

# **WIENER MITTEILUNGEN**

**WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER**

## **Hochwässer – Bemessung, Risikoanalyse und Vorhersage**

**Band 216 - Wien 2009**

# **WIENER MITTEILUNGEN**

**WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER**

Band 216

## **Hochwässer**

**Bemessung, Risikoanalyse und Vorhersage**

ÖWAV – Seminar

Bundesamtsgebäude Wien

26. Mai 2009

Herausgeber:

o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Günter Blöschl

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie

Technische Universität Wien



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
VIENNA  
UNIVERSITY OF  
TECHNOLOGY

Institut für Wasserbau und  
Ingenieurhydrologie  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13 / 222-2  
1040 Wien



zukunft  
1909-2009  
denken

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



[lebensministerium.at](http://lebensministerium.at)

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

Druck: Riegelnik  
Piaristengasse 19  
1080 Wien

ISBN: 978-3-85234-108-8

## Vorwort

*"Die Allgemeinheit ist durch die großen Hochwässer der vergangenen zehn Jahre überrascht worden und es ist begreiflich, daß sie auf der Suche nach den Ursachen für diese ungewöhnliche Erscheinung glaubte, die verschiedenen Maßnahmen der Wasserwirtschaft verantwortlich machen zu müssen. Fast dieselben Bedenken sind schon früher geäußert worden, wenn nach längerer Ruhe unerwartet große Hochwässer eintraten. Es ist dies eine Folge der oben geschilderten Häufung der großen Schadenhochwässer in einzelnen Gruppen von wenigen Jahren."*

Diese Aussage bezieht sich nicht auf die Extremhochwässer der letzten Jahre in Österreich oder Europa. Sie stammt aus einer Untersuchung der großen Hochwässer am Rhein der Jahre 1925 und 1926 <sup>1</sup>. Wenn auch die hydrologischen Extremereignisse keine neue Erscheinung des beginnenden 2. Jahrtausend sind, so stellt sich dennoch die Frage nach dem Umgang mit den Hochwässern für jedes Jahrzehnt neu. Stärkerer Flächendruck, höhere finanzielle Werte in den Überflutungsflächen und geänderte Klimadynamik sind nur einige der neuen Herausforderungen die zu den traditionellen hinzukommen. Das sich jetzt durchsetzende Konzept zum Umgang mit den Hochwässern ist Hochwasserrisikomanagement, bei dem nicht einzelne Maßnahmen des Hochwasserschutzes isoliert betrachtet werden, sondern alle relevanten Maßnahmen in Gesamtheit geplant und durchgeführt werden sollen <sup>2</sup>.

Obwohl auch diese gesamtheitliche Sicht keinesfalls neu ist (siehe z.B. <sup>1</sup>), erfordert sie erneute Anstrengungen des effektives Hochwasserrisikomanagement als eine fach- und ressortübergreifende Querschnittsaufgabe, die sektoral - also zum Beispiel allein durch die Wasserwirtschaft - nicht bewältigt werden kann. Der "Kreislauf des Katastrophenmanagements" besteht aus Vorsorgemaßnahmen (Flächenvorsorge, Risikovor-sorge, Informationsvorsorge, Technischer Hochwasserschutz, Vorbereitung des Katastrophenschutzes) und Bewältigungsmaßnahmen während des Ereignisses (Hochwasserwarnung und Kommunikation, Katastrophenabwehr, Soforthilfe für Betroffene und Wiederaufbauhilfe). Dabei ist das funktionierende Zusammenspiel von technischen und nicht technischen Maßnahmen der Schlüssel zum erfolgreichen Umgang mit Hochwässern. Der Slogan "nach dem Hochwasser ist vor dem Hochwasser" kommuniziert eindrücklich, dass selbst extreme Hochwässer keine Ausnahmeerscheinung sind, wenn auch im Einzelfall eine große Betroffenheit herrscht. Man kann deshalb aus den vergangenen Ereignissen, und wie mit ihnen umgegangen wurde, viel für die Zukunft lernen.

Mit den in diesem Band zusammengestellten Beiträgen zum Symposium "Hochwässer – Bemessung, Risikoanalyse und Vorhersage" werden die aktuellen Fragen des Hochwasserrisikomanagement sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus praktischer Sicht aufgegriffen. Sie sind in vier Themenblöcke gruppiert: Der erste Block befasst sich mit

---

<sup>1</sup> Jahrbuch für die Gewässerkunde Norddeutschlands, Besondere Mitteilung Bd 5, Nr 2 Berlin 1929, Seite 5.

<sup>2</sup> Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken, Amtsblatt der Europäischen Union L 288/27.

Ereignisanalysen und den ablaufenden Hochwasserprozessen in den unterschiedlichen Naturräumen Österreichs vom Hochgebirge bis hin zum Flachland. Das Ziel solcher Analysen ist es immer, die Prozesse bei derartigen Ereignissen zu verstehen, und diese mit geeigneten Methoden zu beschreiben. Im zweiten Block geht es um die Bestimmung von Bemessungswerten des Hochwassers. Dabei kommt der Frage der Unsicherheit solcher Werte große Bedeutung zu, wie diese bestimmt und bei der Umsetzung berücksichtigt werden kann. Der dritte Block widmet sich der Risikoanalyse, also der Frage nach den Hochwasserwahrscheinlichkeiten in der Fläche, den möglichen Schäden und der Minimierung der Gesamtkosten. Im abschließenden Block geht es um das aktuelle Thema der Vorhersage und Kommunikation, sowohl während des Ereignisses als auch als Vorsorgemaßnahme. Zutreffende und rechtzeitige Information hat klar eine steigende Bedeutung im Gesamtsystem des Hochwasserrisikomanagement.

Die Veranstalter Technische Universität Wien, Österreichischer Wasserwirtschaftsverband und das Lebensministerium würden sich freuen, wenn mit den hier vorgelegten Beiträgen ein kleiner Beitrag zu den Bemühungen um gute Lösungsansätze für die Praxis geleistet werden könnte.

Günter Blöschl, Mai 2009

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	3
<b>Prozesse</b>	
<i>Reinhard Böhm, Ingeborg Auer, Wolfgang Schöner, Manfred Ganekind, Christine Gruber, Anita Jurkovic, Alexander Orlik, Markus Ungersböck:</i> Eine neue Website mit instrumentellen Qualitätskriadaten für den Großraum Alpen zurück bis 1760	7
<i>Robert Kirnbauer, Bernhard Kohl und Gerhard Markart:</i> Hochwasserauslösende Prozesse	21
<i>Johannes Hübl:</i> Hochwässer in Wildbacheinzugsgebieten	45
<i>Hannes Gabriel:</i> Hochwasserablauf in Flussstrecken	59
<b>Bemessung</b>	
<i>Viktor Weilguni:</i> Bemessungsniederschläge in Österreich	71
<i>Ralf Merz:</i> Methoden zur Bestimmung des Bemessungshochwassers	85
<i>Jan Szolgay und Silvia Kohnová:</i> Bemessungshochwässer in der Slowakei	105
<b>Risikoanalyse</b>	
<i>Heidi Kreibich und Annegret H. Thieken:</i> Methoden der Risikoquantifizierung	137
<i>Robert Loizl:</i> Hochwasserabflussgebiete und Gefahrenzonen zur Risiko- kommunikation mit der Raumplanung – Der “Salzburger Weg”	147
<i>Franz Sinabell und Gerhard Streicher:</i> Wirtschaftliche Bewertung von Hochwässern	165
<i>Rudolf Friewald:</i> Hochwässer aus schutzwasserwirtschaftlicher Sicht	175
<b>Vorhersage und Kommunikation</b>	
<i>Jürgen Komma, Ulrike Drabek und Günter Blöschl:</i> Aktuelle Methoden der Hochwasservorhersage	181
<i>Johannes Moser und Christian Kopeinig:</i> Hochwasserwarnung in Kärnten	213
<i>Franz-Klemens Holle:</i> Hochwasservorhersage in Bayern, Modellumgebung und DV-Vernetzung	231
<i>Reinhad Vogt:</i> Hochwasserkommunikation in Köln	255



## **EINE NEUE WEBSITE MIT INSTRUMENTELLEN QUALITÄTS- KLIMADATEN FÜR DEN GROSSRAUM ALPEN ZURÜCK BIS 1760**

Reinhard Böhm, Ingeborg Auer, Wolfgang Schöner, Manfred Ganekind,  
Christine Gruber, Anita Jurkovic, Alexander Orlik, Markus Ungersböck

### **1. Einleitung**

Im März 2009 ging HISTALP ans Netz. Damit sind die Resultate eines jahrelangen Arbeitsschwerpunktes der Klimaforschungsgruppe des österreichischen Wetterdienstes nun leicht und ohne Einschränkung für die Allgemeinheit zugänglich. Gerade für den potenziellen Nutzerkreis der Leser dieser Zeitschrift existiert ein breites Spektrum technischer und wissenschaftlicher Anwendung für Qualitätsklimadaten, wie sie in der HISTALP-Datenbank enthalten sind. Die hier gegebene historische Darstellung des Weges von den ersten Anfängen bis zur HISTALP-Website soll den Hintergrund klarstellen und kann gleichzeitig auch als Leitfaden für die Verwendung in der Praxis dienen. Es handelt sich um eine deutschsprachige Überarbeitung des englischen Hauptnavigationstextes der Website. HISTALP ist ein internationales Produkt, sowohl von der Datenbereitstellung her, der gemeinsamen Bearbeitung in formaler und informeller Kooperation, als auch in Anbetracht des Wertes des Großraums Alpen für die internationale Forschung. „Climate knows no borders“ ist eine unserer Grundüberzeugungen – deshalb ist die Website englischsprachig. Möge dieser deutschsprachige Überblick einheimischen Benutzern das Leben erleichtern.

### **2. Der Beginn in den frühen 1990er Jahren**

Die Idee einer grenzübergreifenden Datensammlung von instrumentellen Langzeitklimadaten für den Alpenraum und seiner weiteren Umgebung entstand in den frühen 1990ern in der damaligen Klimaabteilung der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (jetzt, in der neuen Struktur, Abteilung für Klimaforschung). Zunächst wurde das vorhandene österreichische Langzeitdatenpotenzial der beiden Hauptklimaelemente Temperatur und Niederschlag aufgearbeitet (Böhm, 1992, Auer, 1993). Bereits in diesen beiden frühen Arbeiten wurden die später genauer definierten Anforderungen an eine Qualitätsdatenbasis für die Analyse der regionalen Klimavariabilität zugrunde gelegt. Derartige Daten sollen sein:

- 1) *LANG* (volle Ausnutzung der vorhandenen Potenzials an instrumentell gemessenen Klimadaten)
- 2) *DICHT* (Netzwerkdichte adäquat zur gegebenen räumlichen Variabilität des jeweiligen Klimaelements)
- 3) *QUALITÄTSGEPRÜFT* (nichtklimatologische Ausreißer entfernt und Lücken geschlossen)
- 4) *HOMOGENISIERT* (nicht-klimatologische Brüche in den Zeitreihen durch Anpassung des jeweils älteren Zustandes der Messungen an den aktuellen)
- 5) *MEHRDIMENSIONAL* (Klima ist mehr als Temperatur, also möglichst viele Klimaelemente)

6) *BENUTZERFREUNDLICH* (gute Beschreibung des Datenhintergrundes, Daten in unterschiedlicher Struktur und möglichst einfach erhältlich)

Die ersten Schritte in Richtung der oben definierten Ziele in den frühen 1990ern erfüllten bereits die Anforderungen 1, 2 und 4.

Anforderung 1 wurde durch intensive Digitalisierungsarbeit erreicht, die zu Reihen führte, die für die Temperatur (und später auch für den Luftdruck) in die zweite Hälfte des 18. Jahrhundert zurückführte, für den Niederschlag (und später auch für die Bewölkung) in die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts. Dies konnte nur erreicht werden, indem vorerst lediglich Monatswerte in die Datensammlung aufgenommen wurden. Dies ermöglichte die Digitalisierung in angemessener Zeit, erbrachte wesentlich mehr vor allem frühe Daten, als es mit Tagesdaten möglich gewesen wäre und erzielte damit die nötige Netzwerkdichte zur Homogenisierung. Auf den letzten Punkt werden wir noch ausführlicher eingehen.

Anforderung 2 wurde durch die Aufarbeitung von 58 Temperatur- und 62 Niederschlagsreihen für das österreichische Staatsgebiet erfüllt.

Viel Arbeit wurde in die Homogenisierung der Reihen investiert. Es wurde erstmals in Österreich eine systematische Homogenisierung von Klimazeitreihen durchgeführt. Dafür wurden Programme entwickelt, die später zum ZAMG-System HOCLIS weiterentwickelt werden sollten - beschrieben u.a. in Peterson et al., 1998, Auer et al., 1999.

Den Punkten 3, 5 und 6 wurde in der Anfangsphase teilweise nachgekommen. Zeitreihenlücken wurden geschlossen, was die Analyse erleichtert, die Ausreißerkontrolle war nur marginal. Mit zwei Klimaelementen wurden die ersten Schritte in Richtung der Anforderung 5 getan. Auch Punkt 6 wurde teilweise erfüllt. Die beiden erwähnten Publikationen beschrieben den Datenhintergrund detailliert, die Daten wurden zunächst in zwei Arten („Modes“) aufbereitet – „original“ und „homogenisiert“. Noch in der frühen „Österreichperiode“ von HISTALP wurde für die beiden Klimaelemente ein erster „Grid-Mode“ produziert: An die 13 in Österreich liegenden geographischen Gitterpunkte im Abstand 1° Länge und Breite wurden Relativreihen interpoliert und analysiert (Auer und Böhm, 1994).

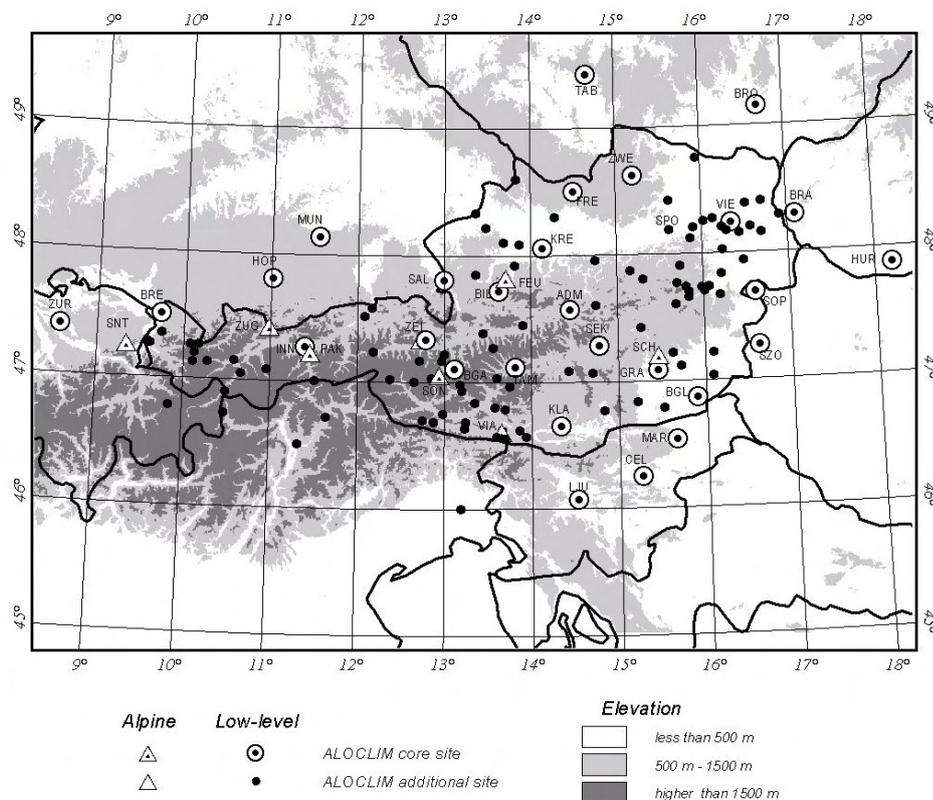
### **3. 1997-2001: Zusätzliche Klimaelemente – Beginn der internationalen Kooperation**

Ein nationales und ein internationales Forschungsprojekt (ALOCLIM - BMWF-GZ. 308.938/3-IV/B3/96, Auer et al., 2001a and b und ALPCLIM – EU-FP4 ENV4-CT97-0639, Auer et al., 2001c) unterstützten die nächsten Schritte in Richtung HISTALP.

Die ALOCLIM-Aktivitäten erweiterten die Region durch die Miteinbeziehung von grenznahen Langzeitreihen aus der Schweiz, aus Deutschland, Tschechien, Slowakei, Ungarn und Slowenien, und für einen Kern von 22 österreichischen und 14 ausländischen Stationen konnte durch die Erweiterung auf 7 Klimaelemente erstmals der Anforderung 5 in hohem Maß nachgekommen werden. Zusätzlich zu

Temperatur und Niederschlag wurden Langzeitreihen des Luftdrucks, der Sonnenscheindauer, der Bewölkung, der relativen Feuchte und des Dampfdrucks digitalisiert und homogenisiert. Erstmals wurden auch Metadaten systematisch in den Prozess der Homogenisierung einbezogen. Die dabei in unserer Gruppe entstandene Erfahrung konnte später auch in einen technischen Leitfaden der WMO eingebracht werden (Aguilar et al., 2003).

Im EU-Projekt ALPCLIM (Environmental and climate records from high elevation alpine glaciers) war die HISTALP-Gruppe zuständig für das klimatologische Subprojekt. Das wurde dazu genutzt, für die Klimaelemente Temperatur und Niederschlag den Arbeitsbereich von dem in Abb. 1 dargestellten erstmals auf die volle „Greater Alpine Region“ (GAR) auszudehnen, die die Alpen und ihre weitere Umgebung umfasst und von 4 bis 19°E und von 43 bis 49°N reicht. Dieser Bereich hat sich bis heute als GAR erhalten und ist mit dem aktuellen Stationsnetz in Abb.2 dargestellt. Das eigentliche Forschungsziel des Klimateils von ALPCLIM war, die in den Gipfelregionen von Mont Blanc und Monte Rosa gebohrten Eiskerne mit gemessener Klimainformation zur Kalibrierung der aus stabilen Isotopen abgeleiteten indirekten Klimadaten zu unterstützen (Schöner et al., 2002). Eine erste Langzeit-Klimanalyse des gesamten Alpenraums wurde von Böhm et al., 2001 publiziert, die auch die Homogenisierung am Beispiel des Klimaelements Temperatur beschrieb.



**Abb. 1.** Das ALOCLIM-Messnetz multipler Langzeitklimazeitreihen aus dem Jahr 2001 (Auer et al., 2001b)

#### 4. 2002-2007: Systematische Einführung des Begriffs HISTALP

Wieder waren es vor allem zwei Forschungsprojekte, die in erster Linie dazu beitrugen, die bisher aufgelaufene Fülle von Einzelergebnissen am instrumentellen Klima des Alpenraums zu einer „offiziellen“ gemeinsamen Datenbank zusammen zu fassen und in Hinkunft „HISTALP“ zu benennen – Historical Instrumental Climatological Surface Time Series of the Greater Alpine Region.

2002-2005 lief das österreichische FWF-Projekt CLIVALP (Climate Variability Studies in the Alpine Region, P 15076-N06) und erlaubte die Erarbeitung einer systematischen Datenbankstruktur, und einer erweiterten, gut beschriebenen und leicht zu bedienenden Programmsammlung zur Datenhandhabung, Prüfung, Homogenisierung, Outlier-Korrektur und zur Schließung von Datenlücken.

2003-2006 ermöglichte das EU-Projekt ALP-IMP (Multi-centennial climate variability in the Alps based on Instrumental data, Model simulations and Proxy data, EVK-CT-2002-00148) eine tiefere Verankerung von HISTALP in der internationalen Forschungslandschaft und eine Ergänzung durch die Erweiterung auf Modellsimulationen und auf indirekte Klimadaten (Proxies).

Beide Projekte kooperierten eng und brachten eine beachtliche „Ernte“ an Fachpublikationen sowohl im Hinblick auf Datenqualitätsfragen als auch auf Analysen dieser Daten:

Auer et al., 2007 beschreibt ausführlich den Datensatz selbst. Es wird systematisch auf die verschiedenen Datenarten (modes) eingegangen, nämlich

- „station-mode (alle Einzelreihen der in Abb. 2 sichtbaren Stationen) im Status „original“ (ori) und „homogenisiert“ (hom), für sieben verschiedene Klimaelemente,
- grid-mode-1 (Relativreihen der Temperatur, des Niederschlages und des Luftdrucks interpoliert an ein reguläres Gitternetz von 1° geographischer Länge und Breite,
- CRSM-mode (über die in Abb.2 gezeigten Unterregionen gemittelte Relativ-Zeitreihen)

Eine Reihe von Veröffentlichungen konzentrierten sich auf technische Aspekte vor allem im Bezug auf die Homogenisierung (Auer et al., 2003a, Ungersböck et al., 2003, Scheifinger et al., 2003, Böhm, 2004, Auer et al., 2004, Hiebl, 2006). Auer et al., 2005a unternahm dies exemplarisch und ausführlich für den Niederschlags-Subset. Efthymiadis et al., 2006 entwickelten für den Niederschlag einen ersten Datensatz in dem für die Zukunft als Ziel auch für andere Klimaelemente geplanten grid-mode-2, nämlich absolute Gitterpunktsdaten in hoher räumlicher Auflösung. Für den Niederschlag war dies realistisch für eine Auflösung von 1/6° geographischer Länge und Breite möglich. Van der Schrier et al., 2007 entwickelte daraus einen zweiten grid-2 Datensatz, und zwar einen des „Palmer Drought Severity Index“ (PDSI) für die GAR-Region. Beide decken den Zeitraum 1800 bis 2003 ab.

Erste klimatologische Analysen basierend auf HISTALP Daten veröffentlichten Wanner et al., 2003, Auer et al., 2003b, Böhm et al., 2003, Auer et al., 2005b, Brunetti et al., 2006, Böhm, 2006, Efthymiadis et al., 2007, Böhm and Auer, 2007. Matulla et al., 2005 unternahm eine vergleichende Analyse von HISTALP-CRSM-Reihen mit historischen Modellsimulationen, die vor allem auf die Fähigkeit globaler gekoppelter „state of the art“ Ozean-Atmosphären-Modelle abzielte, auch die interessanten Ausreißer vom Langzeittrend zu erfassen, wie etwa die kalten 1810er Jahre, die ozeanischen und niederschlagreichen 1910er, oder die heißen Sommer um 1950. Im kontinentalen Maßstab tun die Modelle das übrigens zufriedenstellen, im regionalen eher nicht.

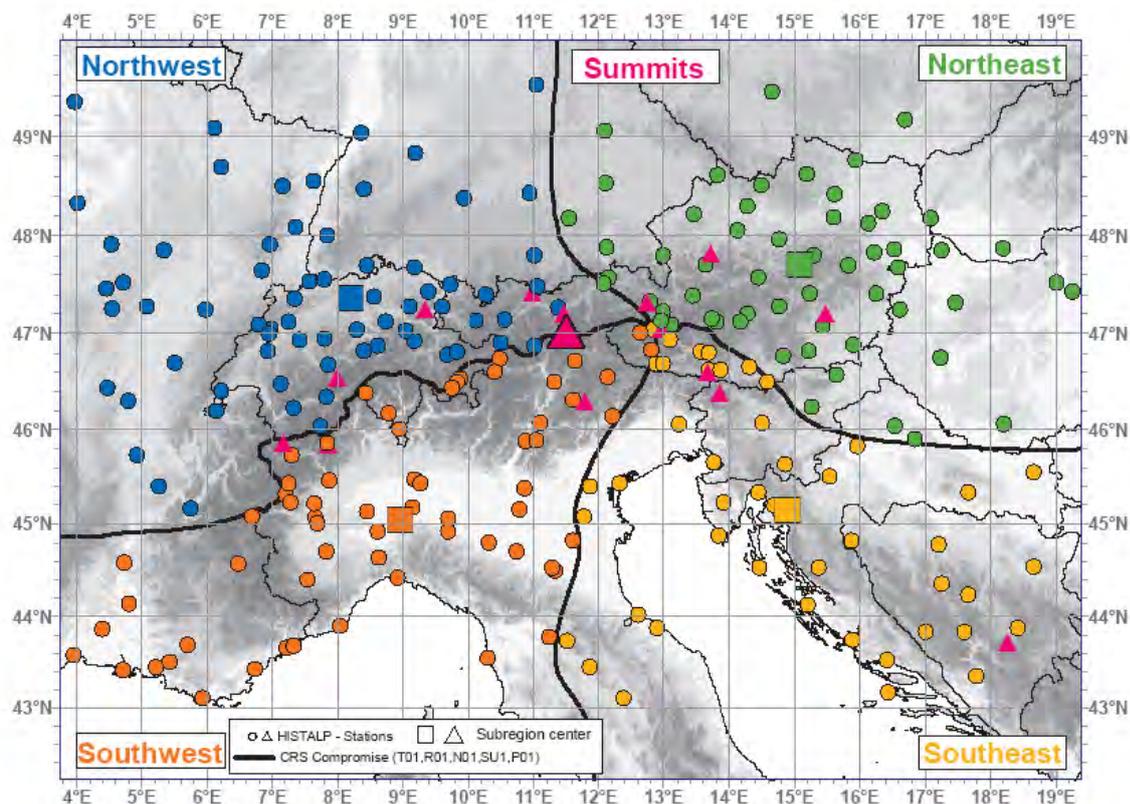
Eine größere Zahl von Studien benutzten die neue instrumentelle Datenquelle für die Kalibrierung und/oder die Co-Analyse mit natürlichen Proxies (indirekte Klimadaten abgeleitet aus Vorgängen in der Natur) und solchen aus schriftlichen historischen Quellen („documentary proxies“). Casty et al. 2005 benutzten HISTALP Daten für eine 500-jährige Rekonstruktion von Temperatur und Niederschlag in der Region. Vincent et al., 2005, Schöner und Böhm, 2007, Zemp et al., 2006, Zemp et al., 2007 integrierten HISTALP-Klimainformation in Gletscherstudien. Bereits seit den frühen 1990er Jahren existiert eine anhaltende Tradition der Verwendung von HISTALP-Daten für Untersuchungen an alpinen Seen vor allem durch die Limnologie Gruppen der Universität Innsbruck und der ÖAW in Mondsee. Im Vordergrund des Interesses von Psenner and Schmidt, 1992, Sommaruga et al, 1997, Koinig et al, 1998a, Koinig et al, 1998b, Koinig et al, 2002 stand und steht der Einfluss des Klimas auf biologische Prozesse in Alpenseen, manche davon mit einem Potenzial zur Nutzung für Klimarekonstruktionen.

Intensiv wurden und werden HISTALP Daten von der Baumring-Forschungs-Community verwendet. Allein zwischen 2005 und 2007 wurden von Wilson et al., 2005, Nicolussi et al., 2005, Frank et al., 2005, Büntgen et al., 2005, Frank and Esper, 2005a, Frank and Esper, 2005b, Carrer and Urbinati, 2006, Büntgen et al., 2006a, Büntgen et al., 2006b, Leal et al., 2007 and Frank et al., 2007 Fragen über die Rekonstruierbarkeit des Klimas aus Baumringen behandelt, Verbesserungen und Qualitätsanalysen vorgenommen, und es entstanden Langzeit-Rekonstruktionen des Alpenklimas zurück bis mehr als 1000 Jahre vor heute.

Intensiv genutzt für inter- und transdisziplinäre Anwendungen, also für den Dialog zwischen den Fachdisziplinen und auch für den zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit, wurden HISTALP Daten im ZAMG-BMWF-proVision Projekt „A tale of two valleys“ (<http://www.zamg.ac.at/a-tale-of-two-valleys>). Eines der Projektziele war, aus der Klimavergangenheit für die Zukunft zu lernen, und dabei die HISTALP-Reihen zu nutzen. Zurzeit wird an einem entsprechenden Buch gearbeitet, das die Projektergebnisse allgemein verständlich zusammenfasst. Es wird 2009 in der Reihe „alpine space – man&environment“ der „innsbruck university press“ erscheinen.

## 5. 2008: Update und eine erste Re-Analyse

Neben der Routine-Aktualisierung des Datensatzes wurde ein Teil des HISTALP-Temperaturdatensatzes einer tiefgreifenden Re-Analyse unterzogen, nämlich die 32 Temperaturreihen, die in der frühen Instrumentenperiode beginnen (vor den 1870ern). Erste Hinweise auf einen in dieser Zeit möglicherweise existierenden systematischen Fehler der historischen Messungen kamen von den gemeinsamen Untersuchungen an hochalpinen Baumringen, deren rekonstruierte Sommertemperaturen systematisch kühler waren, als die instrumentell gemessenen. Frank and Esper, 2005, Büntgen et al., 2006b, Frank et al., 2007 wiesen auf eine offenbar bestehende Entkopplung hin, und Hiebl, 2006 diskutierte das breiter und zwar auch unter Verwendung von historischen Modellsimulationen und von analogen Untersuchungen in Skandinavien. Als mögliche Ursache bei den instrumentellen Messdaten wurde eine ungenügende Abschirmung der Thermometer an den frühen Messstandorten diskutiert.



**Abb. 2.** Das aktuelle HISTALP-Netzwerk von ca. 200 Standorten und mehr als 500 einzelnen Klimazeitreihen. Zusätzlich ist die objektiv analysierte Regionalisierung nach Auer et al., 2007 durch unterschiedliche Farbgebung und Klima-Grenzlinien eingezeichnet

Böhm et al, 2009b schließlich verwendeten Langzeit-Parallelmessungen im Stift Kremsmünster an dem dort noch erhaltenen und aktiven historischen Messplatz - im Vergleich zur modernen automatischen Messanordnung, um daraus verallgemeinerungsfähige unterschiedliche Korrekturmodelle für diesen EIB (Early

Instrumental Bias) abzuleiten. Ein neuerliches intensives Metadatenstudium von historischen Stationsbeschreibungen der 32 Langzeitreihen ermöglichte die Anwendung dieser Korrekturmodelle auf diese wertvollen frühen instrumentellen Informationen im Großraum Alpen. Die EI-Bias-Korrektur machte die Temperaturen in der warmen Jahreszeit (April-September) im Schnitt um  $0.4^{\circ}\text{C}$  kühler und ließen die der kalten Jahreszeit (mit geringem Einfluss der Sonneneinstrahlung) weitestgehend gleich. Das verschob die Version 2008 der HISTALP Temperaturreihen zweifellos näher zur Wahrheit, und die EIB-Korrektur wurde auch in alle entsprechenden Gitterpunktsdaten hineingearbeitet.

Abb.2 zeigt das HISTALP Stationsnetz der Version 2008, zusammen mit der bereits besprochenen Regionalisierung. Diese Version steht zurzeit über die HISTALP-Website (siehe Titel dieses Beitrages) zur freien Verfügung. HISTALP wurde mit dem Jahr 2009 in das Routineprogramm der ZAMG aufgenommen und hat damit an Nachhaltigkeit gewonnen, da damit eine größere Unabhängigkeit von Zusatzfinanzierungen durch kurzfristige Forschungsprojekte gegeben ist. Es ist für die Zukunft eine regelmäßiges Update und auch eine ständige Erweiterung und Verbesserung geplant. Eine davon, die speziell für hydrologische Anwendung interessant ist, sei hier noch kurz vorgestellt.

## 6. Erste Schritte in Richtung Tagesdaten

Ein noch weitgehend offenes Problem auf dem Gebiet der Homogenisierung ist die Verwendung von Tages- und Subtagesdaten. Gerade diese stehen ja zurzeit sehr im Vordergrund des Interesses, da ja „der Klimawandel“ zu einer Intensivierung der extremen Ausformungen des Klimas (Wetters) führen soll. Gerade diese, meist kleinräumigen und kurzzeitigen Phänomene entziehen sich jedoch noch weitgehend einer Homogenisierung, und die wissenschaftlich saubere Behandlung vieler Fragestellungen über Trends der Extremwerte ist dadurch stark eingeschränkt. Warum das so ist, und welche Strategien dieses Defizit reduzieren sollen, sei hier als Ausblick auf die entsprechenden Pläne der „instrumentellen Klimarekonstrukteure“ besprochen und die gegenwärtigen Arbeiten daran skizziert.

Wohl die größte Diskrepanz zwischen harten wissenschaftlichen Fakten und deren Wahrnehmung durch die Öffentlichkeit besteht auf dem Gebiet der extremen Ausformungen des Klimas. Unter dem allgemein akzeptierten Schlagwort „das Klima wird immer verrückter“ hat sich ein Dogma festgesetzt, das gerade bei den weichsten Fakten ansetzt, die die klimatologische Wissenschaft derzeit (noch?) zu bieten hat. Weiche Faktenlage bei den Extremwerten herrscht sowohl bei der Klimarekonstruktion der Vergangenheit, als auch bei der Klimamodellierung – in beiden Fällen begründet durch eine Tatsache, die im Kapitel 8.5.4 des Working Group 1 Reports von IPCC-2007 (Model Simulation of Extremes) so beschrieben ist:

*Because most AOGCMs have coarse resolution and large-scale systematic errors, and extreme events tend to be short lived and have smaller spatial scales, it is somewhat surprising how well the models simulate the statistics of extreme events in the current climate, including the trends during the 20th century. This is especially true for the*

*temperature extremes, but intensity, frequency and distribution of extreme precipitation are less well simulated.*

Wir haben es absichtlich beim englischen Originaltext belassen, erstens um nicht den Vorwurf der Manipulation zu ermöglichen, zweitens aber weil diese Sprache es so gut erlaubt, Zwischentöne zu formulieren. Dieses „*somewhat surprising*“ und das „*less well*“ sind schon kleine Meisterstücke. Im Original des Textes, bevor der mühsame Prozess des „peer reviewings“ durchgeföhrt werden musste, war noch etwas direkter von „*serious deficiencies in the simulation of precipitation*“ die Rede, und zwar „*both in the intensity and the distribution of precipitation*“.

Im Hinblick auf die Analyse eventueller Trends von Extremwerten in der Vergangenheit kommen noch zwei zusätzliche Herausforderungen dazu. Zum einen erfordern die Gesetze der Statistik lange und räumlich dichte Zeitreihen, um zu signifikanten Ergebnissen zu kommen, gerade wenn die sehr seltenen sehr starken Ausreißer das Ziel der Analyse sind. Und genau diese langen Zeitreihen erfordern als *conditio sine qua non* die sorgfältige Homogenisierung dieser Zeitreihen. Wie wir zeigen konnten (Auer et al., 2007) erfährt eine durchschnittliche Klimazeitreihe im Durchschnitt alle 20 bis 30 Jahre eine Diskontinuität (Verlegung, Instrumenten- oder Technologiewechsel, Änderung der Umgebung und zahlreiche andere Gründe), deren Stärke das eigentliche Klimasignal erreichen oder auch übertreffen kann. Und gerade für die zur Analyse von „short lived“ Extremwerten besonders benötigten Klimazeitreihen von Tageswerten (oder noch kürzerer Zeitspannen) zeigen eine zweite Besonderheit der entsprechenden Feldverteilungen: Sie dekorrelieren räumlich viel stärker, als längerfristige Mittelwerte oder Summen. Gerade das Klimatelement Niederschlag ist in dieser Hinsicht sehr empfindlich. Wie wir im Zuge des oben erwähnten ALP-IMP Projekts zeigen konnten (Scheifinger et al., 2003), dekorrelieren die räumlichen Felder der Monats- bis Jahressummen des Niederschlages in Europa zwar erst in 100 bis 150km Entfernung auf 50% gemeinsame Varianz, die der Tagessummen jedoch bereits in etwa 40km. Damit genügt die bestehende Messnetzdichte (etwa die von HISTALP) zur Homogenisierung, für die ja immer gut korrelierte Referenzreihen vorhanden sein müssen, von Monats bis Jahreswerten, sie genügt jedoch (noch) nicht zur Behandlung von längeren Tageswertreihen. Das gilt sowohl international als auch für den Alpenraum oder Österreich. Für einige Subregionen Österreichs arbeitet unsere Gruppe gerade an der Erstellung räumlich dichter Tagesreihen für das 20. Jahrhundert. Das wurde innerhalb des internationalen Projekts FORALPS begonnen, in dem sich der von der ZAMG geleitete Projektteil WP-5 u.a. mit dieser Problematik befasste.

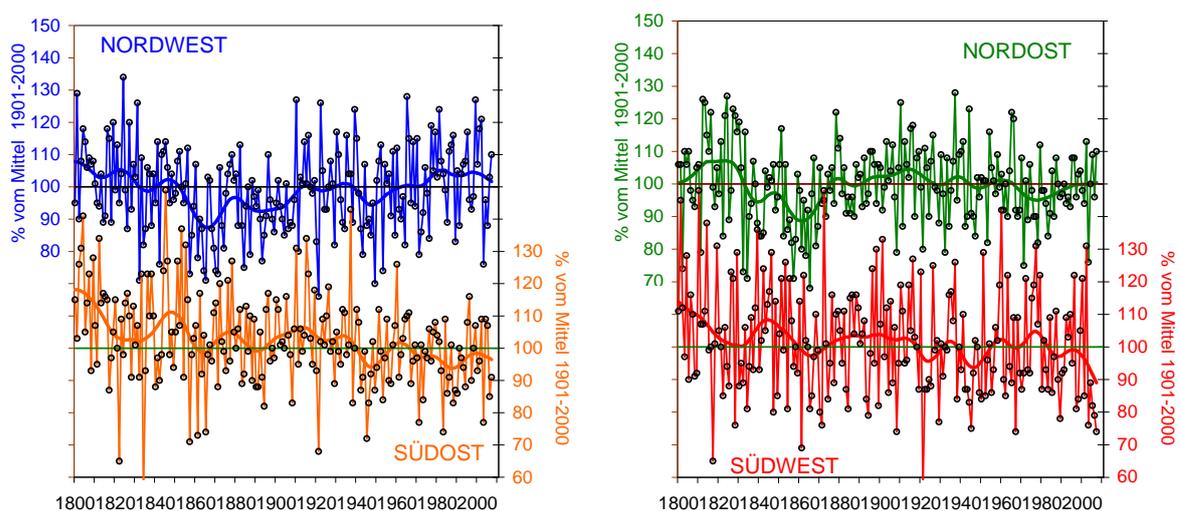
(<http://www.zamg.ac.at/forschung/klimatologie/klimawandel/foralps/>). Auf internationaler Ebene werden derzeit im Rahmen einer COST-Aktion die theoretischen Grundlagen der Problematik systematisch untersucht (COST-action ES-0601 HOME - Advances in homogenisation methods of climate series: an integrated approach, <http://www.homogenisation.org/>), auf nationaler Ebene unterstützt das BMWF die diesbezügliche Forschung im Rahmen interner ZAMG-Projekte. HOMDAY hat verschiedene Methoden verglichen und bewertet und HOM-OP Austria entwickelt ein

entsprechendes Programmpaket für den operationellen Gebrauch. Erste nachlesbare Ergebnisse aus diesem Bereich sind in Gruber et al., 2008, und Auer et al., 2008 zu finden.

Ein interessantes vorläufiges Ergebnis, das unsere laufenden diesbezüglichen Projekte erbracht haben bzw. gerade erbringen (Auer et al. 2008, Böhm, 2009a), ist, vor allem beim Niederschlag, der überraschend enge Zusammenhang zwischen Trends von Extremwertindizes auf Tagesbasis und den entsprechenden Trends von Mittelwerten, bis hinauf zu Jahresmitteln. Es scheint, zumindest für unsere Region, nicht so zu sein, dass Trends der Extremwerte auch in ganz andere Richtungen gehen können, als die der Mittelwerte.

## 7. Conclusio

Mit diesem Ausblick auf einen Teil unserer Pläne für die künftige Entwicklung von HISTALP können wir nur nochmals dazu einladen, diese nun leicht und frei benutzbare Qualitätsdatenbasis der Klimavariabilität im Großraum Alpen zu nutzen. Sollte Interesse bestehen, sowohl bei Fragen der Datenerstellung, als auch im Hinblick auf Analysen mit HISTALP Daten weiter in die Tiefe zu gehen, bietet dazu das Literaturverzeichnis Gelegenheit, das wir aus diesem Grund speziell ausführlich gestaltet haben. Sollten sich praktische Fragen über technische Probleme ergeben oder auch wissenschaftliche Vorschläge für vielleicht von uns nicht bedachte oder vorläufig noch nicht berücksichtigte Datenquellen oder Möglichkeiten der Aufbereitung, steht das HISTALP-Team zur Zusammenarbeit bereit. Es ist zurzeit mit dem Autorenteam dieser Veröffentlichung identisch.



**Abb. 3.:** Regionale Jahressummenreihen 1800-2007 des Niederschlages im Großraum Alpen. **links:** CRS-Nordwest (blau) und CRS-Südost (orange), **rechts:** CRS-Nordost (grün) und CRS-Südwest (rot). Einzeljahre und 30-jährig geglätteter Verlauf (Gauß'scher Tiefpassfilter), Relativwerte (in Prozent des Mittels des 20.Jahrhunderts). Zur Lage der Subregionen vergleiche Abb.2

Zum Abschluss sollen in Abbildung 3 die regionalen Niederschlagszeitreihen mit ihren im Alpenraum doch recht unterschiedlichen Langzeittrends und überlagerten dekadischen Entwicklungen der potenziellen Anwender-Community im Gebiet der Hydrologie „Geschmack“ auf unsere Datensammlung machen.

## 8. Literatur

Aguilar E, Auer I, Brunet M, Peterson TC, Wieringa J, 2003. Guidelines on Climate Metadata and Homogenization. World Climate Programme Data and Monitoring WCDMP **53**, WMO-TD **1186**, WMO. Geneva

Auer I, 1993. Niederschlagsschwankungen in Österreich. *Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik* **7**: 1-73  
Böhm R, 1992. Lufttemperaturschwankungen in Österreich seit 1775. *Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik* **5**:1-96

Auer I, Böhm R, 1994. Combined temperature-precipitation variations in Austria during the instrumental period. *Theoretical and Applied Climatology* **49**: 1-14

Auer I, Böhm R, Schöner W, 1999. ALOCLIM – Austrian-Central European long-term climate. Creation of a multiple homogenised long-term climate dataset. In: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> seminar for homogenisation of surface climatological data. Budapest, Nov.1998. WCDMP **41**, WMO-TD **962**: 47-71

Auer I, Böhm R, Schöner W, 2001a. Long Climatic Time Series from Austria. In: History and Climate – Memories of the Future? ed. by Jones PD, Ogilvie AEJ, Davies TD, Briffa KR. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 125-152

Auer I, Böhm R, and Schöner W, 2001b. Austrian long-term climate 1767-2000 – Multiple instrumental climate time series from Central Europe. *Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik*, **25**: 147 pages plus Data- and Metadata- CD

Auer I, Böhm R, and Schöner W, 2001c. Final report of EU-project ALPCLIM. Chapter 3: Instrumental Climate.

Auer I, Böhm R., Scheifinger H, Ungersböck M, Orlik A. and Jurkovic A. 2003a: Metadata and their role in homogenising. Fourth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases, Budapest, Hungary, 6-10 October 2003), WCDMP **56**, WMO-TD **1236**. 17-23, WMO Geneva

Auer I, R. Böhm R, Potzmann R, Ungersböck M, 2003b. Änderung der Frosthäufigkeit in Österreich. *Terra Nostra*, **2003**/6: 25-29

Auer I, Böhm R, Scheifinger H, Ungersböck M, Orlik A, Jurkovic A, 2004. Metadata and their role in homogenising. Proceedings of the Fourth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases, Budapest, Hungary, 6-10 October 2003), WCDMP-No.**56**, WMO-TD No.**1236**: 17-23, WMO Geneva

Auer I, Böhm R, Jurkovic A, Orlik A, Potzmann R, Schöner W, Ungersböck M, Brunetti M, Nanni T, Maugeri M, Briffa K, Jones P, Efthymiadis D, Mestre O, Moisselin JM, Begert M, Brazdil R, Bochnicek O, Cegnar T, Gajic-Capka M, Zaninovic K, Majstorovic Z, Szalai S, Szentimrey T, 2005a. A new instrumental precipitation dataset in the greater alpine region for the period 1800-2002. *International Journal of Climatology* **25**: 139-166

Auer I, Matulla C, Böhm R, Ungersböck M, Maugeri M, Nanni T, Pastorelli R, 2005b. Sensitivity of frost occurrence to temperature variability in the European Alps. *International Journal of Climatology* **25**: 1749-1766

Auer I, Böhm R, Jurkovic A, Lipa W, Orlik A, Potzmann R, Schöner W, Ungersböck M, Matulla C, Briffa K, Jones PD, Efthymiadis D, Brunetti M, Nanni T, Maugeri M, Mercalli L, Mestre O, Moisselin J-M, Begert M, Müller-Westermeier G, Kveton V, Bochnicek O, Stastny P, Lapin M, Szalai S, Szentimrey T, Cegnar T, Dolinar M, Gajic-Capka M, Zaninovic K, Majstorovic Z, Nieplova E, 2007. HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. *International Journal of Climatology* **27**: 17-46

Auer I, Jurkovic A, Orlik A, Böhm R, Korus E, Sulis A, Marchetti A, Manenti C, Dolinar M, Nadbath M, Vertacnik G, Vicar Z, Pavcic B, Geier G, Rossi G, Leichtfried A, Schellander H, Gabl K, Zardi D. 2008. High quality climate data for the assessment of Alpine climate, its variability and change on regional scale - Collection and analysis of historical climatological data and metadata Final Report FORALPS WP5: Meteo – Hydrological Forecast and Observations for improved Water Resource Management in the Alps WP 5 Data Set.

<http://www.zamg.ac.at/forschung/klimatologie/klimawandel/foralps/>

Böhm R, Auer I, Brunetti M, Maugeri M, Nanni T, Schöner W, 2001. Regional temperature variability in the European Alps 1760-1998 from homogenized instrumental time series. *International Journal of Climatology* **21**: 1779-1801

Böhm R, Auer I, Schöner W, Ungersböck M, Huhle C, Nanni T, Brunetti M, Maugeri M, Mercalli L, Gajic-Capka M, Zaninovic K, Szalai S, Szentimrey T, Cegnar T, Bochnicek O, Begert M, Mestre O, Moisselin JM, Müller-Westermeier G, Majstorovic Z. 2003. Der Alpine Niederschlagsdipol – ein dominierendes Schwankungsmuster der Klimavariabilität in den Scales 100 km – 100 Jahre. *Terra Nostra*, **2003/6**: 61-65

Böhm, R, 2004. Systematische Rekonstruktion von zweieinhalb Jahrhunderten instrumentellem Klima in der größeren Alpenregion – ein Statusbericht. In: Gamerith W, Messerli P, Meusburger P, Wanner H (Hrsg.) (2004): Alpenwelt – Gebirgswelten. Inseln, Brücken, Grenzen. Tagungsbericht und wissenschaftliche Abhandlungen zum 54. Deutscher Geographentag, Bern 2003. 28.9. bis 4.10.2003. – Heidelberg, Bern. 121-131

Böhm R, 2006. Reconstructing the climate of the 250 years of instrumental records at the northern border of the Mediterranean (the Alps). *Il Nuovo Cimento* **29C** N1 13-20

Böhm R, Auer I. 2007. 250 Jahre Klimavariabilität in den Alpen. Wiener Mitteilungen **206**: 17 – 28

Böhm R, 2009a. Klimarekonstruktion in der instrumentellen Periode – Probleme und Lösungen für den Großraum Alpen. In: Psenner R, Lackner R, Borsdorf A (eds.) Klimawandel in Österreich – Die letzten 20.000 Jahre...und ein Blick voraus. *alpine space – man & environment* **6**: 145-164

Böhm R, Jones PD, Hiebl J, Frank D, Brunetti M, Maugeri M, 2009b. The early instrumental warm-bias: a solution for long central european temperature series 1760-2007. *Climatic Change*. (special edition of the Millennium-project) accepted

- Brunetti M, Maugeri M, Nanni T, Auer I, Böhm R, Schöner W, 2006. Precipitation variability and changes in the greater alpine region over the 1800-2003 period. *Journal of Geophysical Research*, **111**: doi: 10.1029/2005JD006674
- Büntgen U, Esper J, Frank D, Nicolussi K, Schmidhalter M, 2005. A 1052-year tree-ring proxy for Alpine summer temperatures. *Climate Dynamics* **25**: 141–153
- Büntgen U, Frank D, Schmidhalter M, Neuwirth B, Seifert M, Esper J, 2006a. Growth/climate response shift in a long subalpine spruce chronology. *Trees* **20**: 99–110
- Büntgen U, Frank DC, Nievergelt D, Esper J, 2006b. Summer temperature variations in the European Alps: AD 755-2004. *Journal of Climate* **19**: 5606-5623
- Carrer M, Urbinati C, 2006. Long-term change in the sensitivity of tree-ring growth to climate forcing in *Larix deciduas*. *New Phytologist* (2006) doi: 10.1111/j.1469-8137.2006.01703.x
- Casty C, Wanner H, Lutherbacher J, Esper J, Böhm R, 2005. Temperature and precipitation variability in the European Alps since 1500. *International Journal of Climatology* **25**: 1855-1880
- Efthymiadis, D, Jones PD, Briffa KR, Auer I, Böhm R, Schöner W, Frei C, Schmidli J 2006. Construction of a 10-min-gridded precipitation data set for the Greater Alpine Region for 1800–2003, *J. Geophys. Res.*, **111**: D01105, doi:10.1029/2005JD006120
- Efthymiadis D, Jones PD, Briffa K, Böhm R, Maugeri M, 2007. Influence of large-scale atmospheric circulation on climate variability in the Greater Alpine Region of Europe. *Journal of Geophysical Research* **112**: D12104, doi: 10.1029/2006JD008021
- Frank D and Esper J, 2005a. Temperature reconstructions and comparisons with instrumental data from a tree-ring network for the European Alps. *International Journal of Climatology* **25**: 1437–1454
- Frank D and Esper J, 2005b. Characterization and climate response patterns of a high-elevation, multi-species tree-ring network in the European Alps. *Dendrochronologia* **22**: 107-121
- Frank D, Wilson R, Esper J, 2005. Synchronous variability changes in Alpine temperature and tree-ring data over the past two centuries. *Boreas* **34**: 498–505
- Frank D, Büntgen U, Böhm R, Maugeri M, Esper J, 2007. Warmer early instrumental measurements versus colder reconstructed temperatures: shooting at a moving target. *Quaternary Science Reviews* **26**: 3298-3310
- Gruber C, Auer I, Jurković A 2008 Endbericht HOMDAY - Auswahl eines Verfahrens zur Homogenisierung von täglichen Klimadaten als notwendige Grundvoraussetzung zur Analyse von täglichen Klimazeitreihen in Hinblick auf „Climate Change“. 28 Seiten plus 8 Annexe
- Hiebl J, 2006. The early instrumental climate period (1760-1860) in Europe. Evidence from the Alpine region and Southern Scandinavia. Diploma thesis, Geogr Inst, University of Vienna, 103 pages
- Leal S, Melvin TM, Grabner M, Wimmer R, Briffa KR, 2007. Tree-ring growth variability in the Austrian Alps: the influence of site, altitude, tree species and climate.

- Boreas* **36**: 426-440 Koinig KA, Schmidt R, Sommaruga-Wögrath S, Tessadri R, Psenner R, 1998a. Climate change as the primary cause for pH shifts in a high alpine lake. *Water, Air, and Soil Pollution* **104**: 167–180
- Koinig KA, Sommaruga-Wögrath S, Schmidt R, Tessadri R, Psenner R, 1998b. Acidification processes in high alpine lakes. In: Haigh MJ, Krecek J, Rajjwar GS, Kilmartin MP (eds). *Headwaters: Water Resources and Soil Conservation*. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, 45-54
- Koinig K, Kamenik C, Schmidt R, Agusti-Panareda A, Appleby P, 2002. Environmental changes in an alpine lake (Gossenköllesee, Austria) over the last two centuries – the influence of air temperature on biological parameters. *Journal of Paleolimnology* **28**: 147–160
- Matulla C, Auer I, Böhm R, Ungersböck M, Schöner W, Wagner S, Zorita E, 2005. Outstanding past decadal-scale climate events in the Greater Alpine Region analysed by 250 years data and model runs. *GKSS-Report* **2005/4**
- Nicolussi K, Kaufmann M, Patzelt G, van der Plicht J, Thurner A, 2005. Holocene tree-line variability in the Kauner Valley, Central Eastern Alps, indicated by dendrochronological analysis of living trees and subfossil logs. *Vegetation History Archaeobotany* **14**: DOI 10.1007/s00334-005-0013-y
- Peterson TC, Easterling DR, Karl TR, Groisman P, Auer I, Böhm R, Plummer N, Nicholis N, Torok S, Vincent L, Tuomenvirta H, Salinger J, Förland EJ, Hanssen-Bauer I, Alexandersson H, Jones P, Parker D, 1998. Homogeneity Adjustments of In Situ Climate Data: A Review. *International Journal of Climatology*, **18**: 1493-1517
- Psenner R, Schmidt R, 1992. Climate-driven pH control of remote alpine lakes and effects of acid deposition. *Nature* **356**: 781-783
- Scheifinger H, Böhm R, Auer I, 2003. Räumliche Dekorrelation von Klimazeitreihen unterschiedlicher zeitlicher Auflösung und ihre Bedeutung für ihre Homogenisierbarkeit und die Repräsentativität von Ergebnissen. *Terra Nostra*, **2003/6**: 375-379
- Schöner W, Auer I, Böhm R, Keck L, Wagenbach D, 2002. Spatial representativity of air temperature information from instrumental and ice core based isotope records in the European Alps. *Annals of Glaciology* **35**: 157-161
- Schöner W, Böhm R, 2007. A statistical mass balance model for reconstruction of LIA ice mass for glaciers in the European Alps. *Annals of Glaciology* **46**: 161-169
- van der Schrier G, Efthymiadis D, Briffa KR, Jones PD, 2007. European Alpine moisture variability for 1800-2003. *International Journal of Climatology* **27**: 415-427
- Sommaruga-Wögrath S, Koinig KA, Schmidt R, Sommaruga R, Tessadri R, Psenner R, 1997. Temperature effect on the acidity of remote alpine lakes. *Nature* **387**: 64-67
- Ungersböck M, Orlik A, Jurkovic A. 2003. HISTALP – eine Datenbank zur kombinierten Erfassung von historischen Klimazeitreihen und deren Metadaten. *Terra Nostra* **2003/6**: 450-452.
- Vincent C, Le Meur E, Six D, Funk M, 2005. Solving the paradox of the end of the Little Ice Age in the Alps. *Geophysical Research Abstracts* **32/9**

Wanner H, Lutherbacher J, Casty C, Böhm R, Xoplaki E, 2003. Variabilität von Temperatur und Niederschlag in den Europäischen Alpen seit 1500. In: Jeanneret F, Wastl-Walter D, Wiesmann U, Schwyn M (Hrsg.), 2003. *Welt der Alpen – Gebirge der Welt. Ressourcen, Akteure, Perspektiven*. Haupt Verlag, Bern, Stuttgart, Wien. 61-76

Wilson, R, Frank D., Topham J., Nicolussi K, Esper, J, 2005. Spatial reconstruction of summer temperatures in Central Europe for the last 500 years using annually resolved proxy records: problems and opportunities. *Boreas* **34**: 490–497

Zemp M, Haeberli W, Hoelzle M, Paul F, 2006. Alpine glaciers to disappear within decades? *Geophysical Research Letters* **33**: L13504, doi:10.1029/2006GL026319

Zemp M, Hoelzle M, Haeberli W, 2007. Distributed modeling of the regional climatic equilibrium line altitude of glaciers in the European Alps. *Global and Planetary Change* **56**: 83-100

**Korrespondenz an:**

**Dr. Reinhard Böhm**

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

Hohe Warte 38,

A-1190 Wien

Email: reinhard.boehm@zamg.ac.at

Web: <http://www.zamg.ac.at/histalp>

## HOCHWASSERAUSLÖSENDE PROZESSE

Robert Kirnbauer, Bernhard Kohl und Gerhard Markart

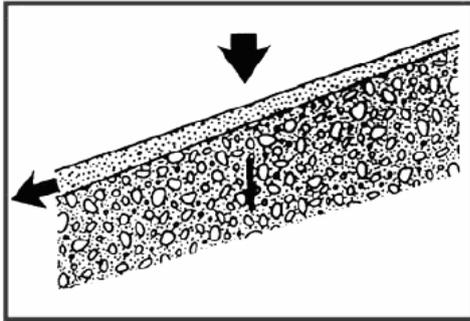
### 1. Einleitung

Die Abflussentstehung, auch in den Oberläufen der Gewässer, ist ein so komplizierter, vielparametrischer Prozess, dass er auch heute noch intensiv beforscht wird. Ein ganz wesentliches Merkmal der Abflussentstehung ist ihre Heterogenität im Raum und ihre Variabilität in der Zeit. In den Sechziger und frühen Siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts, z.B. in der Ersten Internationalen Hydrologischen Dekade 1965 bis 1974, sind Konzepte entwickelt worden, die in den meisten weit verbreiteten operationellen, als kommerzielle Software oder freeware erhältlichen Niederschlag-Abfluss-Modellen den Kern der Berechnungsroutinen bilden. Weit verbreitet ist z.B. das Konzept der variablen beitragenden Fläche (Dunne&Black, 1970; Beven& Kirkby, 1979) bzw., für den ober- wie unterirdischen Abfluss das Konzept des Linearspeichers bzw. der Speicherkaskade (Nash, 1958). Gerade das Zusammenspiel der ober- bzw. unterirdischen Abflussanteile ist Gegenstand weltweiter Forschung (McDonnell, 2009).

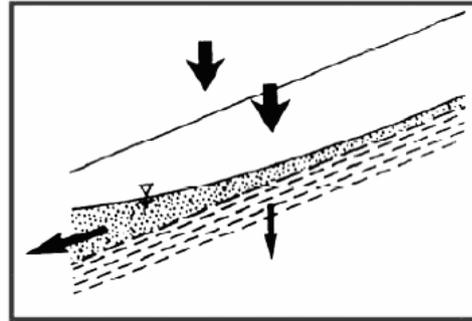
In der folgenden Darstellung (Abb. 1) werden Gedankenmodelle und Schemata zu Abflussprozessen zusammengestellt. Während die an der Geländeoberfläche ablaufenden Prozesse wenigstens optisch beobachtbar sind, entziehen sich die unterirdisch ablaufenden Vorgänge a priori jeglicher Beobachtbarkeit. Aus optischen Beobachtungen und auch aus quantifizierenden Messungen von oberflächlich abfließendem Wasser lassen sich jedoch nur in Ausnahmefällen Schlüsse auf dessen Herkunft ziehen.

In der Folge wird über Versuche berichtet, diese Prozesse experimentell nachzuweisen und zu quantifizieren. Hierbei folgen wir dem Weg vom Standort über die Testfläche, das kleine Einzugsgebiet (1 – 5 km<sup>2</sup>) zum mesoskaligen Gebiet (150 km<sup>2</sup> und größer). Grundsätzlich sind solche Untersuchungen geeignet zur Schaffung der Datengrundlage für flächendetaillierte Modelle und zur Verifikation / Falsifikation von Modellkonzepten. Es kann aber auch gezeigt werden, dass das Abflussverhalten von Gewässern aus anderen Naturräumen als jenem des Untersuchungsgebietes (Grauwackenzone), mit den hier gefundenen Modellansätzen plausibel erklärt werden kann.

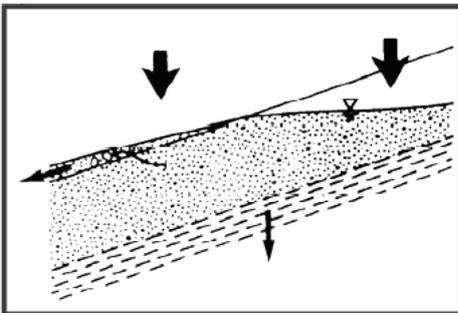
HORTON-  
Oberflächenfließen



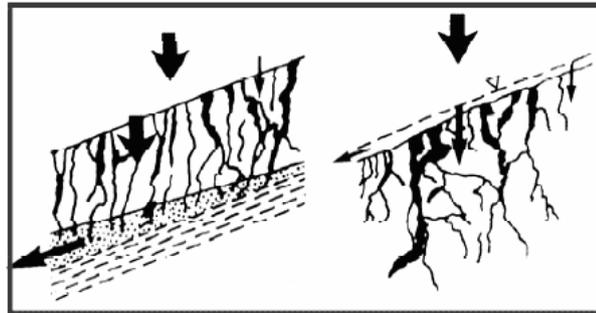
DUNNE-  
oberflächennaher  
Bodenabfluss



Sättigungsflächenabfluss

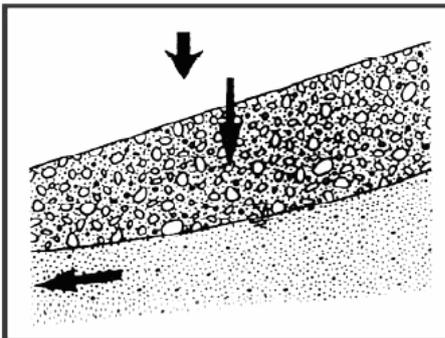


Makroporenabfluss



bevorzugte  
Fließwege

Grundwasserabfluss



Sättigungsflächen-  
ausbildung über  
dem Kapillarsaum

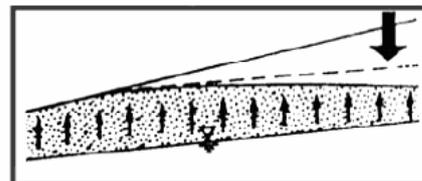


Abb. 1: Studienblatt „AbflusSENTSTEHUNG“ zur Vorlesung „Ingenieurhydrologie“ an der TU Wien (Gutknecht und Blöschl, 2006)

## 2. Experimentelle Abflussuntersuchungen am Standort

### 2.1 Beregnungsexperimente und Begleituntersuchungen

Seit annähernd 3 Jahrzehnten werden am Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen beim BFW und am Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft in München zur Charakterisierung des Abflussverhaltens beitragender Flächen in Wildbacheinzugsgebieten Starkregensimulationen und begleitende Untersuchungen, wie Erhebungen boden- und vegetationskundlicher Kennwerte durchgeführt. Die Ergebnisse von mittlerweile über 700 Einzelberegnungen wurden in einer gemeinsamen Datenbank zusammengeführt und ausgewertet. Abbildung 2 zeigt exemplarisch zwei Beregnungsstandorte während der Starkregensimulation.



**Abb. 2:** Regensimulationen

Generell ist es bei Regensimulationen extrem schwierig, natürliche Starkniederschläge in ihrer zeitlichen Verteilung nachzubilden. Bei den Regensimulationen des BFW werden i.d.R. Blockregen definierter Intensität (10 - 120 mm/h) bis zum Erreichen eines konstanten Verhältnisses zwischen Niederschlag und Abfluss (Abflusskonstanz) aufgebracht. Mit der in Abbildung 2 gezeigten Anlage werden jedoch weder die kinetische Energie des Niederschlages bei Starkregen noch die entsprechende Tropfengröße erreicht. Für die exakte Nachbildung dieser Eigenschaften wären wesentlich aufwendigere Beregnungsanlagen notwendig (ca. 8 m Fallhöhe, aufwendiges System zur Erzeugung großer Tropfen). Dieser Aufwand würde den Vorteil der derzeit in Verwendung befindlichen Anlage - die einfache Konzeption und hohe Mobilität - zunichte machen, d.h. prozessrelevante Standorte könnten nicht bzw. nur unter wesentlich höherem Arbeits- und Kosteneinsatz untersucht werden.

Meteorologische und saisonale Vorbedingungen der Testflächen können i.d.R. nur mit Einschränkungen vordefiniert bzw. bei der Durchführung von Versuchsreihen nicht konstant gehalten werden. Daher ist eine exakte Dokumentation der Standortseigenschaften und Versuchsrandbedingungen essentiell (Dokumentation der Bodenfeuchte vor, während und nach der Beregnung; Erfassung bodenphysikalischer

Kennwerte, Beschreibung der Vegetation, Quantifizierung der Bestandesbiomasse, Art und Intensität der Nutzung, etc.).

Bei der experimentellen Abflussuntersuchung auf der Plot-Skala ist die Konzentrationszeit von besonderer Bedeutung. Bei künstlicher Beregnung lässt sich die Konzentrationszeit ermitteln als Zeitspanne von Beregnungsanfang bis zum Augenblick, in dem ein Gleichgewichtszustand zwischen Zufluss und Abfluss (= Abflusskonstanz) erreicht wird (Sifalda, 1996). Standortwirkungen, wie Interzeption, Evaporation, Muldenretention, Speicherung im Boden, Transpiration, u.a. verzögern in unterschiedlichem Maße die Abflussbildung und werden im Begriff „Summe der initialen Verluste“ zusammengefasst. Diese Prozesse sind unabdingbar mit den Vorbedingungen verknüpft, ebenso wie der Abflussbeiwert.

Der Begriff Abflussbeiwert birgt das Potential missverständlicher Verwendung. Man muss den **Gesamtabflussbeiwert** ( $\psi_{\text{tot}}$ ), als Quotienten aus dem Teil eines Niederschlagsereignisses, der direkt zum Abfluss ( $A_0$ ) gelangt (effektiver Niederschlag) und dem Gesamtniederschlag ( $N$ ), vom **Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz** ( $\psi_{\text{const}}$ ) unterscheiden. Dieser kann, da er von den Vorbedingungen unabhängig ist, zum Vergleich unterschiedlicher hydrologischer Reaktionseinheiten innerhalb und außerhalb des Einzugsgebietes herangezogen werden.

Ein erstes Produkt der Auswertungen der Beregnungsdatenbank ist die „Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes bei konvektiven Starkregen“ (Markart et al. 2004, Markart et al. 2006). Sie ist die Basis für die Erstellung von Abflussbeiwertkarten zur Berechnung von Abflussspitze und Abflussfracht beim Bemessungsereignis in Wildbach-einzugsgebieten. Neben der Anleitung für die quantitative und qualitative Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes, enthält die gegenständliche Anleitung auch einen Ansatz zur Anschließung der für die Ermittlung der Fließzeiten notwendigen Rauigkeit der Oberfläche.

Dieses Dokument steht zum freien Download zur allgemeinen Verfügung (<http://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=4342>).

Die Abflussprozesse selbst, sei es Oberflächenabfluss, oberflächennaher oder tiefgründiger Interflow, werden quantitativ in Form von Abflussganglinien erfasst. Über verschiedene Messanordnungen – z.B. quantitative Bestimmung des Oberflächenabflusses und des Abtrages bei natürlichen oder künstlichen Niederschlägen oder Erfassung des Interflows über experimentelle Versuchsanordnungen im Feld bzw. indirekt unter Einsatz von Methoden der Tracerhydrologie unter Verwendung von TDR, Leitfähigkeitsmessgeräten, Geoelektrik u.a. erlauben qualitative und quantitative Aussagen zum jeweiligen Abflussprozess (Markart et al. 2008, Weiler et al. 1998).

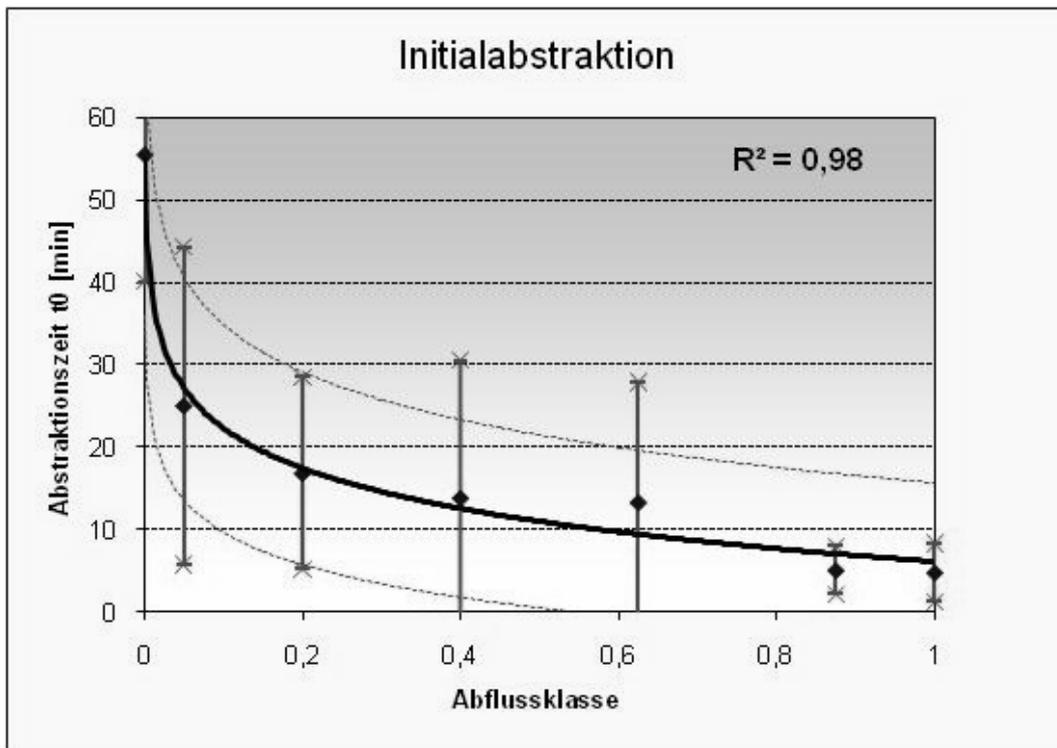
## 2.2 Vorbedingungen: Vorfeuchte – Initialabstraktion

Der Systemzustand (die Vorbedingungen) modifiziert die Abflussreaktion. Initial vorhandene Speicher müssen erst gefüllt und überwunden werden ehe die Abflussbildung einsetzt. Die Verzögerungszeit als Funktion der Summe freier initialer Speicher wird im Beregnungsexperiment gemessen. Das am BFW vorhandene Kollektiv an Beregnungen umfasst Untersuchungen bei sehr trockenen bis zu extrem feuchten Vorbedingungen, also auch bei Randbedingungen deren Auftreten in natura als sehr unwahrscheinlich anzusehen ist. Beispielsweise wurden Standorte zu Vergleichszwecken mit unterschiedlichen Beregnungsanlagen oder unterschiedlicher Regenintensität wiederholt beregnet (100 mm/h, 60 mm/h, 30 mm/h). Auf abflussstüchtigen Standorten liegt bei solchen Wiederholungen die Abstraktionszeit nahe dem Wert Null.

Die Auswertung von 254 Beregnungen am Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen des BFW in Innsbruck zeigt, dass ein Zusammenhang zwischen Abflussbeiwert in Sättigung und Initialabstraktion abgeleitet werden kann. Abbildung 3 illustriert diese Beziehung zwischen Abstraktionszeit und Abflussbeiwertklasse. Der Sättigungsabflussbeiwert ist also indirekt ein Maß für die Pufferzeit. Selbst Standorte mit Sättigungsflächenabfluss bei hoher Vorsättigung (z.B. Feuchtfelder, Hangmoore) verfügen über eine geringe Pufferzeit von durchschnittlich 5 Minuten.

Diese mittlere durchschnittliche Abstraktionszeit, die wie erwähnt sowohl trockene wie nasse extreme Vorbedingungen beinhaltet definieren wir als „Realistisches Worst Case Szenario“ im Sinne der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von hochwasser-auslösenden Niederschlägen. Welchen Anteil Speicher und Infiltration innerhalb der Initialabstraktion einnehmen kann anhand von Bodenfeuchtedaten, maximaler Infiltrationsrate und den bodenphysikalischen Parametern (Porenvolumina,  $k_F$ -Wert, ...) abgeleitet werden. Für Standorte, an denen kein Oberflächenabfluss gemessen wurde, deren Infiltrationskapazität jedoch höher als die applizierte Regenintensität liegt und ihre Abstraktionszeit unbegrenzt sein kann, wurde die Initialabstraktion gleich der Regendauer festgelegt.

Hydrologische Reaktionseinheiten werden nach dem System von Markart et al. (2004) verschiedenen Abflussbeiwertklassen zugeordnet. An Standorten der Abflussbeiwertklasse 1 ( $\psi_{\text{const}} = 0$  bis 0,1), wird ein Starkregen durchschnittlich 28 Minuten lang gepuffert. An Standorten mit höherer Abflussbereitschaft (z.B. Abflussklasse 3,  $\psi_{\text{const}} = 0,3$  bis 0,5) reduziert sich dieser Zeitraum bereits auf 15 min.



**Abb. 3:** Initialabstraktion vs. Abflussklasse / Abflussbeiwert Mittlere Abstraktionszeit (= „Realistisches Worst Case Szenario“) von Beregnungsstandorten (n=254) gruppiert nach Abflussbeiwertklassen (System nach Markart et al. 2004) mit Bandbreiten feuchter und trockener Vorbedingungen.

### 2.3 Unterscheidung und Quantifizierung von Abflussprozessen am Standort

Ist die Initialabstraktion einmal überwunden, kann der Abflussprozess direkt beobachtet und gemessen werden. Mit der am BFW verwendeten Versuchsanordnung kann der Abfluss unterhalb der Testfläche in unterschiedlichen Tiefen (an der Oberfläche, oberflächennah, in verschiedenen Bodentiefen, z.B. direkt unter Abfluss führenden Schichten oder Makroporen, z.B. Mauslöchern, Wurzelröhren) gesammelt und quantifiziert werden. Bei manchen Boden-/Vegetationskomplexen ist eine exakte Abtrennung zwischen Oberflächenabfluss und oberflächennahem Zwischenabfluss nicht möglich. An solchen Standorten, z.B. manchen Waldböden mit geringmächtiger durchlässiger Humusaufgabe werden beide Komponenten gemeinsam erfasst.

Der Begriff Oberflächenabfluss suggeriert ein Fließen auf der Fläche, häufig als „Sheet Flow“ bezeichnet. Dieser bezeichnet aber nur jenen Anteil des Wassers, der sich mit sehr geringen Fließhöhen auf der Oberfläche fortbewegt bevor er Tiefenlinien bzw. Kanäle, die lineares Fließen erlauben, erreicht ([http://www.msu-water.msu.edu/asp/glossary-menu.asp?st\\_id=34](http://www.msu-water.msu.edu/asp/glossary-menu.asp?st_id=34)).

Im Alpenraum ist ein solches flächiges Fließen im geeigneten Gelände nur auf kurzen Fließstrecken von wenigen Metern zu beobachten. Das Kleinrelief des Geländes führt selbst an homogen und für das menschliche Auge sehr ausgeglichen erscheinenden Standorten rasch zur Abflusskonzentration, wie in Abbildung 4a) und c) ersichtlich.

Neben der Abflussmenge ist vor allem die Abflussgeschwindigkeit für die Hochwasserentstehung von entscheidender Bedeutung. Unterschiedliche Rauigkeiten an der Oberfläche und Durchgängigkeit der Poren im Boden verzögern den Abflussprozess. Mittels Salz- und Farbtracern können Abstandsgeschwindigkeiten gemessen und daraus der Widerstand bzw. die Rauheit der jeweiligen Vegetations-/Bodeneinheit berechnet werden.



**Abb. 4:** Messung der Abflussgeschwindigkeit: a) und c) rascher Oberflächenabfluss, b) langsamer Interflow, d) rascher Interflow – Channel flow

#### 2.4 Die Bedeutung des Oberflächenabflusses bei Starkregen

Oberflächenabfluss kommt zustande, wenn die Infiltrationsintensität kleiner ist als die Regenintensität (z.B. aufgrund von Infiltrationshemmnissen – Hortonian Overland Flow) oder wenn die obere Bodenzone mit Wasser gesättigt ist (Saturation Overland Flow - Spraeffico et al. 2003). Im ersten Fall spricht man von Oberflächenabfluss infolge Infiltrationsüberschuss, im zweiten Fall von Sättigungsüberschuss. Da die Infiltrationsrate zwar keine Konstante, jedoch begrenzt ist, nimmt die Bedeutung des Oberflächenabflusses mit der Niederschlagsintensität zu.

Bei Starkregensimulationen wird aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse gerne eine Standard-Beregnungsintensität von 100 mm/h verwendet. Im Beregnungskollektiv des Instituts für Naturgefahren (BFW) finden sich derzeit 160 Standorte,

welche mit diesem Standardregen mit einer Mindestregendauer von einer Stunde, wenn möglich bis zum Erreichen der Abflusskonstanz, berechnet wurden. Die Testflächen umfassen die gebietsrepräsentativen Boden-/Vegetationskomplexe in den verschiedenen bearbeiteten Wildbacheinzugsgebieten. Der Abflussbeiwert bei einer Regenintensität von 100 mm/h ( $\psi_{const100}$ ) bzw. die Häufigkeit seines Auftretens dieser Standorte ist in Abbildung 5 dargestellt, klassifiziert nach dem Schema von Markart et al. (2004).

Auf fast 80% der untersuchten Flächen entsteht Oberflächenabfluss, auf 41 % der Flächen überschreitet  $\psi_{const100}$  den Wert 0,5. Aus dieser Auswertung wird die Bedeutung von Oberflächenabfluss in Einzugsgebieten des Ostalpenraumes bei Starkregen deutlich erkennbar.

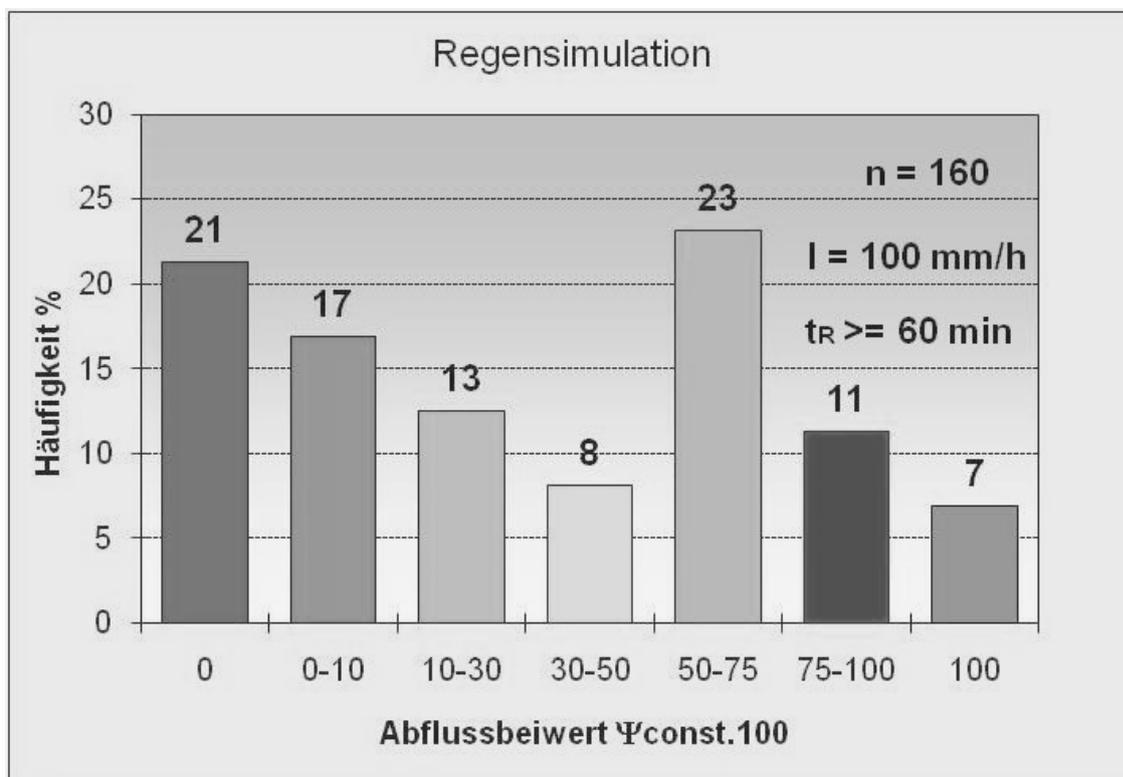
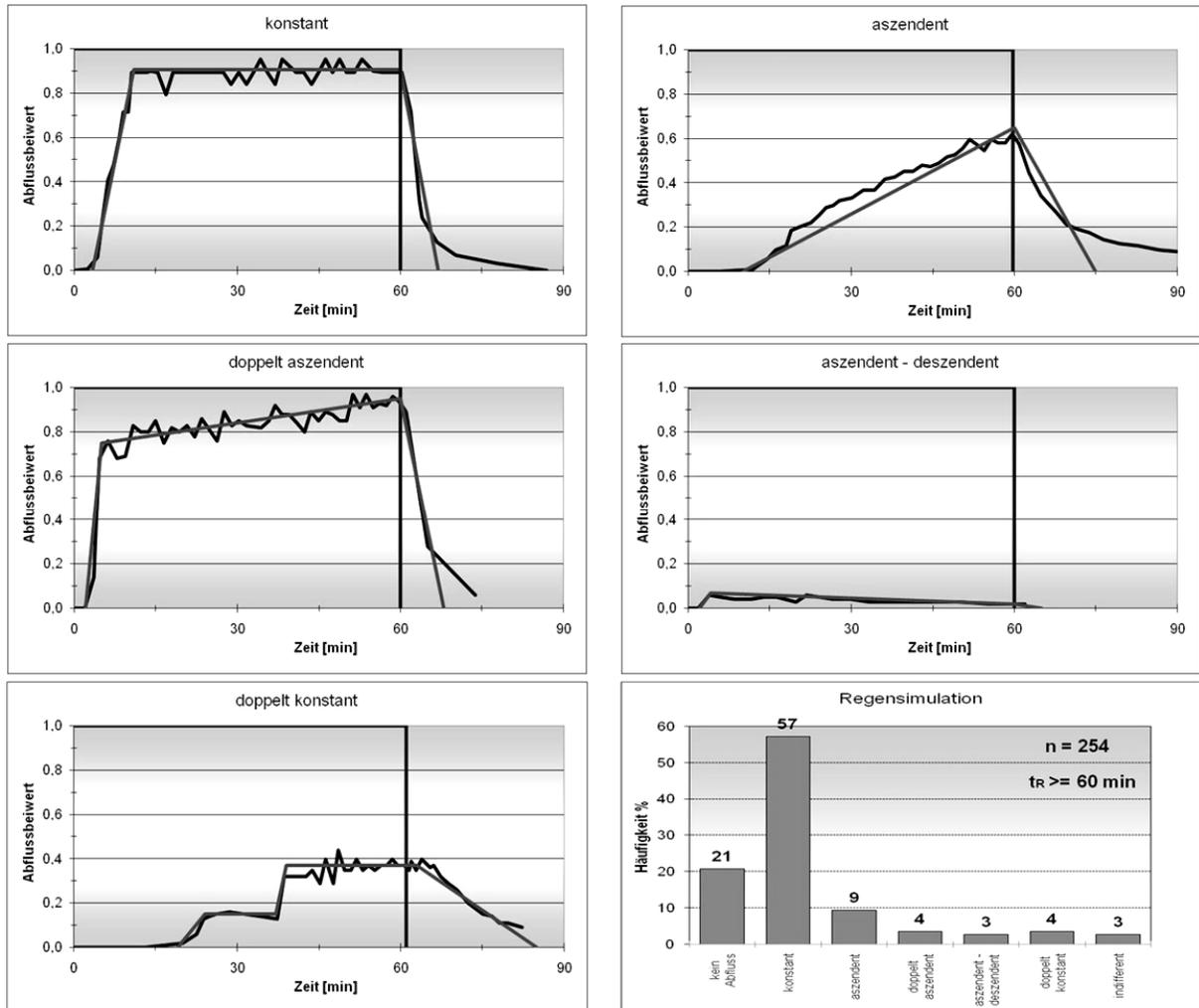


Abb. 5: Häufigkeitsverteilung von Oberflächenabflussklassen an 160 Standorten.

## 2.5 Ausprägung von Oberflächenabfluss

Ein Fünftel der bisher am Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen des BFW in Innsbruck untersuchten Boden-/Vegetationskomplexe weist eine Infiltrationskapazität auf, die größer als die Intensität des aufgebrachten Starkregens von 100 mm/h ist, es entsteht kein Oberflächenabfluss. Bei auftretenden Abflussreaktionen kann über Form und Verlauf der Abflussganglinie auf den ablaufenden Abflussprozess bzw. auf Überlagerungen unterschiedlicher Abflussprozesse geschlossen werden (Scherrer 1997, Scherrer et al. 2007).



**Abb. 6:** Interpretation unterschiedlicher Abflussprozesse anhand von Ganglinien aus Regensimulationen.

Der am häufigsten anzutreffende Abflussmechanismus wird als Horton'scher Oberflächenabfluss oder Oberflächenabfluss infolge Infiltrationsüberschuss bezeichnet (Bronstert et al. 2005). Klassischer Horton'scher Oberflächenabfluss tritt an 57 % aller untersuchten Flächen auf. Nach Ablauf von Anlaufzeit (Abstraktionszeit) und Konzentrationszeit tritt Abflusskonstanz ein, die Abflussganglinie bleibt bis zum Regenende konstant. Wie aus Abbildung 6 (unten rechts) ersichtlich, zeigen bei Starkregen hoher Intensität nur wenige Versuchsstandorte einen Abflussmechanismus, der vom „Oberflächenabfluss infolge Infiltrationsüberschuss“ abweicht. Für diese Auswertung wurde die Gesamtzahl an Einzelberechnungen des BFW herangezogen (254 Berechnungen an 160 Standorten). Die auftretenden Abflussmechanismen können neben konstantem Abfluss entsprechend der Steigung der Abflussganglinie in aszendend, doppelt aszendend, aszendend – deszendend, doppelt konstant oder indifferent untergliedert werden (siehe Abbildung 6):

Aszendente Abflussganglinien sind als Übergang von „Oberflächenabfluss infolge Infiltrationsüberschuss“ zu oberflächennahem Bodenabfluss bzw. Sättigungsflächenabfluss interpretierbar. An manchen Boden-/ Vegetations-komplexen ist eine exakte

Abtrennung zwischen Oberflächenabfluss und oberflächennahem Zwischenabfluss nicht möglich (vgl. Kapitel 2.3). In diesem Zwischenbereich und im oberflächennahen Bodenraum über Stauhohizonten läuft der Fließprozess aufgrund hoher Fließwiderstände stärker verzögert ab. Abhängig von der Regendauer stellt sich auch an diesen Standorten theoretisch die Abflusskonstanz auf einem von der Restpermeabilität der Stauschicht abhängigen Niveau ein.

Doppelt ascendente Ganglinien lassen eine Überschneidung von Abflussprozessen vermuten. Zwei unterschiedliche Szenarien wurden beobachtet. An Standorten mit geringer Vegetationsdecke, also einem hohen Anteil an erosionsanfälligem, offenem Boden, stellt sich Horton'scher Oberflächenabfluss ein. In Kombination mit dem Oberflächenprozess der Verschlammung sinkt sukzessive die Infiltrationskapazität, was zu einem zweiten kontinuierlichen Anstieg der Abflussganglinie führt. Die Kombination von Horton'schem Oberflächenabfluss und Sättigungsflächenabfluss kann zu ähnlichen Ausbildungen führen.

Zumeist sind einzelne Abflussmechanismen nur sehr kleinräumig exakt von einander trennbar. Mit zunehmender Einzugsgebietsgröße gehen sie oft in der Gesamtreaktion auf. Aszendent - deszendent verlaufende Ganglinien sind auf Boden-/Vegetationskomplexen mit hydrophober Wirkung von Auflagen zu beobachten. Es tritt Oberflächenabfluss infolge Infiltrationsüberschuss auf, wobei die Infiltrationsrate mit der Zeit durch den Abbau der hydrophoben Effekte ansteigt und der Abfluss abnimmt.

Eine doppelt konstante Abflussbildung entsteht, wenn sich Horton'scher Oberflächenabfluss mit Makroporenabfluss aus bevorzugten Fließwegen überlagert. Dieser Abfluss aus bevorzugten Fließwegen (Mausgänge, Regenwurmröhren, Wurzelkanäle,...) kann bis zur Vernetzung dieser Wege eine deutlich längere Anlaufzeit benötigen, was schließlich zu einem zweiten deutlich abgegrenzten Abflussplateau führt.

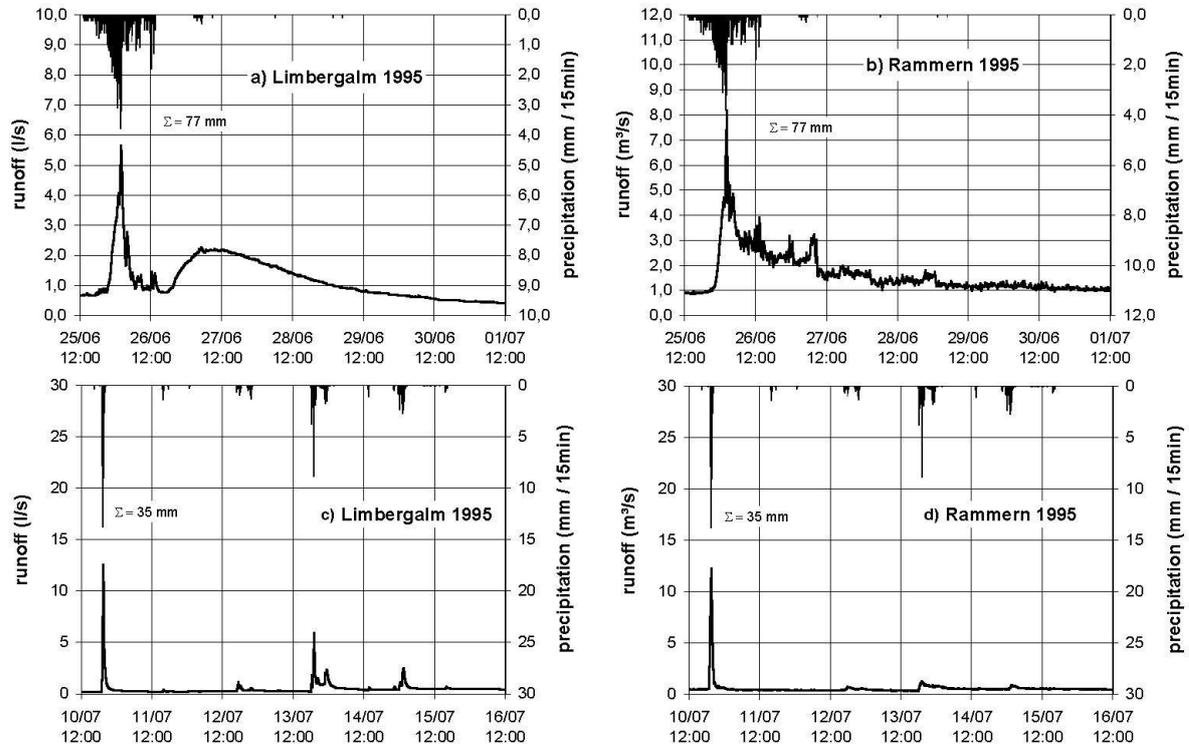
Die Abflussganglinien von 7 Beregnungsversuchen (3 %) ließen sich aus unterschiedlichen Gründen, z.B. technischen Problemen bei der Versuchsdurchführung, nicht nach obigem Schema interpretieren und wurden als indifferent eingestuft.

### **3. Naturmessungen zur Abflussentstehung, Prozessanalysen**

#### **3.1 Hydrologische Prozessanalysen, Grundsätzliches**

Die in der Naturwissenschaft sonst übliche Vorgehensweise beim Aufbau eines Experimentes zum Test einer Hypothese, nämlich das Schaffen von Versuchsbedingungen, die störende Einflüsse weitestgehend ausschalten, und die Wahl von geeigneten Randbedingungen, Eingangsgrößen, Messgrößen, etc. ist in der Hydrologie nur eingeschränkt möglich. Ein Einzugsgebiet hat mit dem Versuchsaufbau eines physikalischen oder chemischen Experimentes wenig gemein, die natürliche Eingangsgröße Niederschlag ist nicht beeinflussbar, die Messungen können mit erheblichen Unschärfen behaftet sein. Will man annähernd klare Versuchsbedingungen erreichen, muss die Testfläche so klein sein, dass die auf ihr

vorhandenen Inhomogenitäten bezüglich Topographie, Bewuchs, Boden, Geologie des Untergrundes etc. als im Rahmen des geplanten Experimentes vernachlässigbar angenommen werden können. (Diese Annahme quantitativ auf Gültigkeit zu prüfen, wäre wieder großer Aufwand.)



**Abb. 7:** Zwei Ereignisse, gemessen auf unterschiedlichen Skalen:  
Oben li: Dauerregen, unten Gewitter. Oben li: Feuchtfläche Limbergalm (gesamt ca. 7 ha; vernässt ca. 1240 m<sup>2</sup>); Rasche Abflussreaktion (Oberflächen- und rascher Zwischenabfluss) zuerst, nachlaufende Welle aus dem Untergrund später.  
Oben re: Hauptpegel Rammern (16 km<sup>2</sup>); Die Unterscheidung der Abflussreaktionen ist nicht möglich. Unten: An beiden Pegeln sehr ähnliche Abflussreaktionen

Mit der Verkleinerung der Versuchsfläche ist die Schwierigkeit verbunden, die Versuchsergebnisse auf größere Skalen zu übertragen (siehe z.B. Blöschl, 1996). Bei der hydrologischen Feldforschung ist das Analogon zum Versuchsaufbau die Auswahl der Testfläche und jenes zu den Randbedingungen bezüglich der Eingangsgröße die Auswahl des Regenereignisses (Kirnbauer und Haas, 1998).

In Abbildung 7 wird gezeigt, dass unterschiedliche Typen von Regen auf unterschiedlich großen Flächen sehr unterschiedliche Abflussreaktionen (Dauerregen, Abbildung 7 oben) oder identische Abflussreaktionen (Gewitterregen, Abbildung 7 unten) hervorrufen. Abbildung 7 oben: Auf der Feuchtfläche Limbergalm (gesamt ca. 7 ha; vernässt ca. 1.240 m<sup>2</sup>) sind die dem Niederschlag folgende rasche Abflussreaktion und die später nachlaufende Welle aus dem unterirdischen Abfluss deutlich unterscheidbar, während die nachlaufende Welle am Pegel Rammern (ca. 16 km<sup>2</sup>)

durch Überlagerungseffekte verschleiert ist. Die Abflussreaktionen auf die Gewitterregen (Abbildung 7 unten) sind auf beiden Skalen gleich. Somit kann die Beobachtbarkeit von Prozessen nicht nur von der Testfläche sondern auch vom Ereignistyp abhängig sein.

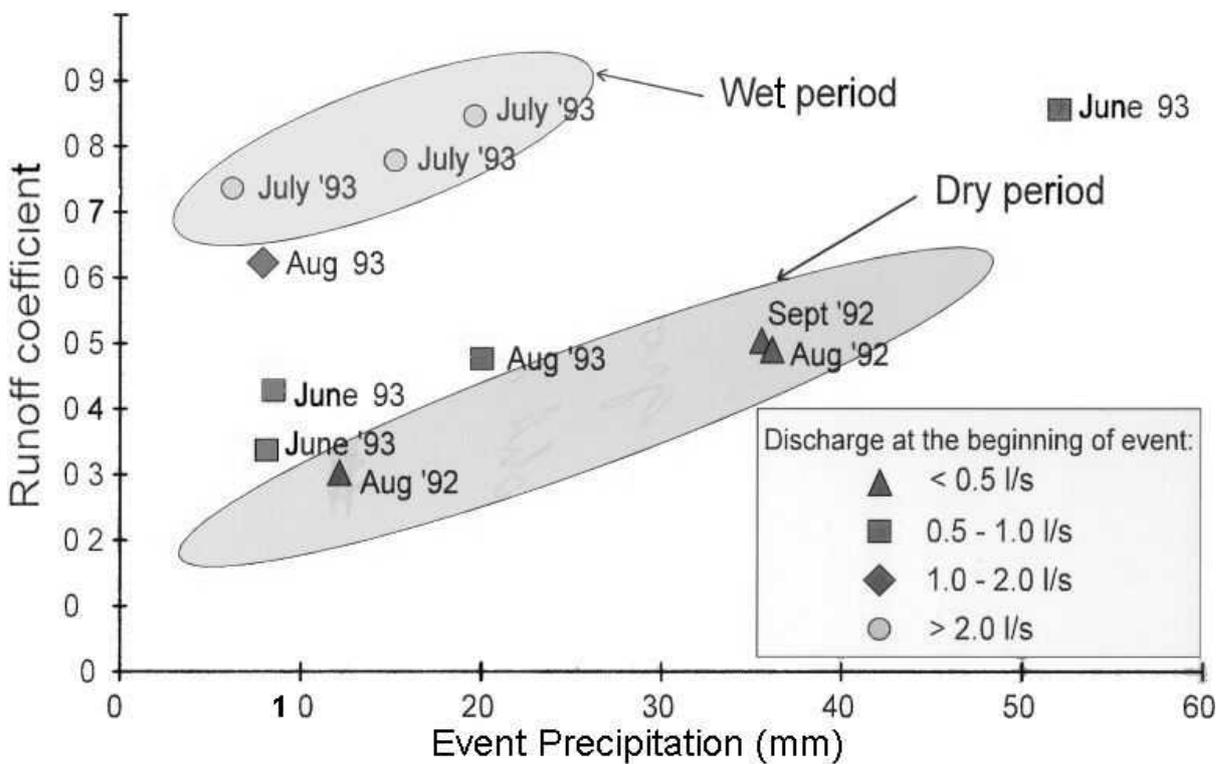
Im folgenden Abschnitt wird über Prozessstudien an Sättigungsflächen der Größe von einigen tausend m<sup>2</sup> bis einige ha berichtet (z.B. Abbildung 8). Auf ihnen entsteht hauptsächlich Oberflächenabfluss, sie werden jedoch von unterirdischem Abfluss durchfeuchtet, der sich als ein wichtiger Einflussfaktor erweist.



**Abb. 8:** Sättigungsfläche Limbergalm (vernässte Fläche 1.240 m<sup>2</sup>, Gesamteinzugsgebiet incl. unterirdisches Einzugsgebiet ca. 7 ha)

### 3.2 Abflusststehung auf Sättigungsflächen

Von den Sättigungsflächen wird in hydrologischen Modellen angenommen, sie würden den auf sie fallenden Niederschlag verlustlos ans Gerinne ableiten (Abflussbeiwert  $a = 1$ ). Diese Sättigungsflächen seien aber in ihrer Größe variabel, und sie dehnten sich im Verlauf eines Ereignisses aus und zögen sich dann wieder zusammen. Diese Hypothese war zu überprüfen. Daher wurden im hydrologischen Untersuchungsgebiet Löhnersbach drei Sättigungsflächen mit Abflussmessstelle und Ombrograph ausgestattet (Nobilis et al., 2002). Allerdings waren diese Flächen so ausgewählt worden, dass aus topographischen Gründen ein Ausdehnen über den an der Vegetation erkennbaren Sättigungsbereich nicht möglich war.

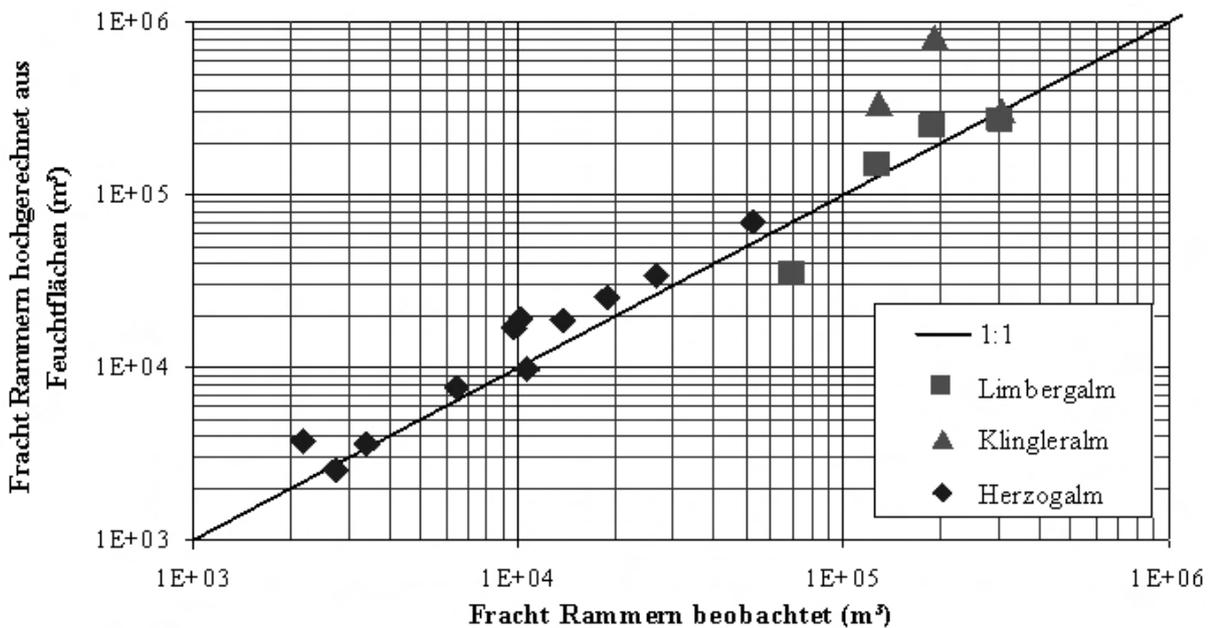


**Abb. 9:** Sättigungsfläche Herzogalm: Abhängigkeit des Abflussbeiwertes vom Ereignisniederschlag und vom Abfluss zu Ereignisbeginn.

Auf der ersten untersuchten derartigen Sättigungsfläche (Herzogalm, ca. 3.000 m<sup>2</sup>) zeigte sich die in Abbildung 9 dargestellte Dynamik des Abflussbeiwertes: Der Abflussbeiwert nimmt mit der Ereignisniederschlagshöhe zu; großer Abfluss zu Ereignisbeginn verursacht hohe Abflussbeiwerte; der Abflussbeiwert ist jedoch nicht „1“. Der Abfluss zu Ereignisbeginn, also der Quellabfluss, der die Sättigungsfläche durchströmt, bewirkt bei Niederschlagsereignissen um die 10 mm mehr als eine Verdoppelung des Abflussbeiwertes. Somit wirkt der unterirdische Abfluss als Verstärkerfaktor für den rasch wirksam werdenden Abfluss von der Sättigungsfläche, der – ohne weitere Untersuchung – als Oberflächenabfluss

eingeschätzt werden kann. Dieses Zusammenspiel von unter- und oberirdischem Abfluss ist insofern für die Hochwasserentstehung bedeutsam, als im Allgemeinen ein hoher Prozentsatz der Hochwasserfracht auf Feuchtflächen entsteht.

Für das Einzugsgebiet des Löhnersbaches lässt sich die Dominanz des Sättigungsflächenabflusses anhand einer überschlägigen Hochrechnung der Abflussfrachten nachweisen. Aus den hydrogeologischen Untersuchungen von Pirkl (1989, 1993) und aus Geländebegehungen kann der Flächenanteil der Sättigungsflächen am Gesamteinzugsgebiet des Löhnersbaches bis zum Pegel Rammern zu ca. 8% angegeben werden. Postuliert man, dass bei einem Niederschlag-Abfluss-Ereignis auf allen Feuchtflächen derselbe Abflussbeiwert gilt wie auf einer der drei messtechnisch überwachten Feuchtflächen (vernässte Flächen: Limbergalm: 1.240 m<sup>2</sup>, Herzogalm: 3.000 m<sup>2</sup>, Klingleralm: 4.000 m<sup>2</sup>), während das restliche Einzugsgebiet keinerlei raschen Abfluss liefert, so kann man auf Basis dieser Annahmen und der Messungen auf den Feuchtflächen die Abflussfracht am Gebietspegel Rammern abschätzen. Hier zeigt sich das in Abbildung 10 dargestellte Bild: Diese Hochrechnung liefert erstaunlich gute Ergebnisse. Aus Flächen der Größenordnung 0,2 bis 0,3 Prozent der Gesamtfläche lässt sich die gesamte Abflussfracht recht gut schätzen.



**Abb. 10:** Hochrechnung der HW-Abflussfracht von drei Sättigungsflächen des Löhnersbaches auf den Gesamtabfluss am Hauptpegel Rammern am Löhnersbach.

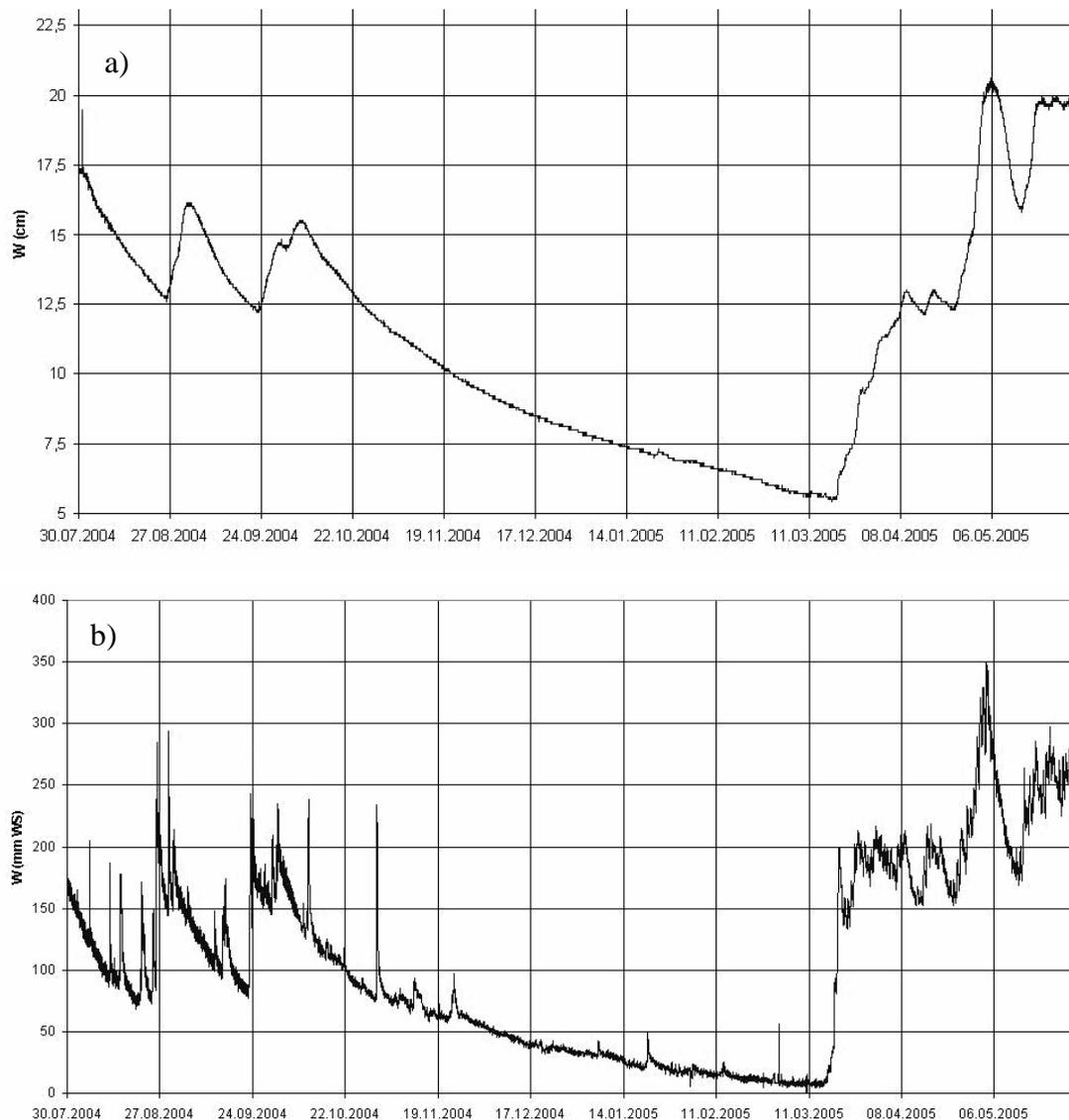
Hierzu sollen jedoch Einschränkungen nicht verschwiegen werden: a) Durch hydrochemische und tracerhydrologische Untersuchungen von Tilch et al. (2006) wurde nachgewiesen, dass die Abflussfrachten auf den Feuchtflächen nicht allein durch den auf sie fallenden Niederschlag erklärt werden können. Vielmehr ist in der Abflussfracht von den Feuchtflächen auch ein nicht zu vernachlässigender Anteil an raschem unterirdischem Abfluss enthalten. Mit zunehmender Auffeuchtung des Gebietes gewinnt der unterirdische Abfluss zunehmend an Bedeutung (Tilch et al.,

2006). b) Bei der Feuchtfläche Klingleralm (Dreiecke in Abbildung 10) konnte ein Zustrom von Wasser aus der Umgebung nicht ausgeschlossen werden. Hier grenzt an der orographisch linken Seite ein mit Bürstlingrasen (*Nardetum*, *Nardus stricta*) bewachsener Hang an die Feuchtfläche. Ein Borstgrasrasen bildet viel Nekromasse aus, die fast wie ein Strohdach wirkt und somit die Infiltration behindert (Markart und Kohl, 1995; Kohl et al., 2004) und den Oberflächenabfluss steigert, der dann in die Feuchtfläche geströmt sein kann. Es ist plausibel, die in Abbildung 10 erkennbare Überschätzung der Abflussfracht auf diesen Effekt zurückzuführen.

