kann, A., Stadlbacher, C. und C. Wittmann (2006) Niederschlagsmaximierung mit dem ALADIN- Modell. Forschungsbericht BMLFUW.

Hammer N. (1993) „Eine optimierte Starkniederschlagsauswertung III OWUNDA Mitteilungsblatt 69.

HAÖ (2003) Hydrologischer Atlas von Österreich. BMLFUW, Wien. Erste Lieferung 2003, Zweite Lieferung 2005, 3. Lieferung 2007.

Kreps H. und Schimpf H. (1965) Starkregen und Starkregenstatistik. Mit zahlreichen Beilagen und Karten. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich. 42, 1 – 44.

Lorenz P., Skoda G. (2000) „Bemessungsniederschläge kurzer Dauerstufen ($D \leq 12$ Stunden) mit inadäquaten Daten.“ Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich 80.

Lorenz, P. und Skoda G. (2003) Konvektive Starkniederschläge – Niederschlag in 15 Minuten, Karte 2.5; - Niederschlag in 60 Minuten, Karte 2.6; - Niederschlag in 180 Minuten, Karte 2.7. Aus: Erste Lieferung des Hydrologischen Atlas von Österreich, BMLFUW, Wien.

ÖKOSTRA-93 (1992) Österreichische koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und –auswertung. Heft 3 (Ed. G. SKODA): Eine optimierte Starkniederschlagsauswertung. Forschungsbericht, BMLF, Wien.

Schimpf H. (1970) Untersuchungen über das Auftreten beachtlicher Niederschläge in Österreich. Österreichische Wasserwirtschaft 22, 121 – 127.

Schimpf H. (1970) Untersuchungen über das Auftreten beachtlicher Niederschläge in Österreich. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich 61, 12. (Hydrographentagung, 17.-21. Nov. 1969, Wien).

Skoda G. (1993) Eine optimierte Niederschlagsauswertung, I: Erste Erfahrungen mit ÖKOSTRA-93. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich 69, 29-32.

Wiesner C. J. (1970) Hydrometeorology. Chapman and Hall Ltd., London.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Viktor Weilguni
Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
Abteilung VII / 3 – Wasserhaushalt (HZB)
Marxergasse 2, A-1030 Wien
Email: Viktor.Weilguni@bmlfuw.gv.at

EINSATZ VON SIMULATIONSMETHODEN BEI DER BESTIMMUNG EXTREMER ABFLÜSSE

Günter Blöschl

1. Einleitung

Für zahlreiche Aufgaben im Wasserbau und in der Wasserwirtschaft sind Bemessungswerte des Hochwassers erforderlich, die einer bestimmten, geringen Überschreitungswahrscheinlichkeit entsprechen. Dabei wird die Überschreitungswahrscheinlichkeit eines Scheitelabflusses in einem Jahr meist ausgedrückt durch ihren Kehrwert, die Jährlichkeit. Die Schwierigkeit bei der Bestimmung solcher Hochwasserwerte bzw. der damit verbundenen Jährlichkeiten liegt darin, dass sie oft in einer Größenordnung liegen, die weit größer als die größten im Gebiet beobachteten Hochwässer ist. Die Ingenieurhydrologie hat eine Vielzahl von Methoden entwickelt, mit dieser Problematik umzugehen. Jede dieser Methoden hat Vor- und Nachteile. Einen ausführlichen Überblick gibt Gutknecht (2007a); eine kurze Zusammenstellung zeigt Tabelle 1. Die Methode, den Bemessungsabfluss aus dem Bemessungsniederschlag zu berechnen besitzt den Vorteil, viele unterschiedliche Einzeleinflüsse analysieren zu können, um damit eine Grundlage zur Wahl des Bemessungswertes zu erhalten. Allerdings besitzt die Methode viele Freiheitsgrade (d.h. viele Parameter sind zu wählen) und die Jährlichkeit ergibt sich nicht direkt aus dem Verfahren. Die lokale Hochwasserstatistik ist robust, da sie sich vor allem auf die gemessenen Hochwasser-scheitel im Gebiet stützt mit wenigen zusätzlichen Annahmen. Allerdings sind die Messreihen in kleinen Einzugsgebieten meist zu kurz für gültige Aussagen über den Bemessungswert und zudem nicht homogen, d.h. sie besitzen zeitliche Schwankungen in ihren statistischen Eigenschaften. Die Regionale Hochwasserstatistik greift das Problem der kurzen Reihenlänge auf und vergrößert die Stichprobe durch das Einbeziehen von Abflussmessungen in Nachbargebieten. Hier stellt sich allerdings das Problem, dass die geforderte statistische Homogenität in der Region selten zutrifft. Auch lokale hydrologische Informationen sind bei der Regionalen Hochwasserstatistik schwer einbeziehbar. Die Abgeleitete Hochwasserstatistik kombiniert die vorhergehenden Ansätze. Ihre Vorteile bestehen darin, dass ein hohes Maß an Prozessverständnis einfließen kann, dass sich die Jährlichkeit direkt aus dem Verfahren ergibt, und dass die Auswirkung verschiedener Einflussgrößen (wie z.B. anthropogene Beeinflussungen) analysiert werden kann. Allerdings stellt sich – in ähnlicher Weise wie beim Bemessungsniederschlag/Abfluss Ansatz – das Problem der Wahl der Modellparameter und der Extrapolierbarkeit der Annahmen auf extreme Verhältnisse.

Der vorliegende Beitrag widmet sich der Abgeleiteten Hochwasserstatistik unter Verwendung von Simulationsmethoden. Generell werden bei der Simulation Experimente mit einem Modell durchgeführt, um Erkenntnisse über das reale dynamische System zu gewinnen (Gutknecht, 1979; Lamb, 2005). Dementsprechend ist auch im vorliegenden Fall das Schwergewicht auf der Analyse der maßgebenden Prozesse und ihrer Bedeutung für Scheitelabflüsse sowie den damit verbundenen Jährlichkeiten. In

der Synthese der Prozesse lassen sich dann – unter bestimmten Annahmen – Aussagen über die gewünschten Scheitelabflüsse extremer Abflussereignisse und deren Jährlichkeit treffen.

Tab. 1: Methoden zur Bestimmung n-jährlicher Hochwässer.

Methoden	Vorteile	Nachteile
Bemessungsniederschlag → Bemessungsabfluss	Einzeleinflüsse	viele Freiheitsgrade Jährlichkeit?
Lokale Hochwasserstatistik	robust	kurze Reihen Homogenität?
Regionale Hochwasserstatistik	größere Stichprobe	lokale Information? regionale Homogenität?
Abgeleitete Hochwasserstatistik	Einzeleinflüsse	viele Freiheitsgrade

2. Simulationsmethode

2.1 Vorgangsweise

Bei der Abgeleiteten Hochwasserstatistik wird ein stochastisches Niederschlagsmodell mit einem deterministischen Abflussmodell kombiniert, woraus sich synthetische Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven berechnen lassen. Zwei grundsätzliche Zugänge sind möglich. Bei dem ersten werden kontinuierliche Reihen des Niederschlags generiert und mittels eines Niederschlag-Abfluss Modells in kontinuierliche Abflussreihen umgesetzt und daraus die statistischen Eigenschaften der Hochwässer ermittelt (z.B. Ott and Linsley, 1972; Tavakkoli, 1985; Rahman et al. 2002; Sivapalan et al., 2005). Bei dem zweiten werden auf Basis der Theorie abgeleiteter Verteilungsfunktionen die Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Niederschlags direkt in Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Abflusses umgesetzt (Eagleson, 1972; Blöschl and Sivapalan, 1997; Sivapalan et al, 2005). Die erste Methode wird auch als Monte Carlo Simulation bezeichnet, da die Reihen mit Hilfe von Zufallszahlen am Computer generiert werden. Die zweite Methode wird auch als analytische Methode bezeichnet, da die Lösung durch Integration im Wahrscheinlichkeitsraum gefunden wird, ohne Einzelereignisse zu generieren.

In der vorliegenden Arbeit werden die Methoden von Blöschl and Sivapalan (1997) und Sivapalan et al. (2005) verwendet und für die vorliegende Fragestellung adaptiert. Beide Methoden liegen sowohl in einer Monte Carlo Variante als auch in einer analytischen Variante vor. Der Vorteil der Monte Carlo Methode besteht darin, die Komplexität des Modells beliebig erhöhen zu können, etwa um zusätzliche Variablen zu berücksichtigen. Dies ist in der analytischen Methode nur bis zu einem bestimmten

Maß möglich. Demgegenüber stehen die Vorteile der analytischen Methode, auch für sehr große Jährlichkeiten rasch Aussagen zu erhalten, und die einzelnen Einflussgrößen in ihrem Zusammenwirken direkt analysieren zu können. Beide Varianten werden deshalb in dieser Arbeit herangezogen.

2.2 Niederschlagssimulation

Einen Überblick über stochastische Modelle zur Niederschlagssimulation gibt Blöschl (2005b). Grundsätzlich unterscheidet man Punktmodelle, die für einen bestimmten Standort eine zeitliche Abfolge von Niederschlagsintensitäten generieren, und zweidimensionale Modelle, die eine Abfolge von räumlichen Verteilungen von Niederschlagsintensitäten generieren. Die zweidimensionalen Modelle sind sowohl rechen-technisch als auch bei der Parameterbestimmung wesentlich aufwändiger als die Punktmodelle. Für kleine Gebiete sind Punktmodelle ausreichend. Die Parameter des Modells werden an beobachtete Niederschlagszeitreihen mit möglichst guter zeitlicher Auflösung (z.B. 10 Minuten) und möglichst langer Reihenlänge (z.B. mehrere Jahrzehnte) angeeicht.

Die Stellung der stochastische Niederschlagsmodelle innerhalb des Spektrums von Methoden, Bemessungsniederschläge zu bestimmen, zeigt Tabelle 2 für Österreich. Die regionalisierten Regenreihen nach Schimpf (1970) sind zwar in Österreich gut eingeführt, sie sind allerdings vor allem auf Basis von Tagesstationen des Niederschlags entstanden. Bei kurzen Dauerstufen (z.B. einer Stunde) tendieren sie in manchen Regionen dazu, den Niederschlag zu unterschätzen. Die lokale Niederschlagsstatistik wäre aus statistischer Sicht ideal, doch sind die vorhandenen Reihen für die Frage von extremen Abflussereignissen in der Regel viel zu kurz. Meteorologische Modelle besitzen den Vorteil, dass sie auf Basis von physikalischen Beziehungen Szenarien mit unterschiedlichen Bedingungen berechnen können, allerdings ergibt sich aus den Szenarien keine Jährlichkeit. PMP Verfahren bestimmen einen wahrscheinlich größten Niederschlag durch Maximieren des in der Luftsäule über einem Gebiet ausfällbaren Wasserdampfs. Die verfügbare Methodik ist allerdings in klimatischen Verhältnissen entwickelt worden, die mit Österreich nicht vergleichbar sind. Hüllkurven stützen sich auf die Annahme, dass ein in der Region beobachteter Extremniederschlag auch im Gebiet auftreten könnte. Sie sind robust, da datenbasiert, allerdings ist die Jährlichkeit nicht leicht bestimmbar. Stochastische Niederschlagsmodelle erlauben das Generieren langer Niederschlagsreihen zum Zwecke der Abflusssimulation. Sie müssen zwar (an kurzen Messreihen) geeicht werden, doch kann das Modell Ereignisse generieren, die größer als die beobachteten sind. Außerdem erlaubt die Formulierung, die Parameter regional zu übertragen. Ein weiterer Vorteil stochastischer Niederschlagsmodelle besteht darin, unterschiedliche Einflussgrößen des Niederschlagsprozesses untersuchen zu können.

Tab. 2: Methoden zur Bestimmung der Bemessungsniederschläge.

Methode	Vorteile	Nachteile
Regionalisierte Regenreihen	eingeführt	vor allem Tagesstationen
Lokale Niederschlagsstatistik	Jährlichkeit	kurze Reihen
Meteorologisches Modell	Modellphysik	Jährlichkeit?
Probable maximum precipitation (PMP)	Extremereignisse	Methode?
Hüllkurven	Extremwerte	Jährlichkeit?
Stochastisches Niederschlagsmodell	regionalisierbar	Eichung

Im folgenden wird kurz das von Sivapalan et al. (2005) entwickelte Modell vorgestellt. Es ist ein Punktmodell, das eine Abfolge von Niederschlagsereignissen erzeugt mit Niederschlagsdauern und einer Niederschlagspausen, die der Weibullverteilung gehorchen. Für Dauern und Pausen werden jahreszeitliche Schwankungen angesetzt, z.B. eine kürzere Niederschlagsdauer im Sommer. Die mittleren Niederschlagsintensitäten jedes Ereignisses werden gammaverteilt angenommen, wobei die Parameter von der Niederschlagsdauer abhängen und ebenfalls jahreszeitlich schwanken, z.B. mit größten Intensitäten im Sommer. Ein wichtiger Aspekt ist der zeitliche Verlauf des Niederschlags innerhalb des Ereignisses, der im Falle der Monte Carlo Variante durch eine multiplikative Kaskade beschrieben wird, im Falle der analytischen Variante als Funktion des Verhältnisses von Niederschlagsdauer und Gebietsverzögerungszeit parameterisiert wird. Das Niederschlagsmodell besitzt insgesamt 14 Parameter, die an Niederschlagsdaten der Station Frankenfels in Niederösterreich angeeicht wurden.

Ein Beispiel einer generierten Regenreihe (mit der Monte Carlo Variante) zeigt Abbildung 1. Die zeitliche Abfolge lässt sich mit dem Auge nicht von einem beobachteten Regenereignis unterscheiden. In Abbildung 2 werden die statistischen Eigenschaften der Simulationsergebnisse verglichen mit den K45 Regenreihen nach Schimpf (1970). Der Station Frankenfels, an der das Modell geeicht wurde, ist im Hydrographischen Jahrbuch die Klasse K45 zugeordnet. Die Form der Simulationen und der Regenreihen stimmt sehr gut überein, allerdings liegen die Simulationen etwas über den K45 Regenreihen, insbesondere bei der Dauerstufe von einer Stunde und großen Jährlichkeiten. Beispielsweise weisen die K45 Regenreihen bei einer Jährlichkeit von 100 Jahren und einer Dauerstufe von 1 h eine Niederschlagshöhe von 42 mm auf, während der entsprechende Wert der Simulationen 60 mm beträgt. Es ist wahrscheinlich, dass hier die Regenreihen zu tief liegen.

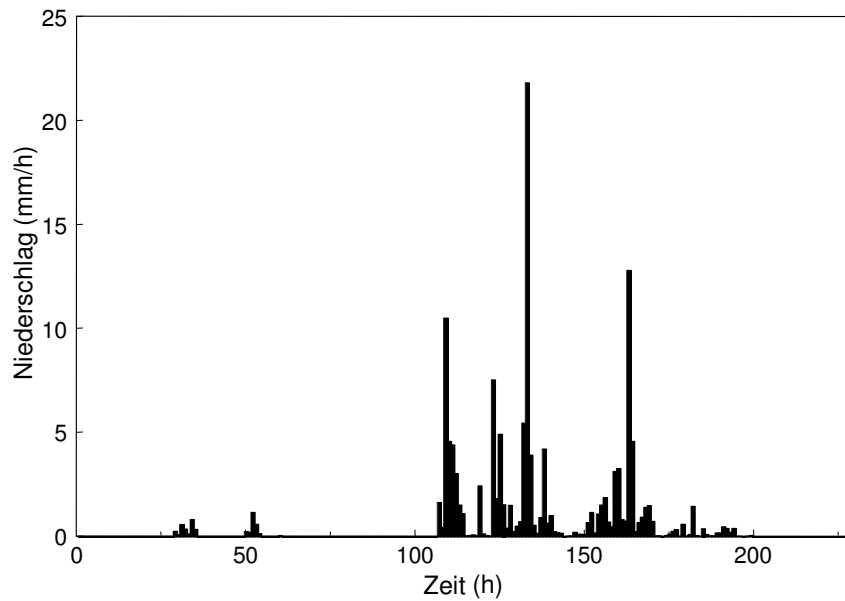


Abb. 1: Typisches simuliertes Niederschlagsereignis (großes Ereignis im Oktober in den nördlichen Kalkvoralpen).

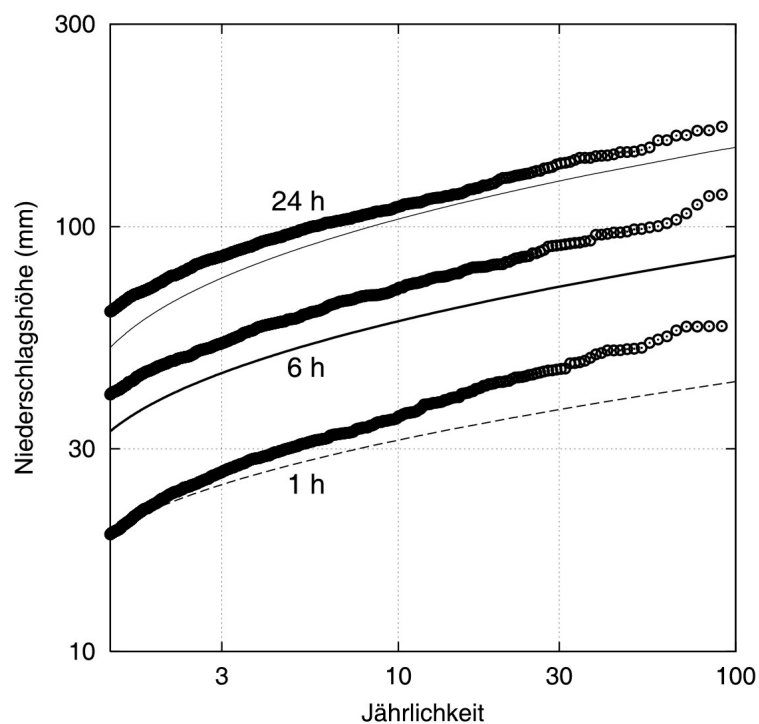


Abb. 2: Vergleich der simulierten Niederschlagshöhen (Punkte) mit den K45 Regenreihen nach Schimpf (1970) (Linien) für Dauerstufen von 1, 6 und 24 Stunden.

2.3 Abflusssimulation

Das Abflussmodell ist ein Ereignismodell, das Basisabfluss, Abflussbildung und Abflusskonzentration berücksichtigt. Die Abflussbildung wurde durch einen Ereignisabflussbeiwert beschrieben, der als Zufallszahl angesehen wurde. Es wurde angenommen, dass er einer Beta-Verteilung folgt (siehe Merz et al., 2006a). Der Mittelwert des Abflussbeiwertes wurde als jahreszeitlich variabel angenommen, z.B.

größter mittlerer Abflussbeiwert im Frühjahr. Die Varianz der Zufallskomponente wurde konstant angesetzt. Die Abflusskonzentration wurde durch einen Linearspeicher mit variabler Verzögerungszeit beschrieben. Die Parameter des Abflussmodells wurden teilweise abgeleitet durch Analyse von beobachteten Abflüssen an mehreren Pegeln Österreichs, teilweise wurden plausible Werte angesetzt, da in Sivapalan et al. (2005) kein konkretes Einzugsgebiet beschrieben werden sollte.

In der Monte Carlo Variante wird unter Verwendung von Zufallszahlen eine Zeitreihe von Abflüssen generiert, deren maximale jährliche Hochwasserscheitel statistisch ausgewertet werden. In der analytischen Variante werden die Wahrscheinlichkeiten integriert getrennt für jeden Monat j ($j=1,12$):

$$F_Y^j(q_p) = \int_0^\infty F_I^j \left\{ \frac{q_p - q_0^j}{r_c^j \chi [1 - \exp(-t_r/t_c)]} \mid t_r \right\} f_{T_r}^j(t_r) dt_r \quad (1)$$

wobei F_Y^j die Verteilung der monatlichen maximalen Scheitelabflüsse, q_p die Scheitelabflüsse ausgedrückt als Spende, F_I^j die Verteilung der Niederschlagsintensität, q_0^j der Basisabfluss, r_c^j der Abflussbeiwert, χ ein Parameter, der den zeitlichen Verlauf des Niederschlags innerhalb des Ereignisses beschreibt, t_r die Niederschlagsdauer, t_c die Verzögerungszeit des Einzugsgebiets, und $f_{T_r}^j$ die Verteilung der Niederschlagsdauer sind. In Gleichung (1) wird nur über die Niederschlagsdauer t_r integriert. Dieser Ansatz wird erweitert und zusätzlich über die Verteilungsfunktion der Abflussbeiwerte und die Verteilungsfunktion der Parameterisierung für den zeitlichen Verlauf der Niederschläge innerhalb des Ereignisses integriert (Sivapalan et al., 2005, Gl. 25). Die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten für das Jahr ergeben sich dann aus dem Produkt der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten für die Einzelmonate unter der Annahme der statistischen Unabhängigkeit der Hochwässer. Die Jährlichkeit T ist somit:

$$T = \{\Pr[Q > q_p]\}^{-1} = \left\{ 1 - \prod_{j=1}^{12} [F_Y^j(q_p)]^{m_j} \right\}^{-1} \quad (2)$$

wobei m_j die Anzahl der Hochwasserscheitel pro Monat sind. In Abbildung 3 werden die beiden Varianten – Monte Carlo und analytisch – verglichen für ein hypothetisches Einzugsgebiet. Für kleine bis mittlere Jährlichkeiten stimmen die beiden Varianten vollständig überein. Dies bedeutet, dass die Integration im Wahrscheinlichkeitsraum korrekt durchgeführt wird. Kleine Unterschiede sind bei großen Jährlichkeiten anzutreffen. Sie sind auf den Näherungsansatz zur Parameterisierung des zeitlichen Verlaufs des Regens innerhalb des Ereignisses in Falle der analytischen Variante zurückzuführen, sowie auf die zufällige Variabilität der Realisationen im Falle der Monte Carlo Variante. Während die analytische Methode modellmäßig die

Grundgesamtheit ergibt, sind das Ergebnis der Monte Carlo Variante einzelne Realisationen, von denen hier eine dargestellt ist.