### **3.3 Unterirdischer Abfluss als bestimmendes Element der Abflussentstehung**

In diesem Abschnitt soll gezeigt werden, wie der unterirdische Abfluss über lange Zeiträume hinweg die Abflussdynamik prägt. In Abbildung 11 sind zwei Wasserstandsganglinien einander gegenüber gestellt. 11 a ist reiner Quellabfluss einer für die Wasserversorgung von Saalbach vorgesehenen Quelle im Schwarzacher Graben, dem linksseitigen Nachbartal des Löhnersbaches. Die Quelle liegt auf ca. 1.550 Meter Seehöhe und entwässert in den Schwarzacher Graben. Diese Ganglinie kann mit jener des Löhnersbaches am Pegel Rammern (11 b; Seehöhe ca. 1.100 m) verglichen werden: Bis auf kurze, durch Hochwässer verursachte Ausschläge nach oben zeigt die Ganglinie des Baches praktisch dieselbe Dynamik wie die ins benachbarte Tal entwässernde Quelle.

Bei genauer Untersuchung von raschen und von verzögerten Abflussreaktionen auf der Testfläche Limbergalm mit Hilfe hydrochemischer und tracerhydrologischer Methoden erweist sich sowohl die rasche als auch die verzögerte Reaktion aus unterschiedlichen Wässern zusammengesetzt (Tilch et al., 2003). Die rasche Reaktion besteht nur zu einem kleinen Teil aus Niederschlagswasser des Ereignisses, während der Großteil „altes“ Wasser ist, und auch die nachlaufende Welle ist aus mindestens zwei Abflussanteilen zusammengesetzt. Dies lässt den Schluss zu, dass sowohl das in Abbildung 11 dargestellte Quellwasser als auch das Löhnersbachwasser Mischungen unterschiedlichster Wässer sind.



**Abb. 11:** Quellabfluss und Gerinneabfluss

- a) Quelle Hacklbergalm Schwarzachergraben
- b) Abfluss im Löhnersbach (Nachbartal).

### 3.4 Die hydrogeologischen Verhältnisse bestimmen das Abflussregime

Die Dynamik des unterirdischen Abflusses wird durch die hydrogeologischen Bedingungen im Einzugsgebiet bestimmt: Tiefgründige Auflockerung des Felsuntergrundes und durchlässige Deckschichten begünstigen die Tiefensickerung großer Anteile des Niederschlagswassers und schaffen somit große Mengen von unterirdischem Wasser, welches nach Aufenthaltszeiten von Monaten (bis Jahren) aus Quellen mit eher gleichmäßiger Schüttung austritt. Im Kristallin des Löhnersbachgebietes liegen solche Verhältnisse auf der rechten Talseite vor. Die großvolumigen Massenbewegungen haben dort unterirdische Fließwege geschaffen, die in Form von wenigen aber starken Quellen austreten. Dementsprechend ist das

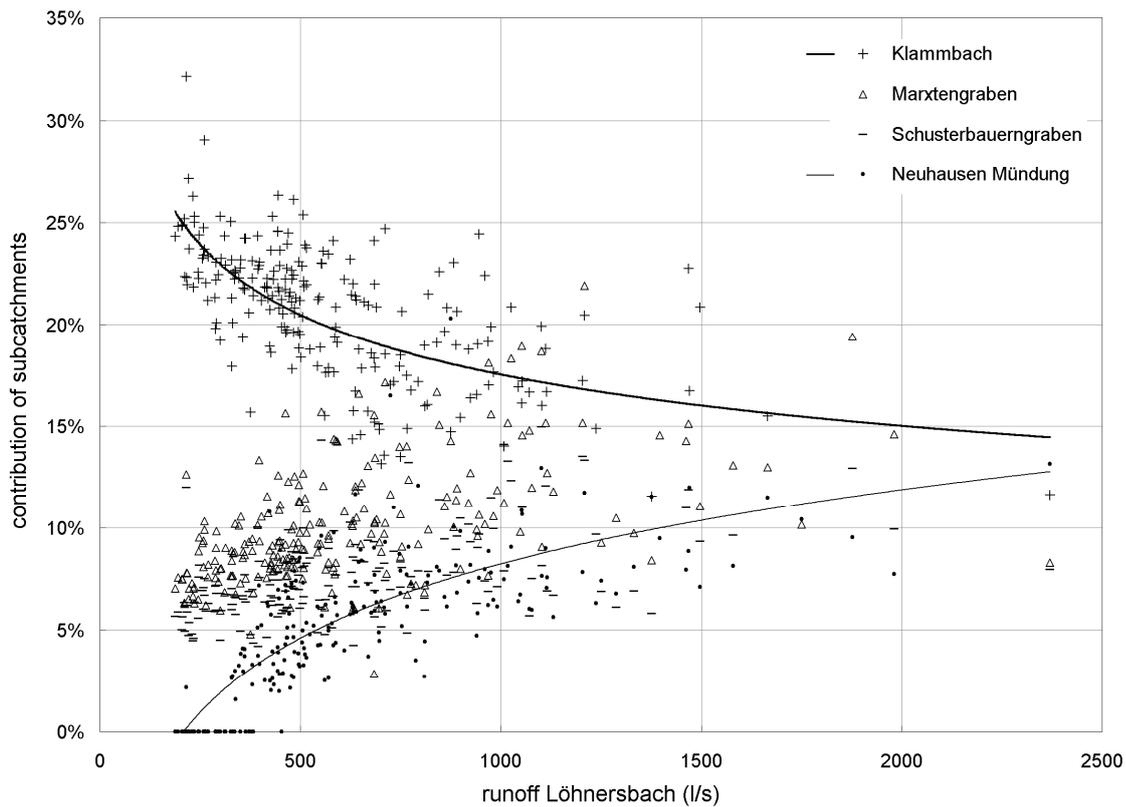
Gewässernetz hier verhältnismäßig dünn. Kontrastierende Verhältnisse charakterisieren die linke Talseite (Abbildung 2 in Tilch et al., 2003). Generell ist die linke Talseite des Löhnersbaches gekennzeichnet durch viele kleinere Massenbewegungen, eine große Anzahl von Quellen und entsprechende Dichte des Gerinnenetzes. Die Quellhorizonte finden sich häufig an den talseitigen Begrenzungen der Massenbewegungen. Dort sind sie verbunden mit Vernässungszonen, die je nach Schüttung der Quellen großflächig überströmt oder von kleinen Rinnsalen durchzogen sind. Nur wenige der Quellen schütten permanent, die anderen versiegen bei länger anhaltender Trockenheit, springen aber wenige Tage nach ausgiebigen Niederschlägen wieder an. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass die Einzugsgebiete solcher Quellen seicht und klein sind.

Die während des Sommers in den Jahren ab 1993 täglich durchgeführten Abflussmessungen an den linksseitigen Zubringern Schusterbauerngraben, Marxtengraben und Neuhausengraben und dem rechtsseitigen Klamm bach spiegeln dieses unterschiedliche Abflussverhalten auf den zwei Talseiten deutlich wider. Berechnet man den Prozentsatz, den der jeweilige Zubringer zum Abfluss im Löhnersbach beiträgt, und trägt diesen Prozentsatz über dem Löhnersbachabfluss auf (Abbildung 12), so zeigt sich, dass die linksseitigen Zubringer bei Niederwasser wenig beitragen, ihr Beitrag aber mit zunehmendem Durchfluss im Löhnersbach wächst. Der von rechts kommende Klamm bach verhält sich umgekehrt: Die tiefgründigen Quellen der rechten Talseite schütten auch dann noch kräftig, wenn die seichten Quellen der linken Zubringer stark zurückgegangen oder sogar versiegt sind. Der relative Beitrag des Klamm baches ist bei Niederwasser groß, nimmt aber dann ab.

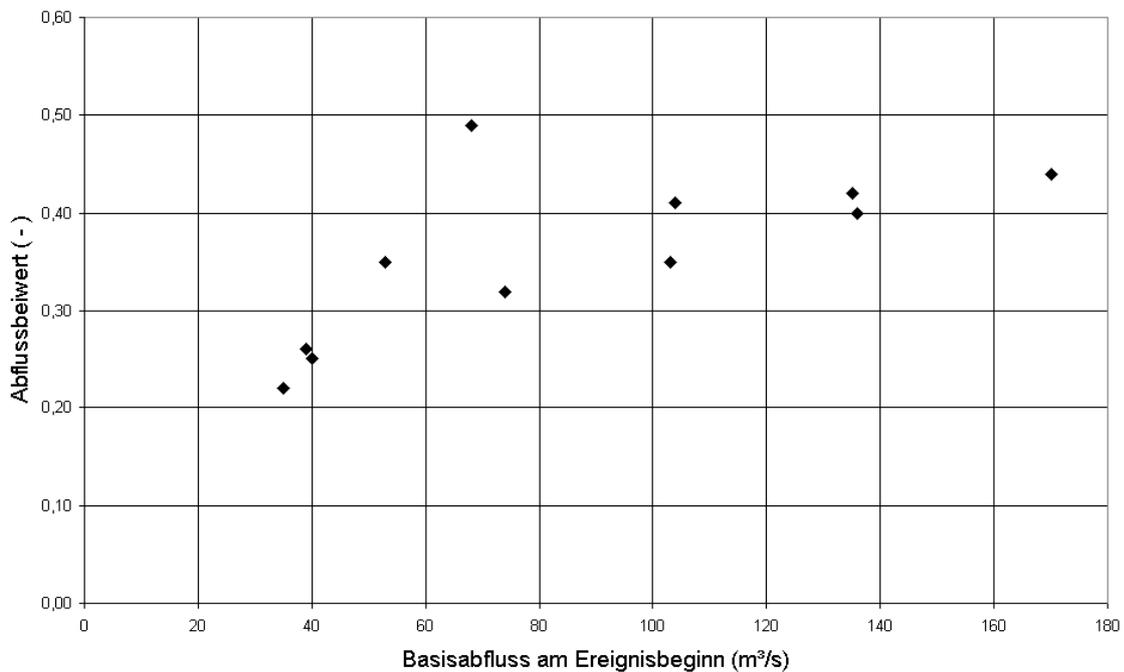
Bei bekanntem hydrogeologischem Einzugsgebietsverhalten lässt sich der Abfluss des kleineren Gewässers aus jenem des größeren zurückrechnen. Die Abflüsse des Klamm baches wurden a) unter Annahme einer gleichen Abflusssspende im ganzen Gebiet, und b) unter Verwendung der in Abbildung 12 dargestellten oberen Kurve aus jenen des Löhnersbaches zurückgerechnet und mit Abflussmessungen verglichen. Bei der Berechnungsart b) wird das charakteristische Einzugsgebietsverhalten des Klamm baches berücksichtigt, und diese Berechnung zeigt signifikant bessere Ergebnisse (Kirnbauer et al., 2005).

### **3.5 Abflussentstehung in mesoskaligen Einzugsgebieten**

Das Charakteristikum der Zunahme des Abflussbeiwertes mit zunehmendem Abfluss zu Ereignisbeginn (vgl. Kleinstfläche Herzogalm, Abbildung 9) ist überregional auch in größeren Einzugsgebieten erkennbar. Der Ereignis-Abflussbeiwert von Niederschlag-Abflussereignissen bei Flüssen kann durch Analyse der Niederschlags- und Abflussganglinien oder durch Kalibrierung eines Niederschlag-Abfluss-Modells ermittelt werden. Abbildung 13 zeigt das Ergebnis von Kalibrierungsarbeiten mit dem Modell HEC-HMS an der Enns bis zum Pegel Liezen (Pjagulovic, 2009). Hier zeigt sich eine deutliche Zunahme des Abflussbeiwertes mit dem Basisabfluss am Ereignisbeginn. Die Analogie zu den Verhältnissen auf der Kleinstfläche ist deutlich erkennbar und scheint plausibel.



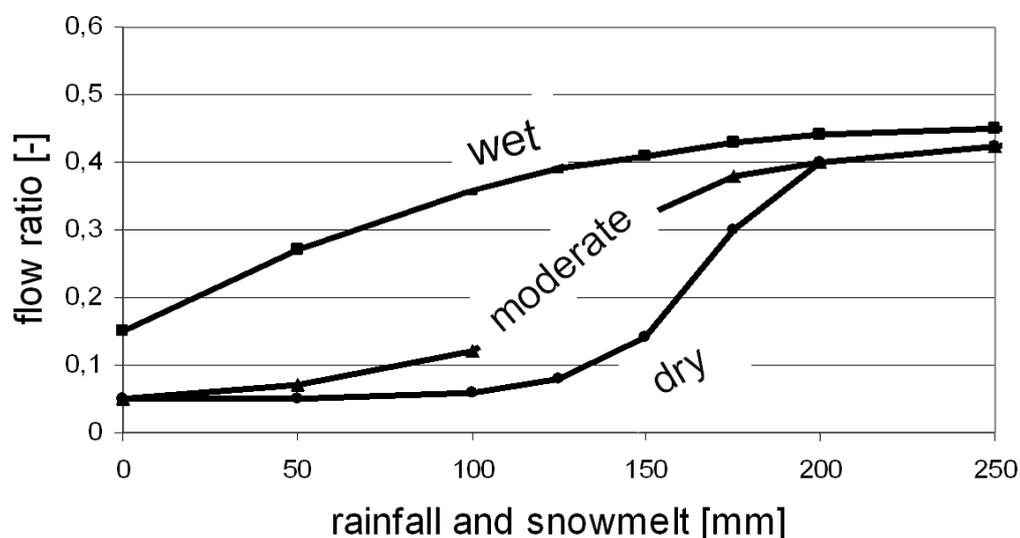
**Abb. 12:** Unterschiedliches Einzugsgebietsverhalten der rechten und linken Talseite des Löhnersbaches. Abflussanteil der Zubringer von rechts (Kreuze) bzw. von links (Dreieck, Strich, Punkt) am Löhnersbach-Abfluss.



**Abb. 13:** Zunahme des Abflussbeiwertes mit zunehmendem Abfluss zu Ereignisbeginn  
Pegel Liezen/Enns: Einzugsgebiet: 2.116 km<sup>2</sup>

Im Verlauf von Analysen zur Erstellung eines neuen Hochwasservorhersageverfahrens für die Steyr (185 km<sup>2</sup>) bzw. ihre Zubringer Teichl (233 km<sup>2</sup>) und Steyrling (73 km<sup>2</sup>) zeigte sich diese Abhängigkeit in gleicher Weise und wurde in einen Algorithmus zur Ermittlung des Abflussbeiwertes als Funktion von Basisabfluss zu Ereignisbeginn und Niederschlagssumme umgesetzt (Kirnbauer et al., 2000).

Für das Einzugsgebiet der Drau bis Sachsenburg (2.561 km<sup>2</sup>) entwickelten Fordinal et al. (2009) ein Szenarienmodell zur Hochwasserwarnung. Auch hier ergaben Ganglinienanalysen eine Abhängigkeit des Abflussbeiwertes (in Abbildung 14 als flow ratio bezeichnet) von der Vorbefeuchtung des Einzugsgebietes und der Niederschlagssumme.



**Abb. 14:** Einfluss des Feuchtezustandes des Einzugsgebietes der Drau bis Sachsenburg (2.561km<sup>2</sup>) am Ereignisbeginn bei einem Szenarienmodell zur Hochwasservorhersage (die flow ratio entspricht dem Abflussbeiwert). (Vortrag Fordinal et al., 2009; persönliche Mitteilung).

Es erscheint nicht unplausibel zu vermuten, dass die überregional und auf unterschiedlichsten Skalen festgestellten Ähnlichkeiten der Abflussentstehung auf grundsätzliche Ähnlichkeiten in den Teilprozessen der Abflussbildung (verschiedene Arten der Entstehung von Oberflächenabfluss bzw. unterirdischem Abfluss) zurück zu führen sind.

#### 4. Schlussfolgerungen (take home messages)

- Prozesse der Abflussentstehung können nur am Standort bzw. an der Kleinstfläche (Größenordnung wenige ha) klar beobachtet und gemessen werden. Auf größeren Skalen werden sie durch Überlagerungen verschleiert.
- Auch auf Sättigungsflächen ist der Abflussbeiwert nicht identisch gleich Eins. Er nimmt mit zunehmendem Abfluss bei Ereignisbeginn und mit zunehmendem Ereignisniederschlag zu.

- Der unterirdische Abfluss ist wesentlich an der Hochwasserentstehung beteiligt. Einerseits durch Vergrößerung des Abflussbeiwertes auf Sättigungsflächen. Hier wirkt er als Verstärker. Andererseits wirkt er durch Überlagerung aus den Teilgebieten größerer Einzugsgebiete kraft seiner längeren Dauer Hochwasser verursachend. Diese Wirkung stellt sich nur bei länger anhaltenden Niederschlägen vom advektiven Typ und bei größeren Regenmengen (ab ca. 45 – 50 mm) ein.
- Einzelne Charakteristika der Abflussbildung (insbesondere die Zunahme des Abflussbeiwertes mit zunehmendem Abfluss zu Ereignisbeginn) sind auf allen Maßstabsebenen erkennbar.
- Die Abflussbildung ist auf beiden Maßstabsebenen (Plot-Ebene und Einzugsgebietsebene) in hohem Maß von der Vorbefeuchtung des Bodens abhängig (vgl. Zehe et al. 2007). Hohe Vorbefeuchtung verkürzt die Anlaufzeit. Der Gesamtabflussbeiwert ( $\psi_{\text{tot}}$ ) ändert sich auf beiden Ebenen in Abhängigkeit von der Vorfeuchte. Auf der Plot-Ebene bleibt ( $\psi_{\text{const}}$ ) annähernd gleich, wie die Auswertungen von Wiederholungs-berechnungen auf 26 Standorten von Kohl und Markart (2002) zeigen.

## 5. Literatur

Beven, K. J. and Kirkby, M. J. (1979): A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, Vol. **24**, No. 1, pp. 43-69.

Bronstert, A., Wittenberg, H., Niehoff, D. (2005): Abfluss von Urbanflächen (runoff from urban areas). In A. Bronstert (ed.), *Abflussbildung - Prozessbeschreibung und Fallbeispiele*. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 13.05, 40-46.

Blöschl, G. (1996). „Scale and scaling in hydrology,“ Wiener Mitteilungen, Band 132. Habilitationsschrift. Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, Technische Universität Wien.

Dunne, T. and Black, R. D. (1970): Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. *Wat. Resour. Res.*, Vol. **6**, No. 5, pp. 1296-1311.

Fordinal, I., Komma, J. and Gutknecht, D. (2009): Early Flood Warning System based on a "Catalogue Concept" EGU General Assembly, Vienna 2009; EGU2009-5046

Gutknecht, D. und Blöschl, G. (2006): Studienblätter zur Lehrveranstaltung Ingenieurhydrologie, Technische Universität Wien, Inst. f. Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Eigenverlag.

Kirnbauer, R. & Haas, P. (1998): Observations on runoff generation mechanisms in small Alpine catchments. – In: Kovar, K., Tappeiner, U., Peters, N. E. & Craig, R. G. (eds.): *Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters*. – Proc. of the HeadWater'98 Conference, Meran, Italy, Apr. 1998, IAHS Publ. no. 248:239-247.

Kirnbauer, R., Müller, G., Fröschl, F., Schönmayr, G. und Pöschl, S. (2000): Ein Hochwasservorhersageverfahren für die Steyr – Überarbeitungen und Neuentwicklungen zu einem bewährten Modell. XX. Conference of the Danubian Countries. Publication CD, file cl12.pdf

- Kirnbauer, R., Blöschl, G., Haas, P., Müller, G. and Merz, B. (2005): Identifying space-time patterns of runoff generation – A case study from the Löhnersbach catchment, Austrian Alps. In: 'Global change and mountain regions - a state of knowledge overview'. Ed.: Ulli Huber, Harald Bugmann & Mel Reasoner; Springer Verl., pp. 309-320
- Kohl, B. and G. Markart (2002): Dependence of surface runoff on rain intensity – Results of rain simulation experiments. In: International Commission for the Hydrology of the Rhine basin: Proceedings of the International Conference on Flood Estimation, March 6-8, Berne, Switzerland, 139-146.
- Kohl, B., S. Sauer Moser, D. Frey, L. Stepanek und G. Markart (2004): Steuerung des Abflusses in Wildbacheinzugsgebieten über flächenwirtschaftliche Maßnahmen. Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT, Tagungspublikation, Band 1, Thema III, 159-169.
- Markart G., B. Kohl, B. Sotier, T. Schauer, G. Bunza und R. Stern (2004): Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). BFW Dokumentation, Nr.3.
- Markart G., B. Kohl, B. Sotier, T. Schauer, G. Bunza und R. Stern (2006): Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes bei Starkregen - Grundzüge und erste Erfahrungen. ÖWAV-Seminar „Methoden der hydrologischen Regionalisierung“ im Lebensministerium, 18.-19.5.2006, Wiener Mitteilungen, Band 197, 159-178.
- Markart G., B. Kohl, G. Bieber, A. Römer, A. Ita, K. Klebinder, S. Pfeiler, K. Suntinger, W. Bauer, H. Pausch, M. Strasser (2008): Beitrag des oberflächennahen Zwischenabflusses zum Gesamtabfluss in einem alpinen Kleinstzugsgebiet bei Dauerregen. Endbericht zu einer Pilotstudie an die Österreichische Akademie der Wissenschaften, Kommission für Hydrologie. 89 Seiten.
- Markart, G. und B. Kohl (1995): Starkregensimulation und bodenphysikalische Kennwerte als Grundlage der Abschätzung von Abfluß- und Infiltrationseigenschaften alpiner Boden-/Vegetationseinheiten, Ergebnisse der Beregnungsversuche im Mustereinzugsgebiet Löhnersbach in Salzburg, Berichte der Forstl. Bundesversuchsanstalt Wien, Bd. 89.
- McDonnell (2009): Where does water go when it rains? Conceptualizing runoff processes in headwater catchments (John Dalton Medal Lecture) [http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2009/oral\\_programme/1528](http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2009/oral_programme/1528)
- Nash, J.E. 1958. The form of the instantaneous hydrograph. In General Assembly of Toronto, pages 114–118. IAHS, Publ. No. 42 (3).
- Nobilis, F., Bergmann, H., Müller, G. (2002): „Hydrologische Versuchsgebiete in Österreich – Erfahrungen, nationale und internationale Anforderungen, Zukunftsaspekte.“ In: Mitteilungsblatt d. Hydrographischen Dienstes in Österreich. Hrsg.: Hydrographisches Zentralbüro, Wien, Nr. 81, S. 1-126 (Löhnersbach: S. 84-91)
- Pirkl, H. (1989): „Erarbeitung der Zusammenhänge zwischen Hanginstabilitäten und -labilitäten, Hangwasserhaushalt und Massenbewegungen in Teilen des Zentralalpen-

kristallins.“ Österreichische Akademie der Wissenschaften, Geologische Bundesanstalt. Wien. Unveröffentlichter Forschungsbericht, Kartierung.

Pirkl, H. (1993): „Arbeitsunterlagen für eine interdisziplinäre Fachdiskussion zur Auswertung und Verknüpfung von Kartierungsinhalten - Einzugsgebiet Löhnersbach / Saalbach.“ Unveröff. Forschungsbericht, Wien 1993.

Pjagulović, Ž. (2009): Hydrologische Untersuchungen an Hochwässern in der Oberen Enns. Diplomarbeit; Technische Universität Wien

Scherrer, S. (1997): Abflussbildung bei Starkniederschlägen – Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Starkniederschläge. VAW-Mitteilungen Nr. 147.

Scherrer, S., F. Naef, A.O. Faeh and I. Cordery (2007): Formation of runoff at the hillslope scale during intense precipitation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **11**, 907-922.

Sifalda, V. (1996): Approximation der Konzentrationszeit der Abflüsse von kleinen natürlichen Einzugsgebieten. *Wasserwirtschaft* **86**, 104-105

Spraefico M., R. Weingartner, M. Barben und A. Ryser (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten – Praxishilfe. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 4, Bern.

Tilch, N., Uhlenbrook, S., Didszun, J., Wenninger, J., Kirnbauer, R., Zillgens, B. & Leibundgut, C. (2006): Hydrologische Prozessforschung zur Hochwasserentstehung im Löhnersbach-Einzugsgebiet (Kitzbüheler Alpen, Österreich). – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* **50(2)**:67-78.

Tilch, N., Uhlenbrook, S., Didszun, J., Leibundgut, C., Zillgens, B., Kirnbauer, R., & Merz, B. (2003): Entschlüsselung von Abflussbildungsprozessen mit Hilfe tracerhydrologischer Ansätze in einem alpinen Einzugsgebiet. – *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft* **55(1/2)**:9-17.

Weiler, M., F. Naef and C. Leibundgut (1998): Study on runoff generation on hillslopes using tracer experiments and a physically based numerical hillslope model. In: *Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters*. IAHS-Publ. No. 248, 353-360.

Zehe, E., H. Elsenbeer, F. Lindenmaier, K. Schulz and G. Blöschl (2007): Patterns of predictability in hydrological systems. *Water Resources Research*, Vol. **43**, W07434, doi: 10.1029/2006WR005589.

**Anschrift der Verfasser:**

**Dipl.-Ing. Dr. Robert Kirnbauer**

Technische Universität Wien  
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie  
Karlsplatz 13/222-2  
A-1040 Wien  
Tel.:+43-1-58801-22320  
Fax:+43-1-58801-22399  
Email: kirnbauer@hydro.tuwien.ac.at

**Mag. Bernhard Kohl**

**Dipl.-Ing. Dr. Gerhard Markart**

Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum  
für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW)  
Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen  
Rennweg 1 - Hofburg  
A - 6020 Innsbruck  
Tel.: +43-512-573933-5132  
Fax: +43-512-573933-5135  
Email: bernhard.kohl@uibk.ac.at



## **HOCHWÄSSER IN WILDBACHEINZUGSGEBIETEN**

Johannes Hübl

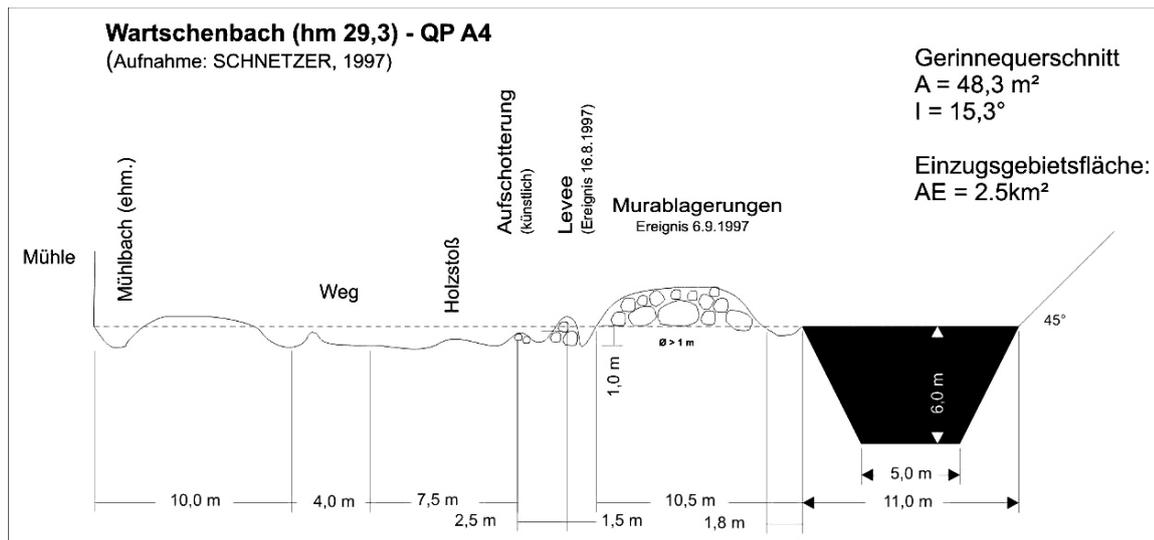
### **1. Einleitung**

Das Thema Hochwässer in Wildbacheinzugsgebieten bietet seit Jahrzehnten reichlich Diskussionsstoff. Seit Beginn der Planung von Schutzmaßnahmen an Wildbächen entwickelten Wissenschaftler, aber auch eine große Anzahl an Praktikern, eine Vielzahl an theoretischen Berechnungsansätzen und empirischen Formeln, die der Ableitung des Bemessungsereignisses dienen sollten. Dadurch entstand eine ständig wachsende Sammlung an Methoden (zusammengestellt z.B. in Hagen et al. 2007). Die Anpassung dieser Gleichungen bzw. der Eingangsparameter in hydrologische Modelle wurde überwiegend durch eine Rückrechnung von Ereignissen erzielt, wobei die in der Natur noch sichtbaren Abflussmarken als Eingangsgröße dienten, da direkte Abflussmessungen in Wildbacheinzugsgebieten nur in geringem Umfang verfügbar sind.

### **2. Die Bemessung von Hochwässer in Wildbächen**

Obwohl in Österreich rund 13.000 Wildbacheinzugsgebiete verordnet sind, werden die Abflüsse nur in wenigen Einzugsgebieten messtechnisch erfasst. Eine statistische Auswertung zur Abschätzung von Bemessungsabflüssen, wie in größeren Einzugsgebieten üblich, ist deshalb kaum möglich. Um trotzdem Aussagen über Bemessungsabflüsse treffen zu können, wird traditionsgemäß von verfügbaren Niederschlagsdaten ausgegangen. Unter der Annahme, dass ein n-jährlicher Bemessungsniederschlag auch einen n-jährlichen Bemessungsabfluss liefert, werden die Abflüsse mit verschiedensten Modellansätzen ermittelt. Eine Kalibrierung der Rechenergebnisse erweist sich auf Grund fehlender Daten als schwierig, sodass die bestehende Unsicherheit in den Ergebnissen durch die Kombination verschiedener Modelle zu kompensieren versucht wird.

Je kleiner das Einzugsgebiet, umso größer ist die potentielle Abflussspende. Neben diesem bekannten Effekt ist weiters zu berücksichtigen, dass Wildbacheignisse zumeist in sehr kurzer Zeit, oft in wenigen Minuten, ablaufen. Deshalb wird umgangssprachlich auch der Begriff „Lawine“ (Stein- oder Schlammlawine) für Wildbachprozesse verwendet. Als sichtbares Merkmal dieser raschen Verlagerungsvorgänge können die durchflossenen Querschnittsflächen dienen, die auch in sehr kleinen Einzugsgebieten zumeist mehrere Zehnerquadratmeter messen können und somit Abflüsse jenseits von 100 m<sup>3</sup>/s vermuten lassen (Abb. 1). Diese Abflüsse sind rein hydrologisch nicht erklärbar. Sie werden erst dann verständlich, wenn in der Abflussermittlung auch das verlagerte Feststoffvolumen berücksichtigt wird. Sie geben deshalb Auskunft über den Gemischabfluss, für eine Kalibrierung hydrologischer Modelle sind diese Abflüsse nicht geeignet, da sie viel zu große Abflussspenden aus Wildbacheinzugsgebieten vorgeben würden.



**Abb. 1:** Durchflossene Querschnittsfläche, Wartschenbach Ereignis vom 6.9.1997 (Hübl et al. 2002)

### 3. Was ist ein Hochwasser in einem Wildbach?

Laut ÖNORM B2400 (1986) wird Hochwasser definiert als Wasserstand oder Abfluss, der einen bestimmten Grenzwert überschreitet. In der europäischen Hochwasser-richtlinie (Richtlinie 2007/60/EG) gilt die zeitlich beschränkte Überflutung von Land, das normalerweise nicht mit Wasser bedeckt ist, als Hochwasser.

Gemäß ForstG 1975 idgF wird den Wildbächen die Eigenschaft zugewiesen, dass sie durch rasch eintretende und nur kurze Zeit dauernde Anschwellungen Feststoffe aus ihrem Einzugsgebiet oder aus ihrem Bachbett entnehmen, mit sich führen und ablagern, oder einem anderen Gewässer zuführen können. Deshalb ist für die Abflussbildung in Wildbächen auch die Mobilisierbarkeit der Feststoffe (v.a. Geschiebe) zu beachten, denn durch den Feststofftransport werden wesentliche Abflusseigenschaften verändert:

- Die volumetrische Feststoffkonzentration kann Werte bis zu 0.7 (0.8) erreichen (z.B. Takahashi 1991)
- Die Dichte des Wasser-Feststoffgemisches kann mehr als das Doppelte der Dichte von Wasser betragen (z.B. Iverson 1997)
- Das Fließverhalten nimmt bei höherer Feststoffkonzentration ein Nicht-Newtonisches Verhalten an (z.B. Costa 1984)
- Die Viskosität kann sich auf weit mehr als 2 Pas erhöhen (z.B. Costa 1984)
- Die Dauer eines Murganges kann sich von wenigen Sekunden bis auf eine Zeitdauer von mehreren Tagen erstrecken (z.B. Lehmann 1996)
- Die Abflussspitze von murartigen Verlagerungsprozessen kann ein Mehrfaches des Reinwasserabflusses betragen (z.B. Costa 1984).
- Eine Murgang kann aus mehreren Murschüben bestehen, die in kurzen Zeitabständen aufeinander folgen (z.B. Davies, 1988).

Deshalb werden - entsprechend des Feststoffanteiles im Abfluss - verschiedene Verlagerungsprozesse unterschieden (Hübl 2007; ONR 24800).

Zur fluviatilen Ausprägung des Verlagerungsprozesses werden Hochwasser (HW) und fluviatiler Feststofftransport (FFT) gezählt, in der murartigen Ausprägung werden murartiger Feststofftransport (MFT) und Murgang (MG) zusammengefasst. Für Hochwasser gilt, dass - bei Überschreitung eines gewissen Wasserstandes - die volumetrische Feststoffkonzentration ( $c_v$ ) sehr gering und damit die Dichte des Abflusses gegenüber der Dichte des Wassers kaum erhöht ist. Anstelle des Begriffs eines „Bemessungshochwassers in Wildbächen“ sollte deshalb besser nur von einem „Bemessungsabfluss“ gesprochen werden.

Die volumetrische Feststoffkonzentration ( $c_v$ ) für ein Ereignis errechnet sich mit:

$$c_v = \frac{V_S}{V_W + V_S}$$

$V_S$  Fracht Sediment [ $m^3$ ];  $V_W$  Fracht Wasser [ $m^3$ ]

Daraus ergibt sich ein Sedimentzuschlagsfaktor (SZ) mit dem der Hochwasserabfluss zu multiplizieren ist, um den Gesamtabfluss zu bestimmen.

$$SZ = 1 + \frac{c_v}{(1 - c_v)}$$

$$Q_{WS} = SZ \cdot Q_W$$

$Q_{WS}$  Gemischabfluss [ $m^3/s$ ];  $Q_W$  Abfluss Wasser [ $m^3/s$ ]

Verglichen mit der DIN 19663 (1985) ergeben sich gemäß den Abgrenzungskriterien in der ONR 24800 etwas höhere Multiplikatoren (Tab. 1) für den Gemischabfluss.

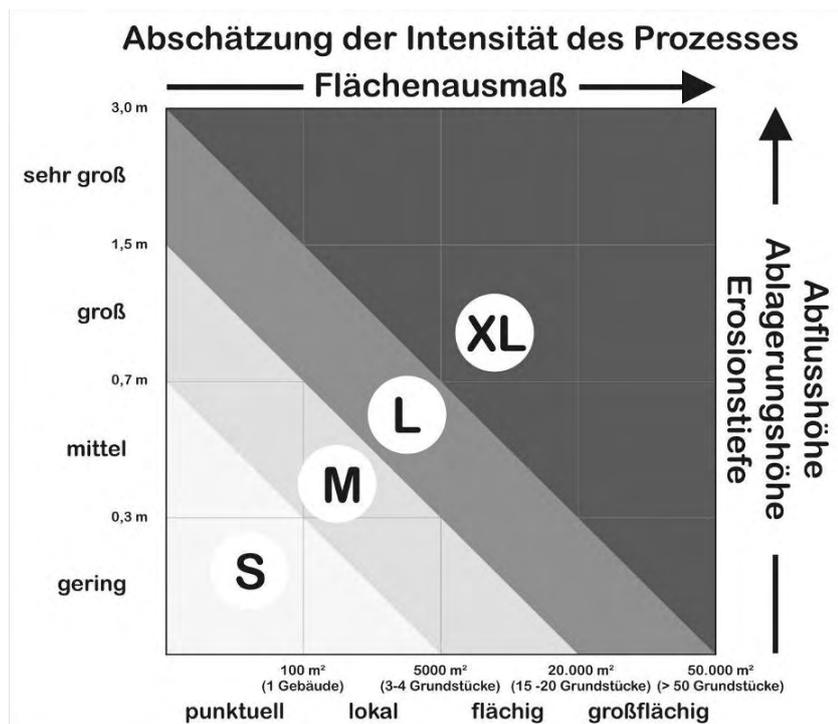
**Tab. 1:** Vergleich der Geschiebe- bzw. Sedimentzuschlagsfaktoren für den Reinwasser abfluss bei unterschiedlicher Feststoffkonzentration

Sedimentzuschlagsfaktor gem. ONR 24800		Geschiebezuschlag gem. DIN 19663	
Hochwasser (HW)	1.0-1.05	Geschiebetransport kann ausgeschlossen werden	1.0
Fluviatile Feststoffverlagerung (FFT)	1.05-1.11	Geschiebetransport gering	1.05-1.1
Murartige Feststoffverlagerung (MFT)	1.11-1.67	Mittlerer bis großer Geschiebetransport	1.1-1.4
Murgang (MG)	> 1.67	Sehr großer Geschiebetransport, Muren sind nicht auszuschließen	> 1.4

#### 4. Welche Reaktion zeigt das Einzugsgebiet?

Es ist unbestritten, dass die Erkenntnisse über die Reaktion eines Einzugsgebietes auf einen bestimmten Niederschlag (ein Auslöseereignis) nur mit Einschränkungen auf andere Einzugsgebiete übertragen werden können. Dies ist auf die unterschiedliche Disposition der Einzugsgebiete gegenüber Auslöseereignissen zurückzuführen. Deutlich wird dieses Verhalten, wenn man Ereignischroniken verschiedener Einzugsgebiete in Bezug auf Frequenz, Verlagerungsprozess und Magnitude der Ereignisse vergleicht. Dafür werden in einem vom BMLFUW, Abt. IV/5 finanzierten Projekt die in den Gefahrenzonenplänen der Wildbach- und Lawinenverbauung registrierten Schadereignisse in einer Datenbank erfasst. Seit Projektbeginn (2008) konnten bisher rund 20.000 Schadensereignisse von Wildbächen bearbeitet werden, eine erste Auswertung soll im Herbst 2009 vorliegen.

Die Magnitude (Intensität) eines Ereignisses wird mit einer für die Ereignisdokumentation entwickelten Matrix (Abb. 2), in der für Wasserprozesse die Faktoren Ausbreitungsfläche und Ablagerungs- bzw. Abflusstiefe berücksichtigt werden (Hübl 2008) klassifiziert.



**Abb. 2:** Matrix zur Bestimmung der Magnitude eines Ereignisses (Hübl 2008)

Beispielhaft ist in Abb. 3 die Ereignischronik des Lattenbaches dargestellt. Murgänge (MG) sind der dominante Verlagerungsprozess im Einzugsgebiet, das Wiederkehrintervall liegt bei den Ereignissen kleiner Intensität (S) bei rund 10 Jahren. Vom Institut für Alpine Naturgefahren durchgeführte Abflussmessungen (2007 und 2008) in diesem rund 7 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiet ergaben für diese häufigen Ereignisse kurzfristige Abflussspitzen von 200 bis 350 m<sup>3</sup>/s (sh. Abb. 4) bei einem Rein-

wasserabfluss von etwa 5 m<sup>3</sup>/s. Daraus ergab sich der Hinweis, dass der „üblichen“ hydrologischen Berechnung der Bemessungsabflüsse aus dem Niederschlag, auch unter Berücksichtigung von Sedimentzuschlägen, Grenzen gesetzt sind.

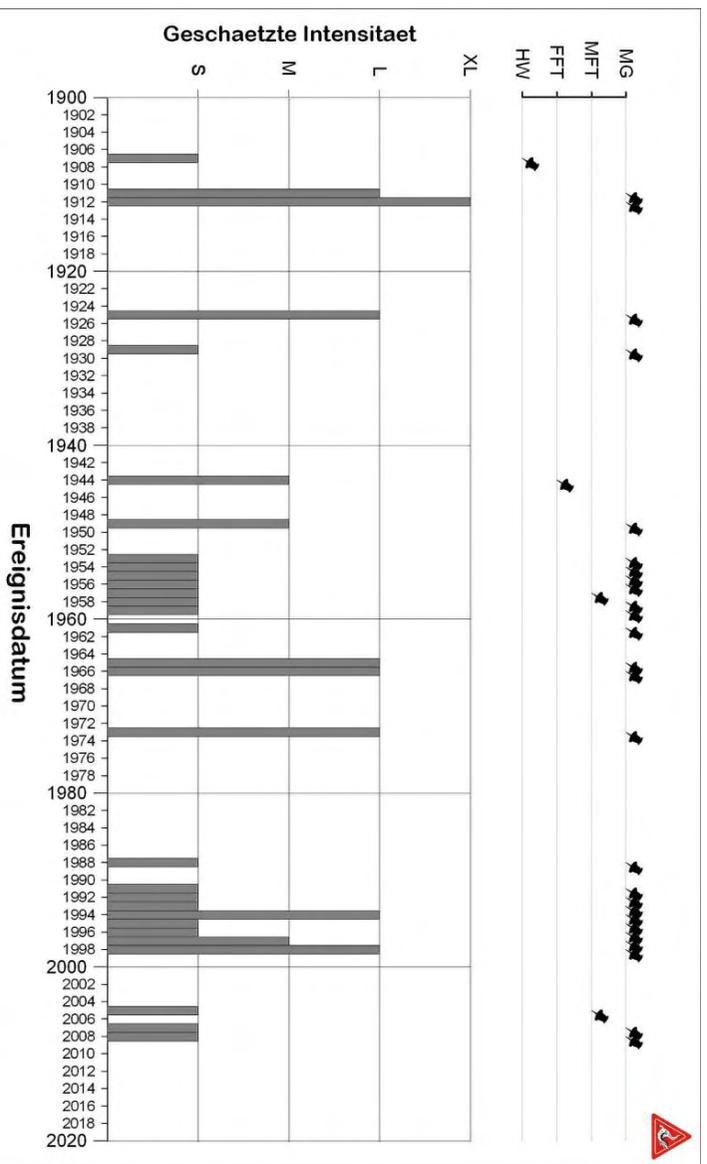


Abb. 3: Ereignischronik Lattenbach, Tirol

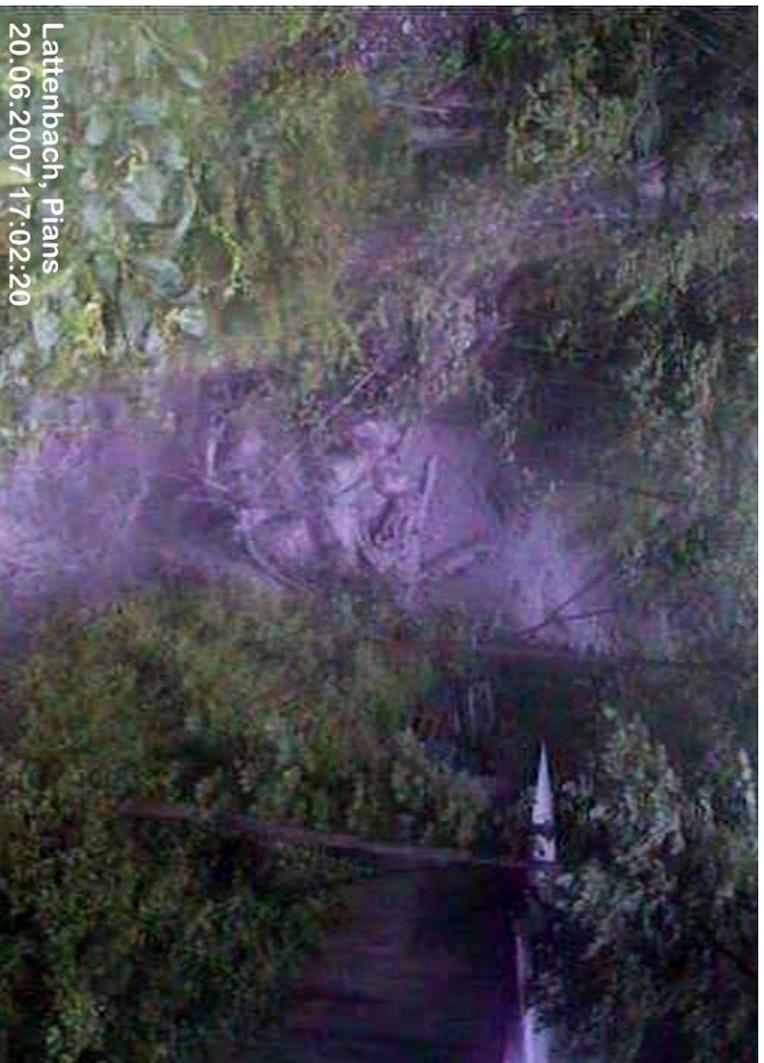


Abb. 4: Murschub am Lattenbach (Geschwindigkeit rund 4.5 m/s, Abfluss etwa 50 m<sup>3</sup>/s)

Obwohl der Abfluss in Wildbacheinzugsgebieten prinzipiell über das Niederschlagsangebot gesteuert wird, modifiziert die Mobilisierbarkeit von Feststoffen den Abfluss wesentlich. Als maßgebliche Faktoren sind dabei das mobilisierbare Feststoffvolumen und die Mobilisierungszeit anzusehen. Die aus diesen Faktoren resultierende Mobilisierungsintensität beeinflusst maßgeblich den auftretenden Verlagerungsprozess und die Art und Größe des Abflusses.

Jedes Einzugsgebiet befindet sich in einem dynamischen, metastabilen Systemzustand (Chorley und Kennedy 1971), der durch eine Grund- und eine variable Disposition (Heinimann et al. 1998) bestimmt ist (Abb. 5). Bei kleiner Disposition zur Feststoffmobilisierung oder nicht verfügbaren Geschiebequellen verhält sich ein Wildbacheinzugsgebiet ähnlich einem größeren Einzugsgebiet, in dem fluviatile Prozesse (Hochwasser, Fluvialer Feststofftransport) dominieren. Mit steigender Disposition erfolgt ein zumeist abrupter Übergang in einen anderen Systemzustand, der von murartigen Prozessen (Murartiger Feststofftransport, Murgang) geprägt ist. Bei sehr hoher Disposition zu Verlagerungsprozessen kann schon bei sehr kleinen Auslöseereignissen (Niederschlag, Abfluss) ein Übergang in den anderen Systemzustand erfolgen.

In gewissen Einzugsgebieten besteht die Möglichkeit eines weiteren Überganges in einen Systemzustand III, in dem extrem hohe Abflüsse (z.B. über 1000 m<sup>3</sup>/s) erreicht werden können. Für die Bemessung ist dieser Zustand zumeist nicht maßgebend, jedoch sollte er zur Beurteilung der Restgefährdung herangezogen werden.

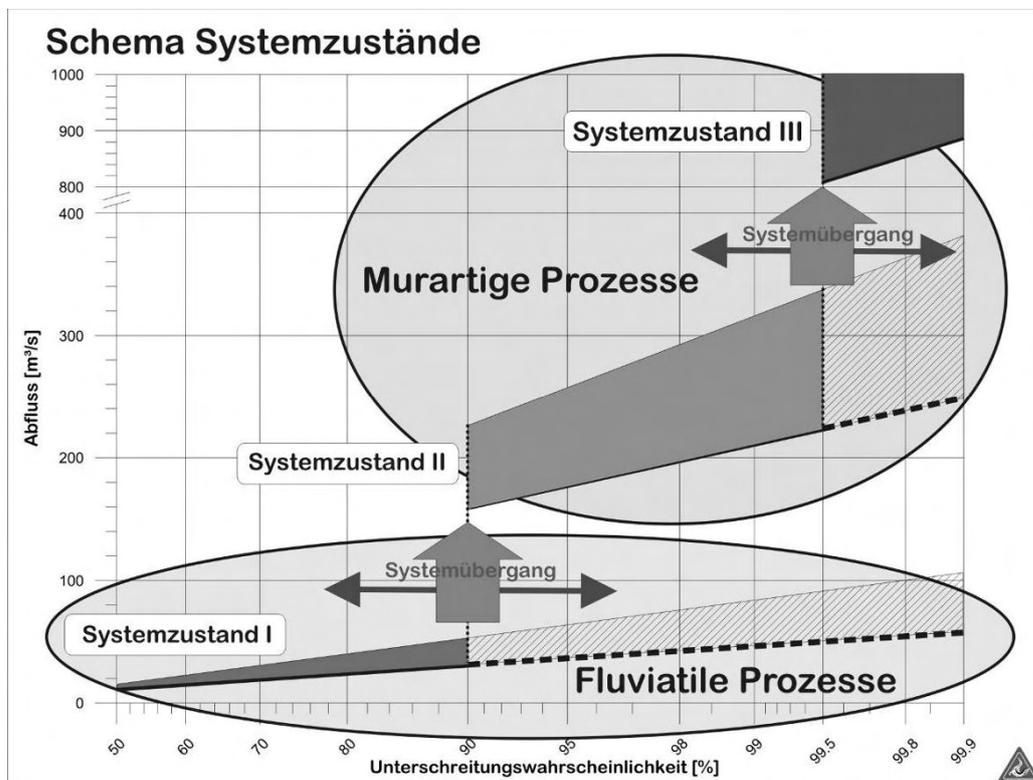


Abb. 5: Systemzustände in einem Wildbacheinzugsgebiet

## 5. Was muss bei der Bemessung von Abflüssen in Wildbächen berücksichtigt werden?

Die Berechnung der Bemessungsabflüsse in Wildbächen muss den jeweiligen Systemzustand des betroffenen Einzugsgebietes berücksichtigen. Kann für den Systemzustand I, in dem fluviatile Prozesse auftreten, mit hydrologischen Ansätzen der Bemessungsabfluss ermittelt werden, so ist dies für den Systemzustand II nicht mehr möglich. Basierend auf einer empirischen Beziehung zwischen Spitzenabfluss und Murgangvolumen werden von verschiedenen Autoren Formeln zur Abschätzung des Spitzenabflusses vorgeschlagen, wobei aber von Rickenmann (1999) angemerkt wird, dass die entwickelten Formeln den Abfluss bis zum Faktor 100 überschätzen können.

Beispielhaft sei die Schätzformel für Spitzenabflüsse granularer Murgänge nach Mizuyama et al. (1992) angeführt.

$$Q_{ws} = 0.135 \cdot V_{ws}^{0.780}$$

$V_{ws}$  Fracht Wasser und Sediment [m<sup>3</sup>]

### 5.1 Wie oft treten Schadensereignisse auf?

In Wildbächen wird der Bemessungsabfluss zumeist aufgrund der Niederschlagsstatistik einer Jährlichkeit zugeordnet. Da diese Annahme grundsätzlich die Disposition des Einzugsgebietes auf Abflusentstehung und Feststoffmobilisierung unberücksichtigt lässt, müssen weitere methodische Ansätze Anwendung finden, um die auftretenden Unsicherheiten zu verringern. Primär ist in diesem Zusammenhang die rückwärtsgerichtete Indikation anzuführen (Heinimann et al. 1998), in deren Rahmen unterschiedliche methodische Ansätze (Hübl et al. 2007a) Anwendung finden.

- Historische Methode

Der historisch-statistische Ansatz stützt sich auf die Auswertung von Berichten und Chroniken. Als Ergebnis dieser Methode lassen sich zumindest Rückschlüsse auf die Frequenz ziehen. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass Aufzeichnungen über Ereignisse in der Regel nicht alle stattgefundenen Ereignisse, sondern zumeist nur größere (mit Schaden verbundene) Ereignisse, beinhalten. Bestenfalls finden sich auch Hinweise auf die Auslösungsursache, den Verlauf, die Intensität, die Ausbreitung und den Schaden. Mithilfe der zur Zeit in Bearbeitung befindlichen Ereignischronik können in Zukunft Wiederkehrintervalle von Ereignissen unterschiedlicher Intensität besser abgeschätzt werden.

- Morphologische Methode

Da sich die Wirkung früherer Ereignisse zumeist an Spuren im Gelände (morphologischer Formenschatz, Vegetation) erkennen lässt, geben „stumme Zeugen“ Aufschluss über den Prozesstyp. In Kombination mit dendrogeomorphologischen Analysen (Stoffel 2008) kann die Kenntnis über Frequenz von

murartigen Verlagerungsarten deutlich verbessert werden. Ebenso hilfreich ist die Auswertung von Aufschlüssen im Ablagerungsbereich, wenn organisches Material aus verschiedenen Ablagerungsschichten für Datierungen gewonnen werden kann.

## **5.2 An welcher Stelle im Einzugsgebiet soll der Bemessungsabfluss ermittelt werden?**

Da der Bemessungsabfluss in Wildbächen maßgeblich von den Feststoffen beeinflusst wird, ist es vorab notwendig die Lage des Bemessungsstandortes festzulegen. Zum Beispiel wurde bei einem Ereignis (19. Juni 2006) am Angerbach (Hübl et al. 2007b) ein murartiger Abfluss durch eine Funktionskette in einen fluviatilen Abflusstyp umgewandelt, wodurch sich der Abfluss von rund 100 auf 30 m<sup>3</sup>/s reduziert. Ebenso verringerte sich der Abfluss des Lattenbaches beim Ereignis vom 23. August 2005 von rund 50 m<sup>3</sup>/s im Mittellauf auf 5 m<sup>3</sup>/s an der Mündung infolge natürlicher Sedimentation des mitgeführten Geschiebes.

## **5.3 Welcher Verlagerungsprozess liegt dem Bemessungsereignis zugrunde?**

Von zentraler Bedeutung für die Festlegung des Bemessungsabflusses ist vorab die Bestimmung des möglichen Verlagerungsprozesses. Je mehr Feststoffe im Einzugsgebiet in kurzer Zeit mobilisiert werden können, umso eher wird der Systemzustand II mit murartigen Verlagerungsvorgängen erreicht. Je nach Disposition kann der Systemübergang bereits bei sehr kleinen Auslöseereignissen stattfinden. So wird von Langenscheidt (2002) berichtet, dass die Murgangaktivität am kleinen Mühlsturzhorn (Reiteralm) beginnt, wenn Niederschlagsintensitäten von 2 mm/10 Minuten überschritten werden. Auch von anderen Einzugsgebieten ist aus der Ereignischronik bekannt, dass Murgänge relativ häufig (Frequenz kleiner 20 Jahre) auftreten. Deshalb kann ein seltenes, z.B. ein 100-jährliches Hochwasserereignis für viele Einzugsgebiete ausgeschlossen werden, da der Systemübergang bereits bei häufigen Auslöseereignissen erfolgt (Abb. 5). Erst wenn durch Schutzmaßnahmen die Feststoffherde stabilisiert oder der Transportprozess verändert wird und somit der Systemzustand I auch für seltene Ereignisse erreicht wird, kann mit hydrologischen Modellen der Bemessungsabfluss festgelegt werden.

Der Abfluss in einem Wildbacheinzugsgebiet ist kein linearer Prozess, sondern weist ein äußerst komplexes Verhalten auf, da Ursache und Wirkung entkoppelt sind. Die Verlagerungsprozesse können sich bei einem Ereignis entlang des Gerinnelaufes je nach den auftretenden Randbedingungen ändern (Prozess-Routing). Um den an einem Betrachtungspunkt auftretenden Verlagerungsprozess festzulegen ist es notwendig, die Prozesse, beginnend im oberen Einzugsgebiet, entlang des Gerinneverlaufs zu bestimmen.

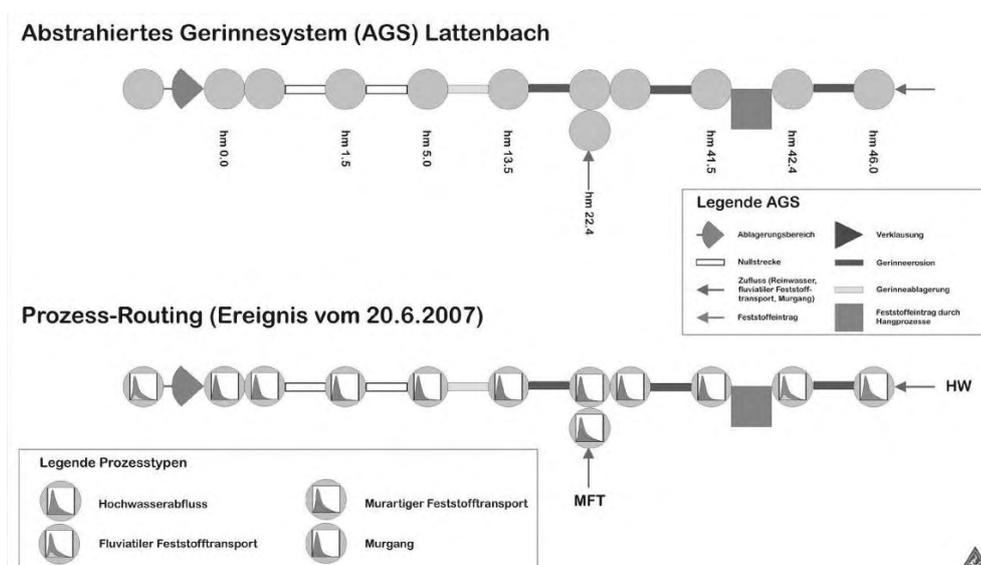
Dies kann z.B. durch eine Kartierung der durch „stumme Zeugen“ belegten Prozesse erfolgen (Prozesskartierung). Es hat sich die Bildung unterschiedlicher Szenarien bewährt die mögliche Reaktionen von Gerinneabschnitten aufzeigen. Die Darstellung dieser Szenarien kann im sogenannten „Abstrahierten Gerinnesystem“ (AGS)

erfolgen, das anlässlich des Projektes EtAlp (BMLFUW 2003) entwickelt wurde (Abb. 6).

Abschnitte, die ein ähnliches Verhalten im Hinblick auf den hydraulisch ausschlaggebenden Transport und/oder Ablagerungsprozess aufweisen, werden als Gerinnesystemelemente (GSE) zu einer stark abstrahierten Darstellung des Gesamtsystems (AGS) zusammengefügt. Insgesamt stehen acht verschiedene Elemente zur Auswahl, die folgendermaßen charakterisiert werden können:

- Nullstrecke (keine Veränderung des Transportprozesses)
- Zufluss (aus einem seitlichen Zubringer wird entweder Hochwasser, Fluviatiler Feststofftransport, Murartiger Feststofftransport oder Murgang unterstellt)
- Feststoffeintrag (punktueller Feststoffeintrag durch Seiten- oder Sohlenerosion)
- Verklausung (temporäres oder permanentes Hindernis im Abflussquerschnitt)
- Gerinneerosion (Gerinnestrecke mit vorwiegender Sohlen und/oder Seitenerosion)
- Gerinneablagerung (Gerinnestrecke mit vorwiegender Geschiebedeposition)
- Feststoffeintrag durch Hangprozesse (Geschiebeherde, die nicht mit dem Gerinnesystem in Verbindung stehen)
- Ablagerungsbereich (Depositionsbereich der Verlagerungsprozesse)

Jedem Gerinnesystemelement wird an seinem Anfangsknoten ein Transportprozessstyp unterstellt. Innerhalb des GSE kann es zu einer Transportprozessveränderung kommen, das Ergebnis wird dann am Endknoten des Elements, der wiederum den Anfangsknoten des unterliegenden Elements darstellt, abgebildet. Die Auswahl des am Endknoten zu erwartenden Prozessstyps muss der Bearbeiter selbst treffen, wobei sich als Hilfsmittel die Szenarioanalyse anbietet (Mazzorana et al. 2009).



**Abb. 6:** Prozess-Routing am Beispiel Lattenbach, Ereignis vom 20. Juni 2007

#### 5.4 Bei welchem Auslöseereignis erfolgt der Systemübergang?

Die Disposition eines Einzugsgebietes ist kein statischer sondern ein dynamischer Faktor. Sie beruht auf einer Kombination der Faktoren Untergrund (Geologie, Boden), Morphologie, Klima, Vegetation (Pflanzengesellschaft, Vegetationszustand), Landnutzung, Wasserhaushalt u.a. Am besten lässt sich der Systemübergang aus der Ereignischronik ableiten, indem man die Eintrittswahrscheinlichkeit häufiger murartiger Prozesse geringer Intensität ermittelt.

#### 5.5 Wie wirkt sich die Mobilisierungsintensität der Feststoffe auf die Form der Ganglinie aus?

Durch die Mobilisierungsintensität wird die Form der Ganglinie des Verlagerungsprozesse maßgeblich verändert (Abb. 7). Bei großer bis extremer Mobilisierungsintensität kann die Ganglinie einen kurzen aber sehr hohen Spitzenabfluss oder auch mehrere aufeinander folgende größere Abflussspitzen aufweisen. Mittlere Mobilisierungsintensitäten verkürzen den Verlauf des Abflusses, währenddessen kleine Mobilisierungsintensitäten die Form der Ganglinie nicht merklich verändern.

Als geomorphologisches Hilfsmittel zur Bestimmung dieser Intensität können z.B. die von Stiny (1910) geprägten Anbruchsformen dienen (Tab. 2). Linienhafte Anbrüche im Gerinne, wie Ufer-, Keil- und Feilanbrüche können kleine bis große Feststoffvolumina freisetzen. Die Mobilisierungszeit dauert aber generell länger als bei Muschel- und Verklausungsbruch (Dammanbruch), wo sehr große Feststoffmengen in kürzester Zeit verfrachtet werden können. Eine Sonderform eines Anbruches mit extremer Intensität kann durch die Verflüssigung eines Bodenkörpers eintreten, wenn dieser Körper durch eine Zusatzlast (impulsive loading) plötzlich beaufschlagt wird (Bovis 1992).

**Tab. 2:** Abschätzung der Mobilisierungsintensität von Feststoffherden in Wildbächen

Anbruchsform	Mobilisierbares Volumen	Mobilisierungszeit	Mobilisierungsintensität
Uferanbruch	klein bis mittel	kurz bis mittel	klein bis mittel
Keilanbruch	mittel	kurz bis lang	klein bis mittel
Feilanbruch	mittel bis groß	kurz bis lang	mittel bis groß
Muschelanbruch	mittel bis groß	sehr kurz	gross bis sehr groß
Verklausungsbruch	mittel bis sehr groß	sehr kurz	gross bis sehr groß
Verflüssigung	klein bis sehr groß	sehr kurz	gross bis extrem

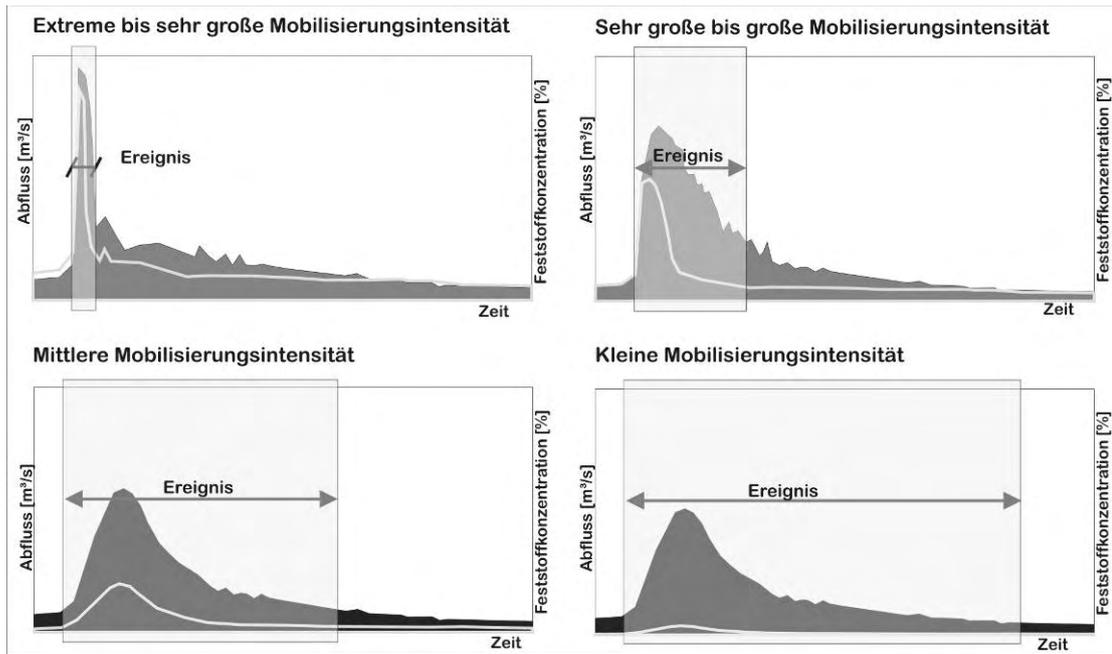


Abb. 7: Ausprägung der Ganglinien bei verschiedener Mobilisierungsintensität

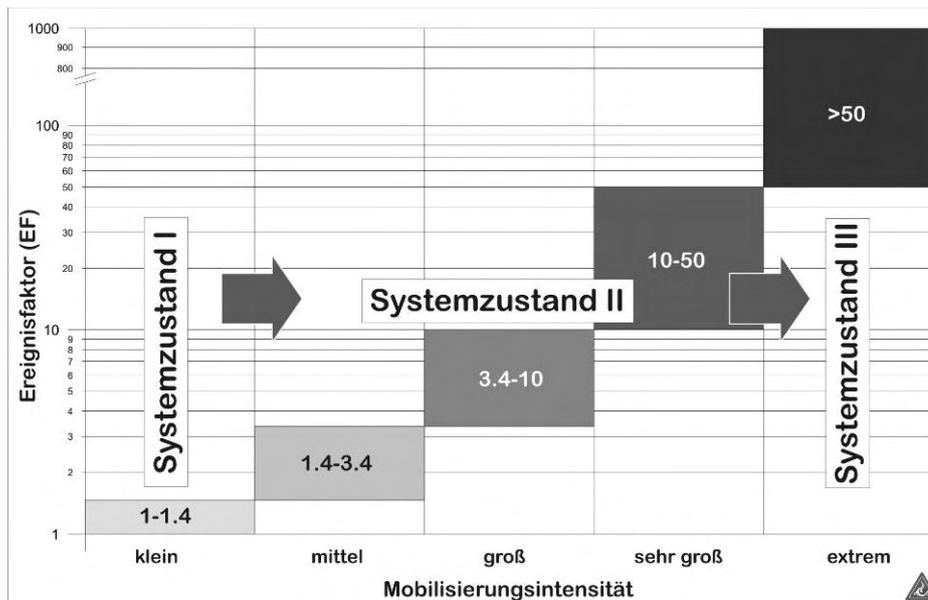
## 6. Festlegung eines Ereignisfaktors

Der Ereignisfaktor berücksichtigt, dass bei feststoffreichen, murartigen Transportprozessen die Volumensverlagerung in kurzer Zeit stattfindet. Rechnerisch ergibt sich eine Bandbreite des Ereignisfaktors, weil die maßgebliche Ereignisdauer (Abflussspitze) wesentlich kürzer ist als die der zugrunde liegenden Ganglinie des Reinwasserabflusses.

Bei Ereignisfaktoren kleiner 1.4 treten nur fluviatile Prozesse auf, Faktoren zwischen 1.4 und 3.4 repräsentieren einen Übergangsbereich, ab Ereignisfaktoren größer 3.4 ist mit murartigen Verlagerungsprozessen zu rechnen. Es ist mit den vorhandenen Daten derzeit nicht möglich, eine Einschränkung der Bandbreite des Ereignisfaktors vorzunehmen, sodass auch in Zukunft ein erfahrener Bearbeiter die Entscheidung über den Bemessungsabfluss treffen muss.

Um einen Bemessungsabfluss zu schätzen, ist der Abfluss beim Systemübergang (z.B.  $HQ_{10}$ ) mit dem Ereignisfaktor zu multiplizieren, da sich mit dem Übergang in ein anderes System die Abflusseigenschaften maßgeblich ändern. Erfolgt kein Systemübergang, d.h. dass fluviatile Prozesse auch bei sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit maßgeblich sind, kann vereinfacht mit den Sedimentzuschlägen (Tab. 1) gerechnet werden.

Nimmt man beispielhaft an, dass eine Abflussganglinie in einem Einzugsgebiet für den Systemübergang (Zustand I auf Zustand II) einen Abfluss von  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  und eine Dauer von rund 1.5 Stunden aufweist, so kann der Spitzenabfluss, wenn mächtige Feilanbrüche als Feststoffquellen dienen und die maßgebliche Verlagerung innerhalb von 20 Minuten (ein Fünftel der „Reinwasserdauer“) stattfindet, bei einem gewählten Ereignisfaktor von 10 mit  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  angenommen werden.



**Abb. 8:** Ausprägung der Ganglinien bei verschiedener Mobilisierungsintensität

## 7. Schlussfolgerungen

Das vorgeschlagene Bemessungskonzept für Abflüsse aus Wildbacheinzugsgebieten berücksichtigt zwar wesentliche Faktoren, bleibt aber, solange dieser Ansatz nicht mit zahlreichen Daten belegt werden kann, ein Gedankenmodell. Das Konzept hilft, die wesentlich größeren Abflüssen in Wildbächen aufgrund unterschiedlicher Systemzustände zu erklären. Die hohe zeitliche und räumliche Variabilität der Ereignisse kann mit diesem Konzept besser erklärt werden als mit den herkömmlichen hydrologischen Verfahren. Gerade im Hinblick auf die laufende Diskussion über Abflussveränderungen durch den „globalen Wandel“, verbunden mit Systemänderungen im Einzugsgebiet, erscheint diese Vorgangsweise sinnvoll.

## 8. Literatur

BMLFUW (2003): ETAlp – Erosion, Transport in Alpinen Systemen: Gesamtheitliche Erfassung und Bewertung von Erosions- und Transportvorgängen in Wildbacheinzugsgebieten, Handbuch Detailebene, (Hrsg. Projektteam EtAlp)

Bovis, M.J., Dagg, B.R. (1992): Debris flow triggering by impulsive loading: mechanical modelling and case studies, *Can. Geotech. Journal*, **29**, S. 345-352

Chorley, R., Kennedy, B. (1971): *Physical Geography. A systems approach*, Prentice Hall London

Costa, J.E. (1984): Physical geomorphology of debris flows, in: *Developments and applications of geomorphology* (ed. by COSTA, J.E. and FLEISHER, P.J.), S. 268-317, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo

Davies, T.R.H. (1988): Debris flow surges - a laboratory investigation, *Mitt. d. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, **96**, ETH, Zürich

DIN 19663 (1985): *Wildbachverbauung, Begriffe: Planung und Bau*, Juni 1985

- Hagen, K., Ganahl, E., Hübl, J. (2007): Analyse und Evaluierung von gebräuchlichen empirischen Ansätzen zur Hochwasserabschätzung in Wildbächen. In: Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (Hrsg.), BFW-Berichte (Schriftenreihe des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft) 137, 112; Eigenverlag, Wien; ISBN 1013-0713
- Heinimann, H., Hollenstein, K., Kienholz, H., Krummenacher, B. & Mani, P. (1998): Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren, Bern, BUWAL Umwelt-Materialien 85
- Hübl, J., Ganahl, E., Moser, M., Schnetzer, I., (2002): Dokumentation Wartschenbach, WLS Report 52, Institut für Wildbach- und Lawinenschutz, Universität für Bodenkultur Wien (unveröffentlicht)
- Hübl, J. (2007): Ereignisdokumentation in Wildbächen - Systematik und mögliche Ergebnisse. In: Gutknecht, D. (Hrsg.), Wiener Mitteilungen: Extreme Abflussereignisse. Dokumentation - Bedeutung - Bestimmungsmethoden. ÖWAV-Seminar, Bundesamtsgebäude Wien, 24.-25. Mai 2007 206, 69 - 84; Inst. f. Wasserbau u. Ingenieurhydrologie, TU Wien, Wien; ISBN 978-3-85234-098-2
- Hübl, J.; Fuchs, S.; Agner, P. (2007a): Optimierung der Gefahrenzonenplanung: Weiterentwicklung der Methoden der Gefahrenzonenplanung; IAN Report 90; Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien (unveröffentlicht)
- Hübl, J., Thaler, S., Holub, M. (2007b): Dokumentation und Analyse des Ereignisses vom 19. Juni 2006 am Angerbach/Bad Hofgastein. IAN Report 114. Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur-Wien (unveröffentlicht)
- Hübl, J. (2008): Ereignisdokumentation Wasser, Lehrunterlagen zum Universitätskurs Ereignisdokumentation, Institut für Alpine Naturgefahren (Hrsg.), Universität für Bodenkultur Wien, 77 S.
- Iverson, R.M. (1997): The physics of debris flows, *Reviews of Geophysics*, **35**, 3/August 1997, S. 245–296, American Geophysical Union
- Langenscheidt, E. (2002): Felsstürze, Muren und deren auslösende Faktoren am kleinen Mühlsturzhorn – Reiteralm, Nationalpark Berchtesgaden, in: Gmundner Geo-Studien 1 (Hrsg. Weidinger, J.T.), S. 51-60, ERKUDOK Institut Museum Gmunden
- Lehmann, C. (1996): Empfehlungen zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen, Teil II Fachliche Grundlagen und Fallbeispiele, Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie, Mitteilung Nr. 4, Bern
- Mazzorana, B., Hübl, J., Fuchs, S. (2009): Improving risk assessment by defining consistent and reliable system scenarios. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. **9**, 145-159; ISSN 1561-8633
- Mizuyama, T., Kobashi, S., Ou, G. (1992): Prediction of debris flow peak discharge; Proc. Int. Symp. Interpraevent, Bern, Switzerland, Bd. 4, S. 99-108

ONR 24800 (2009): ON-Regel Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung, Österreichisches Normungsinstitut

Rickenmann, D. (1999): Empirical Relationships for Debris Flows, *Natural Hazards*, **19**, S. 47-77, Kluwer Academic Publishers

Stiny, J. (1910): Die Muren, Wagner, Innsbruck

Stoffel, M. (2008): Murgangaktivität auf einem bewaldeten Kegel der schweizer Alpen seit dem Holozän, Proc. Int. Symp. Interpraevent, Dornbirn, Vol. 1, S. 501-511

Takahashi, T. (1991): Debris Flow, IAHR AIRH Monograph, Balkema, Rotterdam, Brookfield

**Anschrift des Verfassers:**

**Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Johannes Hübl**

Universität für Bodenkultur Wien

Institut für Alpine Naturgefahren

Department Bautechnik und Naturgefahren

Peter Jordan Straße 82

A - 1190 Wien

Tel.: +43 1 47654-4352

E-mail: johannes.huebl@boku.ac.at

# HOCHWASSERABLAUF IN FLUSSSTRECKEN

Hannes Gabriel

## 1. Einleitung

Die Erhaltung vorhandener Retentionsflächen und die Schaffung neuer Retentionsräume sind trotz fallweise auftretender Interessenskonflikte mit Land- und Forstwirtschaft, Raumordnung und Siedlungsentwicklung vordringliches Ziel des modernen Wasserbaus. Die Kombination von Rückhalt des Wassers am Ort seiner Entstehung durch geeignete Bewirtschaftung, der Verlangsamung des Wellenablaufes durch Schaffung geeigneter Strukturen im und am Fluss und die Errichtung von Rückhaltebecken kann viel zur Vermeidung von Hochwasserschäden beitragen.

In diesem Beitrag werden jene Prozesse beleuchtet und die auf sie wirkenden Einflussfaktoren dargestellt, die den Wellenablauf in Flussstrecken und damit auch die Auswirkungen von Hochwasserereignissen maßgeblich bestimmen. Danach werden die daraus resultierenden Aspekte und Konsequenzen für die Planung dargestellt.

## 2. Wellenablauf

### 2.1 Allgemeines

In diesem Beitrag wird davon ausgegangen, dass sich am oberen Ende eines Gewässers eine Welle gebildet hat und sich diese nun talwärts bewegt. Auf die bei der Entstehung dieser Welle oftmals komplex zusammenwirkenden meteorologischen, geologischen, morphologischen, geobotanischen und anthropogenen Faktoren soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

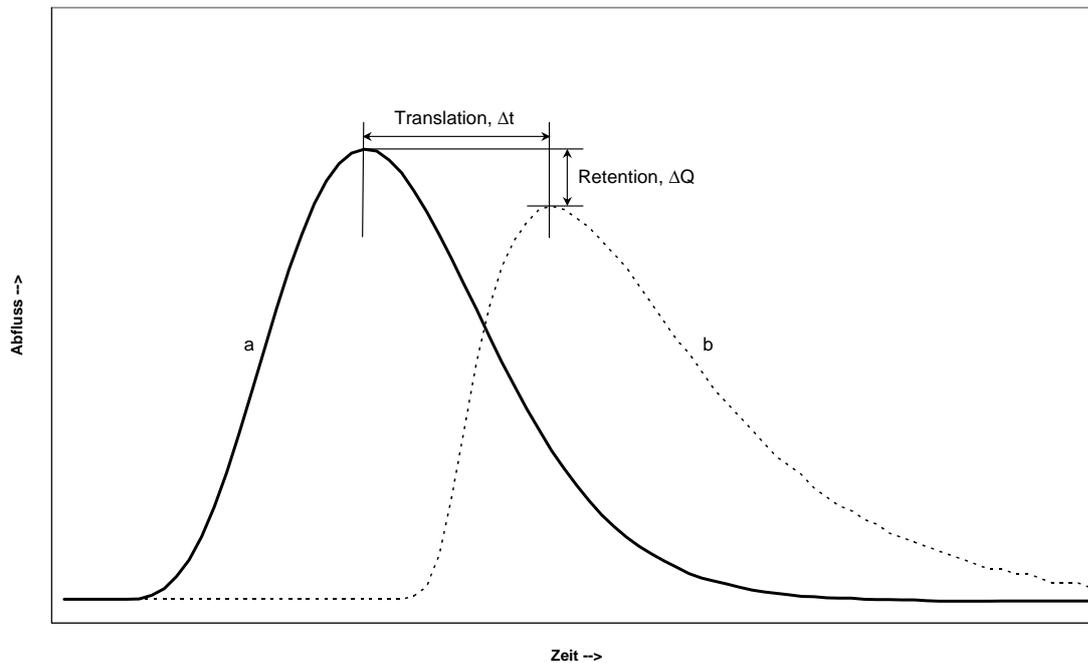
Höhere Abflüsse sind in der Regel durch Starkregenereignisse, welche mehr oder weniger unmittelbar Hochwässer verursachen können, oder durch intensive Schneeschmelze infolge raschen Temperaturanstiegs in höheren Lagen bedingt. Als besonders kritisch ist die Kombination dieser beiden Faktoren anzusehen, also das zeitliche Zusammentreffen von intensiver Schneeschmelze und Starkniederschlägen.

### 2.2 Prozesse: Translation und Retention

Die für den Wellenablauf maßgeblichen Prozesse sind die Translation und die Retention (Abbildung 1). Sie treten bei jedem Fließvorgang in Erscheinung und beeinflussen je nach Situation unterschiedlich stark die Verformung einer Eingangswelle.

Unter Translation ist ganz allgemein die Fortbewegung einer Welle zu verstehen. Sie erfolgt mit jener Geschwindigkeit, welche sich im Abflussraum infolge dessen Querschnittsform, Längsneigung und Rauheit einstellt.

Retention ist der Rückhalt von Wasser im oder neben dem Abflussraum. Sie bedingt eine Verringerung des Wellenscheitels, also eine Abflachung der Welle.



**Abb. 1:** Wellenablauf – Translation und Retention. a – Eingangswelle, b – Ausgangswelle.

Bei der in der Natur auftretenden fließenden Retention tritt durch Strukturen im Flussbett und in den durchströmten Vorländern in erster Linie der erwähnte Verzögerungseffekt des Abflusses auf, zudem kann in Abhängigkeit von Längsgefälle und Wellenform eine Verringerung des Wellenscheitels eintreten.

Bei der stehenden Retention, welche in der Regel künstlich durch Aufstau in gesteuerten oder ungesteuerten Rückhaltebecken geschaffen wird, wird der Wellenscheitel durch das gezielte Zwischenspeichern von Teilen des Abflusses reduziert.

In der Natur kann stehende Retention oberwasserseits natürlicher Drosseln wie enger Schluchtstrecken, oder durch Verlegung des Abflussraumes durch Muren oder Felsstürze auftreten. Zumeist wird stehende Retention aber künstlich geschaffen, da sie im Hinblick auf die Reduktion des Wellenscheitels die bei weitem effizienteste Form ist.

Da ein natürlicher Wellenablauf bzw. die sich daraus ergebende Wellenverformung wie erwähnt das Ergebnis des engen Zusammenwirkens der Prozesse Translation und Retention ist, werden im Folgenden beide Prozesse unter dem im allgemeinen Sprachgebrauch verwendeten Begriff „Retention“ subsumiert.

### 2.3 Einflussfaktoren

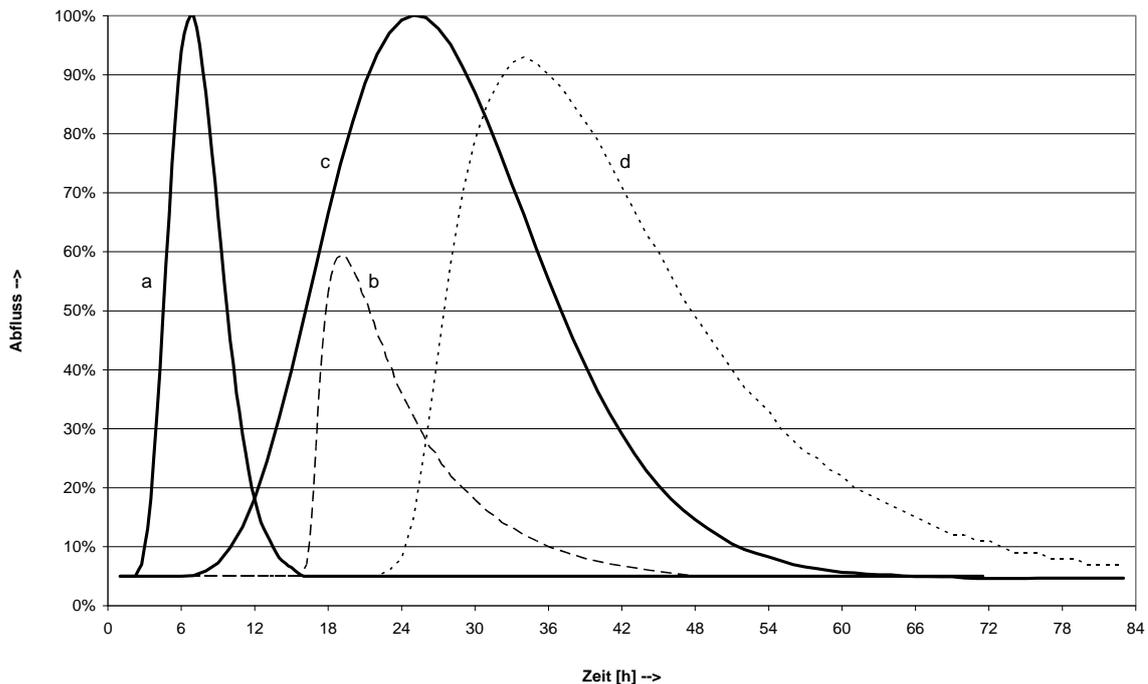
Da der Erhalt, die Verbesserung und die Schaffung von Retention in allen ihren Ausprägungen erklärtes Ziel des modernen Schutzwasserbaus ist, existieren zahlreiche Untersuchungen und Berechnungen zu diesem Thema. In diesem Abschnitt werden die einzelnen das Retentionsverhalten von Flussräumen beeinflussenden Faktoren kurz beschrieben.

### 2.3.1 Form der Eingangswelle

Maßgebend für das Ausmaß des Rückhaltes einer Welle in einem vorgegebenen Abflussraum sind deren Scheitelwert, zeitliche Entwicklung und Fracht im Vergleich zum verfügbaren Abflussraum (Abbildung 1).

Durch fließende Retention werden Abflussscheitel von Wellen geringer Fracht stärker reduziert als jene von Wellen großer Fracht.

Auch sind steile und kurze Wellen im Falle stehender Retention günstiger, da zur Reduktion der Wellenscheitel geringere Rückhaltevolumina erforderlich sind.



**Abb. 2:** Wellenverformung unterschiedlicher Eingangswellen. Rechteckgerinne,  $B=10$  m,  $L=10$  km,  $I = 1$  ‰,  $k_{St}=10$  m<sup>1/3</sup>/s; a, b – Ein- und Ausgangswelle I; c, d – Ein- und Ausgangswelle II (vierfache Fracht von Welle I).

### 2.3.2 Verfügbarkeit von Abflussraum

Für jede Form der Retention ist das Vorhandensein von ausreichend Raum im und entlang des Flusses eine wesentliche Grundvoraussetzung.

Werden beispielsweise im Zuge von Renaturierungen Strukturierungsmaßnahmen gesetzt, so müssen die Auswirkungen der dadurch erhöhten Wasserspiegel auf vorhandene Hochwasserschutzbauten untersucht werden.

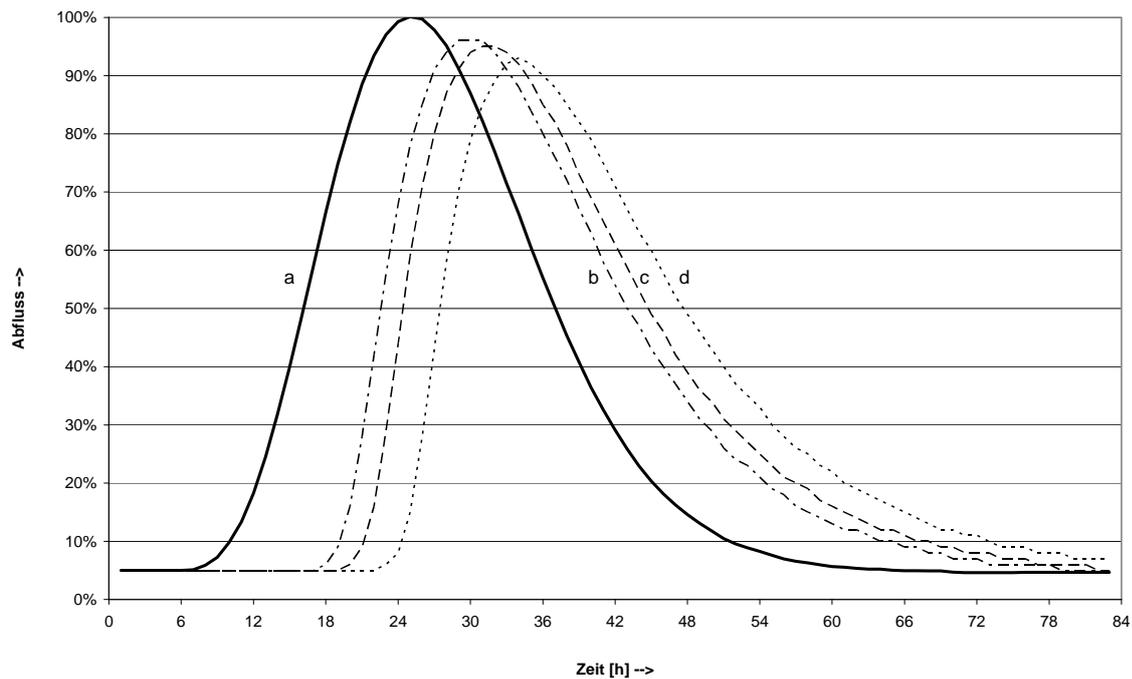
Die größte abflussverzögernde Wirkung hat dabei ein breiter, flacher und stark strukturierter Abflussraum. Durch den verlangsamten Abfluss kommt es zu einer Verzögerung der Welle und einer Dämpfung des Hochwasserscheitels flussab.

Für die stehende Retention ist ausreichend verfügbares Speichervolumen wesentlich. Hier wird Wasser dem unmittelbaren Abflussgeschehen entzogen und auf entsprechenden Flächen zwischengespeichert. Dadurch kann der Wellenscheitel deutlich abgemindert werden.

Übersteigen aber lange oder übergroße Wellen das verfügbare Volumen, so verliert das Retentionsbecken die Wirkung der Scheitelabminderung gänzlich, zuströmendes Wasser wird unvermindert in den Unterlauf abgegeben.

### 2.3.3 Längsgefälle des Abflussraumes

Vergleichende Untersuchungen der Abflussentwicklung entlang zahlreicher Fließgewässer zeigen deutlich, dass bei gleichbleibender Rauigkeit mit abnehmendem Längsgefälle die Retentionswirkung infolge der Verlangsamung des Abflusses deutlich zunimmt (Abbildung 3).



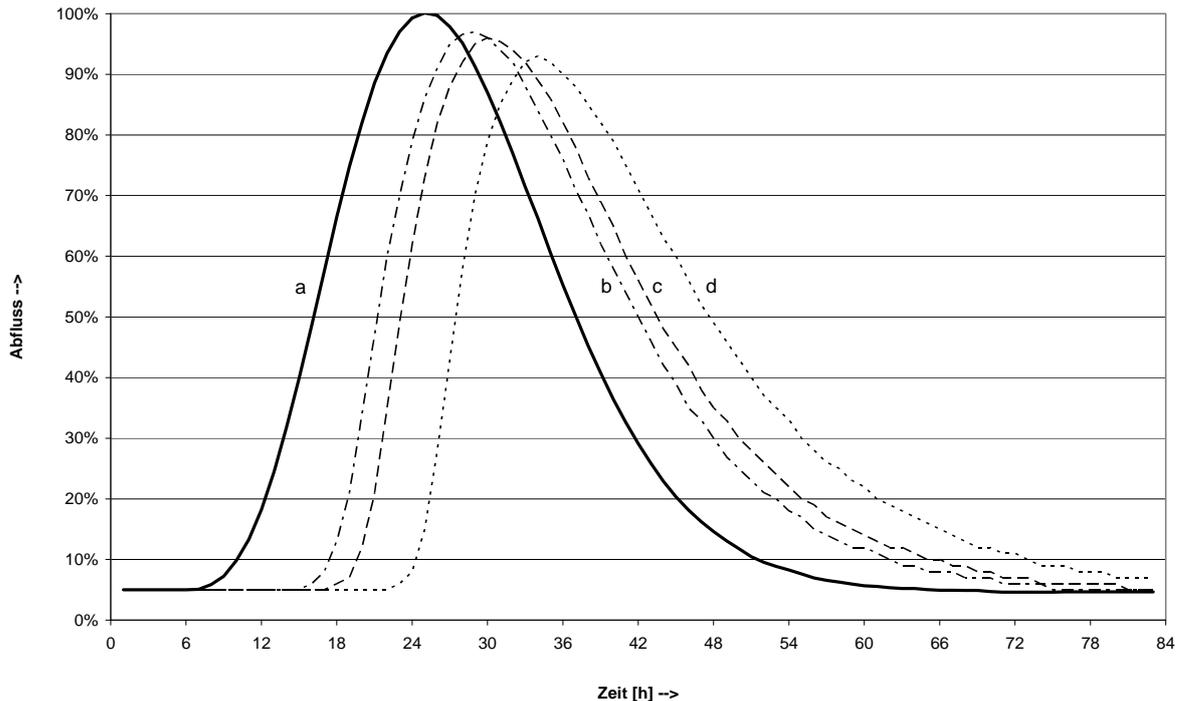
**Abb. 3:** Wellenverformung infolge unterschiedlichen Längsgefälles. Rechteckgerinne,  $B=10$  m,  $L=10$  km,  $k_{St}=10$  m<sup>1/3</sup>/s; a – Eingangswelle, b–d – Ausgangswellen bei  $I = 5$  ‰, 2.5 ‰ und 1 ‰.

Eine Verstärkung dieses Verzögerungseffektes durch eine zusätzliche Vergrößerung der Rauigkeit durch Strukturierungsmaßnahmen ist in flacheren Flussabschnitten kaum zu erzielen, wohl aber in steilen Flussabschnitten.

### 2.3.4 Struktur und Nutzung des Abflussraumes

Unter Struktur sind hierbei sowohl kleinräumige Strukturelemente wie Einbauten am Gewässerbett oder standortgerechter Bewuchs im und unmittelbar am Gewässer zu verstehen, als auch großräumige Strukturen wie komplexe Auwaldbereiche mit Altarmen, Tümpeln, Unterholz und Buschwerk.

Generell gilt, dass die retendierende Wirkung infolge Verzögerung des Abflusses umso größer ist, je rauer der Abflussraum ist (Abbildung 4).



**Abb. 4:** Wellenverformung infolge unterschiedlicher Rauigkeit. Rechteckgerinne,  $B=10$  m,  $L=10$  km,  $I=1$  ‰; a – Eingangswelle, b–d – Ausgangswellen bei  $k_{St}=30$  m<sup>1/3</sup>/s, 20 m<sup>1/3</sup>/s und 10 m<sup>1/3</sup>/s.

Strukturierungen des Abflussraumes entfalten im Gegensatz zu Retentionsbecken ihre Wirkung über das gesamte Abflussspektrum. Im Fluss selbst bedingen sie eine rückhaltende Wirkung bei kleineren und mittleren Ereignissen, die Vorländer werden bei beginnender Durchströmung infolge größerer Ereignisse aktiv.

Da geringere Fließgeschwindigkeiten im Gewässer selbst bei gleichem Durchfluss höhere Wasserstände bedingen, können Vorlandüberflutungen mit ihren zusätzlich bremsenden Effekten früher eintreten als in unstrukturierten Gewässern, was sich auf die Retentionswirkung eines Abschnittes positiv auswirkt.

In steilen Flussabschnitten ist die Wirkung von Strukturelementen stärker, da hier eine abflussbremsende Wirkung stärker in Erscheinung tritt als in flachen Flussabschnitten, wo die Geschwindigkeiten ohnedies vergleichsweise geringer sind.

Unterliegen die Vorländer intensiver landwirtschaftlicher Nutzung, so ist deren abflussverzögernde Wirkung stark von Frucht und Jahreszeit abhängig. Rauigkeiten und damit verbunden Abflussverzögerungen können in einem weiten Spektrum von sehr glatt und damit kaum verzögernd wie in der Saatperiode bis zu überaus rau wie beispielweise bei Mais in Vollreife variieren.

Zudem sind die meisten über viele Jahre hinweg bewirtschafteten Flächen an ehemals vorhandenen Grobstrukturen wie Gräben, Feldraine, Böschungen, etc. durch oftmaliges Überpflügen verarmt.

### **2.3.5 Lage im Einzugsgebiet**

Je kleiner das Einzugsgebiet, desto steiler und kürzer sind in der Regel die auftretenden Wellen. Daher sind hier retendierende Maßnahmen im Sinne einer stehenden Retention effizient möglich. Da kleine Einzugsgebiete zudem oftmals ein großes Längsgefälle aufweisen, ist auch eine starke abflussverzögernde Wirkung von Strukturelementen gegeben.

Da Hochwässer großer Jährlichkeit im Unterlauf oftmals durch die Summe von Hochwässern kleiner Jährlichkeiten in den Zubringern entstehen, ist der Rückhalt im Oberlauf, der schon bei Hochwässern geringerer Jährlichkeit aktiviert wird, sinnvoll. Jedoch ist zur Erzielung einer signifikanten Wirkung auf größere Hochwasserwellen im Unterlauf eine größere Anzahl solcher Maßnahmen in verschiedenen Teileinzugsgebieten erforderlich.

Zur Reduktion kleinerer Hochwässer im Unterlauf, welche oftmals auch aufwändige und kostspielige Aufräumarbeiten und Instandsetzungsmaßnahmen nach sich ziehen, sind derartige Maßnahmen gut geeignet.

### **2.3.6 Gesteuerte oder ungesteuerte Becken**

Sowohl Zu- als auch Ablauf von Retentionsbecken können mit regelbaren Steuerorganen oder mit unbeweglichen Bauwerken ausgestattet sein.

Die Wirkung ungesteuerter Rückhaltebecken ist nur bei der zugrundeliegenden Bemessungswelle optimal. Gesteuerte Becken weisen eine weitaus größere Flexibilität auf, ein wesentlich größeres Spektrum an Wellen kann abgemindert werden. Für eine der jeweiligen Welle angepasste, optimale Betriebsführung sind allerdings zusätzlich genaue Prognosen über die weitere Entwicklung der Hochwasserwelle erforderlich.

### **2.3.7 Becken im Haupt- oder Nebenschluss**

Becken im Hauptschluss werden vom Gerinne durchflossen und weisen an ihrem unteren Ende ein gesteuertes oder ungesteuertes Drosselorgan auf. Mittels dieses Organs wird der Hochwasserablauf auf das für die flussabwärts folgende Flussstrecke zulässige Maß reduziert, der Rest wird retendiert.

Bei Becken im Nebenschluss wird das Wasser über ein entsprechendes Einlaufbauwerk dem Abfluss entzogen und erst nach dem Durchgang des Wellenscheitels wieder in das Gerinne rückgeleitet. Die Entleerung derartiger Becken kann geregelt oder ungeregt über ein festes Drosselbauwerk erfolgen.

## **3. Aspekte und Konsequenzen**

### **3.1 Allgemeines**

Trotz fallweise auftretender Interessenskonflikte mit Land- und Forstwirtschaft, Raumordnung und Siedlungsentwicklung ist der Erhalt vorhandener Retentionsflächen und die Schaffung neuer Retentionsräume bevorzugte Aufgabe des modernen Wasserbaus. Die Kombination aus Rückhalt des Wassers am Ort seiner Entstehung

durch geeignete Bewirtschaftung, der Verlangsamung des Wellenablaufes durch Schaffung geeigneter Strukturen im und am Fluss und die Errichtung potenter Rückhaltebecken kann viel zur Vermeidung von Hochwasserschäden beitragen.

Speziell der Erhalt von Naturräumen, welche eine retendierende Wirkung auf den Abfluss ausüben, ist ein wesentliches Ziel aktueller wasserwirtschaftlichen Planungen. Hierfür werden gegenwärtig Strategien entwickelt, um die Abfluss- und Retentionswirkung einzelner Abflussräume zu kategorisieren. Die hierfür heranzuziehenden Parameter wie Volumen, Fließgeschwindigkeit, Füllzeit, etc. können den für zahlreiche Abflussräume in Österreich bereits vorliegenden Abflussuntersuchungen entnommen werden.

Auch wird derzeit verstärkt daran gegangen, zur Kompensation von durch Hochwasserschutzbauten dem Abflussraum entzogenes Volumen eine Verlangsamung des Hochwasserabflusses durch Aufweitungs- und Strukturierungsmaßnahmen zu erzielen. Dies umso mehr, als infolge Nutzungsdruckes nur sehr begrenzt Raum zur Schaffung großer Retentionsvolumina mit scheidelreduzierender Wirkung zur Verfügung steht.

Jedenfalls ist es oftmals so, dass, wenn auch eine relevante Reduktion des Scheitels mit fließender Retention nicht zu erreichen ist, die Verlangsamung der Hochwasserwelle zu einer deutlichen Verlängerung des Zeitraumes bis zum Durchgang der Hochwasserspitze führt. Zeit, die für das Setzen erforderlicher Hochwasserschutzmaßnahmen oder auch zur Durchführung von Evakuierungen genutzt werden kann.

Ein zu beachtender Faktor ist, dass Retention zwar prinzipiell sinnvoll und wünschenswert ist, sich aber im Falle des Zusammenflusses aus zwei Teileinzugsgebieten unterschiedlicher Reaktionszeit auf Niederschläge ungünstig auswirken kann. Retentionsmaßnahmen im schneller reagierenden Einzugsgebiet können dort den Wellenscheitel zwar reduzieren, die zeitliche Verzögerung kann aber zu einem zeitlichen Zusammenrücken der Scheitel beider Einzugsgebiete und somit zu einer Verschärfung der Abflusssituation unterhalb führen. So kann es passieren, dass zwei gedämpfte Spitzen, die sich zeitlich überlagern, in ihrer Summe eine höhere Abflussspitze ergeben, als wenn beide Abflussspitzen zwar ungedämpft, dafür aber zeitlich nacheinander gelagert sind.

### **3.2 Planungsgrundsätze zur Verbesserung und zum Erhalt der Retentionswirkung**

Im Falle fließender Retention wird durch entsprechende planerische Maßnahmen versucht, die retendierende Funktion eines Gewässers zu erhalten, zu verstärken oder neu zu schaffen.

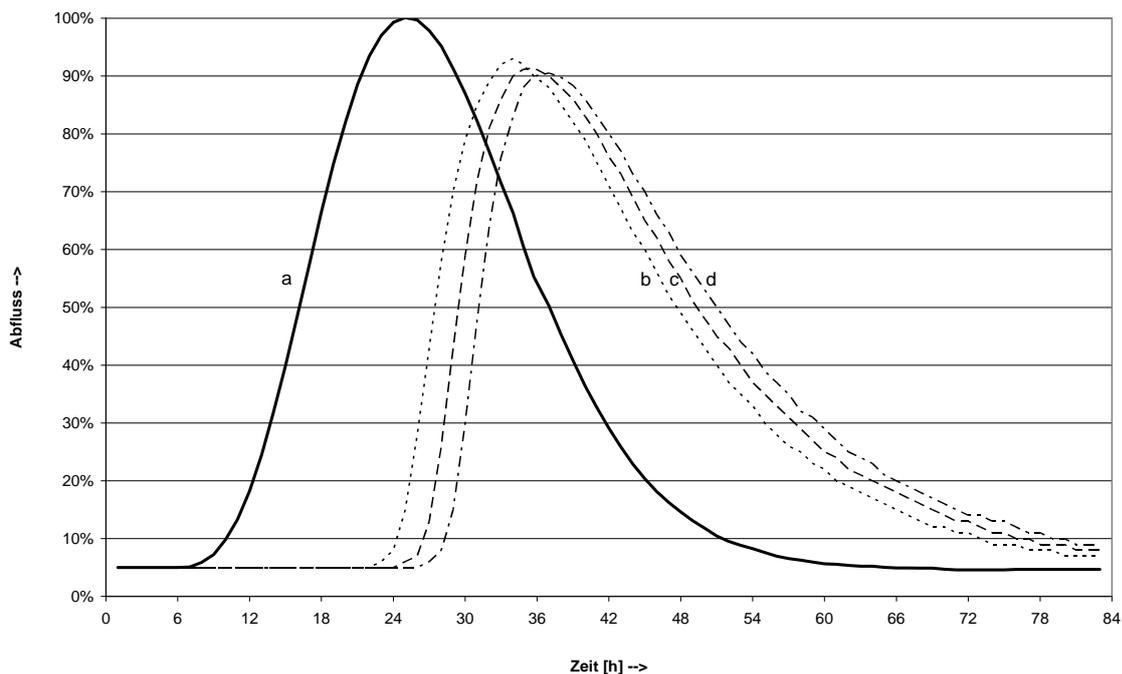
Das Längsgefälle eines Abflussraumes ist über größere Strecken in der Regel nicht veränderbar. Möglich ist die Verringerungen des Längsgefälles im Bereich des Flussbettes. Sie hat, solange es zu keinen Ausuferungen kommt, eine verlangsamende Wirkung, erfordert aber die Errichtung unter Umständen ökologisch problematischer

Querbauwerke. Zudem wird durch die Änderung des Längsgefälles der Sedimenthaushalt des Gewässers verändert.

Möglich ist das Setzen von Strukturierungsmaßnahmen wie der Einbau von Abflusshindernissen und das Zulassen von Bewuchs im Gewässer selbst, was zu einer Vergrößerung der Rauigkeit und einer Verlangsamung des Abflusses führt. Diese Maßnahmen können zudem, speziell wenn sie über längere Abschnitte hinweg durchgeführt werden, bei hart regulierten Gewässern eine wertvolle ökologische Verbesserung gemäß Wasserrahmenrichtlinie herbeiführen.

Soll gleichzeitig das Hochwasserabfuhrvermögen im so strukturierten Abschnitt erhalten bleiben, kann dies durch Aufweitungen des Flussprofils erreicht werden. Auch bei Aufweitungen ist die Veränderung des Sedimenthaushaltes zu beachten.

Flussaufweitungen ohne entsprechende flankierende Strukturierungsmaßnahmen können kaum zur fließenden Retention beitragen (Abbildung 5). Dies umso weniger, als aufgrund eines vergrößerten Abflussquerschnitts bei gleichbleibender Struktur die Abfuhrkapazität des Gewässers steigt und eine sonst auftretende Ausuferung in strukturierte, den Abfluss wie zuvor beschrieben deutlich verzögernde Vorlandbereiche erst bei größeren Durchflüssen erfolgen kann.



**Abb. 5:** Wellenverformung infolge Aufweitung. Rechteckgerinne,  $L=10$  km,  $I=1$  ‰,  $k_{St}=10$  m<sup>1/3</sup>/s; a – Eingangswelle, b–d – Ausgangswellen bei  $B=10$  m, 15 m und 20 m.

Ein Aspekt von Flussaufweitungen bei gleichzeitiger Strukturierung durch standortgerechten Bewuchs ist, dass der projektierte Endzustand nicht, wie sonst bei Wasserbauten üblich, unmittelbar nach Fertigstellung der Baumaßnahmen vorliegt, sondern sich erst zu einem deutlich späteren Zeitpunkt einstellt, wenn sich nämlich der

Bewuchs entsprechend entwickelt hat und zur geplanten Strukturierung in vollem Umfang beitragen kann.

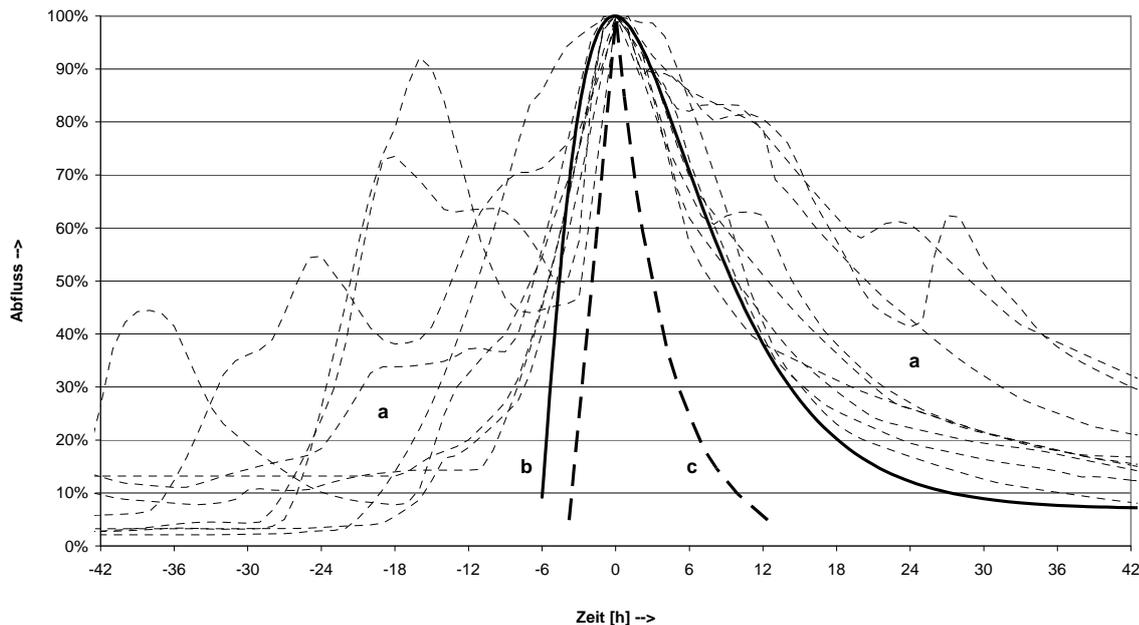
Werden durch Retentionsmaßnahmen land- oder forstwirtschaftlich genutzte Flächen neu oder in stärkerem Ausmaß für den Hochwasserrückhalt in Anspruch genommen, so sind Maßnahmen zur Schadloshaltung der Eigentümer durch Bewirtschaftungerschwernisse, Ernteeinbußen etc. vorzusehen. Hierfür sind entsprechende Entschädigungsmodelle zu entwickeln. Diese sind mitunter sehr schwer zu erarbeiten, da die finanziellen Vorstellungen betroffener Grundbesitzer mit dem finanziellen Rahmen eines Hochwasserschutzprojektes fallweise kaum in Deckung zu bringen sind.

Für die stehende Retention ist der Retentionsraum so zu bemessen, dass der Wellenscheitel des Bemessungshochwassers reduziert werden kann und der Retentionsraum nicht schon vor Eintreffen der Wellenspitze vollständig gefüllt ist.

Hierfür ist die möglichst genaue Kenntnis der Form der abzumindernden Welle von essentieller Bedeutung, die eingehende Analyse abgelaufener Hochwasserereignisse unumgänglich. Stehen keine Beobachtungen zur Verfügung, so sollte die wahrscheinlichste Form der Hochwasserwelle aus Niederschlag-Abflussmodellen abgeleitet werden. Die Abschätzung mithilfe von oft unzulänglichen oder hinsichtlich ihrer Voraussetzungen nicht anwendbaren vereinfachten Verfahren ist an größeren Fließgewässern kaum zulässig (Abbildung 6). Die Gefahr einer Unterbemessung, also des vorzeitigen Volllaufens des Beckens, ist hier sehr groß.

Dies umso mehr, als die Wirkung von Retentionsbecken in die Festlegung von Bemessungswassermengen für Hochwasserschutzmaßnahmen im Unterlauf eingehen. Sollte ein Retentionsbecken seine Aufgabe infolge Zugrundelegung einer dem tatsächlichen Abflussverhalten nicht entsprechenden Wellenform nicht erfüllen können, so sind die angesetzten Bemessungswassermengen für Schutzbauten flussab des Retentionsbeckens zu klein, diese Bauten somit ebenfalls unterdimensioniert.

Probleme können auch auftreten, wenn zwei Hochwasserereignisse unmittelbar nacheinander folgen und das Wasser des ersten Ereignisses noch nicht vollständig abgelaufen ist. Dann kann auch in korrekt dimensionierten Becken nur noch ein Teil des erforderlichen Retentionsvolumens zur Verfügung stehen.



**Abb. 6:** Analyse abgelaufener Ereignisse. a – dokumentierte Hochwasserwellen (standardisiert), b – abgeleitete Wellenform nach Kozeny, c – abgeleitete Wellenform nach Einheitsganglinienverfahren mit Konzentrationszeit nach Kirpich. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Verfahren nach Kozeny sehr gut die beobachteten Wellenformen abbildet, während ein nach dem Einheitsganglinienverfahren bemessenes Becken jedenfalls unterdimensioniert wäre.

### 3.3 Weitere Aspekte bei der Errichtung von Retentionsbecken

Häufig tritt im Zusammenhang mit der Planung von Retentionsbecken im Unterlauf von Flüssen das Problem auf, dass eine relevante Reduktion großer Hochwässer nur bei Vorhandensein sehr großer Volumen möglich ist. Die Bereitschaft, die für eine Neuanlage derart großer Becken erforderlichen Flächen zur Verfügung zu stellen, ist oftmals nicht gegeben. Dies trotz des Umstandes, dass diese Flächen in der Regel bewirtschaftbar bleiben und allfällige Schäden im Hochwasserfall abgegolten werden.

Was die Akzeptanz der Errichtung von Retentionsbecken ebenfalls erschwert ist der Umstand, dass ein Becken, das seine volle Wirkung beispielsweise bei einem HQ100 entfalten soll und auf dieses Ereignis bemessen ist, erst bei bereits sehr großer Wasserführung, z.B. bei einem HQ90, anspringen darf um nicht vorzeitig gefüllt zu sein. Das bedeutet aber weiter, dass Hochwässer bis zu dieser Größe mit allen negativen Konsequenzen ungedämpft das Becken passieren müssen.

In durchströmten Retentionsbecken erfolgt neben der Abflussreduktion auch Geschieberückhalt. Dies hat speziell in stark geschiebeführenden Flüssen im Wesentlichen die folgenden zwei Aspekte. Zum einen führen Auflandungen zu einem Verlust an verfügbarem Retentionsvolumen. Dieses steht während des Hochwassers somit nicht zur Verfügung und muss nach dem Ereignis möglichst rasch wieder aus dem Retentionsraum entfernt werden. Zum anderen wird dadurch der

Geschiebehaushalt im Unterwasser massiv gestört. Durch den Rückhalt kommt es zu einem Geschiebedefizit im Unterwasser – bei großer erosiver Wirkung des Abflusses ist nahezu kein Nachschub an Geschiebe von oben vorhanden. Das bedingt Eintiefungen, die zu großen Problemen an Gründungen bestehender Hochwasserschutzbauten wie Mauern und Dämmen oder an Brückenfundamenten führen können.

Während des Hochwasserereignisses kann es durch den erhöhten Wasserstand im Retentionsbecken zu einem Anstieg des umgebenden Grundwasserkörpers kommen. Spielt dieser weitab von Siedlungsbereichen kaum eine Rolle, so kann es in Siedlungsnähe zu negativen Auswirkungen wie Grundwassereintritten in tiefliegende Gebäudeteile und schweren Schäden an Bauwerken durch Auftrieb kommen. Zur Vermeidung kann das Becken mit entsprechenden Maßnahmen dicht ausgeführt werden, man verliert aber dadurch die Möglichkeit der weiteren landwirtschaftlichen Nutzung dieser Fläche.

Die nach Durchgang der Hochwasserwelle möglichst rasch erfolgende Entleerung der Retentionsbecken bedingt eine gegenüber dem Ist-Zustand verlängerte erhöhte Wasserführung. Diese wiederum kann zum Aufweichen und Durchsickern bestehender Dämme mit der Gefahr deren Versagens sowie im Hinterland zum zusätzlichen Anstieg des Grundwassers mit allen damit verbundenen, zuvor bereits erwähnten Problemen in den Vorländern führen.

Nach der Entleerung des Beckens kommt es zu einem mehr oder weniger abrupten Abfall der Abflussmenge, was zu weiteren Problemen infolge hoher Gradienten zum Fluss hin mit der damit verbundenen Gefahr des hydraulischen Grundbruchs von bestehenden Verbauungen führen kann.

#### **4. Zusammenfassung**

In diesem Beitrag wurden jene Prozesse und Einflussfaktoren dargestellt, die auf den Wellenablauf in Flussstrecken wirken. Die Kenntnis der unterschiedlichen Faktoren erlaubt eine Abschätzung der jeweils zur Verfügung stehenden Möglichkeiten zur Verbesserung des Rückhaltes. Die im Rahmen verschiedener Bearbeitungen gefundenen Zusammenhänge dieser wellenbeeinflussenden Faktoren wurden dargestellt. Zuletzt wurden Aspekte für die Planung fließender und stehender Rückhaltmaßnahmen erläutert.

Auch wenn im Zusammenhang mit derzeitigen Raumnutzungen mit Konflikten zu rechnen sein wird ist davon auszugehen, dass im Rahmen zukünftiger Hochwasserschutzprojekte jedenfalls auf die Erhaltung, verstärkt aber auch auf die Verbesserung und Neuschaffung von Rückhaltmaßnahmen Augenmerk gelegt werden wird.

#### **5. Literatur**

Blöschl, G., Habereeder, C., Komma, J. (2008) Efficiency of non-structural flood mitigation measures: "room for the river" and "retaining water in the landscape". CRUE Research Report No I-6, London 2008.

BMLFUW & BMVIT (2009) Flood Risk II – Vertiefung und Vernetzung zukunftsweisender Umsetzungsstrategien zum integrierten Hochwasserschutz. Wien 2009.

DonauConsult Zottl & Erber (2008) Retentionsstudie Traisen-Gölsen. In: Gewässerentwicklungskonzept Traisen-Gölsen. (unveröff.)

DonauConsult Zottl & Erber (2006 - 2009) Abflussuntersuchungen Niederösterreich I – IV (unveröff.)

DonauConsult Zottl & Erber (2008) Abflussuntersuchung Steiermark 2005 (unveröff.)

Schwaller, G., Töle, U. (2004) Einfluss von Maßnahmen der Gewässerentwicklung auf den Hochwasserabfluss. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München 2005

Werner Consult (2007) Projekt Retentionsuntersuchung Url (unveröff.)

**Anschrift des Verfassers:**

**Dipl.-Ing. Hannes Gabriel**

DonauConsult Zottl & Erber ZT-GmbH

Klopstockgasse 34

A - 1170 Wien

Tel.: +43 1 480 80 10

Fax: +43 1 480 80 10-10

Email: [hannes.gabriel@donauconsult.at](mailto:hannes.gabriel@donauconsult.at)

# BEMESSUNGSNIEDERSCHLÄGE IN ÖSTERREICH

Viktor Weilguni

## 1. Einleitung

Operationell stehen beim Hydrographischen Dienst zur Ermittlung von Bemessungsniederschlägen ein extremwertstatistischer Ansatz nach ÖKOSTRA (Österreichweit koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und – Auswertung; ATV-A121, 1985, ÖKOSTRA-93, 1992, Hammer, 1993) für die Auswertung von zeitlich hoch aufgelösten Niederschlagsdaten, und Ergebnisse eines deterministischen Niederschlagsmodells für konvektive Niederschläge von 5 Minuten bis maximal 12 Stunden, die unter maximierten Anfangs- und Randbedingungen abgeleitet wurden (Lorenz P., Skoda G., 2000; HAÖ, 2003), zur Verfügung.

Um für Gesamtösterreich und für den Dauerstufenbereich von 5 Minuten bis 6 Tage einheitliche Grundlagen zur Bemessung zu schaffen, war es einerseits notwendig einen Weg zu finden die extremwertstatistischen Messstellenauswertungen, die in der Regel nur für den Ort der Messstelle Gültigkeit besitzen, sinnvoll zu regionalisieren (BMLFUW, 2006) und andererseits die Modellrechnungen für Dauerstufen bis zu 6 Tage zu erweitern - das entspricht der längsten Dauerstufe bei den extremwertstatistischen Auswertungen.

Da die maximierten Modellniederschläge (MaxModN) auf Grund des Maximierungsprozesses grundsätzlich merklich höhere Werte als die interpolierten extremwertstatistischen Messstellenauswertungen (ÖKOSTRA) liefern, scheint es plausibel anzunehmen, dass diese Werte eher das obere Drittel aller möglichen Realisierungen von Bemessungsniederschlägen abdecken. Hingegen ergeben die interpolierten Messstellenauswertungen, bedingt durch die große räumliche Variabilität des Niederschlagsprozesses und der dadurch oftmals nicht gemessenen Niederschlagsmaxima, Werte, die dem unteren Drittel des Schwankungsbereichs möglicher Bemessungsniederschläge zuzuordnen sind. Durch diese Eigenheiten der Ergebnisse der verschiedenen Auswertungsmethoden ist es daher möglich den Bereich abzugrenzen innerhalb dessen die Bemessungsniederschläge liegen sollten und durch Kombination dieser Auswertungen die möglicher Schwankungsbreite zu verringern, um so den „mutmaßlich wahren Niederschlagsbemessungswerten“ näher zu kommen.

## 2. Extremwertstatistische Auswertung

Die extremwertstatistischen Auswertungen wurden nach ÖKOSTRA durchgeführt. Ausgewertet wurden zeitliche hoch aufgelöste Niederschlagsdaten (Schreiberdaten) und zusätzlich noch Tagessummen (Messerdaten) um die Messstellendichte ab der Dauerstufe 1 Tag zu erhöhen. Die Auswertung nach ÖKOSTRA (ÖKOSTRA-93, 1992, Hammer, 1993) basiert auf der Methode die in der DVWK- Regel 124 (ATV, 1985) beschrieben ist. Die Vorgehensweise kurz zusammengefasst:

Aus den zeitlich hoch aufgelösten Niederschlagsdaten werden als erstes die Stichproben gebildet, die partiellen Serien, an denen die Anpassung der Verteilungsfunktion durchgeführt wird. Die Wahl fiel auf die partiellen Serien, da der Datenumfang in den meisten Fällen aus statistischer Sicht sehr gering war (< 20 Jahre) und dieser Serientyp nach der DVWK- Regel 124 verwendet werden sollte. Bei der Erstellung der partiellen Serie werden alle Werte oberhalb eines bestimmten Grenzwertes als Stichprobe herangezogen. Dieser Grenzwert wird so festgelegt, dass die partielle Serie 2,5-mal so viele Werte enthält, wie in der Datenreihe Anzahl der Jahre mit Daten vorhanden sind. Es wird für jede Dauerstufe nur ein Wert pro Tag zugelassen, um die Unabhängigkeit der Daten zu gewährleisten. Die Dauerstufenserien werden nicht aus dem kontinuierlichen Datensatz abgeleitet, sondern aus 3 so genannten Grundintervalldatensätzen, die aus 5 Minutensummen, 1 Stundensummen und 1 Tagessummen gebildet werden. Um die Defizite bei der Erstellung der einzelnen Dauerstufenserien aus den Grundintervalldaten mit starrer Dauerstufenblockung auszugleichen, werden die Werte der Stichproben mit einem empirischen (statistisch ermittelten) Korrekturfaktor, der von der Dauerstufe abhängig ist (siehe Tabelle 1), erhöht.

**Tab. 1:** Grundintervalle und Dauerstufen der Serien mit den zugehörigen multiplikativen Korrekturfaktoren

Grundintervalle			Korrekturfaktor	Anzahl der Grundintervalle
5 Minuten	1 Stunde	1 Tag		
Dauerstufen				
Minuten	Stunden	Tage		
5		1	1,14	1
10	2	2	1,07	2
15	3	3	1,04	3
20	4	4	1,03	4
		5	1,03	5
30	6	6	1,02	6
45	9		1,00	7
60	12		1,00	8
90	18		1,00	9

Da die partielle Serie als Stichprobe herangezogen wurde, wird entsprechend der Empfehlung in ATV-121 die Exponentialverteilung angepasst.

$$h_N(D,T) = u_p(D) + w_p(D) \ln(T) \tag{1}$$

$h_N$  ist die Niederschlagssumme bestimmter Dauer  $D$  und Jährlichkeit  $T$ .  $u_p$ ,  $w_p$  sind die Parameter der Verteilungsfunktion. Die Anpassung der Verteilungsfunktionen, d.h. die Bestimmung der Parameter  $u_p$  und  $w_p$  erfolgt für jede Dauerstufe getrennt mit Hilfe einer linearen Regression. Dazu ist es erforderlich den Stichprobenwerten eine geschätzte Wiederkehrzeit zuzuordnen. Als Plotting Position Formel, wird

$$T = (L+0.2)/(k-0.4) M/L \quad (2)$$

verwendet. In Gleichung 2 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).

Nicht immer ergibt sich aus dieser Auswertung ein widerspruchsfreies Bild. Es kann vorkommen, dass Niederschläge mit zunehmender Dauerstufe und/oder Jährlichkeit abnehmen. Dieser Stichprobeneffekt ist darauf zurückzuführen, dass die Verteilungsparameter über die Dauerstufen mehr oder weniger stark streuen können, vor allem der Verteilungsparameter  $w_p$ . Daher ist es sinnvoll (notwendig), die Verteilungsparameter über den Dauerstufenbereich auszugleichen. Dieser Dauerstufenausgleich erfolgt für jeden der Verteilungsparameter durch Einteilung der Dauerstufen in 3 Bereiche, in denen jeweils eine Gerade angepasst wird. Dabei können einfache und doppeltlogarithmische Transformationen und Kombinationen der Dauerstufe  $D$  und der Verteilungsparameter  $u_p$ ,  $w_p$  verwendet werden. An den 2 Bereichsgrenzen wird ein Sprungausgleich durchgeführt, damit der angenäherte Verlauf ohne Sprünge erfolgt.

Um rasch eine „optimale“ Anpassung zu erreichen, werden bei ÖKOSTRA die Bereichsgrenzen automatisch ermittelt. Dabei werden alle möglichen Dauerstufengrenzenkombinationen von 30 Minuten bis zu 3 Tagen, für die Dauerstufenbereichsgrenzen untersucht. Zusätzlich wird die Ausgleichsmethode OWUNDA (Optmierter W und U NiederschlagsDauerstufenAusgleich, Hammer 1993), die bei ÖKOSTRA als weitere Ausgleichsmöglichkeit vorgesehen ist, angewendet. Bei dieser Methode erfolgt der Dauerstufenausgleich über den gesamten Dauerstufenbereich - ohne Aufteilung in 3 Dauerstufenbereiche – wobei jedoch auch nichtlineare Funktionen verwendet werden. Der Messstellenauswertungsalgorithmus bei ÖKOSTRA selektiert an jeder Messstelle den besten Ausgleich der Verteilungsparameter, d.h. jenen mit dem kleinsten Variationskoeffizienten, bei dem die Niederschlagswerte mit zunehmender Dauerstufe und/oder Jährlichkeit größer werden.

Für die extremwertstatistische Auswertung der Tagessummen wird die gleiche Vorgehensweise gewählt, wie bei der Auswertung der zeitlich hoch aufgelösten Niederschlagsdaten. Es werden die partiellen Serien für die sechs Dauerstufen von 1 Tag bis 6 Tage gebildet, an diese Serien die Exponentialverteilung angepasst, die Verteilungsparameter wieder mit Hilfe einer linearen Regression ermittelt, und anschließend der Dauerstufenausgleich durchgeführt. Bei der Durchführung des Dauerstufenausgleichs der Verteilungsparameter wird auf die Methode OWUNDA

zurückgegriffen und aus einigen Funktionen die passende, jene mit dem kleinsten Variationskoeffizienten, die ansteigende Niederschlagswerte mit zunehmender Dauerstufe und/oder Jährlichkeit ergeben, für den Ausgleich selektiert. Bei der Ermittlung der Ausgleichsfunktion mit der besten Anpassung werden auch logarithmische Transformationen von Dauerstufe (D) bzw. Verteilungsparameter  $u_p$  und  $w_p$  (Y) überprüft. Folgende Ausgleichskurven wurden untersucht:

$$\begin{aligned} Y &= a + b \cdot D \\ Y &= a \cdot \exp(b \cdot D) \\ Y &= a \cdot D^b \\ Y &= a + b \cdot D + c \cdot D^2 \end{aligned} \quad (3)$$

An Messstellen an denen sowohl Schreiberdaten als auch Messerdaten zur Verfügung standen, war es, um über den gesamten Dauerstufenbereich ein eindeutiges Auswertungsergebnis zu erhalten, notwendig, die Ergebnisse der Auswertungen der unterschiedlichen Datentypen (Schreiber und Messer) zu verschneiden. Jener Auswertungstyp mit der längeren Datenreihe wurde für die Daten der Dauerstufen 1 Tag bis 6 Tage herangezogen. Das waren in allen Fällen die Reihen der Messerauswertungen. Dabei wurde darauf geachtet, dass beim Übergang von einer Dauerstufe zur nächsten, beginnend bei der Dauerstufe 18 Stunden, vorher festgelegte Grenzwerte für den Anstieg der Niederschlagswerte nicht unter- bzw. überschritten wurden. War das doch der Fall, wurde der Anstieg auf den entsprechenden Anstiegsgrenzwert angehoben bzw. reduziert. Basis der Ermittlung der Anstiegsgrenzwerte bildete eine Analyse der Quotienten der extremwertstatistischen ausgewerteten Niederschlagswerte von Schreiberdaten aufeinander folgender Dauerstufen der Jährlichkeit 100. Zur Bestimmung der Quotienten wurden nur solche Schreibermessstellen herangezogen, an denen auch Messerauswertungen vorhanden waren. Unter der Annahme, dass die Anstiegsgrenzwerte, die für die Jährlichkeit 100 bestimmt wurden, auch für die anderen Jährlichkeiten gültig sind, wurden die Niederschläge der Dauerstufen von 1 Tag bis 6 Tage auf „passende“ Anstiege getestet und gegebenenfalls korrigiert. In Tabelle 2 sind die prozentuellen Anzahlen der zu korrigierenden Messstellen für die Jährlichkeit 100 bei Anwendung dieser Kriterien angeführt.

Durch diese Vorgehensweise bei der Kombination der Auswertungen der unterschiedlichen Datentypen kann der Funktionsverlauf von den angepassten Exponentialverteilungsfunktionen (erheblich) abweichen. Das bedeutet, dass an einem Ort an dem sowohl, Messer- als auch Schreiberdaten vorliegen ab einem Tag das Ergebnis weder der ÖKOSTRA- Auswertung für Schreiber noch jener für Messer entsprechen muss.

**Tab. 2:** Anzahl der korrigierten Messstellen in Prozent in Abhängigkeit der Dauerstufe bei der Jährlichkeit 100

<b>Dauerstufe</b>	<b>Anzahl anheben [%]</b>	<b>Anzahl absenken [%]</b>
1 Tag	~30)	~10
2 Tage	~4	~1
3 Tage	~2	0
4 Tage	~1	0
5 Tage	0	0
6 Tage	0	0

### 3. Maximierte Modellniederschläge (MaxModN)

Bemessungsniederschläge für kurze Dauerstufen bis maximal 12 Stunden, die aus Ergebnissen von maximierten Modellniederschlagsrechnungen abgeleitet wurden (Lorenz P., Skoda G., 2000), stehen 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). Bei diesen Auswertungen werden die Ergebnisse eines physikalisch, meteorologischen Modells, die unter (plausibel) maximierten Bedingungen ermittelt wurden, mit Testbeobachtungen (extremwertstatistischen Auswertungen) kalibriert. Anschließend berechnet man - unabhängig von Messdaten - die gesuchten extremen Niederschlagswerte mit sehr hoher räumlicher Auflösung. Unter der Annahme, dass die im Rahmen von ÖKOSTRA für partielle Serien verwendeten Zusammenhänge zwischen Niederschlagsmenge, Andauer und Eintrittswahrscheinlichkeit (Exponentialverteilung) für das gesamte Bundesgebiet Gültigkeit haben, wird die Niederschlagshöhe als Funktion der Dauerstufe aus 4 Realisierungen (Dauerstufen 2 Stunden und 4 Stunden sowie Jährlichkeiten 30 und 75) bestimmt.

Für die Erweiterung auf längere Dauerstufen wurden die Ergebnisse des numerischen Vorhersagemodells ALADIN (Aire Limitee Adaptation dynamique Developpement International) herangezogen, das seit 1996 an der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) zur Vorhersage im Routineeinsatz steht. Als Basisdaten für die Auswertungen standen die 48 Stundensummen der maximierten ALADIN-Modellniederschläge zur Verfügung. Diese setzen sich für jeden Gitterpunkt aus den Niederschlagsmaxima der im Zeitraum 1996 bis 2006 aufgetretenen extremen Niederschlagsereignissen (Wetterlagen) zusammen. Aufgrund des relativ kurzen Zeitraums, für den die aufgetretenen Wetterlagen mit maximalen Niederschlägen zusammengestellt werden konnten, waren die empirischen Eintrittswahrscheinlichkeit, die diesen Ereignissen zugeordnet wurden, sehr unterschiedlich. Dadurch ergab die

resultierende räumliche Verteilung der maximierten Modellniederschläge kein einheitliches Bild, das über große Bereiche mit andern Auswertungen wie z.B. der Karte „2.10 - Extreme Mehrtagesniederschläge“ des Hydrologischen Atlas von Österreich vergleichbar gewesen wäre. Daher musste dieser Basisdatensatz noch einigen Modifikationen unterzogen werden. Die wesentlichste Änderung bestanden aus einer „Wetterlagenkorrektur“. Dabei wurden jene Wetterlagen entfernt (die größten Ost und Nordost- Wetterlagen), die Niederschläge ergaben, denen eine viel größere Jährlichkeit als 10 zuzuordnen war, und zusätzlich Modellrechnungen mit einer maximierten feuchtlabile Südströmung miteinbezogen – so eine Strömungslage mit ergiebigem Niederschlag war in den 10 Jahren von 1996 bis 2006 nicht vertreten. Durch diese Modifikationen zeigte die räumliche Verteilung der ALADIN-Modellniederschläge sehr plausible Strukturen.

Vergleicht man die Österreichmittel gebildet aus den extrapolierten konvektiven Modellniederschlägen (HAÖ) mit jenem der ALADIN- Daten für 48 Stunden der Jährlichkeit 10, so ergeben sich ähnliche Werte. Das war auch zu erwarten, da die HAÖ- Modelldaten ab der Dauerstufe 4 Stunden an die extremwertstatistischen Auswertungen der Monatssummen (720 Stunden, abgeleitet aus dem Gebietsniederschlagsmodell und daher an allen Gitterpunkten verfügbar) linear angepasst wurden, was bewirkte, dass sich die HAÖ- Daten mit zunehmender Dauerstufe an die extremwertstatistischen Auswertungen annähern, und somit „realistische“ Größenordnungen besitzen. Daher kann grundsätzlich angenommen werden, dass das HAÖ- Wertenniveau als passend angesehen, und die räumliche ALADIN- Verteilung an dieses Niveau durch geringfügige Verschiebungen angepasst und extrapoliert werden kann.

Die Anpassungsgleichung für die Dauerstufe  $D = 48$  Stunden und der Jährlichkeit  $T = 10$  lautet:

$$y_{iNEU}(D=48,T=10) = y_i(D=48,T=10) * [x_m(D=48,T=10) / y_m(D=48,T=10)] \quad (4)$$

$y_{iNEU}$  ist der an das HAÖ- Niveau angepasste ALADIN- Wert und  $y_i$  der ALADIN- Modellwerte am Gitterpunkt  $i$ .  $x_m$  bzw.  $y_m$  sind die arithmetischen Österreichmittel der HAÖ- bzw. der ALADIN- Daten.

Unter der Annahme, dass der Quotient  $Q_i$  zwischen angepasstem ALADIN- und HAÖ- Wert der Dauerstufe 48 Stunden und Jährlichkeit 10 auch für die anderen Dauerstufen und Jährlichkeiten konstant bleibt, können damit auch für diese die ALADIN- Verteilung angenähert werden. Der Quotient der angepassten ALADIN- Werte zu den HAÖ- Werten bei Dauerstufe  $D = 48$  und Jährlichkeit  $T = 10$ , an jedem Gitterpunkt ergibt sich dann zu

$$Q_i = y_{iNEU}(D=48,T=10) / x_i(D=48,T=10) \\ Q_i = y_i(D=48,T=10) / x_i(D=48,T=10) * [x_m(D=48,T=10) / y_m(D=48,T=10)] \quad (5)$$

Der maximierter ALADIN- Niederschlagswert  $y_{iNEU}(D, T)$  an jedem Gitterpunkt für jede beliebige Dauerstufe und Jährlichkeit folgt somit aus den bekannten HAÖ-Werten  $x_i(D, T)$  durch Multiplikation mit dem Quotienten  $Q_i$ .

$$y_{iNEU}(D, T) = x_i(D, T) * Q_i \quad (6)$$

Ein Vergleich zwischen den maximierten ALADIN- Modellniederschlägen und den extremwertstatistischen ÖKOSTRA- Messstellenauswertungen zeigte, dass die ALADIN- Modellniederschläge nicht grundsätzlich als „maximiert“ angesehen werden können, und daher keine „Obergrenze“ der Bemessungsniederschläge darstellen. Es waren nämlich an einigen Messstellen die extremwertstatistischen Auswertungen größer als die ALADIN- Modellwerte. Daher wurde mit Hilfe der ÖKOSTRA- Messstellenauswertungen die ALADIN- Werte dort angehoben, wo die Messstellenauswertungen größer waren, und dort abgesenkt, wo diese (wesentlich) kleiner waren. Damit wurde erreicht, dass an allen Gitterpunkten die maximierten ALADIN- Niederschläge größer als die interpolierten ÖKOSTRA- Auswertungen wurden jedoch nicht größer als das Doppelte.

Um aus den maximierten Modellniederschlägen HAÖ und ALADIN zu einem, über dem gesamten Dauerstufenbereich von 5 Minuten bis 6 Tage eindeutigen, maximierten Modellniederschlagsdatensatz (MaxModN) zu gelangen, wurden diese miteinander verschnitten. Diese Verschneidung erfolgte über den Dauerstufenbereich 6 Stunden bis 2 Tage. Von 5 Minuten bis 6 Stunden werden die HAÖ- Werte verwendet, von 6 Stunden bis ca. 48 Stunden erfolgt die gewichtete Verschneidung von HAÖ- mit den ALADIN- Daten (Gleichung 7) und ab der Dauerstufe ca. 48 Stunden gelten die ALADIN- Werte (Tabelle 3).

$$\text{MaxModN} = G * \text{ALADIN} + (1-G) * \text{HAÖ} \quad (7)$$

Die Gewichte  $G$  für die ALADIN- Werte werden aus Gleichung 9 bestimmt, in der  $D$  die Dauerstufe in Stunden ist

$$G = \{1 / [1 + (\exp(-0.45 * (D - 17) - 0.45))^{0.6}]\} - [0.05151 * \exp(-0.0521 * D)] \quad (8)$$

In Tabelle 3 sind die ALADIN- Gewichte in Abhängigkeit der Dauerstufe angeführt.

Um sicherzustellen, dass die so ermittelten MaxModN- Gitterpunktwerte mit zunehmender Dauerstufe (bei konstanter Jährlichkeit) und zunehmender Jährlichkeit (bei konstanter Dauerstufe) auch ansteigen, wurde ein Anstiegstest – ähnlich wie beim Zusammenführen der extremwertstatistisch ausgewerteten Daten von Tagessummen und den zeitlich hoch aufgelösten Niederschläge -, durchgeführt und gegebenenfalls der Niederschlagsverlauf geglättet.

**Tab. 3:** ALADIN- Gewichte in Abhängigkeit der Dauerstufe

Dauer [h]	Gewicht ALADIN, G
7	0,01303092
8	0,02902040
9	0,04868417
10	0,07280731
12	0,13763907
18	0,47983444
24	0,82004317
48	0,99547174
72	0,99878959
96	0,99965348
120	0,99990076
144	0,99997158

#### 4. Interpolation der ÖKOSTRA- Messstellenauswertungen

Die räumliche Interpolation der extremwertstatistisch nach ÖKOSTRA ausgewerteten Niederschlagsdaten erfolgte einerseits unter Zuhilfenahme der räumlichen Verteilung der maximierten Modellniederschläge und andererseits durch eine einfache invers-quadratisch entfernungsabhängige Gewichtung der Messstellenauswertungen. Durch Kombination dieser beiden Teilergebnisse wird das Endergebnis der interpolierten ÖKOSTRA- Messstellenauswertung erhalten. Die Interpolation erfolgt auf ein Gitternetz mit einer Gitterdistanz von 1/12 Grad longitudinal, 1/20 Grad meridional, zirka 6 km x 6 km. Dieses Gitter entspricht jenem, das auch bei der Erstellung der maximierten Modellniederschläge verwendet wurde.

Da die Anzahl der Messstellen mit Schreiberdaten mit zumindest 20 Jahren an Daten mit 80 im Jahr 2006 relativ gering war, wurden auch Messstellen mit einer Datenlänge von 10 Jahren extremwertstatistisch ausgewertet. Dadurch standen für die Interpolation weitere 141 Messstellen zur Verfügung, also insgesamt 221 Messstellen. Betreiber dieser Messstellen waren in den meisten Fällen der Hydrographischen Dienst, einige stammten auch von der ZAMG, von Kraftwerksgesellschaften und anderen Eigentümern. Zusätzlich zu diesen Messstellen mit zeitlich hoch aufgelösten Niederschlagsdaten wurden auch Messstellen herangezogen an denen „nur“ Tagesniederschlagssummen mit zumindest 20 Jahre Datenlänge vorlagen, und die 2006 noch nicht aufgelassen waren. Nach einer Datenkontrolle und –Korrektur, in Abstimmung mit den Hydrographischen Landesdiensten, standen insgesamt 853 Messstellen für die Auswertung und Interpolation zur Verfügung.

Bei der MaxModN gestützten Interpolation wird davon ausgegangen, dass die räumliche Verteilung der MaxModN- Daten jener der ÖKOSTRA- Niederschläge entspricht, und dass eine Maßzahl, die den Zusammenhang zwischen ÖKOSTRA- und MaxModN- 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 wurde der Quotient zwischen ÖKOSTRA- und MaxModN- Wert verwendet. Dazu wurden die MaxModN- Gitterpunktwerte auf den Ort der Messstelle interpoliert (Distanzgewichtung: invers-quadratisch), der Quotient gebildet und dieser wiederum auf die Gitterpunkte des MaxModN- Gitters interpoliert (Distanzgewichtung: 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 MaxModN- Wert und zusätzlich der interpolierte Quotient. Mit diesen Daten konnte der interpolierter ÖKOSTRA- Wert für jeden Gitterpunkt rückgerechnet werden.

Da die Messstellendichte der Schreiberdaten mit zumindest 20 Jahren an Daten gering war, wurden auch Messstellen mit zumindest 10 Jahren an Daten für die Interpolation herangezogen. D.h. es wurden 2 Datensätze gebildet die in beiden Fällen aus den Tagessummenmessstellen mit zumindest 20 Jahren bestanden und zusätzlich an den einen Datensatz die Schreiberdaten mit zumindest 20 Jahren bzw. an den anderen jene mit zumindest 10 Jahren an Daten angefügt wurden. 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 Ergebnisfeld der ÖKOSTRA- Regionalisierung ergab sich aus der gitterpunktweise 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.

Als weitere Interpolationsmethode für die ÖKOSTRA- Messstellenauswertungen wurde eine „einfache“ invers-quadratische Distanzgewichtung durchgeführt. Für den Interpolationsvorgang wurden wieder 2 Datensätze mit unterschiedlichen Datenlängen verwendet, die gewichtet gemittelt wurden. Dadurch stand an den Gitterpunkten ein weiterer interpolierter ÖKOSTRA- Wert zur Verfügung. Die Verknüpfung der beiden Interpolationsmethoden schien notwendig, da es sich zeigte, dass an manchen Gitterpunkten große Differenzen zwischen den nach unterschiedlichen Methoden interpolierten ÖKOSTRA- Werten bestanden, vor allem bei den kurzen Dauerstufen. Viele dieser großen Differenzen waren als nicht plausibel einzustufen.

Durch die Kombination der beiden Interpolationsergebnisse mit Hilfe einer arithmetischen Mittelbildung konnten große Abweichungen ausgeglichen werden. Das Endergebnis der ÖKOSTRA- Interpolation wird somit über die Gleichung

$$\text{ÖKOSTRA}_{\text{interpoliert}} = [\text{ÖKOSTRA}_{\text{MaxModN}} + \text{ÖKOSTRA}_{\text{R2}}] / 2 \quad (9)$$

erhalten.  $\text{ÖKOSTRA}_{\text{MaxModN}}$  ist der Wert der durch die MaxModN gestützt Interpolation erhalten wurde und  $\text{ÖKOSTRA}_{\text{R2}}$  jener Wert der durch die invers-quadratische distanzgewichtete Interpolation entstanden ist.

Letztendlich wurde das Endergebnis der ÖKOSTRA- Interpolation, wie schon bei den maximierten Modellniederschlägen, auf Anstiegsfehler getestet und gegebenenfalls Korrekturen durchgeführt, um geglättete, von starken, unplausiblen Anstiegen befreite Niederschlagsverläufe zu erhalten.

## 5. Bildung der Bemessungsniederschläge (NBemess)

Da die maximierten Modellniederschläge MaxModN grundsätzlich höhere Werte als die (interpolierten) extremwertstatistischen Messstellenauswertungen liefern, scheint es plausibel anzunehmen, dass diese Werte eher das obere Drittel aller möglichen Realisierungen von Bemessungsniederschlägen abdecken. Hingegen ergeben die (interpolierten) ÖKOSTRA- Messstellenauswertungen, Werte, die dem unteren Drittel des Schwankungsbereichs möglicher Bemessungsniederschläge zuzuordnen sind. Diese Charakteristika der Ergebnisse der verschiedenen Auswertungsmethoden erlauben es den Bereich abzugrenzen innerhalb dessen die Bemessungsniederschläge liegen sollten. Durch Kombination dieser Ergebnisse würde die mögliche Schwankungsbreite verringert, und der „mutmaßlich wahre Niederschlagsbemessungswert“ (NBemess) angenähert werden.

Die Bestimmungsgleichung der Bemessungsniederschläge wird über eine dauerstufenabhängig Gewichtung erhalten

$$\text{NBemess}(D) = G_{\text{MaxModN}} * \text{MaxModN}(D) + (1 - G_{\text{MaxModN}}) * \text{ÖKOSTRA}(D) \quad (10)$$

In der Gleichung 10 sind  $G_{\text{MaxModN}}$  die dauerstufenabhängigen Gewichte zur Bildung der Bemessungsniederschläge und D die Dauerstufe.

Im Vergleich zum Siedlungswasserwirtschaftsprojekt (BMLFUW, 2006) wurde die Gewichtsfunktion modifiziert. Im Siedlungswasserwirtschaftsprojekt nahmen die HAÖ- Gewichte bis 12 Stunden ab. Die Begründung der höheren Gewichte der HAÖ- Werte bei den kurzen Dauerstufen lag an der geringeren Plausibilität der Messstellenauswertungen aufgrund der, besonders für kurze Dauerstufen vorhandenen, inadäquaten Niederschlagsdatenlage. Der Begriff „inadäquate Daten“ bedeuten hier, dass neben den üblichen Messfehlern - es werden zu geringe Werte gemessen -, auch die Niederschlagsmaxima grundsätzlich nicht an der Messstelle auftreten und daher nicht erfasst werden. Werden die Maxima (zufällig) doch erfasst, dann zu selten um

das Niederschlagsklima für extreme Niederschläge auch in der Umgebung der Messstelle adäquat zu beschreiben. Da jedoch eine Annäherung der MaxModN- Daten an die ÖKOSTRA- Auswertungen erreicht wurde – die HAÖ- und ALADIN- Daten wurden an die ÖKOSTRA- Auswertungen angepasst -, müssen auch die Gewichte zur Bestimmung der Bemessungsniederschläge so modifiziert werden, dass diese ab einer bestimmten Dauerstufe wieder zunehmen, um letztendlich eine Gleichgewichtung zwischen MaxModN- und ÖKOSTRA- Werte zu erreichen, da keiner der Auswertungsmethoden der Vorzug gegeben werden kann.

Die Funktion zur Bestimmung der Gewichte für Dauerstufen D [Minuten] bis 6 Stunden ist durch die Gleichung

$$G_{\text{MaxModN1}} = a + b \cdot \text{Log}(D) \quad (11)$$

gegeben. Darin sind  $G_{\text{MaxModN1}}$  die Gewichte zur Bildung der Bemessungsniederschläge,  $a = 0,64852$  und  $b = -0,12664$ . Für Dauerstufen ab 6 Stunden - die MaxModN- Gewichte steigen wieder an – gilt die Gleichung

$$G_{\text{MaxModN1}} = a1 / [1 + \exp(-(D - D0)/b1)] \quad (12)$$

mit  $a1 = 0,5$ ,  $b1 = 138$  und  $D0 = 274.828659$

Bei der Anwendung dieser Gewichtsfunktion zeigte sich jedoch, dass an einigen Gitterpunkten der Verlauf der Niederschlagswerte beim Übergang der Dauerstufe 6 Stunden auf 9 Stunden unplausibel starke Anstiege aufwiesen, was auf die starken Zunahme der Verschneidungsgewichte zurückzuführen war. Daher wurde die Gewichtsfunktion bereits ab 4 Stunden modifiziert, um einen geglätteten Verlauf der Gewichte und der resultierenden Bemessungsniederschläge zu erhalten. Die korrigierten Gewichte wurden mit der Funktion

$$G_{\text{MaxModN-korrigiert}} = G_{\text{MaxModN1}} + 0.058 \exp\{-4.0 [(D - 360)/180]^2\} \quad (13)$$

gebildet. In Tabelle 4 sind die Gewichte für die maximierten Modellniederschläge  $G_{\text{MaxModN}}$  in Abhängigkeit der Dauerstufe D angeführt.

Tests der Anstiege der resultierenden Bemessungsniederschläge sowohl nach zunehmender Dauer als auch nach zunehmender Jährlichkeit ergaben keine Anstiegsfehler. D.h. Alle Bemessungsniederschläge nahmen mit zunehmender Dauerstufe und Jährlichkeit zu.

**Tab. 4:** Gewichte der maximierten Modellniederschläge in Abhängigkeit der Dauerstufe zur Bestimmung der Bemessungsniederschläge.

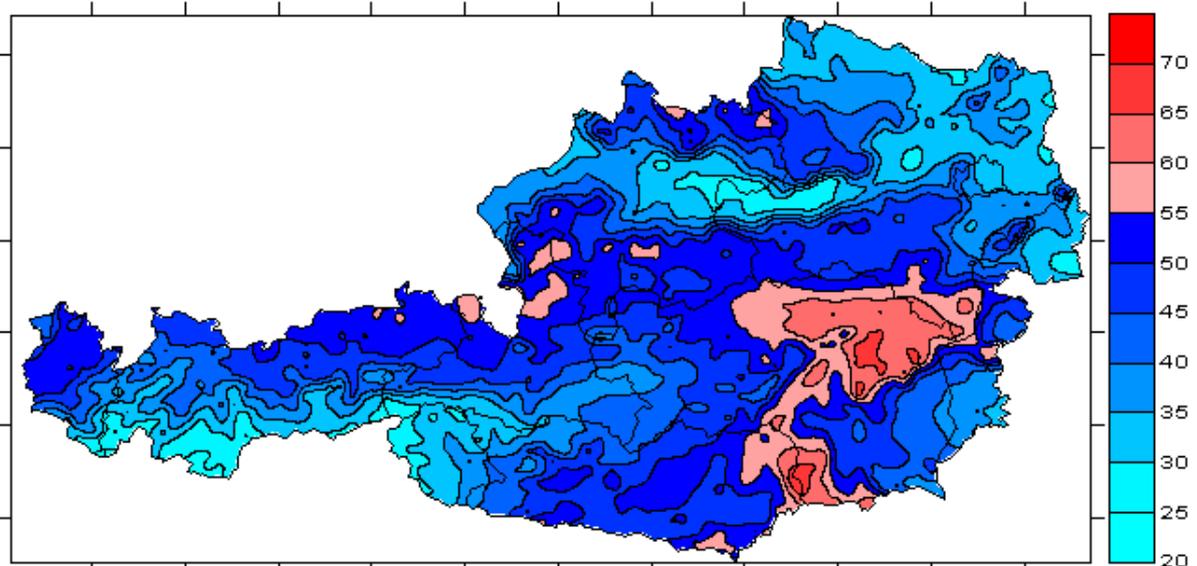
D	$G_{\text{MaxModN1}}$	$G_{\text{MaxModN-korrigiert}}$	$G_{\text{MaxModN}}$
5 Minuten	0,560		0,560
10 Minuten	0,522		0,522
15 Minuten	0,500		0,500
20 Minuten	0,484		0,484
30 Minuten	0,461		0,461
45 Minuten	0,439		0,439
60 Minuten	0,423		0,423
90 Minuten	0,401		0,401
2 Stunden	0,385		0,385
3 Stunden	0,363	0,364	0,364
4 Stunden	0,347	0,357	0,357
6 Stunden	0,325	0,383	0,383
9 Stunden	0,436	0,437	0,437
12 Stunden	0,481		0,481
18 Stunden	0,498		0,498
1 Tag	0,500		0,500
2 Tage	0,500		0,500
3 Tage	0,500		0,500
4 Tage	0,500		0,500
5 Tage	0,500		0,500
6 Tage	0,500		0,500

## 6. Ergebnisse

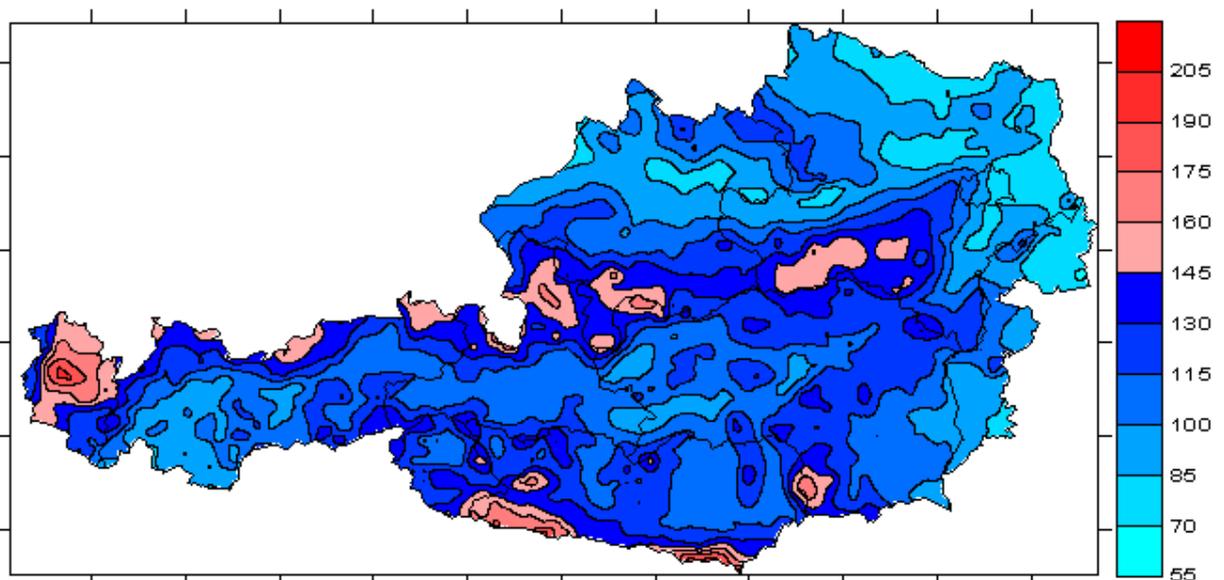
In den Abbildungen 1 und 2 sind die Ergebnisse der Bemessungsniederschlagsauswertung für die Dauerstufen 60 Minuten und 1 Tag der Jährlichkeit 10 dargestellt. Für 60 Minuten zeigen sich die größten Niederschläge entlang der Koralpe, der Gleinalpe, den Fischbacher Alpen bis zum Schneeberg und dem Hochschwab. Die kleinsten Niederschlagsmengen findet man vom Süden Vorarlbergs über den Bereich südliche des Inntals- Ötztaler Alpen, von den Zillertaler Alpen bis Osttirol, entlang des Donautals und im Osten Österreichs.

Bei der Dauerstufe 1 Tag hingegen ergeben sich die größten Niederschläge im Bregenzer Wald und in den Karawanken. Weitere Bereiche mit hohen Niederschlägen findet man von Vorarlberg entlang der Nordalpen bis in den Wienerwald hinein, im Süden Österreichs von den Karnischen Alpen, über die Karawanken zur Koralpe. Dieses räumliche Muster ist z.B. auch mit jenem des 10 jährlichen Tagesniederschlags bei Seebacher und Shahin, 1985 (Abbildung 9d) vergleichbar.

Für die Jährlichkeit 100 bleibt im Großen und Ganzen die räumliche Verteilung für die einzelnen Dauerstufen bestehen.



**Abb. 1:** Bemessungsniederschlag [mm] der Dauer 1 Stunde und Jährlichkeit 10



**Abb. 2:** Bemessungsniederschlag [mm] der Dauer 1 Tag und Jährlichkeit 10

Die Auswertungsergebnisse, die MaxModN-, die ÖKOSTRA- und die Bemessungsniederschlagsdaten, sind im Internet des BMLFUW unter der Adresse <http://gis.lebensministerium.at/ehyd> -> „Bemessungsniederschlag“ als ASCII- und

PDF- Datei für jeden Gitterpunkt und alle Auswertungsdauerstufen von 5 Minuten bis 6 Tage und Jährlichkeiten bis 100 verfügbar

## 7. Literatur

ATV (1985): Niederschlag- Starkregenauswertung nach Wiederkehr und Dauer, ATV-A121, vormals DVWK 124; (ATV – Abwassertechnische Vereinigung)

BMLFUW (2006): Bemessungsniederschläge in der Siedlungswasserwirtschaft – Forschungsbericht

Hammer N. (1993): Eine optimierte Starkniederschlagsauswertung III OWUNDA. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich 69

HAÖ (2003): Hydrologischer Atlas von Österreich. BMLFUW, Wien. Erste Lieferung 2003, Zweite Lieferung 2005, 3. Lieferung 2007

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, BMLFUW, Wien

Seebacher F.S., Shahin M.M.A. (1985): Beitrag zur statistischen Auswertung extremer Tagesniederschläge in Österreich. Österreichische Wasserwirtschaft, Jahrgang 37, Heft 7/8.

### **Anschrift des Verfassers:**

#### **Dr. Viktor Weilguni**

Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

Abteilung VII / 3 – Wasserhaushalt (HZB)

Marxergasse 2

A - 1030 Wien

Tel: +43 1 71100 - 6964

Fax: +43 1 71100 - 6851

E-mail: Viktor.Weilguni@bmlfuw.gv.at

## **METHODEN ZUR BESTIMMUNG DES BEMESSUNGSHOCHWASSERS**

Ralf Merz

### **1. Einleitung**

Für eine Vielzahl wasserwirtschaftlicher Planungs- und Bemessungsaufgaben werden Angaben über maßgebende Hochwasserabflüsse benötigt. In der Ingenieurspraxis werden Bemessungshochwässer in Gebieten, in denen Abflussbeobachtungen vorliegen, meistens durch statistische Analyse von beobachteten Hochwasserabflüssen (auch Extremwertstatistik, Hochwasserstatistik oder Hochwasserwahrscheinlichkeitsanalyse genannt) ermittelt. In Gebieten, in denen keine Abflussbeobachtungen vorliegen, können Bemessungshochwässer durch Übertragung von HQ-Analysen aus Nachbargebieten mit Hilfe von Regionalisierungsmethoden ermittelt werden. Ein alternativer Weg ist die deterministische Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeiten mit Niederschlag-Abfluss (NA)-Modellen.

Beide Wege, Statistik, sowie NA-Modellierung, haben Vor- und Nachteile. Vorteil der statistischen Ermittlung von Bemessungshochwässer ist es, dass die zur Bemessung notwendige Jährlichkeit eines Abflusses direkt durch die Methoden bestimmt ist. Bei der Niederschlag-Abfluss-Modellierung ist die Jährlichkeit des ermittelten Abflusses viel schwieriger zu bestimmen. Vorteil der NA-Modellierung hingegen ist die Möglichkeit den Einfluss von verschiedenen Annahmen über die Hochwasserentstehung auf die Größe des Abflusses zu untersuchen, während Änderungen in der Hochwassergenese bei der Hochwasserstatistik nur schwer zu berücksichtigen sind. Ein weiterer Nachteil der Hochwasserstatistik sind die oft zu kurzen Beobachtungsreihen.

In der Praxis erfolgt die Ermittlung von Bemessungshochwässern in der Regel anhand einer einzigen Methode. Traditionell werden bei größeren Gebieten, in denen in der Regel längere Beobachtungsreihen vorliegen, die statistische Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten gewählt, während in kleinen Gebieten, in denen oft keine oder nur kurze Beobachtungsreihen des Abflusses vorliegen, eher der Weg der NA-Modellierung gewählt wird. Eine Vielzahl von Beschreibungen und Vergleiche der einzelnen Methoden sind in der Literatur zu finden (siehe z.B. Gutknecht, 2007). Ziel dieses Beitrages ist es auf einige aktuelle Probleme der statistischen und deterministischen Ermittlung von Bemessungshochwässern einzugehen und Lösungsmöglichkeiten aufzuzeigen.

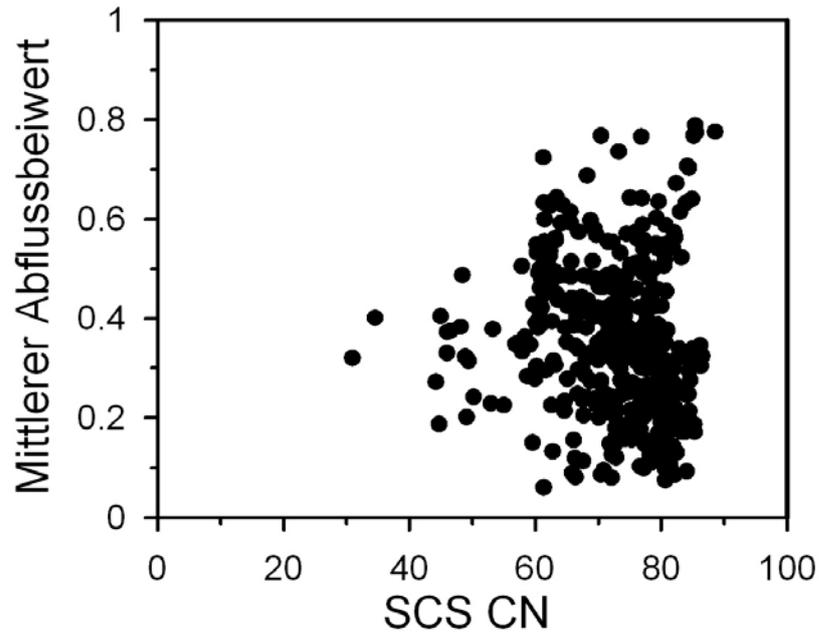
### **2. Niederschlag-Abflussmodellierung**

In der Ingenieurpraxis kommen zur Ermittlung von Bemessungshochwässern in der Regel Ereignismodelle zur Anwendung. Eine Vielzahl von Modellen und Softwarepaketen stehen heute der Praxis zur Verfügung (siehe z.B. Merz und Blöschl, 2002). Bei der NA-Modellierung sind daher im Wesentlichen der Bemessungs-

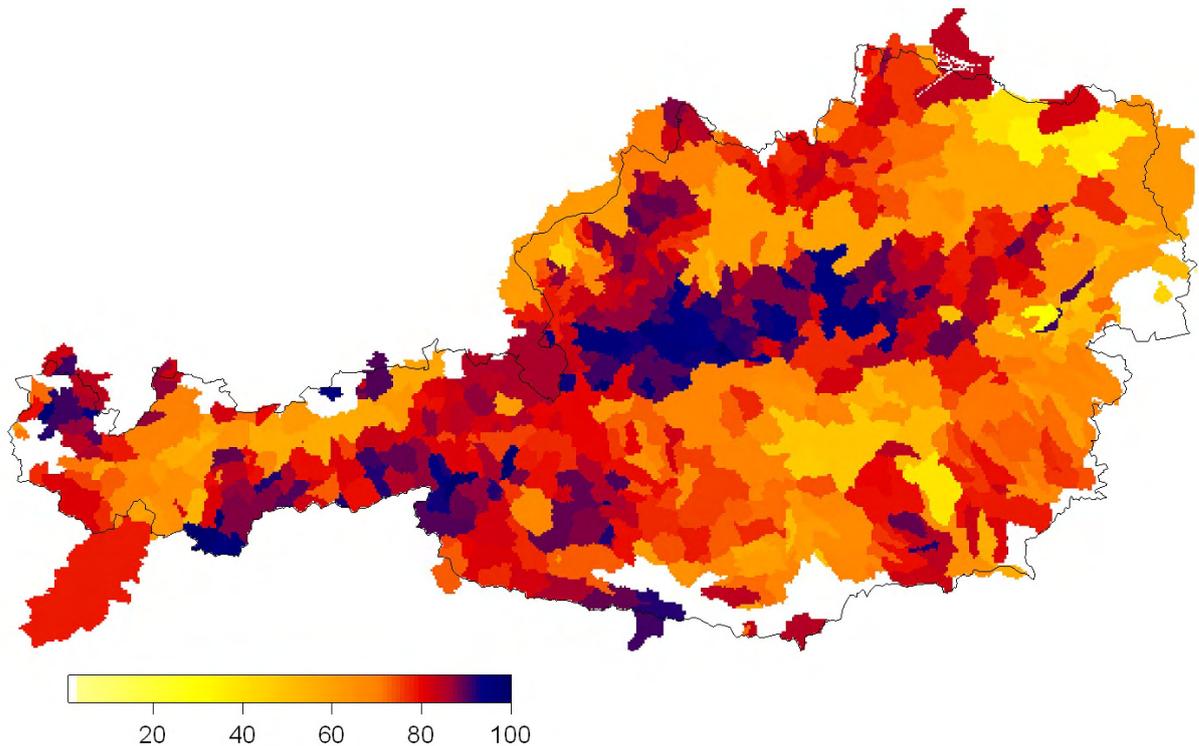
niederschlag, die Modellstruktur und die Modellparameter zu wählen. Zur Ermittlung des Bemessungsniederschlags in Österreich sei der Leser auf Weilguni verwiesen (Weilguni, 2009). Ist das Abflussverhalten des Gebietes hauptsächlich durch bekannte Komponenten bestimmt (z.B. hydraulische Bauwerke), werden meist hydrologisch-hydraulische Modelle bevorzugt, wenn es durch weitgehend unbekannte Kenngrößen bestimmt wird (z.B. Bodeneigenschaften) werden meist Konzeptmodelle bevorzugt, da die Anzahl der zu wählenden Parameter geringer ist.

Viele der verfügbaren Modelle bieten die Möglichkeit Modellparameter direkt aus verfügbaren Gebietsdaten (z.B. digitaler Bodenkarte) zu ermitteln. Oft sind jedoch die verfügbaren Information für das Abflussverhalten des Gebietes nicht repräsentativ und die so ermittelten Modellparameter sehr unsicher. Als Beispiel für die Unsicherheit von Modellparametern aus verfügbaren Gebietsdaten ist die Ermittlung der Abflussbeiwerte nach dem SCS Kurvennummer Verfahren (DVWK, 1984) dargestellt. Die SCS-CN Methode ist in vielen Teilen der Welt die Standardmethode zur Ermittlung von Ereignisabflussbeiwerten. Die Intention des Verfahrens ist, den Ereignisabflussbeiwert für Einzugsgebiete als Funktion des Ereignisniederschlags und einer Kurvennummer zu berechnen. Abflussbeobachtungen werden hierzu nicht benötigt. Die Kurvennummer ist in DVWK (1984) tabelliert als Funktion von Bodentyp, Landnutzung und Regen der vorangegangenen 5 Tage als Maß für die Vorbefeuchtung. Zur Überprüfung der Güte des SCS-CN Verfahrens in Österreich wurden über 64000 Ereignisse in 459 österreichischen Einzugsgebieten ausgewertet (Merz and Blöschl, 2005, 2009). Hierzu wurden flächendeckende Gebietsniederschläge 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.

Abbildung 1 zeigt für jedes Gebiet den aus den Abflussdaten ermittelten mittleren Ereignisabflussbeiwert aufgetragen gegen die SCS-Kurvennummer aus Bodentyp und Landnutzung nach DVWK (1984) bestimmt. Der Bodentyp (großes bis geringes Versickerungsvermögen) wurde hierzu aus der digitalen Bodenkarte Österreichs 1:1 000 000 (ÖGB, 2001) abgeleitet. Die Bodennutzung wurde aus LANDSAT Thematic Mapper Daten (Ecker et al., 1995) bestimmt. Eine starke Abhängigkeit zwischen den mittleren Ereignisabflussbeiwerten und den SCS Kurvennummern wäre zu erwarten, da hohe Kurvennummern nach DVWK (1984) für Gebiete mit wenig Infiltrationskapazität und damit hohen Abflussbeiwerten stehen, während kleine Kurvennummern für Gebiete mit kleineren Abflussbeiwerten stehen. Der Vergleich mit den Abflussbeiwerten aus Abflussdaten zeigt jedoch, dass die Kurvennummern nur sehr wenig Aussagekraft für die zu beobachtenden Abflussbeiwerte haben.



**Abb.1:** Mittlerer Ereignisabflussbeiwert für 459 Gebiete aufgetragen gegen die SCS Kurvennummer nach DVWK (19984).



**Abb. 2:** SCS-CN Werte rückgerechnet aus den Abflussbeiwerten von ungefähr 64000 Ereignissen.

Eine räumliche Analyse der Abflussbeiwerte aus Abflussdaten zeigt, dass für Österreich insgesamt die zum Abfluss passenden SCS-CN Werte nicht so sehr ein Abbild des Bodentyps und der Landnutzung zu sein scheinen, sondern ein Abbild der Jahreswasserbilanz der Einzugsgebiete sind. Gebiete mit großen Jahresniederschlägen

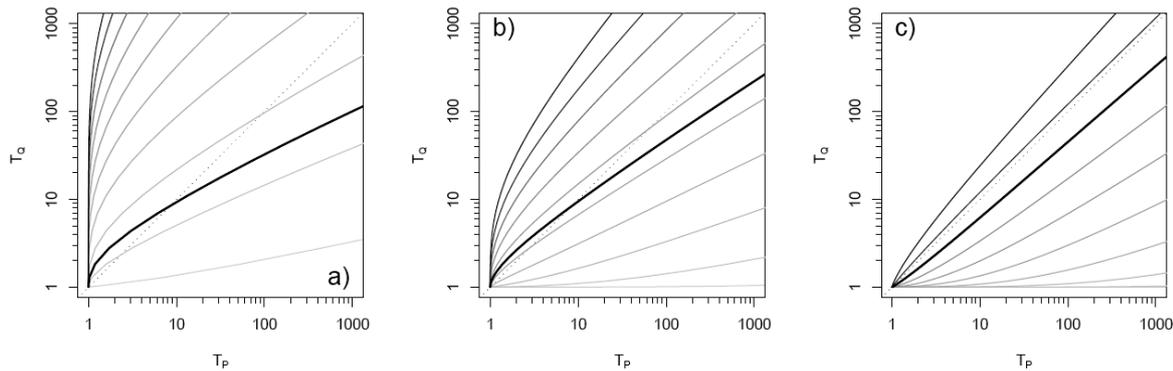
und einem damit verbundenen hohen durchschnittlichen Bodenfeuchtestatus weisen wesentlich größere Abflussbeiwerte auf und somit sollte diesen Gebieten größere CN Werte zugewiesen werden, als Gebiete die durchschnittlich trocken sind. Dies gilt für die hier untersuchten Einzugsgebietsgrößen zwischen 80 und 10 000 km<sup>2</sup>.

Um den Einfluss der Jahreswasserbilanz zu berücksichtigen wurden die SCS-CN Kurvennummer an die Abflussbeiwerten aus den Abflussdaten angepasst. Hierzu wurde in allen Gebieten für jedes Ereignis die Kurvennummer variiert und unter Berücksichtigung des jeweiligen Vorregens über 5 Tage der Ereignisabfluss nach dem SCS-CN Verfahren aus dem Ereignisniederschlag berechnet. Dieser Ereignisabfluss wurde nun mit aus den Abflussdaten ermittelten Ereignisabfluss verglichen. Die zutreffende Kurvennummer wurde durch Minimierung der quadratischen Differenzen über alle Ereignisse eines Gebietes bestimmt und in Abbildung 2 räumlich aufgetragen. Die räumliche Verteilung der rückgerechneten Kurvennummern spiegelt deutlich die Verteilung der Jahreswasserbilanz in Österreich wieder. So sind z.B. am regenreichen Alpennordrand die Kurvennummer sehr groß, im trockeneren Osten sind kleinere Kurvennummern zu erkennen. Da der Einfluss des durchschnittlichen Feuchtestatus eines Gebietes im SCS-Kurvennummer Verfahren nach DVWK (1984) nur ungenügend beschrieben ist, ist für die nach DVWK (1984) ermittelten Abflussbeiwerte in Österreich mit großen Unsicherheiten zu rechnen. Mit deutlich kleineren Unsicherheiten ist zu rechnen, wenn die Abflussbeiwerte durch Eichung an beobachteten Abflussdaten ermittelt werden. Falls keine Eichung an beobachteten Daten möglich ist, können die mittleren Abflussbeiwerte nach Abbildung 2 eine Hilfe zur Ermittlung des maßgebenden Abflussbeiwertes sein.

Auch für die Ermittlung anderer Modellparameter ist eine Eichung an beobachteten Abflussdaten immer anzustreben. Sind für das Gebiet keine Abflussbeobachtungen vorhanden, so ist die Ermittlung der Parameter aus Abflussbeobachtungen am gleichen Vorfluter oder alternativ aus Abflussbeobachtungen in hydrologisch ähnlichen Gebieten zu empfehlen (Blöschl, 2005). Nur als letzter Ausweg sollten Modellparameter aus Gebietseigenschaften (z.B. Bodenkenngrößen, Landnutzung) bestimmt werden. Bei kleinen Einzugsgebieten sind Feldbegehungen eine wertvolle Hilfe zur Bestimmung von Modellparametern. So können z.B. Morphologie und Vegetation Hinweise auf das Gebietsverhalten und somit auf die Modellparameter geben. Ein bemooster Gewässerlauf deutet auf eher langsame Abflussreaktionen, während Erosionstätigkeit auf schnelle Abflussreaktionen und damit größere Abflüsse schließen lässt. Aulitzky (1992) prägte dafür den Begriff der „Sprache der stummen Zeugen“. Anhand morphologischer und biologischer Indikatoren entwickelten Markart et al. (2004) eine Anleitung zur Bestimmung der Abflussbereitschaft. Es ist zwar oft schwer anhand dieser eher qualitativen Informationen einen Modellparameter genau zu bestimmen, jedoch können mit Hilfe solcher qualitativen oder „soft“ Informationen die möglichen Werte der Modellparameter auf hydrologisch sinnvolle Spannweiten beschränkt werden. Besonders in Kombination mit anderen Verfahren zur Bestimmung der Parameter, wie z.B. Regionalisierungsverfahren (Blöschl und Merz, 2002), kann die Unsicherheit der Modellparameter so deutlich verringert werden.

Eine wichtige Frage bei der Ermittlung von Bemessungshochwässern mittels NA-Modellen ist die Frage der Jährlichkeit der ermittelten Abflüsse, da diese nicht immer der Jährlichkeit der Bemessungsniederschläge entsprechen muss. Aus statistischer Sicht ist vorerst der Begriff der Jährlichkeit des Niederschlags zu hinterfragen. Einem Niederschlagsereignis ist keine Jährlichkeit zugeordnet, da es durch mehrere Kenngrößen beschrieben wird (Niederschlaghöhe, Dauer, zeitliche Verteilung), sich die Jährlichkeit aber nur für eine Einzelgröße (z.B. Hochwasserscheitel) eindeutig definieren lässt. Pragmatisch kann man allerdings, entsprechend der Bemessungspraxis eine Jährlichkeit definieren, etwa für die Niederschlagshöhe der maßgebenden Niederschlagsdauer aus der Regenreihe.

Wichtiger für die Ingenieurspraxis ist die Frage nach der Jährlichkeit des ermittelten Abflusses. Die Jährlichkeit hängt davon ab wie die Parameter des NA-Modells gewählt werden und nur unter bestimmten Parameterkombinationen entspricht die Jährlichkeit des Abflusses der Jährlichkeit des Niederschlages. Werden alle Parameter (Abflussbeiwert, Reaktionszeit, ...) und die zeitliche Verteilung des Niederschlags ungünstig gewählt, dann kann die Jährlichkeit des Abflussscheitels wesentlich größer als die des Niederschlags sein. Es lässt sich daher fragen, bei welchen Parameterkombinationen die Jährlichkeiten übereinstimmen. Als vorläufiger Beitrag zeigt Abbildung 3 die Auswertungen von deterministischen Simulationen für unterschiedliche Klimaverhältnisse (Viglione et al., 2009). In Abbildung 3 sind für verschiedene Abflussbeiwerte (0.1-1) bei sonst konstanten Modellparametern (z.B. kritische Niederschlagsdauer) die Jährlichkeit des resultierenden Abflusses gegen die Jährlichkeit des Niederschlages aufgezeichnet. Die Abbildung 3a zeigt die Auswertungen für ein trockenes Gebiet, in dem die Abflussbeiwerte meistens klein sind (Mittelwert=0.1, CV=0.95) und nur selten Ereignisse mit höheren Abflussbeiwerten auftreten. Abbildung 3 b zeigt die Auswertungen für ein feuchtes Gebiet (Mittelwert =0.3, CV=0.65) und Abbildung 3c für ein sehr feuchtes Gebiet (Mittelwert =0.7, CV=0.21), in dem regelmäßig Ereignisse mit hohen Abflussbeiwerten auftreten. Die Abbildungen zeigen, dass das Verhältnis der Jährlichkeiten von Niederschlag und Abfluss stark von dem gewählten Abflussbeiwert abhängt, besonders bei einem trockenen Klima (Abb. 3a). Wählt man in einem trockenen Klima einen zu großen Abflussbeiwert, z.B. 0.4 so erhält man, aufgrund der niedrigen Wahrscheinlichkeit, dass ein Abflussbeiwert dieser Größe auftritt, bei einem hundertjährigen Niederschlag eine Jährlichkeit des Abflusses von etwa 500 Jahren. Die schwarze Linie zeigt das Verhältnis der Jährlichkeiten, wenn der Median der Abflussbeiwerte der maximal jährlichen Hochwasserereignisse verwendet wird. Für alle drei Klimaverhältnisse unterscheiden sich in diesem Fall die Jährlichkeiten von Niederschlag und Abfluss. In einem trockenen Klima sollte, wenn als Abflussbeiwert der Median der Abflussbeiwerte gewählt wird, die Jährlichkeit des Niederschlages ungefähr 1000 Jahre betragen um einen hundertjährigen Abfluss zu erzeugen.



**Abb. 3:** Verhältnis der Jährlichkeiten von Niederschlag ( $T_P$ ) und Abfluss ( $T_Q$ ) unter Verwendung der maßgebenden Niederschlagsdauer für verschiedene Abflussbeiwerte (0.1-1) (graue Linien) und für den Median der Abflussbeiwerte der maximal jährlichen Hochwasserereignisse. a) trockenes Gebiet mit eher kleinen Abflussbeiwerten (Mittelwert=0.1, CV=0.95), b) feuchtes Gebiet (Mittelwert =0.3, CV=0.65) und c) sehr feuchtes Gebiet (Mittelwert =0.7, CV=0.21), in dem regelmäßig Ereignisse mit hohen Abflussbeiwerten auftreten (Viglione et al. 2009).

Als Alternative können Bemessungshochwässer durch eine kontinuierliche Modellierung bzw. einer abgeleiteten Hochwasserstatistik ermittelt werden. Bei der kontinuierlichen Modellierung werden mit Hilfe eines Niederschlagsgenerators lange Zeitreihen synthetischer Niederschläge generiert und durch ein NA-Modell in Abflüsse umgewandelt. Aus der so gewonnenen sehr langen Abflusszeitreihe 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. Es gibt auch die Möglichkeit auf Basis der Theorie abgeleiteter Verteilungsfunktionen die Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Niederschlages direkt in Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Abflusses umzusetzen (Blöschl, 2007). Diese Methode wird auch als analytische Methode bezeichnet, während die kontinuierliche Simulation oft auch als Monte-Carlo Simulation bezeichnet wird. Zwar ist bei der abgeleiteten Hochwasserstatistik, im Gegensatz zur Ereignismodellierung mittels Bemessungsniederschlags, die Jährlichkeit des ermittelten Abflusses genau bestimmt, jedoch stellt sich auch hier die Frage nach der Wahl der Parameter. Aufgrund der Komplexität der Methoden und der Verfügbarkeit und Handhabung von Software, spielt die abgeleitete Hochwasserstatistik in der Ingenieurspraxis im Moment eine noch untergeordnete Rolle (Nemert, 2007). Aufgrund der Möglichkeit der Analyse der verschiedenen Faktoren auf die Größe des Bemessungsabflusses und die implizite Berücksichtigung von Niederschlag und Gebietszustand bei der Ermittlung der Jährlichkeit des Abflusses dürfte die abgeleitete Hochwasserstatistik jedoch auch in der Praxis in Zukunft eine größere Rolle spielen.

### 3. Extremwerthydrologie

Die Vielfältigkeit und Komplexität von meteorologischen und hydrologischen Prozessen, die zu Hochwasserabflüssen führen können, wurden in der hydrologischen Literatur oft diskutiert (z.B. Gutknecht, 1994). Dennoch basiert die traditionelle Vorgehensweise der Hochwasserstatistik auf der Annahme, dass die Vielfältigkeit und Komplexität der Hochwasserprozesse durch wenige einzelne Beobachtungen von Hochwasserabflüssen erfasst werden kann, d.h. dass die beobachtete Hochwasserreihe genügend Information enthält um das Hochwasserverhalten in diesem Gebiet auch in Zukunft ausreichend beschreiben zu können. Für die meisten praktischen ingenieurhydrologischen Fragestellungen trifft dies jedoch nicht zu. Die Abflussreihen sind in der Regel zu kurz, nicht stationär, fehlerbehaftet, entstammen nicht der gleichen Grundgesamtheit etc. Obwohl dies schon lange bekannt ist, wurde in der Regel auf weitere statistische Tests und Analysen gesetzt, in ähnlicher Weise wie sich Baron Münchhausen an seinen eigenen Haaren aus einem Sumpf gezogen haben will. Bei näherer Betrachtung ist allerdings klar, dass dadurch keine zusätzliche Information generiert wird und damit die zu bestimmenden Hochwasserdurchflüsse nicht genauer werden können.

Genauere Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten erfordern zusätzliche Informationen über die Prozesse und Zusammenhänge von Hochwässern im betreffenden Gebiet in die Berechnung einfließen zu lassen. In Merz und Blöschl (2008 a,b,c) wurde ein Verfahren vorgestellt, die Statistik systematisch mit Informationen über die Hochwasserprozesse zu erweitern und Hochwasserwahrscheinlichkeiten aus der Kombination von traditioneller Statistik und Zusatzinformation zu ermitteln. Zusatzinformationen können - der Wortwahl von Dyck (1980, S. 278-279) - in zeitliche, räumliche und kausale Informationen unterschieden werden. Eine zeitliche Informationserweiterung ist möglich, indem man die Reihe der beobachteten Abflussscheitel in Bezug zur längeren hydrologischen Geschichte des Gebietes setzt, wie z.B. durch die Analyse historischer Hochwasserereignisse. Eine räumliche Informationserweiterung ist möglich, indem man die Reihe der beobachteten Abflussscheitel in einem Gebiet mit denen in Nachbargebieten in Bezug setzt, d.h. Informationen über das Hochwasserverhalten werden über Gebietsgrenzen hinweg transferiert bzw. regionalisiert (z.B. mittels Hüllkurven, Spendediagrammen, Regressionen mit Gebietseigenschaften, geostatistischen Verfahren bzw. hydrologischen Längenschnitten bei großen Flüssen). Eine kausale Informationserweiterung ist möglich, indem man die Reihe der beobachteten Abflussscheitel mit den Prozessen der Hochwasserentstehung in Bezug setzt. Dies kann qualitativ erfolgen durch einen Vergleich mit anderen hydrologischen Daten (Niederschlag, Abflussbeiwerte, Saisonalität der Hochwässer, Abflusstypen, Geomorphologie der Gebiete, etc.), sowie quantitativ mittels Niederschlag-Abflussmodellierung oder statistisch-deterministischen Verfahren.

Einzelne Zusatzinformationen werden häufig zur Bestimmung von Hochwasserabflüssen herangezogen, wie etwa historische Hochwässer (z.B. Grünwald, 2007) oder regionale Hochwasserstatistik (Merz und Blöschl, 2005). So zählt es zur

langjährigen Praxis der Hydrographischen Dienste in Österreich, „die Schwächen der rein statistischen Berechnung durch Anwendung anderer Methoden zu mildern“ (Godina, 1998), wozu u.a. Hüllkurven und Spendendiagramme zählen. Eine einzelne Art der Zusatzinformation kann jedoch nie alle Aspekte der Hochwasserentstehung erfassen. Mehrere Arten der Zusatzinformation ergeben ein vollständigeres Bild. Die zu kombinierenden Methoden sollten sich möglichst unterscheiden in Hinblick auf die Voraussetzungen und Annahmen bzgl. der zu beschreibenden hydrologischen Prozesse und Einflussfaktoren, um so einander ergänzende Information in die Berechnung einzubringen. Ebenso sollten die Methoden möglichst unterschiedliche Daten einbeziehen, z.B. unterschiedliche Datentypen wie Abfluss oder Niederschlag oder Daten mit unterschiedlichem Beobachtungszeitraum bzw. an unterschiedlichen Messstellen. Nur manche Zusatzinformationen erlauben eine quantitative Schätzung, wie z.B. die N-A Modellierung als kausale Informationserweiterung. Andere Information erlauben nur qualitative Aussage über das Hochwasserverhalten, wie z.B. Rückschlüsse aus der Morphologie und Gebietsbeschaffenheit auf das Hochwasserverhalten. Gerade diese qualitativen Informationen beleuchten oft wesentliche Aspekte der Hochwasserentstehung, die nicht durch quantitative Methoden abgedeckt werden.

Die Statistik, wie auch jede Zusatzinformation ist mit einem zugehörigen Ergebnisbereich verbunden. Das Ergebnisbereich umfasst einerseits unterschiedliche sinnvolle Schätzungen. Im Falle der Statistik können dies die Anpassungen zwei verschiedener Verteilungsfunktionen an die Hochwasserreihe sein. Bei der regionalen Informationserweiterung können sich unterschiedliche Schätzungen z.B. durch Verwendung von unterschiedlichen Regionalisierungsmethoden (z.B. regionale Spendendiagramme, Regressionen mit Gebietseigenschaften) ergeben. Weiterhin umfasst das Ergebnisbereich auch die mit jeder Schätzung verbundenen Unsicherheiten oder Vertrauensbereiche. Ein traditionelles Maß der Unsicherheit der Extremwertstatistik sind die Konfidenzintervalle. Bei qualitativen Informationen kann zwar kein quantitativer Unsicherheitsbereich angegeben werden, es ist aber vielfach möglich, eine grobe Einschätzung eines Bereiches anzugeben, in der eine Schätzung aufgrund dieser Information sinnvoll ist.

Die Ermittlung des maßgebenden Hochwasserabflusses erfolgt nun durch Kombination von Statistik, Zusatzinformationen und den dazugehörigen Vertrauensbereichen. Formale Verfahren wie Bayes Statistik oder Fuzzy Logics zur Kombination verschiedener Vertrauensbereiche könnten hier zur Anwendung kommen. Die Kombination kann aber auch manuell auf Basis von Experten-einschätzung erfolgen. Führen die einzelnen Informationsquellen zu einer konsistenten Schätzung, d.h. die einzelnen Vertrauensbereiche überlagern sich, so ist der maßgebenden Hochwasserabfluss in den Überlappungsbereich zu legen. In vielen Fällen werden die einzelnen Informationen zu einer inkonsistenten Schätzung führen, d.h. es gibt keinen eindeutigen Bereich, in dem sich die einzelnen Vertrauensbereiche überlagern. Grund hierfür können Datenfehler oder Aspekte sein, die in den bisher verwendeten Informationen nicht erfasst wurden. In diesem Fall wird vorgeschlagen, die verwendeten Daten und Methoden nochmals zu untersuchen und die Ursachen der

Inkonsistenz zu verstehen bzw. neue Informationsquellen in die Berechnung mit einzubeziehen. Lässt sich die Inkonsistenz nicht beheben, ist mit einem großen Unsicherheitsbereich zu rechnen, der die einzelnen Streubereiche umfasst. Gerade in diesem Fall kommt es bei der Zusammenschau auf die Einschätzung der Experten an. Dabei ist die hydrologische Analyse, Interpretation und Argumentation basierend auch auf qualitativem Wissen und Erfahrungen ein wesentlicher Bestandteil. Die Gesamtunsicherheit ist in diesem Fall vielleicht größer als die Unsicherheit die sich nur aus der Hochwasserstatistik ergibt, dies ist bei widersprüchlichen Befunden aber auch realistischer. Um die besondere Bedeutung der hydrologischen Überlegungen hervorzuheben wq prägten Merz und Blöschl (2008c) den Begriff "Extremwert-hydrologie" im Gegensatz zur traditionellen "Extremwertstatistik".

Die Philosophie der Kombination von Statistik und Zusatzinformation ist der Konzeption dem von Gutknecht et al. (2006) vorgeschlagenen „Mehr-Standbeine“-Ansatz zur Ermittlung von Bemessungshochwässern kleiner Auftretenswahrscheinlichkeiten sehr ähnlich. Auch im „Mehr-Standbeine“-Ansatz erfolgt die Bemessung durch Kombination verschiedener Verfahren und Informationsquellen, um so durch mehrere „Standbeine“ ein sicheres Fundament zu erlangen.

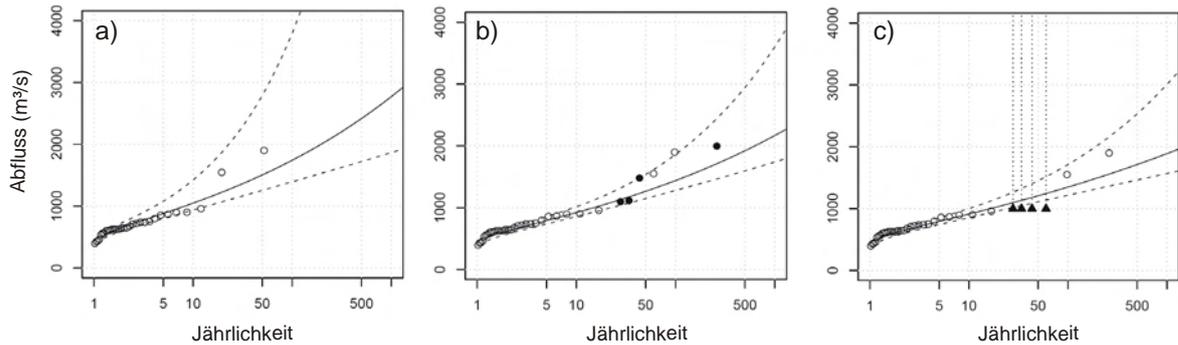
Art und Umfang der verwendbaren Zusatzinformationen unterscheiden sich für jedes Gebiet je nach Datenlage. Es hängt vom Einzelfall ab, welche zusätzlichen Daten und Methoden nützliche Informationen über das Hochwasserverhalten bringen können. Ein striktes Rezept zur Vorgehensweise der Informationserweiterung kann daher nicht gegeben werden. Im Folgenden soll vielmehr anhand einiger Beispiele ein Konzept präsentiert werden, an dem sich die Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten orientieren kann.

### **3.1 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. Dieses Gruppierungsverhalten ist z.B. deutlich in der Zeitreihe der maximalen jährlichen Abflüsse der Donau bei Wien zu erkennen. So wurde fünf der 12 größten Abflüsse in 176 Jahren (1928-2005) in den 20 Jahren von 1890 bis 1899 beobachtet. Durch die Gruppierung von hochwasserreichen und hochwasserarmen 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 Hochwasserkenngößen das Hochwasserverhalten vielfach unterschätzen. Durch einen Vergleich mit Nachbarstationen mit längeren Beobachtungszeiträumen, kann das Auftreten von hochwasserarmen oder hochwasserreichen 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.

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. Für einige Flussgebiete liegen schon detaillierte Untersuchungen von historischen Hochwässern vor (z.B. Wiesbauer, 2007; Rohr, 2007). Für andere Gebiete können Berichte in Archiven und Chroniken ausgewertet werden. Auch Hochwassermarken und Photographien können herangezogen werden, um näherungsweise das Ausmaß der Überschwemmung. Obwohl viele Quellen über historische Hochwasserereignisse vielmals nur sehr ungenaue und unsichere Rückschlüsse auf historische Abflussmengen zulassen, können sie jedoch erheblich die Genauigkeit der Hochwasserschätzung verbessern.

Als Beispiel hierfür ist in Abbildung 4 die Auswertung historischer Hochwasserereignisse am Pegel Villach an der Drau dargestellt. Abbildung 4a zeigt die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve, angepasst mit der Maximum Likelihood Methode an beobachtete maximal jährliche Durchflussspitzen der Jahre 1951 bis 1981. Die 5% und 95% Konfidenzintervalle wurde mit der Bayesian Markov Chain Monte Carlo (MCMC) ermittelt (Reis & Stedinger, 2005). Durch die extremen Hochwasserereignisse in den Jahren 1965 und 1966 hat die angepasste GEV-Verteilung eine sehr hohe Schiefe. Abbildung 4b zeigt ebenfalls die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve unter der Annahme, dass neben der beobachteten Reihe von 1951 bis 1981, in den 120 Jahren davor vier historische Hochwässer auftraten, deren Abflusshöhe genau bestimmt werden kann (HW im Jahr 1851=2000m<sup>3</sup>/s, HW im Jahr 1882=1100m<sup>3</sup>/s, HW im Jahr 1903=1481m<sup>3</sup>/s und HW im Jahr 1946=1120m<sup>3</sup>/s). Abbildung 4c zeigt die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve unter der Annahme, dass neben der beobachteten Reihe von 1951 bis 1981, in den 120 Jahren davor vier historische Hochwässer auftraten, deren Abflusshöhe größer als ein gegebener Schwellenwert (1000m<sup>3</sup>/s) war. Es zeigt sich, dass durch die Einbeziehung historischer Hochwasserinformation die Form der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve deutlich verändert wird und auch die Konfidenzintervalle deutlich kleiner werden. Interessant ist, dass nur kleine Unterschiede in den geschätzten Hochwasserwahrscheinlichkeiten und den dazugehörigen Konfidenzintervalle zwischen dem Fall von genau bekannten historischen Abflusshöhen und dem Fall von historischen Abflusshöhen größer einem Schwellenwert, sind. Die genaue Kenntnis der Abflusshöhe historischer Ereignisse scheint ist weniger wichtig, als die Kenntnis der Anzahl von Ereignissen größer einem Schwellenwert für einen historischen Zeitraum (z.B. 120 Jahre). Eine genaue Ermittlung der Abflusshöhe historischer Ereignisse ist zwar aufgrund der vorhanden historischen Informationen und geänderten Flussprofilen oft nicht möglich, aber durch Analyse von historischen Überschwemmungsflächen, Hochwassermarken und Informationen über Staueffekte vor Brücken und Durchlässen können Schwellenwerte des Abflusses, den historische Ereignisse überschritten haben müssen, angegeben werden.



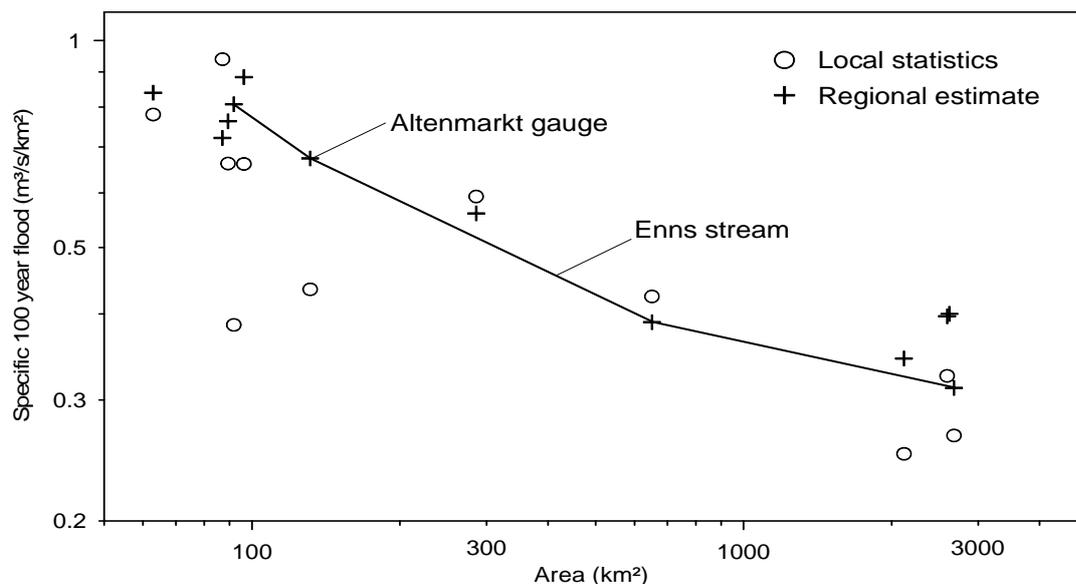
**Abb. 4** Einbeziehung historischer Hochwässer am Pegel Villach an der Drau (5266 km<sup>2</sup>). Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve und 5% und 95% Konfidenzintervalle a) unter Berücksichtigung der beobachteten Hochwasserreihe von 1951 bis 1981. b) unter Berücksichtigung der beobachteten Hochwasserreihe und vier historischen Ereignissen mit bekannter Abflusshöhe und c) unter Berücksichtigung der beobachteten Hochwasserreihe und vier historischen Ereignissen mit einer Abflusshöhe größer dem Schwellenwert 1000 m<sup>3</sup>/s.

### 3.2 Räumliche Zusatzinformationen

Zur räumlichen Informationserweiterung werden die Reihen der beobachteten Abflussscheitel in einem Gebiet mit denen in Nachbargebieten in Bezug gesetzt. Die Idee der räumlichen Informationserweiterung ist es, fehlende Information in der Zeit durch räumliche Information zu ersetzen. 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-jährigen 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, die Hochwasserwahrscheinlichkeiten zu bestimmen.

Als Methoden zur räumlichen Informationserweiterung eignen sich Regionalisierungsverfahren, die zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen in Gebieten ohne Abflussbeobachtungen entwickelt wurden, wie z.B. Mehrfachregressionen, Gruppierungsverfahren oder geostatistische Verfahren. Einen Überblick über Regionalisierungsverfahren statistischer Hochwasserkenngößen ist in Merz (2006) zu finden. Als einfache Methoden zur regionalen Betrachtung von Hochwasserabflüssen werden in diesem Beitrag regionale Spendendiagramme vorgestellt. Hierzu werden Pegelgebiete zu Regionen bzw. Gruppen zusammengefasst, in denen ein einheitliches Hochwasserverhalten angenommen wird. Für jede Region werden die Hochwasserkenngößen als Spenden (z.B. MHq, Hq<sub>100</sub>) gegen die Gebietsfläche graphisch aufgetragen. Ist das Hochwasserverhalten der Gebiete in dieser Region ähnlich, so nimmt die Hochwasserspende mit der Gebietsfläche in ähnlicher Weise ab. In Abbildung 5 ist das Spendendiagramm für das obere Ennstal dargestellt. Die Kreise zeigen die hundertjährige Abflussspende, ermittelt durch Anpassung einer GEV-Verteilung an die lokal beobachteten Daten. Zusätzlich wurden als Kreuze Ergebnisse

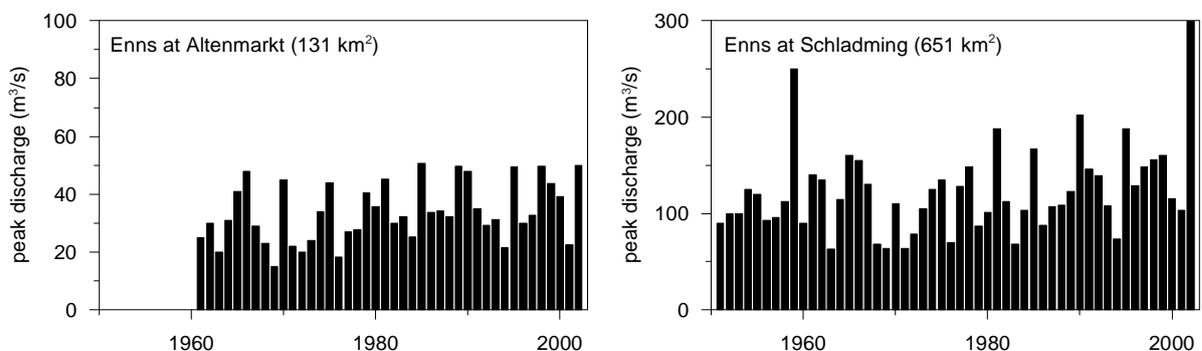
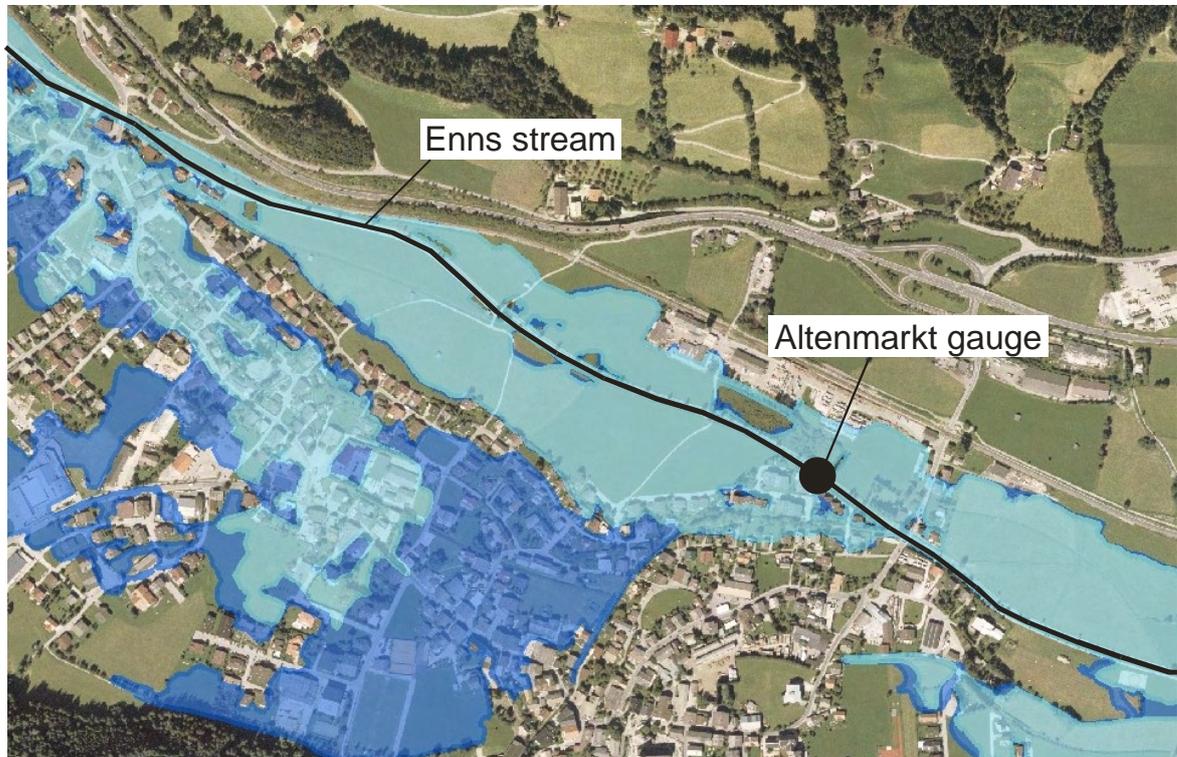
einer regionalen Schätzung der Hochwasserspense mit Hilfe des Top-Kriging Verfahren eingetragen. Das Top-Kriging Verfahren (Skoien et al., 2006) ist eine Erweiterung der geostatistischen Kriging-Methode und berücksichtigt die Topographie des Gewässernetzes und die Größe der Einzugsgebiete. Bei der Top-Kriging Schätzung wird mehr Gewicht auf Ober- und Unterliegergebiete ähnlicher Größenordnung gelegt, als auf nahe gelegene Gebiete an benachbarten Gewässern. Die regionale Schätzung (Kreuze) in Abb. 4 beruht nur auf Informationen aus Nachbargebieten, d.h. lokale beobachtete Abflüsse am Pegel wurden nicht für die Schätzung verwendet.



**Abb. 5:** Regionales Spendendiagramm der Oberen Enns. Hundertjährige Hochwasserspense aus der lokalen Hochwasserstatistik sind als Kreise dargestellt. Regionale Abschätzung sind als Kreuze dargestellt (Merz & Blöschl, 2008a).

Am Pegel Altenmarkt ist die lokal statistisch ermittelte Hochwasserspense deutlich kleiner als der regionale Schätzwert. Eine Analyse der Einzugsgebietseigenschaften wie z.B. Topographie oder Geologie zeigt keine deutlichen Unterschiede zu den anderen Gebieten in dieser Region. Erfahrungen des hydrographischen Dienstes zeigen jedoch, dass der Pegel regelmäßig bei Hochwasser umfließen wird und die Hochwasserreihe somit das Hochwasserverhalten nicht widerspiegelt. Deutlich ist die Ausuferung auch schon bei kleineren Jährlichkeiten in den Hochwasserrisikokarten des Projektes HORA ([hochwasserrisiko.at](http://hochwasserrisiko.at)) zu erkennen (Abb. 6). Auch andere Analysen untermauern diese Erkenntnis. Die Zeitreihe der Jahreshöchst durchflüsse des Pegels Altenmarkt hat im regionalen Vergleich eine eher kleine Differenz zwischen dem kleinsten und dem höchsten beobachteten Wert, wobei relativ viele Ereignisse nahe dem maximalen Abflusswert von ungefähr 50 m³/s beobachtet wurden. Dies deutet darauf hin, dass Abflüsse größer 50m³/s nicht vom Pegel erfasst werden. Deutlich wird dies im Vergleich mit Zeitreihen anderer Pegel am Gewässer (siehe z.B. Enns bei Schladming, Abb. 6). Die räumliche Informationserweiterung deutet in

diesem Beispiel auf deutlich höhere Hochwasserabflüsse hin. So sollte z.B. der aus der lokalen Statistik ermittelte hundertjährige Abfluss von  $58\text{m}^3/\text{s}$  auf  $86\text{m}^3/\text{s}$  erhöht werden.



**Abb. 6:** Hochwasserrisikoflächen (www.hochwasserrisiko.at) der Enns beim Pegel Altenmarkt  $313\text{km}^2$ ) (oben). Zeitreihe der maximal jährlichen Hochwasserabflüsse am Pegel Altenmarkt/Enns und am Pegel Schladming/Enns ( $651\text{km}^2$ ). Aufgrund von Überflutungseffekten werden am Pegel Altenmarkt Abflüsse größer  $50\text{m}^3/\text{s}$  nicht erfasst (Merz & Blöschl, 2008a).

### 3.3 Kausale Zusatzinformation

Eine kausale Informationserweiterung erhält man, in dem man die beobachteten Hochwasserabflüsse in Hinblick auf ihre Entstehungsprozesse analysiert. Die Kenntnis der Hochwasser bestimmenden Prozesse ist besonders dann von Vorteil, wenn weit über den Bereich des bisher Beobachteten interpoliert werden muss, da sich Abflussprozesse mit der Größe des Ereignisses stark ändern können (Gutknecht,

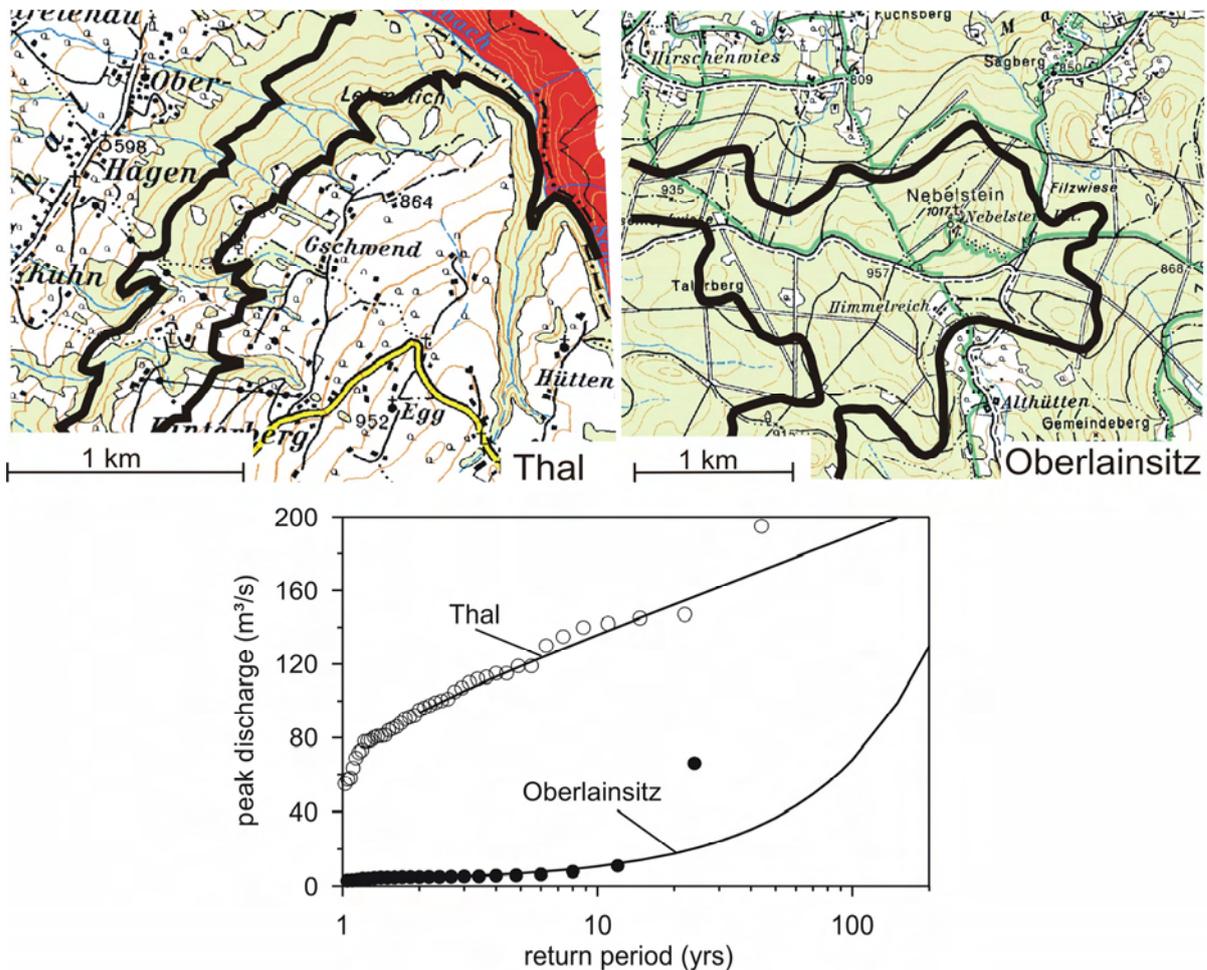
1994). Eine nahe liegende kausale Informationserweiterung ist die Verwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen (Siehe Kapitel 2).

Neben der Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen sind weitere Möglichkeiten der kausalen Informationserweiterung die Analyse der Hochwasser auslösenden Wetterlagen, saisonale Hochwasserstatistik (Schumann, 2005) und die Analyse der Hochwassergenese aus Beobachtungsdaten. Merz und Blöschl (2003) analysierten z.B. über 11000 Hochwasserereignisse in Österreich im Hinblick auf ihre Entstehungsmechanismen und klassifizierten sie in fünf Typen. Die statistischen Eigenschaften der Hochwasserkollektive, aufgegliedert nach den Prozessstypen zeigen deutliche Unterschiede. Treten in einem Gebiet häufig Hochwässer infolge von Gewittern auf, so haben diese Hochwasserkollektive tendenziell eine höhere Schiefe als Hochwasserkollektive aus Gebieten mit einem großen Anteil an Schneeschmelzhochwässern. Eine weitere hilfreiche Informationsquelle zur Extrapolation der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve ist die Analyse der Abflussbeiwerte von Hochwasserereignissen in Abhängigkeit von deren Jährlichkeit (Merz und Blöschl, 2008 a,b). Steigen die Abflussbeiwerte von Hochwasserereignissen mit deren Jährlichkeit stark an, so ist mit einer steilen Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve zu rechnen. Weisen in einem Gebiet auch schon kleine Hochwasserereignisse hohe Abflussbeiwerte auf, so ist mit einer flacheren Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve zu rechnen.

Eine wichtige kausale Zusatzinformation zur Verbesserung der Schätzung ist die lokale Gebietskenntnis. Dies kann einerseits durch Analyse von Abfluss relevanter Informationen wie Geologie, Boden, Landnutzung, Topographie, Klima und anthropogene Eingriffe erfolgen, die durch den Hydrologischen Atlas von Österreich (BMLFUW, 2007) flächendeckend für Österreich digital vorliegen. Diese Informationen können zwar in formale Regionalisierungsmethoden, wie z.B. Mehrfachregressionen, eingebunden werden. Jedoch ist das Zusammenspiel von Klima, Topographie, Geologie etc. bei der Entstehung von Hochwasserereignissen sehr komplex und oftmals nicht durch Mehrfachregressionen abbildbar (Blöschl und Merz, 2008a,b). Karten dieser hydrologisch relevanten Informationen sind jedoch eine wertvolle Hilfe bei der Experteneinschätzung des Hochwasserrisikos und bei der Einschätzung der Aussagekraft anderer Informationsquellen, wie z.B. Regionalisierungsergebnisse. Gerade bei kleinen Gebieten sind auch Experteneinschätzungen auf Basis von Gebietsbegehungen zu empfehlen. 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. Sind persönliche Gebietsbegehungen nicht möglich, ist es hilfreich, Personen mit lokaler Gebietskenntnis, wie z.B. in Österreich die Sachbearbeiter der hydrographischen Landesdienste, in die Bestimmung der Hochwasserkenngrößen einzubinden.