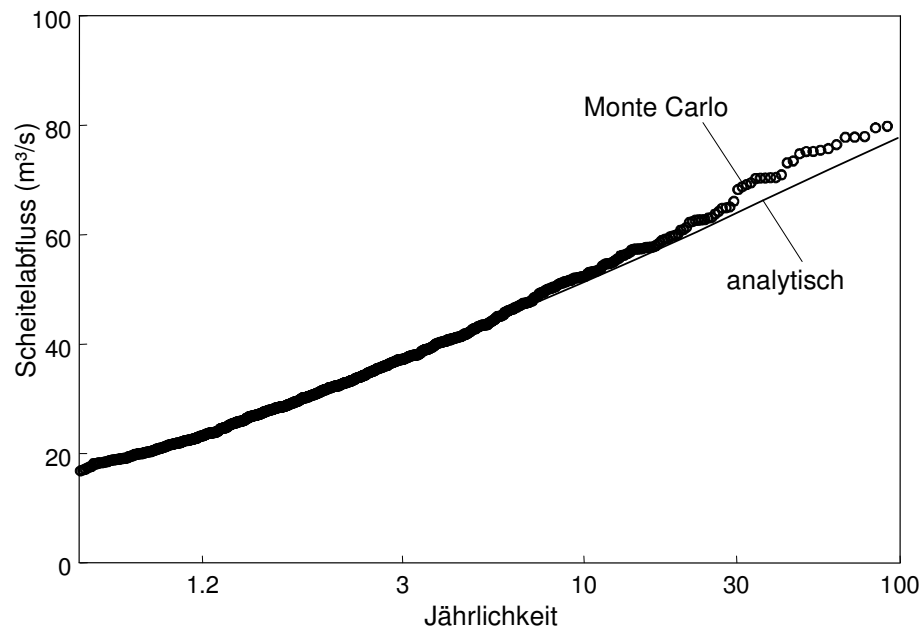


Abb. 3: Vergleich der Monte Carlo Simulationen (Punkte) mit dem analytischen Ansatz der Abgeleiteten Hochwasserstatistik (Linien) für ein hypothetisches Einzugsgebiet in den nördlichen Kalkvorralpen, 36 km² Fläche. Parameter siehe Tabelle 1/9 in Sivapalan et al. (2005).

3. Einflussfaktoren auf die Hochwasserwahrscheinlichkeit

Das vorgestellte Modell wird nun auf ein konkretes Einzugsgebiet angewandt. Das Ziel ist dabei zum einen die Interpretation der beobachteten Hochwasserwahrscheinlichkeiten, zum anderen die Extrapolation auf große Jährlichkeiten. Als Beispiel wird das Einzugsgebiet des Pegels Wienerbruck am Ötscherbach (36 km² Einzugsgebietsfläche) ausgewählt. Für die erste Darstellung (Abbildung 4) wurden die Parameter wie folgt gewählt:

- Abflussbeiwert: Ab einem Ereignisniederschlag von 100 mm steigt der mittlere Abflussbeiwert a_m von 0.1 auf 0.55 an. Um diesen Mittelwert besteht eine zufällige Schwankung.
- Verzögerungszeit t_c : Drei Fälle wurden hier untersucht. In den beiden ersten wurde eine konstante Verzögerungszeit $t_c = 6\text{h}$ bzw. $t_c = 12\text{h}$ angesetzt. Im dritten Fall sinkt ab einem Ereignisniederschlag von 100 mm die Verzögerungszeit t_c von 12h auf 6h.

Die Simulationen wurden für 10.000 Jahre durchgeführt. Der Fall mit variabler Verzögerungszeit (dicke Linie in Abb. 4) zeigt einen Übergang zwischen den beiden anderen Fällen, von langsamer Abflussreaktion bei kleinen Jährlichkeiten zu schneller Abflussreaktion bei großen Jährlichkeiten. Der Knick in der beobachteten (empirischen) Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve (Punkte in Abb. 4) wird durch

den Schwellenwert gut beschrieben. Die Kurve flacht ab einer Jährlichkeit von etwa 10 Jahren etwas ab, da die Reaktionszeit bei größeren Jährlichkeiten nicht in gleichem Maße abnimmt wie bei der Jährlichkeit von etwa 5 Jahren. Abbildung 5 zeigt den Einfluss der Zunahme des Abflussbeiwertes mit dem Niederschlag. Die Parameter wurden wie folgt gewählt:

- Abflussbeiwert: Drei Fälle wurden hier untersucht. In den beiden ersten wurde ein konstanter mittlerer Abflussbeiwert $a_m = 0.1$ bzw. $a_m = 0.55$ angesetzt. Im dritten Fall steigt ab einem Ereignisniederschlag von 100 mm der mittlere Abflussbeiwert a_m von 0.1 auf 0.55 an. Um diesen Mittelwert besteht eine zufällige Schwankung.
- Verzögerungszeit t_c : Ab einem Ereignisniederschlag von 100 mm sinkt die Verzögerungszeit t_c von 12h auf 6h.

Der Fall mit variablem mittleren Abflussbeiwert (dicke Linie in Abb. 5) zeigt einen Übergang zwischen den beiden anderen Fällen, von kleinen mittleren Abflussbeiwerten bei kleinen Jährlichkeiten zu großen mittleren Abflussbeiwerten bei großen Jährlichkeiten. Der Knick in der simulierten Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve ist zwar gleich wie in Abb. 4, da es sich um identische Fälle handelt, die beiden Einhüllenden in Abb. 5 sind jedoch weiter entfernt. Dies weist auf einen in diesem Fall größeren Einfluss des mittleren Abflussbeiwertes hin. Deshalb wurde ein weiterer Satz von Simulationen durchgeführt, bei dem, abweichend von den vorhergehenden Simulationen, die Varianz der Zufallskomponente des Abflussbeiwertes auf Null gesetzt wurde und deshalb nicht der mittlere Abflussbeiwert sondern der Abflussbeiwert selbst gewählt wurde (Abbildung 6):

- Abflussbeiwert: Drei Fälle wurden hier untersucht. In den beiden ersten wurde ein konstanter Abflussbeiwert $a = 0.1$ bzw. $a = 0.55$ angesetzt. Im dritten Fall steigt ab einem Ereignisniederschlag von 100 mm der Abflussbeiwert a von 0.1 auf 0.55 an.
- Verzögerungszeit t_c : Ab einem Ereignisniederschlag von 100 mm sinkt die Verzögerungszeit t_c von 12h auf 6h.

Der Knick ist in diesem Fall (dicke Linie in Abb. 6) viel markanter als in dem Fall, in dem eine zufällige Komponente zugelassen wurde (Abb. 5). Es ist klar, dass Abb. 6 kein wirklichkeitsnahes Beispiel ist, da Abflussbeiwerte immer zufällige Komponenten besitzen. Für Vergleichszwecke ist es jedoch von Interesse. Interessant ist auch, dass bei großen Jährlichkeiten die dicke Linie in Abb. 6 deutlich unter der dicken Linie in Abb. 5 liegt. Dies weist darauf hin, dass die größten simulierten Abflussereignisse in Abb. 5 Abflussbeiwerte aufweisen, die deutlich über 0.55 liegen. In dem konkreten Fall von Wienerbruck ist das auch realistisch, da bereits Abflussbeiwerte größer als 0.8 aus Abflussdaten abgeleitet wurden (z.B. Hochwässer Juli 1970 und August 1991).

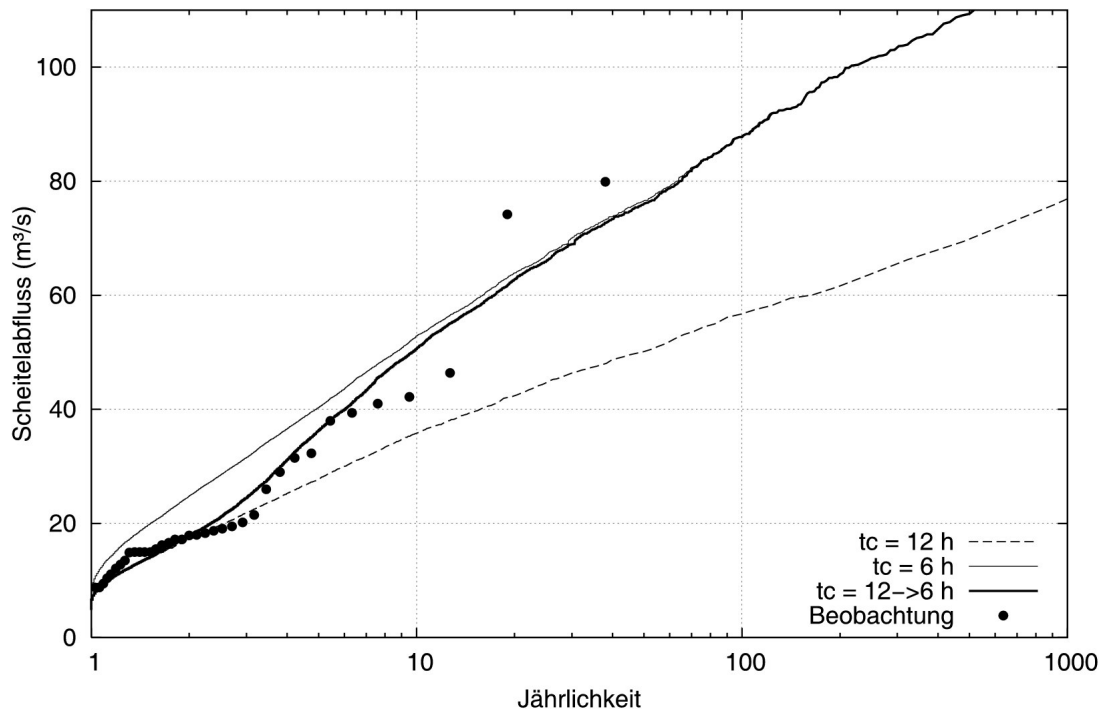


Abb. 4: Abgeleitete Hochwasserstatistik (Linien) und Beobachtungen (Punkte) für den Pegel Wienerbruck am Ötscherbach (36 km²). Dünne Linie: konstante Verzögerungszeit $t_c = 6$ h; strichlierte Linie: $t_c = 12$ h; dicke Linie: Verzögerungszeit t_c sinkt von 12h auf 6h bei zunehmendem Niederschlag ab.

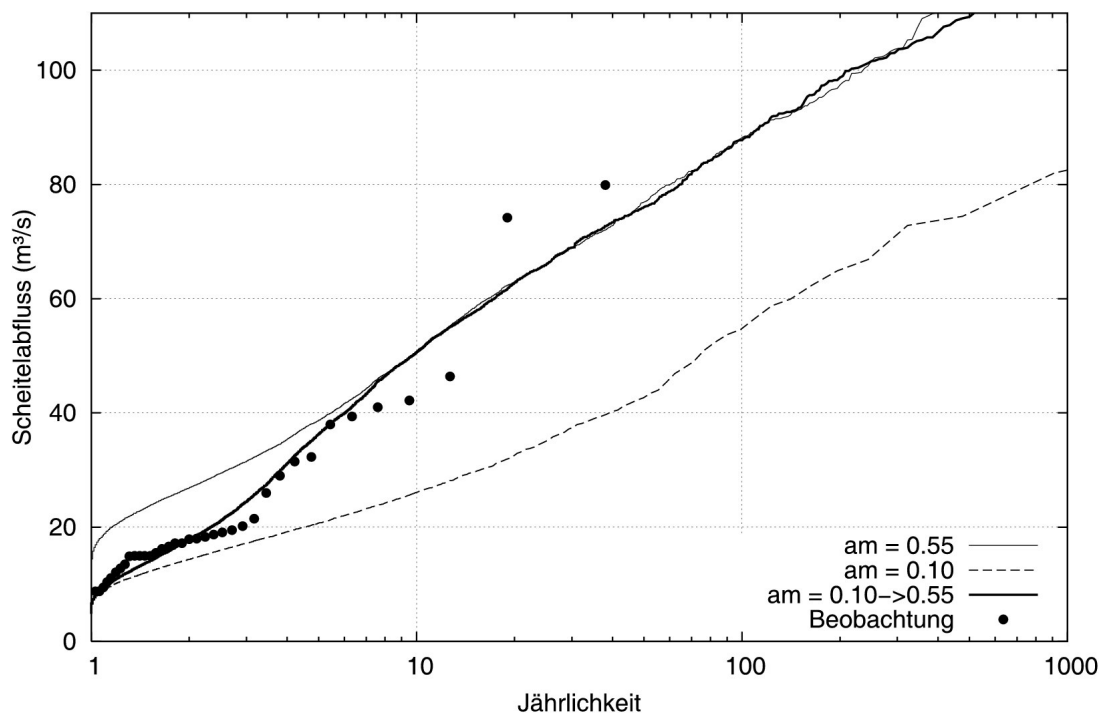


Abb. 5: Abgeleitete Hochwasserstatistik (Linien) und Beobachtungen (Punkte) für den Pegel Wienerbruck am Ötscherbach (36km²). Dünne Linie: konstanter mittlerer Abflussbeiwert $a_m = 0.55$; strichlierte Linie: $a_m = 0.10$; dicke Linie: mittlerer Abflussbeiwert a_m steigt von 0.10 auf 0.55 bei zunehmendem Niederschlag an. Der Abflussbeiwert besitzt eine Zufallskomponente mit einer Varianz von 0.04.

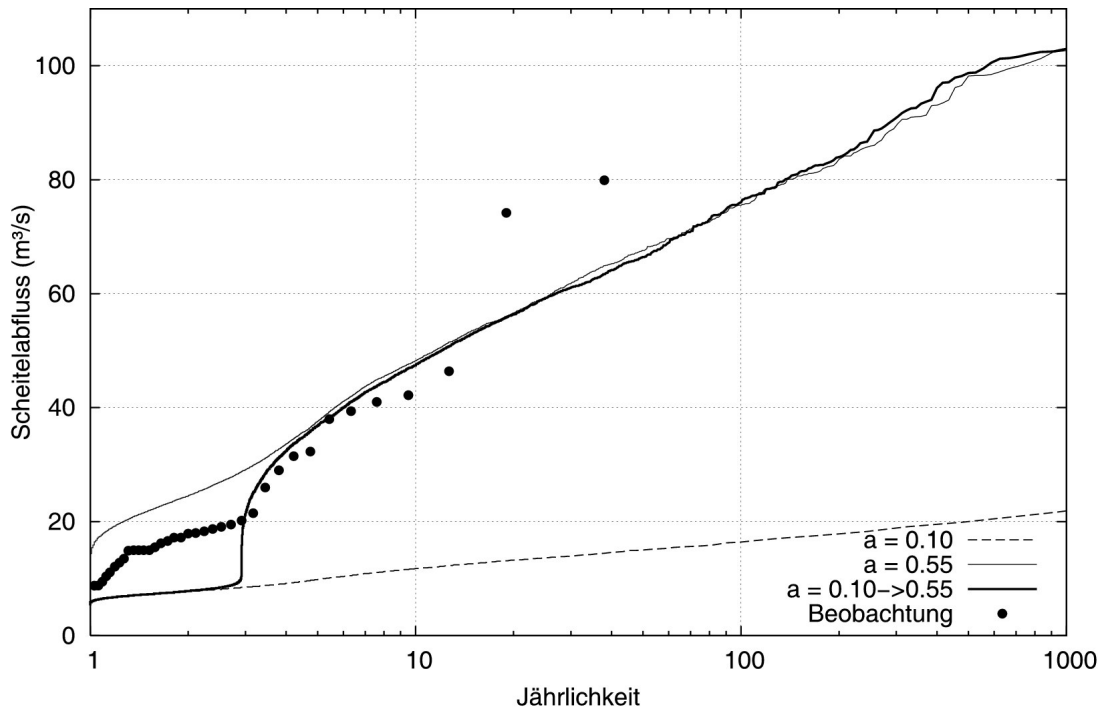


Abb. 6: Wie Abb. 5, jedoch besitzt der Abflussbeiwert keine Zufallskomponente.

In einer weiteren Untersuchung, die Sivapalan et al. (2005) entnommen ist, wurde der Einfluss der Saisonalität analysiert. Der mittlere Abflussbeiwert wurde als konstant angenommen und eine Zufallskomponente berücksichtigt. Die Verzögerungszeit wurde ebenfalls als konstant angenommen. Nun wurde die Zeitverschiebung $\Delta\tau$ zwischen Jahresmaximum des Abflussbeiwertes und Jahresmaximum der mittleren Niederschlagsintensität variiert. Die Zeitverschiebung ist dabei so definiert, dass ein $\Delta\tau = 0$ der Situation entspricht, wenn die größten mittleren Niederschlagsintensitäten und die größten mittleren Abflussbeiwerte im gleichen Monat auftreten. Eine Zeitverschiebung von $\Delta\tau = -3$ Monate bedeutet hingegen, dass beispielsweise die größten mittleren Niederschlagsintensitäten im Sommer und die größten mittleren Abflussbeiwerte im Frühjahr auftreten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt. Da es sich um ein symmetrisches Problem handelt, sind die Kurven für betragsmäßig gleiche Verschiebungen identisch. Die Auswertungen wurden für ein hypothetisches Einzugsgebiet durchgeführt, deshalb sind keine beobachteten Hochwasserabflüsse eingetragen. Zwei interessante Aspekte lassen sich aus Abb. 7 ableiten. Zum einen treten bei einer Zeitverschiebung von $\Delta\tau = 0$ die größten Abflüsse auf. Das ist nicht überraschend, da große Niederschlagsintensitäten auf abflussbereiten Boden fallen. Man kann in dieser Situation von einer Art Resonanz zwischen Niederschlag und Bodenfeuchteverhältnisse sprechen. Der zweite Aspekt ist weniger offensichtlich. Für $\Delta\tau = 6$ müsste man annehmen, dass die Abflüsse kleiner sind als wenn überhaupt keine Saisonalität angesetzt wird (Punkte in Abb. 7). Das ist hingegen nicht der Fall. Es tritt bei $\Delta\tau = 6$ zwar eine Verminderung gegenüber den anderen Fällen mit Saisonalität auf, die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve liegt aber über der ohne Saisonalität, besonders bei großen Jährlichkeiten. Diese Zunahme liegt an dem Wechselspiel zwischen der

Saisonalität im Niederschlag und der Abflussbereitschaft. Für die Interpretation der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve ist dies zweifelsfrei ein wichtiger Aspekt.

Der analytische Ansatz der Abgeleiteten Hochwasserstatistik lässt es auch zu, Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven getrennt für Monate auszuweisen. Ein Beispiel ist in Abb. 8 dargestellt für eine Zeitverschiebung von $\Delta\tau = -3$, d.h., dass die größten mittleren Niederschlagsintensitäten im Sommer und die größten mittleren Abflussbeiwerte im Frühjahr auftreten. Die übliche (jährliche) Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve ist als dicke Linie dargestellt, die monatlichen Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven als dünne Linien. Sie zeigen die Beiträge der Monate zur jährlichen Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve. Mit derartigen Simulationen lassen sich beobachtete Hochwässer ausgezeichnet interpretieren. Das Hochwasser, das etwa im März 2002 an der Salzach in Salzburg aufgetreten ist, war außergewöhnlich als Märzhochwasser. Für den Monate März wurde es als hundertjährliche Ereignisse eingestuft. Wäre der gleiche Scheitelabfluss in einem Monat mit häufigeren Hochwässern aufgetreten (im Sommer) wäre es nur ein zwei bis dreijährliches Ereignis gewesen (Godina et al., 2003). Dieses Verhältnis lässt sich genau in Abbildung 8 für das hypothetische Gebiet ablesen bei einem Scheitelabfluss von $38 \text{ m}^3/\text{s}$ (März Kurve mit Jährlichkeit 100 im Vergleich zu Jahreskurve mit Jährlichkeit 3).