Ein Beispiel der Morphologie des Gebietes als Prozessindikator zeigt Abb. 7. Das linke Bild zeigt einen Ausschnitt einer topographischen Karte im Maßstab 1:50000 des Einzugsgebietes der Rotach im regenreichen Westen Österreichs, während im rechten

Bild ein Ausschnitt des Einzugsgebietes der Lainsitz im eher trockenen Norden Österreichs zu sehen ist. Zur deutlicheren Darstellung sind einige Höhenschichtenlinien schwarz herausgezeichnet. Die Höhenschichtenlinien zeigen, dass im Gebiet der Rotach die Gewässer tief eingeschnitten sind. Dies weist auf Erosionstätigkeit größerer Hochwässer hin. Im Gebiet der Lainsitz sind die Gewässer nicht eingeschnitten. Offensichtlich sind hier Hochwasserabflüsse und somit die Erosionskraft



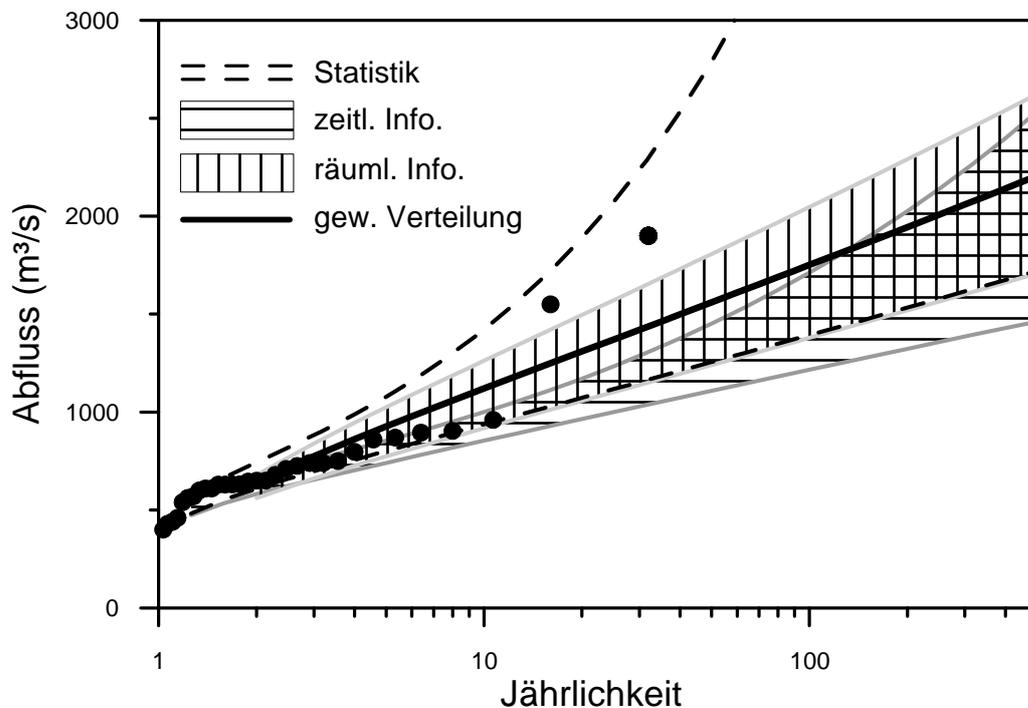
**Abb. 7:** Ausschnitte der topographischen Karte 1:50000 der Einzugsgebiete der Rotach (90km<sup>2</sup>) (links) und der Lainsitz (81km<sup>2</sup>) (rechts). Zur besseren Darstellung des Einschnittes der Gewässer im Relief wurden einige Höhenschichtenlinien schwarz herausgezeichnet. Unten: Beobachtete Hochwasserabflüsse der beiden Gebiete (Merz & Blöschl, 2008a).

deutlich geringer. Anhand des Einschnittes des Gewässers sind also für das Gebiet der Rotach deutlich höhere Hochwasserabflüsse zu erwarten. Diese Einschätzung wird durch beobachtete Abflussdaten bestätigt. In Abbildung 7 unten sind die beobachteten Hochwasserabflüsse der Rotach bei Thal (90km<sup>2</sup>) und der Lainsitz bei Oberlainsitz (81km<sup>2</sup>) eingezeichnet. Die Hochwasserabflüsse der Rotach sind bei etwa gleicher Gebietsfläche deutlich höher. Ebenso ist die Form der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve bei beiden Gebieten sehr unterschiedlich. Die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve der Rotach hat den Charakter eines feuchten Gebietes mit

regelmäßigen größeren Hochwasserabflüssen, d.h. der mittlere jährliche Hochwasserabfluss liegt relativ hoch und die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve verläuft annähernd gerade in einer semi-logarithmischen Darstellung. Die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve der Lainsitz hingegen, hat den Charakter eines trockenen Gebietes. Die meisten Hochwässer sind eher klein, größere Hochwässer sind selten. Die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve steigt daher stark an.

### 3.4 Kombination von Statistik und Zusatzinformationen

Die Kombination von Statistik und Zusatzinformation zur Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten wird hier am Beispiel des Pegels Villach an der Drau kurz dargestellt. In Abbildung 8 sind die Ergebnisbereiche der lokalen Statistik und der zeitlichen und räumlichen Informationserweiterung dargestellt. Der Ergebnisbereich der statistischen Schätzung umfasst die 5% und 95% Konfidenzintervalle um eine an die Reihe 1951 bis 1981 angepasste GEV-Verteilung. Der Ergebnisbereich der zeitlichen Informationserweiterung umfasst die Konfidenzintervalle einer Schätzung unter Berücksichtigung von historischen Hochwässern. In diesem Beispiel wurde der in Kapitel 3.1 beschriebene Fall c von historischen Hochwasserereignissen über einem Schwellenwert zur Bestimmung der Hochwasserwahrscheinlichkeiten verwendet. Als Regionalisierungsverfahren zur räumlichen Informationserweiterung wurde in diesem Fall das Top-Kriging Verfahren (Skøien et al., 2006) gewählt. Der Ergebnisbereich der räumlichen Informationserweiterung umfasst die Top-Kriging Schätzung (ohne Verwendung der lokalen Daten) und die zugehörigen Kriging-Unsicherheiten.



**Abb. 8:** Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve für den Pegel Villach/Drau ( $5266\text{km}^2$ ) Aufgrund der zwei extremen Hochwasserereignisse 1965 und 1966 in Villach hat die aus der lokalen Statistik ermittelte Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve eine große

Steigung. Vergleiche mit längeren Reihen in der Region, in denen einzelne Extremereignisse, wie 1965 und 1966 weniger Einfluss auf die Schiefe haben, zeigen, dass die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve flacher gewählt werden sollte. Da auch viele kurze Hochwasserreihen der Nachbarpegel, aufgrund der extremen Ereignisse 1965 und 1966, eher große Schiefe aufweisen, ist auch die regional ermittelte Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve relativ steil. Auch Analysen der Abflussbeiwerte von Hochwassereignissen in der Region, als kausale Zusatzinformation, deuten auf eine eher flachere Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve hin. Daher wurde für die Bemessung eine Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve gewählt, die in der Schnittmenge des Ergebnisbereiches der Statistik, der zeitlichen und räumlichen Informationserweiterung liegt und um Vergleich zur Statistik flacher geneigt ist.

#### **4. Schlussfolgerungen**

Aus dem vorliegenden Beitrag lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- 1) NA-Modellparametern sollten, wenn möglich, an beobachteten Abflussdaten geeicht werden. Falls dies nicht möglich ist, sollten Abflussdaten aus Gebieten am gleichen Gewässer bzw. aus hydrologisch ähnlichen Nachbargebieten zur Ermittlung von Modellparameter herangezogen werden. Nur als letzte Möglichkeit empfiehlt es sich die Modellparameter aus digital verfügbaren Gebietseigenschaften, wie z.B. Bodetyp und Landnutzung zu ermitteln, da diese Parameter oft mit sehr großen Unsicherheiten verbunden sind. In kleinen Gebieten können Feldbegehungen und Analysen der Gewässermorphologie und Vegetation wertvolle Hinweise auf sinnvolle Bereiche geben, in denen die Modellparameter gewählt werden sollten.
- 2) Die Jährlichkeit des durch NA-Modelle bestimmten Abflusses kann sich deutlich von der Jährlichkeit des Bemessungsniederschlags unterscheiden, besonders wenn die Modellparameter (wie z.B. Abflussbeiwert) maximiert werden. Statistisch-deterministische Simulationsmethoden können helfen, den Einfluss verschiedener Faktoren auf den Unterschied der Jährlichkeit zwischen Bemessungsniederschlag und Abfluss zu klären. Erste Auswertungen deuten darauf hin, dass gerade unter trockenen Klimabedingungen mit eher kleinen Abflussbeiwerten, die Wahl des Abflussbeiwertes einen entscheidenden Einfluss auf das Verhältnis der Jährlichkeiten von Bemessungsniederschlag und Abfluss hat.
- 3) Die Annahmen, auf die die statistische Ermittlung von Bemessungsabflüssen beruht, sind in der Praxis oft nicht gegeben. Es ist daher sinnvoll und notwendig neben der rein statistischen Auswertungen des Hochwasserkollektives auch zeitliche, räumliche und kausale Zusatzinformation mit in die Berechnung einzubringen und den Hochwasserabfluss aus einer Kombination durch Zusammenschau von Statistik und Zusatzinformation zu berechnen. Hierbei ist es wichtig möglichst unterschiedliche Methoden und Daten zu berücksichtigen, um so möglichst ein breites Spektrum von Hochwasser relevanten Faktoren zu berücksichtigen. Dies erfordert zwar einen großen Arbeitsaufwand, der nicht so sehr in der Anwendung verschiedener statistischer Verfahren liegt, sondern in einer hydrologischen Analyse, Interpretation und Argumentation. Vorwissen über die Eigenschaften hydrologischer Prozesse im Gebiet

ist dafür Voraussetzung. Der Einsatz wird aber als notwendig erachtet, um die vielfältigen Aspekte der Hochwasserentstehung zu berücksichtigen und die Bestimmung der Hochwasserwahrscheinlichkeiten auf eine zuverlässige Basis zu stellen.

## 5. Danksagung

Der Autor bedankt sich recht herzlich bei Dr. Alberto Viglione für die Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten am Pegel Villach.

## 6. Literatur

Aulitzky, H. (1992) Die Sprache der "Stummen Zeugen" In: Internationales Symposium Interpraevent 1992 Bern. Schutz des Lebensraumes vor Hochwasser Muren und Lawinen. Tagungspublikation, Band 6. Klagenfurt, Forschungsgesellschaft für vorbeugende Hochwasserbekämpfung, S. 139-174.

Blöschl, G. & R. Merz (2002) Methoden der hydrologischen Regionalisierung im Zusammenhang mit der Niederschlag-Abflussmodellierung. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 164. Niederschlag-Abfluss Modellierung - Simulation und Prognose, Institut für Hydraulik, TU Wien, S. 149-178.

Blöschl, G. (2005) 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. (2007) Einsatz von Simulationsmethoden bei der Bestimmung extremer Abflüsse. In: Extreme Abflussereignisse (Hrsg. D. Gutknecht). Wiener Mitteilungen 206, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien, S. 227-246.

BMLFUW (2007) Hydrologischer Atlas Österreich (HAÖ), 3. Lieferung. Österreichischer Kunst und Kulturverlag und Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

DVWK (1984) Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil II: Synthese, *DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft 113*, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), Bonn.

Dyck, S. (1980) Angewandte Hydrologie, Teil 1. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, München, 528

Ecker, R., Kalliany, R. & Steinnocher K. (1995) Fernerkundungsdaten für die Planung eines Mobilfunknetzes. *Österr. Zeitschr. f. Vermessung und Geoinformation*, **83**, 14-25.

Godina, R. (1998) Berechnung des Bemessungshochwassers. Kursunterlagen. ÖWAV-TU Wien –Kurs: „Berechnung des Bemessungshochwassers“. Techn. Universität Wien.

Grünwald, U. (2007) Zur Einbeziehung historischer hydrologischer Extremereignisse–Erfahrungen aus dem Elbegebiet. In: Extreme Abflussereignisse (Hrsg. D. Gutknecht). Wiener Mitteilungen 206, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien, S. 7-16.

- Gutknecht, D. (1994) Extremhochwässer in kleinen Einzugsgebieten, *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft*, **46(3-4)**, 50-57.
- Gutknecht, D. (2007) Bestimmungsmethoden – Überblick. In: Extreme Abflussereignisse (Hrsg. D. Gutknecht). Wiener Mitteilungen 206, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien, S. 155-180.
- Gutknecht, D., Blöschl, G., Reszler, Ch. & Heindl, H. (2006) Eine „Mehr-Standardbeine“-Ansatz zur Ermittlung von Bemessungshochwässern kleiner Auftretenswahrscheinlichkeit, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, **58(3-4)**,
- Markart G., Kohl B., Sotier B., Schauer T., Bunza G. & Stern R. (2004) Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen, BFW Report 3: Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien, 83 pp.
- Merz R. & Blöschl, G. (2003) A process typology of regional floods. *Water Resources Research*, **39(12)** 1340, doi:10.1029/2002WR001952
- Merz, R. & Blöschl, G. (2008a) Flood Frequency Hydrology 1: Temporal, spatial and causal expansion of information, *Water Resources Research*, **44**, W08432, doi:10.1029/2007WR006744.
- Merz, R. & Blöschl, G. (2008b) Flood Frequency Hydrology 2: Combining data evidence, *Water Resources Research*, **44**, W08433, doi:10.1029/2007WR006745.
- Merz, R. (2006) Regionalisierung von statistischen Hochwasserkenngrößen. 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. (2002) Marktüberblick und Beispiele – Software für die NA-Modellierung. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 164. Niederschlag-Abfluss Modellierung - Simulation und Prognose, Institut für Hydraulik, TU Wien, S. 223-242.
- Merz, R. & Blöschl, G. (2008c) Informationserweiterung zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, **52(6)**, 300-309.
- Merz, R. & G. Blöschl (2009), A regional analysis of event runoff coefficients with respect to climate and catchment characteristics in Austria, *Water Resour. Res.*, **45**, W01405, doi:10.1029/2008WR007163.
- Merz, R., Blöschl, G. & Parajka, J., (2005) Raum-zeitliche Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Heft **50(1)**, S. 2-11.
- Nemmert, J. (2007) Beitrag zur Bestimmung des Bemessungshochwassers von Talsperren mittels stochastischer Langzeitsimulationen, Bau-Ingenieurwesen, Univ. Innsbruck, Dissertation.
- ÖBG (2001) Bodenaufnahmesysteme in Österreich. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft, Heft 62.

- Reis, Jr. & Stedinger, J.R. (2005) Bayesian mcmc flood frequency analysis with historical information. *Journal of Hydrology.*, **313(1-2)**, 97-116.
- Rohr, Ch. (2007) Historische Hochwasserforschung: Die Überschwemmungen an der Traun im 15. und 16. Jahrhundert, Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 206. Extreme Abflussereignisse: Dokumentation – Bedeutung – Bestimmungsmethoden, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien, S. 29-42.
- Schumann, A.H. (2005) Hochwasserstatistische Bewertung des Augusthochwassers 2002 im Einzugsgebiet der Mulde unter Anwendung der saisonalen Statistik, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, **49(4)**, 200- 206
- Skøien, J., Merz, R. & Blöschl, G. (2006) Top-kriging – geostatistics on stream networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, **10**, 277-287.
- Viglione, A., Merz, R. and Blöschl, G. (2009) On the role of the runoff coefficient in the mapping of rainfall to flood return periods, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **13**, 577-593.
- Weilguni, V. (2009) „Bemessungsniederschläge in Österreich“ Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 216. Hochwässer – Bemessung, Risikoanalyse und Vorhersage, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien, S. 71-85.
- Wiesbauer, H. (2007) Historische Überflutungen am Kamp, Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 206. Extreme Abflussereignisse: Dokumentation – Bedeutung - Bestimmungsmethoden, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien, S. 43-58.

**Anschrift des Verfassers:**

**Dr. Ralf Merz**

Technische Universität Wien

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie

Karlsplatz 13/222-2

A-1040 Wien

Tel.:+43-1-58801-22312

Fax:+43-1-58801-22399

Email: merz@hydro.tuwien.ac.at

## BEMESSUNGSHOCHWÄSSER IN DER SLOWAKEI

Jan Szolgay, S. Kohnová

### 1. Einleitung

In den letzten fünf Jahrzehnten wurden in der Slowakei Bemessungshochwässer fast ausschließlich durch die Mitarbeiter des hydrometeorologischen Dienstes bestimmt. Dies war bedingt durch die Bestimmungen der Planwirtschaft und die Vorschriften der technischen Standardisierung, die vorgeschrieben haben, dass die Qualität und die Gültigkeit der hydrologischen Daten und Bemessungswerte für Projektierung von Wasserbauten und wasserbaulichen Maßnahmen durch das Slowakische (früher Tschechoslowakische) Hydrometeorologische Institut begutachtet werden mussten. Die Praxis hat diesen Vorgang akzeptiert, das praktische Know How hat sich so hauptsächlich auf den Kreis der Spezialisten des hydrometeorologischen Dienstes konzentriert. Ein Teil der Entwicklung wurde im Hause selbst durchgeführt und die Grundlagenforschung wurde teilweise ausgelagert in die zuständigen Institutionen (Institut für Wasserwirtschaft in Bratislava, Fakultät für Bauwesen der Slowakischen Technischen Universität, Institut für Hydrologie der Slowakischen Akademie der Wissenschaften).

Bemessungswerte aus gemessenen HQ Werten (ermittelt aus den Reihen der Jahresmaxima) wurden durch die üblichen statistischen Methoden geschätzt (Lognormal und Pearson III Verteilung, Parameterschätzung durch Momente). Zur Ermittlung von Bemessungshochwässern in unbeobachteten Einzugsgebieten haben sich in der Praxis einige einfache Ansätze aus den Vor- und Nachkriegsjahren und den frühen Sechzigern durchgesetzt (wie z.B. die Rational Formula und Ihre Varianten, Abflusspenden Hüllkurven usw.).

Die Forschung konzentrierte sich auf die Fragen der Wahl der Verteilungsfunktionen, die statistischen Eigenschaften der einzelnen Methoden der Parameterschätzung und der Korrekturen von den Abweichungen. Mathematische Abflussmodelle, bzw. andere nicht auf statistischen Grundlagen beruhende Verfahren, wie z. B. das PMF Verfahren, haben sich in der Theorie und in der Praxis nicht durchgesetzt. Diese Tendenz wurde auch durch die Bestimmungen der technischen Normalisierung in der Projektierung unterstützt und bestimmt. Als Projektunterlagen waren nämlich ausschließlich statistisch charakterisierte Bemessungswerte benutzt worden (Bemessungsdurchflüsse und Niederschläge mit einer gegebenen Jährlichkeit).

In der Gegenwart nehmen die technischen Normen mehr die Stellung von Empfehlungen und methodischen Anleitungen ein und die Monopolstellung des hydrometeorologischen Dienstes bei der Bestimmung der Bemessungswerte ist gesetzlich nicht mehr gesichert. Im Prinzip können dadurch die konsultierenden Bauingenieure selbst Einfluss auf die Methoden der Bestimmung der Bemessungswerte nehmen. Allerdings gibt es bisher dazu nicht viele Erfahrungen in der Slowakei. Das Slowakische Hydrometeorologische Institut, das Institut für Landschafts-

wasserbau und Wasserwirtschaft der Slowakischen Technischen Universität, die Institute für Hydrologie und Geografie der Slowakischen Akademie der Wissenschaften haben deswegen eine Reihe von Forschungsprojekten begonnen, die sich die folgenden Problemstellungen als Ziel gesetzt haben.

Die erste Gruppe der Arbeiten konzentrierte sich auf kurzfristig lösbare Probleme:

- Inventur und Revision aller Daten der Maximaldurchflüsse in der Slowakei, (z.B.: Kohnová und Szolgay, 1995, 1996a; Szolgay und Kohnová, 1998, 1999; Podolinská et al., 2005, 2008 Šipikalová, 1978).
- Ermittlung von lokalen Hochwasserwahrscheinlichkeiten durch neue statistische Verfahren und Vergleich der dabei entstandenen Unsicherheiten (z.B.: Szolgay und Kohnová, 1997, 2003; Pekárová et al., 2006; Podolinská et al., 2005, 2006; Podolinská und Šipikalová, 2008).
- Ermittlung von lokalen Extremniederschlagswahrscheinlichkeiten durch neue statistische Verfahren und Vergleich der dabei entstandenen Unsicherheiten (z.B.: Hasbach et al., 2002; Kohnová et al., 2004, 2005a,b, 2006a,b,c; Gaál et al., 2007, 2008a,b).
- Verifizierung der meistbenutzten empirischen Hochwasserformeln und die Ausarbeitung von neuen Richtlinien und Empfehlungen für ihre Anwendung (z.B.: Kohnová und Szolgay, 1995, 1996a,b; Szolgay und Kohnová, 2001a,b; Szolgay, 2007).
- Ausarbeitung von auf neuen Kennwerten basierenden empirischen regionalen Formeln (z.B.: Matúšová et al., 2007; Kohnová und Szolgay, 1996b, 1999; Kohnová et al., 2005d; Kriegerová, Kohnová, 2005).

Die zweite Gruppe der Projekte ist auf langfristig zu lösende Probleme gerichtet, mit denen nur wenig oder keine Erfahrungen in der Praxis in der Slowakei vorhanden waren:

- Anwendung neuer Regionalisierungsmethoden, die auf dem Konzept von nicht zusammenhängenden homogenen Regionen beruhen (z.B.: Gaál und Kyselý, 2007; Gaál et al., 2007; Gaál et al., 2008a, b; Kohnová et al., 2000a, 2005c, 2006e; Kohnová und Szolgay, 2000, 2002; Solín, 2002).
- Anwendung von einfacher Skalierung bei der Bestimmung des Bemessungsniederschlags (z.B.: Bara et al., 2008; Gaál, et al., 2008c).
- Anwendung der Prinzipien der Bayesschen Statistik bei der Einbeziehung von historischen Hochwässern in die Bestimmung der Bemessungswerte (z.B.: Gaál et al., 2009, Szolgay et al., 2008).
- Anwendung von Niederschlag- Abflussmodellen für die Bestimmung von Bemessungswerten (z.B.: Hlavčová et al., 2005; Zvolenský et al., 2007a,b; Kohnová et al., 2006d,e, 2007).

- Anwendung auf GIS basierenden Interpolationsverfahren für die Kartierung der Starkniederschläge (z.B.: Kohnová et al., 2006c, 2008a; Parajka et al., 2004; Szolgay et al., 2007b; 2009).
- Prüfung der Möglichkeit der Bestimmung von extremen Bemessungswerten durch Verfahren wie GRADEX, Probable Maximum Flood (Szolgay und Kohnová, 2001a,b).
- Prüfung der Möglichkeit der Bestimmung von mehrdimensionalen Bemessungswerten durch Mehrdimensionale Verteilungsfunktionen (z.B.: Matúš, 2007; Matúš und Bacigál, 2007; Zelisková und Matúš, 2007; Szolgay et al., 2008).

Das Hauptziel der Arbeiten ist es, nach dem Vorbild der DVWK Regelwerke (1999) und des Flood Estimation Handbook (FEH, 1999), methodische Grundlagen für die konsultierenden Ingenieure zu schaffen.

Im Folgenden werden einige Resultate der Untersuchungen kurz beschrieben und diskutiert und auch die Möglichkeiten der Einführung von ganz neuen Ansätzen besprochen.

## 2. Ältere Ansätze

Am Anfang des vorigen Jahrhunderts benützte man in der Praxis Hochwasserformeln aus den Nachbarländern, wie die von Iszkowski, oder Lauterburg. Später haben mehrere Autoren neue empirische Formeln und Ansätze entwickelt. In der Slowakei teilt man diese grundsätzlich in drei Gruppen:

1. Die sogenannten volumetrischen Formeln, wie die von Čerkašin (1964) und Hrádek (1989), Dzubák (1992), die den Bemessungswert durch die geometrische Schematisierung der Abflussganglinie (meistens durch ein Dreieck) berechnen. Das Volumen des Abflusses wird durch einen Abflussbeiwert aus dem Volumen des abflussgenerierenden Bemessungsniederschlags bestimmt. Es wird angenommen, dass die Dauer dieses der Konzentrationszeit des Einzugsgebietes gleicht und seine Intensität wird aus IDF Kurven entnommen.

2. Die aus der Rational Formula stammenden sogenannten Intensitätsformeln von Heisig (1953), Hlubocký (1977) und Bartošek (Urcikán, 1986) die den Bemessungswert durch einen Abflußbeiwert aus der Intenstität des Bemessungsstarkregens berechnen. Deren Dauer wird durch die Konzentrationszeit des Einzugsgebietes bestimmt. Die Intensität dessen wird aus IDF Kurven, bzw. Formeln entnommen.

3. Die regionalen Beziehungen von Dub (1940, 1957), Halasi-Kun (1968) und Sochorec (1966), die den Bemessungsdurchfluss aus regionalisierten Abflusspende-Einzugsgebietsfläche Beziehungen errechnen. Diese Formeln können auch verschiedene Korrekturbeiwerte enthalten.

Einen Überblick über die Geschichte der Entstehung der älteren Methoden beschreibt Halasi-Kun (1968). Nicht alle finden heute in der Praxis Anwendung, manche aber,

wie die Formeln von Dub, Bartošek und Čerkašin werden noch heute, z.B. beim Entwurf von Entwässerungskanälen für den Straßenbau, bei der Dimensionierung von kleinen Rückhaltebecken und Erosionsschutzmassnahmen und in der Stadtentwässerung, benutzt.

Bei praktizierenden Ingenieuren war und ist die Dub Formel sehr beliebt, da sie wenige, aus Erfahrung zu schätzende. Beiwerte enthält. Dagegen muss man bei den volumetrischen Methoden und den auf der Rational Formula basierenden Verfahren viele (zwar physikalisch interpretierbare) morphologische, hydraulische und Bodenkennwerte schätzen. Diese lassen, auch bei der Verwendung von GIS Daten, großen Raum für Subjektivität zu die letztlich Unsicherheit der Schätzung erhöhen. Ihre Anwendung beschränkt sich daher meistens auf sehr kleine Einzugsgebiete.

Die bekanntesten und in der Ingenieurhydrologischen Praxis meist verwendeten regionalen Formeln zur Berechnung der Hochwasserabflusspenden mit einer gegebenen Jährlichkeit in kleinen und mittleren Einzugsgebieten der Slowakei basieren so auf der Formel von Dub (1940, 1957):

$$q_{\max,N} = \frac{A}{(F+1)^n} \cdot \left( 1 + \sum_1^4 O_i \right) \quad (1)$$

wo:

- $q_{\max,N}$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ ] die maximale Abflusspende mit der Jährlichkeit  $N$  Jahren ist, wobei Dub  $N$  als 100 Jahre angenommen hat,
- $F$  ist die Fläche des Einzugsgebietes [ $\text{km}^2$ ],
- $O_i$  sind Korrekturbeiwerte, die bei Dub das Verhältnis der Bewaldung, der Form des Einzugsgebietes, und der Höhe der Jahresniederschläge des untersuchten Einzugsgebietes zu den entsprechenden Referenzwerten in der Region betreffen,
- $A, n$  - sind die regionalen Parameter.

Bei der Gestaltung der Formel hat der Autor einen Bewaldungsanteil von 50% des Einzugsgebietes als Referenzwert angenommen. Die Korrekturen der Abweichung von der Referenzbewaldung 50 % rechnet man laut der Formel als:

$$\pm O_{1,2} = 0,5 \cdot \left( 0,5 - \frac{F_L}{F} \right). \quad (2)$$

mit

- $O_1$ - die relative Erhöhung von  $q_{\max,N}$  im Einzugsgebiet mit einen Bewaldungsanteil  $< 50\%$
- $O_2$  - die relative Verminderung von  $q_{\max,N}$  im Einzugsgebiet mit einen Bewaldungsanteil  $> 50\%$

- $FL$ - die Fläche der Wälder im Einzugsgebiet
- $F$  - die Fläche des Einzugsgebietes.

Die Korrekturbeiwerte die die Form des Einzugsgebietes betreffen, beschreiben die Abweichung der Form des Einzugsgebietes von der Referenzform 1: 2,5.

Die Parameter  $A$ ,  $n$  wurden für als hydrologisch homogen geltende und räumlich zusammenhängende Regionen der Slowakei angegeben. Die Einteilung der Slowakei in diese Gebiete und ihre Anzahl haben Dub selbst und auch andere Autoren mehrmals geändert (z.B. sind es in der heute benutzten Form in der Slowakischen Technischer Norm des Ministeriums für Umwelt 60 homogene Gebiete; OTN ŽP, 2003). Eine kartographische Darstellung der Regionen wurde meistens vermieden, diese wurden immer nur schriftlich angegeben, um damit auch einen gewissen Spielraum zu lassen, mit dem untypische örtliche Gegebenheiten der Abflussbildung berücksichtigen werden können. Auch die erfolgreiche Anwendung dieser Formel unterliegt so der Erfahrung des Verwenders. Es war deshalb mehrmals notwendig den gegenwärtigen Stellenwert der, wegen seiner Einfachheit oft angewendeten Formel, zu überprüfen.

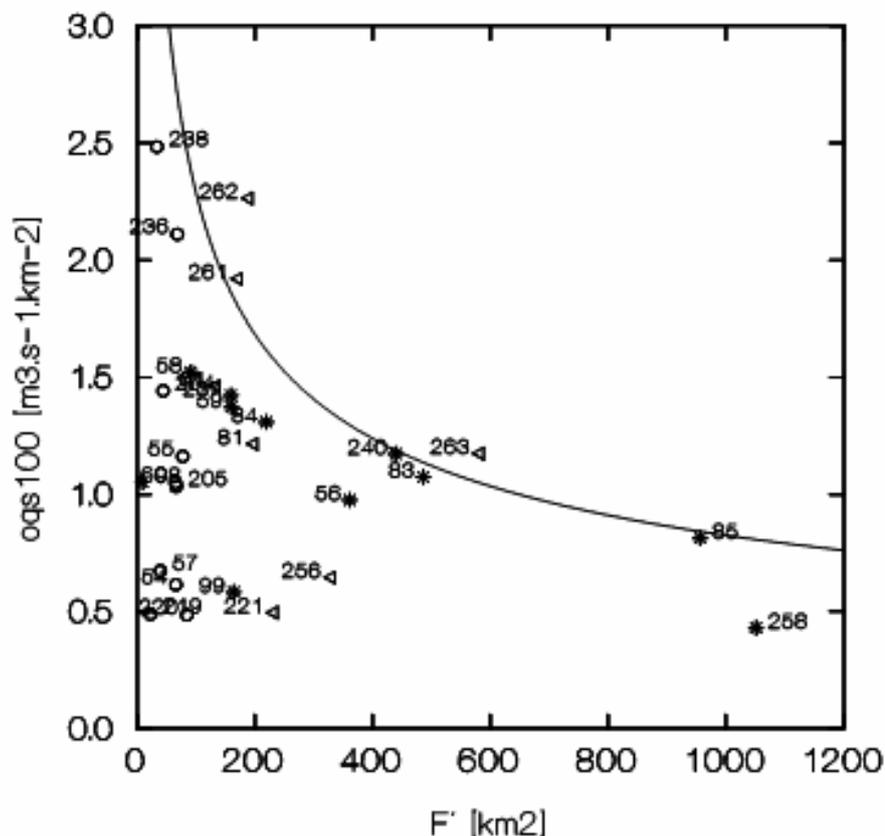
Für die Überprüfung des Stellenwertes der Regionalisierungen von Dub und Halasi-Kun und die Beurteilung weiterer Möglichkeiten der Regionalisierung von maximalen Abflusspenden in der Slowakei wurden in Zusammenarbeit mit dem Slowakischen Hydrometeorologischen Institut mehrmals unternommen. Dazu wurde ein Datensatz von Scheitelabflüssen der jährlichen und saisonalen Maximalwerte aus Regen und Schneeschmelze stammenden Hochwasser aus 267 Pegelstellen in Einzugsgebieten der Slowakei mit der Einzugsgebietsfläche von 5 bis 250 km<sup>2</sup> zusammengestellt und periodisch erweitert. Die Mindestdauer der Durchflussreihen wurde als 15 Jahre gewählt. Die Homogenität der Durchflussdatenreihen und die Zuverlässigkeit des Datenmaterials wurden im Slowakischen Hydrometeorologischen Institut bis hinein in die Konsumtionskurven geprüft. Insgesamt hatten 38 Pegelstellen eine Einzugsgebietsfläche von 5 bis 15 km<sup>2</sup>, 34 Pegelstellen von 15 bis 30 km<sup>2</sup>, 52 Pegelstellen von 30 bis 50 km<sup>2</sup>, 59 Pegelstellen von 50 bis 100 km<sup>2</sup>, 43 Pegelstellen von 100 bis 200 km<sup>2</sup> und 41 Pegelstellen die Fläche größer als 200 km<sup>2</sup>. 28% der Pegelstellen besaßen Datenreihen die kürzer als 21 Jahre waren.

Kohnová und Szolgay (1995, 1996a) und Szolgay und Kohnová (1998, 1999), überprüften vorerst mit Hilfe dieses Datenmaterials die älteren Regionalisierungen. Die  $HQ_{20}$  bis  $HQ_{100}$  Werte wurden mittels der Lognormal Verteilung mit zwei Parametern bestimmt, wobei diese durch die Momentenmethode geschätzt wurden. Diese einheitliche Wahl folgte den uns bekannten traditionellen Formeln zur Hochwasserberechnung. Die Akzeptanz der Wahl der Verteilung wurde mit dem Kolmogorov-Smirnov Test geprüft, keine Resultate wurden abgewiesen.

Der Vergleich zeigte, dass in allen Regionen die in den historischen Formeln angegeben Werte eine Hüllkurve des neuen Datensatzes darstellen. Dies war allgemein nicht bekannt und wurde auch in den original Publikationen nicht angegeben. Abb. 1 zeigt ein typisches Beispiel der Abhängigkeit der hundertjährigen maximalen Abflusspenden von der Einzugsgebietsfläche im Flyschgebiet, das den Außenrand der

Karpaten mit dem Einzugsgebieten der Flüsse Orava, Kysuca, Laborec, Torysa, Ondava und Uh, umfasst.

Die beurteilten alten Regionalisierungen bestimmen so aus heutiger Sicht nicht die mittleren hundertjährigen maximalen Abflusspenden der Slowakischen Flüsse, wie allgemein angenommen wurde, sondern ihre Maximalwerte, was natürlich Folgen hatte für die Praxis der Bemessungen. Es wurde nämlich auch darauf geachtet, dass eine gewisse räumliche und temporale Kontinuität und Konsistenz der zentral bestimmten Bemessungswerte besteht. Da schon bei der Erstellung der ersten Wasserwirtschaftspläne in den frühen Fünfzigern das Hüllkurvenverfahren implizit verwendet wurde (ohne darauf explizit hinzuweisen) wurde so das Prinzip der Regionalen Sicherheit in die Bemessung eingeführt, weiterverwendet bzw. verfeinert aber nicht verlassen. Das Hauptproblem dieses Verfahrens ist die (von Fall zu Fall) unterschiedliche Überbewertung der statistisch ermittelten Bemessungswerte.



**Abb. 1:** Typischer Beispiel der Abhängigkeit der hundertjährigen maximalen Abflusspenden von der Einzugsgebietsfläche im Flyschgebiet des Außenrandes der Karpaten in dem Einzugsgebieten der Flüsse Orava, Kysuca, Laborec, Torysa, Ondava und Uh. Die unterschiedliche Länge der zu Grunde legenden Beobachtungen ist graphisch folgend zu unterscheiden: o - für Beobachtungen zwischen 1971 - 1992, Δ - für Beobachtungen zwischen 1960 - 1992 und \* - für Beobachtungen die vor dem Jahre 1960 begonnen haben.

Die durchschnittliche Überbewertung von maximalen hundertjährigen Abflussspenden durch die Formel von Dub wurde als 212 % ermittelt. Die Verteilung der relativen Abweichungen ist unsymmetrisch über den Nullwert. Zu den größten Überbewertungen kommt es in kleinen Einzugsgebieten (in denen die Formel am meisten angewendet wird), was aus heutiger Sicht als nicht vertretbar erscheint.

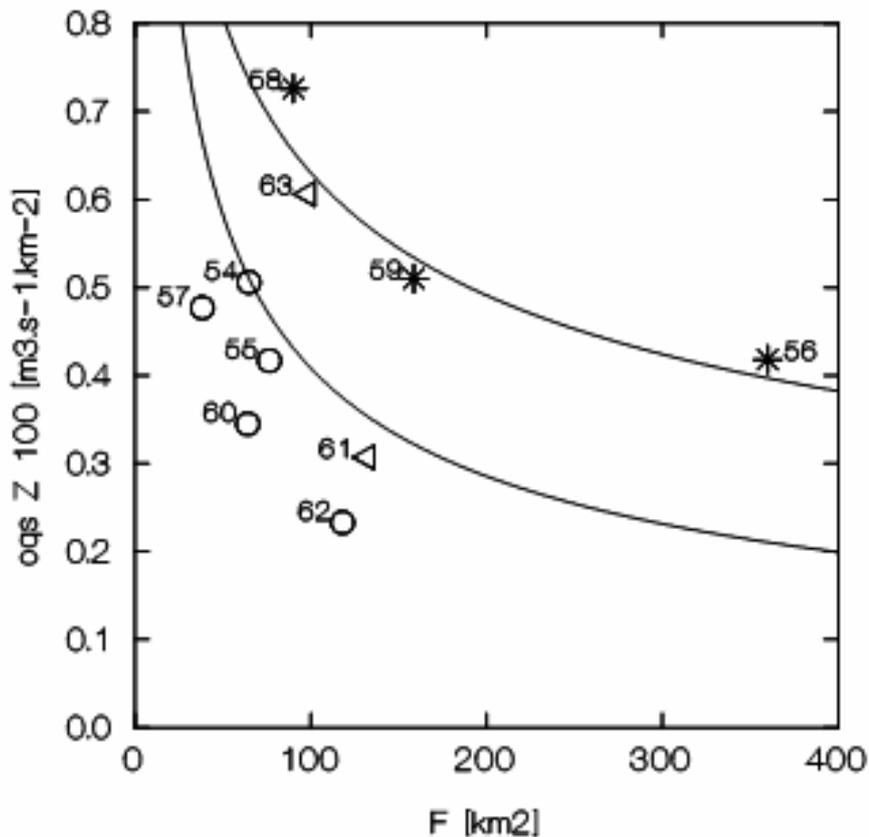
Auch die in der Formel benutzten Korrekturbeiwerte wurden untersucht, da ihre weitere Anwendung in Hinsicht auf den Hüllkurvencharakter der Formel problematisch erschien. Die Gesamtkorrektur für ca. 58% der untersuchten Pegelstellen lag zwischen  $\pm 10\%$ . Das stellt eine relativ kleine Abweichung von den berechneten Wert dar, denn andere Unsicherheiten könnten wesentlich höheren Einfluss auf den Bemessungswert haben (Fehler der Ermittlung der Einzugsgebietsfläche, falsche Einordnung in eine Region). Für die weitere Verwendung der Korrekturen sieht man deswegen heute keinen Grund mehr.

Im weiteren schien es sinnvoll das vorhandene Datenmaterial und die Erfahrung mit dem Verfahren durch einen vernünftigen Aufwand zu dessen Weiterentwicklung zu nutzen. Dabei wurden folgende Möglichkeiten der Einschränkung der regional und lokal stark unterschiedlichen Überbewertung geprüft:

- Verminderung der Inhomogenität der, der Formel zu Grunde liegenden, Daten durch die gesonderte Analyse von Hochwässern aus Regen und Schneeschmelze,
- Bei der Wahl der Regionen neue, z.B. klimatisch, morphologisch und hydrogeologisch begründete Regionalisierungsprinzipien zu testen (bei der Beibehaltung der durch die Praxis akzeptierten Struktur der Formel).
- Einbeziehung von anderen Gebietskennwerten in die Analyse durch Mehrfachregression.

Bei der Analyse der Saisonalität der Jahresmaxima hat sich nämlich gezeigt, dass bedingt durch die Vielfalt der klimatischen und hydrologischen Verhältnisse bei der Entstehung von Hochwasserereignissen in der Slowakei, in den Daten aus Regen und Schneeschmelze kommende Ereignisse gemischt vorkommen. Diese Inhomogenität war dabei geographisch nur schwer zu lokalisieren und danach zu regionalisieren. Es schien daher zweckmäßig eine Verminderung der Inhomogenität in den Daten durch die gesonderte Analyse von Hochwässern aus Regen und Schneeschmelze zu erreichen.

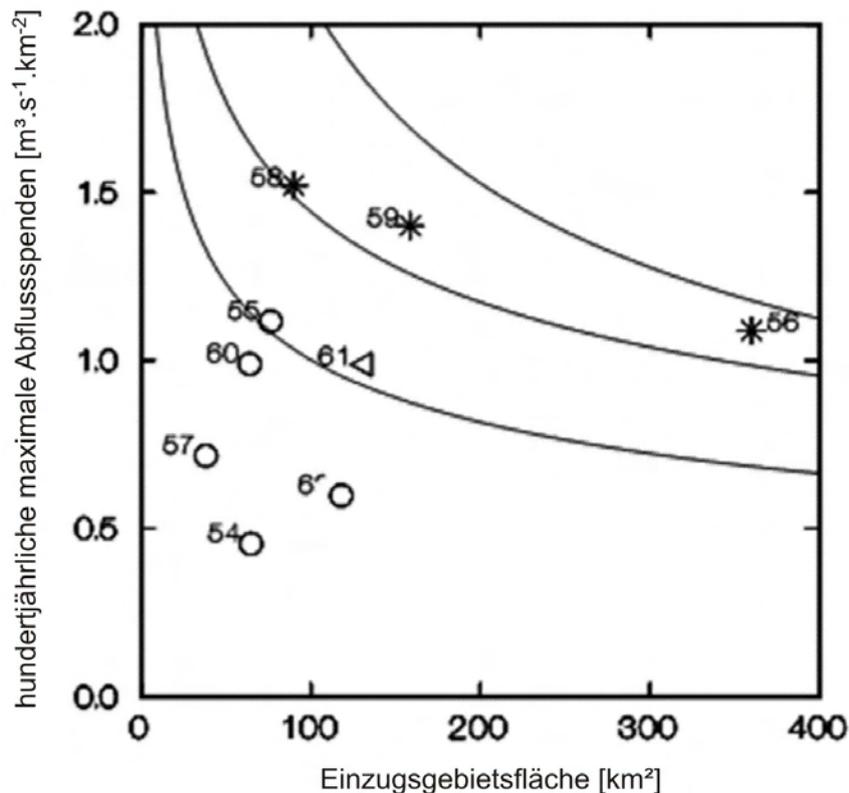
Es hat sich aber für beide saisonale Datensätze gezeigt, dass man, wie es sich schon bei der Analyse der Jahresmaxima gezeigt hat, in den bisher benutzten Regionen nur mit Hüllkurven zu brauchbaren regionalen Parametern für die Formel kommen kann. Auch bei dieser Regionalisierungen kam es zu den größten Überbewertungen der Bemessungswerte in den kleinen Einzugsgebieten. Ergebnisse einer mehr detaillierten Gliederung der bisherigen Regionen z.B. im Rahmen von einzelnen Einzugsgebieten zeigten, dass die große räumliche Variabilität der Hochwasserabflüsse eine zu feine Aufteilung der Gebiete erfordern würde. Dadurch wäre die Aussagekraft der abgeleiteten Beziehungen stark relativiert, denn die wären auf verhältnismäßig kleinen Datensätzen aufgebaut.



**Abb. 2:** Regionalisierung der hundertjährigen maximalen Abflussspenden aus Schneeschmelze im Einzugsgebiet Orava (auf der horizontalen Achse sind die Einzugsgebietsflächen [km<sup>2</sup>] und auf der vertikalen Achse die hundertjährigen maximalen Abflussspenden [m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>] dargestellt).

Den Hüllkurvencharakter der regionalen Beziehungen müsste man in jedem Einzugsgebiet einhalten. Die Überbewertung der Bemessungswerte würde dadurch nur verringert. Abbildungen 2 und 3 illustrieren diese Situation im westlichen Teil des Flyschgebietes. Abbildung 1 am Beispiel des Orava Flusses, wo man in den Einzugsgebieten der oberen und unteren Orava andere Bedingungen für die Hochwasserentstehung annehmen kann. Ähnliche Ergebnisse wurden im Čunderlik (1996) für den Fluss Kysuca im Flyschgebiet erreicht.

In Kohnová (1997) wurden weiter auch verschiedene andere Möglichkeiten der Bildung von Regionen getestet, mit dem Ziel den Umhüllcharakter der regionalen Formeln abzuschaffen. Die Bestimmung von homogenen Regionen geschah weiterhin subjektiv unter anderem durch die Kombination von geologischen, hydrogeologischen, geomorphologischen und hydrometeorologischen Gebieteigenschaften. In jedem Versuch wurden Hochwasser aus Regen und Schneeschmelze gesondert analysiert. Es ist aber nicht gelungen, akzeptablere regionale Formeln abzuleiten ohne deren Umhüllcharakter beizubehalten.



**Abb. 3:** Regionalisierung der hundertjährigen maximalen Abflussspenden aus Sommerregen im Einzugsgebiet Orava (auf der horizontalen Achse sind die Einzugsgebietsflächen [km<sup>2</sup>] und auf der vertikalen Achse die hundertjährigen maximalen Abflussspenden [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>·km<sup>-2</sup>] dargestellt).

Im weiteren wurde in (Szolgay und Kohnová 1997, 1998; Podolinská et al., 2005, 2006; Solín, 1998, 2002) die Einbeziehung von anderen Gebietskennwerten in die Hochwasserformeln in Erwägung gezogen. Die Formeln wurden mit der Einbeziehung von einfach zugänglichen Gebietskennwerten erweitert. Zwei Typen von Beziehungen, multiplikative und additive, wurden getestet:

Multiplikative Formel

$$HQ_{max} = k \cdot A^a \cdot B^b \cdot C^c \dots \quad (3)$$

Additive Formeln:

$$HQ_{max} = k + a \cdot A + b \cdot B + c \cdot C + \dots \quad (4)$$

wobei a, b, c, .... die Regionalparameter und A, B, C, .... die bestimmenden Gebietskennwerte sind. Die Parameter wurden in mehreren als homogen angesehenen Gebieten und auch in größeren Einzugsgebieten durch multiple Regressionsverfahren abgeleitet. Im Allgemeinen wurde die Zuverlässigkeit dieser Formeln nur als befriedigend beurteilt. Der Wert des multiplen Korrelationskoeffizienten lag dabei zwischen 0.56 und 0.82. Ein weiteres Problem mit diesen Formeln stellt die subjektive Wahl deren Struktur und der der benutzten Variablen dar. Die Relevanz dieser Wahl kann man nur mehr oder weniger spekulativ begründen.

Da aber angenommen wurde, dass die älteren Methoden bis zu der Einführung von neuen praxisgerechten Methoden der Bestimmung von Hochwasserabflüssen aus Gebietsmerkmalen in der Praxis noch in vielen Fällen Anwendung finden, wurde im weiteren trotzdem versucht dieses Verfahren zu aktualisieren. Deswegen hat das Slowakische Hydrometeorologische Institut den vorhandenen Datensatz mit Daten aus den in den siebziger Jahren gegründeten neuen Messstationen an kleinen Einzugsgebieten erheblich erweitert (Podolinská et al., 2005). Da die vorher beschriebenen Arbeiten keine wesentlichen Vorschritte hervorbrachten, wurde pragmatisch entschieden eine neue auf Einzugsgebieten basierende Regionalisierung aufzubauen. Diese basierte auf Jahresmaximalwerten. Die Resultate wurden als ein Teil der, durch das Umweltministerium verwalteten, Technischen Norm (OTN ŽP, 2003) für die Methoden der Schätzung der Bemessungshochwasser veröffentlicht und der Praxis zugänglich gemacht. Diese Technische Norm enthält die regionalen Parameter für die Schätzung der maximalen Abflussspenden mit der Jährlichkeit von 100 Jahren für 60 Flussgebiete und deren Subregionen. Das Verfahren wird als eine unmittelbare Zwischenlösung für die Praxis angesehen. Es erlaubt dem Benutzer in jedem Einzugsgebiet aus dem Katalog von Beziehungen, zusammen mit der Kenntnis des Gebietes, und den parallel zugänglich gemachten statistisch abgeleiteten Bemessungswerten in den Pegelstellen sich für einen  $HQ_{100}$  Wert zu entscheiden.

Bemessungshochwässer mit kürzeren Wiederkehrperioden werden mit Hilfe von Regionalbeiwerten aus den 100-jährlichen Hochwässern bestimmt. Diese sind für die 13 Hauptflussgebiete als maximale und minimale Werte angegeben. Dadurch überträgt sich die regionale Überbewertung der Bemessungswerte auf die ganze Verteilungsfunktion. Das führt zu einer regionalen Sicherheit bei hydrologischen Bemessungen, vor allem bei Bauwerken. Da aber auch die regionalen Beiwerte zur Bestimmung der Bemessungswerte für kleinere Wiederkehrintervalle überbewertet sind, sollten diese Bemessungswerte für mehrere Aufgabenstellungen, wie z.B. für naturnahe Flussregulierung, nicht angewendet werden.

### **3. Modernere Verfahren**

Da in vielen Ländern landesweit koordinierte Projekte zur Bearbeitung von Extremereignissen in der Hydrologie und Hydrometeorologie durchgeführt wurden (z.B. HORA – Blöschl et al. (2006), KOSTRA – Malitz et al. (2005), FEH (1999)), sind auch in der Slowakei kürzlich neue Untersuchungen zu diesem Themenkomplex begonnen worden. Die Daten für die Untersuchungen wurden vom Slowakischen Hydrometeorologischen Institut in Bratislava zur Verfügung gestellt, das die methodischen Ansätze letztlich in die neue landesweite Bearbeitung von Hochwässern integrierte (Podolinská et al., 2006).

In der Forschung wurden hauptsächlich methodische Vorgehensweisen auf Praxistauglichkeit getestet, wobei Methoden bevorzugt wurden, die bei ähnlichen Untersuchungen im Ausland Anwendung gefunden haben. Sowohl Starkniederschläge als auch Hochwässer wurden untersucht (z. B.: Hasbach et al., 2002; Gaál et al, 2007;

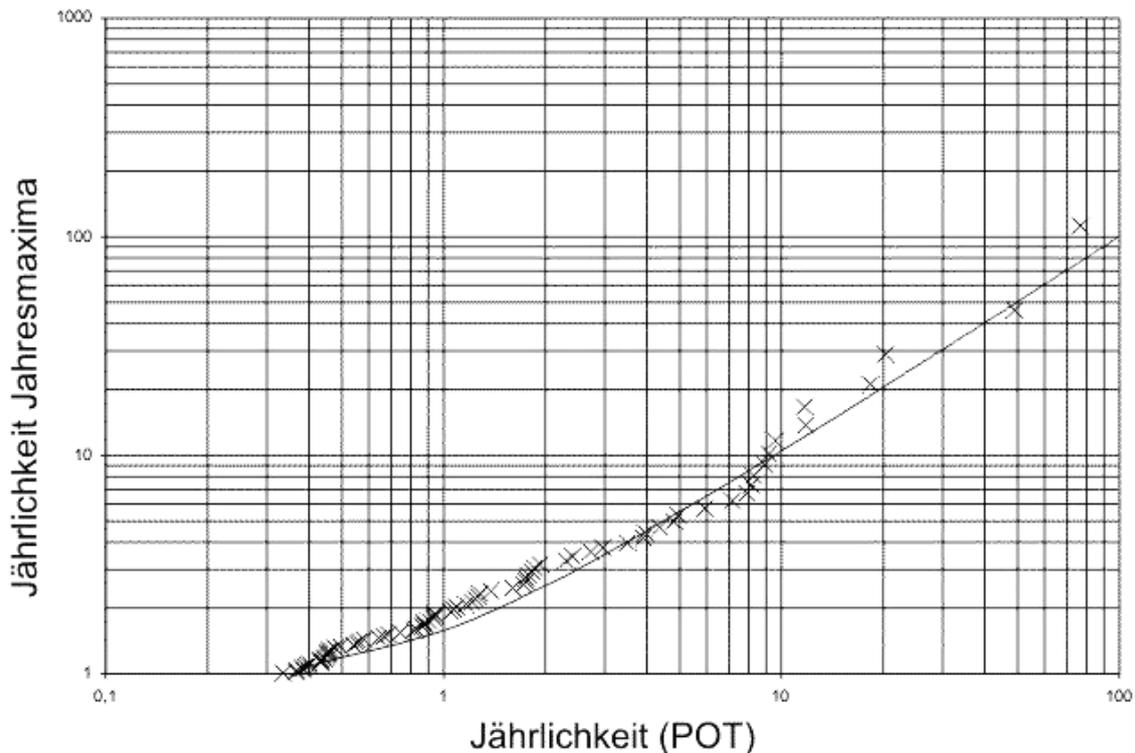
Gaál et al, 2008a, b; Kohnová und Szolgay, 1996a, b, 2002; Kohnová et al., 2004, 2005a,b, 2006a,b,c; Szolgay und Kohnová, 1999; Szolgay et al., 2009).

Als Ausgangsdaten für die gesamte Bearbeitung wurden jährliche Höchstwerte und saisonale Maximalwerte der Sommer- und Winterhalbjahre verwendet. Das POT Verfahren wurde nur ansatzweise getestet (Mitková et al., 2004). Da es in der Praxis keine Tradition hat, wurde es nicht weiter verfolgt. Man muss dazu noch bemerken, dass die Jährlichkeit der Bemessungswerte in der Slowakei traditionell als aus POT Werten ermittelt verstanden wird und aus der Überschreitungswahrscheinlichkeit der Jahresmaximalwerte durch die bekannte Langbein Formel errechnet wird.

$$P = 1 - e^{-\frac{1}{T}} \quad (5)$$

wo  $T$  für die Jährlichkeit der POT Werte und  $P$  für Überschreitungswahrscheinlichkeit der Jahresmaxima steht.

Die Gültigkeit dieser Formel wurde deswegen auch untersucht (Szolgay et al., 2007a) und für die in der Praxis benötigten Jährlichkeiten als gut beurteilt (es wurde die, auch in anderen Untersuchungen gefundene Abweichung bei kleinen Jährlichkeiten nachgewiesen (z.B. Takeuchi, 1984; Gottschalk und Krasovskaia, 2002), wie es in der Abbildung 4 am Beispiel der March gezeigt wird). Das Peak Over Threshold (POT) Verfahren das partielle Reihen verwendet wurde nur ansatzweise getestet.



**Abb. 4:** Vergleich der empirisch geschätzten Jährlichkeiten des Bemessungshochwassers aus den POT Daten (horizontale Achse) und aus Jahresmaximalwerten (vertikale Achse) mit der Langbein Formel (dargestellt als Kurve) an der March in Moravský Svätý Ján.

Da die Statistik und statistische Software eine große Auswahl von Verteilungsfunktionen und Methoden der Schätzung der Parameter anbietet und in der Slowakei seit 20 Jahren keine Untersuchungen zu diesem Themenkomplex durchgeführt wurden, war ein Ziel dieser Arbeiten, einen Überblick über die Aussagekraft und Anwendbarkeit der einzelnen Methoden zu geben. Diese dienten dann als methodische Grundlage für das Slowakische Hydrometeorologische Institut bei der Bearbeitung von Extremereignissen (Podolinská et al., 2006).

Es wurden neun Verteilungsfunktionen und – soweit möglich – vier Schätzungsmethoden nach dem Verfahren nach Geiger et al. (1991), DVWK (1999) und Hosking und Wallis (1997) herangezogen:

Verteilungsfunktionen:

E1 - Extremwertverteilung Typ 1 (1. Extremalverteilung, Gumbel-Verteilung), E2 - Extremwertverteilung Typ 2, AE (GEV) - Allgemeine Extremwertverteilung, ME - Gemischte Extremwertverteilung (Rossi-Verteilung), LN3 - Logarithmische Normalverteilung, P3 – Pearson Typ 3-Verteilung, LP3 - Logarithmische Pearson-Typ 3-Verteilung, WB3 - Weibull Verteilung, GLO - Allgemeine Logistikverteilung, GPA - Allgemeine Paretoverteilung;

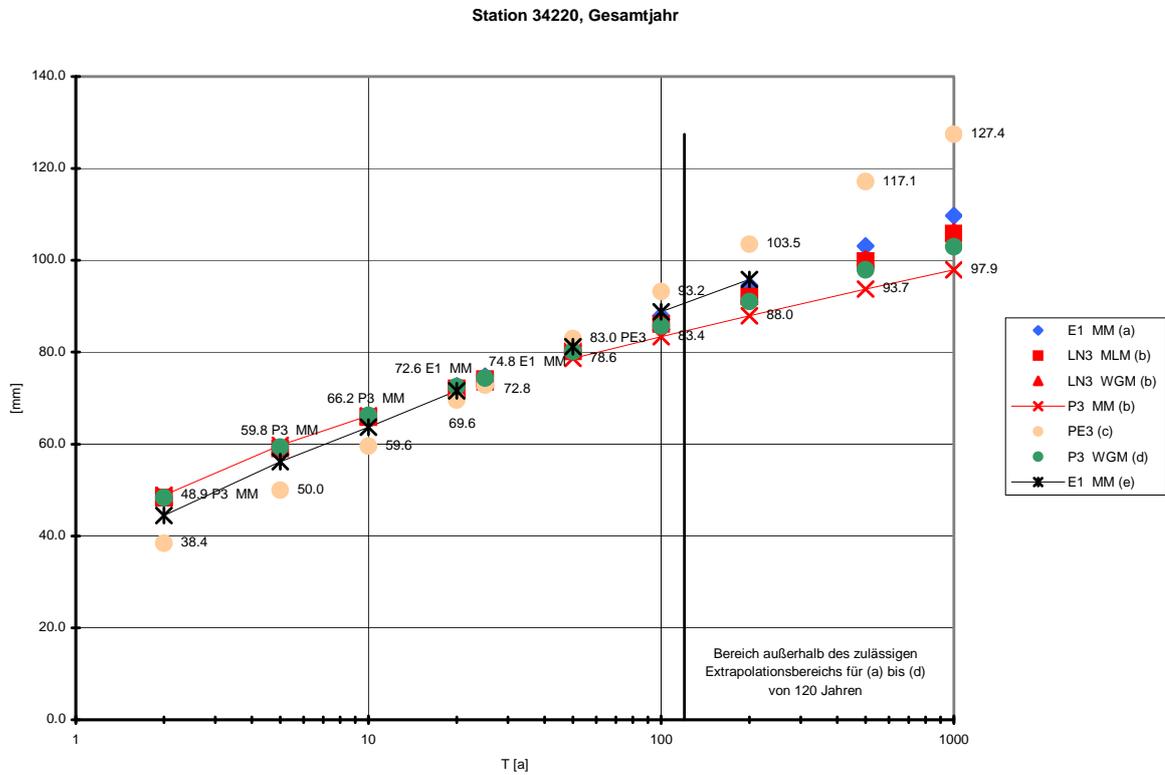
und Schätzungsmethoden:

MM – Momentenmethode, MLM - Maximum-Likelihood-Methode, WGM - Methode der wahrscheinlichkeitsgewichteten Momente und RLM - Regionale Schätzung mit Hilfe der L-Momentenmethode.

Zur Unterstützung der Auswahl einer Verteilungsfunktion wurden allgemein bekannte und auch im DVWK Verfahren benutzte Test verwendet (Kolmogorov Smirnov Test,  $r_p$  und  $n\varpi^2$  (DVWK(1999) zusammen mit dem van Montfort-Test Kluge(1996)). Auch das L-Momenten Diagramm (Hosking und Wallis, 1997), das eine graphisch unterstützte Methode für die Bestimmung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung ist, wurde als Test angewendet. In diesem Diagramm werden die Relationen von L Schiefe ( $L-Cs$ ) und L Wölbung ( $L-Ck$ ) für die zu vergleichenden Verteilungsfunktionen graphisch dargestellt. Für die einzelnen Stationen werden die entsprechenden Wertepaare  $L-Cs$  und  $L-Ck$ , die aus den Beobachtungsreihen geschätzt wurden, eingetragen, und ihre Lage bestimmt die Wahl der geeigneter Verteilungsfunktion (Abbildung 8 zeigt ein Beispiel dieser Methode).

Die Gesamtdarstellung aller durch die Tests favorisierten Verteilungsfunktionen einer Station in Abhängigkeit der Jährlichkeit erfolgte graphisch (entsprechend der drei Zeiträume gab es also drei Diagramme dieser Art je Station). Ein Beispiel für ein solches Diagramm aus der Analyse der Starkniederschläge ist in der Abbildung 5 angegeben. Die Diagramme dienten der Beurteilung der Streuung der Resultate für die verschiedenen Jährlichkeiten und Verteilungsfunktionen. Um besser erkennen zu können, welche Verteilungsfunktion in welchem Bereich die obere oder untere Grenze einer „Verteilungskurvenschar“ bildet, wurden die Verteilungsfunktionen, die maximal oder minimal liegen, mit durchgehenden Linien markiert. Die Werte der übrigen Verteilungsfunktionen befanden sich dann dazwischen. Diese maximalen

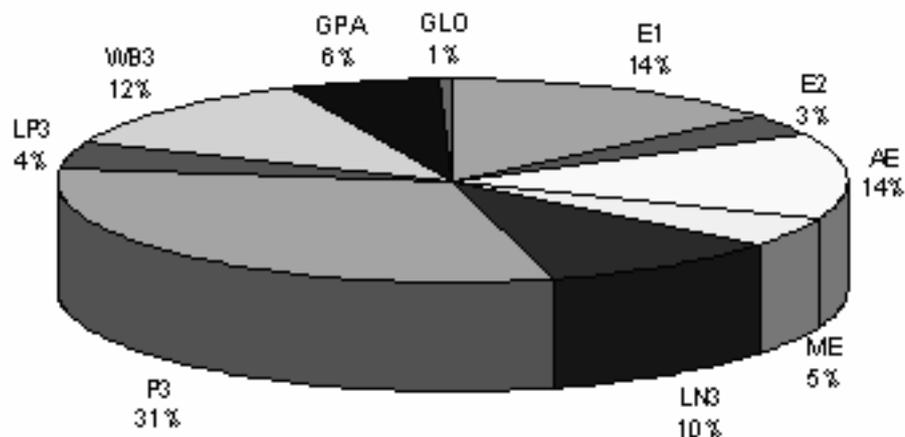
beziehungsweise minimalen Verteilungsfunktionen wurden für diese Untersuchung „Randfunktionen“ genannt. Sie sind auch in der Legende als Linie bei der betreffenden Funktion angedeutet.



**Abb. 5.** Diagramm der favorisierten Verteilungsfunktionen der Höchstwerte der 1-Tagesniederschläge des gesamten Jahres der Station Staré Hory in der Zentralslowakei im Hron Einzugsgebiet.

Wie sich auch aus der Abbildung 5 erkennen lässt, lagen die Werte oft dicht beieinander (insbesondere bei kleinen Jährlichkeiten). Oft ergibt sich ein Kreuzungspunkt bei  $T = 20$  a bis  $50$  a. Eine Funktion kann sogar im selben Diagramm in einem Bereich die obere Grenze und für einen anderen Bereich die untere Grenze bilden und umgekehrt. Bei höheren Jährlichkeiten gingen die Funktionen wie erwartet auseinander. Dies ist unter anderem auf die Form der Verteilungsfunktionen und auf die unterschiedliche Gewichtung der Ausreißer bei den einzelnen Schätzungen zurückzuführen. Diese Resultate wurden als praxisorientiertes Konzept bei der Entscheidung, die besten Verteilungsfunktionen zu suchen, benutzt.

Anschließend wurden die Anteile der einzelnen Verteilungsfunktionen aller Stationen in Kreisdiagrammen nach Gesamtjahr, Sommerhalbjahr und Winterhalbjahr getrennt dargestellt. Ein Beispiel ist in der Abbildung 6 für die Höchstwerte der 1-Tagesniederschläge des gesamten Jahres im Hron Einzugsgebiet gezeigt.



**Abb. 6.** Anteile der Verteilungsfunktionen der Höchstwerte der 1-Tagesniederschläge für das Gesamtjahr im Hron Einzugsgebiet.

In diese Diagramme gingen durch die Tests favorisierte Verteilungsfunktionen aller Stationen ein, unabhängig von der Methode der Parameterschätzung. Die Verteilungen mit den jeweils größten Anteilen in den Kreisdiagrammen könnten bei der Bearbeitung der Daten bevorzugt werden, falls man die Wahl einer einheitlichen Verteilungsfunktion im Einzugsgebiet bevorzugen würde. Würde man aus Tradition und Gründen der Wahrung der Kontinuität der Bearbeitung auf die bisher meistbenutzten Verteilungen (Extremalverteilungen von Gumbel bei den Niederschlägen und Pearson III und Lognormal bei den Hochwässern) beharren, können diese Ergebnisse bei solcher Wahl als Entscheidungshilfe dienen.

Ausgehend von diesen Untersuchungen wurden im Slowakischen Hydro-meteorologischen Institut die Bemessungshochwässer der Slowakei neu bearbeitet (Podolinská et al, 2006). In diesem Bericht und in der Praxis des Institutes erfolgt die Wahl der Verteilungsfunktionen nach dem DVWK Verfahren, da es auch durch die entsprechende Software unterstützt wird. Dabei wird keine Verteilungsfunktion a-priori bevorzugt und es wird versucht die Unsicherheiten der Schätzung anzugeben. Eine ausführliche Analyse der Wahl des Beobachtungszeitraumes und der Saison in der Hochwasseranalyse hat bis jetzt allerdings zu keiner Empfehlung in dieser Hinsicht geführt, es werden alle Daten und Jahresmaxima bewertet.

Allgemein kann man feststellen, dass es in diesen Projekten gelungen ist einige neue Aspekte in die statistische Bearbeitung der Extremwerte in der Slowakei einzubringen und zu testen. Es wurden aber einige wichtige Probleme nicht ausreichend gelöst, bzw. sind neue Unsicherheiten aufgetaucht. Für die Zukunft wurden folgende

Empfehlungen formuliert, die weitgehend mit denen im Giesecke et al. (2002) übereinstimmen:

- für die Bearbeitung der Extremwerte wird die Wahl eines sowohl für die Vergangenheit als auch die Zukunft repräsentativen Zeitraumes empfohlen,
- Verfahren für die Wahl einer solchen repräsentativen (quasistationären) Periode sind zu entwickeln,
- die statistisch bessere Parameterschätzung sollte verwendet werden,
- Bestimmung der Unsicherheit der Schätzung sollte angegeben werden, dabei scheint Resampling vorteilhafter zu sein als die Konfidenzintervalle.

Allgemein wurde wieder festgestellt, dass Praxishilfen, Software und Richtlinien das Expertenwissen nur unterstützen und nicht ersetzen sollten. Es wird daher weiter als Vorteilhaft angesehen, dass die Bemessungswerte in der Slowakei zentral erstellt bzw. mindestens begutachtet werden.

Die regionalen Methoden, die in den Vor- und Nachkriegsjahren für die Bestimmung von Bemessungshochwässern in unbeobachteten kleinen und mittleren Einzugsgebieten der Slowakei benutzt wurden, wurden hier im Kapitel 2 beschrieben. Deren Aktualisierung hat auch viele Fragen offen gelassen, wie z.B. diese:

- Überbrücken wir durch das Konzept der regionalen Sicherheit (Hüllkurven) auch in traditionell als hydrologisch sehr homogenen geltenden Gebieten Mangel an hydrologischen oder physiographischen Daten oder fehlende Prozesskenntnisse?
- Wie könnte man die uneinheitliche Bemessungssicherheit in und zwischen den Regionen ausgleichen, bzw. ist die Unterteilung des Gebietes der Slowakei der einzige Weg der zu einem solchen Ziel führen kann (im Limit könnte so jedes Einzugsgebiet eine Region werden)?
- Wie könnte man die subjektive Regionenbildung mehr auf Daten und Kennwerten basierende Verfahren umstellen?
- Welche Daten und Kennwerte sollte man als repräsentativ für Heterogenität der Prozesse der Genese des Hochwasserabflusses in der Slowakei heranziehen?

Im Rahmen einer Reihe von Forschungsprojekten, mit dem Ziel die Berechnung der Bemessungshochwässer in unbeobachteten kleinen und mittleren Einzugsgebieten der Slowakei zu standardisieren, wurden darum auch weitere regionale Verfahren zur Bestimmung von Bemessungshochwässern getestet und verglichen. Das Ziel war eine breitere Palette von praxistauglichen Methoden zu entwickeln die Antworten auf die angeführten Fragen geben könnten.

Die Bedeutung der Regionalisierung für die Forschung und Praxis in der Hydrologie ist allgemein anerkannt. Die Wege und Ziele sowie die genaue Definition des Begriffs haben sich in den letzten Jahrzehnten stark entwickelt und werden teilweise auch kontrovers diskutiert. Hier wird nicht näher auf diese Diskussion eingegangen, sondern nur auf die betreffende Literatur hingewiesen, z.B. Bloeschl und Merz (2008a, b, c), Bobeé et. al. (1995), Burn (1990, 1997), Burn, Boorman (1992), Castellarin et al.

(2001), De Michele und Rosso (2002), Gottschalk (1985), Hosking und Wallis (1997), Pearson (1991), Solín (1998), Wallis et al. (2007), Wiltshire (1986).

In der Anwendung von regionalen Methoden bei der Hochwasseranalyse in der Slowakei wurde in der Vergangenheit zwischen Regionalisierung und regionaler Übertragung unterschieden. Unter Regionalisierung hat man die Ausweisung von Gebieten, Flächen bzw. Einzugsgebietsgruppen gleicher hydrologischer Eigenschaften verstanden und unter regionaler Übertragung die Anwendung (Übertragung) von hydrologischen Charakteristiken, Formeln und Modellen in Gebiete, in denen sie wegen des Mangels an geeigneten Daten nicht vorhanden sind. Jetzt wurde in der neuen hydrologischen Terminologie der Begriff Regionalisierung noch in zwei Verfahren geteilt. Danach führt die Regionalisierung zu geographisch zusammenhängenden homogenen Gebieten (so entstehen homogene Regionen), im Raum nicht benachbarte homogene Einheiten sind das Resultat der regionalen Typisierung (es entstehen homogene regionale Typen). Die Gliederung des Raumes in Einheiten mit gleichen hydrologischen Eigenschaften war am Anfang meist subjektiv durchgeführt worden. In der letzten Zeit wurde das oft bemängelt und es wurden sogenannte objektive Methoden der Regionalisierung bevorzugt.

In der Slowakei wurden erst Ansätze getestet, die auf bisher nicht benutzten Gebietskennwerten und Regionalisierungsverfahren basieren. Die Aufgabenstellung lautete, möglichst einfache Abflussformeln für Hochwasser aus kleinen und mittleren Einzugsgebieten (ca. 20 bis 400 km<sup>2</sup>) herzuleiten ohne den Umhüllcharakter der bisherigen Formeln behalten zu müssen. Wie in mehreren vorherigen Studien, wurden Hochwasser aus Regen und aus Schneeschmelze getrennt untersucht. Der Datensatz der jährlichen Sommerhochwasser und Winterhochwasser aus 267 Pegelstellen in der Slowakei wurde um neue Daten bis 1999 erweitert. Die Fläche der untersuchten Einzugsgebiete lag zwischen 5 und 250 km<sup>2</sup>, die kürzeste Datenreihe betrug 16 Jahre, die längste 63 Jahre. In dieser Studie wurde mit den Datenreihen der Hochwasser aus Schneeschmelze gearbeitet. Folgende Gebietsparameter und klimatische Charakteristiken wurden aus einem digitalen Geländemodell und digitalen Karten mit Hilfe von GIS Verfahren bestimmt: Fläche des Einzugsgebietes, geodätische Höhe des Pegels, Beiwert der Form des Einzugsgebietes, Waldanteil, langjähriger mittlerer Abfluss, mittleres Einzugsgebietsgefälle, mittlere Einzugsgebietshöhe, mittlere Hangorientierung im Einzugsgebiet, Höhe der Schneedecke mit dem Wiederkehrintervall von 50 Jahren, Wasserkapazität der Schneedecke mit dem Wiederkehrensintervall von 50 Jahren, Länge des Hauptvorfluters, Infiltrationsindex der Bodentypgruppe, mittleres Gefälle des Hauptvorfluters, Konzentrationszeit nach Hradek, Kirpich und Nash. Als neue Charakteristika zur Entstehung von Hochwasser wurden Starkniederschläge mit der Wiederholungszeitspanne von 2, 50, 100 Jahren, sowie das absolute Maximum für einen 24-Stunden-Niederschlag für jedes Einzugsgebiet verwendet. Diese Daten wurden mit Hilfe von geostatistischen Interpolationsmethoden und aus vorhandenen digitalisierten und gerasterten Isolinienkarten erstellt.

Der wichtigste Schritt bei der regionalen Analyse ist die Bestimmung von homogenen Regionen. In einer Reihe von Studien wurden entschieden die homogenen Regionen mit Hilfe der Clusteranalyse (K-means clustering) zu ermitteln (Kohnová et al., 2000c; Kohnová und Szolgay, 1999, 2000, 2002; Kohnová et al., 2008a; Solin, 2002).

Es wurde euklidische Metrik verwendet (Hartigan, (1975); Burn, (1997)). Die Ähnlichkeit der Einzugsgebiete wird bei dieser Methode durch deren Position in dem von den einbezogenen Variablen definierten n-dimensionalen Koordinatensystem und durch ihre Distanz zueinander bestimmt. Die euklidische Entfernung zwischen den einzelnen Objekten wird dabei definiert als:

$$D_{j,k} = \left\{ \sum_{i=1}^M W_i (X_{j,i} - X_{k,i})^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

$D_{j,k}$  ist die euklidische Entfernung der Station  $j$  zu  $k$ .  $M$  gibt die Anzahl der Charakteristiken an, und  $W_i$  ihre Wichtung.  $X_{j,i}$  ist der standardisierte Wert der Charakteristik  $i$  an der Station  $j$ .

Die ungefähre Anzahl der Gruppen sollte vorher festgelegt werden, denn von der Anzahl der Cluster hängt auch die weitere praktische Anwendbarkeit der Resultate ab. Weiters sollte in jeder Gruppe eine gewisse Anzahl von Einzugsgebieten sein, die für weitere statistische Analysen ausreichend ist. Die Zahl der Cluster für die ganze Slowakei wurde in diesen Studien deswegen auf acht bis elf beschränkt. Weiter wurde auch darauf geachtet, dass die Anzahl der Einzugsgebiete in den einzelnen Gruppen ungefähr gleich groß war. Um den Einfluss der gegenseitigen Abhängigkeit der Gebietskennwerte auszuschließen, wurden als Eingangsvariablen nur solche Kombinationen von Einzugsgebietskennwerten gewählt, die untereinander einen Korrelationswert kleiner als 0.3 aufwiesen.

Die so entstandenen Gruppen werden noch vor ihrer Homogenitätsüberprüfung einer visuellen Analyse mit Hilfe der Cluster Profile Plots unterzogen. Dabei zeigt sich welche Einzugsgebietsgruppen aufgrund von den gewählten Gebietskennwerten gut auseinander gehalten werden können.

Zur weiteren Untersuchung wurde der Hosking-Wallis-Test zur Überprüfung der regionalen Homogenität in den erstellten Clustern angewendet. Der Testausgabeparameter  $H$  gibt an, wie stark die Anpassung der Punkte aus einem Cluster an eine bestimmte Verteilungsfunktion ist. Der Wert ist somit ein Maß für die Homogenität in einer Region. Nach Hosking und Wallis (1997) soll  $H$  nicht größer als 2 sein. Mehrere Testergebnisse waren nach den ersten Untersuchungen höher als 2 (es ist hier zu bemerken, dass das Kriterium der Homogenität  $H=2$  später von Wallis et al. (2007) als streng bezeichnet wurde und in einigen Arbeiten wurde  $H$  auf 3 geändert). Für alle Regionaltypen wurden auch die Ausreißer mit dem Hosking-Wallis-Test ermittelt. Durch Weglassen, oder Einordnen der Ausreißer in andere Cluster konnte beim erneuten Test meistens eine Verbesserung der Ergebnisse erzielt werden. Als Beispiel sind in der Tabelle 1 die Ergebnisse einer solchen iterativen regionalen Typisierung angegeben.

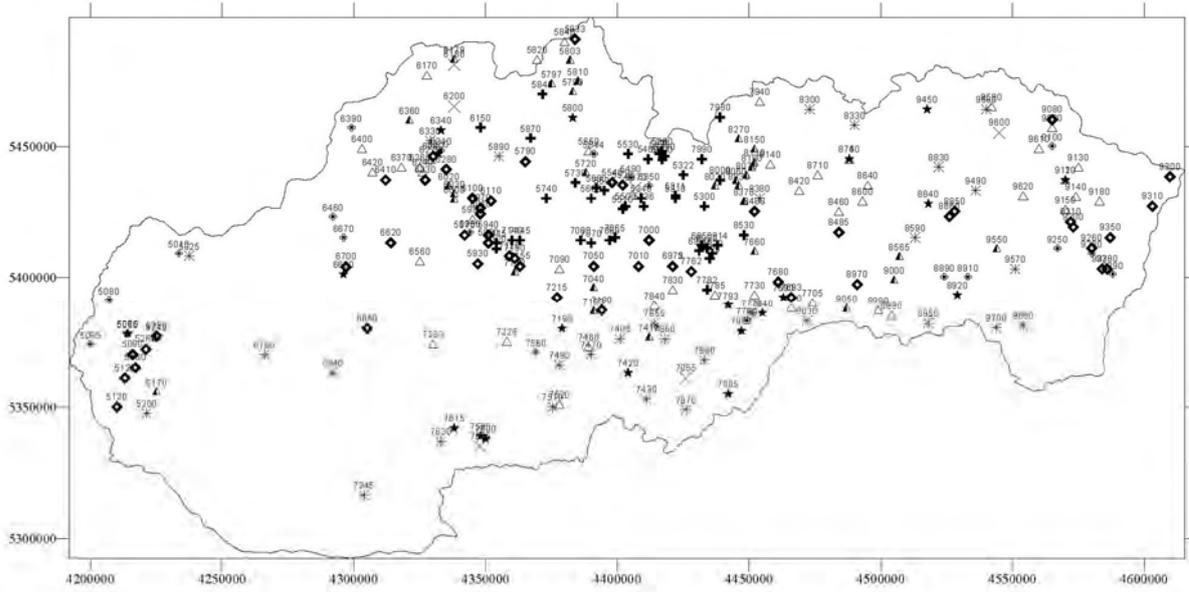
**Tab. 1:** Beispiel für die iterative Bildung von homogenen regionalen Typen mit Hilfe des Hosking-Wallis-Tests (Hochwasser aus Schneeschmelze)

<b>Cluster</b>	<b><i>H Wert</i></b>	<b><i>Ausreißer (Pegel No.)</i></b>	<b><i>H Wert (ohne Ausreißer)</i></b>
<b>1</b>	3,13	6922	<b>1,99</b>
<b>2</b>	4,22	9050	<b>1,55</b>
<b>3</b>	1,56	7155 und 8860	<b>1,47</b>
<b>4</b>	2,26	9280	<b>1,47</b>
<b>5</b>	3,08	8420	<b>2,82</b>
<b>6</b>	2,42	5800	<b>1,36</b>
<b>7</b>	<b>1,30</b>	Keine	
<b>8</b>	3,42	7345	<b>1,42</b>

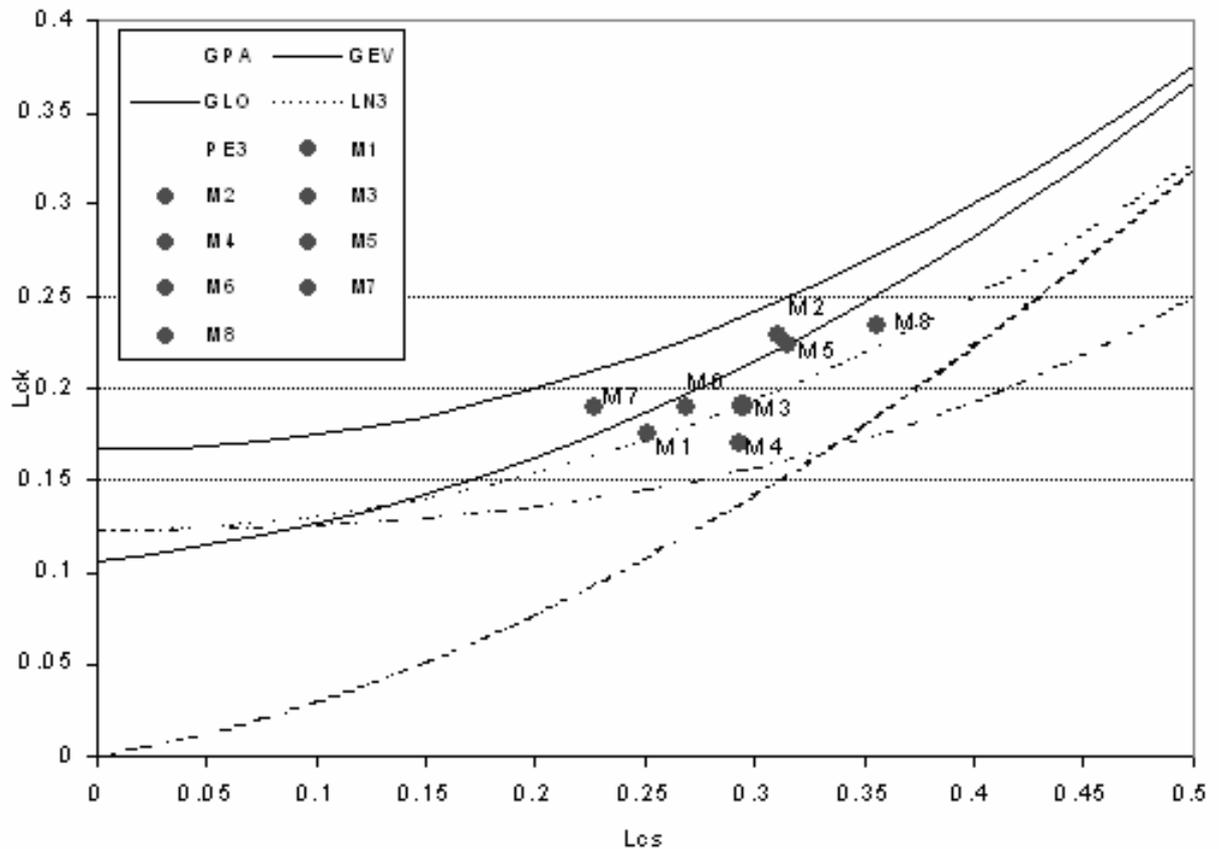
Einige der regionalen Typen konnte man aber auch durch weitere Bearbeitung nicht verbessern. Hinzufügen oder weglassen von vermeintlichen Ausreißern führte nicht zum gewünschten Ergebnis. Es steht zur weiteren Diskussion offen, ob ein rein rechnerisches Verfahren den Anforderungen der Regionalisierung genügt, oder ob man dieses auch durch eine subjektive Vorgehensweise ergänzen sollte und die Resultate auch anders als nur durch statistische Testverfahren verifizieren sollte. Ein Beispiel für die Verteilung der untersuchten Einzugsgebiete der Slowakei in geographisch nicht zusammenhängende Gebiete (homogene regionale Typen für Hochwasser aus Schneeschmelze), das das typische Leopardenfellmuster der räumlichen Ähnlichkeit aufweist, zeigt Abb. 7.

Um eine geeignete Verteilungsfunktion der Hochwasser in den einzelnen Regionaltypen zu bestimmen wurde das L-Momenten Diagramm und das Hosking Testverfahren (Hosking und Wallis, 1997) verwendet. Das L-Momenten Diagramm stellt eine graphisch unterstützte Methode für die Bestimmung von Wahrscheinlichkeitsverteilung für die einzelne Stationen und für die gesamte Region dar.

In der Abbildung 8 ist ein Beispiel des L-Momenten Diagramms der regionalen Mittelwerte der L-Momente gewichtet durch die Beobachtungsperiode, dargestellt. So können für die Jahresmaximalwerte der Hochwasser der Slowakei bei der Mehrheit der regionalen Typen, die GEV Verteilung und die LN3 Verteilung als geeignet angesehen werden.



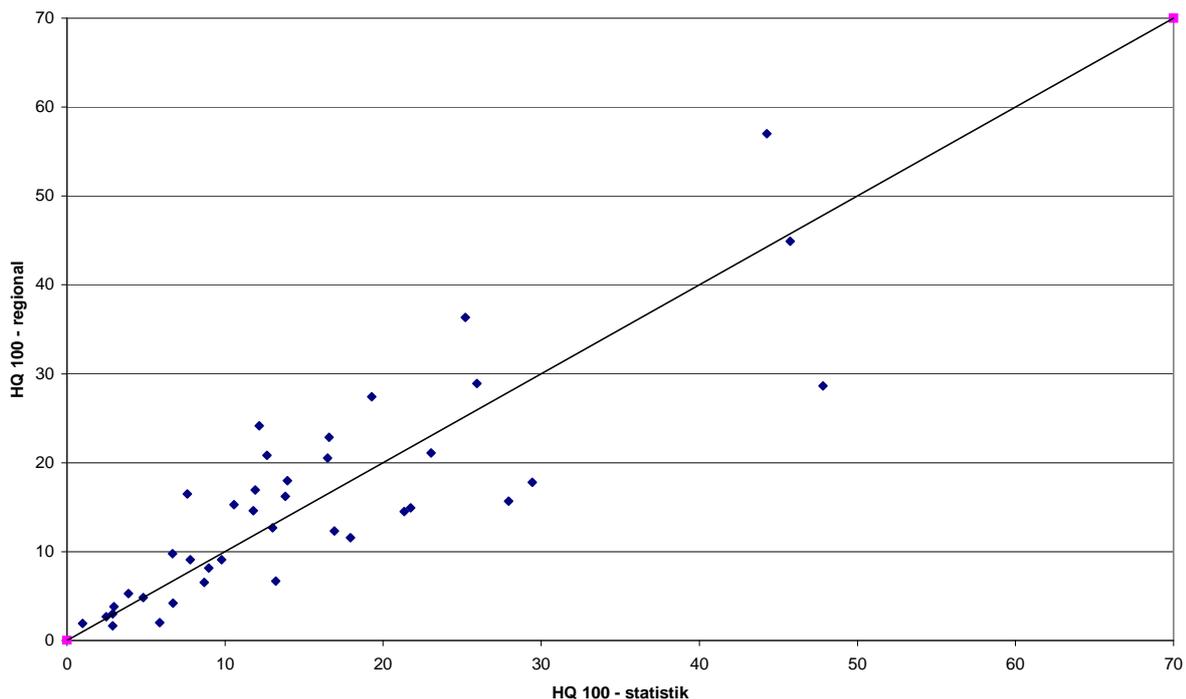
**Abb 7:** Beispiel der Verteilung der untersuchten Einzugsgebiete der Slowakei in geographisch nicht zusammenhängende Gebiete (homogene regionale Typen für Hochwasser aus Schneeschmelze), dass das typische Leopardenfellmuster aufweist.



**Abb. 8:** Beispiel des L-Momenten Diagramms für 8 homogene regionale Typen für Hochwasser aus Schneeschmelze. Als regionale Verteilungsfunktion sind die LN3 und GEV Verteilungen zu empfehlen.

Für die Berechnung von Bemessungshochwassern in unbeobachteten Einzugsgebieten wurde die allgemein bekannte Index-Flood-Methode vorgeschlagen. Als Index Flood wurde der Mittelwert der jährlichen Maxima der Hochwasser gewählt. Aus den in der Literatur angeführten Formeltypen für die Berechnung des Index-Flood aus Einzugsgebetskennwerten, wurden die regionale Regressionsformel mit multiplikativer Form angewendet (siehe Formel 3). Da in den betreffenden regionalen Typen (wie aber auch in anderen Fällen) keine hydrologisch eindeutig begründete Wahl der Variablen für die regionale Regressionsformeln existiert, wurde die Wahl einer angemessenen Form des Zusammenhanges zwischen Gebietsparametern und der Charakteristika der Hochwässer im „Trial und Error“ Verfahren schrittweise mit Mehrfachregression durchgeführt.

Meistens standen zur Kontrolle der gefundenen Beziehungen keine unabhängigen Testdaten zur Verfügung. Eine Abhilfe kann die „jack knife“ Prozedur und ein Vergleich der relativen Abweichungen der Werte aus der statistischen Analyse und der regionalen Verfahren bringen. Als Beispiel wird hier der Vergleich der HQ<sub>100</sub> Werte aus statistischer Analyse und des Hosking und Wallis Verfahrens für ein Cluster in der Abbildung 9 dargestellt.



**Abb. 9:** Vergleich der HQ100 Werten der Hochwasser aus Schneeschmelze berechnet aus der statistischen Analyse und aus der regionalen Schätzung.

Die Resultate dieser Studien kann man wie folgt zusammenfassen:

- Die getrennte Analyse von Sommer- und Winterhochwässern brachte keine Verbesserung hinsichtlich der Verringerung der Streuung der Bemessungswerte in den einzelnen Regionen, für die Praxis empfiehlt es sich weiter die Jahresmaxima zu bearbeiten.
- Die Analyse der relativen Abweichungen der Werte berechnet aus der statistischen Analyse und aus der regionalen Schätzung zeigte bessere Resultate, als die früher getestete regionale Mehrfachregression.
- Die im Prinzip des Verfahrens verankerte Über- und Unterbewertung der Bemessungswerte ist aber für die praktische Anwendung problematisch.
- Diese Methoden sind deswegen zur Bemessung von Wasserbauten, die hohe Sicherheit aufweisen sollten (z.B. Dämme, Rückhaltebecken usw.), nur dann zu empfehlen, wenn die Über- und Unterbewertung einen kleinen akzeptablen Rahmen nicht übersteigt (siehe Abbildung 9).
- Dies zu akzeptieren ist in der Slowakei problematisch, weil die bisherigen Verfahren das Umhüllprinzip beinhalten. Kleinere Sicherheit in der Bemessung in einer Hälfte der Fälle sollte nicht mit höherer in der anderen Hälfte kompensiert werden.
- Hingegen für kleinere Jährlichkeiten und für hydroökologische Projekte sind diese Methoden in der Slowakei günstiger als die, die das Umhüllprinzip enthalten.

Allgemein kann man feststellen, dass es in diesen Projekten gelungen ist einige neue Aspekte in die Regionalisierung einzubringen und zu testen, wie z.B.:

- Einzugsgebiete mit ähnlichen Abflussverhalten könnten ähnliche oder identisch skalierte Verteilungsfunktionen von  $HQ_{max}$  haben, die sogenannten regionalen Verteilungsfunktionen,
- Der Skalierungsfaktor (Indexflood, z.B. das mittlere Hochwasser) ist auch durch Gebietskennwerte bestimmbar.
- Die als homogen angesehenen Einzugsgebiete können im Raum nicht zusammenhängende Gruppen bilden. Das heißt im Prinzip, dass Prozessähnlichkeit und nicht die geographische Nähe entscheidend sein könnten.

Es wurden aber einige wichtige Probleme nicht ausreichend gelöst, wie z.B.:

- Es wurde nicht ausreichend bewiesen, dass man die Prozesse durch Gebietskennwerte unterscheiden kann und homogene Einzugsgebietsgruppen durch ähnliche Gebietskennwerte ausgegliedert werden können.
- Die für die Praxis nicht ganz taugliche Über- und Unterschätzung der Bemessungswerte konnte nicht ausreichend beseitigt werden.
- Trotz der durch einen Algorithmus definierten Verfahren ist die Anzahl subjektiv bestimmter Schritte hoch geblieben (Bestimmung der Anzahl der Regionen,

Wahl der Gebietskennwerte, iterative Korrekturen in der in ein homogenes Gebiet einzuordnenden Einzugsgebiete usw.)

Es sind auch neue Fragen entstanden, wie z.B.:

- Sind die zur Verfügung stehenden Kennwerte repräsentativ für die Abflussbildung?
- Ist das Konzept der räumlich nicht zusammenhängenden Regionen, das rein auf mechanistischen Prinzipien der hydrologischen Ähnlichkeit beruht, korrekt?
- Schneidet die bei der Regionalisierung entstandene Skalierung durch die Einzugsgebiete verschiedener Größen auch durch verschiedene Prozesse und verursacht so die für die Bemessung unerwünschte Streuung der Resultate oder ist diese durch eine wenig differenzierte Regionalisierung verursacht?
- Ist der Grund der nicht praxistauglichen Resultate mangelnde Prozesskenntnis und fehlende Differenzierung der Abflussbildung durch Kennwerte?

Eine für die Bemessungspraxis annehmbare Methode wurde so im vorgegebenen Fall und auch durch die vorgestellte Vorgangsweise bisher nicht erreicht. Es werden weitere Untersuchungen folgen müssen, bei denen die Anwendbarkeit des vorgestellten Konzeptes der regionalen Homogenität unter den sehr heterogenen klimatischen und physiographischen Bedingungen der Slowakei weiter kritisch untersucht wird.

#### **4. Zusammenfassung**

In dem Beitrag haben wir einen Überblick über die Entwicklung der Verfahren zur Bestimmung der Bemessungshochwässer in der Slowakei beschrieben. Wir sind hier von den üblichen Paradigmen der Bestimmung von Bemessungshochwässern ausgegangen, wie z.B.:

- die Annahme der Stationarität der Stichprobe und/oder der räumlichen Homogenität der Hochwasserentstehung,
- die Annahme der Unabhängigkeit und identischen Verteilung der Extremwerte,
- die Annahme, dass sich die Vergangenheit statistisch wiederholen wird,
- die Annahme, dass Extrapolation im Raum und/oder über die Beobachtungszeitspanne und den Beobachtungsraum hinaus möglich ist.

Die wachsende Anzahl und Länge der Datenreihen würden natürlich auch nahelegen Aussagen über das Langzeitverhalten der Extreme zu treffen. Untersuchungen zur besseren Erfassung der räumlichen Heterogenität der hydrologischen Prozesse wären auch möglich und notwendig. Diese Fragen wurden bisher nicht untersucht, wir haben uns auf die Aufgabe konzentriert im üblichen Rahmen praxistaugliche Methoden zu entwickeln. Diese sollten auch die Kontinuität der im Lande üblichen Verfahren berücksichtigen. Folgende wichtige Fragenstellungen haben uns geleitet:

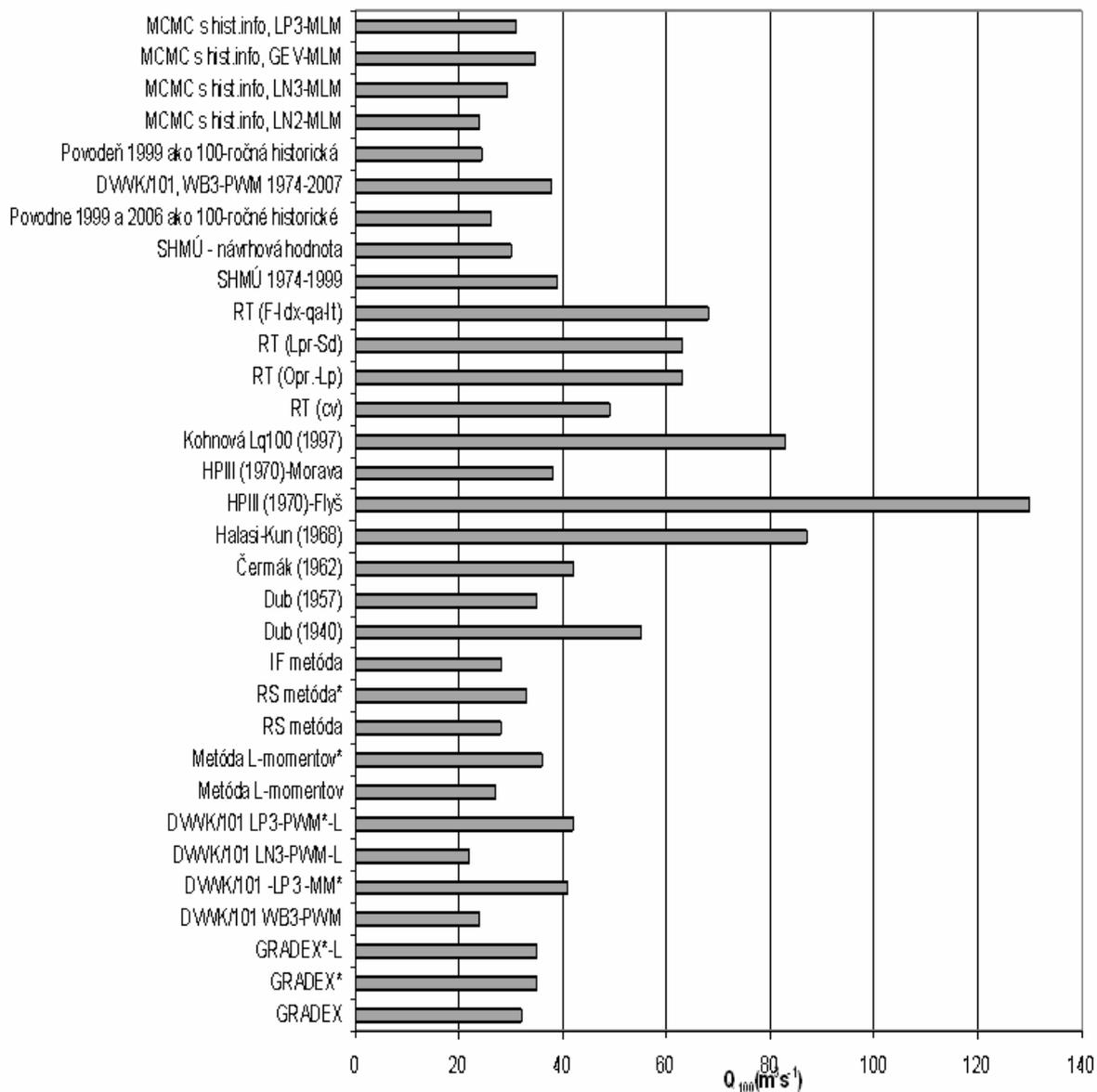
- Wie konsistent ist die Bemessungssicherheit in der Slowakei in Raum und Zeit?
- Wie ist das Recht des Anwenders auf eindeutige Resultate der Schätzung der Bemessungswerte am best möglichen Wege zu sichern?
- Wie Zukunftssicher sind die in der Tradition verankerten Methoden und sind sie für die Zukunft für die Praxis noch tragbar?
- Wie verbesserungsbedürftig sind diese und in wie weit ist es möglich diese überhaupt noch zu verbessern?

Diese Philosophie der Entwicklung wird inzwischen in weiteren Projekten modifiziert, die eine landesweit anwendbare einheitliche Methodik für die Hochwasserrahmenrichtlinie der EU als Ziel haben. So sind Arbeiten im Gange, die sich mit der Skalierung der Extremniederschläge befassen. Der Ziel der Arbeiten ist es die räumliche Variabilität der Skalierung, die lokal in 55 Stationen nachgewiesen wurde, zu untersuchen (Bara et al., 2008, Gaál et al., 2008c). Der Ziel der Arbeiten ist es, zusammen mit den Resultaten von Untersuchungen die die Möglichkeiten der Kartierung von Extremwerten der Tagesniederschläge testeten (z.B.: Kohnová et al., 2006c, 2008b; Parajka et al., 2004; Szolgay et al., 2007; 2009) neue Unterlagen für die bisherigen Niederschlag-Abfluss Beziehungen und neue zu entwickelnde Niederschlag-Abfluss Modelle zu schaffen. Dazu wurde auch das räumliche Verhalten der Abflussbeiwerte in der Rational Formula untersucht (Kohnová et al., 2005d), die bis jetzt leider zu keiner sinnvollen Regionalisierung dieser Werte führten.

Weiters werden auch die Möglichkeiten der Minderung der Unsicherheiten der Schätzung der Bemessungswerte im Rahmen von Bayesschen Methoden durch das Einbeziehen historischer Ereignisse in die lokale und regionale statistische Analyse untersucht (Szolgay et al., 2008 und Gaál et al., 2009).

Die Ingenieurhydrologische Praxis kann sich auch in der Slowakei nicht der Tatsache entziehen, dass die Entwicklung zu immer neueren und einer kaum mehr überschaubaren Fülle von Methoden führt. Die Ergebnisse der Schätzung der Bemessungswerte werden so immer stärker abhängig von der Wahl der Methoden. Auch durch die Globalisierung der Wissenschaft und Projektierung verstärkt sich die ständige Konfrontation von Methoden und deren Resultaten. Als Beispiel für diese Unsicherheiten zeigt Abbildung 10 einen vergleich der Ergebnisse solcher Berechnungen für das Myjava Einzugsgebiet.

Dieses Beispiel zeigt auch, warum auch in der Slowakei Handbücher und/oder Richtlinien benötigt werden, deren Verfassung das Endziel unserer Arbeiten ist. Diese könnten zur Verminderung der Unsicherheit durch die Empfehlung zur Wahl und der richtigen Anwendung von allgemein akzeptierten Methoden führen. Als erster Schritt in diese Richtung kann man Arbeiten nennen, die zu diesem Zweck im Rahmen der technischen Normalisierung als Vorarbeiten zu der Verfassung solcher Richtlinien eingeleitet wurden, (Kohnová et al., 2000b; Szolgay et al., 1999, 2001; Turčan et al., 2003). Deren erstes Zwischenresultat ist die Slowakische Technische Norm des Ministeriums für Umwelt, OTN ŽP (2003), die die bisherige Praxis kodifiziert.



**Abb. 10.** Beispiel eines Vergleichs der Ergebnisse der Berechnungen des HQ100 durch mehrere Methoden für das Myjava Einzugsgebiet in der Slowakei.

### 5. Danksagung

Die präsentierten Resultate wurden im Rahmen der Projekte APVV 0443-07 und APVV 0012-07 entstanden. Die Autoren bedanken sich bei der Slowakischen Wissenschaftlichen Forschungsagentur APVV für die Unterstützung der Forschung.

## Literatur

- Bara, M., Gaál, L., Kohnová, S., Szolgay, J., Hlavčová, K. (2008): Simple Scaling of Extreme Rainfall in Slovakia: A Case Study. *Meteorological Journal*, **11**, No. 4, 153-157
- Blöschl, G., Merz, R. (2008a): Estimation flood risk in Austria. *Slovak Journal of Civil Engineering*, **3**, 13-20
- Blöschl, G., Merz, R. (2008b): Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and causal expansion of information. *Water Resources Research*, **44** (8), article number W08432.
- Blöschl, G., Merz, R. (2008c): Flood frequency hydrology: 2. Combining data evidence. *Water Resources Research*, **44** (8), article number W08433
- Blöschl, G., Merz, R., Humer, G., Hofer, M., Hochhold, A., Wührer, W. (2006): HORA -Hochwasserrisikoflächen Österreich, Hydrologische Arbeiten. Endbericht an das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Sektion VII, 1030 Wien: 27 S., 8 Anhänge
- Bobeé, B., et al. (1995): Recent advances in flood frequency analysis. U.S. National Report to IUGG 1991-1994. Contributions in Hydrology, Washington D.C.
- Burn, D.H. (1990): Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. *Water Resources Research*, **26(10)**: 2257-2265
- Burn, D.H. (1997): Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *J. Hydrol.* **202**, 212-230
- Burn, D.H., Boorman, D.B. (1992): Catchment classification applied to the estimation of hydrological parameters in ungauged catchments. Report 118, Inst. of Hydrology, Wallingford, 71pp.
- Castellarin, A., Burn, D.H., Brath, A. (2001): Assessing the effectiveness of hydrological similarity measures for flood frequency analysis. *J. Hydrol.*, **241** (3-4), 270-287.
- Čerkašin, A. (1964): Hydrologická příručka. HMÚ Praha, 223 s.
- Čunderlík, J. (1996): Povodňový režim tokov flyšového pásma. Medzinárodný posterový den ÚVHK FAST Brno
- De Michele, C., Rosso, R. (2002): A multi-level approach to flood frequency regionalisation. *Hydrology and Earth System Sciences*, **6(2)**: 185-194
- Dub, O. (1940): Stanovenie medzných prietokov riek na Slovensku. *Slov. staviteľ*, **10**, 1940, 8, 129 -137
- Dub, O. (1957): Hydrológia, hydrografia, hydrometria. SNTL Bratislava, 526
- DVWK Regeln 101/1999: Wahl des Bemessungshochwassers. Empfehlung zur Berechnung der Hochwasserwahrscheinlichkeit. Verlag Paul Parey, Hamburg
- Dzubák, M. (1992): Metodická pomôcka na stanovenie hydrologických podkladov pre návrh dimenzačných parametrov poldrov na malých povodiach. SvF STU, Bratislava, 40pp.

- FEH (1999): Flood Estimation Handbook. Part 3. Statistical procedures for flood frequency estimation, IH Wallingford, 1999, 325pp.
- Gaál, L., Bara, M., Szolgay, J., Kohnová, S. (2008c): Spatial variability of simple scaling properties of extreme short-term rainfall in the Western Carpathians. In: Geophysical Research Abstracts. 10: Abstracts of the Contributions of the EGU General Assembly. Vienna, Austria 2008
- Gaál, L., Gaume, E., Viglione, A., Szolgay, J., Blöschl, G. (2009): Return period estimation of extraordinary flash flood events in Slovakia: regional frequency analysis using a Bayesian MCMC approach. Geophysical Research Abstracts, 11, EGU2009-11936. EGU General Assembly
- Gaál, L., Kyselý, J. (2007): A comparison of regional approaches to the frequency analysis of extreme precipitation events in Slovakia and Czech Republic. In: Heinonen, M., ed.: Climate & Water: Proceedings of the Third International Conference on Climate and Water. - Helsinki: Finnish Environment Institute SYKE, ISBN 978-952-11-2790-8, 133-139
- Gaál, L., Kyselý, J., Szolgay, J. (2008 b): Region - of - Influence Approach to a Frequency Analysis of Heavy Precipitation in Slovakia. *Hydrology and Earth System Sciences*, **12**, No. 3, 825-839
- Gaál, L., Szolgay, J., Lapin, M. (2008a): Regional Frequency Analysis of Heavy Precipitation Totals in the High Tatras Region in Slovakia for Flood Risk Estimation. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, **38**, No. 3, 327-355
- Gaál, L., Szolgay, J., Lapin, M., Faško, P. (2007): Process-based delineation of regions for a regional frequency analysis of multi-day precipitation totals in the cold season in Slovakia. In: *Contributions to Geophysics and Geodesy*. ISSN 1335-2806, **37**, No. 3, 197-224
- Geiger, H., Zeller, J., Röthlisberger, G. (1991): Starkniederschläge des schweizerischen Alpen und Alpenrandgebietes, Band 7. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL, Birmensdorf.
- Giesecke, J., Bardossy, A. Markovich, D. (2002): Extremwertstatistik. Endbericht. Bundesanstalt fuer Gewaesserkunde, Koblenz, 49 pp.
- Gottschalk, L. (1985): Hydrological regionalization of Sweden, *Hy. Sci. J.*, **30**, 1, 3, 65-83.
- Gottschalk, L., Krasovkaja, I. (2002): L-moment estimation using annual maximum (AM) and peak over threshold (POT) series in regional analysis of flood frequencies. *Norsk Geografisk Tidsskrift* **56(2)**, 179-187
- Halasi-Kun, G. (1968): Die Ermittlung von Hochstabflüssen für Einzugsgebiete kleiner als 300 km<sup>2</sup> im Bereich der Slowakei. Mitteilungen, TU Braunschweig, Heft 22, 105 S.
- Hartigan, J. A. (1975): Clustering Algorithms. New York, John Wiley and Sons.
- Hasbach, B., Kohnová, S., Kubeš, R., Szolgay, J. (2002): Comparison of methods for the estimation of design precipitation on the river Hron. In: XXI. Konferenz der Donauländer, Bucharest, Romania, ISBN 973-0-02759-5, 12pp.

- Heisig, V. (1953): Zlepšení výpočtů maximálních odtoků z menších povodí. *Vodní hospodářství a mechanizace zemědělské výroby*, 1, 18
- Hlavčová, K., Kohnová, S., Kubeš, R., Szolgay, J., Zvolenský, M. (2005): An empirical method for estimating future flood risk for flood warnings. *Hydrology and Earth System Sciences*, **9(4)**, 431-488
- Hlubocký, B. (1977): Opakovanie maximálnych prietokov na slovenských tokoch. Záverečná správa úlohy. Interná publikácia SHMÚ Bratislava, 48 p.
- Hosking, J.R.M., Wallis, J.R. (1997): Regional frequency analysis: an approach based on L-moments. Cambridge University Press, Cambridge; New York; Oakleigh. 224 p. ISBN 0-521-43045-3
- Hrádek, F. (1989): Řešení maximálního povrchového odtoku na modelovém povodí. VŠZ, Praha, 90s.
- Kluge, CH. (1996): Statistische Analyse von Hochwasserdurchflüssen. Dresdner Berichte, TU Dresden, H. 7.
- Kohnová, S. (1997): Regionálna analýza maximálnych špecifických odtokov na malých povodiach Slovenska. Dizertačná práca. SvF STU Bratislava, 159 s.
- Kohnová, S., Szolgay, J. (1995): K používaniu Dubovho vzorca pre výpočet maximálneho storočného špecifického odtoku na malých povodiach Slovenska. *Vodohospodársky časopis*, 43, 1-2, 3-27
- Kohnová, S., Szolgay, J. (1996a): K určovaniu storočného maximálneho špecifického odtoku na malých povodiach. *Vodohospodársky časopis*, 44, 1996a, 2-3, 164-183
- Kohnová, S., Szolgay, J. (1996b): Regionalisierung maximaler Abflußspenden in kleinen Einzugsgebieten der Slowakei. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung*, **28**, 3, 116-121
- Kohnová, S., Szolgay, J. (1999): Regional estimation of design summer flood discharge in small catchments of northern Slovakia. In: Gottschalk, L. – Olivry, C. – Reed, D. – Rosbjerg, D. eds.: *Hydrological extremes: Understanding, Predicting, Mitigating*. IAHS publ. No. 255, IAHS Press Wallingford, 265-268
- Kohnová, S., Szolgay, J. (2000): Regional estimation of design flood discharges for river restoration in mountainous basins of northern Slovakia. In: Marsalek, et al. (eds.), *Flood Issues in Contemporary Water Management*, NATO Science Series, Vol 71. Kluwer Academic Publishers, 41-47. ISBN 0-7923-6452X
- Kohnová, S., Szolgay, J. (2002): Practical applicability of regional methods for design flood computation in Slovakia. In: Weingartner, R., Sperafico, M., eds.: *Proceedings of International Conference on Flood Estimation*, CHR Report II- 17, Bern, 529-539
- Kohnová, S., Gaál, L., Szolgay, J., Hlavčová, K. (2005a): Analýza maximálnych úhrnov zrážok v povodí horného Hrona, STU Bratislava, 162 s., ISBN 80-227-2339-8
- Kohnová, S., Gaál, L., Szolgay, J., Hlavčová, K. (2006b): Regional estimation of design 10-day precipitation totals in the upper Hron region. *Slovak Journal of Civil Engineering*, XIV, 1, 10-18
- Kohnová, S., Hlavčová, K., Szolgay, J., Zvolenský, M. (2007): Influence of Pooling Scheme on Undirect Estimation of Rainfall-Runoff Model Parameters. In: Petraš, J.,

eds.: Water Management and Hydraulic Engineering: Proceedings of 10th International symposium. Croatia, Šibenik, Zagreb: Faculty of Civil Engineering, ISBN 978-953-6272-22-8, 12pp.

Kohnová, S., Hlavčová, K., Szolgay, J., Parajka, J. (2006a): Chapter 7. On the choice of spatial interpolation method for the estimation of 1- to 5- day basin average design precipitation. In: J. Schanze et al. (eds.) Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures. Springer, XI, ISBN: 978-1-4020-4596-7, 77-89

Kohnová, S., Hlavčová, K., Zvolenský, M., Szolgay, J. (2006d): Regional Regression Formulae for Estimation of Rainfall - Runoff Model Parameters in Ungauged Catchments. In: Lapin, M., Matejka, F.: Bioclimatology and Water in the Land. Medzinárodná vedecká konferencia. Strečno 2006, SBS SAV, Bratislava CD, 9 s. ISBN 80-89186-12-2

Kohnová, S., Kriegerová, I., Podolinská, J., Szolgay, J., Hlavčová, K. (2005c): Regional methods for design flood computation in Slovakia (Review and Comparison): In: Nachtnebel, H.P., Jugovic, C.J., eds.: Ninth International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering. Ottenstein, Austria, 369-376, ISBN 3-200-00446-0

Kohnová, S., Lapin, M., Szolgay, J., Gaál, L. (2005b): Methodology for the selection of 10-day maximum precipitation totals and their statistical analysis in the upper Hron region, *Contributions to Geophysics and Geodesy*, **35/3**, 299-318

Kohnová, S., Parajka, J., Szolgay, J., Hlavčová, K. (2006c): On the possibilities of mapping the maximum daily precipitation totals. In: Molnar, P., et al., eds.: 7th International Workshop on Precipitation in Urban areas, Extreme Precipitation, Multisource data measurement and Uncertainty. St. Moritz, 170-174. ISBN 3-309386-65-2

Kohnová, S., Schneider, K., Szolgay, J. (2000a): Untersuchungen zur Anwendbarkeit des Konzeptes der regionalen Homogenität fuer die Bestimmung von Bemessungshochwassern in der Slowakei. In: Moehlmann, Ch. et al.: Berichte 11, TU Kaiserslautern, BRD. ISSN 1433-4860, 67-83

Kohnová S., Szolgay J., Gaál L. (2004): Estimation of design 5-day maximum precipitation totals in the upper Hron region. *Meteorological Journal*, **7**, 2, 79-83

Kohnová, S., Szolgay, J., Čunderlík, J., Hlavčová, K., Demeterová, B. (2000b): Stanovenie N-ročných maximálnych prietokov mimo vodomerných staníc. Rozborová úloha pre tvorbu STN „Kvantifikácia povodňového režimu.“ MŽP SR. 72 s.

Kohnová, S., Szolgay, J., Hlavčová, K. (2005d): K možnosti regionalizácie storočného vrcholového odtokového súčiniteľa na malých povodiach Slovenska. *Acta Hydrologica Slovaca*, **6**, 1, 107-116

Kohnová, S., Szolgay, J., Hlavčová, K. (2008a): Regional Flood Frequency Analysis of Annual Maximum Floods from the Winter Season in Slovakia. *Meteorological Journal*, **11**, No. 1-2, 65-70

Kohnová, S., Szolgay, J., Hlavčová, K., Gaál, L., Parajka, J. (2008b): Extreme Precipitation Mapping for Flood Risk Assessment in Ungauged Basins of the Upper

- Hron River Basin in Slovakia. In: Flood Risk Management: Research and Practice. Proceedings of European Conference. Oxford, UK. Taylor & Francis, London, ISBN 978-0-415-48507-4, 1033-1038
- Kohnová, S., Szolgay, J., Solín, L., Hlavčová, K. (2006e): Regional Methods for Prediction in Ungauged Basins. Key Publishing, Ostrava, 113 pp., ISBN 80-87071-02-6
- Kohnová, S., White, D., Szolgay, J. (2000c): Analyse der räumlichen Variabilität von Starkniederschlägen in der Slowakei für die regionale Hochwasseranalyse. In: XX. Konferenz der Donauländer, Bratislava, 8 S., CD
- Kriegerová, I., Kohnová, S. (2005): Seasonality analysis of flood occurrence in mid-sized catchments in Slovakia. *J. Hydrol. Hydromech.*, **53**, 3
- Malitz, G. et al. (2005): Grundlagenbericht über Starkniederschlagshöhen in Deutschland, (Grundlagenbericht KOSTRA-DWD-2000). Deutscher Wetterdienst – Hydrometeorologie.
- Matúš, R. (2007): The Modeling of Hydrological Joint Events Using Aggregation Operators. PhD. thesis. Department of Water Resources Management. Slovak University of Technology, 120pp.
- Matúš, R., Bacigál, T. (2007): Selection of the Right Copula for Hydrological Extremes. In: *Journal of Electrical Engineering*. - ISSN 1335-3632, **58**, No. 7, 93-96
- Matúšová, E., Kohnová, S., Szolgay, J., Hlavčová, K., Števková, A. (2007): K problematike výberu vhodnej metódy na určenie 100-ročného maximálneho prietoku na malých povodiach Slovenska. In: Čejp, J., Julíne, T., Říha, J., eds.: Rizika ve vodním hospodářství 2007: Brno: ECON, ISBN 978-80-86433-43-1, 386-395
- Mitková, V., Kohnová, S., Pekárová, P. (2004): Porovnanie odhadov maximálnych sezónnych prietokov v profile Dunaj-Bratislava. *Acta Hydrologica Slovaca*, **5**, 1, 52-63
- OTN ŽP 3112-1:03, 2003. Hydrologické údaje povrchových vôd. Kvantifikácia povodňového režimu. Časť 1: Stanovenie N-ročných prietokov a N-ročných prietokových vln na väčších tokoch.
- Parajka, J., Kohnová, S., Szolgay, J. (2004): Priestorová interpolácia parametrov hustoty rozdelenia pravdepodobnosti maximálnych denných zrážkových úhrnov na povodí horného Hrona. *Acta Hydrologica Slovaca*, **5**, 2, 258-265
- Pearson, C.P. (1991): New Zealand Regional Flood Frequency Analysis Using L-moments. *New Zealand Journal of Hydrology*, **30**, No. 2, 53-64
- Pekárová, P., Kohnová, S., Trnavská, E., Miklánek, P., Szolgay, J., Hlavčová, K., Pauerová, I. (2006): On the determination of the 100-year specific peak flows in small catchments for flood risk mapping. *Meteorological Journal*, **9**, 157-164
- Podolinská, J., Šipikalová, H. (2008): T-year maximum discharges on water courses in Slovakia. XXIVth Conference of the Danubian Countries IOP Publishing
- Podolinská, J., Šipikalová, H., Škoda, P., Blaškovičová, L., Demeterová B. (2005): N-year maximum discharges on the Slovakia rivers. Conference Hydrological days 2005

Bratislava, CD, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 4 (2008) 012012  
doi:10.1088/1755-1307/4/1/012012

Podolinská, J., et al. (2006): Spracovanie hydrologických charakteristík – N-ročné maximálne prietoky. Záverečná správa. výskumno- vývojovej úlohy SHMÚ Bratislava, 88s.

Sochorec, R. (1966) : Směrnice pro zpracování N-letých vod. HMÚ Ostrava, 16s.

Solín, Ľ. (1998): Hydrologické regionálne členenie územia: súčasný stav a problémy. Geografický časopis, 50: 139-156.

Solín, Ľ. (2002): Identification of physical regional types for regional flood frequency analysis. In: Weingartner, R., Sperafico, M., eds.: Proceedings of International Conference on Flood Estimation, CHR Report II- 17, Bern, 687-697.

Szolgay, J. (2007): Catchment and river processes: experimental and mathematical modeling. Report to IAHS. Contributions to Geophysics and Geodesy, 37, č.5, Special Issue , ISSN 1335-2806. 69 – 93

Szolgay, J., Kohnová, S. (1997): Computation of the mean annual snowmelt flood and its variability in small catchments of the high core mountainous regions of Slovakia. *Slovak Journal of Civil Engineering*, V, 1-2, 20-27

Szolgay, J., Kohnová, S. (1998): Regional estimation of the snowmelt induced mean annual floods in mountainous regions of Slovakia. In: Tappeiner at al.: Head Water98', European Academy of Bolzano, SCHC, IAHS, ICMH, Merano, 127-131

Szolgay, J., Kohnová, S. (1999): Vergleich der Methoden fuer die Abschaetzung von Bemessungsabfluessen in kleinen und mittleren Flussgebieten der Slowakei. In: Koehler, G.: Bemessungsabfluesse fuer kleine Einzugsgebiete. Berichte No 9, Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft TU Kaiserslautern, 93-105

Szolgay, J., Kohnová, S. (2001a): K potrebe normovania metód určovania N-ročného maximálneho prietoku štatistickými postupmi. In: Kamenský et al.: Vplyv vodohospodárskych stavieb na tvorbu a ochranu životného prostredia. 4. Konf. s medzinárodnou účasťou, Podbanské, KHT SvF STU, 161-16. ISBN 80-88820-18-9

Szolgay, J., Kohnová, S. (2001b): K možnosti prehodnotenia systému určovania N-ročných maximálnych návrhových prietokov na Slovensku. In: IX. Posterový deň s medzinárodnou účasťou. Transport vody, chemikálií a energie v systéme pôda - rastlina - atmosféra. Ed.: Majerčák, J., Hurtalová, T. UH SAV Bratislava, CD, ISBN 80-968480-4-6. 10 pp.

Szolgay, J., Kohnová, S. (2003): Regional flood frequency of L-moments. In: Šoltész, A. et al., eds.: VIII. International symposium on Water Management and Hydraulic Engineering. STU Bratislava, Gdansk Univerzity, University of Zagreb, Podbanské, ISBN 80-227-1954-4, 187-195

Szolgay, J., Kohnová, S., Čunderlík, J., Podolinská, J. (1999): Stanovenie N-ročných maximálnych prietokov vo vodomerných stanicích. Rozborová úloha pre tvorbu STN „Kvantifikácia povodňového režimu.“ MŽP SR, 71s.

Szolgay, J., Kohnová, S., Hlavčová, K., Gaál, L., Bacigál, T. (2008): Appraisal of the hydrological design values of the water work Orlik. Report, SvF STU Bratislava, 127pp. (in Slovak)

- Szolgay, J., Kohnová, S., Hlavčová, K., Minárik, M. (2007a): K používaniu Langbeinovho vzorca pre dobu opakovania v hodnotení povodňového rizika. In: Čejp, J., Julín, T., Říha, J., eds.: Rizika ve vodním hospodářství 2007: Sborník příspěvků/Brno, ECON, ISBN 978-80-86433-43-1. 494-499
- Szolgay, J., Hlavčová, K., Kohnová, S., Lupták, Ľ. (2001): Kvantifikácia N-ročných maximálnych prietokov na základe zrážok. Rozborová úloha pre tvorbu STN Kvantifikácia povodňového režimu. MŽP SR, 82s.
- Szolgay, J., Parajka, J., Kohnová, S., Hlavčová, K. (2009): Comparison of mapping approaches of design annual maximum daily precipitation. *Atmospheric Research*, **92**, 289–307
- Szolgay, J., Parajka, J., Kohnová, S., Hlavčová, K., Lapin, M., Faško, P. (2007): Testing of mapping approaches for estimation of 100-year maximum daily precipitation totals in the upper Hron River basin. In: Contributions to Geophysics and Geodesy. ISSN 1335-2806, 37, No. 3, 225-246
- Šipikalová, H. (1978): Porovnanie metód výpočtu N-ročných prietokov. Záverečná správa výskumnej úlohy. SHMÚ Bratislava
- Takeuchi, K. (1984): Annual maximum series and partial-duration series –evaluation of Langbein’s formula and Chow’s discussion. *Journal of Hydrology*, **68**, 275-284.
- Turčan, J., Szolgay, J., Kohnová, S., Lukáč, M., Turbek, J. (2003): Zhodnotenie stavu a aktualizácia programu technickej normalizácie v hydrológii Slovenska. Vývojová úloha TNK č. 64., MŽP SR, 120 s.
- Urcikán P. (1986): Dimenzovanie stôk modifikáciou Bartoškovej metódy. *Vodní hospodářství*, 3, 63 -69
- Wallis, J.R., Schaefer, M.G., Barker B.L. and Taylor, G.H. (2007): Regional precipitation-frequency analysis and spatial mapping for 24-hour and 2-hour durations for Washington State. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **11** (1): 415-442
- Wiltshire, S.E. (1986): Identification of homogeneous regions for flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, **84**, 287-302
- Zelisková, D., Matúš, R. (2007): The dependence structure of random variables modeled by copulas. In: Proceedings IAM 2007 workshop on informatics, automation and mathematics. ISBN 978-80-227-2751-8, 28-34
- Zvolenský, M., Hlavčová, K., Kohnová, S., Szolgay, J. (2007a): Prediction of rainfall-runoff model parameters in ungauged catchments. In: Boegh, E., et al., eds.: Quantification and Reduction of Predictive Uncertainty for Sustainable Water Resources Management. IAHS Publication 313. IAHS Press, The Netherlands ISSN 0144-7815, 357-364
- Zvolenský, M., Kohnová, S., Hlavčová, K., Szolgay, J., Parajka, J. (2007b): To the application of spatial interpolation methods for estimation of rainfall-runoff model parameters in ungauged catchments. In: *Meteorological Journal*, 10, 10, 145-152

**Anschrift der Verfasser:**

**Univ. Prof., Dr., Dipl. Ing. Ján Szolgay**  
**Univ. Doz., Dr., Dipl. Ing. Silvia Kohnová**  
Slowakische Technische Universität Bratislava  
Institut für Wasserwirtschaft, Fakultät für Bauwesen  
Radlinského 11  
813 68 Bratislava  
Slowakische Republik  
Tel: +421 2 59274 499  
fax: +421 2 529 23 575  
Email: [jan.szolgay@stuba.sk](mailto:jan.szolgay@stuba.sk)  
[silvia.kohnova@stuba.sk](mailto:silvia.kohnova@stuba.sk)

## METHODEN DER RISIKOQUANTIFIZIERUNG

Heidi Kreibich, Annegret H. Thieken

### 1. Einleitung

Entscheidungen über Hochwasserschutzmaßnahmen und andere präventive oder vorsorgende Maßnahmen sollten auf der Basis von umfassenden Risikoanalysen getroffen werden. Diese beinhalten u.a. eine Schätzung potentieller Hochwasserschäden für die verschiedenen Planungsvarianten. Das Hochwasserrisiko setzt sich aus der Hochwassergefährdung und der Vulnerabilität, insbesondere den exponierten Vermögenswerten und deren Schadenanfälligkeit zusammen. Die Wahrscheinlichkeit eines Schadens hängt von dem Zusammenspiel der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Prozesse ab, die bei dem betrachteten Schadenszenario maßgebend sind. Eine solide Risikoquantifizierung ist Voraussetzung für eine angemessene Hochwasservorsorge. Erst wenn mögliche Schadenereignisse und ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten mit großer Zuverlässigkeit bekannt sind, lassen sich abgesicherte Empfehlungen für die verschiedenen Segmente der Hochwasservorsorge (Raumplanung, Risikovorsorge, Nutzungs- und Bauvorschriften etc.) ableiten.

Da wenig über die Faktoren, die die Schäden beeinflussen können, bekannt ist, beschränken sich die meisten Modelle zur Abschätzung von Hochwasserschäden auf den Wasserstand als bestimmenden Faktor. Diese Wasserstand-Schaden-Funktionen sind meist nach Wirtschaftssektoren (Privathaushalte, Öffentliche Gebäude, Dienstleistungssektor etc.) differenziert (z.B. MURL, 2000; IKS, 2001). Einen Überblick über Modelle zur Abschätzung von Hochwasserschäden geben Smith (1994) sowie Merz & Thieken (2004).

In Deutschland basieren beinahe alle bislang entwickelten Schadenmodelle auf der Datenbank HOWAS (HOchWasserSchäden, vgl. Buck & Merkel, 1999). HOWAS enthält direkte Schäden von insgesamt 4038 Objekten von neun Hochwasserereignissen zwischen 1978 und 1994 mit einem Schwerpunkt in Süddeutschland (Buck & Merkel, 1999). Als Schaden bestimmender Faktor wurde der Wasserstand erhoben. Die Schadenwerte und die aus HOWAS abgeleiteten Wasserstand-Schaden-Funktionen weisen jedoch eine beträchtliche Streubreite auf (Merz et al., 2004), die vermutlich durch unterschiedliche, aber nicht erfasste Randbedingungen der Einzelschäden (z.B. Vorsorgemaßnahmen) verursacht werden. Schadenabschätzungen sind daher momentan mit erheblichen Unsicherheiten verbunden (Merz et al., 2004).

Um die Datenlage und das Wissen über Hochwasserschäden zu verbessern sowie die Unsicherheit von Schadenabschätzungen zu reduzieren, indem neben dem Wasserstand weitere Faktoren bei der Schadenabschätzung berücksichtigt werden, wurden im Nachgang des August-Hochwassers 2002 durch das GFZ Potsdam und die Deutsche Rückversicherung, Düsseldorf, in 1697 betroffenen Privathaushalten

computergestützte Telefoninterviews durchgeführt (vgl. Kreibich et al., 2005b; Thieken et al., 2005; 2007). Neben den direkten Schäden an Wohngebäuden und am Hausrat wurden zahlreiche Faktoren, die den Schaden beeinflussen könnten, abgefragt. Dazu gehören u.a. die Hochwassereinwirkung (Wasserstand, Dauer, Fließgeschwindigkeit), die Kontamination des Flusswassers durch Abwasser, Öl oder andere Chemikalien, Frühwarnung und durchgeführte Notmaßnahmen, langfristige Vorsorgemaßnahmen sowie der Wert und die Eigenschaften des betroffenen Gebäudes/Hausrats.

Im vorliegenden Beitrag wird zusammengefasst, welche Faktoren auf Basis dieses Datensatzes die Hochwasserschäden in Privathaushalten beeinflussen. Darüber hinaus wird die Entwicklung des neuen Schadenmodells FLEMOpS erläutert und einige Ergebnisse der Modellvalidierung präsentiert.

## 2. Schadenbeeinflussende Parameter

Zunächst wurde untersucht, wie einzelne Faktoren (Variablen) den Schaden an Gebäuden und am Hausrat beeinflussen. Dabei wurden sowohl die absoluten als auch die relativen, d.h. die auf den jeweiligen Gesamtvermögenswert bezogenen Schäden (im Folgenden Schädigungsgrade) betrachtet. Tab. 1 zeigt, wie sich die Variablenwerte verschiedener Einwirkungsfaktoren im oberen und unteren Quartil der Schadenparameter unterscheiden. Die verschiedenen Faktoren, die die Hochwassereinwirkung beschreiben, d.h. Wasserstand, Fließgeschwindigkeit, Überflutungsdauer und Kontamination, haben in den oberen Quartilen deutlich erhöhte Werte.

**Tab. 1:** Einfluss verschiedener Einwirkungsfaktoren auf Hochwasserschäden in Privathaushalten (verändert nach Thieken et al., 2005). (Legende: ↑↑: Variablenwerte sind höher im 0,75-Quantil des Schadenparameters; Signifikanzniveau  $\leq 0,01$ ; ↑: Variablenwerte sind höher im 0,75-Quantil des Schadenparameters; Signifikanzniveau  $\leq 0,05$ .)

Einwirkungsfaktoren	Absoluter Schaden		Relativer Schaden	
	Gebäude	Hausrat	Gebäude	Hausrat
Wasserstand	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Fließgeschwindigkeit	↑↑	↑	↑↑	↑↑
Überflutungsdauer	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Kontamination	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑

Korrelationsanalysen zwischen den Einwirkungsfaktoren und den Schädigungsgraden zeigen signifikante Korrelationen für Wasserstand, Fließgeschwindigkeit, Überflutungsdauer und Kontamination, wenn alle Daten zusammen betrachtet werden (Tab. 2). Teilt man die Daten jedoch entsprechend unterschiedlicher Hochwassertypen

auf, zeigt sich, dass nur die Faktoren Wasserstand und Kontamination für alle Schäden aller Hochwassertypen signifikant sind (Hristova, 2007). Die Faktoren Fließgeschwindigkeit und Überflutungsdauer haben nur im Fall einer Sturzflut einen signifikanten Einfluss auf die Schädigungsgrade. Verschiedene Hochwassertypen können auch sehr kleinräumig auftreten. Zum Beispiel traten in Dresden am 12. und 13. August 2002 zunächst Sturzfluten an Bächen sowie an der Weißeritz und am Lockitzbach auf. Am 17. August 2002 erreichte dann die Elbe 9,40 m am Pegel Dresden. Außerdem stieg das Grundwasser an manchen Stellen bis zur Geländeoberkante und blieb über mehrere Monate auf hohem Niveau (Kreibich et al., 2005a).

**Tab. 2:** Korrelationsanalyse zwischen den Einwirkungsfaktoren und den Schädigungsgraden für alle Daten und aufgeteilt nach Hochwassertypen: Sperman-Rho (Paarweiser Datenausschluss; \* Korrelation ist auf dem Niveau 0.05 signifikant).

Hochwassertypen	Schädigungsgrade	Wasserstand	Überflutungsdauer	Fließgeschwindigkeit	Kontamination
Alle	Gebäude	0.67*	0.43*	0.18*	0.42*
	Hausrat	0.54*	0.30*	0.07*	0.29*
langsame Flussüberschwemmung	Gebäude	0.55*	0.16*	0.09	0.28*
	Hausrat	0.35*	0.09	-0.02	0.16*
Sturzflut	Gebäude	0.56*	0.35*	0.35*	0.40*
	Hausrat	0.45*	0.13*	0.22*	0.25*
Deichbruch	Gebäude	0.33*	0.12	-0.07	0.18
	Hausrat	0.32*	0.12	-0.09	0.19*
Grundhochwasser	Gebäude	0.35*	0.11	0.03	0.19*
	Hausrat	0.38*	0.14	0.04	0.25*

Neben der Hochwassereinwirkung können sich auch die Gebäudecharakteristik sowie andere Widerstandsfaktoren auf den Schaden auswirken (Tab. 3). Zum Beispiel hat der Vorsorgeindikator in den unteren Quartilen deutlich höhere Werte - genau wie der Indikator für durchgeführte Notmaßnahmen, zumindest im Hinblick auf die Gebäudeschäden.

**Tab. 3:** Einfluss verschiedener Widerstandsfaktoren auf Hochwasserschäden in Privathaushalten (verändert nach Thieken et al., 2005). (Legende: ↑↑: Variablenwerte sind höher im 0,75-Quantil des Schadenparameters; Signifikanzniveau  $\leq 0,01$ ; ↑: Variablenwerte sind höher im 0,75-Quantil des Schadenparameters; Signifikanzniveau  $\leq 0,05$ ; ○: Variablenwerte im oberen und unteren Quartil des Schadenparameters unterscheiden sich nicht signifikant; ↓: Variablenwerte sind niedriger im 0,75-Quantil des Schadenparameters; Signifikanzniveau  $\leq 0,05$ ; ↓↓: Variablenwerte sind niedriger im 0,75-Quantil des Schadenparameters; Signifikanzniveau  $\leq 0,01$ ).

Widerstandsfaktoren	Absoluter Schaden		Relativer Schaden	
	Gebäude	Hausrat	Gebäude	Hausrat
Geb.-/Wohnungsgröße	↑↑	↑↑	↓↓	↑↑
Gebäudequalität	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Notmaßnahmen	↓↓	○	↓↓	↓
Bauvorsorge	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓

Hauptkomponentenanalysen zeigen, dass die zahlreichen Variablen vor allem in folgende Komponenten eingeteilt werden können: 1) Gebäudeeigenschaften (Größe, Typ und Wert des geschädigten Gebäudes/Hausrats), 2) Struktur des betroffenen Haushalts (Größe und Altersstruktur), 3) statische Hochwassereinwirkung (Wasserstand, Überflutungsdauer und Kontaminationen) sowie 4) Vorsorge und Hochwassererfahrung. Weitere Komponenten wie Notmaßnahmen, sozioökonomischer Status des Haushalts oder die dynamische Hochwassereinwirkung (Fließgeschwindigkeit) treten nur in Teildatensätzen auf (Details in Thieken et al., 2005).

Da vor allem die Werte der Komponenten für die statische Hochwassereinwirkung und die Gebäudeeigenschaften signifikant sowohl mit den Gebäude- als auch mit den Hausratschäden korrelierten (Thieken et al., 2005), wurde ein zweistufiges Schadenmodell erstellt. In der ersten Stufe werden Hochwasserschäden auf Basis der statischen Hochwassereinwirkung durch den Wasserstand sowie auf Basis von Gebäudeparametern (differenziert nach Gebäudetypen und Gebäudequalität/Ausstattung) abgeschätzt. In einer zweiten Stufe können Effekte durch Kontaminationen und Vorsorgemaßnahmen berücksichtigt werden. Die praktische Relevanz dieser Faktoren zeigen z.B. die Rhein-/Maashochwasser von 1993 und 1995, bei denen 1995 durch Vorsorge die Schäden bei vergleichbarer Einwirkung gegenüber 1993 in etwa halbiert werden konnten (Wind et al., 1999), sowie das Pfingsthochwasser 1999, bei dem deutliche Schadenerhöhungen durch Ölkontaminationen auftraten (Müller, 2000).

## 1. FLEMOps - Ein Schadenmodell für Wohngebäude

Für die Ableitung des Schadenmodells wurden die 1697 Einzelschäden zunächst klassifiziert, entsprechend den Faktoren Wasserstand (bis 20 cm, 21-60 cm, 61-100 cm, 101-150 cm, über 150 cm), Gebäudetyp (Einfamilienhaus, Reihen-/Doppelhaus, Mehrfamilienhaus) und Gebäudequalität/Ausstattung (einfach, mittel, sehr gut). Für alle Teildatensätze wurden mittlere Schädigungsgrade berechnet (Abb. 1; Details in Büchele et al., 2006). Da hinsichtlich der Schädigungsgrade keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gebäuden einfacher Qualität und mittlerer Qualität existierten, wurde die Klasse „einfache Gebäudequalität“ nicht weiter getrennt behandelt, sondern der mittleren Qualitätsklasse zugeschlagen. Hierbei ist zu beachten, dass sich die „Gebäudequalität“ nicht auf die Widerstandsfähigkeit des Gebäudes gegenüber Hochwasser bezieht, sondern auf das Design oder die Ausstattung des Gebäudes.

Die Widerstandsfähigkeit des Gebäudes gegenüber Hochwasser kann hingegen in einer zweiten Stufe des Schadenmodells berücksichtigt werden, da Zu- und Abschlüge für die Fälle „keine Kontamination - keine Vorsorge“, bis „keine Kontamination - sehr gute Vorsorge“ und „starke Kontamination - keine Vorsorge“ berechnet wurden (Tab. 4). Für diese Auswertung wurden die Angaben zur privaten Vorsorge (verschiedene Maßnahmen der Verhaltens- und Bauvorsorge, siehe Kreibich et al., 2005b) und zu den Kontaminationen (keine, Kontamination durch Abwasser, Chemikalien und/oder Öl) zu Indikatoren zusammengefasst, die jeweils drei Klassen unterscheiden. Die erste Klasse beschreibt die Abwesenheit eines Faktors, d.h. keine Kontamination bzw. keine Vorsorge. Die Klassen „mittlere“ und „starke“ Kontamination berücksichtigen sowohl die Art der Kontamination als auch den Aspekt einer einfachen, doppelten oder dreifachen Kontamination. Die Klassen „mittlere“ und „sehr gute“ Vorsorge berücksichtigen Art und Anzahl verschiedener Maßnahmen der Verhaltens- oder Bauvorsorge. Da nur sehr wenige Haushalte, die Vorsorgemaßnahmen durchgeführt hatten, durch starke Kontamination betroffen waren (n = 21), wird vermutet, dass starke Kontaminationen durch Hochwasservorsorge verhindert werden können, und die wenigen Fälle, bei denen dies nicht zutrifft, vernachlässigbar sind. Die resultierenden Zu-/Abschlüge sind in Tab. 4 zusammengefasst.

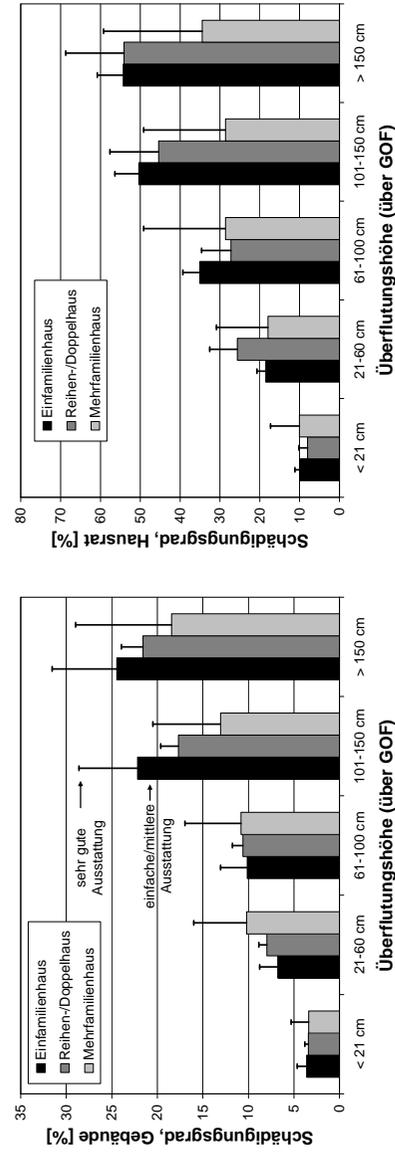


Abb. 1: Mittlere Schädigungsgrade für Wohngebäude und Hausrat für verschiedene Teildatensätze (verändert nach Büchele et al., 2006).

**Tab. 4:** Zu- und Abschläge für Schäden an privaten Wohngebäuden und am Hausrat durch Kontamination und Vorsorge (aus Büchele et al., 2006).

	<b>Zu-/Abschläge Gebäudeschaden</b>	<b>Zu-/Abschläge Hausratschaden</b>
keine Kontamination, keine Vorsorge	0,92	0,90
keine Kontamination, gute Vorsorge	0,64	0,85
keine Kontamination, sehr gute Vorsorge	0,41	0,64
mittlere Kontamination, keine Vorsorge	1,20	1,11
mittlere Kontamination, mittlere Vorsorge	0,86	0,99
mittlere Kontamination, sehr gute Vorsorge	0,71	0,73
starke Kontamination, keine Vorsorge	1,58	1,44

Das Konzept, Skalierungsfaktoren für Schadenfunktionen anzuwenden, wurde bereits von McBean et al. (1988) umgesetzt, die Zu- und Abschläge für Frühwarnung, Überschwemmungsdauer, Sturzfluten und Eis induzierte Fluten berechneten. Auch bei der Anwendung der HOWAS-Schadenfunktionen schlagen Buck & Merkel (1999) vor, Zusatzinformationen wie Alter, Größe und Ausstattung der Gebäude sowie Vorwarnzeiten oder die Überflutungsdauer durch Skalierung der mittleren Schadenfunktion mit Hilfe von Expertenwissen zu berücksichtigen.

Bei der Anwendung dieses mikroskaligen Schadenmodells muss für jedes betroffene Gebäude entschieden werden, in welche Klasse (Kombination aus Wasserstand, Gebäudetyp und Gebäudequalität) es gehört, so dass der mittlere Schädigungsgrad (Abb. 1) abgeschätzt werden kann. Der berechnete relative Schaden kann in einer zweiten Stufe, falls die benötigten Informationen vorliegen, durch die Faktoren für Vorsorge und Kontamination in Tab. 4 angepasst werden und schließlich mit dem Gebäudewert multipliziert werden, um den absoluten Schaden zu erhalten.

Da für eine Modellanwendung in größeren Gebieten die Gebäudedaten des amtlichen Liegenschaftskatasters (ALK) oft zu umfangreich sind und darüber hinaus in der Regel keine Informationen über den Gebäudetyp und die Gebäudequalität enthalten, sind die mikroskaligen Schadenmodelle so zu skalieren, dass sie auf größere, einheitliche Landnutzungseinheiten anwendbar sind. Deshalb wurde folgendes Skalierungsverfahren auf Basis von statistischen Daten (INFAS Geodaten, 2001) entwickelt.

Die INFAS-Gebäudetypen, die die Zusammensetzung des Gebäudebestandes in einer Gemeinde beschreiben, wurden zunächst den drei Wohngebäudetypen des mikroskaligen Schadenmodells (Einfamilienhäuser, Reihen-/Doppelhäuser und Mehrfamilienhäuser) zugeordnet. Danach wurde pro Gemeinde der prozentuale Anteil der Gebäudetypen ermittelt und mit einer Clusterzentrenanalyse (k-means mit euklidischer Distanz) in SPSS weiter klassifiziert. Die 5-Clusterlösung lieferte eine zufrieden stellende Einteilung der Gebäudestruktur. Die Anteile der Gebäudetypen pro Cluster sind in Tab. 5 zusammengestellt.

**Tab. 5:** Clusterzusammensetzung der Wohngebäudestruktur: Anteile der Gebäudetypen in Prozent pro Cluster; EFH: Einfamilienhaus, RDH: Reihen-/Doppelhaus, MFH: Mehrfamilienhaus (verändert nach Thieken et al., 2008).

Cluster	Anteil EFH [%]	Anteil RDH [%]	Anteil MFH [%]	Beschreibung
1	12,00	5,13	82,87	Mehrfamilienhaus-dominiert
2	31,35	24,58	44,07	Mischbebauung (hoher Anteil MFH)
3	37,51	46,19	16,30	Mischbebauung (hoher Anteil RDH)
4	68,51	21,43	10,05	Mischbebauung (hoher Anteil EFH)
5	92,25	4,81	2,94	Einfamilienhaus-dominiert
Alle	73,2	14,3	12,5	Mittlere Zusammensetzung

Weiterhin enthalten die INFAS Geodaten (2001) Angaben zur Gebäudequalität. Die Gebäude werden in sechs Qualitäts- bzw. Ausstattungsklassen eingeteilt, wobei 1 eine exklusive Gebäudequalität/Ausstattung beschreibt und 6 eine sehr einfache. Da keine Unterteilung nach Gebäudetypen vorgenommen wurde, wurde für die Anwendung des Schadenmodells ein mittlerer Wert pro Gemeinde berechnet, der in drei Klassen (gute bis exklusive Ausstattung; mittlere Ausstattung; einfache Ausstattung) unterteilt wurde.

Bei der mesoskaligen Schadenabschätzung wird mit Hilfe dieser Informationen ein mittleres Schadenmodell pro Gemeinde aufgestellt, in das die Schadenfunktionen für die verschiedenen Gebäudetypen entsprechend ihrem Anteil gewichtet eingehen. Pro Rasterzelle wird je nach Wasserstandsklasse ein mittlerer Schädigungsgrad berechnet, der multipliziert mit dem zugehörigen Vermögensbestand (Kleist et al., 2006; Thieken et al., 2006) einen absoluten Schaden pro Rasterzelle liefert. Dieses Vorgehen ermöglicht die deutschlandweite Anwendung des Schadenmodells.

Das mesoskalige Modell ist als Web-Service umgesetzt worden und ist über die Vernetzungsplattform Naturkatastrophen NaDiNe online verfügbar (<http://nadine.helmholtz-eos.de/FLEMO.html>). Fachnutzer haben die Möglichkeit, mit ihren eigenen Hochwasserszenarien Modelldurchläufe zu berechnen und mit den Ergebnissen weiterzuarbeiten. Interessenten können in Absprache mit der Sektion Hydrologie am GFZ (FLEMO@gfz-potsdam.de) einen Zugang erhalten.

## 2. Validierung und Anwendung

Modellanwendungen und Validierungen auf der Mikro- und Meso-Skala zeigen vor allem für das Augusthochwasser 2002 sehr gute Ergebnisse (Thieken et al., 2008). Im Vergleich mit anderen Modellen lieferte FLEMOps beste Schätzungen, was die Annahme bestätigt, dass die Unsicherheit bei der Abschätzung von Hochwasserschäden verringert werden kann, wenn neben dem Wasserstand weitere Faktoren berücksichtigt werden.

Beispielhaft wird im Folgenden gezeigt, dass das entwickelte Modell in der Lage ist, in einer Testgemeinde, der Gemeinde Eilenburg an der Mulde in Sachsen, realistische Schadenabschätzungen zu liefern (für weitere Anwendungen und Validierungen siehe Thieken et al., 2008). Die Eingangsdaten und die Ergebnisse der Schadenabschätzung für das August-Hochwasser 2002 sind in Tab. 6 zusammengefasst. Neben dem GFZ-Modell, für das beide Modellstufen angewendet wurden, wurde der Schaden auch mit Schadenfunktionen aus IKSR (2001) und MURL (2000) berechnet. Die Wohngebäudewerte und ihre räumliche Verteilung wurde den Arbeiten von Kleist et al. (2006) und Thieken et al. (2006) entnommen.

**Tab. 6:** Eingangsdaten und Ergebnisse der Schadenabschätzung für die Testgemeinde Eilenburg und das Hochwasser vom August 2002 (verändert nach Apel et al., 2009).

<b>Angaben der Sächsischen Aufbaubank (SAB) für Eilenburg</b>	
Gesamtschaden August 2002, Wohngebäude	77,12 Mill. €
Anzahl der betroffenen Gebäude (Anzahl der Anträge)	765
<b>Telefonbefragung des GFZ Potsdam und der Deutschen Rückversicherung</b>	
Anzahl der befragten Haushalte in Eilenburg	37
Anteil der Haushalte ohne Kontamination	24,3 %
Anteil der Haushalte mit starker Kontamination	64,9 %
Anteil der Haushalte ohne Bauvorsorge	89,1 %
Anteil der Haushalte mit mehr als einer Bauvorsorgemaßnahme	5,4 %
<b>Schadenabschätzung für das August-Hochwasser 2002 (Szenario: 2D-Modellierung mit LISFLOOD-FP von Bates &amp; de Roo, 2000)</b>	
Schadenfunktion aus IKSR (2001)	34,50 Mill. €
Schadenfunktion aus MURL (2000)	9,78 Mill. €
GFZ-Modell, 1. Stufe (Wasserstand, Gebäudetyp, Ausstattung)	48,68 Mill. €
GFZ-Modell, 2. Stufe („keine Vorsorge, starke Kontamination“)	76,92 Mill. €

Das August-Hochwasser 2002 verursachte in der Gemeinde Eilenburg einen Wohngebäudeschaden von 77,12 Millionen Euro (Angabe der Sächsischen Aufbaubank, Stand 17.02.2005). Auf Basis einer hydraulischen Simulation mit LISFLOOD-FP (Bates & de Roo, 2000) wird die beste Schätzung der Schadenangabe der SAB mit dem GFZ-Schadenmodell der 2. Stufe erreicht (Tab. 6).

### 3. Literatur

- Apel H., G. T. Aronica, H. Kreibich & A. H. Thielen (2009) Flood risk analyses—how detailed do we need to be? *Natural Hazards*, **49** (1), 79-98.
- Bates, P. D. & A. P. J. de Roo (2000) A simple raster-based model for floodplain inundation. *Journal of Hydrology*, **236**, 54-77.
- Büchle, B., H. Kreibich, A. Kron, A.H. Thielen, J. Ihringer, P. Oberle, B. Merz & F. Nestmann (2006) Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. *NHESS*, **6**, 485-503.
- Buck, W. & U. Merkel (1999) Auswertung der HOWAS-Schadendatenbank. Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, HY98/15.
- Hristova, B. (2007) Analysis of the difference of flood damages caused by riverine flood, flash floods, levee breaches, and rising groundwater. Master Thesis, Brandenburg Technical University Cottbus, Faculty of Environmental Science and Process Engineering.
- IKSR (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins) (2001) Atlas der Überschwemmungsgefährdung und möglicher Schäden bei Extremhochwasser am Rhein. Koblenz.
- INFAS Geodaten (2001) Das Data Warehouse. Bonn, INFAS GEOdaten GmbH, Status: Dezember 2001.
- Kleist, L., A. H. Thielen, P. Köhler, M. Müller, I. Seifert, D. Borst & U. Werner (2006) Estimation of the regional stock of residential buildings as a basis for comparative risk assessment for Germany. *NHESS*, **6** (4), 541-552.
- Kreibich, H., T. Petrow, A. H. Thielen, M. Müller & B. Merz (2005a) Consequences of the extreme flood event of August 2002 in the city of Dresden (Germany). In: Savic D.A., Marino M.A., Savenije H.H.G., Bertoni J.C. (eds.): Sustainable Water Management Solutions for Large Cities, *IAHS red book publ.* **293**, 164-173.
- Kreibich, H., A. H. Thielen, T. Petrow, M. Müller & B. Merz (2005b) Flood loss reduction of private households due to building retrofitting - Lessons learned from the Elbe floods in August 2002. *NHESS*, **5**, 117-126.
- McBean, E. A., J. Gorrie, M. Fortin, J. Ding & R. Moulton (1988) Adjustment Factors for flood damage curves. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **114** (6), 635-646.
- Merz, B. & A. H. Thielen (2004) Flood Risk Analysis: Concepts and Challenges. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, **56** (3-4), 27-34.
- Merz, B., H. Kreibich, A. Thielen & R. Schmidtke (2004) Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings. *NHESS*, **4** (1), 153-163.
- Müller, M. (2000) Die Auswirkungen von Deichbrüchen und Heizöllagerung auf Überschwemmungsschäden bei Wohngebäuden. *Versicherungswirtschaft*, **151** (10), 693- 696.

MURL (2000) Potentielle Hochwasserschäden am Rhein in NRW. Ministerium für Umwelt Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.

Smith, D. I. (1994) Flood damage estimation – A review of urban stage-damage curves and loss functions. *Water SA*, **20** (3), 231-238.

Thielen, A.H., M. Müller, H. Kreibich & B. Merz (2005) Flood damage and influencing factors: New insights from the August 2002 flood in Germany. *WRR*, **41(12)**. W12430.

Thielen, A. H., M. Müller, L. Kleist, I. Seifert, D. Borst & U. Werner (2006) Regionalisation of asset values for risk analyses. *NHESS*, **6** (2), 167-178.

Thielen, A. H., H. Kreibich, M. Müller & B. Merz (2007) Coping with floods: A survey among private households affected by the August 2002 flood in Germany. *Hydrological Sciences Journal*, **52** (5), 1016-1037.

Thielen, A. H., A. Olschewski, H. Kreibich, S. Kobsch & B. Merz (2008) Development and evaluation of FLEMOps – a new Flood Loss Estimation MOdel for the private sector. In: D. Proverbs, C. A. Brebbia, E. Penning-Rowsell: Flood Recovery, Innovation and Response. 315-324.

Wind, H. G, T. M. Nierop, C. J. de Blois & J. L. de Kok (1999) Analysis of flood damages from the 1993 and 1995 Meuse flood. *WRR*, **35** (11), 3459-3465.

**Korrespondenz an:**

**Dr. Heidi Kreibich**

Helmholtz-Zentrum Potsdam

Deutsches GeoForschungsZentrum, Sektion Hydrologie

Telegrafenberg

D-14473 Potsdam

Deutschland

Tel: +49 331 288 1550

Fax: +49 331 288 1570

Email: kreib@gfz-potsdam.de

## **HOCHWASSERABFLUSSGEBIETE UND GEFAHRENZONEN ZUR RISIKOKOMMUNIKATION MIT DER RAUMPLANUNG "DER SALZBURGER WEG"**

Robert Loizl

### **1. Ausweisung der Hochwasserabflussräume und Gefahrenzonen - Praxis vor den Hochwasserereignissen 2002**

#### **1.1 Ausweisung der Hochwasserabflussräume**

Die sukzessive Ausschaltung von Hochwasserrückhalteräumen bewirkt eine Beschleunigung der Hochwasserwelle und eine Erhöhung der Hochwasserspitze in den flussabwärts liegenden Talabschnitten. Weiters entspricht die Schaffung von zusätzlichem, neuem Gefährdungs- und Schadenspotenzial in den Überflutungsräumen nicht den schutzwasserwirtschaftlichen Zielsetzungen.

Die Bundeswasserbauverwaltung in Salzburg setzte sich daher als Fachdienststelle schon viele Jahre vor den dramatischen Hochwasserereignissen in den Jahren 2002 und 2005 konsequent für die Erhaltung der noch vorhandenen Hochwasserabfluss- und -rückhalteräume ein. Dabei entstanden vor allem in den alpinen Tallagen des Landes, welche gleichzeitig auch dicht besiedelte und intensiv genutzte Lebens- und Wirtschaftsräume sind, immer wieder Interessenskonflikte mit den raumordnerischen und wirtschaftspolitischen Entwicklungszielen der Gemeinden.

Sowohl die wirtschaftliche Entwicklung als auch die Siedlungstätigkeit konzentrierte und konzentriert sich vorwiegend in den ebenen, durch Infrastruktureinrichtungen in der Regel gut erschlossenen Talböden.

Bis zum Augusthochwasser 2002 wurde innerhalb der HQ30-Flächen die Neuausweisung von Bauland aus schutzwasserwirtschaftlicher Sicht grundsätzlich als nicht zulässig beurteilt. Die rechtliche Grundlage dafür bildet jene Bestimmung im Raumordnungsgesetz, nach der Flächen, die im Gefährdungsbereich von Hochwässern liegen, nicht als Bauland ausgewiesen werden dürfen. Da jedoch der Hochwassergefährdungsbereich im Raumordnungsgesetz nicht näher definiert ist, wurde für dessen Abgrenzung in Anlehnung an die derzeitige Regelung nach § 38 (3) WRG sinngemäß das 30-jährliche Hochwasserabflussgebiet herangezogen.

Die Freihaltung der Hochwasserrüberflutungsflächen außerhalb der HQ30-Anschlaglinie war bei der damaligen Rechtslage in Raumordnungs- und Baurecht - insbesondere auch im Hinblick auf den o.a. Interessenskonflikt - in der Praxis kaum umsetzbar.

Aufgrund der Ausbaugröße der Salzburger Flüsse wird ein erheblicher Teil der hochwassergefährdeten Siedlungen jedoch erst bei großen Hochwasserereignissen ab der Größenordnung eines HQ100 überflutet (z.B. Stadt Hallein, Stadt Salzburg). Gerade das Augusthochwasser des Jahres 2002 verdeutlichte den Umstand, dass bei einem HQ100 (oder einem noch größeren Ereignis) jedoch Retentionsräume, die

bereits unter dem HQ30 geflutet werden, keine Dämpfung der Wellenspitze bewirken. Für solche großen Ereignisse sind nur Retentionsräume wirksam, die erst bei sehr hohen, deutlich über dem HQ30 liegenden Abflüssen aktiviert werden.

Aus fachlicher Sicht wurde daher im Anschluss an das Katastrophenhochwasser 2002 gefordert, dass auch zwischen der Anschlaglinie des HQ30 und des HQ100 die für den Hochwasserabfluss und –rückhalt wesentlichen Überflutungsräume erhalten werden sollten (nicht der gesamte HQ100 Überflutungsraum). Als Voraussetzung dafür müssen diese für den Hochwasserabfluss und –rückhalt wesentlichen Überflutungsräume im Rahmen der schutzwasserwirtschaftlichen Planungen in Zukunft zusätzlich ermittelt und dargestellt werden.

Dieser Vorschlag ging konform mit dem damals in Ausarbeitung befindlichen Änderungsentwurf für die RIWA-T (Technische Richtlinien für die Bundeswasserbauverwaltung bzw. Richtlinien zur Gefahrenzonenausweisung, Fassungen 2006; seit 01.06.2006 in Kraft), nach denen im Rahmen eines Gefahrenzonenplanes künftig die für den Hochwasserabfluss und –rückhalt wesentlichen Flächen als Rot-Gelbe Zone ausgewiesen werden können.

## **1.2 Ausweisung der Gefahrenzonen**

Seitens der Wildbach- und Lawinenverbauung wurden für das Land Salzburg bereits vor dem Hochwasserjahr 2002 nahezu flächendeckend Gefahrenzonenpläne im eigenen Betreuungsbereich erstellt. Derzeit werden laufend Revisionen der bestehenden Pläne durchgeführt. Diese werden einerseits nach beendeten Verbauungen notwendig, andererseits dann, wenn sich auf Grund neuerer Erkenntnisse Notwendigkeiten von Änderungen bei bestehenden Gefahrenzonenplänen ergeben.

Aufgrund der Planungsgrundsätze der RIWA-T aus dem Jahr 1994, nach welchen Auswirkungen aus Gefahrenmomenten wie Flussverwerfungen, Ufer- und Damnbrüchen, Geschiebeeinstößen, Rutschungen, Verklausungen, Wasserstauen, Grundeisbildung, Eisstoß, Qualmwasseraustritten u. dgl. ersichtlich zu machen sind, wurden in Salzburg bis zum Jahr 2002 keine Gefahrenzonenplanungen durch die BWV nach diesen Bestimmungen durchgeführt. Begründet war dies vor allem darin, dass bei einem solchen Berechnungsansatz, dem eine Analyse aller Gefahren samt deren ungünstigster Überlagerung zu Grunde zu legen war, sich in vielen alpinen Tälern die Hochwasserabflussbereiche sowie auch die Roten Zonen praktisch über den gesamten Talboden erstrecken würden. Unter Berücksichtigung der Wildbachgefahrenzonen auf den Schwemmkegeln der Seitenzubringer sowie der Gefährdungsbereiche infolge Steinschlag und Lawinen an den Talhängen würden in diesen Tälern letztlich kaum besiedelbare Flächen übrig bleiben.

Eine diesbezügliche Änderung der RIWA-T 1994 wurde bereits vor dem Jahr 2002 mit dem BMLFUW und den anderen Bundesländern diskutiert. Die Bundeswasserbauverwaltung Salzburg vertrat dabei die Ansicht, dass in den Planungsgrundsätzen die taxative Aufzählung der Gefahrenmomente entfallen sollte und es vielmehr dem verantwortlichen, fachkundigen Planer überlassen werde, welche dieser Gefahren-

momente im konkreten Fall – abhängig von der Charakteristik des Gewässers und den regional völlig unterschiedlichen Randbedingungen - anzusetzen sind.

Da im Betreuungsbereich der Bundeswasserbauverwaltung Salzburgs vor dem Jahr 2002 keine aktuellen Gefahrenzonenpläne vorlagen, wurden, wie bereits erwähnt, die Gefährdungsbereiche von Hochwässern gem. § 17 Abs. 5 ROG in der Regel den HQ30 – Überflutungsflächen gleichgesetzt (HQ30 = quasi "Rote Zone") bzw. wurden diese in besonderen Einzelfällen durch individuelle Beurteilung der Fachabteilung festgelegt.

## **2. Ausweisung der Hochwasserabflussräume und Gefahrenzonen - Praxis nach den Hochwasserereignissen 2002**

### **2.1 Ausweisung der wesentlichen Hochwasserabfluss- und –rückhalteräume – "Der Salzburger Weg der Kooperation von Raumordnung und Schutz-wasserwirtschaft"**

Begleitend zur fachlichen Forderung, dass auch zwischen der Anschlaglinie des HQ30 und des HQ100 die für den Hochwasserabfluss und –rückhalt wesentlichen Überflutungsräume erhalten werden sollten sowie der Schaffung von zusätzlichem neuen Gefährdungs- und Schadenspotenzial in Überflutungsräumen entgegenzutreten ist, mussten auch entsprechende rechtliche Instrumente zur Umsetzung geschaffen werden.

Die Freihaltung der Hochwasserüberflutungsflächen außerhalb der HQ30-Anschlaglinie war unter Zugrundelegung wasserrechtlicher Bestimmungen kaum durchsetzbar (HQ30 bis HQ100 ist quasi „Gelbe Zone“, hoher Siedlungsdruck aufgrund ökonomischer Überlegungen; Geländeanhebungen bzw. – veränderungen unterliegen außerhalb des HQ30-Abflussraumes keiner wasserrechtlichen Bewilligungspflicht!).

Da die Freihaltung dieser Räume aus überregionaler schutzwasserwirtschaftlicher Sicht von Bedeutung ist, war aus Sicht der Bundeswasserbauverwaltung im Land Salzburg zu fordern, dass der Bundesgesetzgeber im Wasserrecht entsprechende Vorsorge trifft, um die Länder bei der Umsetzung dieses Zieles zu unterstützen. Daher wurde vorgeschlagen, dass auf bundesgesetzlicher Ebene im § 38 des Wasserrechtsgesetzes ein Abs.4 neu eingefügt wird, der eine Verordnungsermächtigung für den Landeshauptmann zur Festlegung der für den Hochwasserabfluss und –rückhalt wesentlichen Flächen beinhalten sollte. In den bisherigen Novellen zum Wasserrechtsgesetz 1959 wurde dieser Änderungsvorschlag jedoch bedauerlicherweise nicht berücksichtigt.

Auf landesgesetzlicher Ebene erfolgte in den Jahren 2003 und 2004 eine Neuorientierung im Raumordnungs- und Baurecht. Mit 1. November 2003 wurde von der Salzburger Landesregierung das gemäß § 6 Abs 3 und § 4 Salzburger Raumordnungsgesetz - SROG 1998 überarbeitete Landesentwicklungsprogramm (LEP

2003) für verbindlich erklärt. Im Kapitel "C.2. Naturräumliche Gefährdungen und Wasserwirtschaft" wurden u. a. folgende Ziele neu aufgenommen:

- Absicherung des Dauersiedlungsraumes vor Naturgefahren unter Berücksichtigung des Aspekts der Nachhaltigkeit.
- Freihaltung der Abflussräume und Gewässernahbereiche von Nutzungen, die den Abfluss und die ökologische Funktionsfähigkeit von Gewässern beeinträchtigen.

Als Maßnahmen wurden u. a. formuliert:

- Die durch Naturgefahren bedrohten Bereiche (...) sind von solchen Nutzungen freizuhalten, die eine weitere Erhöhung des Schadenspotentials nach sich ziehen würden (Maßnahmenträger: Regionalverband, Gemeinde; Instrumente: Regionalprogramm, REK, FWP, GFZPI).
- Hochwasserabfluss- und -rückhalteräume sollen als Vorrang- oder Vorsorgeflächen erhalten und gesichert werden (Maßnahmenträger: Bund, Land, Regionalverband, Gemeinde; Instrumente: Schutzwasserwirtschaftliche Grundsatzkonzepte, Förderungen, Regionalprogramm, REK, FWP).

Das LEP 2004 konkretisiert nunmehr das Spannungsfeld zwischen räumlichen Nutzungs- und Entwicklungsabsichten sowie schutzwasserwirtschaftlichen Zielvorstellungen der Schadens- und Gefahrenprävention durch klarere Ziel- und Maßnahmenformulierungen.

Wesentlich tiefgreifender waren jedoch die Vorschläge, die durch eine fachübergreifende "Arbeitsgruppe Hochwasserschutz" im Jahr 2003 zur Änderung des Salzburger Raumordnungsgesetzes 1998, des Bebauungsgrundlagengesetzes 1968, des Baupolizeigesetzes 1997 und des Bautechnikgesetzes 1976 ausgearbeitet wurden. Dieser Gesetzesentwurf wurde Mitte September 2003 zur Begutachtung ausgesendet und ist vom Salzburger Landtag im Jahr 2004 als „Hochwasserschutz-Maßnahmengesetz“ verabschiedet worden.

Bisher orientierte sich die Raumordnung in der Flächenwidmungsplanung an der Anschlaglinie bzw. Höhenkote eines 30-jährlichen Hochwasserereignisses. Im Baurecht war die seit dem Jahr 1900 höchste Hochwasserkote oder die Kote eines 30-jährlichen Hochwassers („amtsbekannt oder nachgewiesen“) maßgeblich. Künftig unterliegt auch der Bereich zwischen HQ30 und HQ100 einer besonderen raumordnungs- und baurechtlichen Vorsorge.

Dieser "Salzburger Weg" in Form des „Hochwasserschutz-Maßnahmengesetzes“ verfolgt v.a. folgende Zielsetzungen:

- Die Kenntlichmachung der Hochwasserabflussgebiete nach wasserrechtlichen Bestimmungen und der für den Hochwasserabfluss und – Rückhalt wesentlichen Flächen sowie der Gefahrenzonen der forstlichen Raumplanung.
- Ein Widmungsverbot im Gefährdungsbereich von Hochwasser, Lawinen, Murgängen, Steinschlag udgl. und auf Flächen, die für den Hochwasserabfluss und –Rückhalt wesentlich sind (§ 17 Abs. 5 Raumordnungsgesetz 1998 idgF.).

- Die Berücksichtigung des 100-jährlichen Bemessungsereignisses für Bauplatzerklärungen (d.h. Nachweis der Kote eines 100-jährlichen Hochwassers).
- Die Versagung der Bauplatzerklärung auf Flächen, die für den Hochwasserabfluss und –Rückhalt wesentlich sind.
- Die Verbesserung der Hochwassersicherheit von Wohnräumen durch die Festlegung des 100-jährlichen Hochwassers (Fußboden von Wohnräumen + 15 cm über HQ100-Kote).
- Die explizite Aufnahme der Berücksichtigung der Hochwassersicherheit für Behälter zur Lagerung flüssiger Brennstoffe im Bautechnikgesetz (ermöglicht die Vorschreibung von Auftriebssicherungen).
- Die Möglichkeit bei erteiltem Baukonsens nachträglich zusätzliche Auflagen und Bedingungen, soweit dies zur Beseitigung von Gefährdungspotenzialen erforderlich ist, vorzuschreiben.

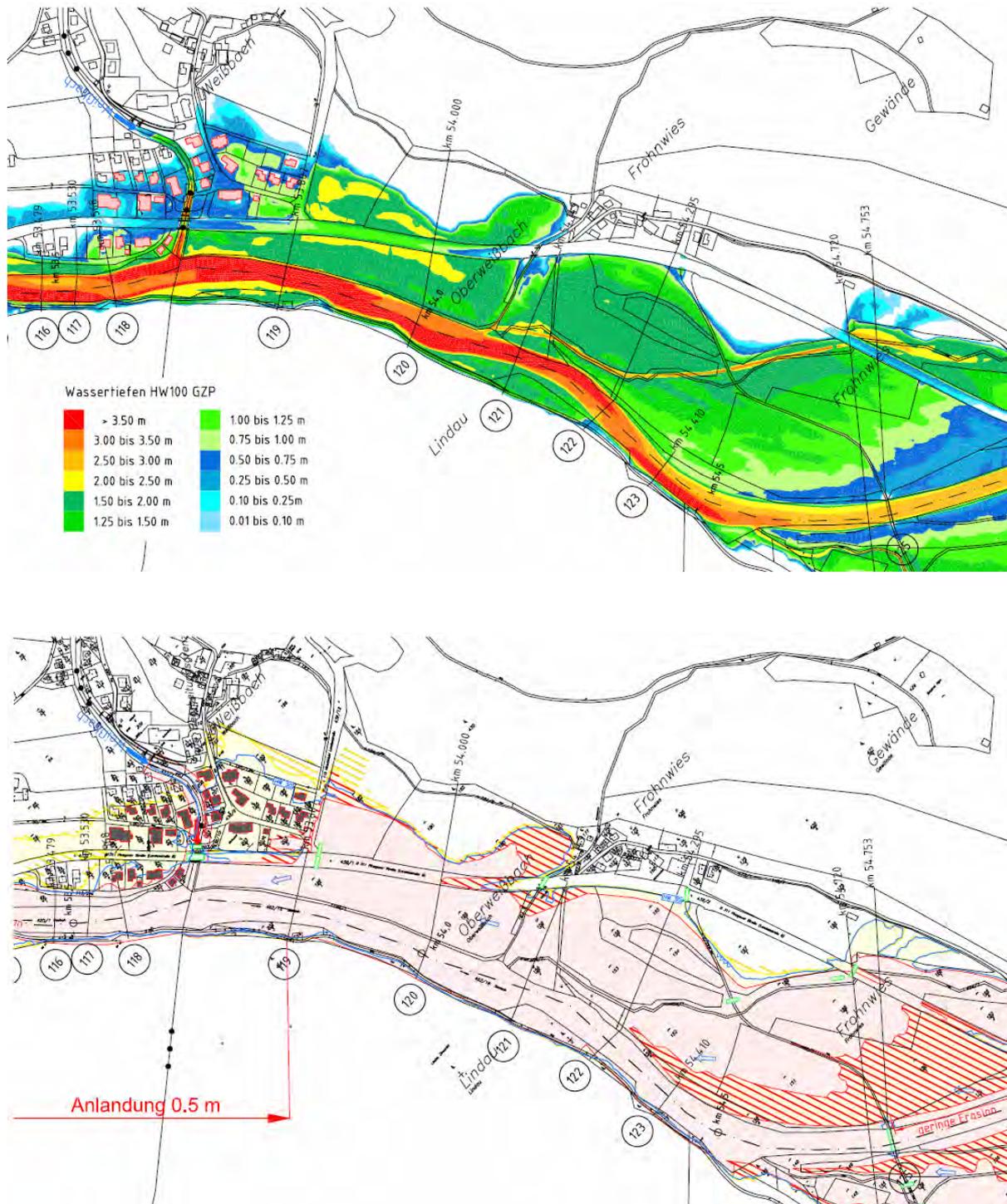
Mit diesen Änderungen ist aus schutzwasserwirtschaftlicher Sicht im Land Salzburg eine verstärkte Kooperation der Gemeinden entlang von Fließgewässern - etwa im Rahmen überörtlicher Raumordnungsinstrumente - zur Sicherung der wesentlichen Hochwasserabfluss- und -rückhalteräume postuliert worden. Damit ist eine effektive Flächenvorsorge auf der Ebene der Regional- und Gemeindeplanung zu betreiben. Somit ist ein rigoroses Freihalten der Gefährdungsbereiche sowie der wesentlichen Abfluss- und Rückhalteräume über die Flächenwidmungsplanung notwendig. Voraussetzung ist, dass durch die Schutzwasserwirtschaft entsprechende Beurteilungsgrundlagen zur Verfügung gestellt werden.

## **2.2 Ausweisung der Gefahrenzonen**

Aufgrund der Erfahrungen aus den Hochwasserereignissen im Jahr 2002 setzte sich in Salzburg die Erkenntnis durch, dass auch im Betreuungsbereich der BWV sowohl als Grundlage für die Beurteilung der Gefährdungsbereiche als auch für die Abgrenzung der für den Hochwasserabfluss und –rückhalt wesentlichen Flächen, künftig auch die Erstellung von Gefahrenzonenplänen anzustreben ist.

Grundsätzlich konnten Gefahrenzonenpläne des Flussbaues nach der RIWA-T 1994 im Rahmen von schutzwasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepten oder als eigenständige Planungen durchgeführt werden. Im Jahr 2003 wurde daher begonnen im Rahmen der Ergänzung und/oder Aktualisierung der schutzwasserwirtschaftlichen Planungsgrundlagen bei der Erstellung von Gewässerbetreuungskonzepten für die wichtigsten Hauptgewässer die Ausarbeitung von Gefahrenzonenplänen mit zu beauftragen (Gefahrenzonenplanung im Rahmen des GBK Lammer – Fertigstellung 2006, GBK Saalach – Fertigstellung 2009, GBK Obere Salzach – Fertigstellung 2009, GBK Mur – Fertigstellung 2008 und GBK Taurach-Lonka – Fertigstellung 2008).

Für die Ausweisung der Gefahrenzonen liegen bei diesen GBKs als hydraulische Berechnungsgrundlagen überwiegend 2-d instationäre Abflussmodelle vor (vgl. Abbildung 1).



**Abb. 1:** Lageplan mit Wassertiefen und dazugehöriger GFZP (Quelle: DI. Dr. Bernhard Sackl, hydroconsult GmbH, Graz, 2007)

Diese Gefahrenzonenpläne orientieren sich an der seit Juni 2006 gültigen RIWA-T bzw. den zeitgleich ergangenen Richtlinien zur Gefahrenzonenausweisung. Die grundsätzlichen Aspekte zur Vorgangsweise bei der Ermittlung der Gefahrenzonen werden nachfolgend näher erläutert.

### **3. Vorgangsweise bei der Ermittlung der Gefahrenzonen**

#### **3.1 Ausweisungsgrundsätze**

Die RIWA-T in der geltenden Fassung sowie die Richtlinien zur Gefahrenzonenausweisung (Fassung 2006) lassen einen gewissen Interpretationsspielraum offen, was die Ermittlung der einzelnen Zonen betrifft. Im Folgenden wird die Vorgangsweise bei der Ermittlung der Zonen beschrieben.

Folgende Ausweisungsgrundsätze sind anzuwenden:

- Gefahrenzonenpläne haben die Art und das Ausmaß der Gefahren bei Eintritt des Bemessungsereignisses unter Berücksichtigung der Geschiebe- und Wildholzföhrung darzustellen. Als „Bemessungsereignis“ sind Hochwasserabflüsse mit einer 100-jährlichen Eintrittswahrscheinlichkeit zu verstehen.
- Hierbei sind Auswirkungen aus Gefahrenmomenten wie Flussverwerfungen, Ufer- und Dammböhrchen, Geschiebeeinstößen, Flächenerosionen und Erosionsrinnenbildungen, Rutschungen, Verklausungen, Wasserstauen, Grundeis- und Eisstoßbildungen, Qualmwasseraustritten usw. ersichtlich zu machen. Hochwassergefährdungen aus derartigen Gefahrenmomenten sind auch dann auszuweisen, wenn sie nicht aus HQ100-Abflüssen entstehen, aber vergleichbare oder größere Auswirkungen haben.
- Darüber hinaus ist der Gefahrenbereich bei Überschreiten des Bemessungsereignisses bis HQ300 einschließlich des dadurch ausgelösten Versagens schutzwasserbaulicher Anlagen darzustellen.
- Die Pläne sind an den Beröhrungsstellen mit Wildbacheinzugsgebieten mit den Gefahrenzonenplänen der Wildbachverbauung abzustimmen.
- Die Erkundung der Gefahrenursachen hat unter Berücksichtigung der geologischen, hydrogeologischen, hydrologischen, meteorologischen, klimatischen und biologischen Verhältnisse sowie der landeskulturellen und der übrigen anthropologischen Einflüsse zu erfolgen. Auf den jeweiligen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse ist Bedacht zu nehmen. Methodik und Genauigkeit sind in jedem Einzelfall nach den örtlichen Bedürfnissen festzulegen.
- Die Berücksichtigung der Wirksamkeit baulicher Anlagen hat die Beurteilung des Standes der Technik zur Voraussetzung.

### **3.2 Kriterien für die Zonenabgrenzung**

#### **HW30-Zone (Zone wasserrechtlicher Bewilligungspflicht)**

Die Anschlaglinie des HW30 gemäß § 38 Abs. 3 WRG ist auszuweisen.

#### **Rote Zone (Bauverbotszone)**

Als Rote Zone werden Flächen ausgewiesen, die zur ständigen Benutzung für Siedlungs- und Verkehrszwecke wegen der voraussichtlichen Schadenswirkungen des Bemessungsereignisses nicht geeignet sind. Das sind Abflussbereiche und Uferzonen von Gewässern, in denen Zerstörungen oder schwere Beschädigungen von Bauobjekten, von Verkehrsanlagen sowie von beweglichen und unbeweglichen Gütern möglich sind und vor allem das Leben von Personen bedroht ist. Als Rote Zone sind auszuweisen:

Gewässerbett und Bereiche möglicher Uferanbrüche unter Berücksichtigung der zu erwartenden Nachböschungen und Verwerfungen (Umlagerungen) einschließlich dadurch ausgelöster Rutschungen. Im Regelfall wird entlang größerer Gewässer grundsätzlich ein 10 m-Streifen entlang der Böschungsoberkante des Flussbettes ausgewiesen, bei kleineren Gewässern ein 5 m-Streifen.

Überflutungsbereiche, wo die Kombination von Wassertiefe  $t$  [m] und Fließgeschwindigkeit  $v$  [m/s] folgende Grenzwerte überschreitet:

$$t \geq 1,5 - 0,5 \times v \text{ oder } v \leq 3,0 - 2,0 \times t \text{ für } 0 \leq v \leq 2,0$$

Bereiche mit Flächenerosion und Erosionsrinnenbildung bei Überschreitung der für die jeweiligen Boden- und Geländebeziehungen zulässigen Grenzwerte für Fließgeschwindigkeit  $v$  [m/s] und Schleppspannung  $t$  [N/m<sup>2</sup>]

#### **Rot-Gelbe Zone (Retentions-, Abfluss- und wasserwirtschaftliche Vorrangzone)**

Als Rot-Gelbe Zone werden Flächen ausgewiesen, die für den Hochwasserabfluss notwendig sind oder auf Grund der zu erwartenden Auswirkungen bei den Abfluss beeinträchtigenden Maßnahmen auf das Gefahrenpotenzial und das Abflussverhalten des Gewässers eine wesentliche Funktion für den Hochwasserrückhalt aufweisen.

#### **Gelbe Zone (Gebots- und Vorsorgezone)**

Als Gelbe Zone werden die verbleibenden Abflussbereiche von Gewässern zwischen der Abgrenzung der Roten bzw. Rot-Gelben Zone und der Anschlaglinie des Bemessungsereignisses HW100 ausgewiesen, in denen unterschiedliche Gefahren geringeren Ausmaßes auftreten können. Beschädigungen von Bauobjekten und Verkehrsanlagen sowie die Behinderung des Verkehrs sind möglich. Die ständige Benutzung für Siedlungs- und Verkehrszwecke ist in Folge dieser Gefährdung beeinträchtigt.

#### **Blaue Zone (Wasserwirtschaftliche Bedarfszone)**

Als Blaue Zone werden Flächen ausgewiesen, die für wasserwirtschaftliche Maßnahmen oder für die Aufrechterhaltung deren Funktion benötigt werden oder deshalb einer besonderen Art der Bewirtschaftung bedürfen.

### **Gefahrenbereich bis HW300 (Hinweisbereich)**

Gefahrenbereiche bei Überschreiten des Bemessungsereignisses bis HQ300 einschließlich des dadurch ausgelösten Versagens schutzwasserbaulicher Anlagen sind rot schraffiert (hinter Schutzeinrichtungen) bzw. gelb schraffiert auszuweisen.

### **3.3 Vorgangsweise für die Zonenabgrenzung**

Neben anderen Gefahrenmomenten wie Damnbrüchen, Brückenverklausungen, Qualmwasser und anderem stellt somit die Berücksichtigung von Geschiebeeinstößen aus Zubringern und damit verbundene Anlandungen ein wesentliches Element des Gefahrenzonenplanes dar. Geschiebeeinstöße der Zubringer, die im Regelfall im Zuständigkeitsbereich der WLW liegen, werden dabei meist für ein 150-jährliches Szenario betrachtet.

Die RIWA-T sieht, wie erwähnt, als Bemessungsereignis ein 100-jährliches Ereignis vor (Überschreitungswahrscheinlichkeit  $p = 0.01$ ). Die Überlagerung eines 100-jährlichen Abflusses an einem Gewässer mit einem 150-jährlichen Ereignis an einem Zubringer würde in vielen Fällen jedoch ein Bemessungsereignis ergeben, das weit seltener auftritt, als es  $p = 0.01$  entspricht. Dies ist bei der Ermittlung der Gefahrenzonen zu berücksichtigen.

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass als hydraulische Berechnungsgrundlage ein 2d-instationäres Modell vorliegt.

#### **3.3.1 HQ30 - Zone**

Die  $HW_{30}$ -Anschlaglinie kennzeichnet den 30-jährlichen Überflutungsbereich und ist als so genannte „HQ<sub>30</sub>-Zone“ (siehe Pkt. 4.1 der Richtl. zur Gefahrenzonen- ausweisung) Bestandteil des Gefahrenzonenplanes (wasserrechtliche Bewilligungspflicht, vgl. § 38 WRG). Im Gegensatz zu allen anderen Zonen wird dabei nicht davon ausgegangen, dass gleichzeitig mit dem HQ<sub>30</sub> am betrachteten Gewässer massive Geschiebeeinstöße von Zubringern zu erwarten sind. Die Berechnung der  $HW_{30}$ -Anschlaglinie erfolgt daher im Regelfall ohne zusätzliche Anlandungen. Gefahrenmomente wie mögliche Brückenverklausungen werden berücksichtigt.

Neben der  $HW_{30}$ -Anschlaglinie werden auch die  $HW_{10}$ - und  $HW_{100}$ -Überflutungsbereiche ohne Geschiebe- und Verklausungseinfluss ermittelt, jedoch nicht im Gefahrenzonenplan dargestellt. Diese Pläne dienen als interne Informationsgrundlage für die BWV. Sie stellen Szenarien dar, bei denen zwar am betrachteten Gewässer ein n-jährlicher Abfluss auftritt, jedoch Geschiebeeinstöße keine Rolle spielen (z.B. gleichmäßige Gebietsüberregnung insbesondere größerer Einzugsgebiete). Würde man etwa  $HW_{100}$ -Szenarien wie im Gefahrenzonenplan nur mit Geschiebeeinfluss darstellen, hätte man für solche ebenfalls häufig auftretenden Szenarien keine Grundlagen (z.B. für Prognosezwecke) zur Verfügung.

### 3.3.2 Berechnung der übrigen Zonen

Für weitere Zonenabgrenzungen gelten in Bereichen, wo Geschiebeeinstöße von Zubringern eine Rolle spielen, folgende Kriterien. Das Beispiel bezieht sich auf Zubringer mit einer Geschiebezufuhr gemäß einem  $HQ_{150}$ -Ereignis laut WLIV.

A) Einzugsgebiet Zubringer und Hauptvorfluter ähnlich groß und Schwerpunkt nahe zueinander:

Maximum aus  $BHQ = HQ_{30}$  bis  $HQ_{100} + \text{Geschiebe } HQ_{150}$  und

$BHQ = HQ_{100}$  ohne Geschiebe

B) Fläche Einzugsgebiet Zubringer und Hauptvorfluter etwa 1:2 bis 1:10 und Schwerpunkt weiter entfernt zueinander:

Maximum aus  $BHQ = HQ_{10}$  bis  $HQ_{30} + \text{Geschiebe } HQ_{150}$  und

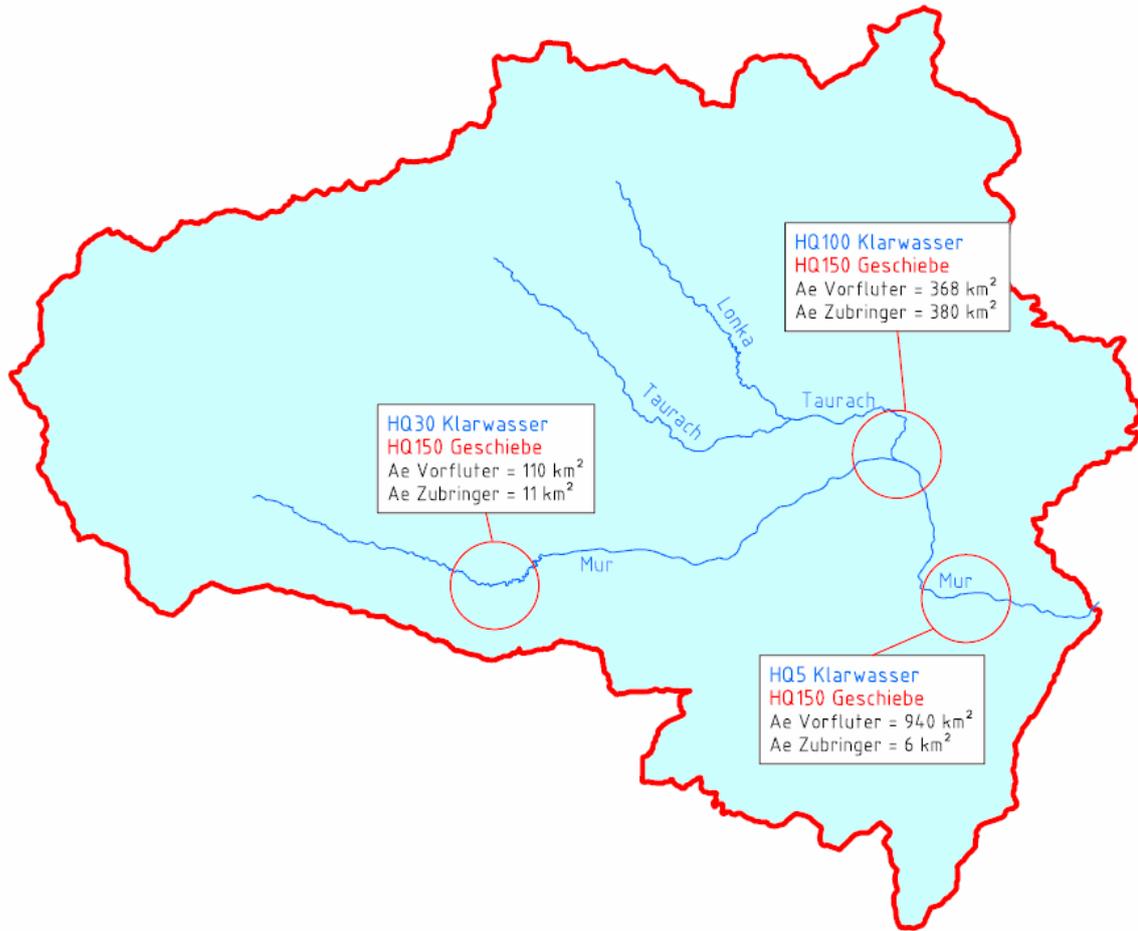
$BHQ = HQ_{100}$  ohne Geschiebe

C) Fläche Einzugsgebiet Zubringer und Hauptvorfluter etwa  $>1:10$  und Schwerpunkt weit entfernt zueinander:

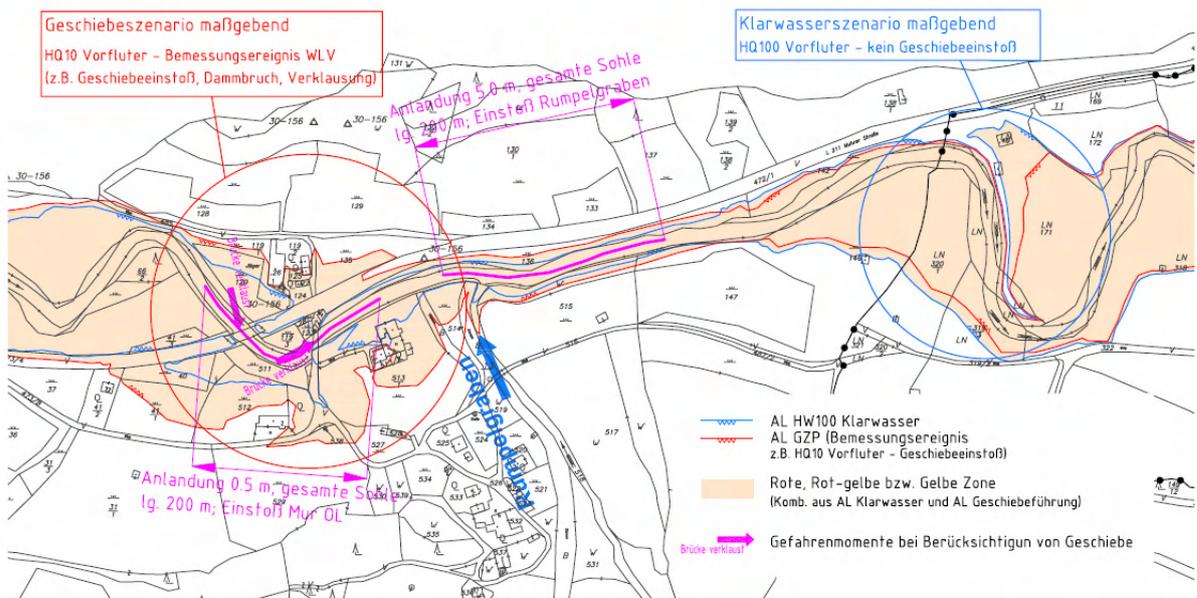
Maximum aus  $BHQ = HQ_5$  bis  $HQ_{10} + \text{Geschiebe } HQ_{150}$  und

$BHQ = HQ_{100}$  ohne Geschiebe

Die im Gefahrenzonenplan darzustellende Zonengrenze ergibt sich demnach aus der Überlagerung zweier Szenarien, aus der das Maximum gebildet wird.



**Abb. 2:** Szenarien im Rahmen der Gefahrenzonenplanung zum GBK Mur (Quelle: DI. Dr. Bernhard Sackl, hydroconsult GmbH, Graz, 2007)



**Abb. 3:** Diese Abbildung zeigt die Überlagerung der beiden Szenarien "HW100 Klarwasser und Geschiebeeinstoß". Im GFZP wird nur die jeweils maßgebliche Linie dargestellt (Quelle: DI. Dr. Bernhard Sackl, hydroconsult GmbH, Graz, 2007)

**Tab. 1:** Diese Tabelle zeigt die maßgebliche Anlandungshöhen und –längen (Szenarien) im Vorfluter (Quelle: DI. Dr. Bernhard Sackl, hydroconsult GmbH, Graz, 2007)

<b>Zubringer-Bachnahme</b>	<b>Gewässer</b>	<b>Mündung</b>	<b>Anlandungs-höhe</b>	<b>betroffener Querschnitt</b>	<b>Länge Anlandung</b>
		<b>[Flusskm]</b>	<b>[m]</b>		<b>[m]</b>
Rumpelgraben	Mur	437.795	5.0	gesamter Flussschlauch	200
Zederhausbach	Mur	433.426	2.0	gesamter Flussschlauch	300
Klausgraben	Mur	432.374	2.0	rechte Sohlhälfte	250
Leißnitzbach St. Margarethen	Mur	425.759	1.0	rechte Sohlhälfte	100
Spitzinggraben	Mur	422.155	1.0	rechte Sohlhälfte	150
Leißnitzbach Tamsweg	Mur	416.065	1.0	gesamter Flussschlauch	300
Thomatalerbach	Mur	410.666	1.5	gesamter Flussschlauch	300
Mislitzbach	Mur	408.759	2.5	gesamter Flussschlauch	100
Tschellabach	Mur	408.215	4.0	gesamter Flussschlauch	200
Kendlbrucker Mühlbach	Mur	404.90	2.0	gesamter Flussschlauch	300
Taurach Mündung	Mur	416.456	1.5	gesamter Flussschlauch	400
Mur-Oberlauf	Mur	438.045	0.5	gesamter Flussschlauch	200
Taurach-Oberlauf	Taurach	12.780	0.5	gesamter Flussschlauch	200
Lonka Mündung	Taurach	7.440	0.5	gesamter Flussschlauch	200
Lignitzbach	Taurach	5.040	1.0	gesamter Flussschlauch	100
Göriachbach	Taurach	2.980	2.0	gesamter Flussschlauch	300
Lessachbach	Taurach	2.100	2.0	gesamter Flussschlauch	500
Lonka Oberlauf	Taurach	9.760	1.5	gesamter Flussschlauch	200

### 3.3.2.1 Rote Zone

Die „Rote Zone“ ergibt sich aus mehreren Kriterien:

- 1) Geschwindigkeit  $v$ , Wassertiefe  $t$  (laut GFZPI-Richtlinien - Pkt. 4.2; Maximum aus Kriterien laut 3.3.2)
- 2) Erosionsgefahr aufgrund hoher Schleppspannungen (Max. aus Kriterium lt. 3.3.2). Bei instationären Berechnungen ist zu beachten, dass im ansteigenden Ast der Hochwasserwelle bei der Überströmung von Böschungen zu wesentlich höheren Schleppspannungen kommen kann, als beim Spitzenabfluss.
- 3) Uferzone mit einer Breite von 5 bis 10 m zur Berücksichtigung von möglichen Uferanbrüchen.

### 3.3.2.2 Rot-gelbe Zone

Die Rot-gelbe Zone liegt zwischen der roten Zone und der Grenze der gelben Zone und beinhaltet wesentliche Abfluss- und Rückhalteräume.

Wesentliche Abflussräume werden aus Strömungsbildern, Wassertiefenplänen und Geschwindigkeitsdarstellungen ermittelt. Hier ist es besonders wichtig, beide möglichen Szenarien laut Pkt. 3.3.2 zu betrachten. Die Retentionswirkung wird aus einer instat. Berechnung für Strecken ohne Zufluss abschnittsweise beurteilt. Eventuell wird auch eine Wassertiefengrenze als einfaches Kriterium festgelegt, die sich beim Bemessungshochwasser einstellt.

### 3.3.2.3 Gelbe Zone

Die „Gelbe Zone“ ist die Anschlaglinie, die sich beim Bemessungshochwasser (siehe 3.3.2) als Maximum aus beiden zu betrachtenden Szenarien ergibt.

Die Annahme von Brückenverklausungen erfolgt dann, wenn nur mehr ein geringer Freibord zur Konstruktions-UK vorhanden bzw. die KUK eingestaut ist. Es wird unterschieden zwischen den Gefahrenhinweisen „Verklausungsgefahr“ (geringer Freibord) und „Brücke verklaust“ (eingestaut). Dabei wird die KUK im hydraulischen Modell 0.5 m abgesenkt. Dieser Gefahrenhinweis erfolgt nur in Ausnahmefällen nicht, wenn eine Wildholzführung im HW-Fall ausgeschlossen werden kann.

*Beispiel: Zur Ermittlung der gelben Zone im Rahmen der GFZP beim GBK Mur wird zusätzlich zur  $HQ_{100}$ -„Klarwasserberechnung“ das in der Abb. 2 dargestellte Szenario berechnet. Das Maximum aus beiden Berechnungen wird im GFZP dargestellt.*

Wo Hochwasserschutzdämme überströmt werden und dabei Dammbücke oder die Erosion von gegenüber dem Vorland erhöhten Uferborden möglich ist, wird dies berücksichtigt. Wenn durch einen Dambruch eine massive, den Spitzenabfluss mindernde Entlastung für den Unterlauf stattfindet, so ist dies in einem möglichst plausiblen Gesamtszenario ebenfalls zu berücksichtigen.

### 3.3.2.4 Gefahrenbereich bis $HQ_{300}$

Die Berechnung des  $HQ_{300}$ -Bereiches erfolgt grundsätzlich mit Berücksichtigung der Geschiebeeinstöße von Zubringern bei  $HQ_{150}$ . Eventuelle Ausnahmen ergeben sich bei

sehr großen Gebieten am Unterlauf, wo allerdings ein rel. kleiner Zubringereinstoß nicht mehr so ausschlaggebend für das große Hauptgerinne ist.

#### **4. Koordinierte und abgestimmte Erstellung der Gefahrenzonenpläne, Dialog mit den Betroffenen und Implementierung in Raumplanung, Bau- und Sicherheitswesen**

##### **4.1 Koordinierte und abgestimmte Erstellung im Arbeitsfeld Naturgefahren**

Die Gefahrenzonenplanung (GFZPI) wird im Bundesland Salzburg im Betreuungsbereich der Bundeswasserbauverwaltung (BWV) im Regelfall im Rahmen von Gewässerentwicklungskonzepten, schutzwasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepten oder Abflussuntersuchungen mit beauftragt. In den überwiegenden Fällen erfolgt die Erstellung eines digitalen Geländemodells aufbauend auf Airborne-Laserscandaten und terrestrischer Vermessungen und anschließend i.d.R. eine 2-dimensionale Abflussuntersuchung als Grundlage der GFZPI.

Nach der allgemeinen Grundlagenerhebung, der Erstellung einer Basiskarte sowie der hydrologischen Grundlagenerhebung stellt im überwiegend alpinen Einzugsgebiet die Definition der maßgeblichen schadensauslösenden Szenarien im Zusammenhang mit Wildbacheinzugsgebieten ein zentrales Arbeitspaket dar. Hier erfolgt bereits im Vorfeld der Abflussuntersuchungen ein intensiver Dialog mit dem Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung (FTD WLW) mit der grundsätzlichen Festlegung und Abstimmung der schadensauslösenden Szenarien.

Nach Durchführung der 2-d hydraulischen Berechnung der maßgeblichen Gefahrenszenarien im Zusammenhang mit Wildbachzubringern erfolgt auf Grundlage eines Entwurfes des Gefahrenzonenplanes eine Plausibilitätsprüfung vor Ort. Diese abgestimmte Vorgangsweise, die auch vice versa bei Erstellung der GFZPI des FTD WLW im Schnittbereich der Betreuungsaufgaben zur Geltung kommt, wird seit 2008/2009 durchgeführt. An dieser nehmen i.d.R. der Planverfasser (als Auftragnehmer der Bundeswasserbauverwaltung), der Leiter des FTD der WLW, der örtlich zuständige WLW – Gebietsbauleiter sowie der Leiter der Schutzwasserwirtschaft sowie das regionale schutzwasserwirtschaftliche Planungsorgan teil. Das Ergebnis dieser fachlichen Vorprüfung und Koordinierung wird schriftlich festgehalten. Anschließend erfolgt die Ausfertigung der abgestimmten Gefahrenzonenpläne.

##### **4.2 Dialog mit den Betroffenen**

###### **4.2.1 Vorgangsweise lt. RIWA**

Entsprechend den Richtlinien zur Gefahrenzonenausweisung für die Bundeswasserbauverwaltung (BMLFUW, Fassung 2006) ist der Gefahrenzonenplan sowohl bei der betroffenen Gemeinde als auch beim Amt der Landesregierung über vier Wochen zur öffentlichen Einsicht aufzulegen. Von der Auflage sind die wasserwirtschaftliche Planung, die Raumordnungsstellen und in Berührungsbereichen

die Dienststellen der Wildbach- und Lawinenverbauung mit der Einladung zur Stellungnahme zu verständigen. Die Auflage des Gefahrenzonenplanes ist durch die Bundeswasserbauverwaltung im Amtsblatt der Landesregierung (Salzburger Landeszeitung) kundzumachen.

Nach Ablauf der Auflagefrist soll die örtliche Prüfung des Gefahrenzonenplanes durch die Bundeswasserbauverwaltung erfolgen. Das Ergebnis dieser Überprüfung ist in einer Niederschrift festzuhalten. Der örtlichen Prüfung sind Vertreter folgender Stellen beizuziehen:

- zwei VertreterInnen der Bundeswasserbauverwaltung (Prüfung auf fachliche Richtigkeit),
- der Raumplanungsdienststelle des Landes und der jeweilige Gemeinde (Planungsbetroffene),
- der/die PlanverfasserIn (Erläuterung des Gefahrenzonenplanes),
- des FTD für Wildbachverbauung in Berührungsbereichen (beratende Mitwirkung).

Gefahrenzonenpläne bedürfen der Genehmigung der Bundeswasserbauverwaltung. Im Anschluss an die örtliche Prüfung werden diese daher der zuständigen Sektion im BMLFUW übermittelt. Nach Genehmigung sind diese unter Anschluss der Niederschrift den betroffenen Dienststellen und Gemeinden zuzuleiten.

#### **4.2.2 Vorgangsweise im Bundesland Salzburg**

Im Bundesland Salzburg wurden im Jahr 2008 an den Betreuungsgewässern Mur, Taurach, Longa und Gasteiner Ache in insgesamt 13 Gemeinden Gefahrenzonenpläne fachlich abgestimmt erstellt, mit den Betroffenen erörtert, aufgelegt und fachlich geprüft sowie genehmigt. Dabei hat sich folgende grundsätzliche Vorgangsweise unter Berücksichtigung der Vorgaben des BMLFUW bis auf weiteres bewährt:

- Erstellung der Gefahrenzonenpläne im Rahmen von Gewässerentwicklungskonzepten, da diese im Bearbeitungsauftrag auch ein Maßnahmenkonzept beinhalten, sowie parallele Vorstellung der Maßnahmenkonzepte zur GFZPI ("Aufzeigen der Gefährdung + konzeptive Lösungsansätze"),
- Erstvorstellung und Diskussion der Gefahrenzonenplanung mit dem jeweiligen Gemeindeoberhaupt und dessen administrativer Leitung ("Erstabklärung der Gefährdung, der individuell Betroffenen sowie der räumlichen Entwicklungsabsichten der Gemeinde mit Bgm.+ Amtsleitung, mit Bgm. auch in seiner Funktion als Baubehörde"),
- Zweitvorstellung und Diskussion der Gefahrenzonenplanung in der Gemeindevertretung oder ggf. in den jeweiligen Bau- und Raumordnungsausschüssen ("Raumplanungsbehörde; Bauabsichten.."), fakultativ (nach Wunsch der Gemeinde) mit Einbezug des/der jeweiligen OrtsplanersIn ("Räumliches Entwicklungskonzept, Flächenwidmungsplan"),

- Bekanntgabe der öffentlichen Auflage über 4 Wochen in der Salzburger Landeszeitung und zugleich in den gemeindeeigenen Publikationsorganen (z.B. "Gemeindebrief"),
- Auflage in der jeweiligen Gemeinde über 4 Wochen und Veröffentlichung auf der Homepage des Landes ([www.salzburg.gv.at/gefahrenzonen](http://www.salzburg.gv.at/gefahrenzonen)),
- fakultativ (nach Wunsch der Gemeinde) öffentliche Präsentationstermine für die GemeindebürgerInnen zur Erläuterung und Diskussion der Gefahrenzonenplanung ("Erörterung des Fachgutachtens GFZPI"),
- Übermittlung allfälliger Einwendungen an den den/die PlanverfasserIn zur neuerlichen Überprüfung und schriftlichen Abklärung als Grundlage der örtlichen Prüfung,
- Örtliche Prüfung, Behandlung allfälliger Einwendungen und schriftlicher Abschluss des Ergebnisses (Niederschrift),
- Übermittlung der Gefahrenzonenplanung samt Niederschriften an das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft mit anschließender Genehmigung,
- Übermittlung der genehmigten Gefahrenzonenplanung samt Niederschriften an die jeweilige Gemeinde (digital und analog) bei gleichzeitiger Information betroffener Dienststellen, Behörden und Ämter,
- Veröffentlichung der geprüften und genehmigten Gefahrenzonenplanung auf der Homepage des Landes Salzburg ([www.salzburg.gv.at/gefahrenzonen](http://www.salzburg.gv.at/gefahrenzonen)),
- Übermittlung der genehmigten Gefahrenzonenplanung samt Niederschriften an die jeweilige Bezirksverwaltungsbehörde (digital und analog), auch mit dem Ersuchen der Ersichtlichmachung der Grenzen des Hochwasserabflussgebietes (WRG: 30-jährliche Hochwasserabflussgebiete) im jeweiligen Wasserbuch und Angebot eines Termins zur Erörterung des "Fachgutachtens GFZPI",
- Übermittlung der genehmigten Gefahrenzonenplanung samt Niederschriften an den FTD für WLVD(digital)
- Darstellung der Planinhalte im Geographischen Informationssystem des Landes Salzburg ("SAGIS") bzw. im Wasserinformationssystem ("WIS").

#### **4.2.3 Implementierung in Raumplanung, Bau- und Sicherheitswesen**

Die Ergebnisse der Gefahrenzonenplanung werden im Rahmen aufsichtsbehördlicher Genehmigungsverfahren zur Raumplanung, aber auch im Rahmen behördlicher Genehmigungsverfahren in den jeweiligen Gemeinden (z.B. baubehördliche Genehmigungen) als fachgutachtlicher Stellungnahmen durch die Bundeswasserbauverwaltung Salzburg bzw. die Fachabteilung Wasserwirtschaft eingebracht.

Zugleich besteht in den betroffenen Gemeinden und Regionen ein Überarbeitungsbedarf der jeweiligen Raumplanungsinstrumente auf überörtlicher und

örtlicher Ebene. Diese Planrevisionen bzw. Überarbeitungen werden dzt. sukzessive umgesetzt.

## 5. Resumee

Im Bundesland Salzburg, im Arbeitsbereich der Bundeswasserbauverwaltung, wird seit dem Jahr 2003 das Instrument der Gefahrenzonenplanung eingesetzt. Die ersten derartigen Plangrundlagen aufbauend auf den neuen Richtlinien des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft aus dem Jahr 2006 wurden im vergangenen Jahr (2008) in einem standardisierten Kommunikationsprozess (in Anlehnung an die Vorgangsweise des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinerverbauung) mit den Planungsbetroffenen erörtert und für das Raumplanungs-, Bau- und Sicherheitswesen in den jeweiligen Gemeinden zur Verfügung gestellt.

Die veränderte Sichtweise mit Abkehr von den bis 2003 erarbeiteten Abflussuntersuchungen mit ausschließlicher Darstellung der Hochwasserabflussgebiete war auch darin motiviert, dass im öffentlichen Bewusstsein im Zusammenhang mit dem geforderten Risikodialog das Instrument des Gefahrenzonenplanes wesentlich besser verankert war, als diese Ausweisung und Darstellung von Überflutungsbereichen. In den überwiegend alpinen Kommunen des Landes Salzburg war der Gefahrenzonenplan (der WLW) bekannt und ist als Instrument der Risikokommunikation in Raumordnungs- und Baurechtsfragen bereits etabliert.

Die bisherige Erfahrung in 13 Gemeinden zeigt, dass der Dialog zur Naturgefahrenkommunikation unter Berücksichtigung der Restgefährdung ("*Restrisiko*") wesentlich zielgerichteter mit den jeweiligen Verantwortungs- und Entscheidungsträgern zu führen ist.

Im Jahr 2009 ist der Abschluss der Erstellung, Auflage und örtlichen Prüfung samt Genehmigung der Gefahrenzonenplanung an Oberer Salzach samt Zubringern, Saalach, Enns und Pongauer - Taurach im Betreuungsbereich der Bundeswasserbauverwaltung vorgesehen.

Bis zum Ende des Jahres 2010 sollen an allen wesentlichen Betreuungsgewässern der Bundeswasserbauverwaltung im Bundesland Salzburg entsprechende Gefahrenzonenpläne zur Verfügung stehen.

**Anschrift des Verfassers:**

**Dipl.-Ing. Robert Loizl, MAS MTD**

Amt der Salzburger Landesregierung, Land Salzburg

Michael-Pacher-Straße 36

A - 5020 Salzburg

Tel.: +43 662 8042-4489

E-Mail: [wasserwirtschaft@salzburg.gv.at](mailto:wasserwirtschaft@salzburg.gv.at)

Web: [www.salzburg.gv.at/wasser.htm](http://www.salzburg.gv.at/wasser.htm)

## WIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG VON HOCHWÄSSERN

Franz Sinabell und Gerhard Streicher

### 1. Einleitung

Schäden durch Naturereignisse sind nur aus menschlicher Perspektive zu bewerten. Die Natur an sich kennt keine Schäden, erst der Mensch bewertet die Auswirkungen natürlicher Ereignisse auf sich und spricht von Schadereignissen. Dies wird deutlich anhand der Besiedlung von Flussräumen, die attraktive Wohn- und Wirtschaftsstandorte sind. Es ist das menschliche Verhalten, das die Voraussetzung für Schädigungen liefert. Die gänzliche Meidung der gefährdeten Räume würde Schädigungen erst gar nicht möglich machen.

Die wirtschaftlichen Vorteile, die sich aus der Besiedlung von Räumen mit Gefahrenpotential ergeben, sind aber so groß, dass ein gewisses Maß an Schädigung hingenommen wird. Ein Planer, der die wirtschaftlichen Aktivitäten in solchen Gebieten steuern würde, hätte folgende einfache Entscheidungsregel, um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Risiko auf der einen Seite und wirtschaftlichen Vorteilen auf der anderen Seite zu erreichen: Grenzkosten und Grenznutzen müssen sich die Waage halten.

Nutzen ist ein ökonomischer Begriff, der den Vorteil für die Menschen beschreibt. Annäherungsweise bestimmt wird dieser Vorteil durch Gewinne oder Einkommen. Aber auch der Zugewinn an Lebensqualität spielt dabei eine Rolle, ist aber schwerer zu quantifizieren. Von Grenznutzen spricht man, wenn der zusätzliche Vorteil durch eine marginale Einheit, etwa ein zusätzliches Wohnhaus in einem Siedlungsraum, gemeint ist.

Der Begriff "Kosten" hat in dieser Gleichung mehrere Facetten. Die erste bezieht sich auf Kosten als alternativer Begriff für Risiko bzw. Schaden. Aus ökonomischer Sicht ist Risiko das quantitative monetäre Maß von Schaden multipliziert mit Eintrittswahrscheinlichkeit. Ein Raum, in dem ein jährlich auftretendes Hochwasser einen realen Schaden von  $x$  verursacht, gilt daher als genauso gefährdet wie ein Raum, in dem 100 Häuser stehen, die von 100jährigen Ereignissen gefährdet sind und im Ereignisfall ebenfalls jeweils im Ausmaß von  $x$  geschädigt werden. Die zweite Bedeutung von "Kosten" nimmt Bezug auf die Kosten der Schadenabwehr. Durch Vorsorgemaßnahmen wie etwa angepasste Bauweise oder Dämme kann das Schadenpotential vor allem von häufigen Ereignissen deutlich gemindert werden. Es lohnt sich aber nicht, jeden erdenklichen technischen Aufwand zu treiben, um Schäden gering zu halten. Vielmehr ist es nur in dem Maß wirtschaftlich, zusätzliche Anstrengungen zur Schadenvermeidung zu setzen, in dem Schäden verhindert werden.

Die dritte Bedeutung von "Kosten" steht im Zusammenhang mit so genannten externen Kosten. Darunter ist zu verstehen, dass der Akteur eine Handlung setzt, die ihm Vorteile bringt, dies jedoch Kosten an anderer Stelle nach sich zieht. Eingriffe, die eine Erhöhung des potenziellen Durchflusses nach sich ziehen – also auch einige

Maßnahmen zur Senkung des Hochwasserrisikos an einer Stelle im Flusslauf – haben durch Verringerung der Retentionswirkung möglicherweise negative Folgen für die Unterlieger. Wenn die Betroffenen im Oberlauf den zusätzlichen Schaden, den sie für Unterlieger verursachen, nicht berücksichtigen, so werden entweder die falschen oder Schutzvorkehrungen in zu hohem Maß getroffen. Die ungezügelte Versiegelung von Flächen verursacht ebenso externe Effekte, wenn nicht gleichzeitig Maßnahmen getroffen werden, den gesteigerten Abfluss zu drosseln.

Eine vierte Bedeutung von "Kosten" bezieht sich auf den umfassenden Begriff, der in der volkswirtschaftlichen Betrachtung zu beachten ist. Dieser Kostenbegriff ist nicht bloß auf jene Aspekte beschränkt, die auch in der Buchhaltung als Kostenposition Berücksichtigung finden. Der Verlust von Leib und Leben, menschliches Leid, die Zerstörung von Kulturgütern, Beeinträchtigungen der Lebensqualität zählen ebenso zu den "Kosten", die in einer umfassenden wirtschaftlichen Bewertung berücksichtigt werden müssen. Solche Kosten und "negativer Nutzen" sind identisch.

Die Kosten-Nutzenanalyse ist die Methode, die eingesetzt wird, um diese Abwägung zwischen Schäden und Schadenvermeidung vorzunehmen. Diese Methode wurde gegen die Mitte des vorigen Jahrhunderts entwickelt, um große Hochwasserschutzprojekte wirtschaftlich zu bewerten. In der Zwischenzeit wird diese Methode für sehr viele Bereiche angewandt in denen öffentliche Gelder zum Einsatz kommen, sei es im Gesundheitswesen oder auch in der Forschungsförderung (methodische Einführen siehe: Jones, 2005; Hanley und Spash, 1995; Hackl und Pruckner, 1994).