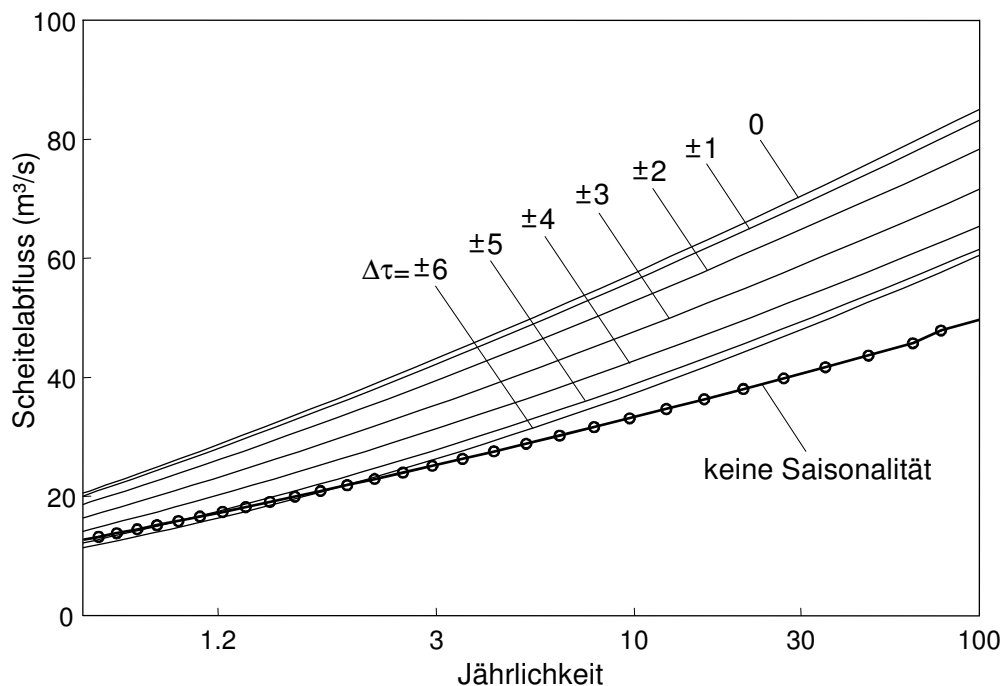


Abb. 7: Einfluss der Saisonalität auf die Hochwasserwahrscheinlichkeit (analytischer Ansatz der Abgeleiteten Hochwasserstatistik) für ein hypothetisches Einzugsgebiet in den nördlichen Kalkvorpalen, 36 km^2 Fläche. Parameter siehe Tabelle 1/10 in Sivapalan et al. (2005). $\Delta\tau$ ist die Zeitverschiebung zwischen Jahresmaximum des Abflussbeiwertes und Jahresmaximum des Niederschlags.

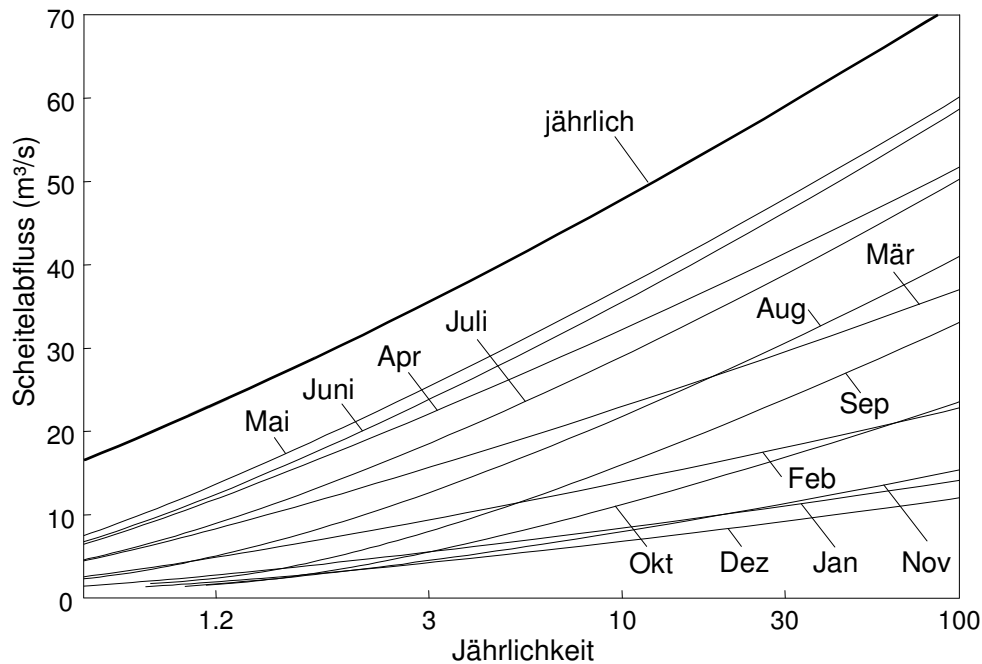


Abb. 8: Hochwasserwahrscheinlichkeiten für unterschiedliche Monate (dünne Linien) und für das gesamte Jahr (dicke Linie) für ein hypothetisches Einzugsgebiet in den nördlichen Kalkvoralpen, 36 km² Fläche. Parameter siehe Tabelle 1/11 in Sivapalan et al. (2005). Die Zeitverschiebung $\Delta\tau$ zwischen Jahresmaximum des Abflussbeiwertes und Jahresmaximum des Niederschlags ist -3 Monate (maximaler Niederschlag im Sommer, maximaler Abflussbeiwert in Frühjahr).

4. Hochwasserwahrscheinlichkeit in unterschiedlichen Klimaregionen

Die Untersuchungen in Abschnitt 4 zielten auf die Interpretation der beobachteten Hochwasserwahrscheinlichkeiten und die Extrapolation auf große Jährlichkeiten in einem bestimmten Gebiet ab. Diese Untersuchungen lassen sich nun auf den regionalen Kontext erweitern. Die Idee ist dabei, die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve für typische Gebiete abzuleiten, die je nach Region unterschiedlich sind. In Österreich weist nicht nur das Niederschlagsregime sondern auch das Einzugsgebietsverhalten enorme regionale Unterschiede auf. Davon ist besonders die Abflussbildung betroffen. Merz et al. (2006b) weisen darauf hin, dass in Österreich die Größe der Abflussbeiwerte vor allem mit der Gebietsbodenfeuchte gekoppelt ist, die wiederum in hohem Maße mit der Wasserbilanz der Gebiete gekoppelt ist. Als Beispiel zeigt Abbildung 9 die Summenhäufigkeitsverteilung der Abflussbeiwerte für zwei Gebiete in Österreich, die hydrologisch sehr verschieden sind. Lunz an der Ois (117 km²) liegt in den nördlichen Kalkalpen. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt mehr als 1600 mm, die mittlere Jahresabflusshöhe ist ca. 1200 mm. Schützen an der Wulka (384 km²) liegt im nördlichen Burgenland. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt kaum 600 mm, die mittlere Jahresabflusshöhe ist ca. 100 mm. Entsprechend den Unterschieden in der Wasserbilanz fallen die Unterschiede in den Ereignisabflussbeiwerten aus. In Lunz betragen die Abflussbeiwerte im Mittel 0,4, bei 20% der Ereignisse sogar 0,8 und mehr. In Schützen hingegen wird nur bei 20% der Ereignisse ein Abflussbeiwert von 0,05 überschritten. Es ist klar, dass derartige Unterschiede in den Abflussbeiwerten massive Auswirkungen auf die Hochwasserwahrscheinlichkeit haben.

Zwei extreme Szenarien wurden hier untersucht. Das erste Szenario (strichlierte Linie in Abbildung 10) steht für eine feuchte Klimaregion wie etwa den Bregenzer Wald oder die Ybbstaler Alpen. Für alle Ereignisniederschläge wurde der Abflussbeiwert auf 0.80 gesetzt mit einer zufälligen Komponente (Varianz von 0.04). Die Überlegung ist, dass bei derartigen Gebieten wegen der großen Regenhäufigkeit Ereignisse immer auf relativ feuchte Gebietseigenschaften treffen, also sind die Ereignisabflussbeiwerte immer hoch. Die Verzögerungszeit wurde auf $t_c = 6\text{h}$ gesetzt. Das zweite Szenario (durchgezogene Linie in Abb. 10) steht für eine trockene Klimaregion wie etwa das Marchfeld oder das nördliche Burgenland. Für kleine bis mittlere Ereignisniederschläge wurde der Abflussbeiwert auf 0.05 gesetzt ohne zufällige Komponente. Die Überlegung ist, dass bei derartigen Gebieten der Vorregen nicht ausreicht, um das Gebiet in einer Weise zu sättigen, die abflussrelevant wird. Ab einem Ereignisniederschlag von 200 mm steigt in diesem Szenario der mittlere Abflussbeiwert $a_m = 0.55$ an mit einer zufälligen Schwankung (Varianz von 0.04). Die Verzögerungszeit wurde auf $t_c = 3\text{h}$ gesetzt. Bei den großen Niederschlägen ist an eine Situation mit ausgiebigen großräumigen Niederschlägen gedacht, in die Gewitterzellen eingebettet sind, die zu sehr raschen Reaktionen des Gebietes führen können. Zur Vergleichbarkeit wurden bei beiden Szenarien die gleichen Niederschlagsparameter wie in den vorhergehenden Beispielen angesetzt und eine Einzugsgebietsfläche von 36 km² gewählt. Abb. 10 zeigt, dass sich die Ereignisabflussbeiwerte direkt in der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve abbilden. Für das Gebiet in der trockenen Klimaregion liegen bei kleinen Jährlichkeiten die Durchflüsse für eine bestimmte Jährlichkeit wesentlich unter denen im Gebiet der nassen Klimaregion. In den hier gewählten Szenarien ist der einer Jährlichkeit von 30 Jahren entsprechende Scheitelabfluss 13 m³/s gegenüber 95 m³/s im Szenario für das feuchte Klimagebiet. Bei großen Jährlichkeiten steigt die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve im feuchten Szenario mit gleicher Neigung weiter an, während im trockenen Szenario ein Knick auftritt mit einem markanten Anstieg der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve. Bei einer Jährlichkeit von 500 Jahren weisen die beiden Szenarien mit den hier gewählten Parametern Durchflüsse der gleichen Größenordnung auf. Die großen Unterschiede bei kleinen Jährlichkeiten sind aus den beobachteten Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven bekannt. Die HORA Auswertungen von etwa 1000 Pegeln in Österreich (Merz et al., 2006c) zeigten Unterschiede von mehr als einer Zehnerpotenz für die unterschiedlichen Klimaregionen. Dabei ist zu beachten, dass hier aus Gründen der Vergleichbarkeit das gleiche Niederschlagsregime für die Szenarien gewählt wurde, während auch dafür beträchtliche regionale Unterschiede auftreten. Den Knick ab einer Jährlichkeit von in diesem Fall 60 Jahren beobachtet man in der Regel nur in der Form von Ausreißern, die meist schwer zu interpretieren sind. In der Zusammenschau mit den Ergebnissen der Simulation hingegen, lassen sich Ausreißer direkt interpretieren als Ausdruck eines geänderten Abflussregimes bei Niederschlägen großer Ergiebigkeit. Der sprunghafte Anstieg der Abflussbeiwerte wurde hier extrem aber plausibel angenommen wie er in kleinen Gebieten auftreten könnte. In großen Gebieten wird der Knick weniger stark ausgeprägt sein, da sich räumliche Unterschiede im Gebiet stärker ausgleichen.

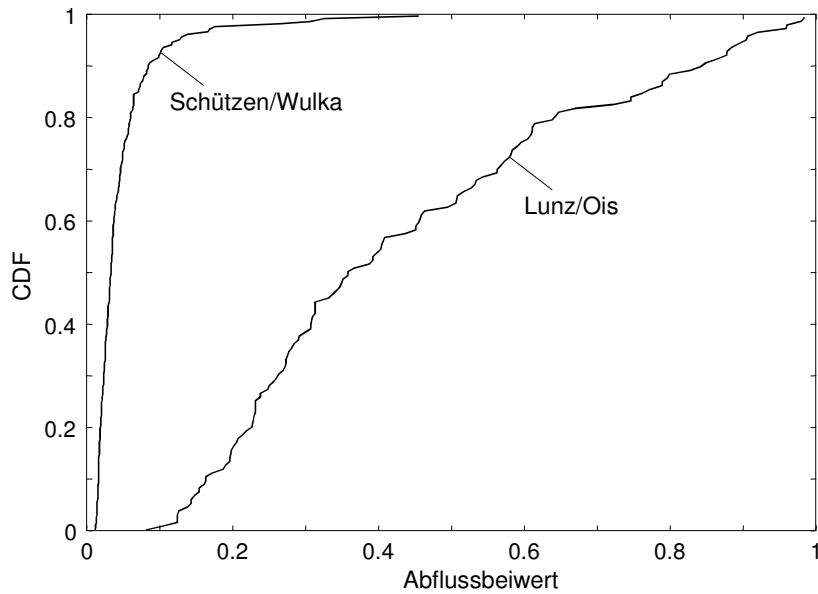


Abb. 9: Summenhäufigkeitsverteilung der aus Abflussmessungen abgeleiteten Abflussbeiwerte für zwei Gebiete in unterschiedlichen Klimaregionen: Lunz / Ois (117 km², ca. 1600 mm Jahresniederschlag); Schützen / Wulka (384 km², ca. 600 mm Jahresniederschlag). Nur Ereignisse mit Niederschlagshöhen größer als 10 mm wurden berücksichtigt. Aus Merz et al. (2006b).

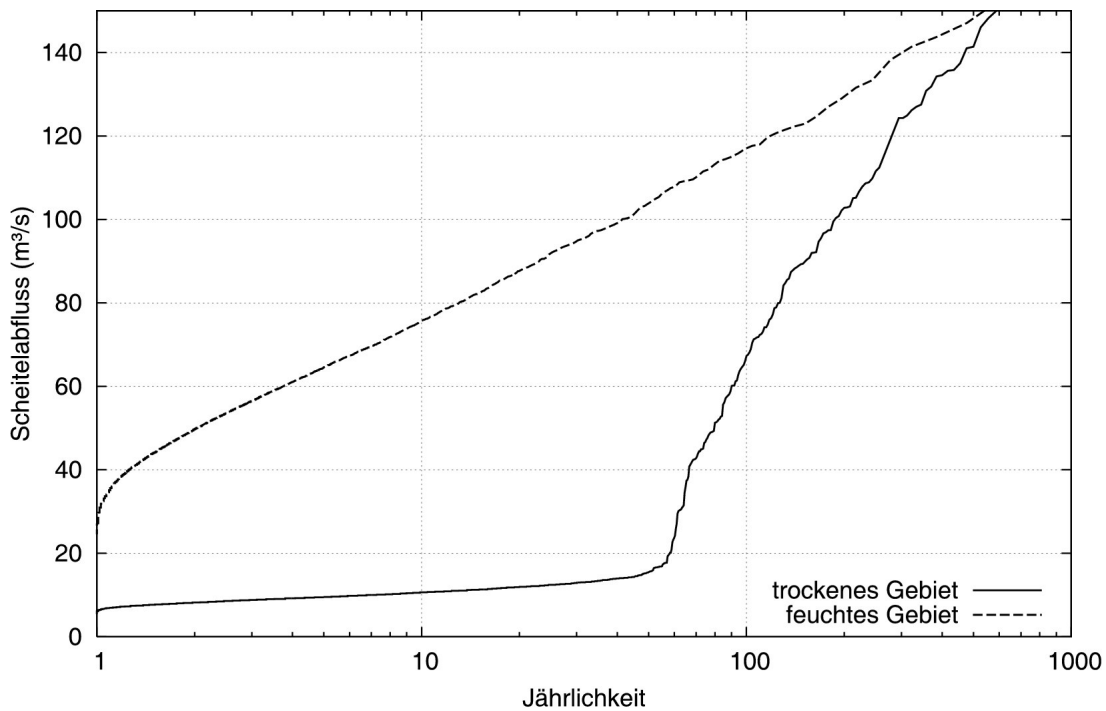


Abb. 10: Vergleich der Hochwasserwahrscheinlichkeiten für zwei hypothetische Gebiete in unterschiedlichen Klimaregionen. Trockene Klimaregion wie etwa das Marchfeld oder das nördliche Burgenland (durchgezogene Linie); feuchte Klimaregion wie etwa der Bregenzer Wald oder die Ybbstaler Alpen (strichlierte Linie). Parameter siehe Text.

5. Die Jährlichkeit des Bemessungsabflusses

Das vorgestellte Simulationsmodell kann auch herangezogen werden, um Aufschlüsse zu erhalten über die Jährlichkeit des Abflusses im Bemessungsfall. Die typische Vorgangsweise bei der Bemessung besteht aus folgenden Schritten (Gutknecht, 2007b).

- Annahme eines Niederschlagsereignisses bestimmter Niederschlagshöhe und Dauer (und damit Jährlichkeit) (Tabelle 2)
- Annahme des dazu passenden zeitlichen Verlaufs des Niederschlags
- Annahme eines Flächenabminderungsfaktors für den Niederschlag
- Bestimmung bzw. Wahl der Parameter eines Niederschlag-Abflussmodells
- Anwendung des Niederschlag-Abflussmodells auf Niederschläge unterschiedlicher Dauer
- Wahl desjenigen Scheitelabflusses als Bemessungswert, der bei Variation der Niederschlagsdauer den Größtwert ergibt.

Insgesamt wird dann in der Regel angenommen, dass die Jährlichkeit des Abflusses der Jährlichkeit des für das Bemessungsereignis gewählten Niederschlags entspricht. Dieser Vorgangsweise liegt die Annahme zugrunde, dass die Parameter des Niederschlag-Abflussmodells in einer Weise gewählt werden, dass sie "jährlichkeitsneutral" sind. Werden hingegen z.B. besonders große Abflussbeiwerte oder besonders kurze Verzögerungszeiten gewählt, ist klar, dass die Jährlichkeit des Abflusses über der des Niederschlags liegen wird. Umgekehrt werden besonders kleine Abflussbeiwerte oder besonders lange Verzögerungszeiten zu einer Jährlichkeit des Abflusses führen, die unter der des Niederschlags liegt. Diese Aspekte können aber bei der üblichen Vorgangsweise der hydrologischen Bemessung nicht quantitativ berücksichtigt werden. Die Quantifizierung ist in der Tat schwierig, da die Jährlichkeiten des Abflusses von sehr vielen Einflussgrößen bestimmt ist, deren Zusammenwirken bei Bemessungsverfahren nicht sichtbar wird. Hier können Simulationsmethoden der Abgeleiteten Hochwasserstatistik einen weitergehenden Einblick liefern. Gleichung (1) kombiniert die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Einflussgrößen und berechnet, unter genau definierten Annahmen, diejenige Jährlichkeit des Abflusses, die der Jährlichkeit des Niederschlags entspricht. Ein Beispiel zur Erläuterung der Wirkungsweise ist in Abbildung 11 gezeigt. Da die vielfältigen Einflussgrößen verschiedene Wirkungen auf die Jährlichkeit haben, wurde hier der einfachste Fall gewählt – Blockregen (d.h. konstante Niederschlagsintensität während eines Ereignisses), Abflussbeiwert konstant, Verzögerungszeit konstant mit $t_c = 16\text{h}$. Damit ist das Abflussmodell linear. Die Jährlichkeit des Niederschlags wurde auf 100 Jahre gesetzt. Die einzige Einflussgröße, die variiert, ist die Niederschlagsdauer. Bei der Bemessung würde man Niederschläge unterschiedlicher Dauer jeweils als Input in das Niederschlag-Abflussmodell heranziehen und jeweils die Scheitelwerte bestimmen. Dies stellt die durchgezogene Linie in Abb. 11 dar. Bei sehr kleiner Regendauer ist der Scheitelabfluss klein, da zwar die Intensität hoch ist, aber nicht das ganze Gebiet zum Abfluss beiträgt. Bei einer Regendauer, die etwa der Verzögerungszeit $t_c = 16\text{h}$ entspricht, tritt der größte

Scheitelabfluss auf. Dies entspricht der Konzeption des Flutplanverfahrens. Bei einer größeren Regendauer nimmt der Scheitelabfluss wieder ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die mittlere Niederschlagsintensität bei größerer Niederschlagsdauer geringer ist als bei kurzer. Die Abgeleitete Hochwasserstatistik kombiniert die unterschiedlichen Dauern entsprechend der Wahrscheinlichkeitsverteilung $f_{T_r}^j$ der Dauer der Niederschlagsereignisse wodurch sich ein Wert von in diesem Fall $37 \text{ m}^3/\text{s}$ ergibt. Dem gegenüber steht das Maximum der Bemessungsvorgangsweise von $48 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Unterschied ergibt sich daraus, dass in der Bemessungsvorgangsweise maximiert wird, während die Abgeleitete Hochwasserstatistik die Wahrscheinlichkeitsbeiträge aller Niederschlagsdauern berücksichtigt. Die letztere Methode ist statistisch gesehen konsistenter.

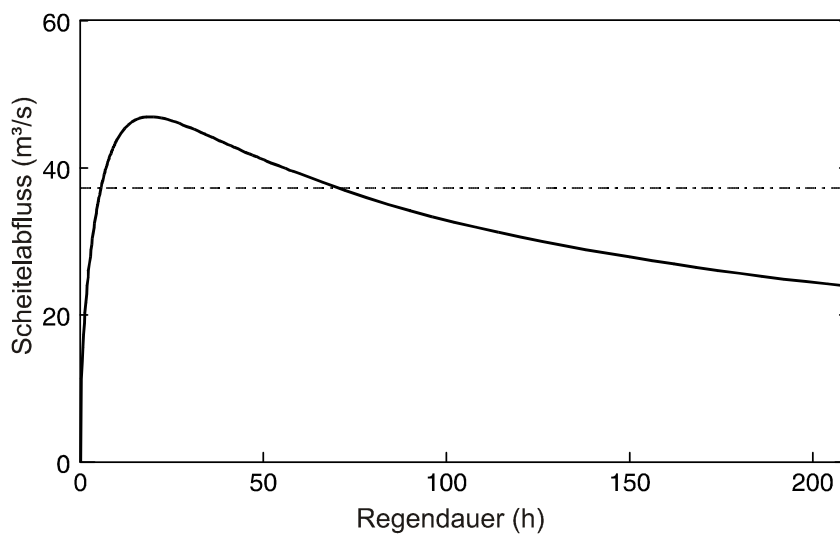


Abb. 11: Scheitelabfluss (dicke Linie) berechnet mit einem Abflussmodell aufgetragen gegen die Regendauer für eine Jährlichkeit des Niederschlags von 100 Jahren bei Blockregen. Verzögerungszeit $t_c = 16\text{h}$, konstanter Abflussbeiwert. Strichpunktierte Linie zeigt den mit dem analytischer Ansatz der Abgeleiteten Hochwasserstatistik berechneten Scheitelabfluss.