Man kann sich die Volkswirtschaft als einen Kreislauf vorstellen. Dieses Modell zeigt, dass Hochwässer, wenn die wirtschaftliche Bedeutung zur Diskussion stellt, nicht nur Schäden verursachen und Nachteile nach sich ziehen. Es gibt vielmehr auch Vorteile. Zum einen bringt die prophylaktische Schadenbegrenzung und Schadenabwehr Beschäftigung und Wertschöpfung. Versicherungsdienstleistungen ermöglichen einen Risikotransfer, und diese Dienstleistung hat ebenfalls einen Wertschöpfungsanteil. Die Schadenbeseitigung und Wiedererrichtung von zerstörter Infrastruktur stimuliert die Wirtschaft. Nicht selten nutzen betroffene Unternehmen eine Katastrophe, um den Maschinenpark und die Ausstattung zu modernisieren, und sind dadurch in der Lage, künftig effizienter zu produzieren. In einer umfassenden Bewertung sind diese Vorteile den Nachteilen gegenüberzustellen. Es wird allerdings nur selten der Fall sein, dass die erwähnten Vorteile annähernd gleich groß sind wie die Schäden. Vielmehr dürfte die Regel sein, dass die Gesellschaft nach einem Hochwasserereignis deutlich schlechter da steht als zuvor. Denn all die vielen Ressourcen, die eingesetzt werden müssen, um den Schaden zu beseitigen, wären von den Betroffenen für Zwecke eingesetzt worden, die ihren Plänen viel eher entsprochen hätten. Die Einschränkung auf "dürfte" deutet an, dass dies in jedem Fall geprüft werden muss.

In diesem Beitrag werden mehrere der Facetten dieses Themenkreises beleuchtet. Der Zugang ist kein methodisch systematischer, sondern ein empirischer, mit starkem Bezug zu Österreich. Es wird auf vorhandene Literatur zurückgegriffen und diese wird entsprechend den oben skizzierten Überlegungen strukturiert. Der Darstellung dieser Befunde widmet sich der kommende Abschnitt. Damit wird die Basis für die

Schlussfolgerungen gelegt in denen aufgezeigt wird, welche Wissenslücken nach wie vor bestehen. Diese können nur geschlossen werden, wenn in einem interdisziplinären Prozess vermehrt gemeinsame Projekt durchgeführt werden.

## **2. Schäden durch Hochwässer in Österreich 2002 und 2005 im engeren Sinn**

Obwohl Naturereignisse in Österreich sehr häufig auftreten, wissen wir über deren Schadenausmaß relativ wenig. In den meisten Fällen liegen nur sehr grobe Schätzungen vor. Trotz einer guten hydrographischen Dokumentation wurde in der Vergangenheit auf die Aufzeichnung der wirtschaftlichen Konsequenzen zu wenig Wert gelegt.

Mit der Erhebung der Schäden sind vor allem jene Abteilungen in den Ämtern der Landesregierungen befasst, die mit der Abwicklung der Beihilfen an Geschädigte betraut sind. Darüber hinaus führen auch das Bundeskanzleramt, die Kammern und der Versicherungsverband Schätzungen über das Schadenausmaß durch. Die mit der Erhebung der Schäden betrauten Organisationen verwenden jedoch keine einheitliche Methodik der Schadenbemessung. Die Zuordnung zu einzelnen Ereignissen und die Unterscheidung zwischen Sachschäden, Folgeschäden wie Betriebsunterbrechung und Umweltschäden werden unterschiedlich gehandhabt. Es gibt keine zentrale Einrichtung, in der die Ergebnisse der Schadenerhebung systematisch zusammengeführt werden. Die am besten zugängliche Quelle ist der jährliche Bericht des Katastrophenfonds. Dieser weist eine Gesamtsumme der im abgelaufenen Jahr gewährten Beihilfen aus. Daraus kann aber nur indirekt auf die tatsächliche Schadenhöhe geschlossen werden. Eine Unterscheidung der einzelnen Ereignisse und Gefahren (z.B. Hochwasser, Lawinen) ist nicht möglich.

Anhaltspunkte für typische Schadenfälle liefern Dokumentationen einzelner Ereignisse. So betrug im Jahr 2005 in Vorarlberg der von der Agrarbezirksbehörde geschätzte durchschnittliche Schaden an Gewerbe- und Industrieobjekten knapp 306.000 € jener an privaten Wohngebäuden 22.400 € an landwirtschaftlichen Gebäuden 15.000 € und an anderen Gebäuden etwas über 62.000 € (Agrarbezirksbehörde Vorarlberg, 2006). Diese genannten Fälle stellen aber nicht die durchschnittlichen Schäden der Grundgesamtheit der betroffenen Objekte dar, sondern nur jene, die ein (nicht genau beziffertes) Mindestmaß an Schäden überschritten haben, und deren Eigentümer um Beihilfen ansuchten. Dies ist die typische Situation in Österreich: der Schadenumfang ist in der Regel nur partiell bekannt.

Zwei Ereignisse, die so gut dokumentiert sind, dass auch monetäre Schäden näher eingegrenzt werden können, waren die Hochwässer der Jahre 2002 und 2005. Die Gesamtschäden wurden auf 2,9 Mrd. € bzw. 592 Mio. € geschätzt. Diese Schadensummen setzen sich aus folgenden Komponenten zusammen: Schäden an privaten Haushalten, Unternehmen und andere Schäden (Schäden am Vermögen der Gebietskörperschaften, darunter Infrastruktur, also auch Hochwasserschutz-einrichtungen und weitere Positionen wie die Kosten der Einsätze von Feuerwehren, Rettungen und Bundesheer und Kosten zur Beseitigung von Ökoschäden). Schäden an

der Infrastruktur im Besitz privater Unternehmen im öffentlichen Eigentum (z. B. ÖBB) fallen ebenfalls in die Kategorie 'andere Schäden'.

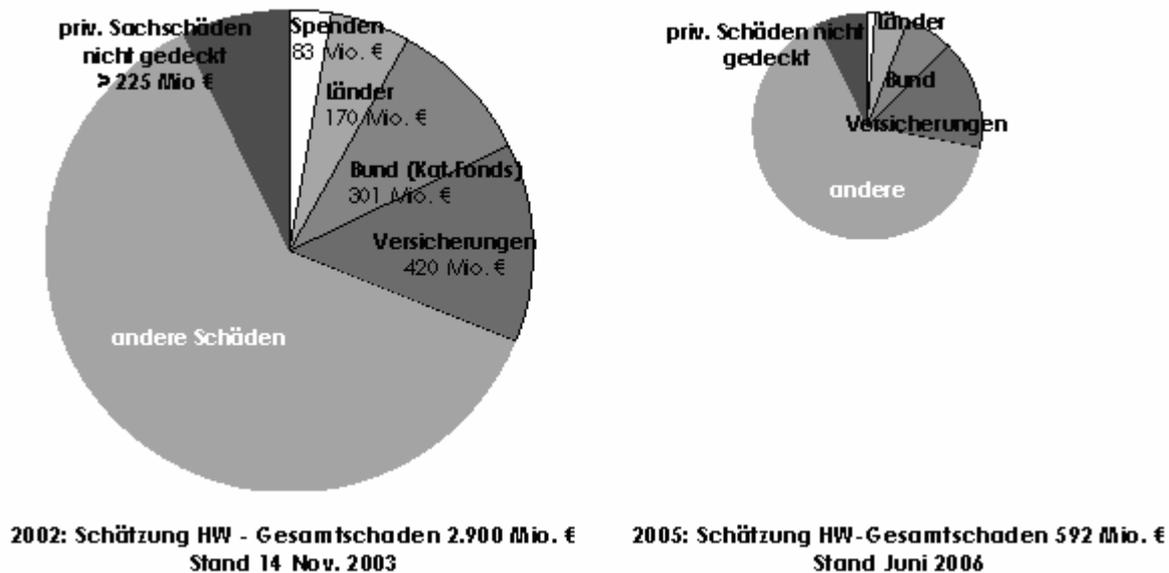
Die Summe der Schäden privater Haushalte und Unternehmen betrug im Jahr 2002 zumindest 1,2 Mrd. € wovon ein Betrag von etwa 225 Mio. € von den privaten Haushalten und Unternehmen selber getragen werden musste (Abbildung 1). Der Großteil des privaten Schadens wurde über Versicherungen, Beihilfen des Bundes und der Länder sowie durch Spenden gedeckt.

Im Jahr 2005 betrug der Schaden privater Haushalte und Unternehmen durch die Hochwasserereignisse vom August 228 Mio. € (Rudolf-Miklau, 2006). Auch den Betroffenen dieses Ereignisses kamen öffentliche Beihilfen, Versicherungsleistungen und Spenden zu Gute. Neben den Schäden an privaten Haushalten und Unternehmen wurden 2005 Schäden an der Infrastruktur im Umfang von 328 Mio. € verursacht, von denen 85 Mio. € auf Schäden an Hochwasserschutzanlagen entfielen.

Wie diese Gegenüberstellung zeigt, werden Absicherungen gegen Schäden nicht nur von Versicherungsunternehmen angeboten, sondern auch von der Gesellschaft (Staat und private Spender). Der zentrale Unterschied zwischen einer Kompensation durch Versicherungsunternehmen und durch die Gesellschaft ist, dass Versicherer auf Basis des Vertragsrechtes zu Leistungen verpflichtet sind, während Staat und private Spender nicht einklagbare Beihilfen gewähren. Versicherte müssen allerdings laufend Prämien bezahlen selbst wenn keine Schädigung eintritt.

Betroffene Haushalte und Unternehmen können auf öffentliche Beihilfen zählen, sie werden aber in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich behandelt. Untersuchungen von Pretenthaler et al. (2004) zeigen, dass je nach Bundesland unterschiedlich hohe öffentliche Beihilfen gewährt werden: Ein typischer Haushalt, der einen Schaden von 19.000 € erleidet, bekommt Beihilfen zwischen 4.500 € und 10.129 €. In einzelnen Bundesländern mindern Leistungen von Versicherungen die anerkannte Schadenssumme, in anderen nicht.

Trotz der Leistungen der Versicherungswirtschaft, der Beihilfen und Spenden muss ein Teil des Schadens durch die Betroffenen selbst gedeckt werden. Abbildung 1 zeigt, dass in den Jahren 2002 und 2005 der Selbstbehalt im Durchschnitt 1/5 der Schäden an Privathaushalten und in der Privatwirtschaft umfasste. Für einzelne Haushalte kann jedoch der Anteil beträchtlich über diesem Durchschnittswert liegen. Wenn die Schädigung sehr schwer ist, kann das Ausmaß sogar Existenz bedrohend sein. Im Gegensatz dazu sind je nach Bundesland auch vollständige Entschädigungen der Schäden möglich.



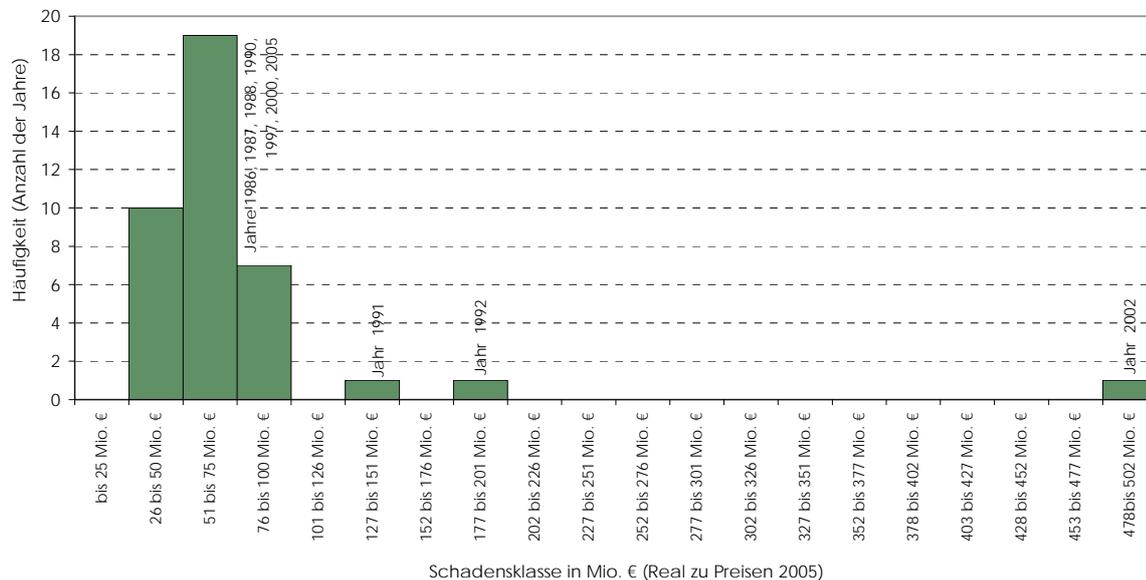
**Abb. 1:** Schätzung der Schäden durch die Hochwasserereignisse 2002 und 2005

Q: BMF, Bundesvoranschläge und Amtsbehelfe zum Bundesfinanzgesetz, diverse Jahrgänge; Rechnungshof Österreich, Bundesrechnungsabschlüsse, diverse Jahrgänge; BMF, Katastrophenfondsberichte des Bundesministers für Finanzen, Erster bis Sechster Bericht nach dem Katastrophenfondsgesetz 1996; Versicherungsverband Österreich, 2006, pers. Mitteilung vom 19. 6. 2006; Pretenthaler, F. et al. (2004A), Sattler, et al. (2004); Schadenssumme August 2005 Hochwasser: EC, COM(2006)114 final, 10. 3. 2006 und BMLFUW, 2006C. Anmerkung: Spendenaufkommen im Jahr 2005 beruht auf WIFO-Schätzungen.

Im gewerblichen und industriellen Bereich erfolgen – sofern vertraglich vereinbart – Deckungen innerhalb der Sturmschadenversicherung, die auch Betriebsunterbrechungen umfassen. Nur wenige private Haushalte haben eine spezielle Hochwasserversicherung. Die Leistungen der Versicherungen begründeten sich aus der Eigenheim- und Haushaltsversicherung, in deren Rahmen auch Naturschäden bis zu einer bestimmten Höhe gedeckt sind. Typischer Weise sind Schäden im Bereich zwischen 4.000 € und 7.000 € gedeckt (Sinabell - Trimmel, 2004).

Der Katastrophenfonds ist eine Quelle, die zur Quantifizierung der Schäden herangezogen werden kann. Da nur ein Teil der Gesamtschäden aus dem Fonds gedeckt wird, können die Angaben nicht verwendet werden, um das gesamte Schadenmaß zu bestimmen. Die jährlichen Aufwendungen geben jedoch einen guten Überblick über die Verteilung von Schäden. Zu diesem Zweck werden die Ausgaben des Katastrophenfonds in realen Werten zu Preisen 2005 ausgewiesen, es werden also die Effekte der Teuerung ausgeblendet. In Abbildung 2 werden die Daten zu den Ausgaben des Katastrophenfonds in einem Häufigkeitsdiagramm dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass sehr große Schäden (wie etwa im Jahr 2002) vergleichsweise selten auftreten, und dass das Hochwasserereignis von 2005 offenbar nicht außergewöhnlich groß war, in den Jahren 1991 und 1992 waren wirtschaftlich größere Ereignisse zu verkräften. In den meisten Jahren wurden vom Katastrophenfonds Beträge zwischen 50 Mio. € und 75 Mio. € (zu Preisen 2005) zur Schadenbeseitigung ausgezahlt. In diesen Beträgen sind nicht nur die Beihilfen an private Haushalte und Unternehmen

enthalten, sondern auch die Wiedergutmachung der Schäden von Gebietskörperschaften



**Abb. 2:** Häufigkeitsverteilung der vom Bund (Katastrophenfonds) gedeckten Gesamtschäden, 1967-2005

Q: WIFO-Berechnungen auf Basis der Bundesrechnungsabschlüsse des Rechnungshofes, diverse Jahrgänge, der Amtsbehelfe zum Bundesfinanzgesetz des BMF, diverse Jahrgänge, sowie der Katastrophenfondsberichte des Bundesministers für Finanzen, Erster bis Sechster Bericht nach dem Katastrophenfondsgesetz 1996; Hinweis: Werte sind real zu Preisen von 2005; Deflationierung mittels BIP-Deflator; Jahre 2002 und 2005 einschließlich der Zahlungen nach dem Hochwasseropferentschädigungs- und Wiederaufbau-Gesetz (HWG) 2002 bzw 2005.

### 3. Volkswirtschaftliche Effekte von Schadereignissen und Präventivmaßnahmen im weiteren Sinn

#### 3.1 Investitionen in Präventivmaßnahmen: wirtschaftliche Effekte

Mit Hilfe eines multiregionalen und multisektoralen volkswirtschaftlichen Modells wurden ausgewählte ökonomische Wirkungen von Schadereignissen und Präventivmaßnahmen untersucht (siehe Sinabell, et al., 2009). Dieses Modell ermöglicht, die Wirkung auf Beschäftigung und Wertschöpfung in der Volkswirtschaft zu schätzen, die durch die Investitionsausgaben ausgelöst werden. Durch die Vorleistungs- und Lieferbeziehungen der Wirtschaftssektoren untereinander ergibt sich eine Multiplikatorwirkung von Investitionen, die mithilfe von Modellen quantifiziert werden kann. Der Wertschöpfungsmultiplikator gibt an, welchen Wertschöpfungseffekt ein Euro an Investitionen in Präventivmaßnahmen über direkte und induzierte Effekte auslöst.

Bei den angestellten Berechnungen wurde in einer ersten Teilabschätzung nicht auf Schadensverhinderung abgestellt, sondern auf die volkswirtschaftliche Multiplikator-

wirkung des "regulären Betriebs" in Form von (laufenden) öffentlichen Ausgaben hat. Als Beispiel wurden die Aufwendungen der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) untersucht. Die mit den laufenden Aktivitäten der WLV verbundenen Kosten von ca. 20 Mio. Euro bewirken einen volkswirtschaftlichen Gesamteffekt auf die Bruttowertschöpfung von ca. 30 Mio. €. Die 315 direkt für die WLV tätigen Personen (d.h. die Bundesbediensteten) sichern über indirekte und induzierte Effekte ca. 560 weitere Beschäftigungsverhältnisse.

Ebenso wurde die Investitionstätigkeit der WLV untersucht, die ein Volumen von ca. 118 Mio. Euro. Für das Jahr 2004 wurden auf diese Weise eine induzierte Bruttowertschöpfung von 156 Mio. Euro und etwa 1.600 zusätzliche Beschäftigte geschätzt. Ein sehr interessanter Aspekt dabei ist, dass knapp ein Viertel der induzierten Wirkungen in Wien wirksam sind, obwohl in diesem Bundesland praktisch keine Maßnahmen gesetzt werden. Durch die Verflechtung der wirtschaftlichen Beziehungen profitiert auch das Land Wien sehr stark von den Maßnahmen der Wildbach- und Lawinenverbauung.

Für die Bundeswasserbauverwaltung liegen analoge Befunde vor (Aumayr et al., 2008). Im jährlichen Durchschnitt 2002 - 2006 wurden von der Bundeswasserbauverwaltung rd. 73 Mio. Euro an Bundesmitteln für Hochwasserschutzprojekte genehmigt, die durch Länder- und Interessentenbeiträge Gesamtverpflichtungen im Wert von 129 Mio. Euro entsprechen. In den Berechnungen wurden zwei Szenarien der Güternachfrage gegenübergestellt: Im ersten Szenario werden die für regionale Maßnahmen direkt benötigten Güter österreichweit und international der „durchschnittlichen“ Güterimportstruktur des jeweiligen Gutes entsprechend nachgefragt. Im zweiten Szenario werden die regional benötigten Güter direkt in der Region nachgefragt. Der österreichische Wertschöpfungsmultiplikator beträgt im ersten Fall 1,5 (198 Mio. Euro) und steigt im zweiten Szenario auf 1,6 (210 Mio. Euro) an, da hier in der ersten Runde die Wertschöpfung noch in Österreich bleibt. Mit diesen gleichgewichtigen Wertschöpfungseffekten sind längerfristig zusätzlich, das heißt indirekt und induziert, 13,4 bzw. 14,5 Beschäftigte je Mio. Euro an Investitionssumme verbunden.

### **3.2 Volkswirtschaftliche Effekte der Schadereignisse von 2002 und 2005**

Das gleiche Modell wurde auch verwendet, um die Folgen der Hochwasserereignisse in den Jahren 2002 und 2005 in den Bundesländern zu quantifizieren (Sinabell et al., 2009). Dabei wurden die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Schäden insgesamt betrachtet. Das kurz gefasste Ergebnis lautet, dass durch die Schadereignisse die Volkswirtschaft Einbußen hinnehmen musste.

Unmittelbar nach den Ereignissen setzten starke Investitionen in Reparatur- und Wiederherstellungsmaßnahmen ein. Dies führt vorübergehend zu einem die Wirtschaft belebenden Effekt. Da diese Investitionen aber finanziert werden müssen, kommt es zu Einsparungen in anderen Bereichen und somit netto zu einer Schwächung der Wirtschaftsleistung in den Folgejahren. Auch dieser Effekt ist nicht in allen Bundesländern gleich. Ebenfalls aufgrund der Verflechtung der Wirtschaftsleistung

diffundieren die wirtschaftlichen Schadenwirkungen über die gesamte Volkswirtschaft. Die vom Naturereignis am stärksten getroffenen Bundesländer steigen aber netto leicht „positiv“ aus. Ein Grund ist die massive Investitionstätigkeit, aus der vor allem lokale Produzenten Vorteile ziehen. Es ist auch nicht zu vernachlässigen, dass der neue Kapitalstock in der Regel produktiver ist als der durch das Schadereignis zerstörte. Es wäre aber falsch, daraus zu schließen, dass die von Naturereignissen betroffenen Bundesländer Wohlfahrtsgewinne verzeichnen würden. Körperliches Leid, der Verlust von Leben und der Schmerz über den Verlust von vertrauten Dingen führen zu starken Einbußen der Lebensqualität. Diese Schadenwirkung wird in den eingesetzten Modellen nicht bewertet; die Modelluntersuchungen geben in dieser Hinsicht kein vollständiges Bild.

Im Zuge einer weiteren sektoralen Untersuchung wurde analysiert, welche Auswirkungen die beiden großen Hochwasserereignisse von 2002 und 2005 auf die Nüchtigungen im Tourismus gehabt haben. Es zeigte sich, dass die Konsequenzen auf einer regional relativ weiträumigen Ebene kaum messbar und nachweisbar sind. Es gibt zwei Gründe dafür: Zum einen profitieren die nicht betroffenen Gebiete von Gästen, die Schadengebieten ausweichen - der Nachteil des einen Tourismusbetriebs gereicht dem anderen in einem nicht betroffenen Gebiet zum Vorteil. Der zweite Grund ist darin zu suchen, dass in Österreich unmittelbar nach Schadenereignissen die öffentliche Infrastruktur zügig wieder hergestellt wird und auch die privaten Unternehmen rasch den Betrieb wieder aufnehmen. Dadurch sind zwar Störungen durch Betriebsunterbrechungen zu verzeichnen, sofort einsetzende Gegenmaßnahmen halten den Schaden aber in Grenzen. Auswertungen der Telekom Austria zeigen, dass beträchtliche Mittel (z.B. im Jahr 2005 in Vorarlberg fast 40% der Schadensumme) darauf verwendet wurden, den Betrieb provisorisch aufrechtzuerhalten. Diese Maßnahmen stellen keine Schadenbeseitigung im eigentlichen Sinne dar, sondern sind verlorene Investitionen, da solche Provisorien im Regelbetrieb nicht weiter verwendet werden.

#### **4. Diskussion und Schlussfolgerungen**

Die Ausführungen zeigten, dass unser Wissen über die wirtschaftlichen Bedeutung von Hochwässern in Österreich nur partiell ist. Ökonomische Arbeiten in den letzten sechs Jahren beschäftigten sich mit folgenden Fragestellungen: die Bedeutung der Kosten-Nutzenanalyse im Zusammenhang mit der Finanzierung von Präventivmaßnahmen (Sinabell und Trimmel, 2004), die Bedeutung des Katastrophenfonds als Finanzinstrument in Prävention und Risikovorsorge (Pretenthaler et al., 2004), die Rolle der Versicherungen als effizientes Mittel zur Risikotragung von Naturgefahren (Sinabell und Url, 2007), volkswirtschaftliche (Kletzan et al., 2002) und regionalwirtschaftliche (Sinabell et al., 2009) Effekte von Hochwasserereignissen sowie die Induktion von Wertschöpfung durch Investitionen in Präventivmaßnahmen (Aumyar et al., 2008 und Sinabell, et al., 2009).

All diese Untersuchungen haben bis jetzt allerdings noch nicht dazu beigetragen, die einleitend skizzierten Fragen umfassend zu erklären. Nach wie vor ist offen und

weitgehend unbekannt, welche nicht-monetären Kosten durch Hochwässer verursacht werden. Da es sich um intangible, schwer zu bewertende Schäden handelt, unterblieb eine Quantifizierung bisher. Für eine umfassende Kosten-Nutzen-Sicht ist allerdings diese monetäre Bestimmung unerlässlich.

Ein weiterer wichtiger Sachverhalt ist nach wie vor weitgehend unbekannt: genügen die öffentlich getätigten Investitionen für den präventiven Hochwasserschutz der einleitend angeführten Entscheidungsregel? Die Bestimmung der Schäden durch Hochwässer stößt neben methodischen Problemen auch auf ganz praktische. Die laufende und konsistente Erhebung von Hochwasserschäden steckt in Österreich noch in den Kinderschuhen und derzeit gibt es nur partielle Ansätze. Dies erschwert die Anwendung von Kosten-Nutzenanalysen im Bereich der Projektierung, da mit Normsätzen gearbeitet werden muss, deren Gültigkeit nicht immer gewährleistet ist.

Untersuchungen für die Wildbach- und Lawinenverbauung brachten zu Tage, dass der Kapitalstock an Anlagen zum präventiven Hochwasserschutz nach einer Phase des starken Aufbaues in den 1960er und 1970er Jahren derzeit nicht erweitert wird. Auf nationaler Ebene ist die Abschreibungen der getätigten Investitionen, also der Kapitalverzehr durch Schadeinwirkung bzw. zeitliche Abnutzung etwa gleich hoch wie die Neuinvestitionen in Schutzanlagen. Die einzelnen Regionen sind davon in unterschiedlicher Weise betroffen. Es gibt Gebiete, in denen nach wie vor Netto-Investitionen getätigt werden, in anderen Gebieten nimmt de facto die Schutzwirkung kontinuierlich ab. Wie sehr dies auch für Hochwasserschutzanlagen entlang von Flüssen zutrifft, ist derzeit nicht bekannt. Es ist daher vordringlich nötig, festzustellen ob der für die Wildbach- und Lawinenverbauung zutreffende Befund auch für die Wasserbauverwaltung zutrifft.

Ein besseres Wissen und auch die bessere Kenntnis über die Kosten eines adäquaten Schutzes sollten schließlich als Entscheidungsgrößen in die örtliche Raumplanung einfließen. Auf diese Weise könnte vermieden werden, was derzeit als großes Problem vorliegt: die Erschließung von hochgefährdeten Gebieten zur baulichen Nutzung ohne adäquaten Schutz.

## **5. Literatur**

Agrarbezirksbehörde Vorarlberg (2006): Erfahrungen in der Agrarbezirksbehörde Bregenz. Präsentation anlässlich der Fachtagung Dokumentation von Naturereignissen, Bregenz, 29. Juni 2006.

Aumayr, Ch., Pluch, K., Habsburg-Lothringen, C., Pretenthaler, F., (2008): Die Volks- und Regionalwirtschaftlichen Effekte der Investitionen in Hochwasserschutzmaßnahmen. InTeReg Research Report Nr. 72-1008, Joanneum Research, Graz.

Hackl, F., Pruckner, G., (1994): Informationsgrundlagen der Umweltpolitik (II): Die Kosten-Nutzen Analyse als Bewertungsinstrument der Umweltpolitik. Einführung in die Umweltpolitik, Vahlen, München.

Hanley, N., Spash, C., (1995): Cost-Benefit Analysis and the Environment. Edward Elgar Publishing, Cheltenham Glos.

Jones, Ch., (2005): Applied Welfare Economics, Oxford University Press, Oxford.

Kletzan, D., Köppl, A., Kratena, K., Wegscheider, A., (2003): Ökonomische Aspekte des Hochwassers 2002: Datenanalyse, Vermögensrechnung und gesamtwirtschaftliche Effekte. Projekt im Rahmen von StartClim, Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, Wien.

Prettenthaler, F., Hyll, W., Türk, A., Vettters, N., (2004): Finanzielle Bewältigung von Hochwasserschäden. Präsentation am 24. November 2004: Flood Risk - Analyse der Hochwasserereignisse vom August 2002, Strategien und Maßnahmen, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2004.

Rudolf-Miklau, F., (2006): Hochwasser 2005. Ereignisdokumentation – Bericht Österreich (Hydrographischer Dienst - Bundeswasserbauverwaltung – Wildbach- und Lawinenverbauung), Bregenz, Präsentation am 4. Juli 2006.

Sinabell, F., Trimmel, S., (2004): Ökonomische Analyse von schadensmindernden Maßnahmen im Hochwasserschutz. Studie des Österreichischen Instituts für Wirtschaftsforschung im Auftrag des Umweltbundesamtes, November 2004, p. 1-42.

Sinabell, F., Fritz, O., Puwein, W., Streicher, G., (2009); Eine volkswirtschaftliche Analyse der Wildbach- und Lawinenverbauung. Studie des Österreichischen Instituts für Wirtschaftsforschung, Wien.

Sinabell, F., Url, T., (2007): Versicherungen als effizientes Mittel zur Risikotragung von Naturgefahren. Studie des österreichischen Instituts für Wirtschaftsforschung im Auftrag des Verbands der Versicherungsunternehmen Österreichs, Wien, Februar 2007.

**Korrespondenz an:**

**Dipl.-Ing. Franz Sinabell**

WIFO Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung

Arsenal Obj. 20, Postfach 91

A - 1031 Wien

Tel: +43-1-7982601

Fax: +43-1- 798 93 86

E-Mail: [franz.sinabell@wifo.ac.at](mailto:franz.sinabell@wifo.ac.at)

# HOCHWÄSSER AUS SCHUTZWASSERWIRTSCHAFTLICHER SICHT

Rudolf Friewald

## 1. Einleitung

Das Tullnerfeld ist bekannt durch die Kraftwerke Dürnrohr und die Müllverbrennung. Die Hochwässer aus schutzwasserwirtschaftlicher Sicht werden im vorliegenden Beitrag an Hand von zwei Beispielen diskutiert:

- Große Tulln Wasserverband
- Perschlingunterlauf Wasserverband



**Abb. 1:** Kraftwerk Dürnrohr



**Abb. 2:** Photo der Baustelle Querung der Großen Tulln bei Judenau



**Abb. 3:** Rückhaltebecken

## **2. Große Tulln**

Bei der Querung Judenau wird die Große Tulln durch die HALG-ÖBB aufgeweitet. Wegen Auflagen der Bepflanzung entstehen Probleme bei der Pflege und ein Widerspruch mit der Räumung.

Der notwendige Durchfluss ist in Wasserrechtsbescheiden klar geregelt. Nur durch Einhaltung dieser Durchflussmenge ist der Verband gegen Haftungsansprüche abgesichert. Daher ist eine ständige Pflege notwendig. Pflege an der Großen Tulln: Pappeln und Weiden sowie anderes Gehölz müssen ständig aus den Abflussbereich entfernt werden. Wird ein Baum gefällt, kann es zu einer Anzeige bei der Naturschutzbehörde kommen. Es besteht also ein Widerspruch von Ökologie und Schutzfunktion. Fischereiberechtigte: Die Beschattung des Wassers fehlt manchmal. Dadurch kann es zu Schadenersatzansprüchen kommen. Durch das Trüben des Gewässers beim Räumen von Anlandungen gibt es ebenso Forderungen der Fischer nach Entschädigung. Die Räumung darf nur zu bestimmten Zeiten erfolgen. Einträge verhindern: Um die Räumung zu minimieren sind Fremdeinträge zu verhindern. Mitsprache der Wasserverbände bei Flurbereinigungen und das Schaffen von Rückhaltebecken sind wichtige Maßnahmen. 73 Becken wurden von den Gemeinden errichtet. Die Flächen wurden von Eigentümern gepachtet.

## **3. Perschlingunterlauf**

Themen, die die Alte Perschling betreffen, sind Bauten im Gewässer, die Haftungsfrage, Aufarbeiten von Altlasten und Kosten-Machbarkeit. Das Räumen wurde jahrelang vernachlässigt. Es geht um über 300 km Vorfluter. Windeintrag-Erdverwehung, Drainagen sowie Grundwasserprobleme sind zu behandeln. Finanzierung: Akute Räumungen durch Gemeinden sind nicht auf einmal finanzierbar. Ein Modell wie bei der Kanalfinanzierung wäre notwendig. Mit langfristigen vom Bund geförderten Darlehen könnte man den notwendigen Räumungsbedarf als Konjunkturprogramm schnell lösen.



**Abb. 4** Hochwasser Entlastungserinne Perschling



**Abb. 5** Räumung der Vorfluter - Perschling

**Anschrift des Verfassers:**

**Bgm. Labg.a.D Rudolf Friewald**

Am Weichselgarten 18

A - 3441 Pixendorf

Email: [r.friewald@aon.at](mailto:r.friewald@aon.at)



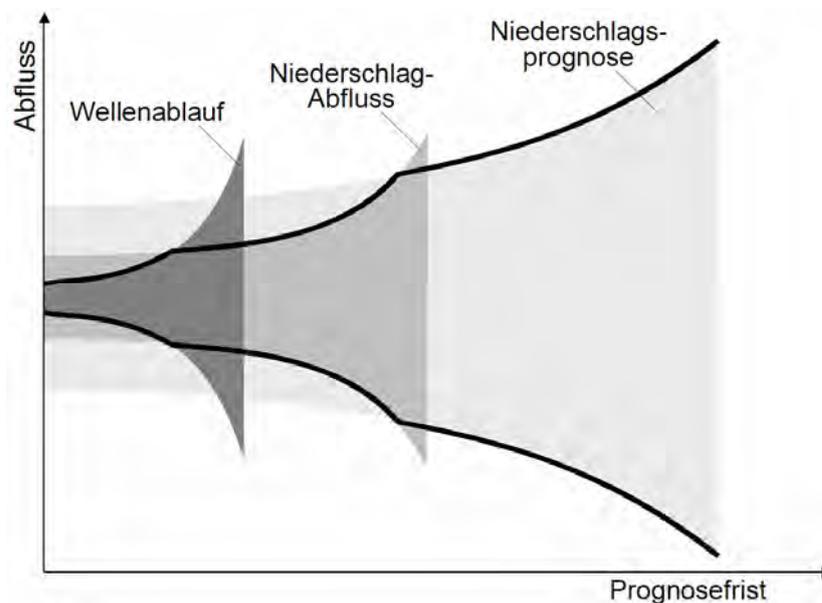
## AKTUELLE METHODEN DER HOCHWASSERVORHERSAGE

Jürgen Komma, Ulrike Drabek, Günter Blöschl

### 1. Einleitung

Die Verfügbarkeit von genauen Hochwasservorhersagen, bis zu Prognosefristen von mehreren Tagen, wird in zunehmendem Maß auch für kleinere Einzugsgebiete gewünscht. Die Änderung des Anforderungsprofils macht die methodische Weiterentwicklung von Hochwasservorhersagesystemen zu einem wichtigen, interdisziplinären Betätigungsfeld in der Meteorologie und Hydrologie.

Die Güte der Vorhersagen unterscheidet sich wesentlich je nach Vorhersagefrist und den damit zweckmäßig einzusetzenden Methoden. Die Zusammenführung der verschiedenen Methoden in einem Vorhersagesystem wird als gestufter Vorhersageansatz bezeichnet (Abb. 1). Die genauesten Vorhersagen sind mittels Wellenablaufmodelle möglich, bei denen der beobachtete Abfluss der Oberliegerpegel als Eingangsdaten verwendet wird. Die damit erzielbare Vorhersagefrist entspricht den Laufzeiten im Gerinne. Um die Prognosefrist über diese Zeitspanne hinaus zu verlängern, werden Niederschlag-Abflussmodelle eingesetzt, welche beobachtete



**Abb. 1:** Gestufter Vorhersageansatz. Die genauesten Vorhersagen sind mittels Wellenablaufmodell unter Verwendung der Abflussdaten am Oberlieger möglich, aber die Prognosefrist ist kurz. Mit einem Niederschlag-Abflussmodell unter Verwendung beobachteter Niederschläge kann die Prognosefrist verlängert werden. Die längsten Prognosefristen sind unter Verwendung prognostizierter Niederschläge möglich, allerdings sind die Prognosen am unschärfsten. Die dicke Linie entspricht der Kombination der Modelle durch den gestuften Vorhersageansatz.

Niederschläge und Lufttemperaturen als Eingangsdaten verwenden. Eine weitere Verlängerung der Vorhersagefrist wird schließlich durch die Verwendung von Niederschlags- und Lufttemperaturprognosen ermöglicht. Allerdings sind in diesem Fall die Unsicherheiten am größten.

Die Entwicklung bei den Niederschlag-Abfluss-Modellen geht dabei weg von ereignisbasierten Blockmodellen hinzu kontinuierlichen Modellen mit flächendetaillierter räumlicher Struktur. Der Vorteil der einfachen Blockmodelle liegt in der robusten Struktur und der geringen Anzahl an Modellparametern, wodurch die Interpretation der Vorhersagen erleichtert wird. Die Anwendung flächendetaillierter Niederschlag-Abflussmodelle für die Hochwasservorhersage bringt den Vorteil mit sich, die räumliche Differenzierung von Niederschlag, Abflussbildung und Abflusskonzentration berücksichtigen zu können. Diese Differenzierung lässt erwarten, dass unterschiedliche Abflusssituationen im Hochwasserfall an den Prognosepegeln genauer beschrieben werden können, als dies mit konventionellen Blockmodellen möglich ist. Die Eichung der räumlich differenzierten Modellparameter an Abflussdaten ist allerdings wegen Problemen bei der Prozessidentifikation nicht eindeutig möglich (Isermann, 1974). Für eine zuverlässige Identifikation der Parameter und der Struktur flächendetaillierter Modelle das Heranziehen von Zusatzinformation unerlässlich. Insbesondere beobachtete räumliche Muster dynamischer hydrologischer Größen, wie Schneebedeckungsmuster oder Bodenfeuchtemuster, bieten sich dafür an (Blöschl et al., 1991).

Hochwasservorhersagen sind stets mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Die Größenordnung der Unsicherheiten wird dabei durch die vorherrschenden meteorologischen und hydrologischen Randbedingungen bestimmt. Im Rahmen der Entscheidungsfindung beim Hochwassermanagement stellt die Quantifizierung dieses Unsicherheitsbereiches eine wertvolle Zusatzinformation für die Risikoabschätzung dar. Eine Methode zur Bestimmung der Unsicherheit von mittel- bzw. langfristigen Niederschlagsvorhersagen ist die Verwendung von Ensemble-Vorhersagen (Buizza, 1997). Dabei wird neben dem Hauptlauf ein Ensemble von zusätzlichen Niederschlagsprognosen, auf Basis von veränderten Anfangsbedingungen des physikalischen Wettermodells, generiert. Diese werden dem hydrologischen Niederschlag-Abflussmodell als Eingangsdaten zur Verfügung gestellt. Die Breite des resultierenden Ensemble-Streubereiches dient dann als Indikator für die Unsicherheit der Hochwasserprognose.

## **2. Niederschlag**

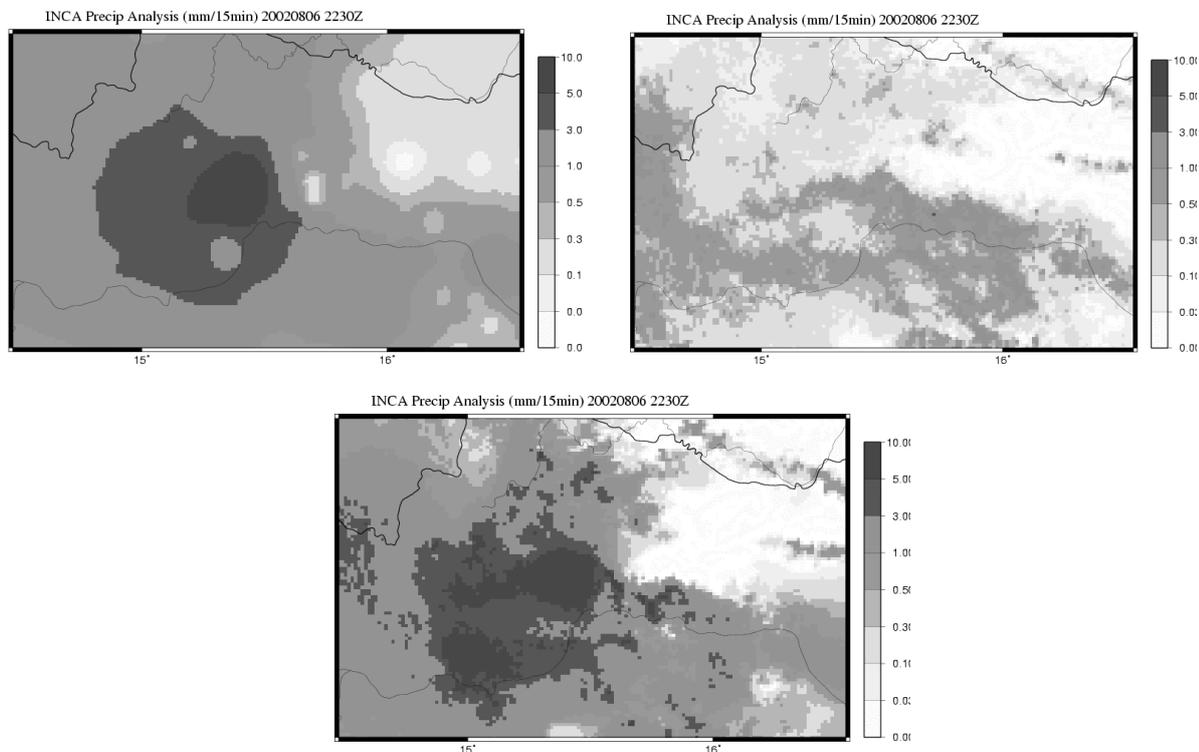
### **2.1 Niederschlagsanalysen**

Im Rahmen der operationellen Hochwasservorhersage bilden aktuelle Beobachtungen von Niederschlägen und Lufttemperaturen wichtige Eingangsinformation für die Niederschlag-Abfluss-Modelle. Der Niederschlag unterliegt einer starken räumlichen und zeitlichen Variabilität und ist deshalb eine sehr schwierig zu messende Klimavariablen. Bei der Niederschlagsmessung kommen grundsätzlich zwei

verschiedene Messmethoden zum Einsatz. Die herkömmliche Methode ist die terrestrische Messung des gefallenen Niederschlags mit Ombrographen. Hierbei kann der gefallene Niederschlag sehr genau und in hoher zeitlicher Auflösung erfasst werden. Da die Anzahl solcher Niederschlagsmessstationen durch die hohen Kosten für Installation und Betrieb begrenzt ist, kann die kleinräumige Variabilität des Niederschlags mit den terrestrischen Niederschlagsmessnetzen nicht in vollem Umfang erfasst werden. Vor allem für die Messung von lokalen Starkniederschlägen mit hoher zeitlicher und räumlicher Dynamik sind die Bodennessnetze häufig zu grobmaschig. Eine alternative Methode zur Erfassung von räumlichen Niederschlagsmustern basiert auf der Radartechnologie. Der Grundgedanke dabei ist eine Relation zwischen der originär gemessenen Radarreflektivität  $Z$  und der Niederschlagsrate  $R$  aufzustellen. Diese  $Z$ - $R$ -Beziehung ist als Potenzgesetz in Abhängigkeit des Tropfendurchmessers formuliert. Unter bestimmten Annahmen lässt sich die Beziehung theoretisch ableiten, in der Praxis werden jedoch häufig empirische Formeln verwendet. Die Problematik beim Rückschluss von der Reflektivität auf die Niederschlagsintensität in Bodennähe besteht darin, dass die  $Z$ - $R$ -Beziehung in der Regel räumlich und zeitlich nicht als konstant angesehen werden kann. In vertikaler Richtung ergeben sich, hauptsächlich hervorgerufen durch die unterschiedlichen Aggregatzustände der Wassertropfen, Änderungen der Radarreflektivitäten und somit auch der  $Z$ - $R$ -Beziehungen. Informationen über diese vertikalen Reflektivitätsprofile (VPR-vertical profile of reflectivity) können zur Abschätzung der bodennahen Niederschlagsintensität verwendet werden (Borga et al., 2000). Einen weiteren wichtigen Einflussfaktor auf die Reflektivitätsbeziehung stellt die vorherrschende meteorologische Situation (stratiforme Wolken, konvektive Zellen) dar. Auch die Topographie und die Entfernung des Aussagegebiets zur Radarstation beeinflussen die Qualität des Messergebnisses. So sind in alpinen Regionen, mit hohen Gebirgsformationen, die Messergebnisse der Radarabtastung durch Abschattungseffekte mit zusätzlichen Unsicherheiten behaftet. Alternative Messungen der Niederschlagsintensitäten mit Hilfe von Mikrowellensystemen (micro wave links) können zur Reduktion der systematischen Fehler bei der Anwendung der  $Z$ - $R$ -Beziehung genutzt werden. Bei dieser Methode wird von der Abschwächung eines Mikrowellensignales zwischen einer Sende- und Empfangseinheit auf den gefallenen Niederschlag entlang dieser Strecke geschlossen (Cummings et al., 2008). Auch die Analyse des Tropfenspektrums mit Hilfe von Distrometern kann wertvolle Zusatzinformationen für die Anpassung der  $Z$ - $R$ -Beziehung liefern (Fiser, 2004). Trotz der Reduktion von Unsicherheiten ist die Quantifizierung des gefallenen Niederschlags durch Radarmessungen für den Zweck der Hochwasserprognose nicht mit hinreichender Genauigkeit möglich.

Die Kombination der räumlich detaillierten Niederschlagsmuster mit den quantitativen Punktinformationen des terrestrischen Niederschlagsmessnetzes vereint die Vorteile beider Methoden. Die Radarniederschlagsverteilungen werden mit Hilfe von Gewichtungsfaktoren an die gemessenen Stationsniederschläge algorithmisch angepasst. Die resultierende Analyse gibt an den Stationspunkten die dort gemessenen Werte wieder, und weist zwischen den Stationen die in den Fernerkundungsdaten enthaltenen Strukturen auf. Das Ergebnis der Zusammenführung beider Informationen stellt die beste Schätzung der aktuellen Niederschlagsverteilung im Untersuchungs-

gebiet dar. Stationsdaten werden mit Fernerkundungsdaten (Satellitendaten für Bewölkung, Radar für Niederschlag) algorithmisch kombiniert. Bei dieser Kombination wird die größere quantitative Genauigkeit der Stationsdaten und die bessere räumliche Auflösung der Fernerkundungsdaten genutzt. Die resultierende Analyse gibt an den Stationspunkten die dort gemessenen Werte wieder, und weist zwischen den Stationen die in den Fernerkundungsdaten enthaltenen Strukturen auf. Um die kombinierten Niederschlagsmuster für die operationelle Hochwasservorhersage nutzen zu können müssen die Daten in Echtzeit verfügbar sein. Durch Fernübertragung der Stationsmesswerte und der Radarbilder mittels Telefonmodem oder Funktechnologie an eine zentrale Rechenstelle können die Informationen mit geringem zeitlichen Versatz verarbeitet werden. In Österreich werden Analysen dieser Art von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik durchgeführt (Haiden et al., 2006). Ein Beispiel für die Kombination von Radar- und Stationsmesswerten ist in Abbildung 2 dargestellt.



**Abb. 2:** Niederschlagsanalysen aus reiner Stationsinterpolation (links oben), Radardaten unkorrigiert (rechts oben), und die in INCA berechnete Synthese (unten) (Haiden et al., 2006). Beispiel vom Hochwasserereignis 2002 im Waldviertel.

## 2.2 Niederschlagsprognosen

Als Basis für die hydrologischen Niederschlag-Abfluss-Modelle stellen die aktuellen Analysen der Niederschlagsmuster unverzichtbare Eingangsinformationen dar. Die erzielbaren Vorhersagefristen sind, abhängig von der Reaktionszeit des Einzugsgebietes, jedoch auf wenige Stunden begrenzt.

Zur Verlängerung der Vorhersagefristen ist die Einbeziehung von Niederschlagsprognosen erforderlich. Eine Methode für die kurzfristige Prognose wird als Nowcasting bezeichnet. Basierend auf den gemessenen Niederschlagsmustern der letzten Stunden kann durch Extrapolation der Bewegungsvektoren auf die Verlagerung der Niederschlagsmuster für die unmittelbare Zukunft geschlossen werden. Die erzielbaren Vorhersagefristen hängen dabei von der Größe und Lebensdauer der meteorologischen Strukturen ab. Für kleine, konvektive Gewitterzellen ergeben sich kürzere Vorhersagefristen als für große advektive Wolkensysteme. Hohe Prognosegenauigkeiten lassen sich mit dieser Methode vor allem für die ersten Stunden der Vorhersage erzielen.

Eine weitere Verlängerung der Vorhersagefrist ist durch den Einsatz von numerischen Wettermodellen möglich. Basierend auf dem Ist-Zustand der Atmosphäre werden mit numerischen Wettermodellen die globalen atmosphärischen Prozesse simuliert. Zur Definition der Anfangs- und Randbedingungen dienen Messdaten des weltweiten meteorologischen Messnetzes, bestehend aus Bodenstationen, Wetterballons, Schiffen, Bojen und Satelliten. Neben den physikalischen Prozessen der Atmosphäre werden auch die Strahlungsbilanz und die Interaktion mit der Erdoberfläche in den Modellen berücksichtigt. Globale numerische Wettermodelle liefern Vorhersagen verschiedener Klimavariablen mit räumlichen Auflösungen im Bereich von 25 bis 50 km für Vorhersagefristen im Bereich von mehreren Tagen. Weltweit gibt es eine Vielzahl von globalen Wettermodellen. Ein häufig verwendetes numerisches Wettermodell in Europa wird vom Europäischen Zentrum für Mittelfristprognosen (ECMWF) in Reading/Großbritannien betrieben. Die Vorhersagen werden zweimal täglich basierend auf den aktuellen atmosphärischen Anfangs- und Randbedingungen erstellt. Die Modellläufe erfolgen jeweils um 12 Uhr und 0 Uhr mit Vorhersagefristen bis zu 10 Tagen. Ähnliche globale Wettermodelle werden in Europa vom deutschen und britischen Wetterdienst betrieben. Die räumliche Auflösung der globalen Niederschlags- und Temperaturprognosen ist auf Grund des großen Modellgebiets auf 25-50 km limitiert. Die Verfeinerung der räumlichen und zeitlichen Auflösung kann durch lokale numerische Wettermodelle realisiert werden. Dabei werden die Anfangs- und Randbedingungen für die räumlich hoch aufgelösten numerischen Wettermodelle aus den globalen Wettermodellen übernommen. Die detaillierte Vorhersage für das begrenzte Modellgebiet erfolgt dann aber unter Berücksichtigung der lokalen topographischen und klimatologischen Gegebenheiten. Für Vorhersagefristen bis zu 48 Stunden liefern lokale Modelle in der Regel bessere Vorhersagen, vor allem für konvektive, kleinräumige Niederschlagsereignisse, als die globalen Modelle. In Europa werden mehrere solcher lokaler Wettermodelle von den zuständigen Wetterdiensten betrieben. Das am häufigsten verwendete lokale Wettermodell in Europa ist das COSMO-Modell. Dieses Modell basiert auf dem „Lokalen Modell“ des Deutschen Wetterdienstes und wurde vom 1998 gebildeten Konsortium für lokale Wettermodellierung (COSMO – consortium for small-scale modelling) weiterentwickelt und zahlreichen europäischen Staaten zugänglich gemacht. Die Vorhersagen stehen bis zu einer maximalen Vorhersagefrist von 78 Stunden und einer räumlichen Auflösung von 7 km zur Verfügung. Das System liefert alle sechs Stunden neue Vorhersagen. Die Vorhersagen von 0 bzw. 12 Uhr erstrecken sich über eine Vorhersagefrist von 78 Stunden und jene von 6 bzw. 18 Uhr nur über 48 Stunden. Ein

anderes lokales Wettermodell im europäischen Raum ist das ALADIN-Modell (Aire Limitee Adaptation dynamique Developpement International). Es wird im Rahmen eines internationalen Projektes von 15 überwiegend europäischen nationalen Wetterdiensten laufend weiterentwickelt. Die österreichische Version des ALADIN-Modells wird von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik seit 1998 operationell eingesetzt und umfasst den zentral- und osteuropäischen Raum, unter besonderer Berücksichtigung der Alpen. Die ALADIN-Vorhersagen werden mit einer räumlichen Auflösung von ca. 10 km und einer zeitlichen Diskretisierung von einer Stunde gerechnet. Neue Niederschlags- und Temperaturprognosen stehen zweimal täglich um 0 und 12 Uhr mit einer Vorhersagefrist von maximal 72 Stunden zur Verfügung. Generell sind die zu erwartenden Niederschlagsmengen mit numerischen Wettermodellen gut prognostizierbar. Größere Unsicherheiten sind hingegen bei der genauen räumlichen Zuordnung des Niederschlages zu erwarten.

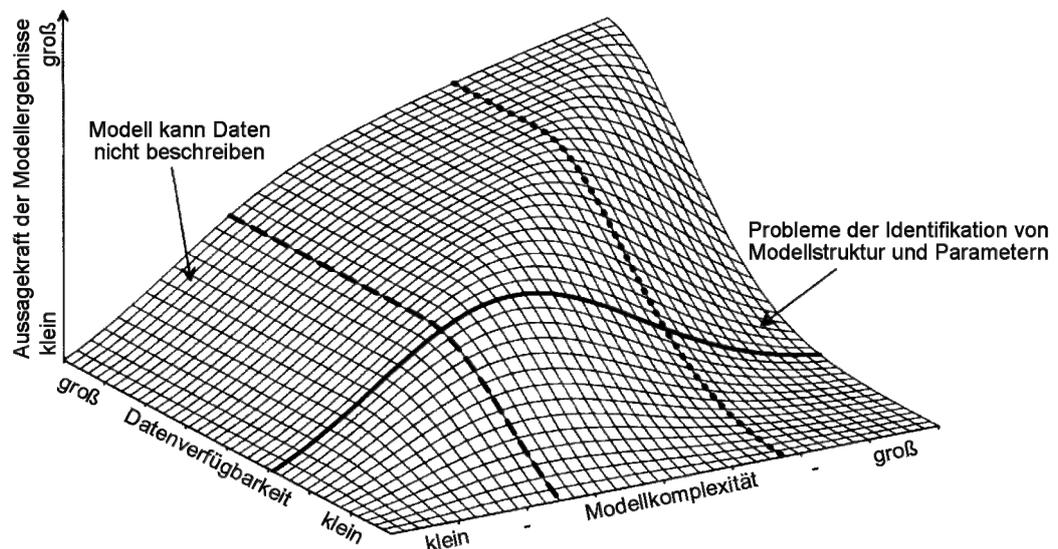
Durch die Kombination der Informationen aus Nowcasting und numerischen Wettermodellen können die jeweiligen Stärken der verschiedenen Methoden genutzt werden. Ein Beispiel für solch einen Kombinationsansatz ist die an der ZAMG entwickelte INCA Methode (Haiden et al., 2006). In Abhängigkeit von der Prognosefrist werden Nowcasting, lokale und globale Vorhersagen durch Gewichtungsfaktoren miteinander kombiniert.

Ein praktisches Problem, mit dem alle Anwender meteorologischer Prognosen zu kämpfen haben, ist deren stark wetterlagenabhängige Qualität. Auch wenn sich das meteorologische Prognosesystem nicht verändert, werden Niederschlagsereignisse im Laufe der Zeit mit sehr unterschiedlicher Güte prognostiziert, weil die Vorhersagbarkeit der Atmosphäre starken Schwankungen von Tag zu Tag unterliegt. Damit ergeben sich je nach Wetterlage unterschiedliche Unsicherheiten bei der Prognose von Niederschlägen. Eine mögliche Strategie, die in letzter Zeit immer häufiger aufgegriffen wird, ist die Verwendung von Ensembleprognosen des Niederschlages. In Abschnitt 6 wird im Detail auf diese Möglichkeit zur Abschätzung der Prognoseunsicherheit eingegangen.

### **3. Niederschlag-Abfluss Modelle**

Eine wichtige Komponente von Hochwasservorhersagesystemen sind hydrologische Modelle zur Beschreibung der Transformation des gefallenen Niederschlages in Abflüsse in Bächen und Flüssen. In Abhängigkeit der hydrologischen Gebietseigenschaften ergeben sich große Unterschiede in den Abflussreaktionen verschiedener Einzugsgebiete. Für hochgelegene Gebiete in alpinen Regionen sind dabei andere hydrologische Abflussmechanismen maßgebend als für trockene Gebiete in den Tiefebenen. Bei der Auswahl einer geeigneten Modellstruktur sollte daher der erste Blick immer auf die individuellen Gegebenheiten des Aussagegebietes gerichtet sein. Die Identifizierung der maßgeblichen Abflussprozesse stellt somit die Grundlage für die Erstellung eines realistischen Niederschlag-Abfluss-Modells dar. Das Spektrum von Niederschlag-Abfluss-Modellen reicht von einfachen Black Box Modellen bis hin zu detaillierten Modellen auf Basis von physikalischen Gleichungen. Neben den

speziellen Gebietseigenschaften beeinflusst auch die Verfügbarkeit und der Informationsgehalt von Messdaten im Modellgebiet die Auswahl eines geeigneten Modelltyps. Mit steigender Informationsdichte im Aussagegebiet können auch komplexere Modelle mit höherem Detaillierungsgrad zur Beschreibung der hydrologischen Prozesse verwendet werden. Die Wechselwirkung von Datenverfügbarkeit und Modellkomplexität auf die Aussagekraft der Modellergebnisse ist in Abbildung 3 dargestellt. Komplexe Modellstrukturen in Verbindung mit einer geringen Datenverfügbarkeit führen zu Problemen bei der Identifikation der Modellparameter und somit zu einer verminderten Aussagekraft des Modells. Einfache Modelle sind bei guter Datenverfügbarkeit nicht in der Lage den Informationsgehalt der Daten in vollem Umfang zu beschreiben. Die optimale Komplexität des Niederschlag-Abfluss-Modells ergibt sich somit aus der Informationsdichte der verfügbaren Daten im Modellaussagegebiet.



**Abb. 3:** Güte der Modellergebnisse in Abhängigkeit von der Modellkomplexität und der Informationsdichte der verfügbaren Messdaten (Grayson und Blöschl, 2008).

Die zweckmäßige Modellkomplexität von Niederschlag-Abfluss-Modellen für das Einsatzgebiet der operationellen Hochwasservorhersage hängt somit wesentlich von der räumlichen Ausdehnung des Aussagegebietes und der verfügbaren Informationsdichte ab. Während für die ersten Vorhersagemodelle durchwegs auf sehr einfache und robuste Blockmodelle zurückgegriffen wurde, geht heute der Trend in Richtung von komplexeren und räumlich hoch aufgelösten Modellansätzen. Diese Entwicklung lässt sich von der Forderung nach immer längeren Vorhersagefristen für immer kleinere Gebiete bei gleichzeitiger Verdichtung der Messnetze ableiten.

Bei den einfachen Blockmodellen handelt es sich meist um ereignisbasierte Ansätze die zur Simulation und Vorhersage von den Vorhersagebeauftragten im Fall einer potentiellen Hochwassergefahr manuell gestartet werden können. Diese Modellansätze

beschreiben die Abflusskonzentrationsprozesse in den Einzugsgebieten. Am häufigsten kommen dabei Modelle zum Einsatz, die auf dem Einheitsganglinienprinzip basieren. Die Abflussbeiwerte, die eine starke Abhängigkeit vom Feuchtezustand im Gebiet aufweisen, müssen je nach vorherrschender hydrologischer und meteorologischer Situation von den Prognosebeauftragten abgeschätzt werden und stellen eine Eingangsgröße für das Modell dar. Als Indikatoren für die Abflussbereitschaft der Gebiete wird dabei meist auf einfache Indexzahlen, wie den Vorregen für eine definierte Zeitperiode, zurückgegriffen. Die Parameterschätzung erfolgt im Regelfall durch die Analyse von beobachteten Hochwasserereignissen für die vorhersagerelevanten Pegelinzugsgebiete. Da die ereignisbezogenen Niederschlag-Abfluss-Modelle nur bedingt zur automatisierten Erstellung von Hochwasservorhersagen eignen, ist der Prognosebeauftragte immer in den Prozess der Vorhersage eingebunden. Die Integration von hydrologischen Erfahrungen und detaillierten Gebietskenntnissen der verantwortlichen Personen erhöht die Plausibilität der erstellten Vorhersagen, speziell im Fall von hydrologischen Extremsituationen (Blöschl, 2008). Ein weiterer Vorteil der Beteiligung von orts- und fachkundigen Personen in den Vorhersageprozess ist die größere Akzeptanz und das Zutrauen in die Prognosen. Diese Aspekte spielen vor allem bei der Kommunikation von Hochwasserwarnungen an übergeordnete politische Instanzen und die Bevölkerung eine wichtige Rolle.

Ein Beispiel für ein Hochwasserwarnsystem auf Basis eines Ereignismodells ist das Hochwasservorhersagesystem in Kärnten (Moser et al., 2006). Zur rascheren Handhabung im Hochwasserfall wurden im Vorfeld zahlreiche Szenarienrechnung mit unterschiedlichen Abflussbeiwerten und Niederschlagsinputs analysiert und in einem Katalogsystem zusammengefasst. Beim verwendeten Niederschlag-Abfluss-Modell handelt es sich um ein ereignisbezogenes Blockmodell mit einer Aufteilung in schnelle, mittlere und langsame Abflusskomponenten. Die Parameterschätzung erfolgte durch die Nachrechnung von zahlreichen historischen Hochwasserereignissen. Als Hilfsmittel zur Einschätzung der Vorbefeuchtung und des Schneevorrats und der Schneeschmelze in den verschiedenen Einzugsgebieten wird ein flächendetailliertes kontinuierliches Niederschlag-Abfluss-Modell verwendet. Als Modelleingangsgrößen stehen INCA Niederschlags- und Temperaturprognosen der ZAMG zur Verfügung. Die Kombination der Informationen aus dem Katalogsystem mit der Einschätzung der hydrologischen und meteorologischen Situation durch die Vorhersagebeauftragten ermöglicht eine rasche und effiziente Beurteilung der zu erwartenden Hochwassersituation.

Der generelle Trend bei der Hochwasservorhersage geht in Richtung von automatisierten Prognosesystemen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Für die automatisierte Erstellung von Hochwasservorhersagen bietet sich der Einsatz von kontinuierlichen Niederschlag-Abfluss-Modellen an. Dabei handelt es sich um bilanzierende, konzeptionelle Modelle zur laufenden Simulation der Abflussvorgänge in einem Einzugsgebiet. Als Eingangsgrößen sind Messwerte bzw. Prognosen des Niederschlags und der Lufttemperatur erforderlich. Entsprechend den gebiets-

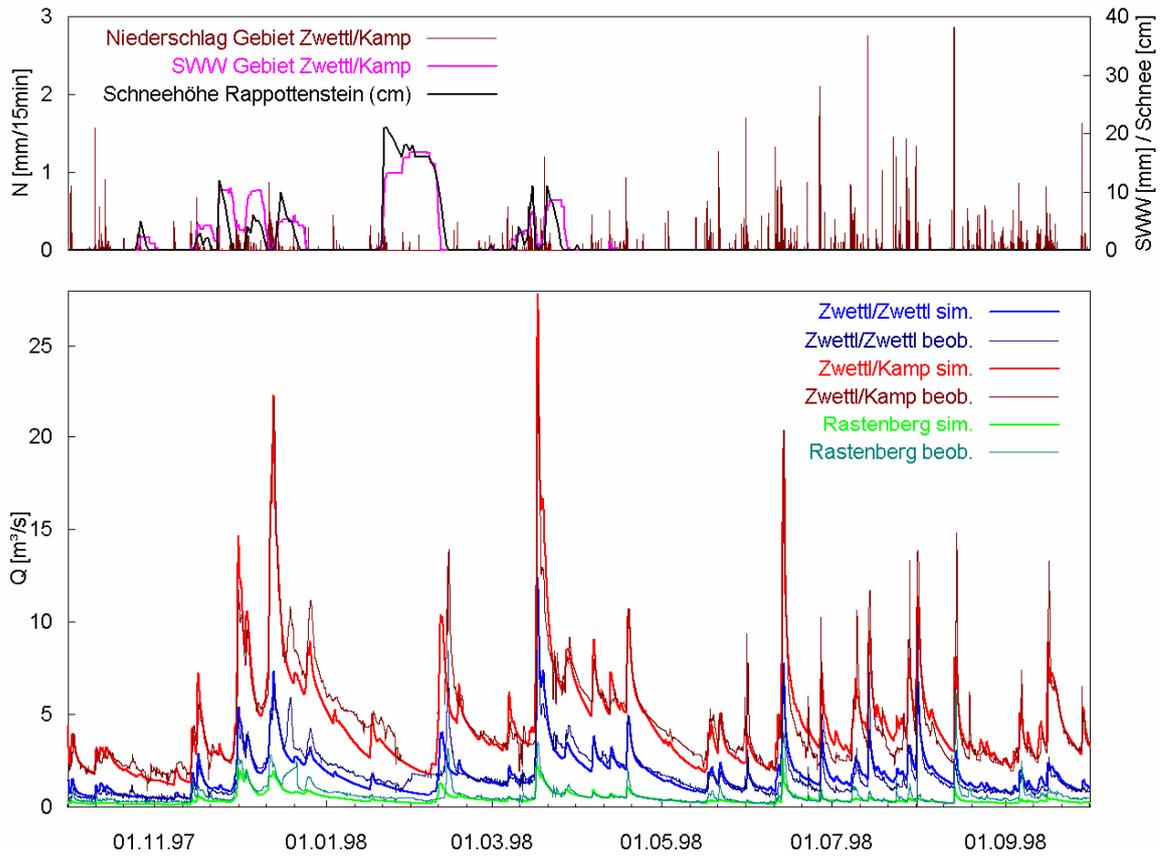
spezifischen Erfordernissen können diese konzeptionellen Modelle Module zur Simulation der Schneeakkumulation und Schneeschmelze, des Bodenfeuchtehaushalts sowie der Abflusskonzentration im Gebiet und im Gerinne beinhalten. Der plausiblen Simulation der Bodenfeuchte kommt dabei eine besonders wichtige Rolle zu, da diese modellintern zur Bestimmung des Anteils an abflusswirksamen Niederschlag herangezogen wird. Für die operationelle Hochwasservorhersage werden kontinuierliche Niederschlag-Abfluss-Modelle mit unterschiedlichem räumlichen Detaillierungsgrad verwendet. Abhängig von der Datenverfügbarkeit und der Größe der Modellgebiete erfolgt die räumlich Gliederung der Modelle in ganze Einzugsgebiete bis hin zu flächendetaillierten Strukturen mit Rasterweiten im Bereich von wenigen hundert Metern. Der Vorteil von flächendifferenzierten Abflussmodellen besteht darin, die räumlich unterschiedlichen Niederschlags- und Abflussbildungsverhältnisse berücksichtigen zu können. Allerdings benötigen solche Modelle für jedes Rechenelement eine große Zahl von Modellparametern. Werden die Modellparameter nicht passend gewählt, sondern etwa Standardwerte auf Basis von Boden-, Gelände- und Landnutzungskarten verwendet, so sind die Simulationen mit solchen Modellen in der Regel ungenauer als solche, die mit traditionellen ingenieurhydrologischen Systemansätzen erzielt werden können (Grayson und Blöschl, 2000). Der Kernpunkt für die Eignung des Modells ist, ob die hydrologische Dynamik im jeweiligen Gebiet treffend beschrieben wird, und dafür sind Informationen über eben diese Dynamik im jeweiligen Gebiet notwendig (Blöschl, 2005).

Eine mögliche Strategie zur Identifikation und Verifikation der Modellstruktur und Parameter eines flächendetaillierten Niederschlag-Abfluss-Modells wird im Folgenden für das Beispiel des Vorhersagemodells am Kamp beschrieben. Für die Erstellung des vorliegenden Vorhersagemodells wurde eine Vorgangsweise entwickelt, die sich von der herkömmlichen Verwendung von Standardwerten für flächendifferenzierte Modelle im Grundsatz unterscheidet (Reszler et al., 2006b). Die zugrundeliegende Philosophie der Parameter- und Modellidentifikation besteht darin, in detektivischer Arbeit alle zugänglichen Belege für das hydrologische Verhalten zu sammeln und daraus eine Modellvorstellung über die Funktion des hydrologischen Systems für unterschiedliche Situationen abzuleiten. Die Belege unterscheiden sich nach dem zu beschreibenden Prozess.

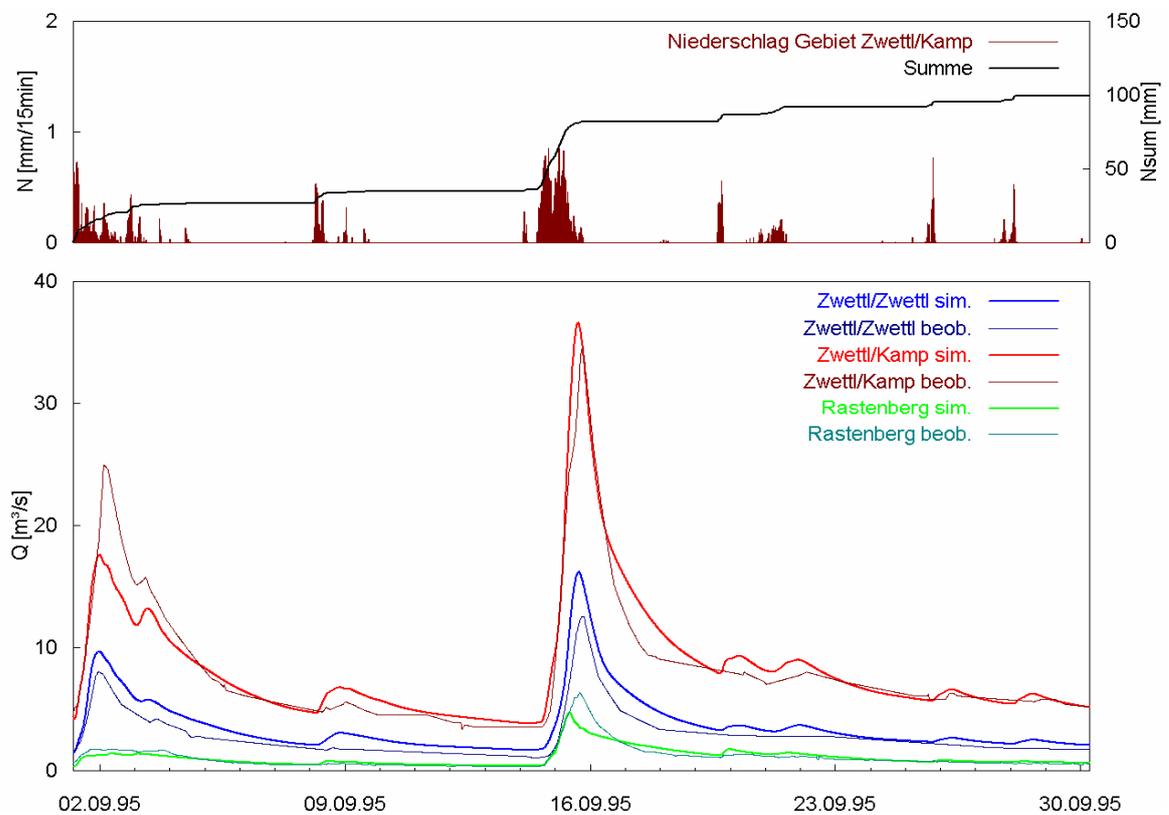
Die Abflussbildung wird für jedes Rasterelement durch einen konzeptionellen Bodenfeuchteansatz beschrieben, der an eine Variante des HBV-Modells (Parajka et al., 2005) angelehnt ist. Die Parameter- und Modellidentifikation besteht aus fünf Schritten, die in Reszler et al. (2006a) im Detail angeführt sind:

- Schritt 1: Setzen von a priori Parameterwerten
- Schritt 2: Feinabstimmung der räumlichen Muster durch spektrale Entmischung
- Schritt 3: Parametereichung (Feinabstimmung)
- Schritt 4: Feinabstimmung der Modellstruktur
- Schritt 5: Plausibilitätskontrolle der simulierten räumlichen Muster

Die a priori Parameterwerte für jedes Pixel wurden manuell festgelegt auf Basis von Voranalysen von beobachteten Abfluss- und Grundwasserganglinien und Feldbegehungen. Die Abflusssimulationen wurden in den einzelnen Schritten mit den Abflussbeobachtungen verglichen, wobei die Dynamik des Abflusses differenziert betrachtet wurde. Eine Analyse auf Basis der jahreszeitlichen Variabilität ergab Belege für die Größe der Verdunstungsparameter, der Perkulationsparameter und der langsamen Grundwasserparameter. Im Zusammenhang mit der Hochwasservorhersage ist die saisonale Dynamik wichtig, um die Anfangsbedingungen für die Prognose möglichst gut zu bestimmen, insbesondere die Bodenfeuchteverteilung im Gebiet, aber auch gegebenenfalls die Schneeverteilung (Abb. 4). Eine Analyse der Wellenform und des Wellenvolumens auf Ereignisbasis ergab Belege für das Verhalten der rascher reagierenden Systemkomponenten und den damit zusammenhängenden Modellparametern bzw. Modellkomponenten (Abb. 5). Dabei wurde nach Ereignisgrößen und Ereignistypen unterschieden. Synoptische (großräumige) und konvektive (kleinräumige) Ereignisse, Schneeschmelz- und Regen-auf-Schnee Ereignisse besitzen eine unterschiedliche Abflussdynamik. Diese getrennt zu betrachten ist wichtig, um mit dem Modell möglichst gut unterschiedliche hydrologische Situationen zu beschreiben. Diese Vorgangsweise unterscheidet sich vollkommen von der manchmal angewandten Minimierung einer Zielfunktion, bei der eine derartige Differenzierung nicht möglich ist und demnach eine passende Beschreibung unterschiedlicher Situationen nicht im gleichen Ausmaß zu erwarten ist. Im Zuge der Modellidentifikation wurden auch Modellkomponenten an die Situation im Kampfgebiet angepasst. So wurde beispielsweise in Schritt 5 ein Bypass in die Modellstruktur eingeführt, der eine schnelle Entwässerung der obersten Bodenschicht während eines Ereignisses zufolge Perkulation in den geklüfteten Fels wiedergibt. Die Plausibilität des Modells wurde durch eine Beurteilung der simulierten räumlichen Muster getestet. So wurde etwa die Plausibilität der räumlichen Verteilung des Oberflächenabflusses für unterschiedliche Situationen beurteilt im Vergleich zur Auskunft von Ortskundigen, die räumliche Verteilung der Bodenfeuchte im Vergleich zu Feldbegehungen und die räumliche Schneeverteilung im Vergleich zu Schneehöhendaten und Schneemustern (Parajka et al., 2006).



**Abb. 4:** Abflusssimulationen zur Identifikation der Modellstruktur, die die saisonale Dynamik betrifft. Oktober 1997 bis Oktober 1998 für drei Pegel im oberen Kampgebiet.



**Abb.5:** Abflusssimulationen zur Identifikation der Modellstruktur, die die Dynamik von Einzelereignissen betrifft. September 1995 für drei Pegel im oberen Kampgebiet.

Die Modellerstellung auf Basis von Belegen erfordert einen großen Arbeitsaufwand. Dieser Arbeitsaufwand besteht nicht in der Durchführung zahlreicher Simulationen und Minimierung einer Zielfunktion, sondern in einer detaillierten hydrologischen Interpretation und Argumentation der Konzeptionen. Vorwissen über die Eigenschaften hydrologischer Prozesse ist dafür Voraussetzung. Dieser Einsatz wird als notwendig erachtet, um die Modellstruktur und Modellparameter in einer plausiblen Weise zu bestimmen und damit ein für unterschiedliche Situationen zutreffendes Modell zu erhalten.

#### **4. Wellenablauf**

Der Wellenablauf beschreibt die Veränderungen einer Zuflusswelle beim Ablauf in einem Gerinneabschnitt. In Abhängigkeit von Gerinnegeometrie und Gewässercharakter ändern sich die Form, die Größe und die Schnelligkeit der ablaufenden Welle. Modelle zur Beschreibung dieser Wellenverformungen zwischen entlang von Gerinneabschnitten werden als Wellenablaufmodelle bezeichnet. Basierend auf Beobachtungen von Wasserständen und Durchflüssen an einem definierten Gerinnequerschnitt kann durch Anwendung solcher Modelle die Laufzeit und die Form der Welle für flussabwärts gelegene Gerinneprofile abgeschätzt werden. Wellenablaufmodelle eignen sich somit ausgezeichnet zum Einsatz für die Hochwasservorhersage. Für den operationellen Betrieb der Modelle ist die Verfügbarkeit von Abfluss- bzw. Wasserstandsmessungen in Echtzeit erforderlich. Die erzielbaren Vorhersagefristen hängen dabei von der Charakteristik des betrachteten Gerinneabschnitts ab. Für große Flüsse mit geringen Fließgeschwindigkeiten können bedeutend längere Vorhersagefristen als für kleine, schnell fließende Gewässer realisiert werden. Generell sind mit Wellenablaufmodellen bessere Vorhersagegenauigkeiten zu erreichen als mit hydrologischen Niederschlag-Abfluss-Modellen. Bei der Messung von Wasserständen und Abflüssen ergeben sich deutlich geringere Unsicherheiten als dies durch die hohe räumliche und zeitliche Variabilität bei der Niederschlagsbestimmung der Fall ist. Weiters sind die maßgeblichen Prozesse beim Wellenablauf durch die Modelle einfacher zu erfassen, als dies, auf Grund von kleinräumigen Heterogenitäten, bei der Niederschlag-Abfluss-Modellierung möglich ist. Zusätzliche Unsicherheiten bei der Anwendung von Wellenablaufmodellen ergeben sich durch laterale Zuflüsse im Bereich des modellierten Gerinneabschnitts die nicht durch Pegelmessstellen erfasst werden. Vor allem für größere Gewässer werden die Durchflüsse in der betrachteten Flussstrecke meist vom Zufluss am Oberliegerpegel dominiert und kleinere laterale Zuflüsse können vernachlässigt werden. Ist die Berücksichtigung der seitlichen Zubringer erforderlich, so können Niederschlag-Abfluss-Modelle zur Abschätzung der Zuflüsse verwendet werden. Dadurch werden jedoch zusätzliche Unsicherheiten in die Vorhersagen der Abflüsse und Wasserstände eingetragen.

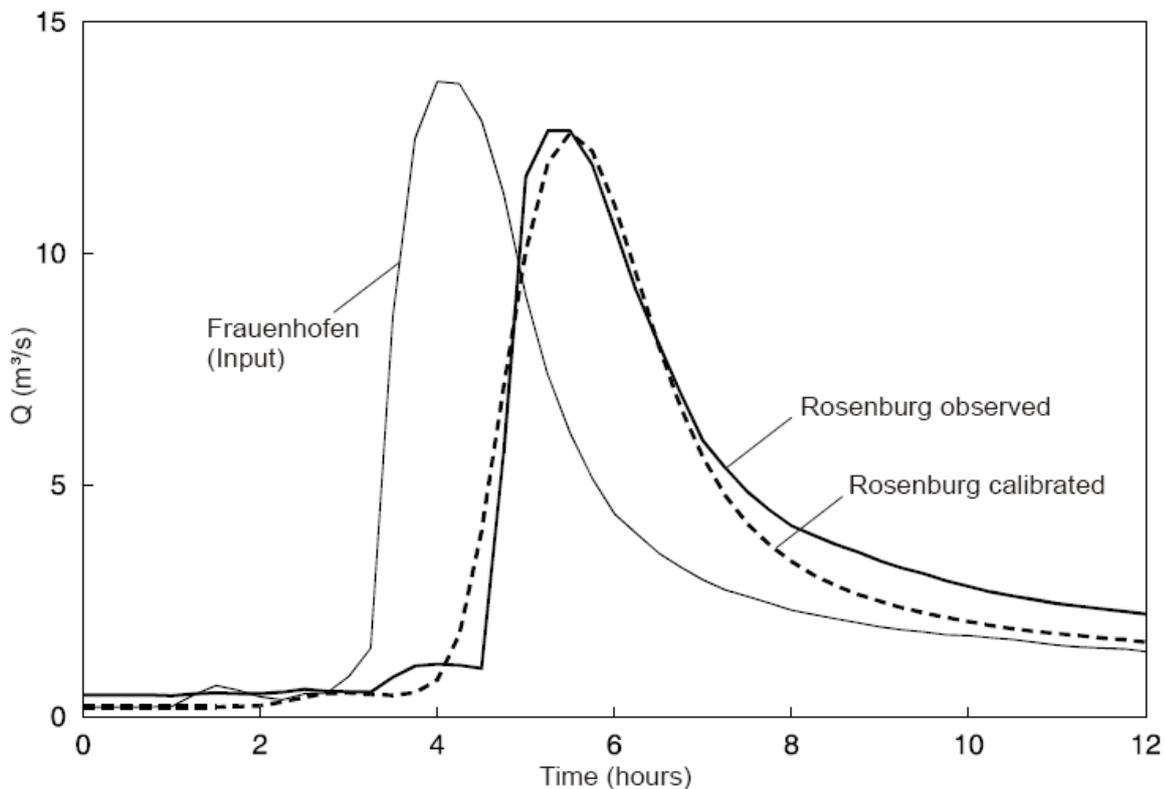
Grundsätzlich kann der Wellenablauf durch hydrodynamische oder hydrologische Modelle beschrieben werden. Die hydrodynamische Modellierung beruht auf den physikalischen Grundgesetzen der Massen- und Impulserhaltung. Die Kombination

der beiden Gesetze führt zu einem System von partiellen Differentialgleichungen (St. Venant'sche Gleichungen). Im allgemeinsten Fall erfolgt der Ansatz des Gleichungssystems für den dreidimensionalen Raum. Für den operationellen Einsatz in Vorhersagesystemen erfolgt im Regelfall näherungsweise eine eindimensionale Formulierung in Fließrichtung. Diese Vereinfachung ist dann zulässig wenn keine Rückstaueffekte und keine komplexen Querströmungen im Modellgebiet zu erwarten sind. Zweidimensionale hydraulische Modelle kommen hauptsächlich zur Berechnung von Überflutungsbereichen und Hochwassergefährdungsbereichen zum Einsatz. Die Lösung der Differentialgleichungssysteme erfolgt dabei mit numerischen Näherungsalgorithmen auf Basis von finiten Differenzen oder finiten Elementen. Eine analytische Lösung ist nur in Sonderfällen für stark vereinfachte Gerinnegeometrien möglich. Für die Modellerstellung sind detaillierte Informationen über die Geometrie der Gerinnequerschnitte, die Geländeform, die Rauigkeiten der Gewässersohle und des Vorlandes erforderlich. Als Modellinput dienen die beobachteten Wasserstände und Durchflüsse am oberen Modellrand. Die Rauigkeitsbeiwerte dienen als Eichparameter und werden durch die Anpassung der Modellergebnisse an beobachtete Durchfluss- und Wasserstandsdaten bzw. durch den Abgleich der simulierten und beobachteten Hochwasseranschlaglinien bestimmt. Als Modelloutput stehen Wasserstände, Durchflüsse und Fließgeschwindigkeiten an allen Berechnungsknoten entlang des modellierten Gerinneabschnittes zur Verfügung.

Eine Alternative zur hydrodynamischen Modellierung sind hydrologische Wellenablaufmodelle. Dabei handelt es um Konzeptmodelle auf Basis des Massenerhaltungsprinzips und einer einfachen Speicherbeziehung. Die Rauigkeitsbeiwerte und Gerinnegeometrien im gesamten Gerinneabschnitt werden bei den hydrologischen Verfahren nur implizit durch die Wahl der Speicherbeziehung und deren Parameter berücksichtigt. Die häufigsten Methoden sind das Kalinin-Miljukov-Verfahren, das Muskingum Verfahren und die lineare Speicherkaskade (Nash-Kaskade). Die Verfahren unterscheiden sich im Wesentlichen nur durch die unterschiedliche Formulierung der Speicherbeziehung als Funktion vom Zufluss zum Gerinneabschnitt und dem Abfluss aus dem Gerinneabschnitt. Im Gegensatz zu den hydrodynamischen Modellen, wo detaillierte Simulationsergebnisse entlang der gesamten Modellstrecke vorhanden sind, erlauben hydrologische Modelle nur Aussagen über die Abflüsse am Ende des Gerinneabschnitts. Ähnlich den eindimensionalen hydrodynamischen Modellen ist der Einsatz von hydrologischen Wellenablaufmodellen auf Gerinneabschnitte ohne Rückstaueffekte und komplexe Querströmungen beschränkt. Die Kalibrierung der Modelle erfolgt üblicherweise anhand von beobachteten Hochwasserganglinien am Beginn und am Ende des betrachteten Gerinneabschnitts. Der Vorteil von hydrologischen Wellenablaufmodellen liegt in der einfachen und robusten Modellstruktur. Bei hydrodynamischen Modellen ergibt sich bei der näherungsweisen Lösung des Differentialgleichungssystems ein hoher numerischer Aufwand und es besteht die Gefahr von numerischen Instabilitäten. Die Verwendung von hydrologischen Wellenablaufmodellen ermöglicht auch für längere Gerinneabschnitte stabile und rasche Rechendurchläufe. Für die operationelle Hochwasservorhersage stellt dies

einen großen Vorteil dar. Auf Grund der impliziten Beschreibung des gesamten Gerinneabschnittes durch eine einzige Speicherbeziehung können durchflussabhängige Unterschiede im Wellenablauf, wie zum Beispiel durch Ausuferung, mit hydrologischen Wellenablaufmodellen nicht berücksichtigt werden. Diese Beschränkung kann durch die Verwendung von durchflussabhängigen Parametersätzen umgangen werden (Szolgay, 2007).

Eine mögliche Vorgangsweise bei der Parameterschätzung für ein durchflussabhängiges hydrologisches Wellenablaufmodell wird im Folgenden anhand des Vorhersagemodells am Kamp erläutert. Als Modell für den Wellenablauf wurde eine lineare Speicherkaskade mit durchflussabhängigen Parametern gewählt, die rechen-technisch sehr effizient ist und somit für die operationelle Hochwasservorhersage bestens geeignet ist. Die geringe Anzahl der Parameter erleichtert auch deren Bestimmung auf Basis von Belegen. Im ersten Schritt wurden vorläufige Parameterwerte für jede Wellenablaufstrecke gewählt. Dies erfolgte durch Beurteilung der topographischen Gegebenheiten (Fließlänge, -gefälle, Ausuferungsflächen, etc.) auf Basis von Querprofilen, Begehungen, Photos und Gesprächen mit Ortskundigen. Im zweiten Schritt wurden Pegeldata für unterschiedlich große Ereignisse ausgewertet und daraus die Modellparameter rückgerechnet. Im dritten Schritt wurden die Modellparameter angeeicht an Ergebnisse von instationären zweidimensionalen hydrodynamischen Simulationen. Die Vorteile dieser Vorgangsweise bestehen darin, dass die



**Abb. 6:** Eichung der Modellparameter für ein Hochwasserereignis im August 2005 an der Taffa (Frauenhofen bis Rosenberg). Die geeichten Parameterwerte für die lineare Speicherkaskade betragen  $n=15$  und  $n*k=1.5$  h.

Funktion des Systems (in diesem Fall durchflussabhängige Wellenverformung, etwa durch Ausuferung) beschrieben werden kann, ohne die numerisch aufwendigen hydrodynamischen Berechnungen im Vorhersagesystem durchführen zu müssen, sowie aus einer Plausibilitätsprüfung der Parameter. Aus einer Kombination der o.a. Belege ergibt sich für jeden Gewässerabschnitt eine Beziehung zwischen Modellparameter und Durchfluss, die dem Vorhersagesystem zugrundegelegt wird. Abb. 6 zeigt ein Beispiel für die Anpassung des Wellenablaufmodells an eine beobachtete Hochwasserganglinie im September 2005 an der Taffa zwischen Frauenhofen und Rosenberg.

## **5. Unsicherheiten im Vorhersagesystem**

### **5.1 Modellnachführung**

Um im Vorhersagefall die best mögliche Genauigkeit der Hochwasserprognosen zu erreichen ist es sinnvoll, die aktuell verfügbaren Abflussmessungen zur Reduktion der hydrologischen Unsicherheiten zu verwenden. Bei der Echtzeit-Vorhersage ist eine – auch nur kurze – schlecht modellierte Periode (z.B. systematischer Fehler, Anstieg einer Hochwasserwelle um einige Stunden zu spät) für den Anwender nicht akzeptabel. Die Echtzeit-Vorhersage von Durchflüssen erfordert daher oftmals eine Korrektur, eine Adjustierung, ein "updating" der Berechnung oder der Prognoseergebnisse bei bzw. nach jedem Berechnungszeitschritt. Zum Zeitpunkt der Prognoseerstellung werden neue Beobachtungswerte dazu verwendet, um Fehler im Ergebnis von vorherigen Berechnungen zu korrigieren bzw. die neue Vorhersage zu adaptieren.

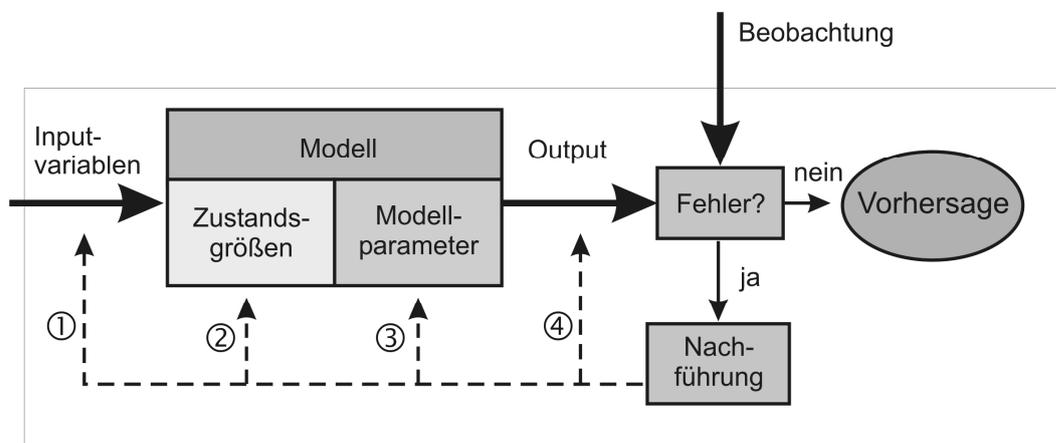
Bei operationellen Hochwasservorhersagesystemen existieren verschiedene hydrologische und meteorologische Unsicherheitsquellen. Zum Beispiel entstehen durch die vereinfachenden Annahmen bei der Abstraktion der Modellstruktur immer Abweichungen vom natürlichen System. Auch die Identifikation und Anpassung der Modellparameter ist immer mit Unsicherheiten behaftet. Mit zunehmendem Informationsgehalt der verfügbaren Daten können diese Parameterunsicherheiten zwar reduziert werden, aber ein gewisser Rest an Unschärfe verbleibt im System. Eine bedeutende Unsicherheitsquelle sind auch die meteorologischen Modelleingangsgrößen. Die exakte Beschreibung der räumlichen Niederschlagsmuster stellt eine schwierige Aufgabe dar. Die Größe der eingetragenen Unsicherheiten hängt dabei von der jeweils vorherrschenden meteorologischen Situation (Abschnitt 2). Auch die Ableitung der aktuellen Verdunstung aus beobachteten Lufttemperaturen und topographischen Eigenschaften bringt zusätzliche Unsicherheiten ins Vorhersagesystem ein.

#### **5.1.2 Möglichkeiten der Nachführung**

Bei Vorhersagen in Echtzeit sind zwar für die Eichung des Modells im Optimalfall ebenfalls geprüfte und ausreichend Daten vorhanden, im Echtzeitfall hat das Vorhersagesystem darüber hinaus auch mit Datenausfällen und nicht offensichtlichen Datenfehlern zu tun. Es ist aber wichtig, in allen Fällen gute Prognosen zu erstellen, da sonst

die Aufgabe des Modells nicht erreicht wird. Der zum nächsten Berechnungszeitschritt einlangende neue Beobachtungswert enthält die aktuelle Information über den im Einzugsgebiet ablaufenden Prozess und bietet daher die Möglichkeit, die zuvor erstellten Vorhersagen mit dieser neuen Beobachtung zu vergleichen, den Prognosefehler zu ermitteln und die Vorhersagerechnung so zu adaptieren, dass das Modellergebnis besser an die Beobachtung angepasst wird – dabei handelt es sich um die Nachführung des Modells. Essenziell notwendig ist daher das Eintreffen einer neuen Beobachtung – ohne diese ist Nachführung nicht möglich.

Grundsätzlich kann zwischen vier verschiedenen Arten der Modellnachführung unterschieden werden. Abhängig davon an welcher Komponente des Modells die Assimilation der beobachteten Daten erfolgt, können Parameter, Zustandsgrößen, Eingangsgrößen oder der Modelloutput selbst nachgeführt werden (Abbildung 7).



**Abb.7:** Mögliche Ansätze für die Nachführung in hydrologischen Modellen (nach Reefsgard, 1997, modifiziert).

### a) Nachführung der Modellparameter

Die Anpassung von Modellparametern wird sowohl von Refsgaard (1997), als auch von Todini (2005) als problematisch angesehen. Refsgaard zitiert Kachroo (1992), der das Aktualisieren von Modellparametern als "on-line Kalibrierung" definiert, und speziell für komplexere Modelle als nicht gerechtfertigt ansieht, da zu viele Parameter im Spiel sind, um gleichzeitig adaptiert zu werden. Kachroo hält den Gedanken, dass sich Modellparameter über den kurzen Zeitraum der Vorhersageerstellung verändern, für nicht akzeptabel und erkennt keine Vorteile in der re-Kalibrierung der Parameter mit jedem Zeitschritt. Todini (2005) führt an, dass das Schätzen von Parametern oftmals zu höchst unstabilen Ergebnissen führt und lehnt dieses Verfahren daher im Gleichklang mit dem von ihm zitierten WMO-Bericht "Simulated real-time intercomparison of hydrological models" (1992) ab.

Dem ist entgegenzuhalten, dass vom Konzeptionellen her weder die Modellstruktur, noch die dem gewählten Modell zugeordneten Modellparameter (bzw. -werte) als die einzig mögliche Art der Nachbildung des Prozesses – in diesem Fall des in hohem Grade nicht-linearen Niederschlag-Abfluss-Prozesses – angesehen werden kann. Wird

dieses Verhalten vom gewählten Modell nicht entsprechend wiedergegeben, ist es im konkreten Fall besser, die jeweiligen Parameter zu verändern, um eine gute Nachbildung des aktuellen Zustandes zu erreichen. Gute Erfahrungen mit der Anpassung von Modellparametern mittels eines Bayes'schen Systems und Kalman-Filter (siehe Beispiel Kamp) wurden im Zuge von Vorhersagen für die Salzach (System HYDRIS für den Hydrographischen Dienst des Amtes der Salzburger Landesregierung, Tauernkraft (TKW) und Salzburg AG) bzw. für die Donau und die Drau (System HYSIM für AHP/Verbund) gemacht.

Das Verfahren ist in diesem Fall deswegen gut geeignet, weil das Modell keine Speicher verwendet, die über einen Bilanzierungszeitraum ausgeglichen sein sollten, sondern weil es sich bei der Beschreibung der Wellentransformation via Nash-Kaskade um ein Verfahren handelt, das gerade durch die Nachführung sehr schnell auf beobachtete Änderungen im Abflussgeschehen, die durch eine Änderung der Parameter für die Wellentransformation beschrieben werden können, reagieren kann. Den auftretenden Veränderungen zwischen Zufluss- und Abflussvolumen wird Rechnung getragen, indem in der Beobachtungsgleichung ein multiplikativer Volumskorrekturfaktor oder ein additives Korrekturglied eingeführt wird, die beide einer Nachführung unterworfen werden.

#### **b) Update der Zustandsvariablen**

Eine andere Möglichkeit ist es, Zustandsvariablen eines kontinuierlichen Modells – z.B. das Schnee-Wasser-Äquivalent (SWE) oder den Wassergehalt einzelner Speicher im Modell – zu adaptieren. Speziell die Beschreibung der Zustände Vorbefeuchtung und Mächtigkeit einer eventuellen Schneedecke sind wegen ihres großen Einflusses auf die Einzugsgebietsreaktion für die gute Modellierung des Abflussgeschehens essenziell. Die direkte Variante ist es, den modellierten Systemzustand zum aktuellen Berechnungszeitpunkt durch den entsprechenden beobachteten Wert zu ersetzen. Das erfordert allerdings aktuelle Messwerte, die für typische Zustandsvariablen kontinuierlicher Wasserhaushaltsmodelle wie z.B. "Wassergehalt einzelner Speicher" nicht einfach zu messen sind. Ein aktueller Forschungsschwerpunkt in diesem Zusammenhang ist die Assimilation von satellitenbasierten Bodenfeuchtemessungen in hydrologische Modelle (Parajka et al.,2009; Hasenauer et al.,2009). Eine alternative Möglichkeit ist es, die Zustandsvariablen anhand der beobachteten Abflussmesswerte zu optimieren. Ein geeignetes Verfahren für die optimale Schätzung der Abflusssimulation ist die Methode des Kalman-Filter, bei der die Gesamtunsicherheit unter Berücksichtigung der Modell- und der Beobachtungsunsicherheit minimiert wird. Für lineare Systeme ist diese Methode direkt anwendbar, für nichtlineare Systeme sind Modifikationen notwendig (erweiterter Kalmanfilter, Ensemble-Kalmanfilter), mit deren Hilfe näherungsweise gearbeitet werden kann.

#### **c) Update der Inputvariablen**

Diese Art der Korrektur kann angewendet werden, wenn als Quelle für Vorhersagefehler die Inputdaten (zumeist Temperatur und Niederschlag) identifiziert werden können. Hierbei müssen die Inputdaten so lange verändert werden, bis die

Modellergebnisse bestmöglich an die Beobachtungen angepasst sind. Der Input „Niederschlag“ ist niemals die „wahre“, im Einzugsgebiet tatsächlich aufgetretene Menge Regen oder Schnee, da er aus Punktmessungen und daraus ermittelten flächenhaften Daten (Gebietsmittel, Rasterwerte) hervorgeht. Es handelt sich also um die aus den Beobachtungen ermittelte, bestmögliche Annäherung an die Wirklichkeit. Die Änderung von Inputdaten geht bei Speichermodellen mit einer Änderung von Zustandsgrößen einher, kann also auch zur Nachführung von Zustandsgrößen herangezogen werden.

#### **d) Update der Modellergebnisse – Outputkorrektur**

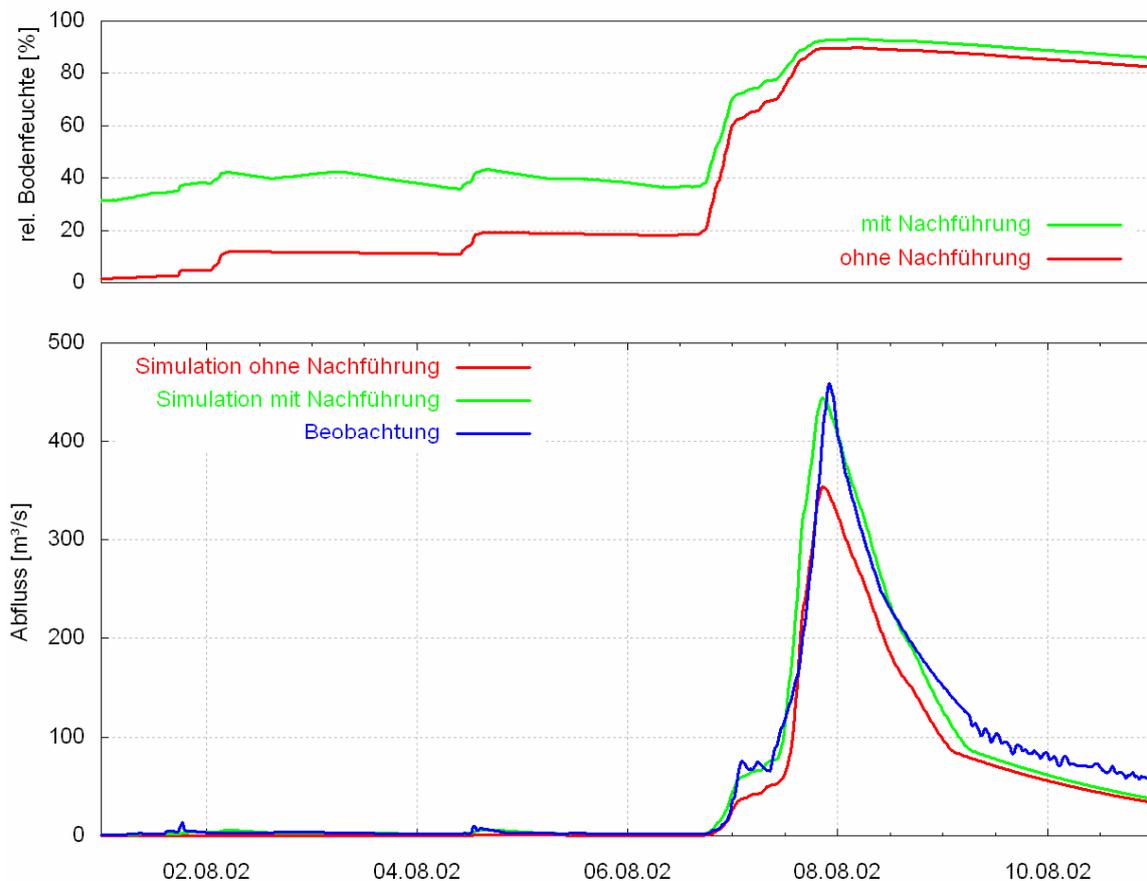
Das Nachführen der Modellergebnisse ist das laut der WMO-Studie (1992) am weitesten verbreitete Verfahren. Das Nachschalten einer Outputkorrektur an den eigentlichen Rechenschritt eines Vorhersagemodells ist an keine Voraussetzungen gebunden. Die Outputkorrektur ist unabhängig vom Prognoseverfahren.

Bei der Outputkorrektur werden die Beobachtungen des Abflusses mit den Vorhersagen aus dem Modell verglichen und versucht, die Fehler entweder mittels eines statistischen Ansatzes (z.B. ein ARMA-Modell) vorherzusagen, um die Prognosen zu verbessern (Todini, 2005). Es ist festzuhalten, dass die Fehlerprognose auf dem aktuellen Zustand des Einzugsgebietes beruht und daher mit zunehmender Vorhersagefrist an Genauigkeit verliert.

#### **5.1.3 Fallbeispiel für das Vorhersagesystem am Kamp**

Eine Möglichkeit zum Einsatz von Inputnachführung und Outputkorrektur wird anhand des Beispiels des operationellen Vorhersagesystems am Kamp beschrieben. Ziel der Hochwasservorhersagen ist es, für alle Prognosefristen die Unsicherheiten möglichst klein zu halten. Es wurden deshalb zwei Nachführalgorithmen eingesetzt, um die Unsicherheiten weiter zu reduzieren. Der erste Algorithmus (Komma et al., 2006a) führt den Bodenfeuchtezustand des Gebietes nach. Im Kampgebiet hängen die Abflussbeiwerte sehr stark von der Vorbefeuchtung ab. Wird diese Vorbefeuchtung durch eine systematische Über- oder Unterschätzung der Verdunstung bzw. des Niederschlages im Modell ungenau abgebildet, sind entsprechende Fehler in der Abflussprognose zu erwarten. Der aktuelle Abfluss ist ein ausgezeichneter Indikator für den Bodenfeuchtezustand des Gebietes und deshalb sollte es möglich sein, durch Verwendung aktueller Abflussdaten die Abflussprognosen zu verbessern. Ein in der Wasserwirtschaft für derartige Zwecke häufig verwendetes Verfahren ist der Kalman Filter (Schilling, 1987). Dieser besteht aus einer Wichtung von Beobachtung und Simulation, wobei das dafür notwendige Kalmangewicht aus den Messvarianzen und Modellvarianzen (d.h. angenommenen Messfehlern und Modellfehlern) ermittelt wird. Die ursprüngliche Form des Kalman Filters ist für lineare Modelle geeignet. Für nicht-lineare Modelle wurden in der Literatur verschiedene Erweiterungen vorgeschlagen, wie etwa der Erweiterte Kalman Filter und der Ensemble Kalman Filter. Die Vorteile des Ensemble Kalman Filters (EnKF) (Evensen, 1994) bestehen darin, dass keine Linearisierung notwendig ist und der Algorithmus durch die Vorwärtsrechnung stabil ist. Für die Hochwasserprognosen am Kamp wurde der Ensemble Kalman Filter

herangezogen. Als Messunsicherheit wurde dabei die Unsicherheit in den Abflussdaten angesetzt. Als Modellunsicherheit wurde die Unsicherheit im Input (Niederschlag, Verdunstung) und dessen Auswirkung auf die Bodenfeuchte angesetzt. Im Ensemble Kalman Filter erfolgt die Berechnung des Kalmangewichts durch zahlreiche interne Simulationen (d.h. ein Ensemble), die sich durch kleine Differenzen im Niederschlagsinput (Perturbationen) unterscheiden. Zur Aktualisierung der Bodenfeuchte wurde ein Ähnlichkeitsansatz gewählt, der die Bodenfeuchte mit dem geschätzten Abfluss in Übereinstimmung bringt. Im Gegensatz zu anderen Nachführalgorithmen mit Hilfe des Abflusses (z.B. Schilling, 1987) wird im vorliegenden Ansatz nicht die Abflussbildung während des Ereignisses nachgeführt, sondern die Entwicklung der Bodenfeuchte zwischen den Ereignissen. Die Wirkungsweise des Ensemble Kalman Filters für das Kampmodell ist in Abb. 8 dargestellt. Zwei Simulationsläufe wurden durchgeführt, die mit den gleichen Anfangsbedingungen der Bodenfeuchte gestartet wurden, die zu Testzwecken auf vollständig trocken gesetzt wurde. Im ersten Simulationslauf ohne Nachführung (rote Linien in Abb. 8) ist deshalb die relative Bodenfeuchte während des gesamten Simulationszeitraumes klein und durch die Unterschätzung der Bodenfeuchte wird auch der Abfluss unterschätzt. Im zweiten Simulationslauf mit Nachführung (grüne Linien in Abb. 8) interpretiert der Ensemble Kalman Filter die Differenz zwischen simuliertem Abfluss und beobachtetem Abfluss



**Abb. 8:** Wirkungsweise des Ensemble Kalman Filters für den Pegel Zwettl/Kamp (622 km<sup>2</sup> Einzugsgebietsfläche).

im Juli und Anfang August 2002 als Fehler im Niederschlag und Verdunstung. Die Verdunstung wird rechnerisch verkleinert (bzw. der Niederschlag vergrößert), dadurch steigt die Bodenfeuchte stärker an. Die Anfangsbedingungen für das Ereignis am 8. August werden dann besser geschätzt als ohne Nachführung und damit ist zu erwarten, dass auch das Ereignis selbst genauer prognostiziert wird.