Abb. 11 wurde mit der analytischen Variante des Simulationsmodells erstellt. Das Gegenstück mit der Monte Carlo Variante zeigt Abbildung 12. Hier wurde die Jährlichkeit des Scheitelabflusses aufgetragen gegen die Jährlichkeit des auslösenden Niederschlags für Ereignisse unterschiedlicher Dauer bei Blockregen. Jeder Punkt stellt ein Ereignis dar. Die Niederschlagsereignisse unterscheiden sich durch ihre Jährlichkeit sowie durch ihre Dauer. Die Ereignisse in der rechten unteren Ecke der Abbildung sind entweder sehr kurze oder sehr lange Niederschlagsereignisse großer Jährlichkeit, die nur zu kleinen Scheitelabflüssen führen. Die Einhüllende am oberen Rand entspricht dem Maximum in Abb. 11, allerdings ausgedrückt als Jährlichkeit. Die Abbildung zeigt, dass eine Bemessungsvorgangsweise der Auswahl der Niederschlagsdauer, die den größten Scheitelabfluss erzeugt, mit den hier gewählten Parametern die Jährlichkeit um einen Faktor 2 überschätzt. Das bedeutet, dass eine Jährlichkeit von 100 Jahren des Niederschlags bei dieser Vorgangsweise einen Scheitelabfluss ergibt, der einer Jährlichkeit von 200 Jahren entspricht. Die Darstellung zeigt

auch, dass es nicht sinnvoll ist, den Begriff der Jährlichkeit auf Ereignisse anzuwenden. Nur der Scheitelabfluss hat eine Jährlichkeit. Ein Ereignis ist durch zusätzliche Kenngrößen wie Volumen bestimmt und ist deshalb nicht durch den Begriff Jährlichkeit fassbar.

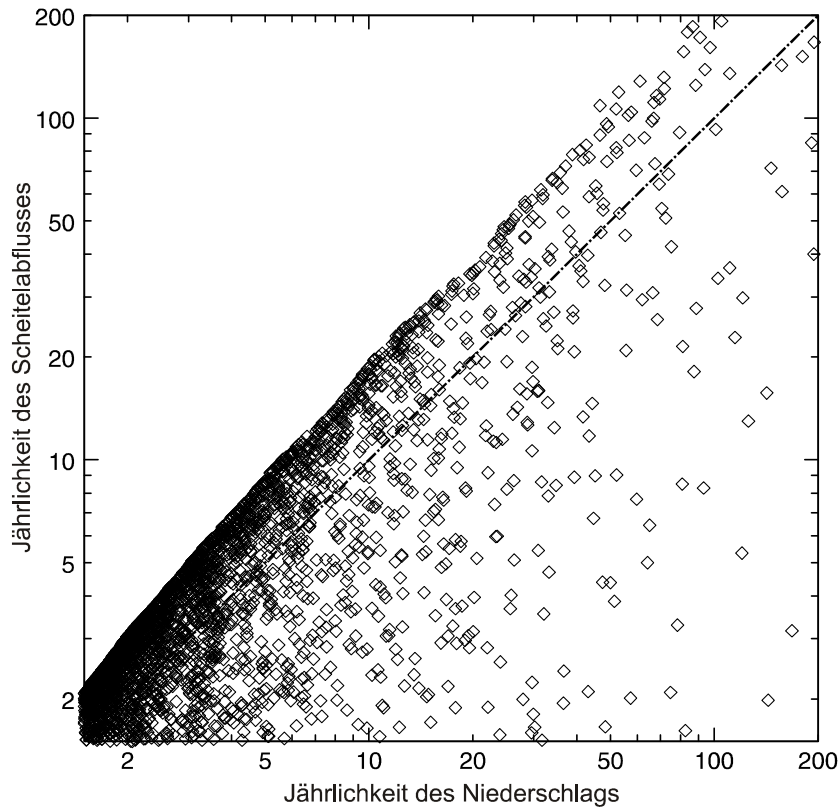


Abb. 12: Jährlichkeit des Scheitelabflusses aufgetragen gegen die Jährlichkeit des Niederschlags für Ereignisse unterschiedlicher Dauer bei Blockregen. Monte Carlo Ansatz, Verzögerungszeit $t_c = 12\text{h}$, konstanter Abflussbeiwert.

6. Zusammenfassende Bewertung

Simulationsmethoden auf Basis der Abgeleiteten Hochwasserstatistik können beitragen zur Interpretation der beobachteten Hochwasserwahrscheinlichkeiten und zur Extrapolation auf große Jährlichkeiten. Der Hauptvorteil besteht darin, dass die Auswirkung verschiedener Einflussgrößen analysiert werden kann. Dies beginnt bei dem stochastischen Niederschlagsmodell, das unterschiedliche Niederschlagsregimes simulieren kann sowie deren Saisonalität. Für das Beispielgebiet konnte der Einfluss der Einzugsgebietskenngrößen Abflussbeiwert und Verzögerungszeit auf die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve aufgezeigt werden, und – für die Bemessungssituation besonders wichtig – der Einfluss der Verschärfung der Abflussbedingungen (größere Abflussbeiwerte, kürzere Verzögerungszeiten) bei zunehmender Jährlichkeit des Niederschlags. Diese Simulationen lassen sich erweitern auf unterschiedliche Klimaregionen. Die beiden gewählten Szenarien, die jeweils für Gebiete in feuchten bzw. trockenen Klimaregionen standen, ergaben massiv unterschiedliche Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven. Insbesondere der Knick bei einer Jährlichkeit von 60 Jahren im

trockenen Gebiet ist für die praktische Anwendung wichtig, sowohl für die Interpretation von Ausreißern als auch für die Extrapolation der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve auf große Jährlichkeiten. Die übliche Annahme einer *glatten* Verteilungsfunktion (z.B. Gumbelverteilung, Allgemeine Extremwertverteilung, Log Pearson III Verteilung) ist bequem, jedoch hydrologisch gesehen offensichtlich nicht immer zutreffend. Die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve in Abb. 10 ist nicht glatt, sondern hat einen Knick wenn das Abflussregime umspringt auf einen anderen Prozess. Solche Schwellenwertprozesse haben auch international zunehmend Beachtung in der Hydrologie gefunden (Blöschl und Zehe, 2005). Es ist klar, dass insbesondere bei Gebieten in trockenen Klimaregionen bei der Extrapolation auf große Jährlichkeiten große Vorsicht geboten ist. Jüngste Beispiele am Kamp im Jahr 2002 und an der March bzw. Thaya im Jahr 2006 belegen diese Ergebnisse.

Simulationsmethoden auf Basis der Abgeleiteten Hochwasserstatistik sind auch besonders gut geeignet zur Analyse der Frage wie sich die Jährlichkeiten des Niederschlags auf die Jährlichkeiten des Abflusses übertragen. Für den einfachen hier gezeigten Fall werden die Jährlichkeiten bei Anwendung der üblichen Bemessungsvorgangsweise um einen Faktor von 2 überschätzt. Das zeigt, dass die Jährlichkeit von Niederschlag und Abfluss nicht gleich ist, selbst wenn das Abflussmodell linear ist und alle Parameter konstant angesetzt werden. Für Abb. 12 wurde nur eine Einflussgröße als Zufallsvariable analysiert, die Niederschlagsdauer. Tatsächlich treten zahlreiche zusätzliche Einflussgrößen auf, wie der Abflussbeiwert, die Verzögerungszeit, der zeitliche Verlauf des Niederschlags innerhalb des Ereignisses sowie die Saisonalität dieser Parameter. In großen Gebieten ist zudem deren räumliche Verteilung und ihr räumliches Zusammenwirken zu berücksichtigen (Gutknecht 1979). Die Vielfalt der Einflussgrößen erschwert allerdings die Zuordnung von Niederschlags- und Abflussjährlichkeiten. Dies bildet ein aktuelles Forschungsthema.

Die Simulationsmethoden auf Basis der Abgeleiteten Hochwasserstatistik erlauben es, die Auswirkung verschiedener Einflussgrößen auf die Hochwasserwahrscheinlichkeit zu analysieren. Dem steht die Schwierigkeit der Parameterwahl gegenüber, besonders die Extrapolierbarkeit der Parameter bzw. der Annahmen auf extreme Verhältnisse. Simulationsmethoden auf Basis der Abgeleiteten Hochwasserstatistik erlauben deswegen kein Vorgehen nach einem Rezept, bei dem die Parameter vorgeben sind und nur die Inputdaten auf den gegenständlichen Fall anzuwenden sind. Die Parameter sind vielmehr im Einzelfall sinnvoll zu wählen und womöglich auf Daten abzustützen. Dennoch lassen sich auch bei knapper Datenlage wichtige Informationen aus der Abgeleiteten Hochwasserstatistik ableiten. Neben der Interpretation der beobachteten Hochwasserwahrscheinlichkeiten und der Extrapolation auf große Jährlichkeiten ist zu erwähnen, dass aus den Simulationen auch die Hochwasserwellen zur Verfügung stehen, die zu einem Scheitelabfluss einer bestimmten Jährlichkeit geführt haben. Für viele Bemessungsfragen der Ingenieurhydrologie ist die Kenntnis der Wellenform zusätzlich zum Scheitelabfluss erforderlich. Diese können aus den Simulationsrechnungen verwendet werden, etwa um die Retentionswirkung eines Stausees oder Rückhaltebecken zu ermitteln. Außerdem sind die Parameter des Niederschlags-

modells regionalisierbar, d.h. übertragbar auf Gebiete in denen keine lange Messreihen zeitlich hochaufgelöster Niederschläge zur Verfügung stehen. Regionalisierungsmethoden geben Godina und Blöschl (2006) an. Ebenso kann man die Parameter des Niederschlag-Abflussmodell regionalisieren (siehe z.B. Blöschl, 2005a), wodurch sich auch Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven für Gebiete ohne Direktmessungen des Abflusses ableiten lassen. Schließlich können Simulationsmethoden auch für andere wasserwirtschaftliche Fragestellungen herangezogen werden, die mit extremen Hochwasserereignissen zusammenhängen, wie etwa Schadenswahrscheinlichkeiten (Apel et al., 2006).

7. Danksagung

Jürgen Komma wird für die Anfertigung der Abbildungen gedankt. Der Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung förderte die Arbeiten (Projekt P18993-N10) finanziell.

8. Literatur

Apel, H., A.H. Thielen, B. Merz and G. Blöschl (2006) A probabilistic modelling system for assessing flood risks. *Natural Hazards*, 38, pp. 79-100.

Blöschl, G. (2005a) Rainfall-runoff modelling of ungauged catchments. Article 133 in: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, M. G. Anderson (Managing Editor), J. Wiley & Sons, Chichester, pp. 2061-2080.

Blöschl, G. (2005b) Statistical upscaling and downscaling in hydrology. Article 9 in: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, M. G. Anderson (Managing Editor), J. Wiley & Sons, Chichester, pp. 135-154.

Blöschl, G. and E. Zehe (2005) On hydrological predictability. Invited commentary. *Hydrological Processes*, 19 (19), pp. 3923-3929.

Blöschl, G. and M. Sivapalan (1997) Process controls on regional flood frequency: Coefficient of variation and basin scale. *Water Resources Research*, 33 (12), 2967-2980.

Eagleson, P. S. (1972) Dynamics of flood frequency. *Water Resources Research*, 8(4), 878-898.

Godina R. und G. Blöschl (2006) Aufgaben und Methoden der hydrologischen Regionalisierung. In: *Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 197. Methoden der hydrologischen Regionalisierung*. Technische Universität Wien, 7-19.

Godina, R., Lalk, P., Lorenz, P., Müller, G. und Weilguni, V. (2003) Die Hochwasserereignisse im Jahr 2002 in Österreich. *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, Nr 82, BMLFUW Wien, pp. 1-39.

Gutknecht, D. (1979) Simulationsverfahren für schutzwasserwirtschaftliche Grundsatzkonzepte. *Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer*, Bd. 30, C/1 - C/44.

Gutknecht, D. (2007a) Bestimmungsmethoden – Überblick. In Gutknecht, D. (Hg.): Extreme Abflussereignisse. Dokumentation – Bedeutung – Bestimmungsmethoden. Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 206. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, 2007, 155-180.

Gutknecht, D. (2007b) Bemessungshochwässer kleiner Auftretenswahrscheinlichkeit - Zur Entwicklung eines Leitfadens zur Ermittlung von Bemessungshochwässern für Talsperren. In Gutknecht, D. (Hg.): Extreme Abflussereignisse. Dokumentation – Bedeutung – Bestimmungsmethoden. Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 206. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, 2007, 85-100.

Lamb, R. (2005) Rainfall-runoff modeling for flood frequency estimation. Article 125 in: Encyclopedia of Hydrological Sciences, M. G. Anderson (Managing Editor), J. Wiley & Sons, Chichester, pp. 1923-1953.

Merz, R., G. Blöschl and J. Parajka (2006a) Spatio-temporal variability of event runoff coefficients. Journal of Hydrology, 331, pp. 591-604

Merz, R., G. Blöschl und J. Parajka, D. (2006b) Raum-zeitliche Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 50 (1), pp. 2-11.

Merz, R., G. Blöschl, M. Hofer und G. Humer (2006c) Hydrologische Regionalisierung im HORA-Projekt (HOchwasserRisikozonierungAustria). In: Disse et al. (eds) Tag der Hydrologie, München, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 15.06, Bd. 2, pp. 279-289.

Ott, R. F. and R. K. Linsley (1972) Streamflow frequency using stochastically generated hourly rainfall, Proc. Int. Symp. On Uncertainties in Hydrologic and Water Resources Systems, Vol. I, 2.8, 1-15.

Rahman, A., P.E. Weinmann, T.M.T. Hoang and E.M. Laurenson (2002) Monte Carlo simulation of flood frequency curves from rainfall. J. Hydrol., 256, 196-210.

Schimpf, H. (1970) Untersuchungen über das Auftreten beachtlicher Niederschläge in Österreich. Österr. Wasserwirtsch., 22, 121-127

Sivapalan, M., G. Blöschl, R. Merz and D. Gutknecht (2005) Linking flood frequency to long-term water balance: incorporating effects of seasonality. Water Resources Research, 41, W06012, doi:10.1029/2004WR003439.

Tavakkoli, D. (1985) Simulation von Hochwasserwellen aus Niederschlägen – Dissertation Technische Universität Wien.

Anschrift des Verfassers:

A.o.Univ.Prof. Dr. Günter Blöschl
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien
Email: bloeschl@hydro.tuwien.ac.at

NIEDERWASSER - BESTIMMUNGSMETHODEN

Gregor Laaha und Günter Blöschl

1. Niederwasserkennwerte

Anders als bei Hochwässern, bei denen meist Abflüsse einer bestimmten Überschreitungswahrscheinlichkeit (Jährlichkeit) von Interesse sind, lassen sich Niederwässer in Abhängigkeit von der untersuchten Fragestellung durch unterschiedlichste Kenngrößen beschreiben (Kresser et al., 1985). Während bei Projekten, die eine Entnahme oder Einleitung in ein Gewässer vorsehen, der niedrigste mittlere Abfluss über eine bestimmte Anzahl von Tagen sowie die Häufigkeit seines Auftretens über die Realisierbarkeit der Anlage als maßgebend angesehen werden, sind Kennwerte der Unterschreitungsdauer ($\max D$, ΣD) u.a. bei Fragen der Wasserqualität oder der Schifffahrt von Bedeutung. Soll ein Abflussausgleich durch Speicherbewirtschaftung erzielt werden, müssen die Abflussdefizite ($\max V$, ΣV) analysiert werden. Eine Zusammenstellung bekannter Methoden findet sich in den DVWK-Regeln 120 und 121.

Über solche spezifische Fragestellungen hinaus sind insbesondere zwei Kenngrößen, das mittlere Jahresniederwasser MJNQ sowie das Abflussquantil Q95, für eine allgemeine Charakterisierung von Niederwässern geeignet (DVWK-Regel 120). Beide Kenngrößen werden meistens auf der Basis von langjährigen Zeitreihen der Abflusstagesmittel (Q_T) berechnet, und charakterisieren den durchschnittlich zu erwartenden Niederwasserabfluss.

Das mittlere Jahresniederwasser MJNQ ist das arithmetische Mittel der Jahresniederwässer (kleinster Abfluss während eines Kalenderjahres) einer zusammenhängenden Reihe von Jahren. Erfolgt die Ermittlung auf Basis der Q_T -Zeitreihe, so wird der Kennwert als mittleres Tagesniederwasser MNQ_T bezeichnet (ÖNORM B 2400). Das MNQ_T ist vielerorts durch anthropogene Maßnahmen wie Wasserentnahmen, Einleitungen, Fischteichbewirtschaftung, Wehrsteuerung bei Laufkraftwerken, etc. beeinflusst. Es ist daher günstig, das mittlere Jahresniederwasser auf der Basis einer geglätteten Q_T -Zeitreihe zu berechnen, und häufig wird hierzu ein gleitender 7-Tages-Mittelwert herangezogen. Das so erhaltene mittlere 7-Tagesniederwasser MNQ_7 ist, aufgrund der meist langen Dauer von Niederwasserereignissen, an unbeeinflussten Stellen sehr ähnlich dem mittleren Tagesniederwasser (MNQ_T), zugleich aber wesentlich robuster gegen kurzzeitige Abflussstörungen.

Eine alternative Gruppe von Kennwerten bilden Abflussquantile, also Abflusswerte der Q_T -Dauerlinie, denen eine bestimmte Überschreitungswahrscheinlichkeit zugeordnet ist. Zur Charakterisierung des Niederwasserabflusses eignen sich Quantile mit einer großen Überschreitungswahrscheinlichkeit. Der in Österreich und auch international am häufigsten verwendete Kennwert Q95 bezeichnet jenen Tagesabfluss, der 95% der Tage des Untersuchungszeitraumes erreicht oder überschritten wurde, und nur an 5% der Tage unterschritten wurde, und eignet sich daher zur Charakterisierung

des in einem durchschnittlichen Jahr zu erwartenden Niederwasserabflusses. Q95 ist robuster gegen kurzzeitige Abflussstörungen (bis zu 5% der kleinsten Q_T können systematisch beeinflusst sein ohne den Wert zu verändern) als das MNQ_7 , und ist daher als Niederwasserkennwert in Österreich besonders geeignet. Die in dieser Arbeit beschriebenen Bestimmungsmethoden beziehen sich daher auf den Kennwert Q95. Wie in Abbildung 1 ersichtlich liefert das Q95 in Österreich sehr ähnliche Werte wie das manchmal alternativ verwendete mittlere 7-Tagesniederwasser MNQ_7 (Laaha et al., 2005b). Die Bestimmungsmethoden sind daher in ähnlicher Weise auch für das MNQ_7 zutreffend.

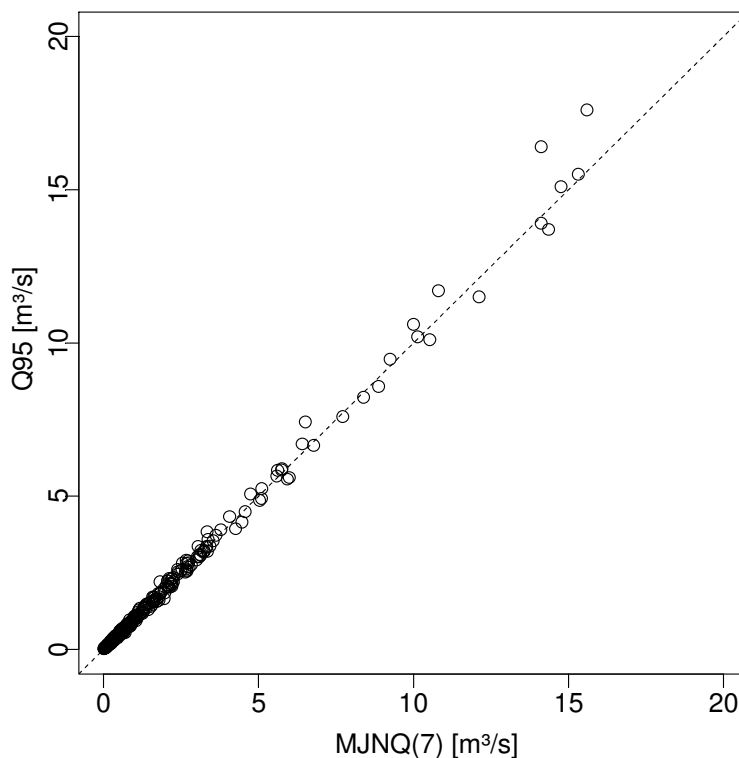


Abb. 1: Beziehung zwischen Q95 und MNQ_7 für 322 Gebiete in Österreich. Werte $> 20 \text{ m}^3/\text{s}$ wurden nicht dargestellt. Aus Laaha et al. (2005b).

2. Bestimmung von Q95 aus Abflussdaten

2.1 Gewässerstellen mit langen Messreihen

Für Gewässerstellen, an denen lange Q_T -Zeitreihen mit guter Qualität vorliegen (z.B. langfristig gemessene Pegel des Hydrographischen Dienstes), erfolgt die Bestimmung von Niederwasserkennwerten am günstigsten aus den Abflussdaten selbst, da hier die Unschärfe in der Regel geringer ist als bei einer alternativen Bestimmung durch Regionalisierung. Für die Aussagekraft der aus Abflussdaten bestimmten Niederwasserkennwerte ist zunächst der Beobachtungszeitraum von entscheidender Bedeutung. Dieser sollte 20 Jahre nicht unterschreiten (DVWK-Richtlinie 120). Bei regionalen Untersuchungen sollte zudem eine einheitliche Bezugsperiode gewählt werden, um die Niederwasserkennwerte mehrerer Messstellen miteinander vergleichbar zu

machen. Ein Verfahren zur Ermittlung von Kennwerten aus Messreihen, deren Reihenlänge kürzerer ist als die Bezugsperiode, ist in Abschnitt 2.2 beschrieben.

Die Güte jeder Auswertung einer Kenngröße ist allerdings auch abhängig von der Zuverlässigkeit der Messwerte. Abflussreihen der Pegelstellen des Hydrographischen Dienstes in Österreich unterliegen einer umfangreichen Qualitätsprüfung (Müller, 2006, S. 59-60.) und weisen eine sehr hohe Güte auf. Besondere Gegebenheiten an der Messstelle, welche die Messwerte beeinflusst haben, wie Verkrautung, Versickerungen, Sohlinstabilität, Vereisung, und andere Beeinflussungen der Niederwasserdaten, sind im Hydrographischen Jahrbuch von Österreich als Kommentar oder Fußnote veröffentlicht. Hieraus kann auf die Güte der Niederwasserdaten geschlossen werden. Die Qualitätsprüfung umfasst auch eine Bilanzierung der Abflüsse für Pegelzweischeneinzugsgebiete, welche insbesondere zur Plausibilisierung der Messwerte im regionalen Kontext herangezogen wird. Für Messstellen, die nicht dem Hydrographischen Dienst zugeordnet sind, ist eine analoge Qualitätsprüfung (Besichtigung der örtlichen Gegebenheiten, Messmethode, Korrektur und Ergänzung fehlerhafter Daten, Plausibilisierung im regionalen Kontext) zu empfehlen. Geeignete Methoden sind in Kresser et al. (1985) beschrieben.

2.2 Gewässerstellen mit kurzen Messreihen

Kennwerte, die aus kurzen Reihen ermittelt wurden, können aufgrund der klimatischen Variabilität der Abflüsse von den Kennwerten langer Zeitreihen abweichen. Sie sollten daher einer Klimakorrektur unterzogen werden, um sie mit den langjährigen mittleren Kennwerten vergleichbar zu machen. Verschiedene Verfahren zur Klimakorrektur wurden in Laaha und Blöschl (2005) verglichen. Die Verfahren zur Klimakorrektur bestehen aus zwei Schritten, Wahl des Referenzpegels (d.h. räumlich nahe liegender Pegel mit längerer Abflussbeobachtung) und Kennwertkorrektur mit Hilfe der Daten des Referenzpegels. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Verfahren, welches einen stromabwärts liegenden Referenzpegel am selben Gewässer heranzieht (Unterliegerpegel-Methode) die genauesten Werte liefert. Die Kennwertkorrektur der Q95 erfolgt durch den Proportionalansatz (z.B. Kroiß et al., 1996):

$$QS_{pred} = QS_0 \left(\frac{QD}{QD_0} \right) \quad (1)$$

In dieser Gleichung bezeichnet QS_{pred} den korrigierten Kennwert Q95 am Zielpegel (d.h., am Pegel mit kurzer Abflussbeobachtung), QS_0 den unkorrigierten Kennwert Q95 am Zielpegel für die Periode der Kurzzeitmessung, QD_0 den Kennwert Q95 am Referenzpegel für die Periode der Kurzzeitmessung, und QD den Kennwert Q95 am Referenzpegel für die Gesamtperiode. Abbildung 2 zeigt die Genauigkeit verschiedener Klimakorrekturmethode in Abhängigkeit von der Reihenlänge im Vergleich zu einer Standardperiode von 20 Jahren. Beträgt die Reihenlänge 5 Jahre, ist der Standardfehler $RMSE=0.08 \text{ m}^3/\text{s}$. Das sind 10% der mittleren Q95. Werden nur Einzelmessungen herangezogen ('E' in Abbildung 2), beträgt der Fehler $RMSE = 0.18 \text{ m}^3/\text{s}$. Im Vergleich dazu ist der Fehler bei Regionalisierungsmethoden

(im Mittel) $RMSE = 0.16 \text{ m}^3/\text{s}$ (siehe Abschnitt 3.2.4). Kennwerte, die aus Messreihen von 5 Jahren abgeleitet werden, sind somit genauer als mittels Regionalisierung ermittelte Kennwerte, während Kennwerte aus Einzelmessungen bei Niederwasser- verhältnissen eine etwas geringere Genauigkeit aufweisen.

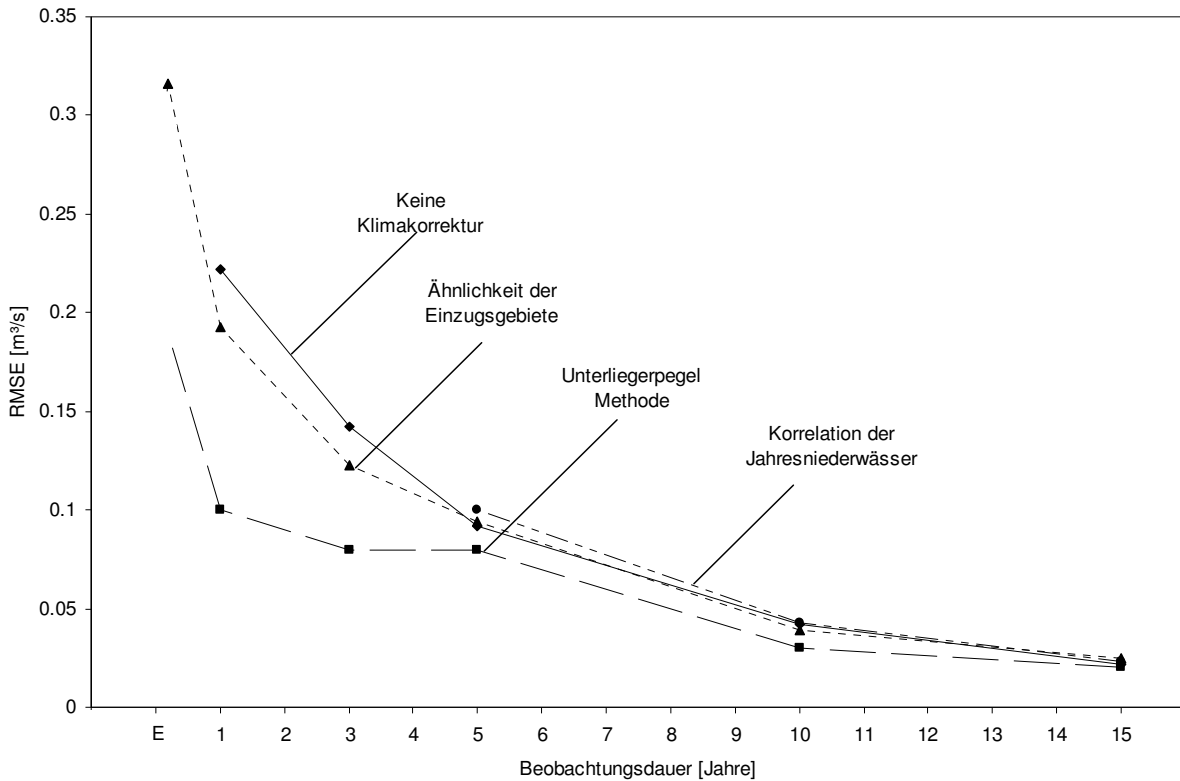


Abb. 2: Absoluter Fehler $RMSE$ (m^3/s) des Niederwasserabflusses $Q_{95_{\text{pred}}}$ kurzer Reihen (<20 Jahre) im Vergleich zum Niederwasserabflusses der 20 Jahre Periode in Österreich. Die Linien entsprechen drei Verfahren mit unterschiedlichem Referenzpegel (Unterliegerpegel am selben Gewässer, Ähnlichkeit der Einzugsgebiete, Korrelation der Jahresniederwässer), und der Ermittlung ohne Klimakorrektur. Aus Laaha und Blöschl (2005).

2.3 Anthropogen beeinflusste Gewässerstellen

Niederwasserabflüsse können kurzfristig durch Einzelmaßnahmen oder längerfristig durch Veränderungen im Einzugsgebiet beeinflusst sein. Kurzfristige Einflüsse mit einer Dauer von wenigen Stunden bis zu einem Tag, wie z.B. Abflussschwankungen durch Wehrsteuerung, Tagesspeicherkraftwerke, Fischteichbewirtschaftung, kurzfristige Wasserentnahme- oder Einleitung, führen vielerorts zu einer Beeinflussung der Abflusstagesmittelwerte und somit der kleinsten Jahresniederwässer. Diese Effekte sind durch Wahl eines geeigneten Niederwasserkenwertes beherrschbar (siehe Abschnitt 1).

Langfristige Einflüsse, wie Speicherkraftwerke (Wochen- bis Jahresspeicher), permanente Aus-, Ein- und Überleitungen (Ausleitungskraftwerke, Wasserversorgung, Abwassereinleitungen), oder anthropogene Veränderungen des Einzugsgebietes, führen hingegen zu einer künstlichen Veränderung des Niederwasserabflussregimes. Wenn die Veränderung stark ist, ist eine direkte Berechnung des Niederwasser-

kennwertes aus den Daten nicht zielführend. Informationen über eventuelle Beeinflussungen eines Gewässerabschnitts können wiederum anhand der Kommentare, Fußnoten und dem Verzeichnis "Durch Zuleitungen, Ableitungen und Speicherungen in Österreich beeinflusste Messstellen" des Hydrographischen Jahrbuchs abgeleitet werden (BMFLUW, 2007).

Bei Vorliegen langfristiger anthropogener Einflüsse im Einzugsgebiet stehen für die Bestimmung des unbeeinflussten Niederwasserkennwertes zwei Verfahren zur Verfügung. Beim ersten Verfahren erfolgt die Bestimmung des Kennwertes aus einer naturalisierten Abflussreihe. Das Verfahren eignet sich primär für durch Zu- oder Ableitungen beeinflusste Gebiete. Die naturalisierte Abflussreihe wird durch Abflussbilanzierung im Einzugsgebiet gewonnen und setzt daher die Kenntnis von Abflusszeitreihen der Zu- und Ableitungen voraus.

Beim zweiten Verfahren erfolgt die Bestimmung des natürlichen Niederwasserkennwertes durch Regionalisierung (Abschnitt 3). Dieses Verfahren eignet sich auch für Gebiete, in denen die Beeinflussung nicht genau quantifiziert werden kann, wie z.B. Speichereinflüsse, Änderung relevanter Einzugsgebietskenngrößen infolge anthropogener Eingriffe. Die Genauigkeit der so ermittelten Kennwerte ist jedoch im Allgemeinen geringer als der mittels Bilanzierung ermittelten Kennwerte.

3. Bestimmung von Q95 an Stellen ohne Abflussdaten (Regionalisierung)

3.1 Grundsätze der Regionalisierung

Für Stellen ohne Abflussdaten können Niederwasserkennwerte durch regionale Übertragung aus benachbarten Gebieten mit ähnlichem hydrologischem Verhalten abgeleitet werden. Hierzu sind in erster Linie statistische Regionalisierungsverfahren geeignet, insbesondere Kriging und multiple Regression.

Bei Kriging erfolgt die regionale Übertragung aufgrund der räumlichen Korrelation der Messwerte. Ordinary-Kriging ist für Abflüsse an Gewässerstellen nicht geeignet, da in diesem Verfahren die Gewässertopologie bei der Berechnung der räumlichen Korrelation nicht berücksichtigt wird. Top-Kriging, ein spezielles Kriging Verfahren das die Gewässertopologie berücksichtigt, ist derzeit in Entwicklung (Skøien et al., 2006). Erste Ergebnisse einer Niederwasserschätzung für Österreich (Laaha et al., 2007) zeigen, dass das Top-Kriging Verfahren für größere Flüsse bei hoher Pegelnetzichte besonders gut geeignet ist, für alpine Standorte (ungemessene Gebiete oder Teileinzugsgebiete des nächstliegenden Pegels) jedoch infolge der Extrapolation der Pegelmessungen auf höher gelegene Gebiete weniger gut geeignet ist.

Bei der Multiplen Regression erfolgt die regionale Übertragung auf der Basis eines linearen Zusammenhangs der Form:

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_m x_m + \varepsilon \quad (2)$$

mit y = Niederwasserkennwert, x_i = Einzugsgebietskenngrößen, b_i = Regressionskoeffizienten, a = Regressionskonstante, ε = Zufallsfehler (Residuum). Dieses

Verfahren ist international weit verbreitet und viele Studien belegen die Eignung des Verfahrens für die Bestimmung von Niederwasserkennwerten an Stellen ohne Abflussdaten (siehe Laaha und Blöschl, 2006c).

Die multiple Regressionsanalyse ist an verschiedene Voraussetzungen gebunden (z.B. Draper und Smith, 1998), die im Wesentlichen durch eine statistische Analyse der Residuen ε überprüft werden können. Residuen sind dabei definiert als Abweichungen zwischen den beobachteten und den mit Hilfe des Regressionsmodells berechneten Werten der Zielgröße. Bei dem klassischen linearen Regressionsmodell gelten folgende Voraussetzungen:

- a) die Residuen sind nicht korreliert (Unabhängigkeit)
- b) die Varianz der Residuen ist konstant (Homoskedastizität)
- c) die Residuen sind normalverteilt (falls Signifikanztest der Regressionskoeffizienten erfolgen soll)

Bei der Anwendung der Multiplen Regression auf Niederwasserkennwerte treten eine Reihe typischer Probleme auf, die spezielle Ansätze erfordern. Lösungsansätze für typische Probleme bei Niederwassermodellen gibt Tabelle 1., ein Beispiel zur Anwendung der Multiplen Regression auf Österreich ist in Abschnitt 3.2 beschrieben.

Tab. 1: Multiple Regression – Probleme und Lösungsansätze für Niederwassermodelle

Problem	Auswirkung	Lösungsansatz
Niederwasserabflüsse sind räumlich korreliert (insbesondere geschachtelte Einzugsgebiete)	Korrelierte Pegel erhalten zu hohes Gewicht bei der Ermittlung der Regressionskoeffizienten	<ul style="list-style-type: none"> • Disaggregation ineinanderliegender Gebiete in Pegelzwischenzugsgebiete • Gewichtete Regression
Heterogenität des Modellgebietes (verschiedene Prozesse wie Sommer- und Winterniederwässer)	Ein Modell für verschiedene Prozesse, hydrologisch nicht sinnvoll und wenig aussagekräftig	<ul style="list-style-type: none"> • Gruppierung in homogene Regionen • Unterteilung in Sommer- und Winterkennwert
Überdominanter Einfluss der Gebietskenngröße	Numerische Probleme bei der Ermittlung der Regressionskoeffizienten	Transformation der Niederwasserabflüsse in Abflussspenden, z.B. $q_{95} = (Q_{95}) / (EG\text{-Fläche})$
Kollinearität (Interkorrelationen) der Einzugsgebietskenngrößen	Überanpassung des Modells an die Stichprobe (künstlich erhöhtes Bestimmtheitsmaß R^2 , aber schlechtere Prognosegüte)	Schrittweise Regression
Ausreißer und Hebelpunkte	Hebelpunkte ziehen Regressionsgerade an, Modell an Pulk der Daten schlechter angepasst.	Erkennung von Hebelpunkten anhand Cook'scher Distanz (Weisberg, 1985), Modellanpassung ohne Hebelpunkte, aber Berechnung der Modellgüte inkl. Hebelpunkte

3.2 Regionalisierung von Q95 in Österreich

3.2.1 Vorgangsweise

Einige Länder verfügen bereits über ein nationales Verfahren für die konsistente Bestimmung von Niederwasserkennwerten an Stellen mit und ohne Abflussbeobachtung. Obwohl in den meisten Ländern in der Regionalisierung ein Regressionsansatz Verwendung findet, gibt es große Unterschiede in den übrigen Aspekten des Bestimmungsverfahrens. Einige Verfahren bestehen aus Karten, von denen der Niederwasserkennwert eines Ortes abgelesen werden kann. Solche Verfahren sind einfach und eindeutig, und erfordern keinerlei subjektive Einschätzung der lokalen Situation durch den Bearbeiter. Andere Verfahren bestehen aus empfohlenen Methoden und Formeln ohne Bereitstellung der nötigen Daten. Solche Verfahren ermöglichen eine sehr flexible Einbeziehung lokaler Daten, erfordern aber für gewöhnlich einen beträchtliches Maß an Experteneinschätzung.

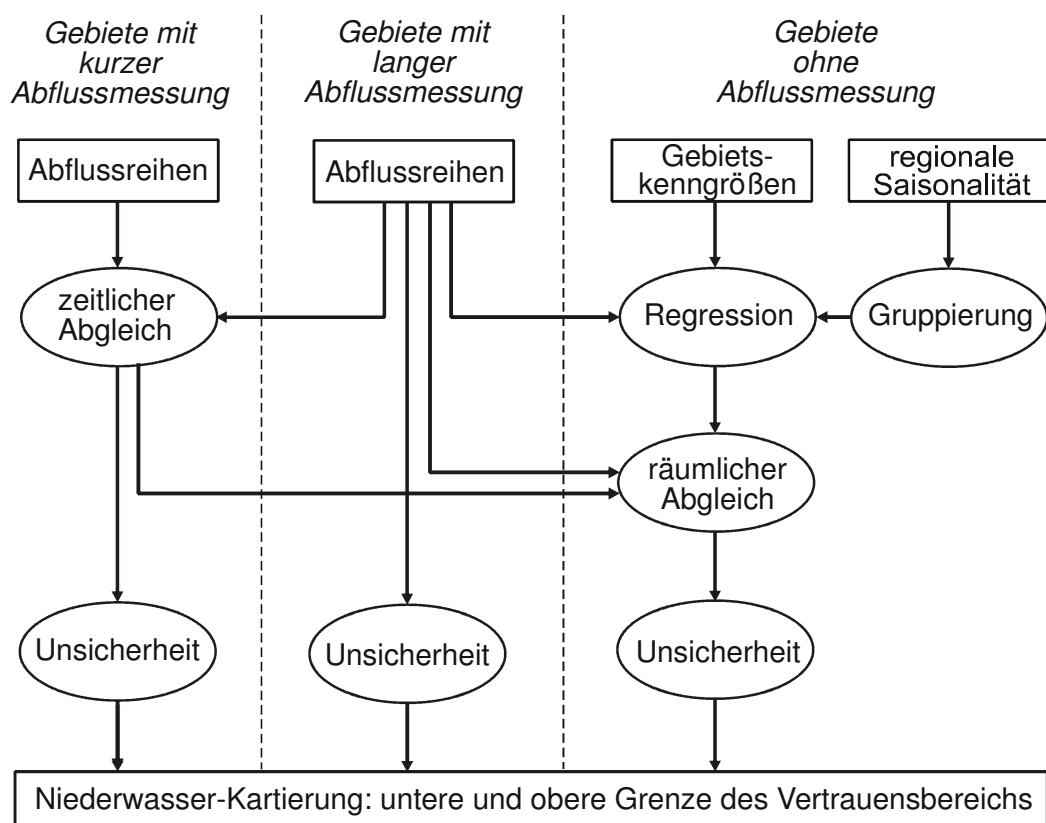


Abb. 3: Niederschätzung in Österreich: eine Kombination von Methoden für Gebiete mit kurzen Abflussreihen, langen Abflussreihen und ohne Abflussreihen, d.h. unbeobachtete Gebiete. Nach Laaha und Blöschl (2006c).

Für Österreich haben wir ein Verfahren zur Bestimmung des Vertrauensbereichs des Niederwasserkennwertes Q95 entwickelt, das zur Erstellung einer Niederwasserkarte geeignet ist. Hierdurch wird die Unschärfe des Verfahrens bei der Bestimmung des Niederwasserkennwertes explizit berücksichtigt. Der Vertrauensbereich kann als Richtwert für die Niederschätzung eines Standortes herangezogen werden. Durch

Einbeziehung lokaler Informationen und Expertenwissen ist eine genauere Einschätzung innerhalb des Vertrauensbereichs möglich. Darüber hinaus ist das Bestimmungsverfahren eine Zusammenstellung von je nach lokaler Datenlage bestmöglich bestimmten Niederwasserkennwerten, und vereint somit Kennwerte für Pegelstellen mit langen und kurzen Abflussreihen, sowie Stellen ohne Abflussmessung. Die Strategie des Regionalisierungsverfahrens ist in Abbildung 3 dargestellt.