Der zweite Nachführalgorithmus besteht aus einem additiven statistischen Fehlermodell, das die Autokorrelation der Abflussprognosefehler ausnützt. Die statistischen Eigenschaften des Fehlers unterscheiden sich stark je nach hydrologischer Situation. Im Bereich des Anstieges und des Scheitels von Abflusswellen dominieren die raschen Abflusskomponenten und die raum-zeitliche Dynamik des Niederschlages. Die Fehler sind deshalb nur über wenige Stunden korreliert. Bei Trockenwetterabfluss bzw. im Auslaufbereich von Abflusswellen dominieren die langsamen Abflussanteile aus den unteren Bodenschichten, welche einer geringeren zeitlichen und räumlichen Dynamik unterliegen. Dadurch ergibt sich eine zeitlich gleichmäßigere Fehlerstruktur und damit eine längere Autokorrelation. Die passende Autokorrelationslänge wurde für die Vorhersage als eine Funktion des Gebietsniederschlages des jeweiligen Gebietes und der Zeit seit diesem Niederschlag angesetzt. Dadurch war es möglich, die statistische Fehlerstruktur je nach hydrologischer Situation zu unterscheiden. Mit Hilfe eines autoregressiven Fehlermodells (AR1 Modell) wird der Abfluss auf Basis der Differenz zwischen beobachtetem und simuliertem Abfluss nachgeführt.

Die beiden Nachführalgorithmen arbeiten auf unterschiedlichen Zeitskalen – Wochen im Falle des Ensemble Kalman Filters und Stunden im Falle des additiven statistischen Fehlermodells. Daher war eine Kombination der beiden Nachführalgorithmen sinnvoll.

## **5.2 Abschätzung der Vorhersageunsicherheit**

Die in der Natur auftretenden atmosphärischen und hydrologischen Prozesse verhalten sich in hohem Maße nicht-linear und führen zu einer Unbestimmtheit des natürlichen Systems. Diese Unbestimmtheit findet sich notwendigerweise auch im strukturellen Aufbau der physikalischen Wettermodelle und der hydrologischen Niederschlag-Abflussmodelle wieder. Deshalb sind Hochwasservorhersagen stets mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Die Größenordnung der Unsicherheiten wird dabei durch die vorherrschenden meteorologischen und hydrologischen Randbedingungen bestimmt. Im Rahmen der Entscheidungsfindung beim Hochwassermanagement stellt die Quantifizierung dieses Unsicherheitsbereiches eine wertvolle Zusatzinformation für die Risikoabschätzung dar.

Eine Methode zur Bestimmung der Unsicherheit von mittel- bzw. langfristigen Niederschlagsvorhersagen ist die Verwendung von Ensemble-Vorhersagen (Buizza, 1997). Dabei wird neben dem Hauptlauf ein Ensemble von zusätzlichen Niederschlagsprognosen, auf Basis von veränderten Anfangsbedingungen des physikalischen Wettermodells, generiert. Diese werden dem hydrologischen Niederschlag-Abflussmodell als Eingangsdaten zur Verfügung gestellt. Die Breite des resultierenden Ensemble-Streubereiches dient dann als Indikator für die Unsicherheit der Hochwasserprognose.

### 5.2.2 Ensemblevorhersagen

In der Meteorologie werden Ensemblevorhersagen schon seit Jahren für die Quantifizierung der Prognoseunsicherheiten verwendet (Buizza, 1997). Als Ensemble wird dabei das Kollektiv einer Vielzahl unterschiedlicher Prognoseläufe bezeichnet. Die übliche Vorgehensweise bei der Generierung von Ensembles ist das wiederholte Starten des numerischen Wettermodells auf Basis von unterschiedlichen Anfangsbedingungen. Die Breite des vom Ensemble aufgespannten Streubereiches dient dabei zur Beschreibung der Unsicherheit des Hauptlaufes (deterministischer Lauf) der Vorhersagen von atmosphärischen Variablen (z.B. Niederschlag). Die führende Institution bei der Erstellung von globalen Ensemblevorhersagen in Europa ist das European Center for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) in Reading (GB). Das ECMWF Modell liefert bei jedem Modelllauf zusätzlich zum Hauptlauf (Abschnitt 2) ein Ensemble von 50 Niederschlagsvorhersagen auf Basis von veränderten Anfangsbedingungen. Die räumliche Auflösung der einzelnen Ensemblemitglieder ist mit ca. 40 km deutlich geringer als jene des deterministischen Modelllaufes. Um Ensemblevorhersagen mit einer höheren räumlichen Auflösung zu erhalten wird auf lokale Wettermodelle zurückgegriffen. Ein solches lokales Modell für Ensemblevorhersagen ist das ECMWF gerechnete COSMO-LEPS (limited-area ensemble prediction system). Das COSMO-LEPS rechnet täglich ein Ensemble von 16 Vorhersagen für Mittel- und Südeuropa mit einem horizontalen Gitterabstand von 10 km, aus dem Wahrscheinlichkeitsvorhersagen abgeleitet werden. Als antreibende Anfangs- und Randfelder für COSMO-LEPS werden aus dem globalen Ensemble repräsentative Vorhersagen ausgewählt, da es aufgrund des Rechenaufwandes zurzeit nicht möglich ist, alle 51 verfügbaren Vorhersagen hoch aufgelöst zu rechnen (Marsigli et al. 2005). Eine alternative Möglichkeit ist die Erzeugung von Pseudo-Ensembles basierend auf den Vorhersagen eines lokalen Wettermodells. An der ZAMG wurde basierend auf dem lokalen Wettermodell ALADIN ein Methode zur Generierung von solchen Pseudo-Ensembles entwickelt (Haiden, 2006). Das ALADIN Modell generiert im operationellen Betrieb keine zusätzlichen Ensemblevorhersagen. Bei den ALADIN Prognosen tritt häufig der Fall ein, dass zwar die vorhergesagten Niederschlagsmengen die richtige Größenordnung haben, jedoch der Ort des Auftretens nicht korrekt prognostiziert wird. Um die räumliche Unsicherheit zu berücksichtigen, wird durch Verschiebung der ALADIN-Niederschlagsfelder in x und y Richtung ein Pseudo-Ensemble von 25 Niederschlagsprognosen erzeugt. Die Größe der Verschiebung geht dabei bis zum Vierfachen der räumlichen Auflösung.

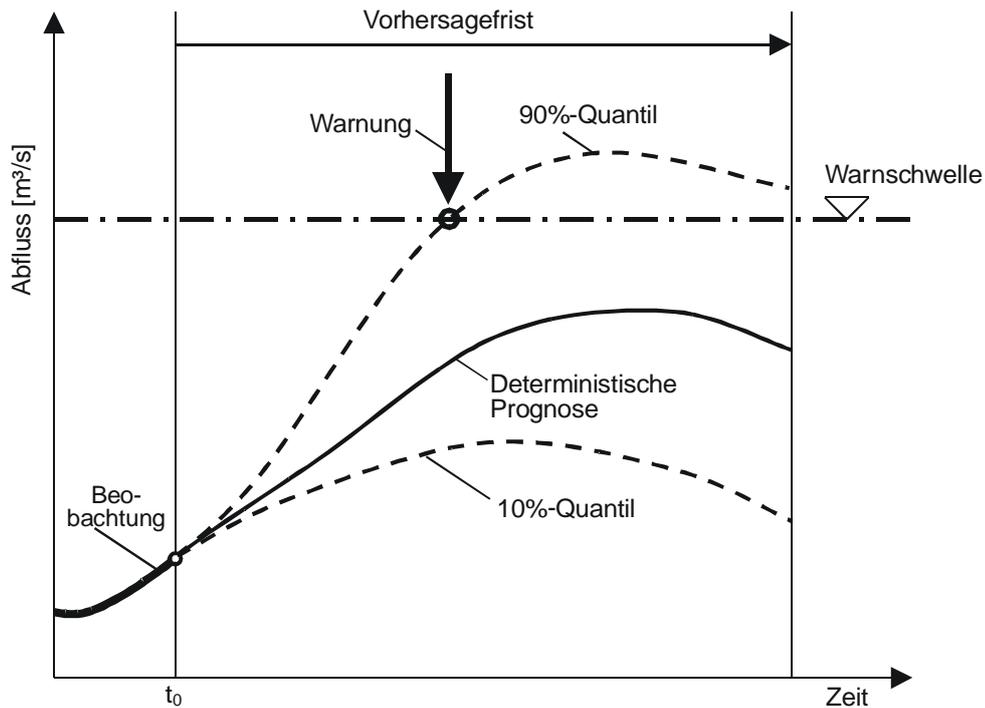
### 5.2.3 Hochwasserwarnung

Werden Ensembleprognosen des Niederschlags als Eingangsgrößen in ein Niederschlag-Abflussmodell verwendet, so erhält man als Ergebnis ein Ensemble von Abflussvorhersagen. Analog zu den Niederschlagsprognosen dient auch bei der Abflussvorhersage der Vertrauensbereich des Ensembles zur Abschätzung der Prognosefehler. Die Grenzen des Vertrauensbereichs werden durch obere und untere Quantile der Ensembles definiert. Die Quantilen geben dabei an, wie viel Prozent der Ensemblemitglieder unterhalb des entsprechenden Wertes liegen. Zum Beispiel ist das

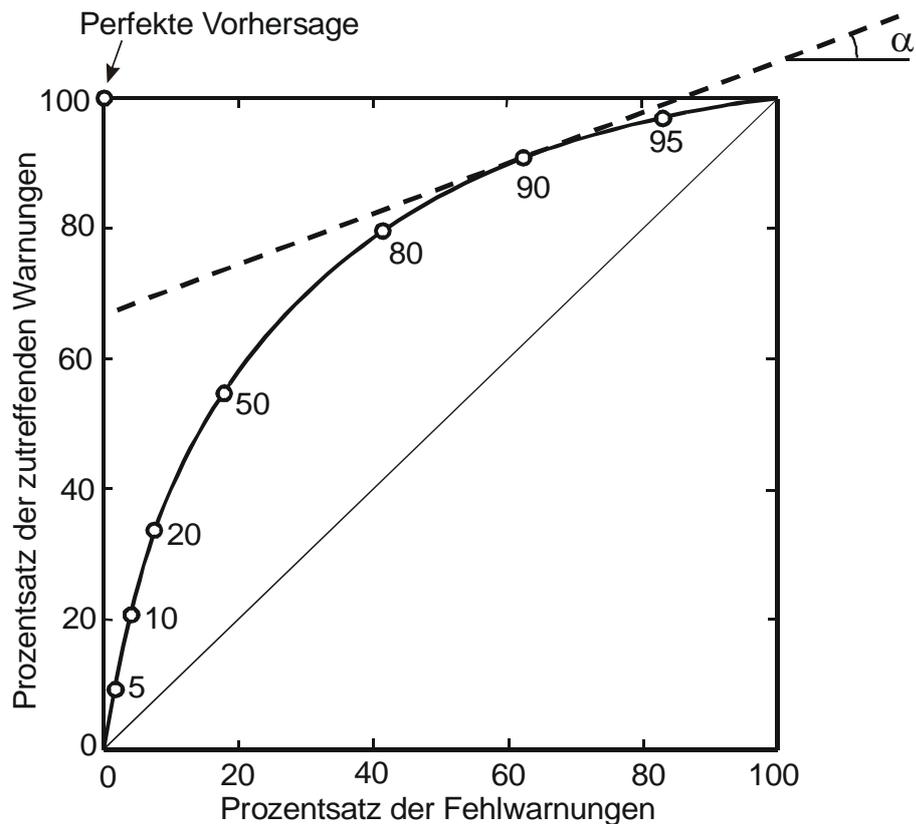
90%-Quantil eines Ensembles als jener Wert definiert, welcher von 90% der Ensemblemitglieder unterschritten wird.

Die Interpretation der Ensemblevorhersagen im Zusammenhang mit der Hochwasserwarnung ist wichtig, um die darin enthaltenen Informationen nutzen zu können. In der Meteorologie werden schon seit längerer Zeit Methoden verwendet, die durch Einführung von Schwellenwerten die Beurteilung von Ensemblevorhersagen ermöglichen (Mason, 1979). Dabei wird die Anzahl der Fehllarme, der zutreffenden Warnungen, der versäumten Warnungen und der Fälle, für die weder eine Warnung noch ein Ereignis aufgetreten ist, in Tabellenform zusammengefasst. Ein Beispiel für die Interpretation von probabilistischen Hochwasservorhersagen im Zusammenhang mit dem Erreichen einer Warnschwelle ist in Abbildung 9 gezeigt. Neben der deterministischen Prognose sind auch die 90% und 10% Quantilen der Ensemblevorhersage dargestellt. Für das gezeigte Beispiel wird nur durch das 90% Quantil eine Hochwasserwarnung ausgelöst, da nur dieses die Warnschwelle überschreitet. Generell wird das 90%-Quantil weit häufiger zur Hochwasserwarnung führen als dies bei der deterministischen Prognose bzw. beim 50% Quantil der Fall ist. Deshalb ist die Anzahl der versäumten Hochwasserwarnungen für das 90% Quantil am geringsten. Bei Verwendung des 10% Quantils ist hingegen die Anzahl der Fehlwarnungen am geringsten. Wenn die Kosten für eine versäumte Warnung und eine Fehlwarnung gleich sind, dann sind die Gesamtkosten über einen längeren Zeitraum dann am geringsten, wenn das 50% Quantil als Warnkriterium verwendet wird. Sind aber die Kosten für eine versäumte Warnung höher als die Kosten einer Fehlwarnung, dann sind die Gesamtkosten über einen längeren Zeitraum am geringsten, wenn ein größeres Quantil als das 50% Quantil, z.B. das 90% Quantil, als Warnkriterium verwendet wird.

Für die graphische Darstellung des Verhältnisses von Fehlwarnungen zu zutreffenden Warnungen wird in der Meteorologie häufig das ROC (Relative Operating Charakteristik) – Diagramm verwendet (Mason und Graham, 1999). Dieses Diagramm kann in analoger Weise auch für die Darstellung der Warncharakteristik der Ensemblevorhersagen von Abflüssen verwendet werden. Ein schematisches ROC-Diagramm ist in Abbildung 10 dargestellt. Der Prozentsatz von Fehlwarnungen gibt dabei die relative Häufigkeit jener Fälle an, in denen die Warnschwelle vom maßgeblichen Ensemble-Quantil überschritten wird, während der beobachtete Abfluss die Warnschwelle nicht erreicht, bezogen auf die Anzahl aller Fälle, für die der beobachtete Abfluss unterhalb der Warnschwelle bleibt. Der Prozentsatz von zutreffenden Warnungen gibt dabei die relative Häufigkeit jener Fälle an, in denen die Warnschwelle sowohl vom maßgeblichen Ensemble-Quantil, als auch vom beobachteten Abfluss überschritten wird, bezogen auf die Anzahl aller Fälle, für die der beobachtete Abfluss die Warnschwelle überschreitet. Ein perfektes Vorhersagesystem, das nur zutreffende Warnungen und keine Fehlwarnungen liefert, würde in diesem Diagramm durch einen Punkt in der linken oberen Ecke dargestellt. Da reale Ensemblevorhersagen vom perfekten Zustand abweichen, ergeben sich für die Quantile unterschiedliche Punkte im Diagramm. Durch Verbinden der Quantile



**Abb. 9:** Prinzipische Skizze für die Hochwasserwarnung auf Basis der Warnschwellenüberschreitung in Verbindung mit Ensembleprognosen des Abflusses.



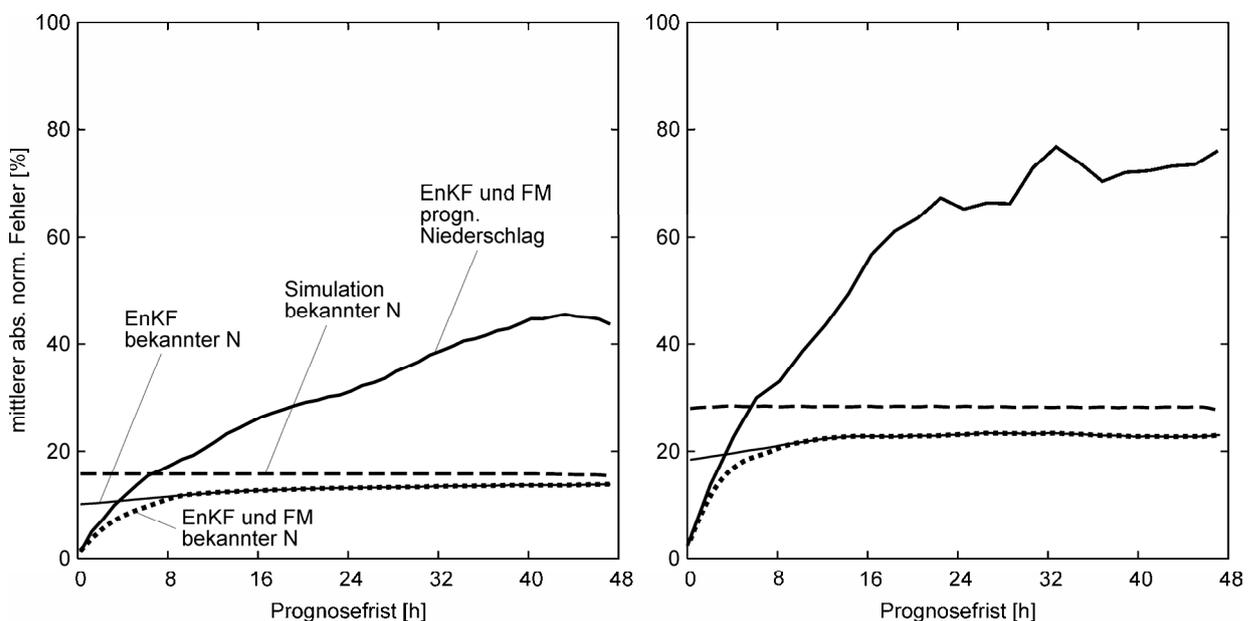
**Abb. 10:** Schematisches ROC-Diagramm für eine bestimmte Warnschwelle und die 5, 10, 20, 30, 50, 80, 90 und 95% Quantile der Ensemblevorhersagen. Es ist sinnvoll, den Winkel  $\alpha$  der Tangente in Abhängigkeit vom Verhältnis der Kosten einer Fehlwarnung zu den Kosten einer versäumten Warnung zu wählen (z.B. kleines  $\alpha$  wenn Kosten der Fehlwarnung vergleichsweise gering sind).

ergibt sich eine Kurve, welche das Warnverhalten der Ensemblevorhersagen für unterschiedliche Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeiten charakterisiert. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, durch welches Quantil der Ensemblevorhersage eine Warnung ausgelöst werden soll. Man kann nun eine Tangente an die ROC-Kurve legen und den Winkel  $\alpha$  der Tangente in Abhängigkeit vom Verhältnis der Kosten einer Fehlwarnung zu den Kosten einer versäumten Warnung wählen. Der Berührungspunkt entspricht konzeptionell der Quantile, deren Warncharakteristik über einen längeren Zeitraum zur Minimierung der Summe der Kosten der Fehlwarnungen und der Kosten der versäumten Warnungen führt. Sind die Kosten einer Fehlwarnung gegenüber den Kosten eines versäumten Alarmes vergleichsweise klein, ist es sinnvoll, auch den Winkel  $\alpha$  klein zu wählen. Für die Hochwasserwarnung ist dies in der Regel der Fall und deshalb ist in erster Linie der obere Vertrauensbereich der Ensembleprognosen von Interesse (Quantile  $> 50\%$ ). Im Beispiel in Abbildung 2 ist für dieses Kostenverhältnis das 90% Quantil der Ensemblevorhersage als Warnkriterium eingezeichnet.

#### 5.2.4 Fallbeispiel für das Vorhersagesystem am Kamp

Um den Beitrag der einzelnen Modellkomponenten zur Prognosegüte zu testen, wurden umfangreiche Tests durchgeführt. Da es sich um ein Hochwasservorhersagemodell handelt, sind vor allem die Fehler bei Hochwässern von Interesse und nicht so sehr die Fehler im Nieder- und Mittelwasserbereich. Als Beispiel zeigt Abb. 11 die mittleren absoluten normierten Fehler für fünf große Ereignisse am Pegel Zwettl/Kamp (622 km<sup>2</sup>), unterschieden nach einer Auswertung über die Dauer des gesamten Hochwasserereignisses (Abb. 11 links) und über den Bereich des Wellenanstieges bis kurz nach dem Scheitel (Abb. 11 rechts). Vier Berechnungsvarianten wurden analysiert. In der ersten Variante (strichlierte Linie in Abb. 11) wurde der zukünftige Niederschlag als bekannt angenommen und die Anfangsbedingungen der Bodenfeuchte wurden nicht nachgeführt. Die mittleren Fehler für die gesamten Ereignisse betragen etwa 15 % und sind kaum von der Prognosefrist abhängig. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich in dieser Variante um ein Simulationsproblem (und kein Prognoseproblem) handelt. In der zweiten Variante (dünne durchgezogene Linie in Abb. 11) wurden die Anfangsbedingungen der Bodenfeuchte mittels des Ensemble Kalman Filters nachgeführt, ebenfalls unter Annahme eines zukünftig bekannten Niederschlages. Durch die Nachführung werden die Fehler reduziert und es ist erkennbar, dass dies vor allem für die kürzeren Prognosefristen der Fall ist, die näher am nachgeführten Zeitpunkt liegen. Werden darüber hinausgehend die Vorhersagen mit dem statistischen Fehlermodell korrigiert (punktierte Linie in Abb. 11) tritt eine weitere Verbesserung ein, allerdings nur im Bereich von weniger als sechs Stunden. Dies entspricht etwa der Autokorrelationslänge der Fehler im Hochwasserfall. In der vierten Variante wurden schließlich die beiden Nachführungen in der gleichen Weise eingesetzt, allerdings wurde der zukünftige Niederschlag nicht als bekannt angenommen, sondern die Niederschlagsprognosen verwendet (dicke durchgezogene Linie in Abb. 11). Für die ersten Stunden sind die Fehler identisch mit der vorhergehenden Variante, da die Prognosen vor allem durch den bereits gefallenem Niederschlag bestimmt sind. Für größere Prognosefristen steigt hingegen der Fehler

deutlich an. Dies ist auf die Unsicherheit des prognostizierten Niederschlages zurückzuführen. Die Fehler sind auch wegen des gestuften Vorhersageansatzes (Abb. 1) stark von der Prognosefrist abhängig. Für eine kurze Vorhersagefrist sind die Fehler klein, da die Wellenablaufmodelle am genauesten sind und die Nachführalgorithmen zusätzlich die Genauigkeit erhöhen. Abb. 11 rechts zeigt analoge Auswertungen allerdings nur für den Anstiegsbereich der Hochwässer. Grundsätzlich ist das Verhalten der Fehler ähnlich wie für das gesamte Ereignis, allerdings sind die Fehler betragsmäßig größer, insbesondere für die Variante der prognostizierten Niederschläge, die für die operationellen Prognosen maßgebend ist. Die größeren Fehler sind darauf zurückzuführen, dass sich im Anstiegsbereich der Welle die Unsicherheiten im Niederschlag stärker auswirken als sonst.

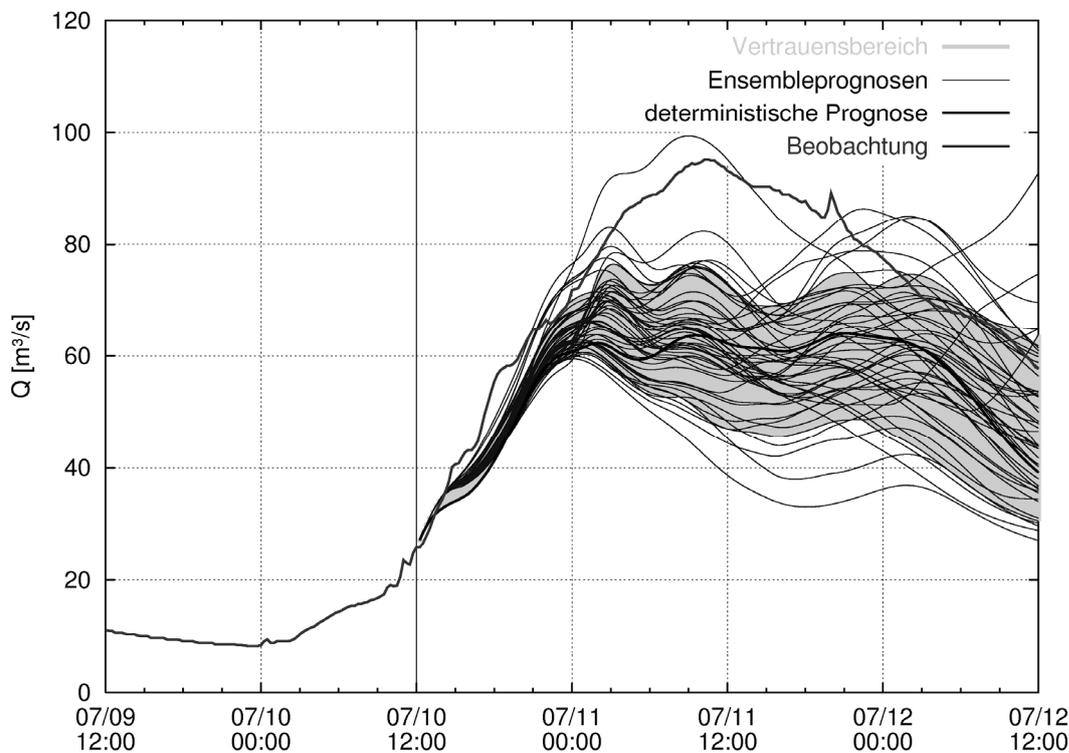


**Abb. 11:** Genauigkeit der Hochwasservorhersage für den Pegel Zwettl/Kamp (622 km<sup>2</sup>) für unterschiedliche Modellkomponenten ausgewertet für fünf große Hochwasserereignisse im Zeitraum 2002-2005. Links: Fehler über das gesamte Ereignis. Rechts: Fehler nur für den Anstieg der Hochwasserwelle.

Die Durchführung von Ensembleprognosen erlaubt es nun, die auf den prognostizierten Niederschlag zurückzuführenden Unsicherheiten im Prognosefall zu erfassen. Die Grundidee ist dabei, dass die Unsicherheit der Hochwasservorhersagen je nach meteorologischer Situation sehr unterschiedlich sein kann, auch wenn die deterministische Vorhersage ähnlich ist. Bei einer stabilen meteorologischen Situation ist auszuschließen, dass es in der unmittelbaren Zukunft zu starken Regenfällen kommt. Bei einer labilen Situation zeigt die deterministische Prognose vielleicht auch keine Niederschläge an, die Wahrscheinlichkeit starker Regenfälle kann jedoch groß sein.

Für die operationellen Vorhersagen im Kampgebiet werden neben den deterministischen INCA-Vorhersagen der ZAMG (Abschnitt 2) auch Ensembleprognosen verwendet. Dabei wird auf ein aus den 50 ECMWF Ensembles und den Pseudo-Ensembles des lokalen ALADIN-Modells kombiniertes Produkt der

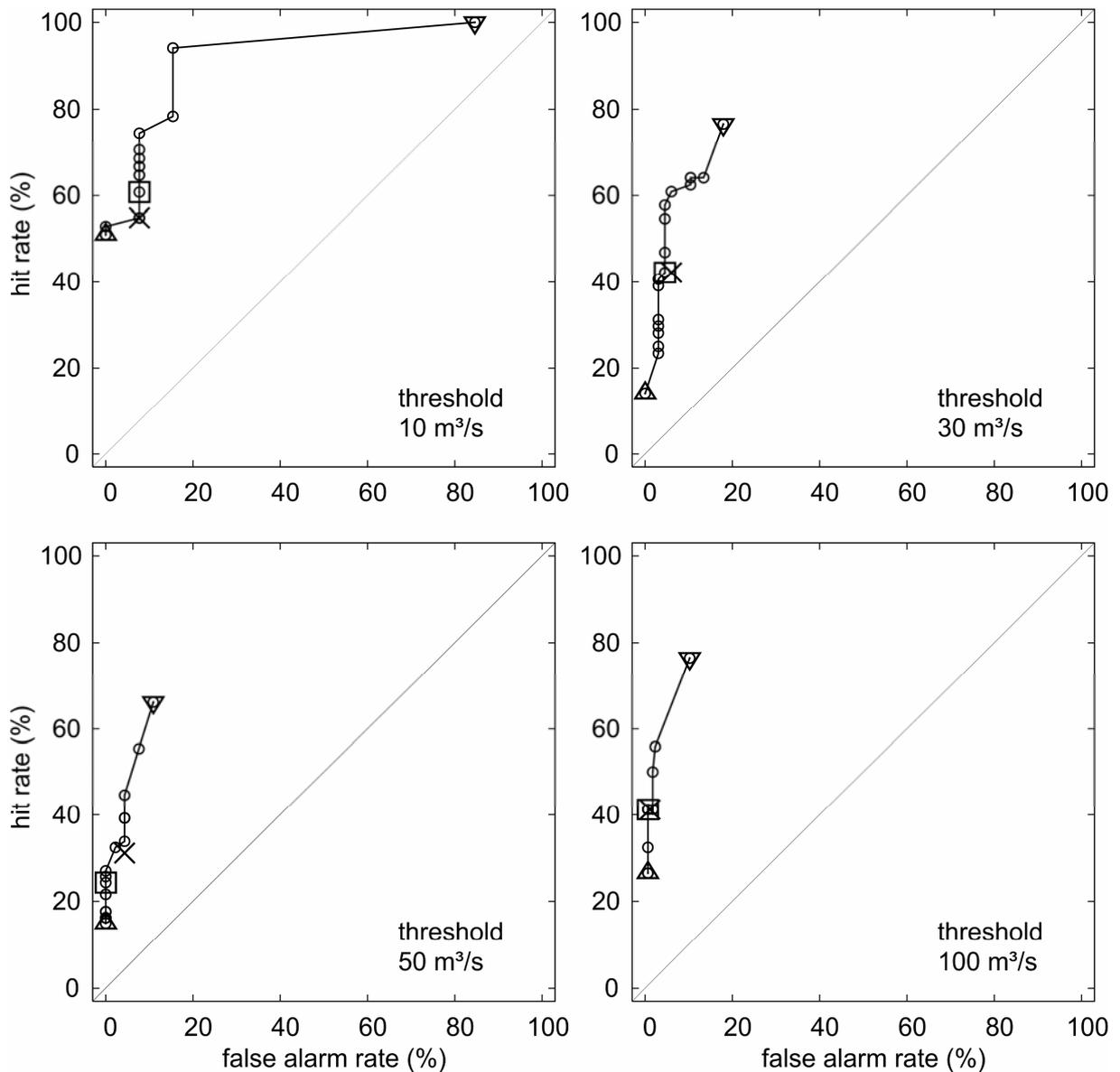
ZAMG zurückgegriffen. Somit ergeben sich 50 mögliche Niederschlagsfelder für das Kampgebiet. Diese Niederschlagsfelder werden jeweils als Eingangsgröße in das Abflussmodell verwendet. Als Anfangsbedingung wird dafür der aktuelle Systemzustand des Gebietes (Bodenfeuchte, Schnee, ..) der letzten deterministischen Simulation verwendet. Diese 50 Niederschlagsfelder führen zu 50 Abflussprognosen an jeder Vorhersagestelle. Ausgewertet werden schließlich die Quantile dieser Abflüsse unter der Annahme, dass jede der Simulationen gleich wahrscheinlich ist. Diese Quantile werden als 10% und 90% Vertrauensbänder dargestellt. Abb. 12 zeigt ein Beispiel dieser Ensemblevorhersagen. Für eine kurze Prognosefrist ist der Vertrauensbereich eng und nimmt mit zunehmender Prognosefrist stark zu. Dies entspricht auch der Zunahme der Vorhersagefehler wie in Abb. 10 gezeigt. Für stabile Wetter-situationen ist hingegen der Vertrauensbereich über die ganze Prognosefrist von 48 Stunden eng und lässt den Schluss zu, dass in diesem Zeitraum nicht mit einem Hochwasser zu rechnen ist.



**Abb. 12:** Ensemblevorhersagen des Abflusses im Juli 2005 für den Pegel Zwettl am Kamp (622 km<sup>2</sup>).

Abbildung 13 zeigt ROC-Kurven basierend auf der Auswertung der 48 Stunden Vorhersagen für fünf Hochwasserereignisse am Pegel Zwettl/Kamp und für verschiedene Abflusswarnschwellen. Die Warnschwellen von 50 und 100 m<sup>3</sup>/s sind realistische Werte für den Kamp bei Zwettl. Die Auswertungen für die Schwellenwerte von 10 und 30 m<sup>3</sup>/s erfolgt für Vergleichszwecke. Die Warncharakteristiken für die unterschiedlichen Quantilen der Ensemblevorhersagen sind als kleine Kreise dargestellt. Die Dreiecke repräsentieren das 100%-Quantil (abwärtsweisendes Dreieck) und das 5%-Quantil (aufwärtsweisendes Dreieck). Der Median der Ensemble-

vorhersagen wird durch ein Quadrat und die deterministische Prognose durch ein Kreuz repräsentiert. Wie zu erwarten ist sind für alle Durchflussschwellenwerte die zutreffenden Prognosen durch das 100%-Quantil der Ensemblevorhersagen größer als jene der deterministischen Vorhersage. Das ist der eigentliche Grund für die Verwendung von Ensemblevorhersagen für die Hochwasserwarnung. Generell zeigen die ROC-Kurven für den Kamp, dass die Vorhersagen nur eine geringe Anzahl von Fehlwarnungen verursachen und die Anzahl der Fehlwarnungen mit steigendem Abflussschwellenwert abnimmt. Die Anzahl der zutreffenden Vorhersagen ist für die Schwellenwerte von 50 und 100 m<sup>3</sup>/s auf ca. 80% beschränkt. In Kombination mit der geringen Anzahl von Fehlalarmen weist dieses Verhalten darauf hin, dass die



**Abb. 13:** Relative Operating Characteristic (ROC) Kurven für die 48 Stunden Ensemblevorhersagen (Kreise) und den den deterministischen Hauptlauf (Kreuze) für unterschiedliche Abflussschwellenwerte für fünf Hochwasserereignisse am Kamp in Zwettl (622 km<sup>2</sup>). 5% Quantil (nach oben zeigendes Dreieck), 50% Quantil (Quadrat) and 100% Quantil (nach unten zeigendes Dreieck).

Vorhersagen zur Unterschätzung der Abflüsse tendieren. Dieser Trend stimmt mit Analysen der meteorologischen Vorhersagen überein, welche ebenfalls die Tendenz aufweisen große Niederschlagsmengen zu unterschätzen (Buizza, 1997). Im Kampgebiet wird dieser Trend durch das ausgeprägte nicht-lineare Gebietsverhalten noch zusätzlich verstärkt. Aus diesem Grund bietet sich hier ein hohes Ensemble Quantil, z.B. 90%, als Kriterium für die Hochwasserwarnung an. Ein weiteres Argument für die Verwendung eines hohen Ensemble-Quantils sind die meist geringeren Kosten für Fehlalarme. In der Praxis spielt bei der Kommunikation von Hochwasserwarnungen an übergeordnete Stellen und die Bevölkerung allerdings die Glaubwürdigkeit der Vorhersagen eine übergeordnete Rolle.

## **6. Zusammenfassung**

Bei der Entwicklung von operationellen Hochwasservorhersagesystemen sollte stets die Komplexität der verwendeten Modelle auf den Informationsgehalt der im Echtzeitbetrieb vorhandenen Daten abgestimmt werden. Hervorgerufen durch die Forderung nach immer längeren Vorhersagefristen für immer kleinere Einzugsgebiete zeichnet sich in den letzten Jahren der Trend hinzu komplexen, flächendetaillierten Modellen für die automatisierte Hochwasservorhersage ab. Je nach Vorhersagefrist und verwendeter Methode ergeben sich deutliche Unterschiede in der erzielbaren Güte der Vorhersagen. Für die ersten Stunden der Vorhersage liefern Wellenablaufmodelle die genauesten Prognosen mit den geringsten Unsicherheiten. Der zeitliche Horizont der Wellenablaufmodelle ergibt sich durch die Fließzeiten in den betrachteten Gerinneabschnitten. Basierend auf aktuellen Durchflussmesswerten können hydrodynamische oder hydrologische Wellenablaufmodelle zur Abflussvorhersage für unmittelbare Zukunft verwendet werden. Für die Erweiterung der Prognosefrist ist der Einsatz von Niederschlag-Abfluss-Modellen erforderlich. Die möglichst genaue Kenntnis der aktuellen Niederschlagsverteilung ist eine Voraussetzung für realistische Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung. Der aktuelle Trend bei der Bestimmung von Niederschlagsmustern ist die Einbeziehung von Radarmessungen zur Beschreibung der kleinräumigen Niederschlagsvariabilität. Dabei werden die detaillierten räumlichen Niederschlagsmuster der Radarmessungen mit den punktuellen Messwerten des terrestrischen Niederschlagsmessnetzes kombiniert. Die Niederschlagsmuster stellen eine gute Ausgangsbasis für die Verwendung von flächendetaillierten Niederschlag-Abfluss-Modellen dar. Der Vorteil von flächendifferenzierten Abflussmodellen besteht darin, die räumlich unterschiedlichen Niederschlags- und Abflussbildungsverhältnisse berücksichtigen zu können. Allerdings benötigen solche Modelle für jedes Rechenelement eine große Zahl von Modellparametern. Werden die Modellparameter nicht passend gewählt, sondern etwa Standardwerte auf Basis von Boden-, Gelände- und Landnutzungskarten verwendet, so sind die Simulationen mit solchen Modellen in der Regel ungenauer als solche, die mit traditionellen ingenieurhydrologischen Systemansätzen erzielt werden können (Grayson und Blöschl, 2000). Bei der Parameter- und Modellidentifikation sollten alle zugänglichen Belege für das hydrologische Verhalten verwendet und daraus eine Modellvorstellung über die Funktion des hydrologischen Systems für unterschiedliche

Situationen abgeleitet werden. Auf Basis von aktuellen Niederschlagsdaten als Input für Niederschlag-Abfluss-Modelle können je nach Gebietsgröße und hydrologischen Eigenschaften Vorhersagefristen von mehreren Stunden erzielt werden. Eine weitere Verlängerung der Vorhersagefristen ist nur mehr durch Verwendung von Niederschlagsprognosen möglich. Für die unmittelbare Zukunft (einige Stunden) kann die Entwicklung der Niederschlagsstrukturen durch Analyse der beobachteten Niederschlagsmuster und Extrapolation der Verlagerungsvektoren (Nowcasting) abgeschätzt werden. Die erzielbare Vorhersagefrist hängt dabei von der vorherrschenden meteorologischen Situation und der Lebensdauer der Wolkensysteme ab. Für längere Vorhersagefristen wird auf die Ergebnisse von numerischen Wettermodellen zurückgegriffen. Dabei kommen globale und lokale Wettermodelle zum Einsatz. Die lokalen Modelle verfügen über eine höhere räumliche Auflösung und berücksichtigen lokale Gegebenheiten im Aussagegebiet (z.B. orographische Effekte). Dabei werden die Anfangs- und Randbedingungen für die lokalen Modelle von den Rechenergebnissen der globalen numerischen Wettermodelle abgeleitet. Die Vorhersagen der numerischen Wettermodelle reichen bis zu mehreren Tagen in die Zukunft.

Der kombinierte Ansatz der verschiedenen Methoden in einem einzigen Vorhersagesystem führt zur Optimierung der Vorhersagequalität für die verschiedenen Vorhersagefristen. Generell nimmt die Unsicherheit der Vorhersagen mit steigender Vorhersagefrist rasch zu. Während in den ersten Stunden noch relativ genaue Prognosen auf Basis von Wellenablaufmodellen erzielt werden können, ergeben sich für Vorhersagefristen von mehreren Tagen sehr große Unsicherheiten. Der größte Anteil der Unschärfe ist dabei den Niederschlagsvorhersagen der numerischen Wettermodelle zuzuordnen. Im Umgang mit hydrologischen und meteorologischen Unsicherheiten kommen in aktuellen Vorhersagesystemen zwei verschiedene Ansätze zum Einsatz. Zum einen wird versucht die best mögliche Anfangsbedingungen für die hydrologischen Modelle abzuschätzen und somit die Vorhersagegüte zu erhöhen. Diese Vorgangsweise wird als Modellnachführung bezeichnet, und basiert auf der ständigen Korrektur der hydrologischen Berechnungen anhand aktueller Durchflussmesswerte. Je nachdem an welcher Stelle der Modellstruktur die Anpassungen vorgenommen werden spricht man von Zustandsgrößen-, Input-, Parameter- und Outputnachführung. Andererseits können Ensemblevorhersagen des Niederschlags zur Beschreibung der Vorhersageunsicherheiten, die von der vorherrschenden meteorologischen und hydrologischen Situation abhängen, verwendet werden. Die Ensembles der Niederschlagsvorhersagen basieren auf veränderten Anfangs- und Randbedingungen der numerischen Wettermodelle und dienen als Eingangsdaten für die Niederschlag-Abfluss-Modelle. Der Streubereich der Ensemblevorhersagen dient dabei als Indikator für die Unsicherheit der Hochwasservorhersagen.

Bei der Interpretation und Kommunikation von Hochwasserwarnungen kommt dem Prognosebeauftragten eine wichtige Rolle zu. Das Wissen über spezifische hydrologische und meteorologische Vorgänge in den interessierenden Einzugsgebieten und die Erfahrungen mit den verwendeten Vorhersagemodellen, bilden die

Rahmenbedingung für plausible Hochwasserwarnungen. Speziell in hydrologischen und meteorologischen Extremsituationen, für die große Unsicherheiten der Modellvorhersagen zu erwarten sind, ist die Kontrolle der Prognosen durch erfahrene Prognosebeauftragte ein unverzichtbarer Beitrag für plausible Hochwasserwarnungen und damit verbundene Zivilschutzmaßnahmen.

## 7. Literatur

Blöschl, G. (2005) Rainfall-runoff modelling of ungauged catchments. In: Encyclopedia of Hydrological Sciences, M. G. Anderson (Hrsg.), J. Wiley & Sons, Chichester, S. 2061-2080.

Blöschl, G., R. Kirnbauer and D. Gutknecht (1991) Distributed snowmelt simulations in an Alpine catchment. 1. Model evaluation on the basis of snow cover patterns. *Water Resources Research*, **27** (12), 3171-3179.

Blöschl, G., Reszler, C., Komma, J. (2006) Hochwasservorhersage für den Kamp, In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 39-54.

Borga, M. and Tonelli, F. (2000) Adjustment of Range-Dependent Bias in Radar Rainfall Estimates, *Phys. Chem. Earth (B)*, Vol. **25**, No. 10-12, pp. 909-914.

Buizza, R. (1997) Potential forecast skill of ensemble prediction and spread skill distributions of the ECMWF ensemble prediction system, *Monthly Weather Review*, **125**, 99-119.

Cummings, R.J., Upton, G.J.G., Holt, A.R., Kitchen, M. (2008) Using micro links to adjust the radar rainfall field, *Advances in Water Resources*, in press.

Doswell, Ch. (1986) The human element in weather forecasting. *National Weather Digest*, **11** (2), 6-17.

Evensen G. (1994) Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research*, **99**, 10143-10162.

Fišer, O. (2004) Z-R (Radar Reflectivity-Rain Rate) Relationships Derived from Czech Distrometer Data, *Proc. of ERAD Conference – Visby, Sweden*, p. 233-236.

Grayson, R. B. und Blöschl G. (Hrsg.) (2000) Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 404 Seiten.

Haiden, T. (2006) Niederschlagsprognosen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung: Fortschritte und Probleme, In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 199-208.

Hasenauer, S., Komma, J., Parajka, J., Wagner, W., Blöschl, G. (2009) Bodenfeuchtedaten aus Fernerkundung für hydrologische Anwendungen, Themenheft

der ÖWAW: Fernerkundung in der Hydrologie und Wasserwirtschaft - Daten und Anwendungen, in Druck.

Isermann, R. (1974) Prozeßidentifikation. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 188pp.

Kachroo, R.K. (1992) River flow forecasting. part 1. A discussion of the principles. *Journal of Hydrology*, **133(1-2)**:1–15.

Komma, J., Ch. Reszler, G. Blöschl und T. Haiden (2006b) Ensembleprognosen von Hochwasserabflüssen. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 279-294.

Komma, J., G. Blöschl und Ch. Reszler (2006a) Nachführung mittels Ensemble-Kalmanfilter. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 243-258.

Marsigli, C., Boccanera, F., Montani, A., Paccagnella, T. (2005) The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system: validation of the methodology and verification, *Nonlinear Processes in Geophysics*, Vol. 12, pp 527-536.

Mason, L. (1979) On reducing probability forecasts to yes/no forecasts. *Monthly Weather Review*, 107, 207-211.

Mason, S. und N. Graham (1999) Conditional probabilities, relative operating characteristics and relative operating levels, *Weather and Forecasting*.

Moser, J. und Kopeinig C. (2006) Hochwasserwarnung in Kärnten, In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 23-38.

Parajka J., R. Merz und G. Blöschl (2005) Regionale Wasserbilanzkomponenten für Österreich auf Tagesbasis. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 57, H 3/4, 43-56

Parajka, J., G. Blöschl und R. Kirnbauer (2006) Schneeinformationen aus Fernerkundungsdaten für die Hochwasservorhersage. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 209-226.

Parajka, J., Naeimi V., Blöschl, G., Komma J. (2009) Matching ERS scatterometer based soil moisture patterns with simulations of a conceptual dual layer hydrologic model over Austria, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, pp. 259–271.

Refsgaard, J.Ch. (1997) Validation and Intercomparison of Different Updating Procedures for Real-Time Forecasting. *Nordic Hydrology*, 28:65–84.

Reszler, Ch., G. Blöschl und J. Komma (2006b) Simulation der Kraftwerkssteuerung am Kamp. In: Hochwasservorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 85-102.

Reszler, Ch., J. Komma, G. Blöschl und D. Gutknecht (2006a) Identifikation von Modellparametern in detaillierten Modellen. In: Hochwasservorhersage. Wiener

Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 199. Technische Universität Wien, Seiten 259-278.

Schilling, W. (Hrsg.) (1987) Anwendungsmöglichkeiten des Kalman-Filters in der Wasserwirtschaft. DFG Mitteilung VII der Senatskommission für Wasserforschung, VCH Weinheim.

Szolgay, J., Danáčová, M. (2007) Detection of changes in the flood celerity by multilinear routing on the Danube. In: *Meteorological Journal*. Vol.10. No. 4, 219-224.

Todini, E. (2005) Rainfall-Runoff models for real time forecasting. In: *Encyclopedia of Hydrological Sciences* Volume 3, Part 11: Rainfall-runoff Modeling, Section 123:1869–1896. John Wiley and Sons.

WMO - World Meteorological Organization (1992) Simulated real-time intercomparison of hydrological models. *Technical Report WMO-Publication Nr. 779*.

**Anschrift der Verfasser:**

Dipl.-Ing. Jürgen Komma  
Dipl.-Ing. Ulrike Drabek  
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Günter Blöschl  
Technische Universität Wien  
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie  
Karlsplatz 13/222-2  
A-1040 Wien  
Tel.:+43-1-58801-22316  
Fax:+43-1-58801-22399  
Email: komma@hydro.tuwien.ac.at

# HOCHWASSERWARNUNG IN KÄRNTEN - EIN PRAXISBEISPIEL

Johannes Moser und Christian Kopeinig

## 1. Einleitung:

Kärntens größter Fluss, die Drau, hat in den vergangenen Jahrhunderten von Oberdrauburg bis Lavamünd das gesamte Drautal immer wieder mit verheerenden Überschwemmungen heimgesucht. Die letzten großen Hochwässer von 1965 und 1966 sind vielen noch in Erinnerung.

Durch die Errichtung einer Kraftwerkskette mit 10 Laufkraftwerken von Lavamünd bis Paternion ist in diesem Flußabschnitt, bis auf zwei Bereiche in Lavamünd und Rosegg, der Schutzgrad sehr hoch. Im Bereich der Kraftwerkskette wird der Abfluss stark von der Steuerung der Wehranlagen durch die Austrian Hydro Power AG (AHP) beeinflusst. Die Hochwasserprognose liegt hier deshalb bei der AHP.

Es kam in der Vergangenheit aber auch an so manchem Zubringerfluß immer wieder zu großen Überflutungen. Vor allem die Gail verursachte immer wieder katastrophale Überschwemmungen. Sie ist auf Grund ihrer Lage an der Grenze zu Italien bei Tiefdruckgebieten im Mittelmeerraum von südlichen Anströmungen mit Stauwirkungen am stärksten betroffen, und deshalb Kärntens Fluss mit den höchsten Hochwasserabflussspenden. In den vergangenen Jahrzehnten wurde hier auch sehr viel Geld in Hochwasserschutzmaßnahmen investiert.

Der hydrographische Dienst Kärnten erstellt Hochwasserprognosen und Hochwasserwarnungen für die obere Drau sowie für die Zubringerflüsse (Isel), Möll, Lieser, Gail, Gurk und Lavant. Ziel des Hochwasserwarnservices ist es allen an der Bewältigung eines Hochwasserereignisses Beteiligten wie Einsatzorganisationen, Behörden, Kraftwerksbetreibern, sonstigen Interessenten sowie natürlich der betroffenen Bevölkerung rechtzeitig Informationen und Warnungen zukommen zu lassen.

## 2. Hochwasserwarnung

Die Einzugsgebiete der oben genannten Flüsse sind mit ca. 1000 km<sup>2</sup> (Ausnahme Gurk mit ca. 2500 km<sup>2</sup>), verglichen mit den großen Flüssen in Österreich, vor allem der Donau, doch recht klein.

Der Zeithorizont der Hochwasserprognose ist deshalb ein kürzerer, und die Abschätzung des zu erwartenden Abflusses meist mit größeren Unsicherheiten behaftet als bei großen Flüssen.

Auf Grund dieser Voraussetzungen zielt die Hochwasserabschätzung und Warnung nicht auf die Vorhersage einer Abflussganglinie, sondern auf das **Abschätzen einer bestimmten Jährlichkeitskategorie des Spitzenabflusses** ab!

Die folgenden **Kategorien** haben sich dabei als praktisch sinnvoll erwiesen:

**Tab. 1:** Jährlichkeitskategorien und Farbschema des Gefährdungspotentials im Hochwasserwarnservice Kärnten.

Jährlichkeitskategorie	Gefährdungspotential
< HQ <sub>1</sub>	Keine
HQ <sub>1</sub> – HQ <sub>5</sub>	Gering
HQ <sub>5</sub> – HQ <sub>10</sub>	Mittel
HQ <sub>10</sub> – HQ <sub>30</sub>	Hoch
HQ <sub>30</sub> – HQ <sub>100</sub>	Sehr hoch
> HQ <sub>100</sub>	Extrem hoch

Diese Einteilung passt auch gut zu den in den Gefahrenzonenplänen ausgewiesenen Überflutungsszenarien und den Ausbaugraden der Flussläufe bzw. den Schutzgraden von Objekten und Siedlungen. Sie sind damit im Allgemeinen auch gut zu den Auswirkungen bzw. Gefahren welche damit verbunden sind in Bezug zu bringen.

Bisherige Beobachtungen und Ergebnisse aus Modellierungen zeigen, dass in der Regel bis HQ<sub>1</sub> keine Ausuferungen auftreten, bis HQ<sub>5</sub> sind nur selten Gebäude betroffen, von HQ<sub>5</sub> bis HQ<sub>10</sub> treten bereits viele Flüsse in nicht regulierten Bereichen aus ihren Flussbetten. Es kommt zu Freilandüberschwemmungen und einzelne Gebäude direkt am Ufer können betroffen sein. Ab HQ<sub>10</sub> – HQ<sub>30</sub> können bereits Siedlungsbereiche mit unzureichendem Hochwasserschutz betroffen sein.

Ab HQ<sub>30</sub> und höher herrscht für viele Orte und Siedlungsbereiche akute Überschwemmungsgefahr. Über HQ<sub>100</sub> sind auch neuere Schutzeinrichtungen oft überlastet.

### 3. Hochwasserinformations- und Hochwasserwarnservice des Hydrographischen Dienstes Kärnten

Das Hochwasserinformations- und Hochwasserwarnservice des Hydrographischen Dienstes Kärnten basiert auf drei Säulen:

<b>Daten</b>	<b>Aktuelle online – Messdaten Hochwasserprognosen mit Modellen und dem Hochwasserszenarienkatalog</b>
<b>Wirkung</b>	<b>Mögliche Gefährdungsbereiche – Generelle Hochwasseralarmpläne</b>
<b>Kommunikation</b>	<b>Kommunikationssystem - Internetplattform mit raschen Informationsmöglichkeiten</b>

Alle drei Säulen sind im System der Hochwasserwarnung gleichermaßen wichtig!

So nützt es zum Beispiel wenig, wenn qualifizierte Prognosen nicht an die entsprechenden Stellen gelangen oder man nicht weiß, was damit verbunden ist.

### 4. Hochwasser an der Gail am 30. Oktober 2008 - Fallbeispiel

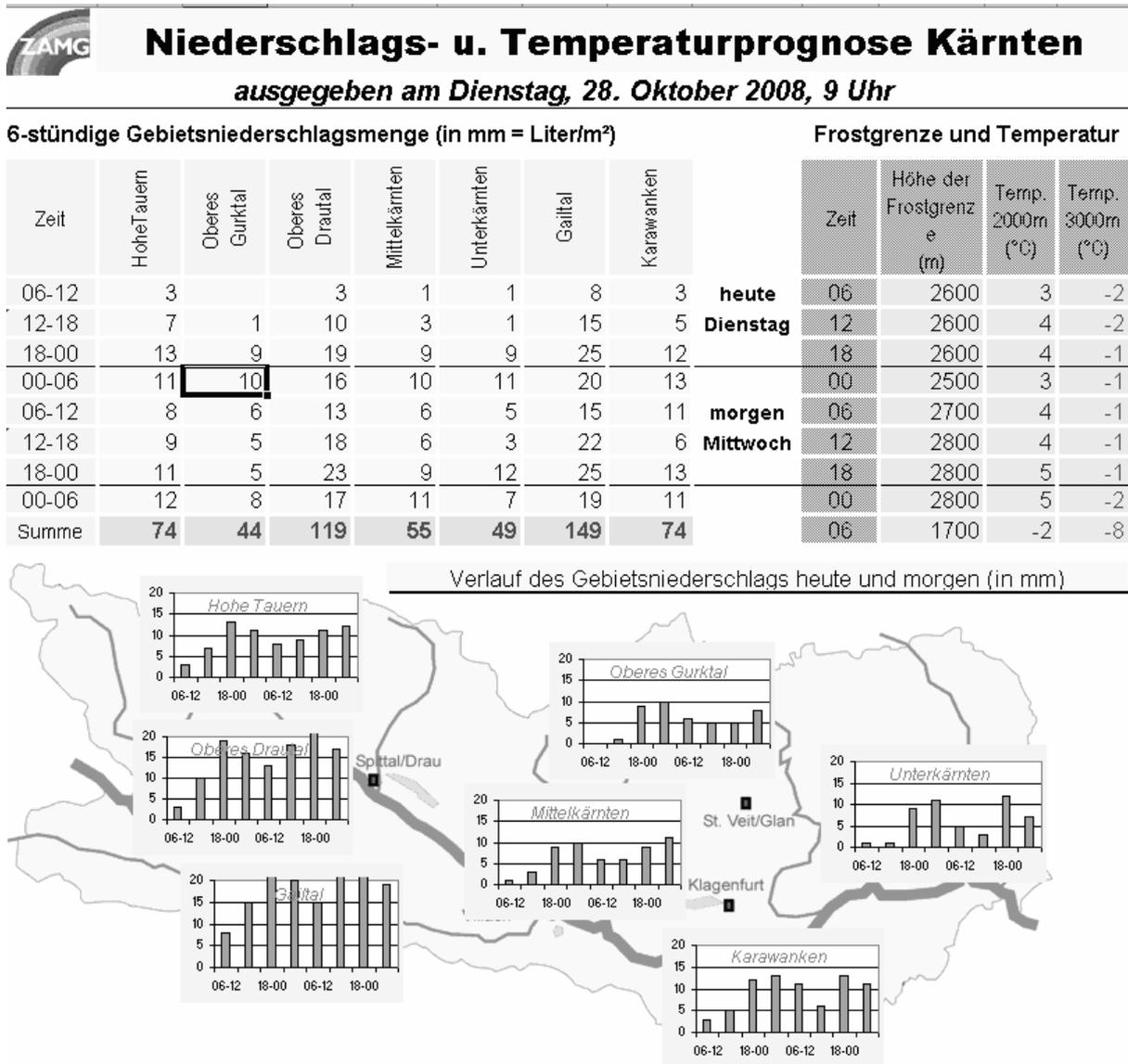
Im Folgenden soll das Hochwasserwarnservice Kärnten anhand eines konkreten Fallbeispiels vorgestellt werden.

#### Chronologie der Ereignisse:

- **Wetterdienst Klagenfurt verschickt eine Starkregenprognose**

Der Wetterdienst Klagenfurt (ZAMG), mit dem es für die Erstellung von Hochwasserwarnungen eine enge Kooperation gibt, versendet, wenn die zu erwartenden Niederschlagsmengen in einem von insgesamt 7 Teilgebieten den Wert von 30 mm überschreitet, eine Starkregenwarnung per E-Mail an den Hydrographischen Dienst. Um zu gewährleisten dass der Hydrographische Dienst auf alle Fälle von der Prognose in Kenntnis gesetzt ist wird bei sehr hohen Prognosewerten auch telefonisch Kontakt aufgenommen,

In dieser Prognosemeldung werden für das Gail- und das obere Drautal für die nächsten 48 Stunden 120 – 150 mm Niederschlag prognostiziert.



**Abb. 1:** Niederschlags- und Temperaturprognose des Wetterdienstes Klagenfurt (ZAMG).

- **Der Hydrographische Dienst startet den operationellen Hochwasserwarndienst**

Auf Grund dieser Prognose (große Niederschlagsmengen) startet der Hydrographische Dienst den operationellen Hochwasserwarndienst.

Der Onlinebetrieb der Niederschlags- und Abflussstationen wird ständig überwacht.

Es wird eine Betriebskontrolle durchgeführt. Funktionieren die Datenübertragungen? Gibt es Ausfälle von Messstationen? Ist vor Ort eine Reparatur oder Instandsetzung erforderlich (noch ist Zeit für Maßnahmen vor Ort vorhanden)?

Laut der oben dargestellten Prognose wird der Niederschlag in zwei Wellen auftreten. Die erste Front soll in der kommenden Nacht mit 60 – 70 mm Niederschlag eintreffen, die zweite Front am Nachmittag und in der Nacht des nächsten Tages. Die prognostizierten Niederschläge der zweiten Welle sind etwas größer als die der ersten (siehe auch Abb. 4).

### Betriebskontrolle Niederschlagsstationen

Durchgeführt am: 15.04.2009 06:55:04

Kontrollzeitraum: 30 Tage

Station	Eigentümer	Niederschlag			Temperatur			Status
		NS Alter [Std]	NS 30 Tage	Max.NS Tageswert	Temp. Alter [Std]	Temp. Min.	Temp. Max.	
<b>Obere Drau</b>								
Spittal ZAMG	ZAMG	0,3	53,0	38,1	0,3	-5,8	21,5	o.k.
Kanzelhöhe ZAMG	ZAMG	0,3	67,1	35,7	0,3	-9,8	13,0	o.k.
Lienz AHP	AHP	-0,9	71,5	30,4	-1,0	-4,8	23,4	o.k.
Oberdrauburg AHP	AHP	-0,9	80,4	39,4	-0,8	-6,4	23,0	o.k.
Irschen	HD Kärnten	3,2	74,8	35,5	3,2	-6,9	16,0	o.k.
Greifenburg AHP	AHP	-0,9	65,3	26,6	k Wert	-9999,0	-9999,0	Fehler
Goldeck	HD Kärnten	-0,1	48,3	30,3	-0,1	-13,1	9,0	o.k.
Hundsmarhof (Villach)	HD Kärnten	555,2	0,0	0,0	555,2	-8,0	9,2	Fehler
Bleistätter Moor	HD Kärnten	3,2	57,2	35,6	3,2	-5,9	23,4	o.k.
Afritz	HD Kärnten	2,8	59,5	38,0	2,8	-5,8	23,6	o.k.
Dellach ZAMG	ZAMG	0,3	85,5	49,6	0,3	-7,6	21,9	o.k.
Villach ZAMG	ZAMG	0,3	84,1	49,0	0,3	-5,6	22,6	o.k.
Weissensee ZAMG	ZAMG	0,3	66,0	40,7	0,3	-10,4	19,6	o.k.
Lienz ZAMG	ZAMG	0,3	68,4	39,2	0,3	-6,8	21,5	o.k.
Sillian ZAMG	ZAMG	0,4	81,2	39,0	0,4	-11,7	17,4	o.k.
Arriach ZAMG	ZAMG	0,3	70,9	45,0	0,3	-6,2	17,8	o.k.
Emberger Alm	HD Kärnten	5,9	81,5	43,5	5,9	2,2	14,1	o.k.
Zettlersfeld HD Tirol	HD Tirol	1,2	50,1	19,3	1,2	-15,4	9,1	o.k.
Lienz HD Tirol	HD Tirol	1,9	81,0	39,2	1,9	-6,8	21,5	o.k.
Sillian HD Tirol	HD Tirol	1,2	75,2	33,9	1,2	-12,2	18,5	o.k.
<b>Isel</b>								
Felber Tauern AHP	AHP	-0,9	17,5	9,5	-0,5	-10,6	12,8	o.k.
Kals AHP	AHP	-0,9	50,7	15,2	-0,8	-10,9	24,6	o.k.
Matrei AHP	AHP	688,9	8,6	8,6	-0,5	-7,0	20,8	Fehler
Virgen ZAMG	ZAMG	0,3	55,2	31,4	0,3	-9,1	16,8	o.k.
Virgen HD Tirol	HD Tirol	1,9	55,4	31,4	1,9	-9,1	16,8	o.k.
Hopfgarten im Def. HD Tirol	HD Tirol	2,4	0,0	0,0	2,4	-7,0	17,1	Fehler
Felbertauerntunnel HD Tirol	HD Tirol	1,2	57,5	23,2	1,2	-10,1	13,5	o.k.
Matrei HD Tirol	HD Tirol	1,2	36,1	22,3	1,2	-5,9	19,0	o.k.

**Abb. 2:** Beispiel eines automatisch generierten Protokolls der Betriebskontrolle.

Bei Auftreten eines Fehlers wird zunächst versucht das Problem von der Abrufzentrale aus zu lösen. Ist dies nicht möglich wird zu strategisch wichtigen Stationen ein Wartungstrupp geschickt, um die Station wieder in Gang zu bringen.

- **Analyse der Niederschlagsprognose**

Mit den diensthabenden Meteorologen der Wetterdienststelle Klagenfurt wird Rücksprache gehalten. Zusätzlich erhalten wir folgende verbale Beschreibung der Wettersituation:



**ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND  
GEODYNAMIK**  
**Wetterdienst Klagenfurt** REGIONALSTELLE FÜR KÄRNTEN

✉ Flughafen, A-9020  
Klagenfurt  
☎ (0463) 41 443  
Fax (0463) 42 633  
E-Mail  
klag@zamg.ac.at  
Internet  
<http://www.zamg.ac.at>

# Telefax

Betreff: **Vorwarnung: Starkregen  
morgen**

*lt. Verteiler  
Stunden)*

*(mind. 30 mm = l/m<sup>2</sup> in 24*

- ausgegeben am Dienstag, 28.10.08 um 10 Uhr
- gültig für heute Dienstag 15 Uhr bis übermorgen Donnerstag 8 Uhr
- zu erwartende Niederschlagsmengen: **bis 150 mm, in Kammlagen bis 200 mm**
- im Bereich: **Schergewicht Gailtal/Lesachtal und Oberes Drautal**
- Text: Kräftige Tiefdruckentwicklung im Mittelmeerraum mit starkem Südweststau, in der Nacht zum Donnerstag zusätzlich eingelagerte Gewitter. Schneefallgrenze durchwegs über 2000m Höhe, teilweise bis 2500m hinauf Regen. Erst bei abklingendem Niederschlag am Donnerstag in der Früh sinkt die Schneefallgrenze auf 1300m ab. Vor allem im Stau anhaltender intensiver Niederschlag, Mengen: im Gailtal 100 bis 150 mm, in den Kammlagen bis 200mm möglich. Oberes Drautal 80 bis 120mm, Raum Villach noch um 80mm, Unterkärnten um 50mm.

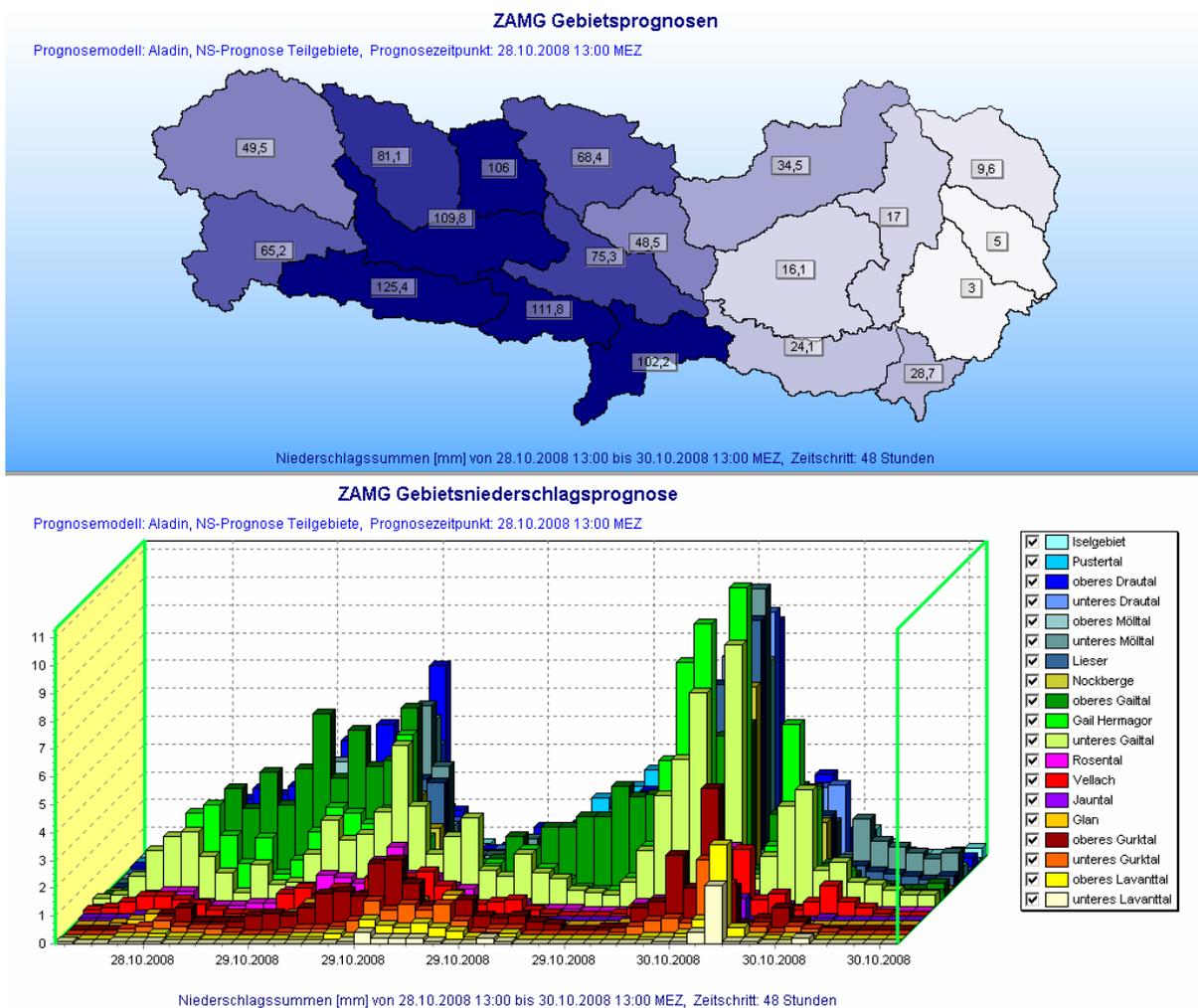
erstellt von: Stockinger/Stefan

**Abb. 3:** Manuell erstellte Starkregenwarnung der ZAMG Regionalstelle Klagenfurt mit verbaler Beschreibung des Niederschlagsereignisses.

Gerade bei Wetterlagen mit starken Stauwirkungen hat es sich gezeigt, dass die Erfahrung des Meteorologen immer noch sehr wertvoll ist! Daher ist seine Einbeziehung in den Prognosevorgang wesentlich.

• **Modellprognosen - Niederschlag**

Die Aladin-Vienna Prognosedaten zeigen ein ähnliches Bild mit etwas geringeren Niederschlagsmengen. Die Regenmengen liegen im Gailtal und im oberen Drautal auch über 100 mm.



**Abb. 4:** Gebietsniederschlagsprognose des Modells Aladin Vienna (ZAMG), räumliche und zeitliche Verteilung der Niederschläge.

INKA - Prognosedaten stehen zum derzeitigen Zeitpunkt noch nicht zur Verfügung, sollen zukünftig (ab Mitte 2009) aber mit verwendet werden.

Bei Niederschlagsmengen dieser Größenordnungen muss an der Gail mit Hochwasser gerechnet werden!

Zum Vergleich zur Prognose nachfolgend die tatsächlich während des Ereignisses gemessenen Niederschlagswerte:

Niederschlagsverteilung von 28.10.2008 6.00 Uhr bis 30.10.2008 6.00 Uhr

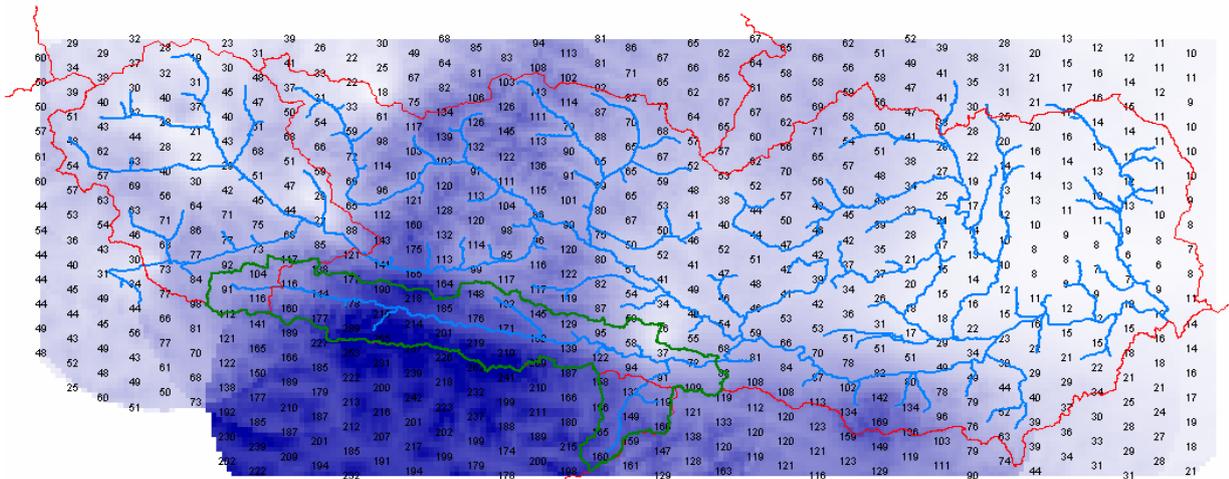


Abb. 5: Gemessene Niederschlagsverteilung während des Ereignisses, Überlagerung der interpolierten Stundensummen.

- **Überprüfen der Ausgangssituation**

Es gab einige Wochen zuvor keine größeren Niederschlagsmengen, der Gebietsniederschlag der letzten 21 Tage ist kleiner als 10 mm. Auch die Abflüsse befinden sich im Niederwasserbereich (Abfluss < 2 MJNQ).

Man kann also von einem **trockenen Bodenfeuchtezustand** ausgehen.

Niederschlagsverteilung von 7.10.2008 6.00 Uhr bis 28.10.2008 6.00 Uhr

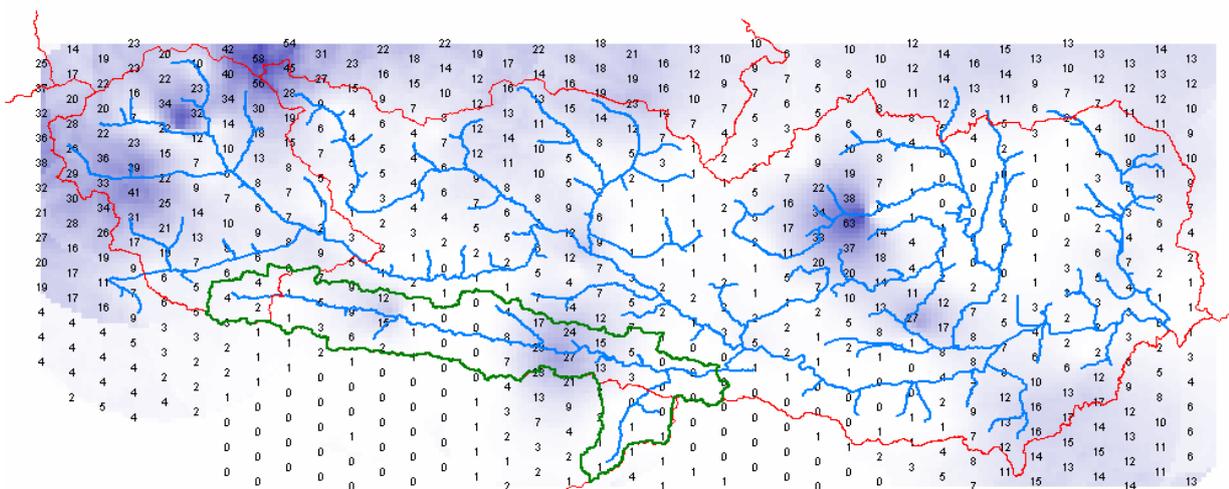


Abb. 7: Verteilung des 21 Tage-Vorniederschlages, Überlagerung der Stundensummen.

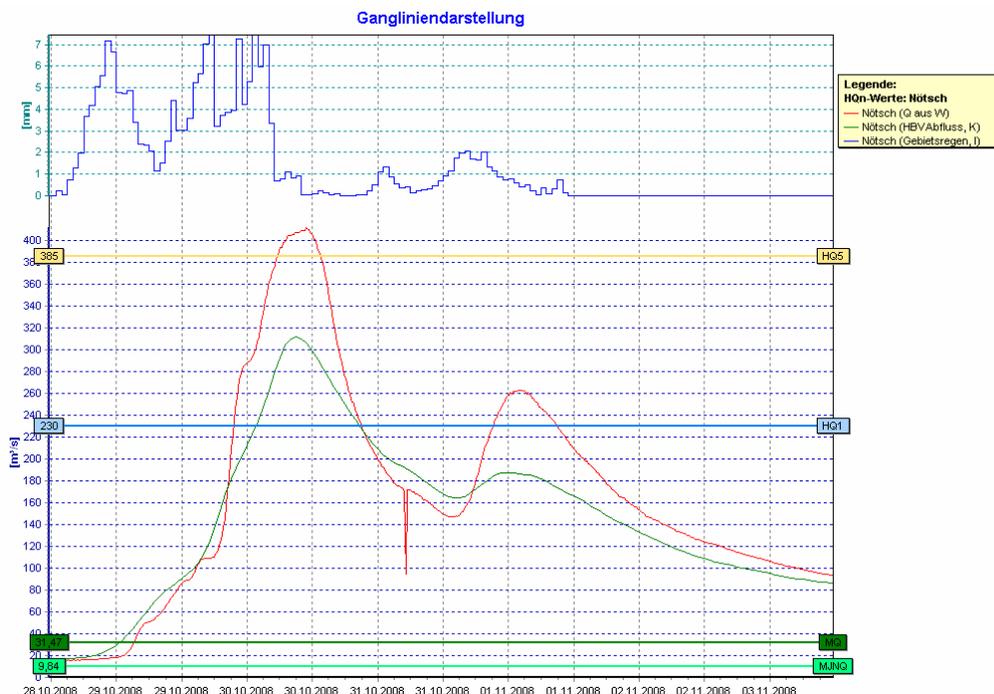
• **Modellprognosen - Abfluss**

Für die Modellierung des Niederschlags-Abflussprozesses wird das kontinuierliche Wasserbilanzmodell HBV (Sten Bergström, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, TU Wien) verwendet. Das Modell verwendet eine räumliche Auflösung der Gitterpunkte von einem Kilometer und einen Zeitschritt von einer Stunde.

Für die Berechnung werden die Daten des meteorologischen Modells Aladin – Vienna (ZAMG) auf das Berechnungsgitter des HBV-Modells umgerechnet. Stündlich werden dann diese Modelldaten durch die einlangenden Niederschlagsdaten der ca. 100 fernübertragenen Niederschlagsstationen (HD Kärnten, ZAMG, AHP, HD Tirol, OSMER), welche ebenfalls auf dieses Berechnungsgitter interpoliert werden, überschrieben. Normalerweise startet ein neuer Berechnungslauf zweimal täglich nach Eintreffen der Niederschlagsprognosen. Im Hochwasserfall können die Rechenläufe öfter gestartet werden.

Um gute Modellergebnisse zu erhalten ist es von entscheidender Bedeutung, dass der im Modell gespeicherte Ausgangszustand möglichst gut mit den realen Verhältnissen übereinstimmt. Messfehler können sich über Monate fortpflanzen und können sich auch in unterschiedlichen Zustandsgrößen auswirken. Es müssen deshalb der aktuelle Bodenfeuchtezustand, das vorhandene Schneewasseräquivalent und die unterschiedlichen Bodenspeicher immer wieder auf Plausibilität geprüft werden.

**Die Modellergebnisse sind nur so gut wie die Eingangsdaten!**



**Abb. 7:** Prognostizierte Abflüsse mit dem Modell HBV und den prognostizierten Niederschlägen. Das Modell war zu diesem Zeitpunkt noch in Entwicklung und nicht ausreichend geeicht!

- **Abflussprognose mit dem Hochwasserszenarienkatalog  
(auf Basis HEC HMS - HEC RAS)**

Für das Gailgebiet wurde im Zuge der Entwicklung des Hochwasserwarnmodells ein Hochwasser-Szenarienkatalog für alle wichtigen Pegelmessstellen zusammengestellt.

Daraus kann bei Bekanntsein des Prognosegebietsniederschlages, der Regendauer, der Regenverteilung und des Bodenfeuchtezustandes sehr rasch die zu erwartende Hochwasserspitze abgeschätzt werden.

Auf Grundlage eines kalibrierten Abflussmodells (HEC HMS – HEC RAS) wurden für verschiedene Niederschlagsmengen (50, 100, 150, 200, 250 und 300 mm) und unterschiedliche Regenverteilungen (Anfangs-, mittig- und endbetont, doppelwellig und gleichmäßige Verteilung) sowie unterschiedliche Niederschlagsdauern von 12, 24, 48 und 72 Stunden Abflussszenarien berechnet und die Ergebnisse in Überblicksgrafiken zusammengestellt.

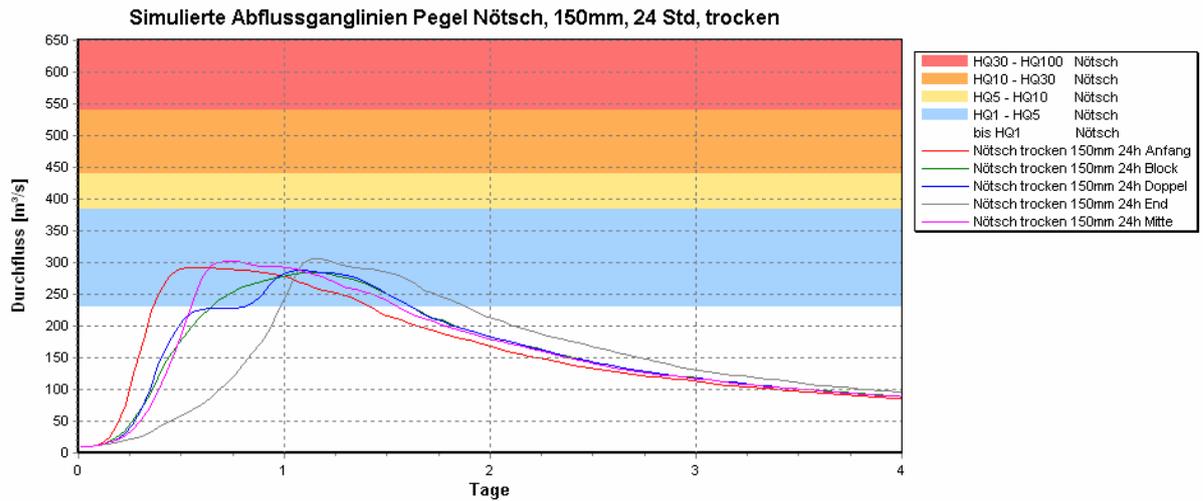
Der Hydrologe kann dabei schon vorweg bei der Erstellung des Kataloges viel Erfahrung in der Abschätzung von Hochwässern sammeln. Es lassen sich dann auch „unscharfe“ und nur verbal vorhandene Informationen des Meteorologen in die Erstellung der Hochwasserprognose einbeziehen.

Vor allem Unsicherheiten in der Niederschlagsprognose lassen sich in einem numerischen Modell nur sehr aufwendig aufnehmen. Es müssen für jedes Szenario neue, flächig und räumlich unterschiedlich verteilte Eingangsdaten ermittelt werden.

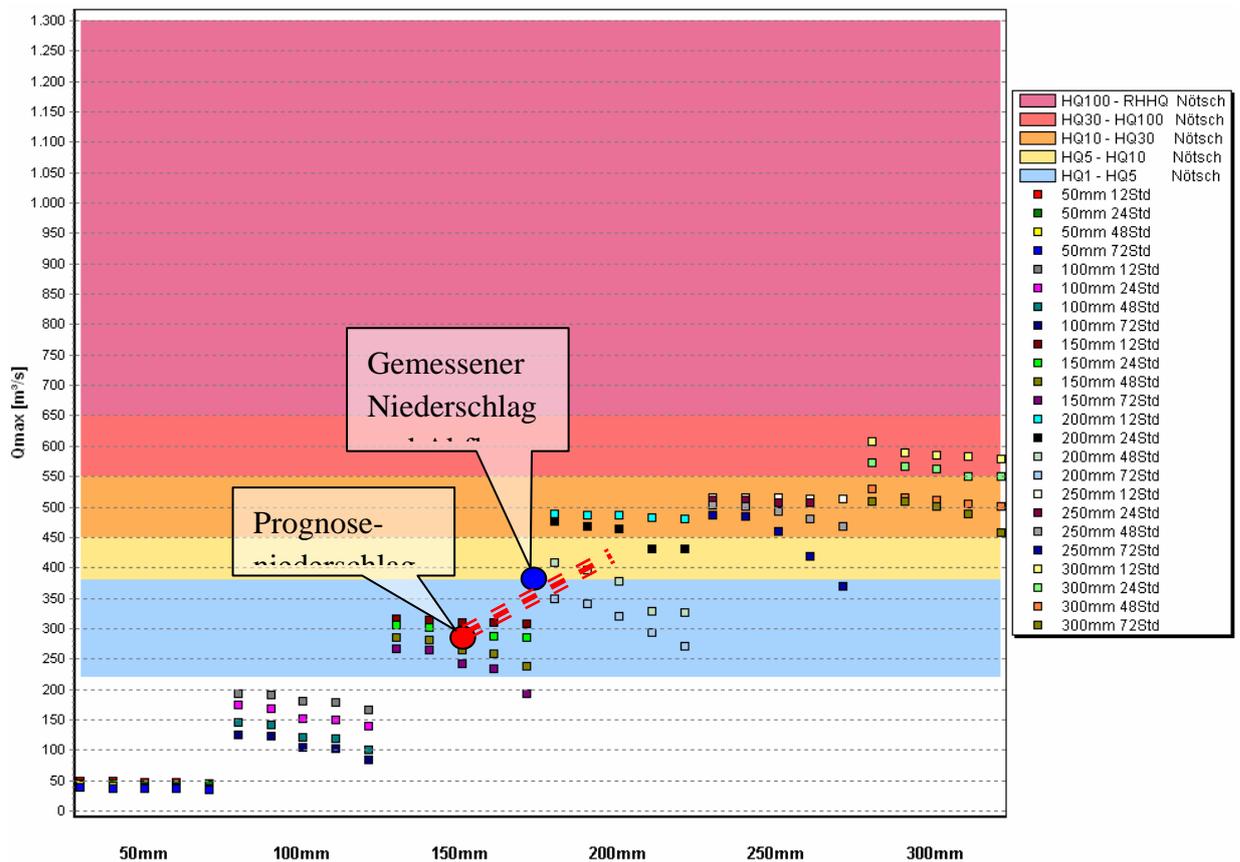
Mit dem Szenarienkatalog können Fragen bezüglich unterschiedlicher Niederschlagsmengen, Ausgangszustände oder Regendauern- und Regenverteilungen nach unseren Erfahrungen ausreichend genau, dabei aber doch einfach, beantwortet werden.

### **Zur Prognose vom 28.10 2009:**

Gewählt wurde das Szenario „trockener Ausgangszustand“ – siehe Kapitel „Überprüfen der Ausgangssituation“, Niederschlagsdauer 36 Stunden, Gebietsniederschlagsmenge 150 mm.



**Abb. 8:** Abflussganglinien der simulierten Szenarien für den Pegel Nötsch für 150 mm Gebietsniederschlag (flächig gleichmäßig, zeitlich unterschiedlich verteilt) und 24 Stunden Dauer, trockener Ausgangszustand.



**Abb. 9:** Hochwasserszenarien-katalog Pegel Nötsch; Abschätzung der Hochwasserspitze bei 150 mm bzw. 175 mm Gebietsniederschlagsmenge und einer Dauer von 36 Stunden.

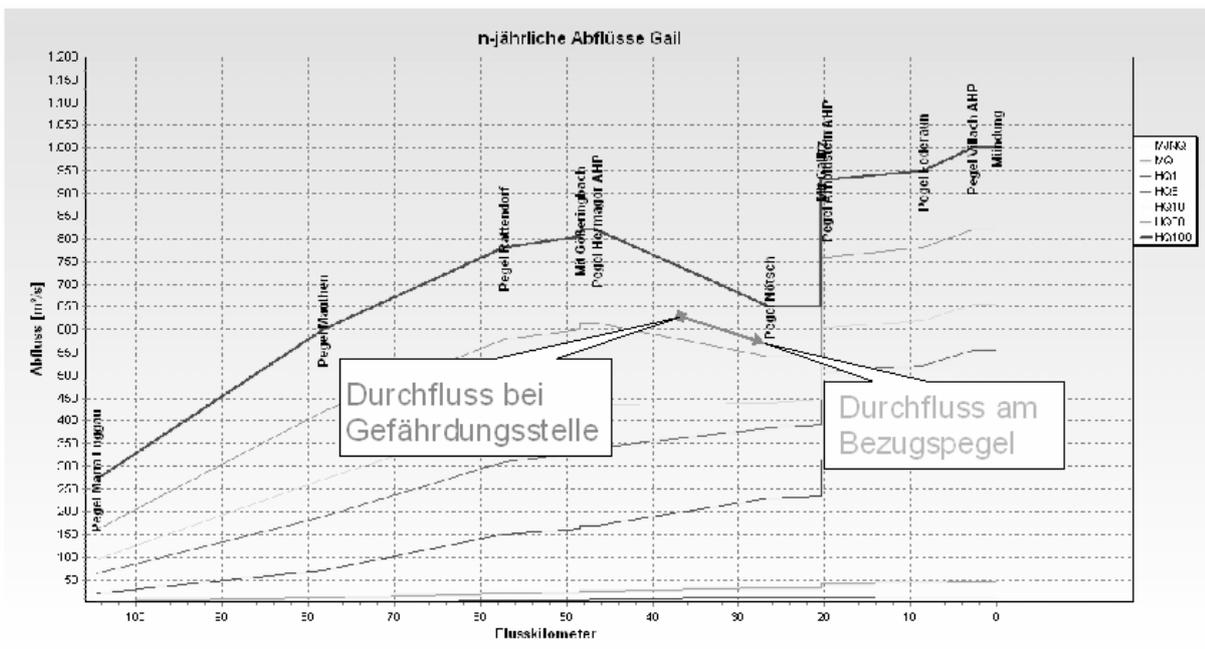
Demnach würde unter diesen Bedingungen an der Gail in Nötsch ein Hochwasser in der Kategorie HQ<sub>1</sub>- HQ<sub>5</sub> zu erwarten sein.

Aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung der Niederschläge und den laut Meteorologen zu erwartenden eingelagerten Gewitterzellen wurde der zu erwartende Spitzenabfluss von vorneherein etwas höher als der Niederschlagsprognose entsprechend eingeschätzt.

Hinweis: Während des Ereignisses wird stündlich aus den interpolierten Niederschlagsverteilungen der aktuelle Gebietsniederschlag berechnet. Damit ist ein ständiger Vergleich zwischen Niederschlagsprognose und Niederschlagsmessung möglich.

- **Auswirkungen der prognostizierten Abflüsse – Generelle Hochwasseralarmpläne**

Für alle Flüsse in Kärnten wurden die Gefahrenpunkte erhoben und mit dem kritischen Abfluss in einer Datenbank abgelegt. Im System sind weiters die hydrologischen Längenschnitte der Gewässer gespeichert. Unter der Annahme, dass im Bereich eines Bezugpegels Abflüsse derselben Jährlichkeit auftreten kann aus dem Abfluss an der Gefährdungsstelle der Abfluss am Bezugspegel ermittelt werden.



**Abb. 10:** Schema der Umrechnung der kritischen Abflüsse an der Gefährdungsstelle in zugehörige Abflüsse am Bezugspegel.

Da auch die Pegelschlüssel der Bezugspegel im System hinterlegt sind kann auch der zugehörige kritische Wasserstand am Bezugspegel automatisch ermittelt werden.

Die Alarmpläne werden direkt aus den Datenbankeinträgen generiert (PDF-Dateien) und liegen auch gesammelt in gedruckter Form vor.



Hochwasserwarnservice Kärnten

### Generelle Gefährdungsliste Gail

#### Pegel Mauthen

HQ-Kateg.	Gemeinde	Gefährdung	Typ	Beschreibung	Lageplan	W-Ber. Pegel	WPegel ~cm
HQ1-HQ5	Kirchbach	Mittel	Brücke/Straße	ÖBB Durchlass Gundersheim - Dammbalken	LP 4	170 - 285	235
HQ1-HQ5	Kötschach - Mauthen	Gering	Freiland	Beginn erster Retentionen	LP 2	170 - 285	245
HQ5-HQ10	Dellach	Gering	Freiland	Überströmung in Rückhaltebereiche	LP 2/3	285 - 340	340
HQ10-HQ30	Kirchbach	Mittel	Siedlung	Teil von Stranig (Ringdamm in Bau)	LP 6	340 - 420	350
HQ10-HQ30	Kirchbach	Mittel	Brücke/Straße	Straße Stranig - Reisach	LP 6	340 - 420	350
HQ10-HQ30	Kirchbach	Hoch	Siedlung	südliche Objekte Gundersheim	LP 4	340 - 420	360
HQ10-HQ30	Kirchbach	Mittel	Brücke/Straße	Landesstraße Goderschach - Stranig	LP 5	340 - 420	385
HQ10-HQ30	Kirchbach	Hoch	Brücke/Straße	Bahnlinie Gundersheim	LP 4	340 - 420	410
HQ30-HQ100	Kirchbach	Sehr hoch	Siedlung	Oberdöbemitzen (Dammbbruchgefahr)	LP 6	420 - 495	430
HQ30-HQ100	Kirchbach	Sehr hoch	Siedlung	Teil von Treßdorf (Dammbbruchgefahr)	LP 6	420 - 495	440
HQ30-HQ100	Kirchbach	Sehr hoch	Siedlung	Teil von Gundersheim (Bahndamm durchlässig)	LP 5	420 - 495	445
HQ30-HQ100	Kirchbach	Sehr hoch	Siedlung	Teil von Grininitzen (Dammbbruchgefahr)	LP 4	420 - 495	450
HQ30-HQ100	Kötschach - Mauthen	Sehr hoch	Siedlung	Kötschach-Mauthen Ortsbereich! (Ausbau ab 2008)	LP 1	420 - 495	460

#### Pegel Rattendorf

HQ-Kateg.	Gemeinde	Gefährdung	Typ	Beschreibung	Lageplan	W-Ber. Pegel	WPegel ~cm
HQ1-HQ5	Kirchbach	Gering	Freiland	Beginn erster Retentionen	LP 6	300 - 410	395
HQ5-HQ10	Kirchbach	Gering	Flussbauwerk	Überströmstrecke Stranig	LP 6	410 - 460	435
HQ10-HQ30	Kirchbach	Mittel	Brücke/Straße	Straße Stranig - Reisach	LP 6	460 - 550	460
HQ10-HQ30	Kirchbach	Mittel	Siedlung	Teil von Stranig (Ringdamm im Bau)	LP 6	460 - 550	475
HQ30-HQ100	Hermagor - Pressegger	Mittel	Brücke/Straße	Landesstraße Tröpolach - Rattendorf	LP 9	550 - 630	565
HQ30-HQ100	Hermagor - Pressegger	Hoch	Gewerbe/Indu	Umspannwerk Tröpolach	LP 9	550 - 630	570
HQ30-HQ100	Hermagor - Pressegger	Sehr hoch	Siedlung	Teile von Watschig	LP 10	550 - 630	575
HQ30-HQ100	Kirchbach	Mittel	Siedlung	Waidegg (Dammbbruchgefahr)	LP 8	550 - 630	590
HQ100-RHHQ	Hermagor - Pressegger	Sehr hoch	Siedlung	Teile von Rattendorf	LP 9	630 - 720	665

HQ-Kateg.	Gemeinde	Gefährdung	Typ	Beschreibung	Lageplan	W-Ber. Pegel	WPegel ~cm
HQ30-HQ100	Feistritz an der Gail	Sehr hoch	Siedlung	Teil von Feistritz (Dammbbruchgefahr)	LP 19	635 - 690	675
HQ30-HQ100	Feistritz an der Gail	Hoch	Brücke/Straße	Bundesstraße Gailtal Zubringer	LP 19	635 - 690	685
HQ100-RHHQ	Nötsch im Gailtal	Sehr hoch	Siedlung	Teil von Nötsch	LP 19	690 - 730	710
HQ100-RHHQ	Sankt Stefan im Gailtal	Sehr hoch	Siedlung	Vorderberg RHHQ-Querdamm, HQ100-Begleitedamm	LP 16	690 - 730	715

#### Pegel Federaun

HQ-Kateg.	Gemeinde	Gefährdung	Typ	Beschreibung	Lageplan	W-Ber. Pegel	WPegel ~cm
HQ5-HQ10	Villach	Gering	Freiland	Freilandausuferungen	LP 24	475 - 515	490
HQ5-HQ10	Villach	Mittel	Brücke/Straße	Zufahrtsstraße Federaun	LP 24	475 - 515	510
HQ10-HQ30	Finkenstein	Sehr hoch	Siedlung	Teil von Müllnern	LP 25	515 - 570	545
HQ10-HQ30	Villach	Hoch	Siedlung	Teil von Oberschütt	LP 22	515 - 570	550
HQ30-HQ100	Villach	Sehr hoch	Siedlung	Großer Teil von Unterschütt	LP 23	570 - 620	560
HQ30-HQ100	Arnoldstein	Sehr hoch	Siedlung	Teil von Erlendorf	LP 23	570 - 620	575
HQ100-RHHQ	Finkenstein		Gewerbe/Indu	Fumitz - Verschubbahnhof	LP 25	620 - 805	685

#### Pegel Villach AHP

HQ-Kateg.	Gemeinde	Gefährdung	Typ	Beschreibung	Lageplan	W-Ber. Pegel	WPegel ~cm
HQ5-HQ10	Villach	Mittel	Einzelgebäude	Sportplatz Maria Gail	LP 27	455 - 495	490
HQ10-HQ30	Villach	Hoch	Siedlung	Villach - Auen Grundwasserprobleme	LP 26	495 - 555	520
HQ100-RHHQ	Villach	Sehr hoch	Siedlung	Auen/Tschinowitsch/Perau (bei Dammbbruch)	LP 26	610 - 800	800

Abb. 11: Gefährdungsliste für verschiedene Hochwasserkategorien, zugeordnet zu Bezugspegeln, an der Gail.

Im konkreten Fall ist aus dem Alarmplan erkennbar, dass an der Gail bei HQ<sub>1</sub> – HQ<sub>5</sub>, aber auch bei HQ<sub>5</sub> – HQ<sub>10</sub> kaum Gefahrenbereiche gegeben sind. Dies ist auf den hohen Hochwasserschutzgrad entlang der Gail, welcher in den letzten Jahrzehnten erreicht wurde, zurückzuführen. Erste Ausuferungen in Freilandbereichen sind zu erwarten. An Objekten ist nur die Zufahrtsstraße nach Federaun betroffen.

In der Datenbank des Hochwasserwarnservices werden auch die Adressen von im Hochwasserfall wichtigen Personen und Organisationen verwaltet.

### Organisation - Adressliste Gail

Bezirk - Adressliste						
Organisation	Name	Vorname	Tel. Nr.	Mobil Tel. Nr.	Tel. Nr. Privat	E-Mail
BH Hermagor						
BH Hermagor	Bereitschaftsdienst					
BH Villach Land						
BH Villach Land	Bereitschaftsdienst					
Magistrat Villach Stadt						
Magistrat Villach Stadt	Mainhart					

Kraftwerke - Adressliste						
Organisation	Name	Vorname	Tel. Nr.	Mobil Tel. Nr.	Tel. Nr. Privat	E-Mail
AHP Hydrographie	Kugi					
KELAG Hauptschaltleitung H0ft						
KW Schütt-Gail	Leitstelle Klagenf.					

Land - Adressliste						
Organisation	Name	Vorname	Tel. Nr.	Mobil Tel. Nr.	Tel. Nr. Privat	E-Mail
AKL Abt. 18 Flussbau	Koboltschnig					
AKL Abt. 18 Flussbau	Schober					
AKL Abt. 18 Flussbau	Sereinig					
AKL Abt. 18 Hydrographie	Kopeinig					
AKL Abt. 18 Hydrographie	Malle					
AKL Abt. 18 Hydrographie	Moser					
AKL Abt. 18 Talsperrenaufsicht	Santer					
AKL Abt. 18 Talsperrenaufsicht	Themesl					
AKL Abt. 18 Talsperrenaufsicht	Weichlinger					

**Abb. 12:** Liste mit Adressen von Personen und Organisationen, Beispiel aus dem Alarmplan Gail

Weiters enthalten die generierten Reporte der Alarmpläne die Pegelquerprofile, die Überflutungspläne mit Hochwasseranschlaglinien aus den Gefahrenzonenplänen sowie die Fließzeiten zwischen wichtigen Orten entlang des Gewässers.

- **Informationsweitergabe und Service**

Für den Austausch der Informationen zwischen Meteorologen und Hydrologen sowie zur Weitergabe dieser Informationen an Behörden, Interessenten und die Medien wurde eine Internetplattform entwickelt (Kooperation Wetterdienst – Hydrographischer Dienst).

Damit können Warnungen unabhängig vom Ort **gemeinsam** zusammengestellt und versendet werden.

Den Start für eine neue Warnung macht der Wetterdienst. Der Meteorologe beschreibt den prognostizierten weiteren Niederschlagsverlauf unter Einbeziehung der Modelldaten und seiner Erfahrung.

Danach wird über E-Mail und SMS der Hydrographische Dienst vom Vorliegen einer neuen Nachricht verständigt

Im nächsten Schritt wird vom Hydrographischen Dienst in einer eigenen Maske die aktuelle Abflusssituation, die erwartete weitere Entwicklung (Hochwasserprognose) und, auf Basis der Gefährdungslisten, die zu erwartenden Auswirkungen beschrieben.

**Abb. 13:** Eingabemaske des Hydrographischen Dienstes im Hochwasserwarnservice Kärnten.

Aus beiden Informationen – Meteorologie und Hydrologie - wird ein gemeinsamer Bericht in Form einer PDF-Datei generiert.

Dieser kann dann an vorbereitete Verteilerlisten wie Behörden, Bereitschaftsdienste, Einsatzorganisationen, Bund, Sachverständige, Interessenten (Kraftwerksbetreiber) und Medien per E-Mail versendet werden. Die Empfänger erhalten gleichzeitig ein SMS mit dem Hinweis, dass ein neues E-Mail des Hochwasserwarnservices vorliegt.

Je nach Kategorie des Hochwassers werden unterschiedliche Verteiler gewählt.

Bei kleinen Hochwässern werden zumeist nur die jeweiligen Bereitschaftsdienste der Behörden und die Landesalarmzentrale verständigt.

Bei größeren Hochwässern wird ein breiteres Feld an Verteilern gewählt. Auch die Medien werden dann in den Informationsfluss eingebunden. Die gezielte Informationsweitergabe an die Medien soll eine objektivere Berichterstattung bewirken.

Beim Hochwasser vom 30. Oktober 2009 wurden die Bezirksbehörden und der Bereitschaftsdienst des Landes informiert.



## HINWEIS - WARNUNG!

ausgegeben am Mittwoch, 29. Oktober 2008

### Starkniederschlag

#### Starkregen im Westteil Kärntens am Donnerstag 29. Oktober 2008

Vorerst kurze Wetterberuhigung, neuerlich aufkommender Regen vermehrt am Nachmittag  
Niederschlagsmengen bis Mitternacht:  
oberes Gailtal-Lesachtal: 70 bis 90mm  
oberes Drautal: bis 80mm  
Mittelkärntner Raum: nur noch bis 30mm

weitere Niederschlagsmengen morgen Donnerstag von 00 Uhr bis etwa 08 Uhr:  
oberes Gailtal-Lesachtal: 30 bis 40mm  
oberes Drautal: bis 30mm

### HOCHWASSERGEFÄHRDUNG

#### Hochwasserwarnung für Gail und obere Drau

##### Aktuelle Situation

Die erste Niederschlagsfront hat ein Ansteigen der Wasserstände an der Gail und Lieser über den Mittelwasserstand bewirkt. Die Drau und die Flüsse Unterkärntens liegen noch unter dem Mittelwasserstand. Das heißt es gibt insgesamt an den Flüssen noch keine Hochwassersituation.

##### Weitere Entwicklung

Die weitere Entwicklung bei den prognostizierten Niederschlägen wird wie folgt eingeschätzt:  
Während des Tages werden die Wasserständen etwas fallen.  
Ab den späten Nachmittag, mit intensiver werdenden Niederschlägen, gibt es wieder einen deutlichen Anstieg, der bis in den kommenden Morgen andauern kann.  
Diesmal wird es zu Hochwasserführungen vor allem an der Gail und Drau kommen. Jedoch nur im Ausmaß eines 1-5 jährlichen Hochwassers (vielleicht stellenweise etwas darüber), eingeschätzt auf den derzeitigen Prognosegrundlagen. Die Hochwassergefährdung (Überschwemmungsgefahr) wird weiterhin allgemein als "gering" eingeschätzt. (Flüsse führen Hochwasser, Überschwemmungsgefahr von Freiland- und Siedlungsbereichen gering, eventuell sind niedergelegene Einzelobjekte betroffen)  
An den Bächen können im Zuge von konvektiven Einlagerungen Überschwemmungen nicht ausgeschlossen werden.

##### Alarmierungsgrad/Maßnahmen

Bereitschaftsdienste der Behörden und Landeswarnzentrale wurden verständigt

Die nächste Information erhalten Sie: 30.10.2008 9:00 Uhr

Ergänzende Angaben finden Sie im Internet:

Hydrographischer Dienst Kärnten: <http://www.wasser.ktn.gv.at/Hydrographie> und  
Zamg: <http://Hochwasser.kso.ac.at>

Abb. 14: Als PDF-Datei – generierte Warnung, welche als E-Mail Anhang versendet wird.

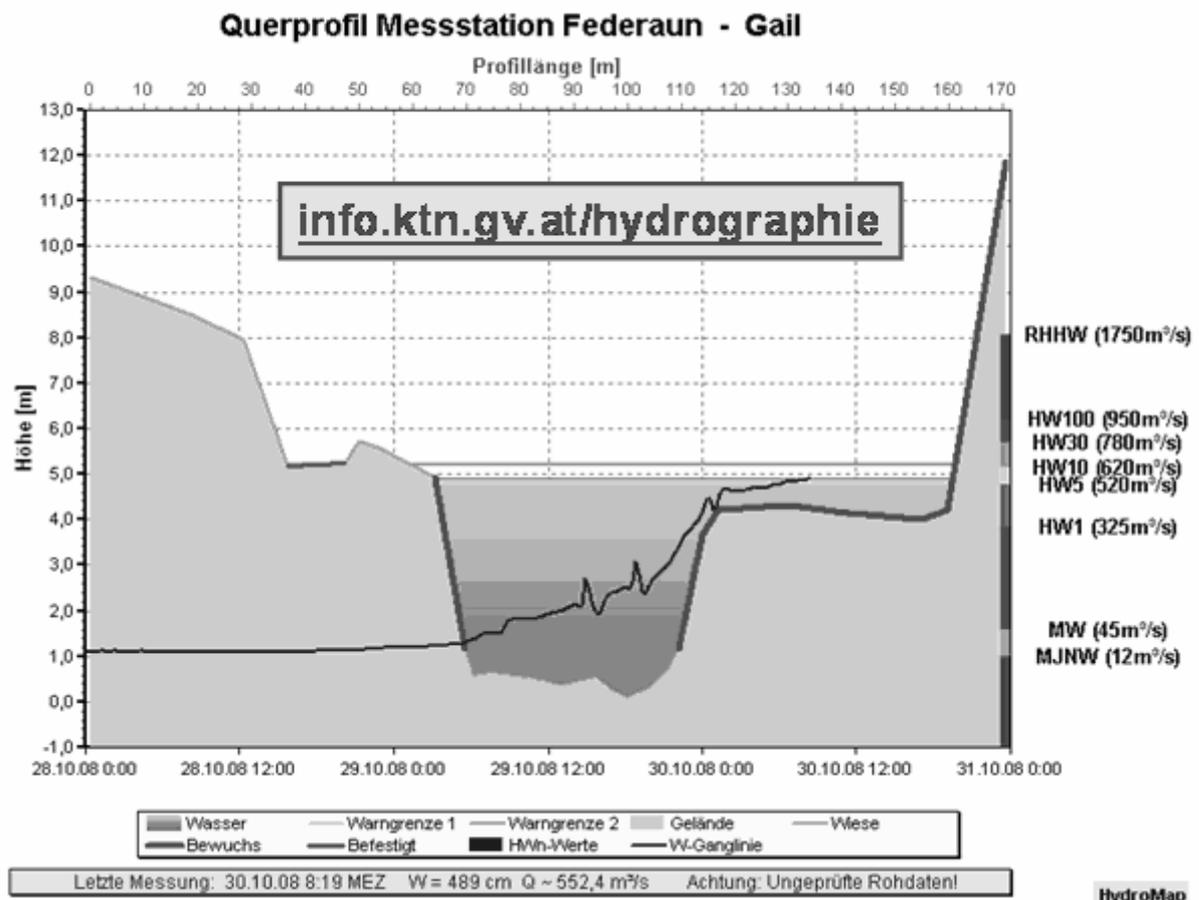
Wichtig erscheint uns auch, dass im Bericht die Angabe des Zeitpunktes der nächsten Aussendung angegeben ist. Damit wissen die Betroffenen wann nächste Informationen zu erwarten sind. Wir wollen damit die Zahl der telefonischen Rückfragen vermindern.