3.2.2 Datengrundlage

Die Datengrundlage für das Regionalisierungsmodell bilden Zeitreihen der Abflusstagesmittel aller Pegel des Hydrographischen Dienstes, die innerhalb des Bezugszeitraumes von 1977 bis 1996 mindestens 5 Jahre durchgehend gemessen wurden, und deren Einzugs- bzw. Zwischeneinzugsgebiete ein weitgehend natürliches Niederwasserregime aufweisen. Für die Regionalisierung wurden 31 Einzugsgebietskenngrößen verwendet. Diese beziehen sich auf Fläche, topographische Höhe und Neigung, langjährigen mittleren Jahresniederschlag, Geologie, Bodennutzung und Gewässernetzdichte, und wurden durch Verschneidung der Grenzpolygone der Einzugs- bzw. Zwischeneinzugsgebiete mit digitalen Karten ermittelt (Laaha und Blöschl, 2006b).

3.2.3 Messwerte der Niederwasserspense q_{95}

Zusätzlich zu 322 Pegeln mit langen Messreihen (Abschnitt 2.1), die im Kartenblatt 5.5 dargestellt sind (Laaha et al., 2005b), wurden Pegel mit kurzen Messreihen einbezogen, wobei für diese Reihen die Q_{95} Werte mittels Klimakorrektur (Abschnitt 2.2) mit den Kennwerten der Bezugsperiode vergleichbar gemacht wurden. Die Ermittlung der Niederwasserspense q_{95} erfolgte in zwei Schritten. Im ersten Schritt wurden die Niederwasserabflüsse ineinander liegender Einzugsgebiete in Niederwasserabflüsse der Pegelzwischen-einzugsgebiete disaggregiert. Hierdurch wird die räumliche Korrelation der Niederwasserabflüsse reduziert, und die Information von Pegelzwischen-einzugsgebieten erschlossen. Im zweiten Schritt wurden alle Q_{95} Niedrigwasserkennwerte durch Division durch die (Zwischen-)einzugsgebietsfläche standardisiert, und die resultierende Niedrigwasserspense q_{95} ($\text{ls}^{-1}\text{km}^{-2}$) wurde in allen weiteren Analysen verwendet. Hierdurch wird der dominante Einfluss der Einzugsgebietsgröße auf den Niedrigwasserabfluss weitgehend eliminiert, welcher zu numerischen Problemen bei der Anpassung des Regressionsmodells führen kann.

3.2.4 Regionalisierungsverfahren

Zur Übertragung der q_{95} Werte von den Pegel-einzugsgebieten auf Gebiete ohne Abflussmessungen wurde das Regressionsmodell aus Laaha & Blöschl (2006a) verwendet, das für acht Regionen in Österreich unterschiedliche Regressionsgleichungen ansetzt. Die Bestimmung der Regionen erfolgte auf Basis der Niederswassersaisonalität (Sommer- und Winterniedrigwasserprozesse), da diese einen guten Indikator für Abflussprozesse darstellt (Laaha und Blöschl, 2003). Aufgrund der Kollinearität der 31 Einzugsgebietskenngrößen wurden die Regressionsgleichungen mittels schrittweiser Regression angepasst. Ausreißer (einzelne Punkte, die von der

Regressionsbeziehung stark abweichen) stellen bei der Modellanpassung ein großes Problem dar. Denn diese können als "Hebelpunkte" wirken, welche die Regressionsgerade überproportional anziehen, die Größe der Residuen für den Hauptteil ("Pulk") der Daten erhöhen, und somit insgesamt zu einer schlechten Modellanpassung führen. Hebelpunkte wurden anhand eines erhöhten Wertes der Cook'schen Distanz (Weisberg, 1985) ausgewiesen und bei der Modellanpassung ausgeklammert, bei Berechnung der Modellgüte aber miteinbezogen. Die resultierenden Gleichungen sind Beziehungen zwischen der Niederwasserspense q_{95} und den Gebietskenngrößen Jahres- und Winterniederschlagssumme, Seehöhe, Hangneigung, Gebietsanteil bestimmter geologischer Einheiten und Landnutzungsklassen, und Gewässernetzdichte.

Das regionale Regressionsmodell wurde, Laaha und Blöschl (2006c) folgend, zur Berechnung der natürlichen Niederwasserspense q_{95} von ca. 7000 Flussgebieten (Einzugs- bzw. Zwischeneinzugsgebiete des Gewässernetzes) angewendet. Zur Verringerung des Regionalisierungsfehlers wurden die Spenden an die lokalen Pegelmessungen angepasst, sofern diese vorhanden waren. Dabei wurden die Spenden der Teilgebiete mit einem Skalierungsfaktor multipliziert, der dem Verhältnis aus beobachteter Spende und dem Mittelwert der regionalisierten Niederwasserspense im jeweiligen Pegelgebiet entspricht. Der Abgleich erfolgte für Pegelinzugsgebiete mit 5 bis 20 Jahren Abflussbeobachtungen, im Fall kurzer Reihen (< 20 Jahre) wurden die q_{95} Werte der Klimakorrektur unterzogen. Laaha und Blöschl (2006c) enthält genauere Angaben zum Verfahren.

3.2.5 Ermittlung des Vertrauensbereichs

Die Unschärfe des Regionalisierungsverfahrens wurde abgeschätzt, indem der Vertrauensbereich

$$VB = q_{95}'_i \pm e \quad (3)$$

der regionalisierten Niederwasserspense ermittelt wurde, wobei $q_{95}'_i$ der Erwartungswert der regionalisierten Niederwasserspense und e dessen Fehlerstandardabweichung ($l s^{-1} km^{-2}$) ist. Unter Annahme normalverteilter Fehler liegt die tatsächliche Niederwasserspense mit einer Wahrscheinlichkeit von 68% innerhalb dieses Vertrauensbereichs (Laaha und Blöschl, 2007b).

Die Ermittlung des Vorhersagefehlers e erfolgte analog zu den in Laaha und Blöschl (2007) beschriebenen Ansätzen für Regressionsschätzungen mit und ohne Abgleich an Pegelraten. Für Gebiete ohne Abgleich an Pegelraten entspricht e dem Vorhersagestandardfehler des regionalen Regressionsmodells (e_1).

Für Gebiete mit Abgleich an Pegelraten wurde die Fehlerstandardabweichung e näherungsweise abgeschätzt als das gewogene Mittel aus Regressionsfehler e_1 und dem Fehler e_2 der lokalen Niederwasserspense des Abgleichsgebietes.

$$e = \alpha \cdot e_1 + (1 - \alpha) \cdot e_2 \quad (4)$$

Der Gewichtungsfaktor α wurde mit 0.5 angesetzt. Der Fehler e_2 der Niederwasserspense des Abgleichsgebiets wurde mittels Fehlerfortpflanzungsgesetz aus den Fehlerstandardabweichungen des Niederwasserabflusses Q95 in den Pegeln an Gebietsauslass e_g und -einlass e_h ($\text{ls}^{-1}\text{km}^{-2}$) berechnet.

$$e_2 = \sqrt{e_g^2 + \sum_h e_h^2} \quad (5)$$

Für Pegel mit 20 Jahren Beobachtungsdauer entsprechen e_g und e_h dem Messfehler $e_{g,m}$ und $e_{h,m}$. Für Pegel mit kürzerer Beobachtungsdauer wurde zusätzlich zum Messfehler ein Klimafehler $e_{g,s}$ bzw. $e_{h,s}$ berücksichtigt, der die Abweichung des Kennwertes kurzer Reihen vom langjährigen mittleren Kennwert beschreibt. Der Fehler e_g berechnet sich in diesem Fall zu:

$$e_g = \sqrt{e_{g,m}^2 + e_{g,s}^2} \quad (6)$$

Die Berechnung von e_h erfolgte analog. Der Messfehler wurde in Anlehnung an Laaha (2000) auf 3% des Abflusses Q95 gesetzt. Der Klimafehler $e_{g,s}$ bzw. $e_{h,s}$ wurde, Laaha und Blöschl (2005) folgend, in Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer auf Werte zwischen 4% und 15% gesetzt.

4. Österreichische Niederwasserkarte

Für die Anwendung des in Abschnitt 3.2 beschriebenen Regionalisierungsverfahren zur Bestimmung des Niederwasserkennwertes für Stellen ohne Abflussdaten müssten die im Regressionsmodell verwendeten Einzugsgebietskenngrößen in jedem Einzelfall ermittelt werden. Auch der lokale Abgleich des regionalisierten Niederwasserkennwertes an den Pegeldata und die Ermittlung des Vertrauensbereiches für jeden Einzelfall würde einen erheblichen Aufwand bei der Anwendung bedeuten. Um die praktische Anwendung zu vereinfachen, wurde das Regionalisierungsverfahren flächendeckend für ganz Österreich ausgewertet und im Hydrologischen Atlas Österreichs, Kartenblatt 5.8 "Niederwasserspense" veröffentlicht (Laaha und Blöschl, 2007a). Das Kartenblatt besteht aus vier Teilkarten, die unterschiedliche Aspekte der Niederwasserspense zeigen. Karte 1 und Karte 2 (Abbildung 4) zeigen untere und obere Grenze des Vertrauensbereichs der regionalisierten Niederwasserspense q95 ($\text{ls}^{-1}\text{km}^{-2}$).

Die gemeinsame Tendenz der in Karte 1 und 2 dargestellten Spendenmuster spiegelt die räumliche Verteilung der Niederwasserspense q95 in Österreich wider. Insgesamt entspricht das Muster dem Jahresniederschlag. Geringe Niederwasserspense (< $1 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$) treten im Flach- und Hügelland im Nordosten und Osten auf. Die maßgeblichen Prozesse sind das Auslaufen des Bodenspeichers und das Absinken des Grundwasserspiegels infolge des sommerlichen Niederschlagsdefizits. Auch hochalpine Gebiete weisen sehr geringe Niederwasserspense (< $1 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$) auf, deren Ursache jedoch in Gefrierprozessen begründet ist. Einzugsgebiete der Alpen mit Ausnahme der hochalpinen Stufe weisen hingegen deutlich höhere Niederwasserspense auf. Das Spendenmuster korreliert mit der mittleren Seehöhe der Einzugs-

gebiete, wobei hohe Lagen deutlich geringere Spenden aufweisen als tiefe Lagen. Die Geologie ist ein weiterer maßgeblicher Faktor. Kristalline Einzugsgebiete zeigen eine homogenere räumliche Verteilung der Niederwasserspenden und geringere Werte ($4-8 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$) als Einzugsgebiete der Kalkalpen, welche ein ausgeprägt heterogenes Muster und hohe Niederwasserspenden (bis $> 10 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$) aufweisen (Abb. 4).

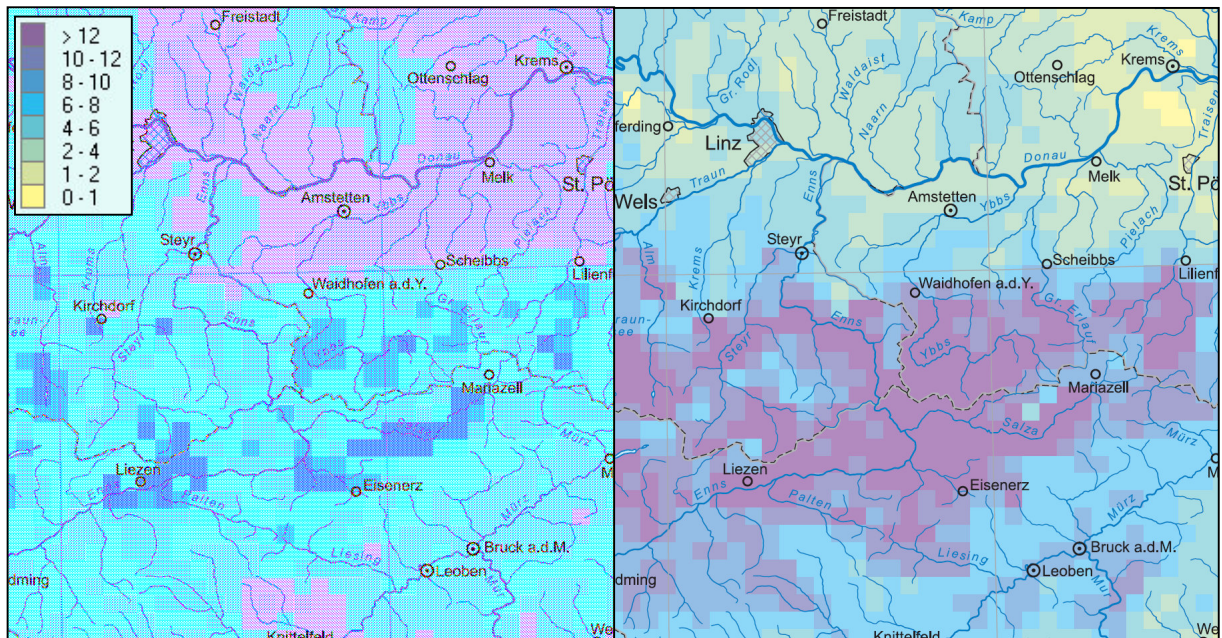


Abb. 4: Ausschnitt aus der österreichischen Niederwasserkarte (Regionalisierte Niederwasserspende $q_{95} [\text{ls}^{-1}\text{km}^{-2}]$, aus Laaha und Blöschl, 2007a, Hydrologischer Atlas Österreichs, Karte 5.8). Linke Abbildung - untere Grenze des Vertrauensbereichs (Karte 1), rechte Abbildung - obere Grenze des Vertrauensbereichs (Karte 2).

Die Unterschiede der in Karte 1 und 2 erkennbaren Tendenzen sind auf unterschiedliche Breiten des Konfidenzintervalls infolge der räumlich variierenden Unsicherheit der Regionalisierung zurückzuführen. Gebiete mit Abgleich an Pegelmessungen (Karte 3) weisen einen geringeren Fehler auf als unabgegliche Gebiete. Der relative Fehler der regionalisierten Niederwasserspenden korreliert mit dem Wert der Niederwasserspende. Für Gebiete mit $q_{95} > 1 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$ beträgt der mittlere relative Fehler ohne Abgleich 20-60%, bei Abgleich an Pegelmessungen 10-40% des q_{95} . Für Gebiete mit $q_{95} < 1 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$ beträgt der mittlere relative Fehler bis über 100%.

In der Druckausgabe des Hydrologischen Atlas wurden die Werte der 7000 Flussgebiete auf ein regelmäßiges Raster von $4 \times 4 \text{ km}^2$ aggregiert. Der Digitale Atlas enthält hingegen die Originalkarte auf Basis der Flussgebiete und ist zusätzlich mit einem Aggregationswerkzeug ausgestattet, das die Berechnung der mittleren natürlichen Niederwasserspende von frei auswählbaren Einzugsgebieten ermöglicht. An Pegelstellen mit natürlichem Niederwasserregime sind die berechneten q_{95} Werte konsistent mit den lokalen Pegelbeobachtungen. An Pegelstellen die anthropogene Beeinflussungen im Einzugsgebiet, oder in Teilen des Einzugsgebietes, aufweisen, weichen die berechneten q_{95} Werte hingegen von den lokalen Pegelbeobachtungen ab. Auch ist der Vertrauensbereich, infolge der größeren Unsicherheit der Regressions-

schätzung ohne lokalen Abgleich an Pegelbeobachtungen, an beeinflussten Pegelstellen größer als an unbeeinflussten Pegelstellen. Einen Aufschluss über anthropogene Beeinflussungen in Pegelzwischenzugsgebieten (Signatur "keine Werte") gibt Kartenblatt 5.8 - Karte 3 des Hydrologischen Atlas. Eine Auswertung der Niederswassersituation im Trockenjahr 2003 im Vergleich zu einem durchschnittlichen Jahr zeigt Kartenblatt 5.8 - Karte 4.

Für große Einzugsgebiete ist das oben angeführte Schätzverfahren nicht geeignet, da in diesen eine Mischung von Niederwasserprozessen zu erwarten ist. In Österreich wurde die Grenze mit einer Fläche $> 4700 \text{ km}^2$ angesetzt (Donau, Drau unter Spittal an der Drau, Mur unter Bruck an der Mur, Enns unter Großraming, Salzach unter Salzburg, und Inn unter Öztaler Ache). Für die Bestimmung von Niederwasserabflüssen großer Einzugsgebiete sollten alternative Verfahren wie lineare Spendenbänder (z.B. Finke und Dornblut, 1998) oder Top-Kriging (Laaha et al., 2007) herangezogen werden. Manchmal ist jedoch gerade bei diesen Gebieten eine Einschätzung der natürlichen Niederswassersituation schwierig, da aufgrund der starken anthropogenen Nutzung keine unbeeinflussten Daten für eine Rekonstruktion der naturalisierten Abflüsse vorliegen.

Die Österreichische Niederswasserkarte ist eine Zusammenstellung von je nach lokaler Datenlage bestmöglich bestimmten Niederswasserkennwerten (Abschnitt 3.2.1). Anstelle eines einzigen Niederswasserkennwertes wird ein Vertrauensbereich des Niederswasserkennwertes angegeben. Für manche Anwendungen, wie beispielsweise großräumige Beurteilungen, genügt dieser Vertrauensbereich für eine angemessene Einschätzung der Niederswasserverhältnisse. Für lokalere Anwendungen empfehlen wir die Einbeziehung lokaler Informationen bei der Bestimmung der Niederswasserverhältnisse. Denn zum einen besitzen Niederswässer aufgrund der großen naturräumlichen Unterschiede in Österreich eine sehr hohe räumliche Variabilität. Zum anderen haben wir die Erfahrung gewonnen, dass lokale Informationen sehr häufig vorhanden sind, deren Einbeziehung einem Experten eine genauere Bestimmung der lokalen Niederswasserverhältnisse ermöglicht. Ein Beispiel wie lokale Informationen in die Niederswasserermittlung einbezogen werden können gibt Abschnitt 5.

5. Anwendungsbeispiel

Das Anwendungsbeispiel ist Teil einer Studie zur Bestimmung von Niederswasserkennwerten für 270 Einzugsgebiete von Wasserkraftwerken in Österreich, welche im Auftrag des Verbandes der Elektrizitätsunternehmen Österreichs durchgeführt wurde (Laaha et al., 2005a und 2005c). In diesem Beispiel soll für eine Wasserfassung der Tauernkraftwerke AG im Zillertal (Standort 65) der natürliche Niederswasserkennwert Q_{95} berechnet werden. Die Anwendung des Aggregationswerkzeugs im Hydrologischen Atlas Österreichs, Karte 5.8, ist in Abbildung 5 dargestellt. Für die Standortskordinaten ergibt die Auswertung einen Vertrauensbereich der Niederswasserspense q_{95} von 2.03 bis $6.01 \text{ ls}^{-1}\text{km}^{-2}$, die Fläche beträgt 57.8 km^2 . Der Niederswasserabfluss Q_{95} des gesuchten Einzugsgebietes liegt somit mit einer Wahrscheinlichkeit von 68% zwischen 0.12 und $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$.

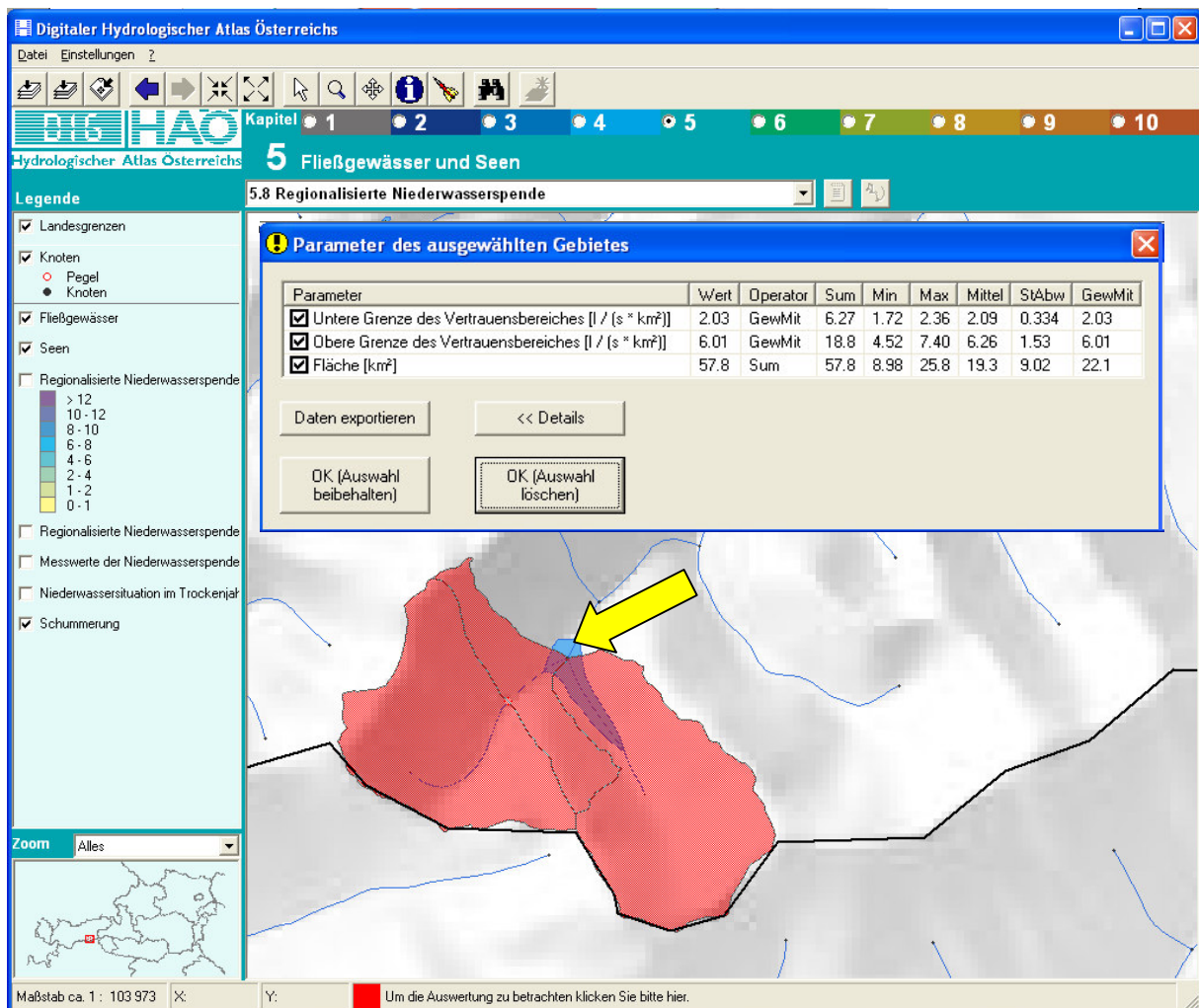


Abb. 5: Anwendung der Österreichischen Niederwasserkarte (Laaha und Blöschl, 2007a, Hydrologischer Atlas Österreichs, Karte 5.8) zur Bestimmung von Q_{95} für Standort 65 (gelber Pfeil). Für das ausgewählte Einzugsgebiet (rote Fläche) ergibt die Auswertung einen Vertrauensbereich der Niederwasserspense von 2.03 bis 6.01 $l s^{-1} km^{-2}$, die Fläche beträgt 57.8 km^2 .

Eine genauere Einschätzung des Niederwasserkennwertes kann durch Einbeziehung lokaler Abflussdaten erfolgen. Für den gegebenen Standort wurden vom Kraftwerksbetreiber monatliche Mittelwasserabflüsse vorgelegt, die aus gemessenen kontinuierlichen Abflusszeitreihen mit hoher zeitlicher Auflösung berechnet worden waren. Die Bestimmung des Q_{95} (bezogen auf das Abflusstagesmittel) aus dem kleinsten monatlichen Mittelwasserabfluss stellt eine Skalierungsaufgabe dar, für die Laaha et al. (2005c) den folgenden Ansatz wählten:

$$Q_{95} = S_j \cdot \min(MQ_m) \tag{7}$$

wobei S_j den Skalierungsfaktor und $\min(MQ_m)$ das kleinste Monatsmittelwasser bezeichnen. Aus den vorgelegten Daten wurde $\min(MQ_m) = 0.24 \text{ m}^3/s$ berechnet. Für vergletscherte Gebiete dieser Region kann der in Laaha et al. (2005c) aus Pegeldata ermittelte Skalierungsfaktor für vergletscherte Gebiete, $S_j = 0.88$, angesetzt werden.

Daraus folgt:

$$Q_{95} = 0.88 \cdot 0.24 = 0.21 \text{ m}^3/\text{s} \quad (8)$$

Der so ermittelte Niederwasserkennwert Q_{95} liegt in diesem Fall in der Mitte des Vertrauensbereiches der regionalen Schätzung mittels Niederwasserkarte. Die Übereinstimmung der aus zwei unterschiedlichen Informationsquellen gewonnenen Niederwasserwerte kann als Bestätigung beider Verfahren gesehen werden, und stützt in diesem Fall das Vertrauen in den ermittelten Kennwert. In anderen Situationen können die Kennwerte auch abweichen. In diesem Fall ist eine Entscheidung zu treffen, bei der die lokale Situation und Expertenwissen miteinbezogen werden sollten. Ein Beispiel wie durch verschiedene Modelle bestimmte Kennwerte miteinander gewinnbringend kombiniert werden können ist in Laaha et al. (2006c) dargestellt.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Eine Bestimmungsmethode für den Niederwasserkennwert Q_{95} in Österreich wurde vorgestellt. Das Verfahren besteht aus unterschiedlichen Ansätzen für Gewässerstellen mit langen Reihen, kurzen Reihen, und Stellen ohne Abflussdaten. Für jede Datensituation wird die Unschärfe des Verfahrens durch Fehlerfortpflanzungsmodelle abgeschätzt. Für eine einfachere praktische Anwendung wurde das Verfahren auf ca. 7000 Flusseinzugsgebiete flächendeckend für Österreich angewendet. Die so erstellte Österreichische Niederwasserkarte besteht aus zwei Teilkarten, welche die untere und die obere Grenze des Vertrauensbereichs des Niederwasserkennwertes darstellen. Sie kann zur Bestimmung eines ersten Richtwertes für die Niederwassersituation verwendet werden, und erlaubt zusätzlich das Einbeziehen von lokalen Informationen und Expertenwissen für eine genauere Bestimmung des Niederwasserkennwertes eines Standortes.

Bei der Erstellung der Karte stand die regionale Betrachtungsweise im Vordergrund. Eine erste praktische Anwendung des Verfahrens erfolgte bereits im Zuge eines Projektes zur Ermittlung von Niederwasserkennwerten für 270 Einzugsgebiete von Wasserkraftwerken in Österreich. Darüber hinaus ist die Sammlung von zusätzlichen Erfahrungen bei der praktischen Umsetzung nötig. Auch die Erstellung eines Leitfadens für die Anwendung der Bestimmungsmethode bei bestimmten wasserwirtschaftlichen Gegebenheiten wäre von hohem praktischem Wert. Diese Arbeiten sind derzeit im laufen und sollen in naher Zukunft veröffentlicht werden.

7. Literatur

BMLFUW (ed.) (2007) Hydrographisches Jahrbuch von Österreich. 112. Band 2004. Hrsg.: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

Draper, N.R., Smith, H. (1998) Applied Regression Analysis (Third Edition). John Wiley & Sons Inc.

- DVWK (1983) *Niedrigwasseranalyse Teil I: Statistische Untersuchung des Niedrigwasserabflusses*, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Regel 120, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin
- DVWK (1992) *Niedrigwasseranalyse Teil II: Statistische Untersuchung der Unterschreitungsdauer und des Abflussdefizits*, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Regel 121, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin
- Finke, W., Dornblut, I. (1998) *Statistische Niedrigwasseranalysen ausgewählter Pegel der Elbe*. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 42-5, 186-195.
- Kresser, W., Kirnbauer, R., Nobilis, F. (1985) *Überlegungen zur Ermittlung von Niederwasserkenngrößen*. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich, 54, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft: Wien.
- Kroiß, H., Gutknecht, D., Schmid, C., Blöschl, G., Fenz, R., Hinteregger, J., Honsowitz, H. (1996) *Methodik und Kritik der ökologischen und ökonomischen Bewertung von regionalen Lösungen zur Abwasserentsorgung am Beispiel des Lainsitztales*. Wiener Mitteilungen, Band 130, TU Wien.
- Laaha, G. (2000) *Zur Beurteilung der Genauigkeit von Niederwasserkennwerten*. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich, 80, 61-68.
- Laaha, G., Blöschl G. (2003) *Saisonalität von Niederwasserspenden in Österreich*. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich 82, 59-68. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wien.
- Laaha, G., Blöschl, G. (2005) *Low flow estimates from short streamflow records—a comparison of methods*. J. Hydrol. 306, 264–286.
- Laaha, G., Blöschl, G. (2006a) *A comparison of low flow regionalisation methods—catchment grouping*. Journal of Hydrology, 323, 1-4, 193–214.
- Laaha, G., Blöschl, G. (2006b) *The value of seasonality indices for regionalizing low flows*. Hydrol. Process. 20, 3851-3878.
- Laaha, G., Blöschl, G. (2006c) *Flächendeckende Bestimmung von Niederwasserkenngrößen in Österreich*. In: Blöschl, G., Godina, R., Merz, R.: *Methoden der Hydrologischen Regionalisierung*, ÖWAV Seminar 18.-19. Mai 2006, Lebensministerium, 1010 Wien; Wiener Mitteilungen, Band 197, 93-108, Wien; ISBN 3-85234-088-8.
- Laaha, G., Blöschl, G. (2007a) *Niederwasserspende (Specific low flow)*. In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), *Hydrologischer Atlas Österreichs*, 3. Lieferung Karte 5.8; Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Wien; ISBN 3-85437-250-7.
- Laaha, G., Blöschl, G. (2007b) *A national low flow estimation procedure for Austria*. Hydrol. Scie. J. (in Druck)

- Laaha, G., Blöschl, G., Parajka, J. (2005a) Dem Spendenmuster auf der Spur - Bestimmung von Niederwasserkenngößen für Wasserkraftwerke und Wasserfassungen in Österreich. VEÖ Journal, DEZ/05, 2-4.
- Laaha, G., Godina, R. Lorenz, P, Blöschl, G. (2005b) Niederwasserabfluss (Low flow). In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), Hydrologischer Atlas Österreichs, Karte 5.5; Österreichischer Kunst- und Kulturverlag Wien, Wien; ISBN 3-85437-250-7.
- Laaha, G., Parajka, J., Blöschl, G. (2005c) Bestimmung von Niederwasserkenngößen für Einzugsgebiete von Wasserkraftwerken. Verband der Elektrizitätsunternehmen Österreichs, Brahmplatz 3, 1040 Wien, 63.
- Laaha, G., Skøien, J., Blöschl, G (2007) A comparison of Top-kriging and regional regression for low flow regionalisation. Geophysical Research Abstracts 9, 07015, 1-2; ISSN 1029-7006.
- Müller, G. (2006) Datenprüfung und Verfügbarkeit beim Hydrographischen Dienst in Österreich. In: Gutknecht D. (Hrsg.) Methoden der hydrologischen Regionalisierung. Wiener Mitteilungen, Bd. 197, Wien.
- ÖNORM B 2400: Hydrologie - Hydrographische Fachausdrücke und Zeichen. Österreichisches Normungsinstitut (1986), Wien.
- Skøien, J.O., Merz, R., Blöschl, G. (2006) Top-kriging – geostatistics on stream networks. Hydrol. Earth Syst. Sci., 10, 277–287
- Weisberg, S. (1985) Applied Linear Regression (Second edn). Wiley, New York.

Anschrift der Verfasser:

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gregor Laaha
Institut für Angewandte Statistik und EDV
Universität für Bodenkultur Wien
Gregor Mendel-Straße 33, A-1180 Wien
Email: gregor.laaha@boku.ac.at

A.o.Univ.Prof. Dr. Günter Blöschl
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien
Email: bloeschl@hydro.tuwien.ac.at

WIENER MITTEILUNGEN WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER
--

Eine von den Wasserbauinstituten an der Technischen Universität Wien, den Instituten für Wasserwirtschaft der Universität für Bodenkultur und dem Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverband herausgegebene Schriftenreihe

Band Nr		Preis €
1	Das Wasser (1968) Kresser W.	vergriffen
2	Die Gesetzmäßigkeiten der stationären Flüssigkeitsströmung durch gleichförmig rotierende zylindrische Rohre (1968) Breiner, H.	vergriffen
3	Abwasserreinigung - Grundkurs (1969) von der Emde, W.	vergriffen
4	Abwasserreinigungsanlagen - Entwurf-Bau-Betrieb (1969) 4. ÖWWV-Seminar, Raach 1969	vergriffen
5	Zukunftsprobleme der Trinkwasserversorgung (1970) 5. ÖWWV-Seminar, Raach 1970	vergriffen
6	Industrieabwässer (1971) 6. ÖWWV-Seminar, Raach 1971	vergriffen
7	Wasser- und Abfallwirtschaft (1972) 7. ÖWWV-Seminar, Raach 1972	vergriffen
8	Das vollkommene Peilrohr (Zur Methodik der Grundwasserbeobachtung) (1972) Schmidt, F.	vergriffen
9	Über die Anwendung von radioaktiven Tracern in der Hydrologie (1972) Pruzinsky, W. Über die Auswertung von Abflußmengen auf elektronischen Rechenanlagen Doleisch, M.:	18,-
10	1. Hydrologie-Fortbildungskurs (1972)	vergriffen
11	Vergleichende Untersuchungen zur Berechnung von HW-Abflüssen aus kleinen Einzugsgebieten (1972) Gutknecht, D.	vergriffen
12	Uferfiltrat und Grundwasseranreicherung (1973) 8. ÖWWV-Seminar, Raach 1973	vergriffen

Band Nr		Preis €
13	Zellstoffabwässer-Anfall und Reinigung (1972) von der Emde W., Fleckseder H., Huber L., Viehl K.	vergriffen
14	Abfluß - Geschiebe (1973) 2. Hydrologie-Fortbildungskurs 1973	vergriffen
15	Neue Entwicklung in der Abwassertechnik (1983) 9. ÖWWV-Seminar, Raach 1974	vergriffen
16	Praktikum der Kläranlagentechnik (1974) von der Emde W.	vergriffen
17	Stabilitätsuntersuchung von Abflußprofilen mittels hydraulischer Methoden und Trendanalyse (1974) Behr, O.:	18,-
18	Hydrologische Grundlagen zur Speicherbemessung(1975) 3. Hydrologie-Fortbildungskurs 1975	vergriffen
19	Vorhersagen in der Wasserwirtschaft (1976) 1. Hydrologisches Seminar des ÖWWV 1976	10,-
20	Abfall- und Schlammbehandlung aus wasserwirtschaftlicher Sicht (1976) 11. ÖWWV-Seminar, Raach 1976	vergriffen
21	Zur Theorie und Praxis der Speicherwirtschaft (1977) 2. Hydrologisches Seminar des ÖWWV 1977	22,-
22	Abwasserreinigung in kleineren Verhältnissen (1977) 12. ÖWWV-Seminar, Raach 1977	vergriffen
23	Methoden zur rechnerischen Behandlung von Grundwasserleitern (1977) Baron W., Heindl W., Behr O., Reitinger J.	vergriffen
24	Ein Beitrag zur Reinigung des Abwassers eines Chemiefaserwerkes, eines chemischen Betriebes und einer Molkerei (1978) Begert A.	vergriffen
25	Ein Beitrag zur Reinigung von Zuckerfabrikabwasser (1978) Kroiss H.	vergriffen
26	Methoden der hydrologischen Kurzfristvorhersage (1978) Gutknecht D.	vergriffen
27	Wasserversorgung-Gewässerschutz (1978) 13. ÖWWV-Seminar, Raach 1978	vergriffen
28	Industrieabwasserbehandlung - Neue Entwicklungen (1979) 14. ÖWWV-Seminar, Raach 1979	vergriffen
29	Probleme der Uferfiltration und Grundwasseranreicherung mit besonderer Berücksichtigung des Wiener Raumes (1979) Frischherz H.	vergriffen
30	Beiträge zur Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft (1979) o. Univ.-Prof. DDr. Werner Kresser zum 60. Geburtstag	vergriffen

Band Nr		Preis €
31	Grundwasserzuströmungsverhältnisse zu Horizontalfilterrohrbrunnen (1980) Schügerl W.	vergriffen
32	Grundwasserwirtschaft (1980) 3. Hydrologisches Seminar des ÖWWV 1980	25,-
33	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (1) (1980)	vergriffen
34	Behandlung und Beseitigung kommunaler und industrieller Schlämme (1980) 15. ÖWWV-Seminar, Raach 1980	vergriffen
35	Faktoren, die die Inaktivierung von Viren beim Belebungsverfahren beeinflussen (1980) Usrael G.	vergriffen
36	Vergleichende Kostenuntersuchungen über das Belebungsverfahren (1980) Flögl W.	vergriffen
37	Ein Beitrag zur Reinigung und Geruchsfreimachung von Abwasser aus Tierkörperverwertungsanstalten (1980) Ruider E.	vergriffen
38	Wasserwirtschaftliche Probleme der Elektrizitätserzeugung (1981) Schiller, G.:	vergriffen
39	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (1981) Teil 2	vergriffen
40	Wasseraufbereitung und Abwasserreinigung als zusammengehörige Techniken (1981) 16. ÖWWV-Seminar, Raach 1981	vergriffen
41	Filterbrunnen zur Erschließung von Grundwasser (1981) ÖWWV-Fortbildungskurs 1981	29,-
42	Zur Ermittlung von Bemessungshochwässern im Wasserbau (1981) Kirnbauer R.	22,-
43	Wissenschaftliche Arbeiten, Zeitraum 1977 bis 1981 (1981)	25,-
44	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft - heute (1981) Teil 3	25,-
45	Verbundwirtschaft in der Wasserversorgung (1982) ÖWWV-Fortbildungskurs 1982	29,-
46	Gewässerschutzplanung, deren Umsetzung und Zielkontrolle im Einzugsgebiet des Neusiedler Sees (1982) Stalzer W.	vergriffen
47	Wechselwirkung zwischen Planung und Betrieb von Abwasserreinigungsanlagen, Erfahrungen und Probleme (1982) 17. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1982	vergriffen

Band Nr		Preis €
48	Kleinwasserkraftwerke - Notwendigkeit und Bedeutung (1982) Flußstudien: Schwarza, kleine Ybbs, Saalach	vergriffen
49	Beiträge zur Wasserversorgung, Abwasserreinigung, Gewässerschutz und Abfallwirtschaft (1982) o. Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. v.d. Emde zum 60. Geburtstag	vergriffen
50	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft - heute (1982) Teil 4	vergriffen
51	Sicherung der Wasserversorgung in der Zukunft (1983) 18. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1983	vergriffen
52	Thermische Beeinflussung des Grundwassers (1983) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1983	vergriffen
53	Planung und Betrieb von Regentlastungsanlagen (1984) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1984	vergriffen
54	Sonderabfall und Gewässerschutz (1984) 19. ÖWWV-Seminar, Gmunden 1984	vergriffen
55	Naturnahes Regulierungskonzept "Pram" (1984)	26,-
56	Blähschlamm beim Belebungsverfahren (1985) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1985	vergriffen
57	Chemie in der Wassergütewirtschaft (1985) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1985	vergriffen
58	Klärschlamm - Verwertung und Ablagerung (1985) 20. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1985	vergriffen
59	Wasserkraftnutzung an der Thaya (1985) Pelikan B.	23,-
60	Seminar "Wasser - Umwelt - Raumordnung" (1985)	16,-
61	Gewässerschutz im Wandel der Zeit Ziele und Maßnahmen zu ihrer Verwirklichung (1985) Fleckseder, H.	vergriffen
62	Anaerobe Abwasserreinigung (1985) Kroiss H.	vergriffen
63	Kleine Belebungsanlagen mit einem Anschlußwert bis 500 Einwohnergleichwerte (1985) Begert A.	vergriffen
64	Belüftungssysteme beim Belebungsverfahren (1986) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1986	vergriffen
65	Planung und Betrieb von Behandlungsanlagen für Industrie- abwässer (1986) 21. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1986	vergriffen
66	Ausspracheseminar Grundwasserschutz in Österreich (1986) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1986	29,-

Band Nr		Preis €
67	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (5) (1986)	vergriffen
68	Zur mathematischen Modellierung der Abfluestehung an Hängen (1986) Schmid B.H.	22,-
69	Nitrifikation - Denitrifikation (1987) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1987	vergriffen
70	Flußbau und Fischerei (1987)	vergriffen
71	Wasserversorgung und Abwasserreinigung in kleinen Verhältnissen (1987) 22. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1987	vergriffen
72	Wasserwirtschaft und Lebensschutz (1987) Wurzer E.	vergriffen
73	Anaerobe Abwasserreinigung Grundlagen und großtechnische Erfahrung (1988) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1988	vergriffen
74	Wasserbau und Wasserwirtschaft im Alpenraum aus historischer Sicht (1988)	22,-
75	Wechselbeziehungen zwischen Land-, Forst und Wasserwirtschaft (1988) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1988	vergriffen
76	Gefährdung des Grundwassers durch Altlasten (1988) 23. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1988	vergriffen
77	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (6) (1987)	vergriffen
78	Wasserwirtschaftliche Planung bei mehrfacher Zielsetzung (1988) Nachtnebel, H.P.	25,-
79	Hydraulik offener Gerinne (1989) Symposium, 1989	vergriffen
80	Untersuchung der Fischaufstiegshilfe bei der Stauhaltung im Gießgang Greifenstein (1988) Jungwirth M., Schmutz S.	vergriffen
81	Biologische Abwasserreinigung (1989) ÖWWV-Fortbildungskurs, 1989, TU-Wien	vergriffen
82	Klärschlammentsorgung (1989) 24. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1989	vergriffen
83	Viruskontamination der Umwelt und Verfahren der Kontrolle (1990) 2. Symposium	18,-
84	Schadstofffragen in der Wasserwirtschaft (1989) ÖWWV-Fortbildungskurs 1989, TU-Wien	29,-

Band Nr		Preis €
85	Schlußbericht zum Forschungsvorhaben Trinkwasseraufbereitung mit Ultraschall, Projekt Abschnitt I (1989) Frischherz H.; Benes E.; Ernst J.; Haber F.; Stuckart W.	18,-
86	Umfassende Betrachtung der Erosions- und Sedimentationsproblematik (1989) Summer W.	25,-
87	Großräumige Lösungen in der Wasserversorgung (1990) 25. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1990	vergriffen
88	Revitalisierung von Fließgewässern (1990) Beiträge zum Workshop Scharfling, 1989	vergriffen
89	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (1990) Teil 9	vergriffen
90	A Study on Kinematic Cascades (1990) Schmid B.H.	18,-
91	Snowmelt Simulation in Rugged Terrain - The Gap Between Point and Catchment Scale Approaches (1990) Blöschl G.	18,-
92	Dateninterpretation und ihre Bedeutung für Grundwasserströmungsmodelle (1990) Blaschke A.P.	nicht erschienen
93	Decision Support Systeme für die Grundwasserwirtschaft unter Verwendung geografischer Informationssysteme (1990) Fürst J.	18,-
94	Schlußbericht zum Forschungsvorhaben Trinkwasseraufbereitung mit Ultraschall; Projekt-Abschnitt 1990 (1990) Frischherz H., Benes E., Stuckhart W., Ilmer A., Gröschl M., Bolek W.	18,-
95	Anaerobe Abwasserreinigung - Ein Modell zur Berechnung und Darstellung der maßgebenden chemischen Parameter (1991) Svardal K.	22,-
96	EDV-Einsatz auf Abwasserreinigungsanlagen (1991) ÖWWV-Fortbildungskurs 1991, TU-Wien	29,-
97	Entfernung von Phosphorverbindungen bei der Abwasserreinigung (1991) ÖWWV-Fortbildungskurs 1991, TU-Wien	25,-
98	Auswirkungen der Wasserrechtsgesetznovelle 1990 auf Behörden, Planer und Betreiber kommunaler Abwasserreinigungsanlagen - aus technischer, rechtlicher und wirtschaftlicher Sicht (1991) 26. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1991	36,-
99	Geruchsemissionen aus Abwasserreinigungsanlagen (1991) ÖWWV-Fortbildungskurs 1991,	22,-
100	Anpassung von Kläranlagen an den Stand der Technik (1992) ÖWWV-Fortbildungskurs 1992, TU-Wien	vergriffen

Band Nr		Preis €
101	Umweltbezogene Planung wasserbaulicher Maßnahmen an Fließgewässern (1992) Pelikan B.	18,-
102	Erfassung hydrometeorologischer Elemente in Österreich im Hinblick auf den Wasserhaushalt (1992) Behr O.	i.V.
103	Wasser- und Abfallwirtschaft in dünn besiedelten Gebieten (1992) 27. ÖWWV-Seminar Ottenstein 1992	36,-
104	Virus Contamination of the Environment (1992) Methods and Control	vergriffen
105	Fließgewässer und ihre Ökologie (1993) ÖWAV-Fortbildungskurs 1992, TU-Wien	22,-
106	Festlegung einer Dotierwassermenge über Dotationsversuche (1992) Mader H.	22,-
107	Wasserrechtsgesetznovelle 1990 und neue Emissionsverordnungen (1992) Vorträge anlässlich der UTEC 1992	29,-
108	Chemische Analytik für einen zeitgemäßen Gewässerschutz (1992) Vorträge anlässlich der UTEC 1992	29,-
109	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (1994) Teil 10 - Beiträge zum Seminar an der Universität für Bodenkultur im November 1994	i.V.
110	Bemessung u. Betrieb von Kläranlagen zur Stickstoffentfernung (1993) ÖWAV-Seminar 1993, TU-Wien	36,-
111	Wasserreserven in Österreich - Schutz und Nutzung in Gegenwart und Zukunft (1993) 28. ÖWAV-Seminar Ottenstein 1993	vergriffen
112	Contamination of the Environment by Viruses and Methods of Control (1993)	18,-
113	Wasserkraft O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. S. Radler anlässlich seiner Emeritierung	vergriffen
114	Klärwärter-Grundkurs (1994) 2. Auflage 1994	vergriffen
115	Beitrag zur Reduzierung der Abwasseremissionen der Bleicherei beim Sulfatverfahren (1994) Urban W. ISBN 3-85234-001-2	22,-
116	Eigenüberwachung von Abwasserreinigungsanlagen für den Gewässerschutz (1994) ÖWAV-Seminar 1994, TU-Wien ISBN 3-85234-002-0	25,-

Band Nr		Preis €
117	Abwasserreinigungskonzepte - Internationaler Erfahrungsaustausch über neue Entwicklungen (1995) ÖWAV-Seminar 1994, TU Wien ISBN 3-85234-003-9	25,-
118	3 Jahre WRG-Novelle (1994) 29. ÖWAV-Seminar: Ottenstein 1994 ISBN 3-85234-004-7	19,-
119	Landeskulturelle Wasserwirtschaft (1994) anlässlich der Emeritierung von o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. H. Supersperg	vergriffen
120	Gewässerbetreuungskonzepte - Stand und Perspektiven (1994) Beiträge zur Tagung an der BOKU 1994 ISBN 3-85234-010-1	32,-
121	Generelle Entwässerungsplanung im Siedlungsraum (1996) ÖWAV-Seminar 1995, TU Wien ISBN 3-85234-011-X	29,-
122	Bedeutung von geowissenschaftlicher Zusatzinformation für die Schätzung der Transmissivitätsverteilung in einem Aquifer (1994) Kupfersberger H.	18,-
123	Modellierung und Regionalisierung der Grundwassermengenbildung und des Bodenwasserhaushaltes (1994) Holzmann, H.	22,-
124	Pflanzenkläranlagen - Stand der Technik, Zukunftsaspekte (1995) ÖWAV-Seminar, BOKU Wien ISBN 3-85234-014-4	22,-
125	Abwasserreinigung - Probleme bei der praktischen Umsetzung des Wasserrechtsgesetzes, (1995) ÖWAV-Seminar 1995, TU-Wien ISBN 3-85234-015-2	32,-
126	Konfliktfeld Landwirtschaft - Wasserwirtschaft (1995) 30. ÖWAV-Seminar, Ottenstein 1995 ISBN 3-85234-016-0	29,-
127	Alte und neue Summenparameter (1995) ÖWAV-Seminar 1995, TU-Wien ISBN 3-85234-017-9	29,-
128	Viruskontamination der Umwelt und Verfahren der Kontrolle (deutsch oder englisch) (1995) 4. Symposium Univ.Prof.Dr. R. Walter ISBN 3-85234-019-5	0,-
129	Einfluß von Indirekteinleitungen auf Planung und Betrieb von Abwasseranlagen (1996) ÖWAV-Seminar 1996, TU-Wien ISBN 3-85234-020-9	vergriffen

Band Nr		Preis €
130	Zentrale und dezentrale Abwasserreinigung (1996) 31. ÖWAV-Seminar, Ottenstein 1996 ISBN 3-85234-021-7	36,-
131	Methoden der Planung und Berechnung des Kanalisationssystems (1996) ÖWAV-Seminar 1996, BOKU-Wien ISBN 3-85234-022-5	29,-
132	Scale and Scaling in Hydrology (1996) Blöschl G. ISBN 3-85234-023-3	vergriffen
133	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (11) (1996) Integrale Interpretation eines zeitgemäßen Gewässerschutzes ISBN 3-85234-024-0	12,-
134	Ein Beitrag zur Charakterisierung von Belüftungssystemen für die biologische Abwasserreinigung nach dem Belebungsverfahren mit Sauerstoffzufuhrmessungen (1996) Frey W. ISBN 3-85234-025-X	22,-
135	Nitrifikation im Belebungsverfahren bei maßgebendem Industrieabwassereinfluß (1996) Nowak O. ISBN 3-85234-026-8	36,-
136	1. Wassertechnisches Seminar (1996) Nebenprodukte von Desinfektion und Oxidation bei der Trinkwasseraufbereitung ISBN 3-85234-027-6	i.V.
137	Modellanwendung bei Planung und Betrieb von Belebungsanlagen (1997) ÖWAV - Seminar 1997, TU-Wien ISBN 3-85234-028-4	32,-
138	Nitrifikationshemmung bei kommunaler Abwasserreinigung (1997) Schweighofer P. ISBN 3-85234-029-2	25,-
139	Ein Beitrag zu Verständnis und Anwendung aerober Selektoren für die Blähschlammvermeidung (1997) Prendl L. ISBN 3-85234-030-6	22,-
140	Auswirkungen eines Kläranlagenablaufes auf abflußschwache Vorfluter am Beispiel der Kläranlage Mödling und des Krottenbaches (1997) Franz A. ISBN 3-85234-031-4	25,-
141	Neue Entwicklungen in der Abwassertechnik (1997) ÖWAV - Seminar 1997, TU-Wien ISBN 3-85234-032-2	36,-

Band Nr		Preis €
142	Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (11) (1997) Abfallwirtschaft und Altlastensanierung morgen ISBN 3-85234-033-0	18,-
143	Abwasserbeseitigung und Wasserversorgung in Wien (1997) Eine ökonomische Beurteilung der Einnahmen, Ausgaben und Kosten Kosz M. ISBN 3-85234-034-9	22,-
144	Raum-Zeitliche Variabilitäten im Geschiebehaushalt und dessen Beeinflussung am Beispiel der Drau (1997) Habersack H. ISBN 3-85234-035-7	29,-
145	Fortbildungskurs: Biologische Abwasserreinigung (1998) ÖWAV - Seminar 1998, TU-Wien ISBN 3-85234-036-5	vergriffen
146	2. Wassertechnisches Seminar (1998) Desinfektion in der Trinkwasseraufbereitung ISBN 3-85234-037-3	i.V.
147	Eigenüberwachung und Fremdüberwachung bei Kläranlagen (1998) 32. ÖWAV-Seminar , Linz 1998 ISBN 3-85234-038-1	36,-
148	Grundwasserdynamik (1998) ISBN 3-85234-039-C	36,-
149	Die Tradition in der Kulturtechnik (1998) Kastanek F. Simulationsanwendung bei der Störung durch poröses Medium (1998) Loiskandl W. ISBN 3-85234-040-4	22,-
150	Auswirkungen von Niederschlagsereignissen und der Schneeschmelze auf Karstquellen (1998) Steinkellner M. ISBN 3-85234-041-1	36,-
151	Experiences with soil erosion models (1998) ISBN 3-85234-042-X	29,-
152	Ein Beitrag zur Optimierung der Stickstoffentfernung in zweistufigen Belebungsanlagen (1998) Dornhofer K. ISBN 3-85234-043-8	25,-
153	Hormonell aktive Substanzen in der Umwelt (1998) ÖWAV / UBA Seminar 1998, BOKU Wien ISBN 3-58234-044-6	vergriffen
154	Erfassung, Bewertung und Sanierung von Kanalisationen (1998) ÖWAV Seminar 1999, BOKU Wien ISBN 3-8523-045-4	29,-

Band Nr		Preis €
155	Nährstoffbewirtschaftung und Wassergüte im Donauraum (1999) ÖWAV - Seminar 1999, TU-Wien ISBN 3-85234-046-2	32,-
156	Der spektrale Absorptionskoeffizient zur Bestimmung der organischen Abwasserbelastung (1999) UV-Seminar 1998, Duisburg ISBN 3-85234-047-0	22,-
157	Bedeutung und Steuerung von Nährstoff- und Schwermetallflüssen des Abwassers (1999) Zessner M. ISBN 3-85234-048-9	25,-
158	Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Stoffbilanzen in der Abfallwirtschaft (1999) Rechberger H. ISBN 3-85234-049-7	vergriffen
159	Sicherheit und Gesundheitsschutz auf Abwasseranlagen und deren Evaluierung (2000) ÖWAV – Seminar 2000, TU-Wien ISBN 3-85234-050-0	22,-
160	Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hydrologie alpiner Einzugsgebiete (2000) Hebenstreit K. ISBN 3-85234-051-9	25,-
161	Innovative Messtechnik in der Wasserwirtschaft (2000) Präsentation eines Forschungsprojektes ÖWAV – Seminar 2000, BOKU – Wien ISBN 3-85234-052-7	vergriffen
162	Sickerwasser und Oberflächenabdichtung auf Reaktordeponien (2000) ÖWAV - Seminar 2000, Wirtschaftskammer Wien ISBN 3-85234-053-5	25,-
163	Abfall- und Abwasserentsorgung in kleinen Verhältnissen (2000) ÖWAV - Seminar 2000, Ottenstein ISBN 3-85234-054-3	25,-
164	Niederschlag-Abfluss-Modellierung – Simulation und Prognose (2000) ÖWAV-Seminar 2000, TU Wien ISBN 3-85234-055-1	30,-
165	Mehrdimensionale Abflussmodellierung am Beispiel der Lafnitz (2000) Habersack, H. / Mayr, P. / Grlinger, R. / Schneglberger, St. ISBN 3-85234-056-x	25,-
166	Anpassung von Kläranlagen – Planung und Betrieb (2001) ÖWAV-Seminar 2001, TU Wien ISBN 3-85234-057-8	40,-

Band Nr		Preis €
167	Bepflanzte Bodenfilter zur weitergehenden Reinigung von Oberflächenwasser und Kläranlagenabläufen (2001) Laber J. ISBN 3-85234-058-6	25,-
168	Kanalbetrieb und Niederschlagsbehandlung (2001) ÖWAV-Seminar 2001, BOKU Wien. ISBN 3-85234-059-4	29,-
169	Development of a Simulation Tool for Subsurface Flow Constructed Wetlands (Entwicklung eines Simulationsmodells für bepflanzte Bodenfilter) (2001) Langergraber G. ISBN 3-85234-060-8	25,-
170	Simulation von Niederschlagszeitreihen mittels stochastischer Prozessmodelle unter Berücksichtigung der Skaleninvarianz (2001) Bogner ISBN 3-85234-061-6	25,-
171	Sewage Sludge Disposal – Sustainable and/or Reliable Solutions (2001) ÖWAV / EWA Workshop 2001, TU-Wien ISBN 3-85234-062-4	25,-
172	Stickstoffentfernung mit Biofiltern (2002) Nikolavcic B. ISBN 3-85234-063-2	30,-
173	Anaerobe Abwasserreinigung: Beeinflussende Faktoren der Versäuerung eines Zitronensäurefabrikabwassers (2002) Moser D. ISBN 3-85234-064-0	20,-
174	Gewässerschutz bei Entlastungsbauwerken der Mischkanalisation (2002) Fenz R. ISBN 3-85234-065-9	25,-
175	Wechselwirkung von physikalischen, chemischen und biotischen Prozessen in aquatischen Systemen (2002) Kreuzinger N. ISBN 3-85234-066-7	i.V.
176	Benchmarking in der Abwasserentsorgung (2002) ÖWAV Workshop Februar 2002, TU-Wien ISBN 3-85234-067-5	30,-
177	Klärschlamm (2002) Möglichkeiten und Verfahren zur Verwertung / Entsorgung ab 2004 ÖWAV Seminar April 2002, Wirtschaftskammer Österreich Schlammbehandlung und Entsorgung ÖWAV / TU – Workshop September 2000, TU-Wien ISBN 3-85234-068-3	30,-
178	Arzneimittel in der aquatischen Umwelt (2002) ÖWAV-Seminar 2002, BOKU Wien ISBN 3-58234-069-1	30,-

Band Nr		Preis €
179	Untersuchungen zur Entfernung natürlicher radioaktiver Stoffe aus Trinkwasser und Überblick zu deren Verbreitung in Österreich (2002) Staubmann K. ISBN 3-85234-070-5	25,-
180	Zum Fließwiderstandsverhalten flexibler Vegetation (2002) Stephan U. ISBN 3-85234-071-3	30,-
181	Understanding and estimating floods at the regional scale (2002) Merz, R. ISBN 3-85234-072-1	30,-
182	Kanalmanagement – Neues Schlagwort oder alte Herausforderung? (2003) ÖWAV-Seminar 2003, BOKU Wien ISBN 3-85234-073-X	30,-
183	Fortbildungsseminar Abwasserentsorgung (2003) ÖWAV-Seminar Februar 2003, TU Wien ISBN 3-85234-074-8	40,-
184	Klärschlamm (2003) ÖWAV-Seminar November 2003, TU Wien ISBN 3-85234-075-6	30,-
185	Nachhaltige Nutzung von Wasser (2003) Endbericht zum Modul MU11 im Rahmen des Forschungsschwerpunktes "Nachhaltige Entwicklung österreichischer Kulturlandschaften " ISBN 3-85234-076-4	30,-
186	Inspektion von Kanalisationen (inkl. Umsetzung ÖNORM EN 13508-2) ÖWAV-Informationsveranstaltung 2004, BOKU Wien ISBN 3-85324-077-2	25,-
187	Datengewinnung, -verwaltung und -nutzung in der Wassergütwirtschaft (2004) ÖWAV-Seminar März 2004, TU Wien ISBN 3-85234-078-0	40,-
188	CSB Elimination in höchstbelasteten Belebungsstufen und ihre Auswirkung auf die Stickstoffelimination von zweistufigen Anlagen unter dem Gesichtspunkt der mathematischen Modellierung (2004) Haider, S. ISBN 3-85234-079-9	30,-
189	Beitrag zum Benchmarking von Abwasserreinigungsanlagen Lindtner, S. ISBN 3-85234-080-2	25,-
190	Öffentlichkeitsarbeit auf Kläranlagen ÖWAV-Seminar Juni 2004, St. Pölten ISBN 3-85234-081-0	30,-
191	Das Verhalten ausgewählter organischer Spurenstoffe bei der biologischen Abwasserreinigung (2004) Clara, M. ISBN 3-85234-082-9	25,-

Band Nr	Preis €
192 Chemie in der Wassergütewirtschaft (2005) ÖWAV-Seminar Februar 2005, TU Wien ISBN 3-85234-083-7	45,-
193 Three-dimensional numerical modelling of turbulent river flow using polyhedral finite volumes (2005) Tritthart, M. ISBN 3-85234-084-5	30,-
194 Abwasserentsorgung im ländlichen Raum: Stand der Technik und alternative Methoden ÖWAV-Seminar September 2005, BOKU Wien ISBN 3-85234-085-3	Preis auf Anfrage
195 Betriebserfahrungen moderner Kläranlagen ÖWAV-Seminar März 2006, TU Wien ISBN 3-85234-086-1	i.V.
196 Kanalmanagement 2006 – Projektergebnisse und Praxiserfahrungen ÖWAV-Informationsveranstaltung 24.1.2006, Wien. ISBN 3-85234-087-X	30,-
197 Methoden der hydrologischen Regionalisierung ÖWAV-Seminar 2006, TU Wien, Lebensministerium, ÖGH, Wien. ISBN 3-85234-088-8	30,-
198 Process based regionalisation of low flows Laaha, G. ISBN-10 3-85234-089-6 ISBN-13 978-3-85234-089-0	30,-
199 Hochwasservorhersage – Erfahrungen, Entwicklungen & Realität ÖWAV-Seminar 2006, TU Wien ISBN-10 3-85234-090-X ISBN-13 978-3-85234-090-6	30,-
200 Scale and stream network structure in geostatistical hydrological analyses (Geostatistische hydrologische Analysen unter Berücksichtigung von Skalenaspekten und Gewässernetzstruktur) Skøien, J. O. ISBN-10 3-85234-091-8 ISBN-13 978-3-85234-091-3	30,-
201 Der kombinierte Ansatz, das Wechselspiel zwischen Emission und Immission – Neue Herausforderungen bei Abwasserentsorgung und Gewässerschutz (2007) ÖWAV-Seminar 2007, TU Wien ISBN 978-3-85234-093-7	47,-
202 Klärwärter-Grundkurs (2007) 3., vollständig überarbeitete Auflage ISBN 978-3-85234-094-4	i. V.
203 Kanalmanagement 2007 – Unterirdische Kanalsanierung ÖWAV-Seminar 2007, BOKU ISBN 978-3-85234-095-1	30,-

Band Nr		Preis €
204	Leitungskataster für Trink- und Abwassernetze (2007) ÖWAV-Seminar 2007, BOKU ISBN 978-3-85234-096-8	i. V.
205	Geruchs- und Korrosionsprobleme in der Kanalisation (2007) ÖWAV-Seminar 2007, TU Wien ISBN 978-3-85234-097-5	i. V.
206	Extreme Abflussereignisse: Dokumentation – Bedeutung – Bestimmungsmethoden ÖWAV-Seminar 2007, TU Wien ISBN 978-3-85234-098-2	30,-

Die Bände sind zu beziehen bei:

Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft
der Technischen Universität Wien
Karlsplatz 13/226, A-1040 Wien

Band: 12, 15, 16, 20, 28, 34, 35, 36, 37, 47, 49, 53, 54, 56, 57, 58, 61, 62, 63, 64, 65, 69, 73, 81, 82, 84, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 105, 107, 108, 110, 114, 116, 117, 121, 125, 127, 129, 130, 134, 135, 137, 138, 139, 140, 141, 143, 145, 147, 152, 153, 155, 156, 157, 158, 159, 161, 162, 166, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 183, 184, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 195, 201, 202, 205

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
der Technischen Universität Wien
Karlsplatz 13, A-1040 Wien

Band: 1, 2, 8, 9, 17, 21, 23, 26, 30, 31, 41, 42, 52, 66, 68, 74, 90, 91, 92, 102, 122, 132, 148, 164, 180, 181, 193, 197, 198, 199, 200, 206

Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau
der Universität für Bodenkultur,
Muthgasse 18, A-1190 Wien

Band: 18, 19, 32, 38, 43, 44, 45, 48, 50, 55, 59, 60, 70, 75, 78, 86, 89, 93, 101, 106, 109, 113, 123, 144, 160, 165, 167, 169

Institut für Wasservorsorge, Gewässerökologie und Abfallwirtschaft
der Universität für Bodenkultur,
Muthgasse 18, A-1190 Wien

Band: 22, 29, 39, 40, 46, 67, 71, 72, 76, 77, 80, 83, 85, 87, 88, 94, 103, 112, 115, 118, 120, 124, 126, 128, 131, 133, 136, 142, 146, 150, 154, 163, 167, 168, 169, 178, 179, 182, 185, 186, 194, 196, 203, 204

Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft
der Universität für Bodenkultur
Muthgasse 18, A-1190 Wien

Band: 119, 149, 151, 170