Nach der Wahl des Verteilers wird die Hochwasserwarnung an den gewählten Verteilerkreis per E-Mail versendet. Gleichzeitig erhalten die Adressaten eine SMS-Meldung am Handy, dass neue Hochwasserinformationen per E-Mail vorliegen.

## 5. Informationen im Internet

Die im Internet angebotenen Informationen richten sich an einen breiten Kreis von Interessenten. Bei der Erstellung der Grafiken wurde deshalb besonders darauf geachtet, dass diese leicht verständlich und trotzdem aussagekräftig sind.

Es werden stündlich aktualisierte Grafiken der aktuellen Niederschlags- und Abflusssituation angeboten. Außerdem werden im Hochwasserfall auch auf der Internetseite des hydrographischen Dienstes Hochwasserwarnungen und Situationsberichte bereitgestellt.



**Abb. 15:** Internetgrafik vom 30.10.2008 mit Querprofil und aktueller Ganglinie des Wasserstandes der Gail am Pegel Federaun.

**Anschrift der Verfasser:**

**Dipl.-Ing. Johannes Moser**  
**Dipl.-Ing. Christian Kopeinig**

Amt der Kärntner Landesregierung,  
Abteilung 18, Wasserwirtschaft – Hydrographie  
Flatschacher Straße 70

A – 9020 Klagenfurt

Fax: 0043 463 536 31828

Tel.: 0043 463 536 31806

E-Mail: johannes.moser@ktn.gv.at  
christian.kopeinig@ktn.gv.at

## **HOCHWASSERVORHERSAGE IN BAYERN, MODELLUMGEBUNG UND DV-VERNETZUNG**

Franz-Klemens Holle

### **1. Einleitung**

Die jüngsten, großen Hochwasserereignisse in Deutschland (Juni 1999, August 2002, Januar 2003 und August 2005) haben die Gefahren, die von Hochwasser ausgehen, wieder in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Allein durch das Hochwasserereignis vom August 2002 entstand in den Ländern Deutschland, Österreich, Tschechien und Ungarn nach Schätzungen der Münchener Rück ein Gesamtschaden von 13.500 Mio. US\$. Aus der Statistik der Naturkatastrophen geht hervor, dass 30 % aller Schadensereignisse und 50 % der volkswirtschaftlichen Schäden weltweit aus Überschwemmungen resultieren (Münchener Rück, 2003).

Die extremen Hochwasser mit ihren katastrophalen Auswirkungen lassen den Ruf der Öffentlichkeit nach mehr Sicherheit und vorbeugendem Hochwasserschutz laut werden. Durch den baulichen und technischen Hochwasserschutz sind die Überschwemmungen zwar seltener geworden, bei Versagen der Schutzvorkehrungen sind die Auswirkungen aber gravierender. Einen absoluten Schutz vor Hochwasser gibt es nicht. Alle baulichen Schutzmaßnahmen, wie z. B. Deiche und Schutzbauten, haben ihre Grenzen. Hochwasser können aber erkannt und - in bestimmten Grenzen – vorhergesagt werden, und damit kann die betroffene Bevölkerung gewarnt und die interessierte Öffentlichkeit informiert werden. Die Aufgaben eines Hochwasserwarn- bzw. Hochwassernachrichtendienstes können kurz mit den Stichworten "Messen - Melden - Vorhersagen - Warnen und Informieren" umrissen werden. Neben einer straffen Organisation und moderner, sicherer Methoden der Datenerfassung und -bereitstellung, erfordern diese Aufgaben eine fundierte hydrologische Basis.

In Bayern wurde, ausgelöst durch das Pfingsthochwasser 1999, frühzeitig ein Innovationsprogramm „Quantitative Hydrologie“ im Gewässerkundlichen Dienst Bayerns aufgelegt (Vogelbacher et al., 2002). Neben der Entwicklung von Vorhersagemodellen umfasste es den Aufbau eines neuen automatischen Online-Niederschlagsmessnetzes, die Optimierung des bestehenden Pegelnetzes, die Verbesserung der Abflussermittlung, die Absicherung der Übertragungswege und die Nutzung neuer Informationswege. Es ist Teil des Aktionsprogramms 2020 zum nachhaltigen Hochwasserschutz in Bayern, in dem Investitionen zum vorbeugenden, technischen und weitergehenden Hochwasserschutz erfolgen (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz:). Im Rahmen eines Entwicklungsvorhabens (Teil 3 dieses EV läuft noch bis Ende 2010) wurden für ganz Bayern Hochwasservorhersagemodelle entwickelt und zum operationellen Einsatz gebracht. Außerdem wurde und wird die Informationsbereitstellung mit modernen Kommunikationsmitteln verbessert, die Zuverlässigkeit der Datenübermittlung und -bereitstellung im Hochwassernachrichtendienst erhöht und die Ausfallsicherheit durch Redundanz in allen Teilbereichen stark erhöht.

## 2. „Messen“: die Datengrundlage für die Hochwasservorhersage

Für einen effektiven vorbeugenden Hochwasserschutz, wie z.B. für das Aufstellen mobiler Hochwasserschutzanlagen oder die Steuerung von Hochwasserrückhalteräumen, sind relativ genaue Vorhersagen für 24 Stunden und länger erforderlich. Diese Forderung bedingt den Einsatz funktionierender Hochwasservorhersagemodelle die sich in der Regel auf gemessene und vorhergesagte Zeitreihendaten stützen.

Wie aus Abbildung 1 zu ersehen ist, werden für eine möglichst lange Vorhersage sowohl hydrologische als auch meteorologische Daten benötigt. Diese Daten müssen vor der Vorhersageberechnung in möglichst kurzer Zeit gesammelt, plausibilisiert und teilweise korrigiert werden. Da die Ereignisdaten auf die Genauigkeit der Hochwasservorhersage in der Regel einen größeren Einfluss haben als alternativ anwendbare Vorhersagemodelle, wird auf die Datenquellen im Folgenden näher eingegangen.

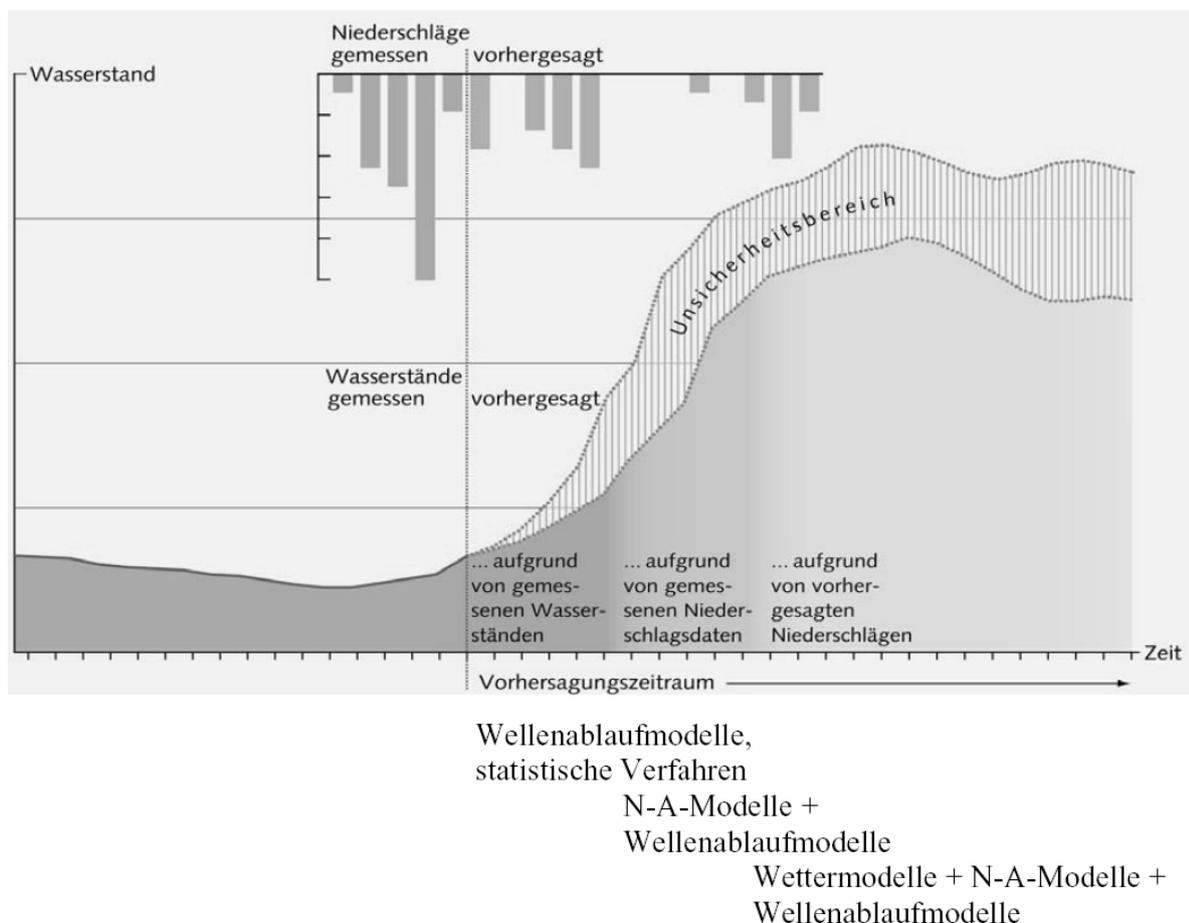


Abb. 1: Schema der Abflussvorhersage (Holle, 2006)

## 2.1 Pegelmessnetz

Für die Hochwasservorhersage wird in der Regel das gleiche Pegelmessnetz wie für den gewässerkundlichen Dienst herangezogen. Die Übertragungswege sind im Allgemeinen ebenfalls die gleichen. In Bayern werden die Messnetzdaten mit dem System WISKI / SODA der Firma Kisters gesammelt und übertragen. Zurzeit werden aus dem Landesmessnetz ca. 630 Pegel abgerufen.

Die extremen Hochwasser der vergangenen Jahre haben gezeigt, dass die Ausstattung und die Übertragungswege der Pegel nicht sicher genug waren. Immer wieder traten Ausfälle der Messeinrichtungen und der Übertragungswege auf. Um die Datenverfügbarkeit zu sichern, wurden deswegen in Bayern die im HND genutzten Pegel mit redundanter, im Allgemeinen unterschiedlicher Messwerterfassung ausgerüstet. Die Redundanz zeigte bereits beim Hochwasser 2005 ihre Wirkung. Bei diesem Hochwasser kam es im Gegensatz zu den Vorangegangenen zu keinen Totalausfällen der Beobachtung, sondern nur zu Ausfällen einzelner Geber (Vogelbacher, 2006)

Beim Hochwasser August 2005, bei dem schon viele Pegel redundant ausgestattet waren, hat sich gezeigt, dass die bisher als relativ genau betrachtete Messgröße Wasserstand auch einen relativ großen Schwankungsbereich aufweisen kann. So waren bei mehreren Pegeln im alpinen und voralpinen Bereich während des Hochwassers Unterschiede zwischen den Gebern von 20 cm und mehr zu verzeichnen. Nach dem Hochwasser konnte zwar in den meisten Fällen der genauere Geber detektiert werden, im operationellen Betrieb ist eine Überprüfung aber nur bedingt möglich, so dass die subjektive Wahl eines Gebers als Datengrundlage zu einer bisher nicht erkannten zusätzlichen Ungenauigkeit der Vorhersage führen kann.

Eine zweite Schwachstelle besonders der älteren Pegel ist der nicht ausreichende Messbereich bei Hochwasser. Diese Pegel werden – soweit möglich - in Abhängigkeit ihrer Wichtigkeit entsprechend baulich geändert, so dass auch eine Messwerterfassung über  $HW_{100}$  hinaus erfolgen kann.

Eine weitere Quelle für Ungenauigkeiten bei der Hochwasservorhersage sind die Umrechnungsfunktionen zwischen Wasserstand und Abfluss. Die Wasserstands/Abfluss-Beziehungen sind besonders im Extrembereich zu wenig belegt und meist ungenau, da in diesen Abflussbereichen keine Abflussmessungen mehr durchgeführt werden können. Eine Umfrage bei den Wasserwirtschaftsämtern hat ergeben, dass es sinnvoll ist, für etwa 300 Pegel hydraulische Überprüfungen der W/Q-Beziehungen im Hochwasserbereich durchzuführen. Diese Nachrechnung erfolgt in den nächsten Jahren. Dafür sind Vergaben für ca. 2,4 Mio. € vorgesehen. Ein weiteres Manko bei der Abflussbestimmung ist, dass die letzten ausgewerteten Abflussmessungen oft zeitlich zu weit in der Vergangenheit und in anderen Abflussbereichen liegen, so dass sie nur noch bedingt Aussagen für den aktuellen Vorhersagezeitpunkt zulassen. Um auch in Zukunft eine Beschleunigung und eine Qualitätssicherung bei der Abflussmessung zu erzielen, werden neue Wege zur Abflussmessung getestet und eingeführt (Roth, 2008). Außerdem werden immer mehr

Pegel redundant mit Geschwindigkeitssensoren ausgerüstet, die eine kontinuierliche Abflussermittlung erlauben.

Es bleiben jedoch auch weiterhin bei der Abflussermittlung (und bei der Rückrechnung der vorhergesagten Abflüsse in Wasserstände) Unsicherheiten bestehen, deren Lösung noch offen ist. Hier sind an erster Stelle die Eintiefung und Auflandung während des Hochwassers besonders an Pegeln im alpinen und voralpinen Bereich zu nennen, die zu einer Querschnittsänderung und damit zu einer Verfälschung des Abflusses führen. Weitere Fehlerquellen sind Eiserscheinungen und lokale Aufstau-, bzw. Beschleunigungseffekte (z.B. Brückeneinsturz oder Dammbbruch).

Zusätzlich zu den 630 Pegeln der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung werden im Hochwassernachrichtendienst weitere 105 Pegel der Nachbarländer und der Wasserschifffahrtsverwaltung des Bundes, sowie 180 Kraftwerkspegel genutzt. Insgesamt werden 853 Pegel in den Vorhersagemodellen verwendet.

## **2.2 Niederschlagsmessnetz und weitere meteorologische Messdaten**

Der Deutsche Wetterdienst und Bayern haben im Rahmen des Programms Messnetz 2000 ca. 300 Niederschlagsstationen errichtet, die in das bundesweite, automatisch registrierende und abrufbare Niederschlagsmessnetz eingebunden sind. Die Daten werden inzwischen stündlich mit einer Auflösung von einer Minute von zwei redundanten Messnetzcentralen des DWD abgerufen, automatisch auf Plausibilität geprüft und in einer Datenbank gespeichert. Neben dem Datenabruf werden laufend alle Niederschlagsstationen auf ihre Funktionsfähigkeit mittels Ferndiagnose geprüft.

In Bayern wurden von den ca. 300 Stationen 107 Stationen von der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung finanziert und betreut. In einem Rahmenvertrag wurden die Modalitäten für den Austausch der Daten und weiterer DWD-Produkte festgeschrieben. So werden die Daten aller Stationen in Bayern vom DWD zeitnah an eine im LfU redundant aufgebaute Messnetzcentrale, die auch abruffähig ist, gesandt. Zusätzlich können die Daten über die SODA-Rechner zugeordneter Wasserwirtschaftsämter abgerufen werden. (Frei, 2002).

Zusätzlich zum Messnetz 2000 werden für Bayern das synoptische Messnetz des Deutschen Wetterdienstes, die Stationen der Firma Meteomedia, das Messnetz der Agrarmeteorologie in Bayern und das des Lawinenwarndienstes genutzt. Für die Flussgebiete, die Flächenanteile in den Nachbarländern enthalten, werden meteorologische Daten aus Österreich (ZAMG und Hydrographischer Dienst) und der Landesbehörden in Baden-Württemberg und Hessen genutzt. So stehen zurzeit ca. 700 Stationen mit Niederschlagsdaten für die Vorhersagemodelle zur Verfügung (Hangen-Brodersen et al., 2008). Dieses Netz scheint für die Hochwasservorhersage ausreichend dicht zu sein.

Weniger dicht sind die Messnetze für weitere meteorologische Daten, die bei der Schneeschmelzberechnung bzw. in Wasserhaushaltsmodellen benötigt werden. In den N-A-Modellen zur Hochwasservorhersage werden für die Schneeschmelzberechnung

die Parameter Schneehöhe, Wassergehalt der Schneedecke, Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit benötigt. Von der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung wurde das Schneemessnetz in den letzten Jahren intensiv ausgebaut. Zurzeit werden Schneehöhe und Wasseräquivalent an 120 Stationen in einem täglichen und teilweise auch in einem dreitäglichen Intervall gemessen. Zusätzlich werden 18 automatische Schneemessstationen betrieben, 15 davon vom Lawinenwarndienst. Die anderen meteorologischen Parameter werden aus den Messnetzen des DWD, der Agrarmeteorologie und der Meteomedia AG gewonnen.

Neben der direkten Niederschlagsmessung an Niederschlagsstationen werden die Daten des Wetterraders zur Bestimmung von Gebietsniederschlägen genutzt. Im Projekt RADOLAN wird die Wetterradererfassung mit der Bodenmessung kombiniert und damit stehen flächenhaft auf Basis eines ca. 1x1 km Rasters Stundenwerte des Gebietsniederschlags zur Verfügung. Die ersten operationell nutzbaren Produkte des DWD sind seit 2005 verfügbar (DWD, 2008). Seit 2008 können die RADOLAN-Gebietsniederschläge direkt in den Vorhersagemodellen in Bayern genutzt werden.

### **2.3 Vorhersage meteorologischer Parameter**

Selbst mit Niederschlag-Abfluss-Modellen sind in der Regel die Vorhersagezeiten für eine Hochwasserwarnung und Speichersteuerung noch zu kurz bzw. zu ungenau. Die einzige Möglichkeit einer weiteren Verlängerung der Hochwasservorhersagezeiten und ihrer Genauigkeit bietet die Vorhersage meteorologischer Parameter und in erster Linie die Niederschlagsvorhersage. In Bayern werden die Vorhersagen verschiedener Wettervorhersagemodelle genutzt, die in Tabelle 1 zusammengefasst sind (Hangen-Brodersen et al., 2008).

In der Regel werden in den Hochwasservorhersagemodellen die Ergebnisse der Modelle des Deutschen Wetterdienstes verwendet und in erster Linie eine Kombination von COSMO-DE und COSMO-EU, da meist eine 72-stündige Abflussvorhersage erstellt wird. Die anderen Wettermodelle werden in Zweifelsfällen genutzt, um die mögliche Varianz der Abflussvorhersagen besser abschätzen zu können.

Vom DWD werden zusätzlich mit dem Modell SNOW-3 (Tabelle 1) Schneeschmelzvorhersagen bereitgestellt. Das Niederschlagsdargebot aus Schneeschmelze und flüssigem Niederschlag wird für 48 Stunden der Vergangenheit simuliert und für bis zu 72 Stunden mit einer räumlichen Auflösung von ca. 1x1 km vorhergesagt (DWD, 2008). Dieses Modell wird in den Monaten November bis Mai betrieben. In den Abflussvorhersagemodellen werden die Schneeschmelzsimulationen (anstelle der gemessenen Niederschläge in Zeiten mit Schneeeinfluss) und die Schneeschmelzvorhersagen genutzt. Schneeschmelzberechnungen werden in den N-A-Modellen nur zur Plausibilisierung oder bei Ereignissen bei denen wiederholt in kurzer Zeit - meist örtlich beschränkt – ein Wechsel zwischen Schneefall, Schneeschmelze mit Regen und Frost auftritt. Dieser Wechsel kann in der Regel durch Messungen belegt werden, wird aber im Allgemeinen nicht durch die Vorhersage der Schneeschmelze realisiert.

Die Ensemblevorhersagen (COSMO-LEPS, s. Tabelle 1) stellen zu einem Vorhersagezeitpunkt 16 verschiedenen Realisationen bereit, die die Varianz der Niederschlagsvorhersagen (eines Modells) aufzeichnen. Diese Realisationen können in Hochwasservorhersagen genutzt werden um den Unsicherheitsbereich der Vorhersagen besser abschätzen zu können. Erste Ergebnisse dieser Analyse sind (Laurent et al., 2008) zu entnehmen.

Zusätzlich werden vom DWD per FAX bzw. Mail verbale Wettervorhersagen, Wetter- und Unwetterwarnungen und vom Meteorologen interpretierte vorhergesagte Gebietsniederschläge bereitgestellt. In kritischen Lagen werden täglich und sonst sporadisch telefonische Einschätzungen der Lage vom „Meteorologen vom Dienst“ im Wetteramt München eingeholt.

**Tab. 1:** In der Hochwasservorhersage verwendete numerische Wettermodelle

Modell	Modellbetreiber	Rasterlänge [km]	Zeitintervall* [h]	Vorhersagezeitpunkt [UTC]	Vorhersagezeit [h]	Verfügbarkeit nach Vorhersagezeitpunkt [h]
GME (Global Model Europe)	Deutscher Wetterdienst	40	3	00 12	174 174	5 5
COSMO-EU	Deutscher Wetterdienst	7	1	00 06 12 18	78 48 78 48	5 3 5 3
COSMO-DE	Deutscher Wetterdienst	2.8	1	00 03 06 ....	21 21 21	1-2 1-2 1-2
COSMO-LEPS	Deutscher Wetterdienst	10	3	12	132	5:30 UTC am Folgetag
SNOW 3	Deutscher Wetterdienst	1	1	00 06 12 18	42 72 66 72	1-2 1-2 1-2 1-2
GFS (Global Forecast System)	NOAA (USA)	Ca. 50	3	00 06 12 18	180 180 180 180	6 6 6 6
ALADIN (Südbayern)	ZAMG (Österreich)	9.6	1	00 12	48 48	4-5 4-5
MOSS (Station Model Output Statistics)	Meteomedia AG	stationsbezogen	3	00	96	5-6

\* in Bayern verwendete Diskretisierungsintervalle

### **3. „Melden“: Messwertübertragung, Datenhaltung, Plausibilisierung und Verwaltung des Systems**

#### **3.1 Datenabruf und Datenhaltung**

Die Daten der Pegelmessstellen werden durch Datenabrufrechner abgerufen und zwischengespeichert. Für diese Aufgabe wird das Abrufsystem SODA der Firma KISTERS AG genutzt (<http://www.kisters.de>). In Bayern sind ca. 30 SODA-Rechner (Industrie PCs mit LINUX-Betriebssystem) im Einsatz. Die Rechner sind dezentral bei den 17 Wasserwirtschaftsämtern und den 4 Standorten der Hochwasservorhersagezentralen aufgestellt und im Rechnerverbund der Bayerischen Staatsverwaltung vernetzt. Die Abrufverwaltung erfolgt meist webbasiert. Bei Ausfall eines oder mehrerer SODA-Rechner können die Aufträge schnell über andere SODA-Rechner aufgesetzt werden. Somit ist eine sehr hohe Redundanz bei den Datenabrufrechnern vorhanden.

Die große Zahl an Abrufrechnern ist jedoch nicht aus Redundanzgründen vorhanden, sondern um in möglichst kurzer Zeit die Daten vieler Stationen auszulesen. Die Übertragung der Pegeldaten zu den SODA-Rechnern erfolgt wie die Datenerhebung bei den meisten im Hochwassernachrichtendienst genutzten Stationen ebenfalls auf zwei unabhängigen Wegen, um die Ausfallhäufigkeit zu reduzieren. Für die Übertragung wird alternativ zum Festnetz (Analog, ISDN, D-Kanal) auch GPRS bzw. GSM oder Funk eingesetzt.

Als redundanter Weg zur Datenverwaltung und Übertragung mit WISKI wurde im Hochwassernachrichtendienst eine unabhängige eigene Datenverwaltung geschaffen, die automatisch alle Sodarechner ausliest. Sobald von den Sodarechnern Daten von HND-Pegeln abgerufen oder empfangen werden, werden diese automatisch an einen zentralen Server im Hochwassernachrichtendienst weitergeleitet, in eine zentrale SQL-Datenbank importiert und auf 4 weitere Datenbanken in München, Hof, Kempten und Weilheim repliziert (Abbildung 5). Gleichzeitig werden andere Datenprotokolle eingelesen wie z.B. per Mail gesandte oder auf FTP-Servern bereitgestellte Daten der Nachbarländer und Wetterdienste. Die Daten stehen im Rechnerverbund der gesamten Wasserwirtschaftsverwaltung zur Verfügung.

#### **3.2 Datenkontrolle**

Eine webbasierte direkte Handeingabe und Handkorrektur auf html-Basis im Rechnerverbund ist ebenfalls möglich. Für die Korrektur der Pegeldaten sind die Wasserwirtschaftsämter zuständig. Ihnen werden zur schnelleren Kontrolle Berichte von Datenplausibilisierern im Intranet im Rahmen der web-basierten Verwaltung der Daten im Hochwassernachrichtendienst bereitgestellt. Die Trennschärfe der Plausibilisierer kann vom Nutzer eingestellt werden. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse des „Fehlerfinders“ (Prüfung auf Datenalter, Lücken und Sprünge). In diesem Plausibilisierer können neben der Darstellung der Ganglinien auch Handeingaben zur Korrektur ausgeführt werden, bzw. „künstliche“ Abflussmessungen gesetzt werden, um die Umrechnung zwischen Wasserstand und Abfluss zu beeinflussen.

Bitte Amt wählen:

Warnungen Pegeldaten Pegellisten & Fax **Fehlerfinder** Redundanztest SODA-Info Wartezeit Hilfe

Prüfung auf Datenalter, -lücken und -sprünge (Zeitraum 7 Tage)

Abfragekriterien:  
 1) Letzter Wert älter als  Stunden  
 2) Datenlücken  
 3) Datensprünge (>10fache Standardabweichung der letzten 7 Tage)

Fehler suchen  Nur Pegel mit DFÜ

Nr.	Pegel-Nr.	Pegelname / Gewässer	Fehlerart	Visualisierung
1.	10032009	Günzburg u. d. Günzmündung / Donau	Datenlücke(n)	[Bar chart icon] [Edit icon] [Data icon]
2.	10035801	Dillingen / Donau	Datenlücke(n)	[Bar chart icon] [Edit icon] [Data icon]
3.	11432002	Gunzesried / Gunzesrieder Ach	Datenlücke(n)	[Bar chart icon] [Edit icon] [Data icon]
4.	12001403	Forgensee Werksabfluss / Lech	Datenlücke(n)	[Bar chart icon] [Edit icon] [Data icon]
5.	12335001	Engen / Illach	Daten in Zukunft	[Bar chart icon] [Edit icon] [Data icon]
6.	12465007	Buchloe / Gennach	Datenlücke(n)	[Bar chart icon] [Edit icon] [Data icon]
7.	13400903	Binzwangen / Altmühl	Datenlücke(n)	[Bar chart icon] [Edit icon] [Data icon]
8.	13922002	Parsberg / Schwarze Laber	Datenlücke(n)	[Bar chart icon] [Edit icon] [Data icon]
9.	13926207	Deuerling / Schwarze Laber	Datenlücke(n)	[Bar chart icon] [Edit icon] [Data icon]
10.	14606008	Schmidmühlen / Vils	Datenlücke(n)	[Bar chart icon] [Edit icon] [Data icon]
11.	14644801	Obersdorf / Rosenbach	Datenlücke(n)	[Bar chart icon] [Edit icon] [Data icon]
12.	15207507	Marienthal / Regen	Datenlücke(n)	[Bar chart icon] [Edit icon] [Data icon]
13.	15213500	Viechtach Reibenmühle / Aitnach	Daten älter als 32 Stunden	[Bar chart icon] [Edit icon] [Data icon]
14.	15408000	Schönach / Große Laber	Daten älter als 36 Stunden	[Bar chart icon] [Edit icon] [Data icon]
15.	16395005	Bairawies / Zeller Bach	Datenlücke(n)	[Bar chart icon] [Edit icon] [Data icon]
16.	17245609	Bruckhäuser / Altkollbach	Datenlücke(n)	[Bar chart icon] [Edit icon] [Data icon]

Abbildung 2: Bericht „Fehlerfinder“ im Rahmen der Datenverwaltung im HND

Bitte Amt wählen:

Warnungen Pegeldaten Pegellisten & Fax Fehlerfinder **Redundanztest** SODA-Info Wartezeit Hilfe

Vergleich der redunten DFÜ-Geber (Zeitraum 7 Tage)

Kriterien:  
 1) Tageweise Datenlücken bei einem oder beiden Gebern  
 2) Abweichung größer als  cm bzw.  m³/s  
 3) Einzelne Datenlücke(n) bei einem oder beiden Gebern

Redundanz testen  Nur abweichende Pegel darstellen

Pegel-Nr.	Pegelname / Gewässer	DASA/Geber primär	DASA/Geber redundant	Fehlerart	* Grafik
10032009	Günzburg u. d. Günzm / Donau	<del>10032009</del> / 10 ISDN	F34106 / 1 ANALOG	Geber 1 ist ausgeschaltet.	Originalzeitreihen
10035801	Dillingen / Donau	10035801 / 10 ANALOG	<del>F22465</del> / 1 ANALOG	Geber 2 ist ausgeschaltet.	Originalzeitreihen
10043708	Neuburg / Donau	10043708 / 10 ISDN	F31590 / 1 ANALOG	Abw. > 5 cm (max. 9 cm)	Originalzeitreihen
10046105	Ingolstadt Luitpolds / Donau	10046105 / 11 ISDN	1010046105 / 11 ANALOG	Geber 2 funzt tageweise nicht.	Originalzeitreihen
10051105	Neustadt / Donau	10051105 / 10 D-KANAL	100511051 / 11 GPRS	Einzelne Lücke(n): Geber 2	Originalzeitreihen
10054500	Kelheimwinzer / Donau	10054500 / 10 ISDN	1005450 / -999 Von ftp.pegelonline.	Einzelne Lücke(n): Geber 1	Originalzeitreihen

Abb. 3: Bericht „Redundanztest“

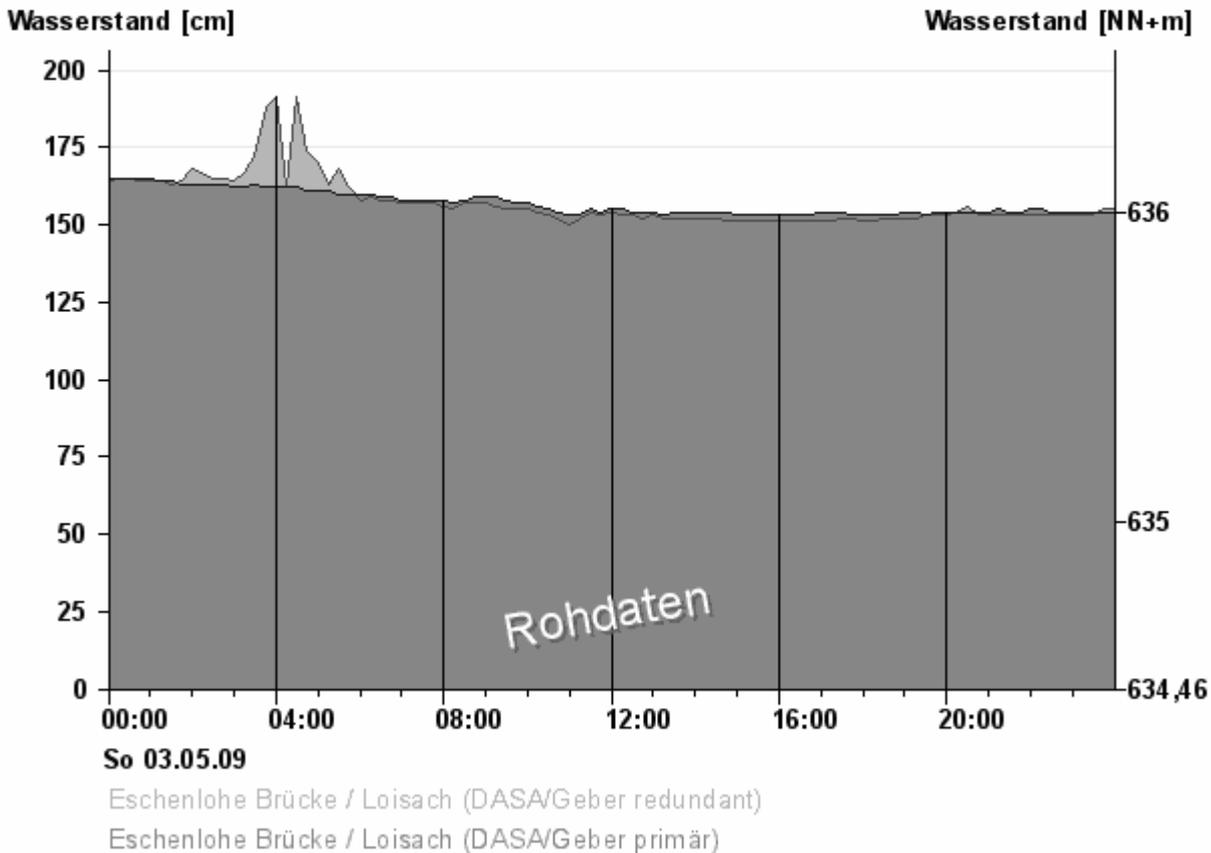
Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse des „Redundanztests“ (Ausgeschaltete Geber, maßgebende Geber im Hochwassernachrichtendienst, einzelne Datenlücken und Unterschiede zwischen Gebern). In Abbildung 4 wird beispielhaft eine kurzfristigen Abweichung zwischen zwei Gebern einer Messstelle wiedergegeben (Ursache unbekannt, richtiger Geber vermutlich „primärer Geber“).

## Pegel im Donaugebiet: Eschenlohe Brücke / Loisach

Beide Geber | Primärer Geber | Redundanter Geber | Handeingabe >> Hauptzeitreihe

Alle 7 Tage >> 29.04.2009 | 30.04.2009 | 01.05.2009 | 02.05.2009 | 03.05.2009 | 04.05.2009 | 05.05.2009

NEU: Zeitangaben dieser Grafik auch in MEZ.



Link: Internetdarstellung

**Abb. 4:** Darstellung der Unterschiede zwischen redundanten Gebern eines Pegels

Mit vergleichbaren Produkten können auch die Niederschlags- und sonstigen Messdaten plausibilisiert und korrigiert werden. Auf dieser passwort-geschützten Verwaltungsebene kann das Gesamtsystem des HND verwaltet, zusätzlich der Abruf von Stationen aufgesetzt und stationsbezogene und flächenorientierte Darstellungen der Messdaten und meteorologischen Daten abgerufen werden (Verweise und Reiter in Abbildung 2). Weiterhin dient diese Ebene zum Informationsaustausch zwischen den am Hochwasservorhersage- und Hochwassernachrichtendienst in Bayern Beteiligten, zur Erstellung und Verwaltung von Hochwasserwarnungen und -meldungen, zur Steuerung der Herausgabe der Hochwasservorhersagen im Intranet- und Internetangebot, sowie zur Steuerung des auf der Datenbank aufgesetzten Fax Pollings und der telefonischen Pegelansage.

### **3.3 Serverfarm im HND**

In Abbildung 5 sind zusammenfassend der Datenfluss und die Serverfarm im Hochwassernachrichtendienst Bayern dargestellt. Alle Funktionen sind auf mindestens zwei Servern redundant hinterlegt. Die Datenbank ist vierfach (auch örtlich getrennt) gespiegelt. Außerdem ist die Datenbank außerhalb der Firewall repliziert, um neben dem schnelleren aber starren statischen Angebot ein dynamisches Angebot und einen Datenexport im Internet realisieren zu können. Die Rechner HND1 bis HND4 sind außerhalb der Firewall installiert und für den Datenaustausch und die Internetbereitstellung zuständig.

Für die Intranetbereitstellung reicht ein Server, da sich die Aufrufhäufigkeit gegenüber dem öffentlichen Angebot in Grenzen hält. Zusätzlich können die im Intranet zusätzlich angebotenen Informationen passwortgeschützt auch über das Internet abgerufen werden, so dass auch hier eine Redundanz vorhanden ist.

Neben den Funktionen Datenimport, Abruf externer Daten und automatische Überwachung der HND-Server (TUX2) und Erstellung des statischen Internetangebotes (TUX1) dienen diese Server der internen Modell- und Parameterverwaltung und als Datenbanksystem für die Hochwasservorhersagen. Der Server TUX3 dient als Test- und Schulungsserver.

Ausschließlich auf dem Datenbank-Master (HND-Int2) erfolgt ein schreibender Zugriff. Die Masterfunktion kann jedoch bei Ausfall schnell auf einen anderen Server übergeben werden, so dass dadurch bedingte Ausfallzeiten stark reduziert sind.

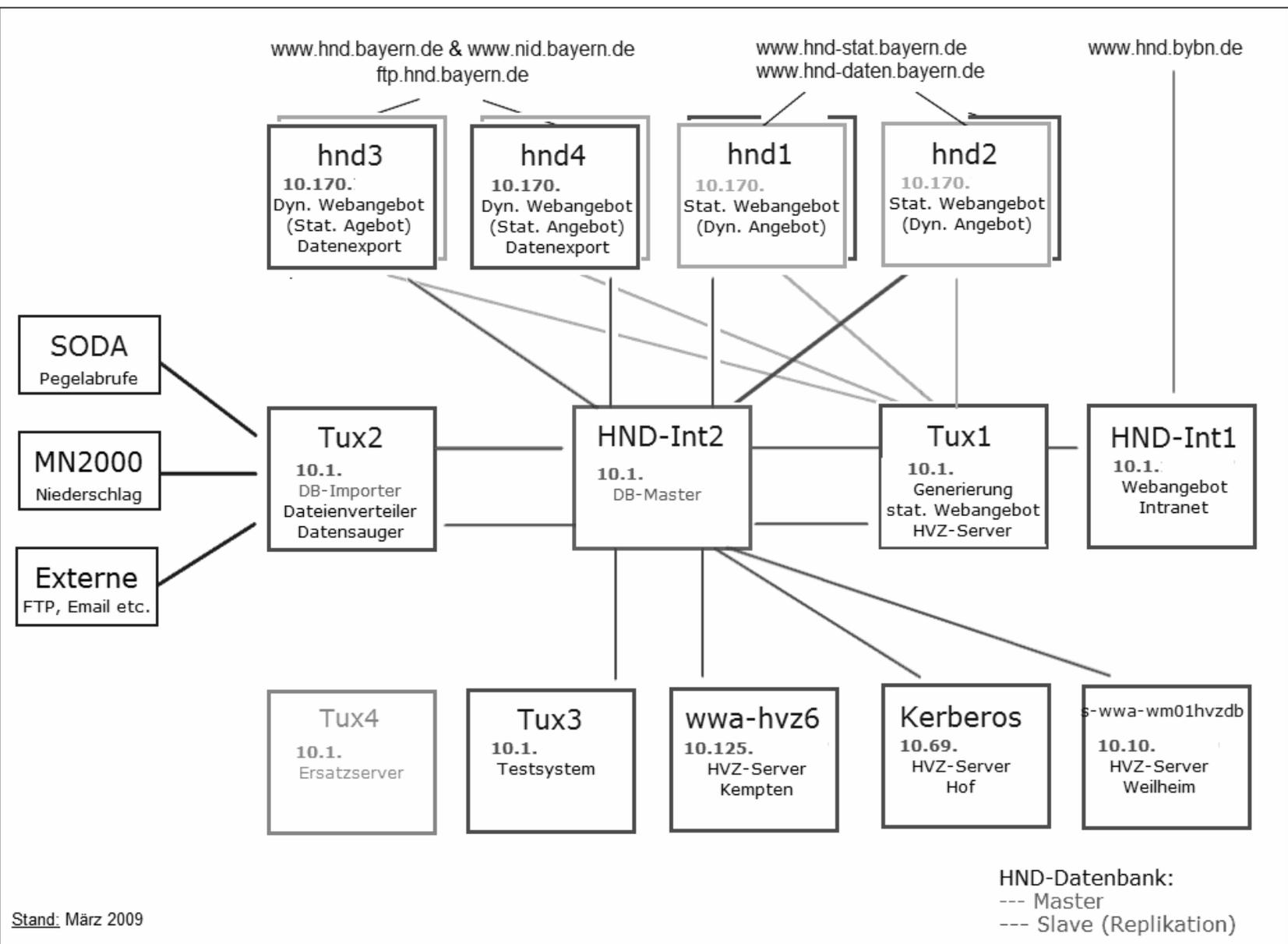


Abb. 5: Serverfarm und Datenfluss im Hochwassernachrichtendienst

#### **4. „Vorhersagen“: Vorhersagemodelle und DV-Umgebung**

In Abbildung 1 ist bereits ein grober Überblick über mögliche Verfahren zur Hochwasservorhersage wiedergegeben. Grob unterscheiden kann man zwischen den statistischen und übrigen Verfahren. Bei den statistischen Verfahren werden Zeitreihendaten direkt in Beziehung gesetzt. Bei den anderen Verfahren werden Prozesse beschrieben. Diese Beschreibungen reichen von einfachen deterministischen bis zu komplexen physikalisch basierten Verfahren. Je höher der Grad der Physikalität der Verfahren ist, umso geringer wird der Einfluss der aus der Eichung an historischen Ereignissen zu ermittelnden Parameter. Zu komplexe Modelle oder Modellbausteine sind aber bei der operationellen Hochwasservorhersage besonders im Versagensfall nicht mehr überschaubar und handhabbar. Als Zwischenlösung werden deswegen für den operationellen Dienst in der Regel Konzeptmodelle (Grey-Box-Modelle) gewählt.

##### **4.1 In Bayern genutzte Hochwasservorhersagemodelle**

In den 80er Jahren wurden in Bayern die ersten DFÜ Messnetze zur Niederschlags- und Wasserstandserfassung in Einzugsgebieten mit gesteuerten Hochwasserspeichern eingerichtet und Hochwasservorhersagemodelle für das Einzugsgebiet der Isar bis München und das Lecheinzugsgebiet entwickelt. Als Vorhersagemodell wurde FGMOD, das Vorgängermodell des jetzt eingesetzten Vorhersagemodells LARSIM eingesetzt. Ende der 80er Jahre wurde ein an verschiedene Speichersystemen adaptierbares, operationell einsetzbares Optimierungsmodell zur Speichersteuerung entwickelt und für die Steuerung des Sylvensteinspeichers in Abhängigkeit von den Abflüssen in Bad Tölz und München eingesetzt. Dieses Steuerungsmodell ist inzwischen im Programmsystem LARSIM integriert. Die ersten Modellbausteine von FGMOD wurden Mitte der 70er Jahre programmiert. Seitdem wird das Modell (FGMOD bzw. heute LARSIM) in erster Linie durch das Ing.-Büro Dr. Ludwig, Karlsruhe, die Hochwasserzentrale des LUBW, Karlsruhe und den HND des bayerischen LfU und von diesen beauftragten Stellen weiterentwickelt.

Operationell wurde in Bayern FGMOD als Hochwasservorhersagemodell für die Speichersteuerung der Isar eingesetzt. Im Hochwassernachrichtendienst wurden dagegen bis zum Jahr 2000 nur empirische und empirisch-synoptische Verfahren genutzt. Am gebräuchlichsten waren Pegelbezugslinienverfahren.

Inzwischen sind für das Bayerische Donaugebiet flächendeckend und für das bayerische Maingebiet weitgehend flächendeckend Vorhersagemodelle auf der Basis des Programms LARSIM im Einsatz (Daamen, 2004). Für das Donaugebiet sind die Modellgebiete in Tabelle 2 zusammengefasst.

**Tab. 2:** Für die Vorhersage im bayrischen Donauegebiet genutzte N-A-Modelle.

<b>Beschreibung</b>	<b>Flussgebiet</b>	<b>Teilgebiete (tgb), Raster (rst)</b>	<b>Eingangspegel mit Vorhersage</b>	<b>Übergabepiegel zum nächsten Modell</b>
(1) Donau bis Lech	Iller und Donau zw. Iller und Lech	11268 rst	Ulm (Baden-Württemberg)	Donauwörth/ Donau
(2) Lech	Lech	177 tgb		Augsburg/ Lech
(3) Altmühl	Altmühl	2638 rst		Beilngries/ Altmühl
(4) Naab	Naab	6362 rst		Heitzenhofen/ Naab
(5) Regen	Regen	3091 rst		Marienthal/ Regen
(6) Donau mit Paar	Donau zwischen Lech und Pegel Schwabelweis (ohne Altmuehl, Naab, Regen)	7228 rst	Donauwörth/ Donau Beilngries/Altmühl Heitzenhofen/Naab Marienthal/ Regen	Regensburg Schwabelweis/ Donau
(7) Isar	Isar	1055 tgb		Plattling/ Isar
(8) Chiemsee	Einzugsgebiet bis Chiemseeauslass	7195 tgb		Seebruck/ Alz
(9) Traun	Alz unterhalb Chiemsee	77 tgb	Seebruck/ Alz	Burgkirchen/ Alz Guffham/ Alzkanal
(10) Mangfall	Mangfall	97 tgb		Rosenheim/ Mangfall
(11) Rott	Rott	62 tgb		Ruhstorf/ Rott
(12) Inn	Inn unterhalb Oberaudorf (ohne Mangfall, Alz, Salzach, Rott)	2682 tgb	Oberaudorf/ Inn Rosenheim/Mangfall Burgkirchen/ Alz Guffham/ Alzkanal Burghausen/ Salzach Ruhstorf/ Rott	Passau Ingling/ Inn
(13) Donau unterhalb Regensburg	Donau unterhalb Regensburg Schwabelweis (ohne Isar und Inn)	7931 rst	Regensburg Schwabelweis/ Donau Plattling/ Isar Passau Ingling/ Inn	Passau Ilzstadt/ Donau
(14) Inn Tirol	Inn zwischen Katjansbrücke und Oberaudorf	241 tgb	Autoregressionsmodell für Pegel Kajetansbrücke	Oberaudorf/Inn
(15) Salzach	Salzach bis Mündung	160 tgb		Burghausen/ Salzach

In Bayern wird das N-A-Modell LARSIM (Bremicker, 2000; Homagk, Ludwig, 1998) im Simulationsmodus genutzt. Zurzeit werden die ersten Vorhersagemodelle im Wasserhaushaltsmodus entwickelt und für den operationellen Betrieb vorbereitet.

Die in jedem Teilgebiet oder Raster ablaufenden Prozesse werden durch eine Reihe hydrologischer Verfahren beschrieben. Es wird unterschieden zwischen Teilgebieten und Gewässerteilstrecken. In LARSIM wird für kleinere Gebietseinheiten (Raster oder natürliche Einzugsgebiete) zunächst die Gebietsniederschlagsbelastung aus Messdaten und Vorhersagen des Niederschlags und der Schneeschmelze bestimmt. Die Abflussbildung wird im Simulationsmodus über zeitkonstante bzw. zeitvariable prozentuale Anteile am Gesamtniederschlag ermittelt. Im Wasserhaushaltsmodus werden dagegen die verschiedenen Abflussbildungskomponenten detaillierter und physikalisch basierter betrachtet. Die Abflussverformung wird für unterschiedliche, über Ratenbeziehungen in Abhängigkeit vom Effektivniederschlag eingeteilte Abflussbereiche mit Speichermodellen berechnet. Dies erfolgt bei den Vorhersagemodellen sowohl im Simulationsmodus, als auch im Wasserhaushaltsmodus, aber in letzterem in mehreren Speicherbereichen. Bei der Simulation im Wasserhaushaltsmodus werden im Allgemeinen komplexere Abflussverformungsalgorithmen genutzt.

In den Gewässerteilstrecken, die die Teilgebiete verknüpfen, erfolgt die Berechnung des Abflusses mit deterministischen Wellenablaufmodellen, deren Parameter Funktionen der Gewässergeometrie sind. In den meisten Fällen werden zur Profilbeschreibung vereinfachte Profile (Doppel- und Tripeltrapezprofile) verwendet. In kleinen Gewässern werden häufig Profilschätzer zur Profilbestimmung eingesetzt. Dies ist möglich, da für kleine Einzugsgebiete keine Vorhersagen herausgegeben werden. Im Williamsverfahren können nicht nur vereinfachte Querprofile sondern auch aus hydraulischen Modellen abgeleitete Abfluss-Speicher-Funktionen genutzt werden. Zusätzlich können in den Gewässerteilstrecken abflussbeeinflussende Bauwerke, wie Speicher, Seen, Abflussaufteilungen ect. modellhaft eingegliedert werden.

Neben diesen den Abflussprozess beschreibenden Modellteilen wird die Möglichkeit geboten, nach Beginn des Hochwasserereignisses wesentliche Parameter des Modells an das aktuelle Ereignis durch Optimierung anzupassen. Zusätzlich oder alternativ zur Parameteroptimierung können statistische Verfahren zur Korrektur der Vorhersagen an Pegeln eingesetzt werden. Bei der Hochwasservorhersage mit LARSIM wird vom implementierten ARIMA-Modell in der Regel nur das Fehlerglied (I(1)-Modell) zur Fehlerkorrektur genutzt.

In den Hauptvorflutern werden zusätzlich zu den N-A-Modellen hydrodynamische Modelle eingesetzt, mit denen Kraftwerkseinflüsse und Staueffekte auf die Abflussverformung berücksichtigt werden können. Zuflussganglinien für diese Modelle werden mit den N-A-Modellen erzeugt auf einem internen Austauschverzeichnis gespeichert, und an die hydrodynamischen Modelle übergeben.

Für den schiffbaren Main wird das Modell WAVOS, das von der BFG entwickelt und betrieben wird, eingesetzt (Wilke, Rademacher, 2002). An der schiffbaren Donau, am Lech unterhalb des Forggensees und am Inn ab Kufstein wird mit dem hydrodynamischen Modell FLORIS-2000 der Fa. SCIETEC gearbeitet (Reichel, 2002 und Pellegrini et al., 2006). Auf der Basis von FLORIS wurde für den Lech ein Optimierungsmodul entwickelt, mit dem auf Grund von Zielvorgaben Parameter für die Betriebsführung an den Staustufen im operationellen Betrieb vorgeschlagen werden. Diese Modellkomponente wird aber bisher nicht operationell eingesetzt.

#### 4.2 Erstellung der Hochwasservorhersagen

Die Vorhersageerstellung erfolgt flussgebietsbezogen durch 5 regional zuständige Hochwasservorhersagezentralen (HVZ), die Wasserwirtschaftsämtern bzw. dem Landesamt für Umwelt (LfU) zugeordnet sind.

**Tab. 3:** Hochwasservorhersagezentralen in Bayern

<b>Flussgebiet</b>	<b>Zentrale</b>	<b>Sitz</b>
Main bis Mündung in den Rhein ohne Tauber, Nidda und Kinzig	HVZ Main	LfU (Dienststelle Hof)
Iller, Lech und Donau zwischen Iller und Lech	HVZ Iller-Lech	WWA Kempten
Isar bis Mündung	HVZ Isar	WWA Weilheim
Donau unterhalb Lech bis Landesgrenze	HVZ Donau	LfU (Dienstort München)
Inn ab Landesgrenze bis Mündung	HVZ Inn	LfU (Dienstort München)

Die Berechnung der Vorhersagen erfolgt in einem bedienten Betrieb. Zunächst werden die Zubringermodelle berechnet bzw. externe Vorhersagen z.B. von Baden-Württemberg für die obere Donau und die Tauber, von Tirol für den Inn bei Kufstein und von Salzburg für die Salzach übernommen. Liegen die externen Vorhersagen nicht zeitgerecht vor, wird die Vorhersage geschätzt bzw. über Hilfsmodelle näherungsweise berechnet (Modelle 14 und 15 in Tabelle 2).

Außerhalb von Hochwasserzeiten werden an Arbeitstagen einmal täglich Vorhersagen erstellt, um den gesamten Vorhersagebetrieb einschließlich der Datengrundlage und der Informationsbereitstellung zu überprüfen und die Vorhersagenden zu trainieren. Die Vorhersageerstellung für alle Modelle kann von jeder HVZ aus durchgeführt werden. Für Main, Donau und Inn werden die täglichen Vorhersagen im Rotationsprinzip abwechselnd durch die Mitarbeiter im HND am LfU und die HVZ-Mitarbeiter (Main, Donau und Inn) durchgeführt. Die Mitarbeiter der HVZ Isar und Iller-Lech ermitteln täglich Vorhersagen für ihre Gebiete, da sie – im Gegensatz zu

den anderen HVZ – direkt in die Speichersteuerung eingebunden sind. Im Hochwasserfall werden die Vorhersagen verdichtet und in etwa dreistündigem Rhythmus – bei extremen Hochwassern auch nachts und am Wochenende – ermittelt.

Für die Vorhersageerstellung wurde mit Hilfe von Javascripten eine einheitliche Modelloberfläche geschaffen, über die alle Vorhersagemodelle gesteuert werden können. Diese Eigenentwicklung mit dem Namen HUGO (Hochwasservorhersage unterstützende grafische Oberfläche) ist in Abbildung 6 wiedergegeben.

Über die Oberfläche von Hugo werden die zu bearbeitenden Modellgebiete ausgewählt, alternative Datenquellen zugeordnet, die benötigten Messdaten geladen und deren Aktualität überprüft, die zu verwendende Niederschlagsvorhersage ausgewählt und häufig wechselnde Vorhersageparameter und Vorhersageoptionen gesetzt. Die eingelesenen Zeitreihen können visualisiert und korrigiert werden. Zusätzlich sind über die Oberfläche Verzweigungen und Vorgaben für die Speichersteuerung vorgebar. Alle Arbeitsschritte werden protokolliert. Im Expertenmodus (Abbildung 6) können alle Steuerungs- und Eingabedateien des Vorhersagemodells visualisiert und editiert werden.

Nach der Initialisierung wird das Vorhersagemodell gestartet. Bei den Modellen WAVOS und FLORIS sind die Variationen der Modelleingabe beschränkt, deswegen werden sie in HUGO ohne Initialisierung gestartet. Treten bei der Bearbeitung Fehler auf, werden diese angezeigt und nach Korrektur können die Modelle erneut gestartet werden. Ist eine Vorhersage erfolgreich berechnet worden, werden die Ergebnisse grafisch angezeigt. Dargestellt werden die gemessenen und berechneten Abfluss- bzw. Wasserstandsganglinien, sowie die entsprechenden Vorhersagen. Außerdem können zur weiteren Information die Gebietsniederschlagsganglinien, die Effektivniederschlagsganglinien, die Gesamtabflussbeiwerte getrennt nach Mess- und Vorhersagezeitraum sowie Meldestufen und Vertrauensbereiche der Vorhersagen dargestellt werden.

Über die Seite mit der grafischen Ergebnisdarstellung können Vorhersagen manuell modifiziert und kommentiert werden, kann zusätzlich der Unsicherheitstyp für die Darstellung (näheres zur Unsicherheitsdarstellung s. Vogelbacher, 2006 und Laurent et al., 2008) gewählt werden, und die Speicherung im Archiv und in der aktuellen Datenbank sowie auf dem Austauschordner veranlasst werden.

Da inzwischen eine dreistündige Aktualisierung der Vorhersagen im Hochwasserfall nicht mehr als ausreichend erachtet wird, eine manuelle Vorhersage im Stundenrhythmus aber nicht möglich ist, wurde HUGO so modifiziert, dass er auch automatisch lauffähig ist (HUGOmat). Der HUGOmat führt automatisch alle Schritte aus, die in der Regel im Handbetrieb durchgeführt werden. Grundlage für den Hugomaten sind die Modelleinstellungen des letzten Handbetriebes. Zusätzlich sind neben den Datenplausibilisierern auch Korrekturalgorithmen für neue Messdaten integriert. Bisherige Test belegen die Robustheit des Hugomaten, so dass er bereits für den Inn und den Unterlauf der Donau automatisch Vorhersagen erstellt und für 5 Pegel

veröffentlicht, bzw. für die Nutzung in der österreichischen Donauvorhersage bereitstellt.

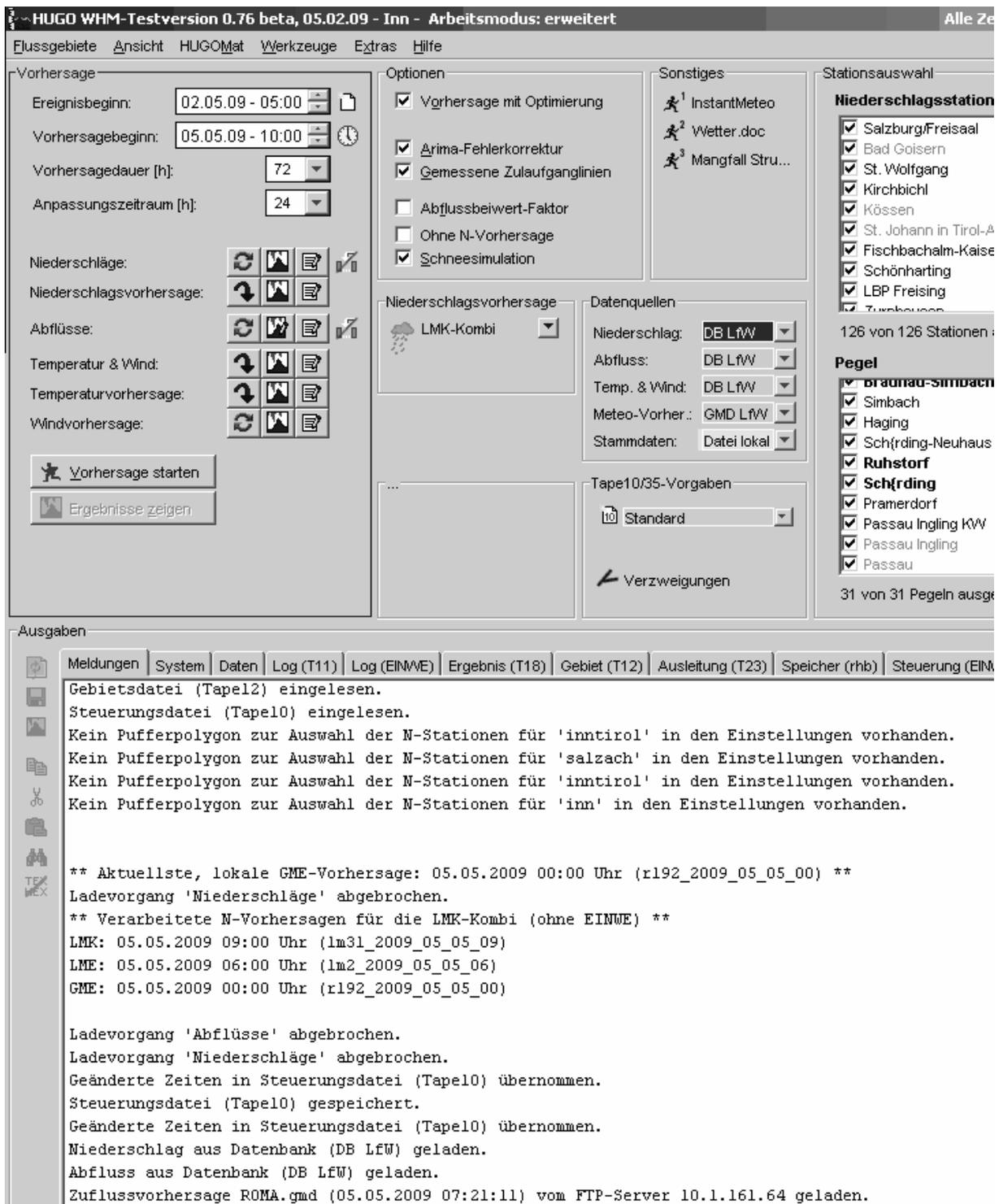


Abb. 6: HUGO, gemeinsame Oberfläche der Vorhersagemodelle

## 5. „Warnen und Informieren“

Hochwasservorhersagen werden in Bayern auf drei Ebenen verbreitet.

Die erste Ebene ist die der Wasserwirtschaftsverwaltung. Über das Programm Flipper (grafische Darstellung aktueller und historischer Vorhersagen; Eigenentwicklung) können alle Wasserwirtschaftsbehörden auf alle im Archiv gespeicherten Vorhersagen an allen Pegeln zugreifen und diese visualisieren. Die Vorhersagen sind kommentiert, müssen aber von den Wasserwirtschaftsämtern – bei Bedarf mit Rücksprache mit der vorhersagenden HVZ – interpretiert werden.

Eine sowohl von der Anzahl der Pegel als auch von der Länge des Vorhersagezeitraums eingeschränkte Information wird im Intranet auf Behördenebene bereitgestellt. Die Behördenebene umfasst auch die Kommunen und stellt somit die Verknüpfung zu den Betroffenen und der Hochwassergefahrenabwehr dar. Für diese Personengruppe muss die Information weitreichend sein, sollte aber möglichst wenig Interpretationsbedarf beinhalten. Auf dieser Ebene werden zurzeit Vorhersagen an 93 Pegelstandorten bereitgestellt

Die dritte Ebene ist die breite Öffentlichkeit, die über das Internet bedient wird. In diesem Medium sollten nur relativ sichere Vorhersagen an repräsentativen Pegeln veröffentlicht werden, aus denen sich die Gesamtlage und deren Entwicklung ableiten lässt. Zurzeit werden auf dieser Ebene 66 Pegel mit Vorhersagen veröffentlicht.

Für die Veröffentlichung im Intranet/Internet werden die Vorhersagen in einer abschließenden Qualitätskontrolle händisch bereitgestellt (Ausnahme: Hugomat). Abbildung 7 zeigt einen Teil der Freigabemaske mit Vorhersageinformationen, der Visualisierungsmöglichkeit der Vorhersagen sowie der Freigabe im Intranet und/oder Internet. Zusätzliche Vorhersagepegel oder die Änderung der Vorhersagezeiten kann über den Reiter Einstellungen erfolgen.

### Verwaltung der Vorhersage-Publikation

Bitte HVZ wählen:

Wartende Vorhersagen | Einstellungen

Pegelnr. ▲▼	Pegelname ▲▼	Gewässer ▲▼	Publikation	Vhs-Zeitraum ▲▼	Berechnet ▲▼	Vhs-Beginn ▲▼	
18003004	Wasserburg	Inn	BY <sub>BN</sub> - -	6 h	05.05.09 14:14	05.05.09 15:00	  
18007209	Schärding	Inn	BY <sub>BN</sub> - -	6 h	05.05.09 14:14	05.05.09 15:00	  
18384509	Engfurt	Isen	BY <sub>BN</sub> - -	12 h	05.05.09 14:14	05.05.09 15:00	  

Anzahl Vorhersagepegel: 3 Alle Vorhersagen publizieren 

**Abb. 7:** Verwaltung der Vorhersage-Publikation im Intranet/Internet

Neben der Verbreitung der Wasserstands- und Abflussvorhersagen an den Pegeln werden diese genutzt, um verbale Vorwarnungen und Warnungen web-basiert zu erstellen. Diese müssen im Rahmen der Hochwassermeldepläne von den Wasserwirtschaftsämtern erstellt und quittiert an Landratsämter und von diesen nach einer Verästelungsstruktur weiter an Kommunen und Betroffene gemeldet werden. Zusätzlich werden diese Warnungen im Intranet/Internet veröffentlicht. Abbildung 8 zeigt die Erstellung einer derartigen Warnung, bei der durch Vorgaben und Auswahlmöglichkeiten (mit Zugriff auf das Warnarchiv) die Erstellung selbst stark vereinfacht wird.

Hochwasserlageberichte werden vom HND im LfU in der gleicher Art erstellt, im Intranet und Internet bereitgestellt und automatisiert per Fax und E-Mail an Presseagenturen, Medien, Bezirksregierungen und Staatsministerien versandt.

Bitte Amt wählen:

---

**Warnungen** | Pegeldata | Pegellisten & Fax | Fehlerfinder | Redundanztest | SODA-Info | Wartezeit | Hilfe

Warnungen eingeben, ausdrucken und publizieren.

---

**Warnstufe:**

Vorwarnung

Warnung "...Ausuferungen..."

Warnung "...bebaute Gebiete..."

Entwarnung

**Landkreise bzw. Städte:**

Memmingen, Unterallgäu

Lindau (Bodensee)

Kempten, Oberallgäu

Kaufbeuren, Ostallgäu

**Pegeltabelle:**

**Zusätzlich in Druckvorschau:**

HND-Telefon  Faxnummer

**Vorlage laden:**

momentan aktiv  Amtsarchiv

- Wam-0, 17.05.08 10:30, WWA KE
- Wam-0, 17.05.08 21:00, WWA KE
- Wam-0, 18.05.08 09:30, WWA KE
- Wam-0, 12.07.08 09:55, WWA KE
- Wam-1, 12.07.08 09:55, WWA KE
- Wam-0, 12.07.08 09:55, WWA KE
- Wam-0, 13.07.08 09:11, WWA KE
- Wam-0, 14.08.08 13:30, WWA KE
- Wam-1, 14.08.08 15:45, WWA KE
- Wam-1, 15.08.08 10:28, WWA KE

**Hochwasserwarnung vor Ausuferungen und Überschwemmungen**

für Stadt Memmingen, Lkr. Unterallgäu, Lkr. Lindau (Bodensee), Stadt Kempten, Lkr. Oberallgäu, Stadt Kaufbeuren, Lkr. Ostallgäu

ausgegeben am  Uhr vom Wasserwirtschaftsamt Kempten

gültig vom  Uhr bis  Uhr (Format: TT.MM.JJJJ hh.mm)

Infolge der vorhergesagten intensiven Niederschlägen für den Zeitraum vom 15.08.2008, 07:00 Uhr bis 16.08.2008, 07:00 Uhr kann es vor allem an den kleineren Fließgewässern zu Überschwemmungen kommen.

An der Mindel und der Günz kann voraussichtlich die Meldestufe 2 erreicht werden.

An den Pegeln der Iller kann die Meldestufe 1 überschritten werden. Dies gilt insbesondere für den Unterlauf (Wiblingen).

---

**Hier leben die Buttons**

Version: 0.05

**Abb. 8:** Web-basierte Erstellung von Hochwasserwarnungen

## 6. Zukünftige Aufgaben in der Hochwasservorhersage

Hochwasservorhersagemodelle gehören inzwischen zum Stand der Technik. Teilbereiche bedürfen jedoch noch einer weitergehenden Forschung bzw. Klärung:

Bei den meteorologischen und den hydrologischen Vorhersageverfahren ist eine Verbesserung der Angaben über den Vertrauensbereich der Vorhersagen notwendig, da weiterhin mit großen Ungenauigkeiten in der Niederschlags- und abgeschwächt in der Abflussvorhersage gerechnet werden muss.

Wegen der Instationarität der Abflussprozesse sind auch bei extremen Abflüssen Grenzwerte und Prozesse zu erwarten, die außerhalb des durch historische Daten erfassten Erfahrungsbereiches liegen. Um auch Extremereignisse modellieren bzw. vorhersagen zu können, müssen diese Abflussbereiche genauer untersucht und entsprechende Modellansätze aufgestellt werden.

Es müssen robuste hydrologische Teilmodelle entwickelt werden, um komplexe hydraulische Fragestellungen, wie massive Versickerungen im Schotterkörper der Vorländer oder die Wechselwirkung zwischen Hauptbett und Vorländern bei stark mäandrierenden Gewässern zu beschreiben.

Optimierungsverfahren zur Steuerung und Regelung von Speicher- und Kraftwerksketten als Grundlage für ein überregionales Hochwassermanagement sind zu entwickeln.

Neben den modelltechnischen Weiterentwicklungen sind die Automatisierung der Datenerhebung, Datenkontrolle und Datenkorrektur und eine robuste (Teil-) Automatisierung der Vorhersageerstellung und –verbreitung voranzutreiben.

Besonders wichtig ist die Verbesserung der Kommunikation zwischen allen Beteiligten im Bereich der Hochwasservorhersage, der Hochwasservorsorge und der Katastrophenabwehr. Unzulänglichkeiten in diesem Bereich führen zu gravierenden Fehleinschätzungen und daraus resultierenden Fehlentscheidungen.

## 7. Literatur:

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz: Hochwasserschutz – Aktionsprogramm 2020.

<http://www.stmugv.bayern.de/de/wasser/speicher/strategie.htm>

Bremiker, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11,

Daamen, K., Holle, F.-K., Vogelbacher, A. (2004): Hochwasservorhersage in Bayern. Wasserstands- und Abflussvorhersagen in grenzüberschreitenden Flussgebieten, BfG, Koblenz 6/2204

DWD (2008): Deutscher Wetterdienst, Linkadresse [www.dwd.de](http://www.dwd.de) im Bereich spezielle Nutzer, Wasserwirtschaft, Radarniederschlag, RADOLAN, RADOLAN Kurzbeschreibung (Stand Oktober 2008)

- Frei, K.-H. (2002): Innovation beim Niederschlagsmess- und Pegelwesen in Bayern. XXI Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen und hydrologisch-wasserwirtschaftliche Grundlagen, Bukarest
- Hangen-Broderson, C., Vogelbacher, A., Holle, F.-K. (2008): Operational Flood Forecast in Bavaria. Proceedings of the 24th Conference of the Danubian Countries, Bled, Slovenia
- Holle, F.-K. (2006): Informationsvorsorge: Hochwasservorhersage und Hochwasserwarndienst. Hochwasser – Vorsorge und Schutzkonzept, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Schriftenreihe des FgHW im DWA, Heft 18.06, S. 169ff
- Homagk, P., Ludwig, K. (1998): Operationeller Einsatz von Flussgebietsmodellen bei der Hochwasser-Vorhersage-Zentrale Baden-Württemberg. *Wasserwirtschaft* **88** (1998), Heft 4
- Laurent, S., Ehret, U., Meyer, I., Moritz, K., Vogelbacher, A. (2008): Dealing with uncertainty of hydrological forecasts in the Bavarian Danube catchment. Proceedings of the 24th Conference of the Daubing Countries, Bled, Slovenia
- Münchener Rück (2003): Naturkatastrophen 2002. In: topics, Jahresrückblick Naturkatastrophen 2002. Münchener Rückversicherungsgesellschaft. München, S. 2-10.
- Pellegrini, M., Reichel, G., Senfter, S. (2006): Bayerischer Inn – Entwicklung eines hydrodynamischen Modells. Ergebnisbericht der Phase II des Projektes, unveröffentlicht.
- Reichel, G. (2002): Prognose und Online-Simulation als Entscheidungshilfe im Hochwasserfall. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 2002, **H. 9-10**,
- Roth, C. (2008): Quality management of discharge measurements in Bavaria. Proceedings of the 24th Conference of the Danubian Countries, Bled, Slovenia
- Vogelbacher, A., Daamen, K., Holle, F.-K., Cohen, I. (2002): Modellgestützte Hochwasservorhersage in Bayern. 21st Conference of the Danube Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, Bucharest, Romania
- Vogelbacher, A. (2006): Hochwasservorhersage an Donau und Inn in Bayern. Wiener Mitteilungen Wasser, Abwasser, Gewässer, Band 199, Wien, S. 175 - 189
- Wilke, K., Rademacher, S. (2002): Operationelle Wasserstands- und Durchflussvorhersagen im Rheingebiet. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 2002, **H. 9-10**, S. 154-162

**Anschrift des Verfassers:**

**Dipl. Ing. Franz-Klemens Holle**

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Dienstort München

Lazarettstr. 67

D80636 München

Tel: +49 89 9214 1282

Fax: +49 89 184027

E-Mail: [franz-klemens.holle@lfu.bayern.de](mailto:franz-klemens.holle@lfu.bayern.de)



## HOCHWASSERKOMMUNIKATION IN KÖLN

Reinhard Vogt

### 1. Einleitung

Das Hochwassermanagement der Stadt Köln ist geprägt von einer ständigen, leicht verständlichen Hochwasserkommunikation mit den Bürgern und den Einsatzkräften. Die besten Hochwasserprognosen, Warnungen und Informationen zum Hochwasserschutz kommen bei den wichtigsten Hochwasserakteuren nicht an und verpuffen, wenn sie nicht immer wieder allgemein verständlich über die unterschiedlichsten Wege und Medien publiziert werden. Deshalb kommt der Hochwasserkommunikation bei der Bewältigung von Hochwasserereignissen, beim Hochwassereinsatz, aber auch außerhalb von Hochwasserereignissen für die Hochwasservorsorge eine große Bedeutung im Hochwassermanagement zu.

Das war in Köln nicht immer so!

Der Bürger vergisst leider zu schnell, wenn kein weiteres Hochwasserereignis in schneller Folge auftritt. Die Betroffenheit verschwindet, wenn nur die Ursachen zwar beschrieben, sich daraus aber keine längerfristigen Handlungsziele ergeben. So ist man beim nächsten Katastrophenhochwasser genauso unvorbereitet, wie Jahrzehnte vorher. Längere hochwasserfreie Perioden führen zu einem sorglosen Umgang mit dem Hochwasserrisiko. Auch in Köln wurde – wie fast überall – dem Hochwasserschutz lange Zeit nicht die notwendige Bedeutung beigemessen. Zum Beispiel wurden die gesetzlichen Überschwemmungsgebiete 1906 nach langer hochwasserfreier Zeit festgesetzt und verhinderten darum auch nicht Bebauungen in Rheinnähe wie das Auenviertel und Lagerhallen in der Westhovener Aue, wo an sich die Namen schon für die entsprechende Bewusstseinschärfung sorgen müssten. Auf den günstigen Freiflächen in Rheinnähe entstanden in unglaublicher Unbekümmertheit große Werke wie z. B. die Fordwerke, die KHD, die Messe, Firmen der Chemieindustrie und vielfältiges Gewerbe mit Riesenschadenspotentialen.

Das verheerende Hochwasser von 1784 (13,55 m Kölner Pegel) und die Jahrhundertflut von 1926 (10,69 m Kölner Pegel) waren vergessen und die Hochwassergefahr wurde bis 1993 nach dem Motto „et kütt wie et kütt“ und „et is noch immer jottejange“ angesehen.

Hochwasserschutz wurde in den besonders gefährdeten Gebieten maximal bis zum Jahrhundertwasserstand erstellt oder wie in der Altstadt und in Porz immer ein paar Zentimeter mehr als das letzte Hochwasser oder gar nicht.

Fehlendes Gefahrenbewusstsein führte dazu, dass der 1988 von der Stadt geplante Hochwasserschutz des Auenviertels, das alle 2 Jahre betroffen war, wegen massiver Widerstände von Villenbesitzern, die etwas erhöht gebaut und ihren Rheinblick beeinträchtigt sahen, nicht verwirklicht werden konnte.

Erst das Hochwasser Weihnachten 1993 brachte in der Bevölkerung, in der Politik und in weiten Teilen der Verwaltung eine grundlegende Bewusstseinsänderung, verstärkt durch das nur 13monatige spätere Jahrhunderthochwasser Ende Januar 1995.

Den Kölnern wurde gezeigt, wie kurz Jahrhunderte in Sachen Hochwasser sein können. Wie auch der Blick auf Bild 1 zeigt, ist Köln damals nur knapp einer Hochwasserkatastrophe mit vielen hunderttausenden von Betroffenen, überschwemmten Krankenhausbetten, vollgelaufenen U-Bahnschächten und großen Umweltkatastrophen entgangen. Die Ford-Autowerke, die Messe, der Zoo, große Chemiebetriebe und sogar die Einsatzzentralen von Feuerwehr und Polizei wären bei einem nur wenige Zentimeter höheren Wasserstand betroffen gewesen. Die überstandene Gefahr schreckte auf, so dass innerhalb weniger Monate das Hochwasserschutzkonzept entstand.

Vor der einstimmigen Beschlussfassung im Rat am 1. Februar 1996 wurde es intensiv präsentiert, diskutiert und optimiert. Nach der Beschreibung der Ursachen der Rheinhochwasser verknüpfte man die Grundgedanken des vorsorgenden Hochwasserschutzes wie

- Flächenfreihaltung
- Natürliche Wasserrückhaltung
- Vermindertes Schadenspotenzial und
- Bewusstmachung der verbleibenden Hochwassergefahr mit den Hauptaspekten
- Der Hochwasserabwehr,
- Des baulichen Hochwasserschutzes,
- Des Hochwassermanagement und
- Der kompetenten Eigenvorsorge



**Abb. 1:** Das Jahrhunderthochwasser aus dem Jahre 1995.  
Köln ist nur knapp einer Katastrophe entgangen.

## **2. Vorsorgender Hochwasserschutz durch gute Sensibilisierung**

Trotz geringer Freiflächen werden derzeit in Köln zwei Hochwasserrückhalteräume umgesetzt. Der gesteuerte Rückhalteraum im Kölner Süden mit einem Rückhaltevolumen von 4,5 Mill. m<sup>3</sup> ist fertig gestellt und der Raum im Kölner Norden – Rückhaltevolumen von 29,2 m<sup>3</sup> - ist zurzeit im Genehmigungsverfahren.

Nicht nur die Rückhalteräume werden von den meisten Bürgern, Politikern und Medien in Köln unterstützt, sondern auch die Rückverlegung von Deichlinien, die Freihaltung und Reaktivierung von Überschwemmungsflächen, die Entsiegelung und Versickerung von Niederschlagswasser, die Überprüfung von Bebauungsplänen auf ihre Hochwasserkompatibilität und die umfangreiche Berücksichtigung des Hochwasserschutzes im Städtebau sowie in der Regionalplanung. Der Gebietsentwicklungsplan, in dem das 500jährige Hochwasser ausgewiesen ist, die Projekte Rheinboulevard, die Musterauenlandschaft Flittarder und Westhovener Aue und Wohnen am Strom sowie entfallende oder geänderte Bebauungspläne sind gute Beispiele der Hochwasservorsorge in der regionalen Bauleit- und Objektplanung.

## **2.1 Kommunikation zur Umsetzung des baulichen Hochwasserschutzes**

Die Nachvollziehbarkeit aller planerischen Entscheidungen für den Bürger ist insbesondere dann wichtig, wenn einige Bereiche von den Schutzmaßnahmen profitieren, während andere diesen Schutz nicht erhalten.

Entsprechend vielfältig sind das Meinungsbild und das Engagement der Betroffenen. Um so wichtiger ist es, durch eine bürgernahe Planung, die direkt oder über die Medien allen direkt oder indirekt Betroffenen zugänglich gemacht wird, eine weitgehende Akzeptanz für die erforderlichen Veränderungen zu erwirken. Dazu müssen zum Beispiel Schutzziele, Einzelheiten der Gestaltung, Randbedingungen aus anderen Nutzungen, Kostenvergleiche sowie Vorteile der Maßnahme, und auch eventuell auftretende Nachteile, in der Öffentlichkeit offen diskutiert werden.

Die Informationen seitens der Anlieger sind von besonderer Wichtigkeit. Schwachstellen des vorhandenen Systems werden auf diese Art sicher und schnell erkannt. Hinweise auf Möglichkeiten und auch Unterstützung in Bezug auf Gespräche mit den jeweiligen Grundstückseigentümern sind eine weitere besondere Hilfe. Durch die rechtzeitige Einbeziehung der Vertreter der Öffentlichkeit, der Bürgerinitiativen und –gemeinschaften in die Planungsüberlegungen konnten in Köln Lösungen gefunden werden, die den städtebaulichen Erfordernissen entsprechen, in einem vernünftigen Kosten/Nutzen-Verhältnis stehen und allseits auf Zustimmung treffen.

Gleichzeitig muss erkannt werden, dass Hochwasser Naturereignisse sind und dass es keinen absoluten Schutz geben kann, so dass die Stadt Köln als Grundlage ihres Schutzzieles für den konstruktiven Hochwasserschutz auch nur das 50/100/200 – jährliche Bemessungshochwasser (BHW) angepasst an die technischen und städteplanerischen/landschaftsbildlichen Aspekte ansetzen kann. Dabei ist die beispielhafte Zusammenarbeit mit dem Bürger vor Ort unabdingbare Voraussetzung für eine Akzeptanz und die Unterstützung des Vorgehens der öffentlichen Stellen.

Für den jetzt fertigen oberirdischen Hochwasserschutz durch Deiche, Mauern und mobile Wände und für die Sicherung des Kanalnetzes mit Schiebern, Pumpwerken und modernisierten Kläranlagen wurden in Köln 430 Millionen Euro investiert.

Dieser hohen Investitionssumme steht bei einem 100jährigen Hochwasser ein verhinderter Schaden von mehreren Milliarden Köln gegenüber. Die volkswirtschaftlichen Folgeschäden wie Produktionsausfälle oder Standortverlegung in mindestens doppelter Höhe sind hierbei noch nicht berücksichtigt.

Mittels eines Schadenspotential-Gutachtens wurden die Notwendigkeit und die Prioritätenfestsetzung der Politik und der Bevölkerung nahegebracht.

## 2.2 Kommunikation im Hochwassermanagement

Die Vielzahl der Hochwasserschutzmaßnahmen bei einer über 60km langen Hochwasserschutzlinie und 5000 Einzelmaßnahmen vom Kanalschieber bis zum Fährdienst sind im „Hochwasserkochbuch“ mit Verantwortlichkeiten, Lagebezug, Durchführungspegelstand, Zeitbedarf und vielem mehr verzeichnet. Im EU-Projekt NOAH ist derzeit ein Flutinformations- und Warnsystem (FLIWAS) fertig gestellt, dass ein elektronisches „Hochwasserkochbuch“ mit einer Wasserstandsvorhersage koppelt. Es ist schematisch in Bild 2 dargestellt.

Ein neu entwickeltes Entscheidungs- und Unterstützungssystem mit vielen hochwassersensiblen Objekten steht zudem den Entscheidern zur Verfügung.

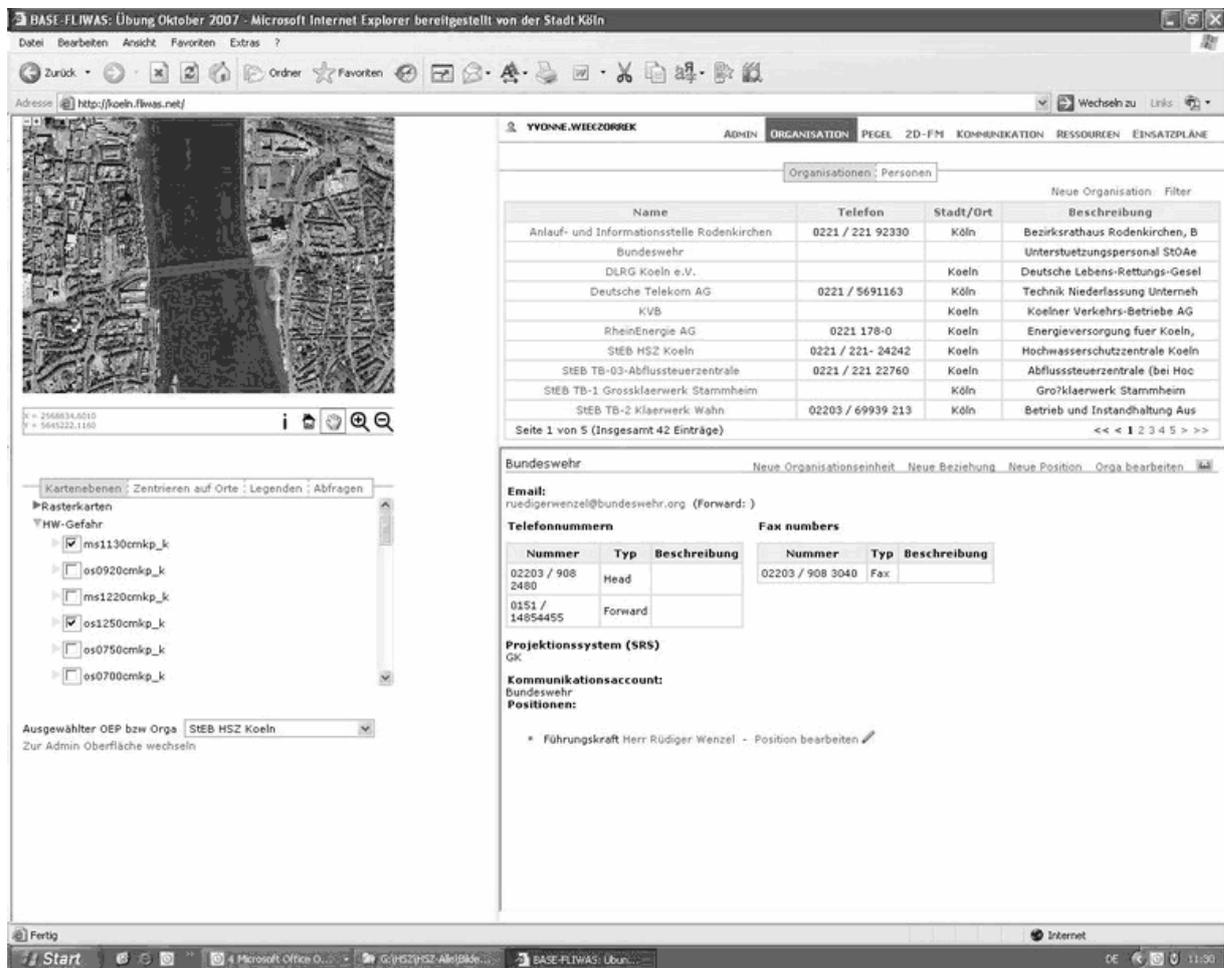


Abb. 2: Das Flutinformations- und Warnsystem (FLIWAS).

### **3. Kommunikationskonzept**

Die Entscheidungen müssen aber für die Öffentlichkeit nachvollziehbar und verständlich sein. Hierfür und für den vorsorgenden Hochwasserschutz entstand ein „Kommunikationskonzept“ für die Hochwasserkommunikation innerhalb und außerhalb eines Hochwasserereignisses.

In dem Kommunikationskonzept sind Regularien für die interne und externe Kommunikation der Hochwasserschutzzentrale Köln (HSZ) vor, während und nach Hochwasserereignissen aufgeführt und neue Maßnahmen zur Sensibilisierung der Bevölkerung für den vorbeugenden Hochwasserschutz beschrieben. Die mögliche zeitliche Umsetzung der Maßnahmen ist angegeben. Die notwendigen Regularien sorgen für ein einheitliches Bild des Hochwasserschutzes nach innen und außen und unterstützen das Verhalten der Bevölkerung während und zwischen den Hochwasserereignissen.

Besonders die Kommunikation außerhalb der Hochwasserereignisse ist außerordentlich wichtig. Das Thema Hochwasser muss permanent in der breiten Öffentlichkeit mittels unterschiedlichster Medien mit unterschiedlichen Schwerpunkten und Zielgruppen bewusst gemacht werden. Diese Bewußtseinsstrategie ist Grundlage einer Strategie der Gefahrenabwehr und des Risikomanagements. Die ständige Sensibilität für das plötzliche Auftreten von Naturkatastrophen, die dauernde Bewusstseinsbildung über deren Ursachen und die Auswirkungen menschlicher Eingriffe sind zur Schadensvermeidung bzw. Schadensverringerung bei Hochwasser unerlässlich.

#### **3.1 Geltungsbereich des Kommunikationskonzeptes**

Die HSZ Köln regelt im Einsatzfall und im vorsorgenden Hochwasserschutz verantwortlich die Außenwirkung des Hochwasserschutzes und koordiniert inhaltlich wie gestalterisch die Kommunikationsprozesse.

Zur Sensibilisierungs- und Öffentlichkeitsarbeit der HSZ gehören insbesondere

- die Medienarbeit der Hochwasserschutzzentrale
- die Konzeption und Umsetzung von Informations- und Werbemittel aller Art und aller Vermittlungsformen zum Hochwasserschutz-Management
- die Beratung von Bürgern, Firmen und Institutionen im Hochwasserschutz
- öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen als Aufklärungsarbeit für den Hochwasserschutz
- der Internetauftritt der Hochwasserschutzzentrale
- Maßnahmen zur internen Kommunikation zwischen den am Hochwasserschutz beteiligten internen und externen Dienststellen.

### **3.2 Kommunikation zur Bewältigung von Hochwasserereignissen**

Die Information der Öffentlichkeit bei der Bewältigung von Hochwasserereignissen ist zur Schadensbegrenzung unabdingbar. Wenn es gelingt, außer den vom Hochwasser direkt Betroffenen, auch die sonstige interessierte Öffentlichkeit rechtzeitig und umfassend mit modernen Instrumenten der Kommunikation und Medienarbeit zu informieren, wird man Schäden begrenzen und Hochwasser ertragbarer gestalten können.

Je nach vorausgesagter Hochwasserentwicklung werden unterschiedliche Warn- und Informationsmedien eingesetzt. Ein wichtiger Faktor für Warnung, Information und Hilfe der betroffenen Bürger sind Bürgerinitiativen und Bürgergemeinschaften. Sie arbeiten Außer der eigenen Medienarbeit mit Internetseite, Bandansage, Hochwassermerkblatt, Warnplakaten, Lautsprecherdurchsagen, Bürgertelefon sowie der Öffentlichkeitsseite von FLIWAS und der Hochwassermittelung ist die Zusammenarbeit mit den öffentlichen Medien ein weiterer wichtiger Bestandteil der Hochwasserwarnung, weil über die Medien die schnellste und effektivste Information erfolgen kann. Schneller ist nur die Warnung über Sirenen, die aber meist gekoppelt ist an eine effektive Medienarbeit.

### **3.3 Internetseite**

Die HSZ bietet auf ihrer Internetseite <http://www.hochwasserinfo-koeln.de> zu jeder Zeit den aktuellen Wasserstand am Kölner Pegel. Gleichzeitig erfolgen über eine aktuelle Hochwasserprognose und Warnung für Köln, die nach Bedarf aktualisiert wird, nützliche Informationen für hochwassergefährdete Bürger. Die Aktualisierung erfolgt bei einem akuten Hochwasserereignis entsprechend der Dienstanweisung „Hochwassereinsatz“.

### **3.4 Öffentlichkeitsmodul FLIWAS**

Zukünftig sollen ausgewählte Informationen und Daten des Kölner Hochwasserinformations- und Managementsystems FLIWAS auf der Internetseite der HSZ dargestellt werden. In FLIWAS sind u.a. die Hochwasservorschriften aller am Hochwassereinsatz beteiligten Dienststellen hinterlegt. Bei Hochwasser erstellt das System anhand der Wasserstandsvorhersage für den Kölner Pegel einen GIS-gestützten Maßnahmenfahrplan für die Einsatzkräfte, der insbesondere die Vorbereitungs- und Durchführungszeiten der einzelnen Maßnahmen berücksichtigt.

### **3.5 Hochwassermerkblatt**

Vor Beginn der hochwassergefährdeten Jahreszeit – vor dem 15. November eines jeden Jahres – ansonsten direkt vor einem Hochwasser wird für einen ausreichenden Selbstschutz der Bewohner in den Überschwemmungsgebieten das mindestens jährlich zu aktualisierende „Hochwassermerkblatt für Bewohner gefährdeter Gebiete“ verteilt. Dieses Merkblatt, dass in Abstimmung mit den Bürgerinitiativen und Bürgergemeinschaften erstellt wird, informiert über die wichtigsten Ansprechpartner

im Hochwasserschutz, die Informations- und Hilfsstellen und über vielfältige Vorsorge- und Verhaltensmaßnahmen im akuten Hochwasserfall. Das Merkblatt wird in ausreichender Stückzahl den Bürgerinitiativen und Bürgergemeinschaften zur Verfügung gestellt und von ihnen aufgrund der genauen Ortskenntnis im hochwassergefährdeten Gebiet ihres Bereiches verteilt. In den übrigen hochwassergefährdeten Bereichen übernehmen Hilfsorganisationen wie die DLRG oder ASB etc. die Verteilung der Merkblätter.

### **3.6 Anrufbeantworter**

Die Vorhersage der HSZ wird täglich vor 8 Uhr unter der städtischen Telefonnummer 221 26161 an alle Interessierte bekannt gemacht. Je nach Wasserstandssteigerung wird diese Ansage mehrmals am Tag aktualisiert. Für diese Ansage, die auch in der dienstfreien Zeit aktuell gehalten wird, sind mehrere Mitarbeiter ausgebildet worden. Auch technisch ist eine jederzeit mögliche Aktualisierbarkeit gewährleistet. Die Ansage, auf die 15 Telefonate gleichzeitig zugreifen können, enthält folgende Daten

- Wasserstand bei einer bestimmten vergangenen Uhrzeit,
- Wasserstandsentwicklung
- Steige- bzw. Fallgeschwindigkeit in Zentimeter-Genauigkeit
- eine Vorhersage für die nächsten 24 Stunden – bei schnell steigendem Wasserstand, auch mit vorhergesagten Zwischenwasserständen,
- eine Aussage über die zukünftige Tendenz und wenn bekannt auch
- ein vorhergesagter Maximalwasserstand.
- Bei personeller Besetzung des Ansagedienstes – bei Einrichtung der Bürgerberatung- ist zum Schluss der Ansage noch ein Hinweis darauf zu geben, dass der Anrufer, wenn er noch in der Leitung bleibt, nach einer kurzen Wartezeit von der Bürgerberatung die notwendigen Auskünfte über z. B. Vorsorgemaßnahmen, Verhaltensmaßnahmen, Grundstücksbetroffenheit, usw. erhalten kann.

### **3.7 Einbeziehung des Call-Centers in die Bürgerberatung**

Bei extrem schnell steigendem Wasserstand, bei ungünstigen Hochwasserprognosen oder wenn durch ein hohes Medieninteresse auch ein extrem großes öffentliches und Bürgerinteresse erzeugt wird, sowie auch nach längerer Zeit ohne Hochwasser, kann die Bürgerberatung der HSZ an ihre Kapazitätsgrenzen stoßen. Damit ein reibungsloser Übergang von der HSZ auf das Call-Center gewährleistet wird, muss ab etwa 6 Meter Kölner Pegel ein gegenseitiger telefonischer oder persönlicher Kontakt vorhanden sein. Die Mitarbeiter des Call-Centers bekommen zukünftig als Ergänzung zu der Hochwassermitteilung eine Tabelle mit den „wichtigsten Ereignissen im Hochwasserfall“. Bei dieser Überlastungssituation wird das Bürgertelefon auf das

Call-Center-Telefon umgeroutet und bis zu 90 Mitarbeiter des Call-Centers verstärken die Bürgerinformation.

### **3.8 Hochwassermittelung**

Die Hochwassermittelung wird erstellt, wenn Wasserstände über 4,50 Kölner Pegel erwartet werden. Dies kann bereits bei Niedrigwasserständen notwendig sein.

Die Hochwassermittelung beinhaltet mindestens:

- die Entwicklung des Rheinwasserstandes,
- die Entwicklung der Wasserstände der wichtigsten Neben- und Zuflüsse des Rheins,
- die Vorhersage für den Kölner Pegel für die nächsten 24 Stunden (eventuell mit Zwischenschritten),
- die Abschätzung der weiteren Entwicklung des Rheinwasserstandes und
- die Entwicklung der Wetterdaten,
- die Durchführung der wichtigsten Schutzmaßnahmen hinsichtlich Zeitpunkt und Ort der Maßnahmen,
- Besonderheiten,
- die Einsatzbereitschaften und
- die Tätigkeiten der Hochwasserschutzzentrale.

### **3.9 Warnplakate**

Die betroffenen Einwohner in den vom Hochwasser bedrohten Gebieten werden über Hochwasserwarnplakat und ein Hochwassermaßnahmenplakat zum einen über die wichtigen Beratungs- und Informationsstellen und zum anderen über die wichtigsten Vorsorgemaßnahmen informiert. Außerdem sind auf den ausgehängten Warnplakaten die Radio- und Fernsehsender (Videotext), die je nach Hochwasserlage rund um die Uhr lokale Hochwassermeldungen durchgeben, verzeichnet.

Der „Plakatklebeplan“ regelt die Zuständigkeiten der Durchführung des Plakatklebeeinsatzes und die jeweiligen Punkte, an denen die Plakate ausgehängt werden, sowie die Anzahl der auszuhängenden Plakate entsprechend der jeweils vorliegenden Warn- und Bedrohungslage.

### **3.10 Radio Köln**

Sehr wichtig für das Gelingen eines jeden Hochwassereinsatzes ist die frühzeitige Information der Bevölkerung über die örtlichen Medien. Frühzeitig hat sich daher die Medienberatung der HSZ mit Radio Köln in Verbindung zu setzen, um Meldungen, Termine für Interviews und den möglichen Einsatz von Radio Köln **in der HSZ** abzustimmen. Für Radio Köln ist rechtzeitig ein entsprechender Arbeitsplatz in der Hochwasserschutzzentrale zur Verfügung zu stellen. Die Kontaktdaten der Redaktion von Radio Köln, die außerhalb der Sendezeit eine Erreichbarkeit gewährleistet,

müssen immer aktuell zur Verfügung stehen. Umgekehrt müssen die wichtigsten Kontaktdaten der HSZ jederzeit aktuell Radio Köln vorliegen.

Beim Einsatz von Radio Köln in der HSZ sollte mindestens stündlich, bei besonderen Ereignissen auch öfters, die Nachrichtenlage zwischen den Beteiligten abgestimmt werden. In Schadenslagen, die unmittelbare Durchsagen ohne Zeitverzögerung benötigen, ist für den Leiter der HSZ die Möglichkeit gegeben, direkt wichtige Durchsagen über den Sender an die Öffentlichkeit zu geben.

### **3.11 WDR – andere Radiosender und Fernsehanstalten**

Nur Radio Köln ist rund um die Uhr in den Hochwasserdienst eingebunden, weil nur Radio Köln bei Bedarf lokale Meldungen jederzeit für die Kölner Hochwasserbedrohten sendet.

Dennoch ist im Hochwasserfall bei allen anderen Medien, besonders der Kölner Medien, großes Interesse an einer aktuellen Berichterstattung vorhanden. Außerhalb der Pressekonferenzen steht deshalb die Medieninfostelle der Hochwasserschutzzentrale Köln den Medien für Auskünfte zur Verfügung und wird von der Öffentlichkeitsarbeit unterstützt.

Vorbereitete E-Mails bzw. Telefaxe, die die aktualisierte Hochwasserprognose, Besonderheiten im Hochwasserdienst, Stromabschaltungen, Verkehrsumleitungen und voraussichtlich überschwemmte Gebiete enthalten, müssen aktuell über einen Presseverteiler „Hochwasser“ an die Medien weitergegeben werden.

### **3.12 Pressekonferenzen**

Die Pressekonferenzen erfolgen mehrmals täglich im Anschluss an die Koordinierungsbesprechungen Hochwasser.

Nach Abschluss der Pressekonferenz werden Interviews mit den Hochwasserbeteiligten der Dienststellen, der HSZ und insbesondere mit dem Leiter des Hochwassereinsatzstabes durchgeführt.

### **3.13 Lautsprecherdurchsagen**

Kurzfristig erforderliche Warnungen müssen zusätzlich zu den anderen Informations- und Warnquellen je nach Schadenslage über Lautsprecherwagen oder Sirenen erfolgen. Für die notwendigen Lautsprecherdurchsagen der mittel- und längerfristigen Warnungen für die Bevölkerung sind Texte mit unterschiedlichen Durchsagen auf Tonträger vorbereitet, damit in den gefährdeten Warnbezirken innerhalb von etwa 20 Minuten gewarnt werden kann.

### **3.14 Sirenenwarnungen**

Eine Sirenenwarnung ist natürlich wesentlich schneller und sicherer als eine Warnung über Lautsprecherwagen.

Eine Auslösung einer Sirenenwarnung ist innerhalb von maximal 2 Minuten von der Leitstelle der Berufsfeuerwehr aus möglich. Meldungen im Lagezentrum der HSZ, die die Sirenenwarnung notwendig macht, werden direkt über die Mitarbeiter der Berufsfeuerwehr in der HSZ an die Leitstelle der Berufsfeuerwehr weitergegeben werden. Somit ist eine schnellstmögliche Warnung möglich. In den besonders vom Hochwasser bedrohten Gebieten wurden im Jahr 2008 über 40 neue Sirenen für diese schnellstmögliche Warnung der Bevölkerung erstellt. Die große Bedeutung der Sirenen ist durch den Weckeffekt des Sirensignals gegeben.

Die Bevölkerung wird hierdurch zum Hören des Lokalsenders aufgefordert, der die ergänzende Information des Ereignisses weitergibt. Die Bevölkerung muss über das richtige Verhalten bei Sirenenauslösung mit Hilfe von Vorabinformationen und durch Aufnahme in die bestehende Informationsblätter unterrichtet werden. Auch die Sirenenstandorte sind mit in die Informationsblätter aufzunehmen.

Möglichst jährlich einmal sollten die 72 Sirenen im Stadtgebiet getestet werden. Weitere 50 Anlagen sollen zur Ergänzungen der Warnungen noch erstellt werden. Der Warnton besteht aus einem einminütigen Heulton – das Gefahrensignal!

Im Ernstfall sollten die Bürger dann Passanten aufnehmen, den Rundfunk einschalten (Radio Köln oder WDR 2) geschlossene Räume aufsuchen und Türen und sowie Fenster schließen. Im Gefahrenfall bei Hochwasser kann es aber auch bedeuten, dass schnellstmögliche Evakuierung und Flucht vor eindringendem Hochwasser notwendig werden. Diese Informationen werden über die Radiosender weitergegeben.

### **3.15 Beratungs- und Informationsstellen in den Bezirksämtern**

Für die hilfeschende Bevölkerung bei höheren Rheinwasserständen werden in den betroffenen Bezirksämtern Anlauf, Hilfs- und Betreuungs- sowie Informationsstellen eingerichtet.

Diese haben hauptsächlich folgende Aufgaben:

- Information, Betreuung, Beruhigung der hilfeschenden Bevölkerung,
- Einrichtung einer örtlichen Koordinierung,
- Auswertung von Hilfsangeboten,
- Verteilung von Hilfsmaterialien,
- Warnung der Bevölkerung vor Ort und insbesondere
- Beratung der Hochwasserschutzzentrale über Besonderheiten im Bezirk.

### **3.16 Einbindung der Bürgerinitiativen, Bürgervereine und -gemeinschaften**

Ein wichtiger Faktor für Warnung und Hilfe der betroffenen Bürger sind die Bürgerinitiativen, Bürgergemeinschaften und Bürgervereine. Sie arbeiten mit der HSZ zusammen und informieren vor Ort ihre Mitglieder über Schutzmaßnahmen, Entwicklungen und Hilfeleistungen sowie über den allgemeinen Hochwasserdienst. Direkte Hilfeleistungen bei einem Hochwasserereignis sind durch die Zusammenarbeit

der Bürgergemeinschaften mit der HSZ für die gefährdete Bevölkerung schnellstmöglich durchführbar. Dies geht mit einer optimalen Vorbereitung und einer straffen Organisation weit über eine allgemeine Nachbarschaftshilfe hinaus.

Insbesondere leisten die Bürgervereine und Bürgerinitiativen

- aktive Unterstützung beim Räumen von Kellern,
- Hilfe bei der Betreuung der Bevölkerung vor Ort,
- Bekanntgabe der bedürftigen Personen wie ältere oder kranke Mitbürger, die besondere Hilfsmaßnahmen benötigen
- Vermittlung bei der Unterbringung von Nachbarn,
- aktive Unterstützung bei der Information und Beratung der Anwohner und
- aktive Sichertätigkeit für die HSZ,
- Bereitstellung und Verteilung von Hilfsmaterialien, wie z.B. dezentrale Sandsackausgaben
- Hilfe bei der Einrichtung und Betreibung der Essensausgabestellen und
- Hilfe bei der Einrichtung von Wärmestuben.

Durch die Einordnung der Hochwasserbürgergemeinschaften in die Hochwasserschutzorganisation wird die Solidargemeinschaft gestärkt und zusätzliche Kräfte in Notsituationen mobilisiert. Hierbei ist natürlich Voraussetzung, dass im Hochwasserfall die Einordnung in die gesamte Hochwasserorganisation sichergestellt ist und dass eine Zusammenarbeit und Schulung auch außerhalb der Hochwasserzeiten durchgeführt wird.

### **3.17 Grundwasserprognosen**

Künftig soll auch die Information über die jeweiligen Grundwasserstände, die sich durch Hochwasser im Rhein bis weit ins Hinterland deutlich erhöhen können, verbessert werden. Derzeit müssen noch die Daten von Grundwasserpeilbrunnen an verschiedenen Stellen im Kölner Stadtgebiet ausgewertet werden. Es kann aber hierüber nur eine grobe Abschätzung der Grundwasserstandsentwicklung vorgenommen werden. Diese Auswertung ermöglicht nur einen aktuellen Überblick über die Gesamtgrundwassersituation bei Hochwasser, nicht aber die spezielle Entwicklung der Grundwasserstände abhängig von den unterschiedlichen Abständen zur Rheinhochwasserlinie und von den unterschiedlichen topographischen und bautechnischen Gegebenheiten. Die Warnung kann deshalb derzeit auch nur grob für gefährdete Stadtbezirke abgegeben werden, um der Gefahr von Kellerdurchnässungen und der Grundbruchgefahr in diesen Ortsteilen zu begegnen. Zur Hochwasserperiode 2009/2010 werden über ein in 2009 erstelltes Grundwassergutachten die maximal möglichen Grundwasserstände in den einzelnen Ortsteilen veröffentlicht, was einer bedeutend besseren Vorbereitung auf 100-jährliche Ereignisse gewährleistet. In drei Jahren wird es mit einem besonderen Grundwassermodell möglich sein jederzeit aktuelle Gefahrenkarten für Grundhochwasser zu erstellen und die entsprechenden Auskünfte in der Hochwasserschutzzentrale Köln zu geben.

### **3.18 Sperr- und Gefahrenzonen**

Da es keinen 100% igen Schutz gibt und es immer wieder zu Überschreitungen der Schutzhöhen oder zum Versagen der Hochwasserschutzeinrichtungen kommen kann, müssen die verbleibenden Restrisiken für die Bürger soweit wie möglich minimiert werden. Besonders hinter mobilen Dammbalkensystemen besteht bei Versagen eine besondere Lebensgefahr. In Köln werden bei Hochwasser 10 km mobile Wände aufgebaut. Zur Minderung des Restrisikos hinter mobilen Hochwasserschutzelementen wird das überflutungsgefährdete Gebiet hinter den mobilen Wänden in Sperr- und Gefahrenzonen gegliedert. Diese Zonen werden ausgewiesen und erfordern bei Hochwasser Nutzungsbeschränkungen und bestimmte Verhaltensregelungen für die Bewohner.

Dazu müssen Informationsmaterialien und Informationshinweise für den Einsatzfall vorbereitet werden, die im Einsatzfall verteilt werden.

An den großen Einfallstraßen zum Kölner Stadtzentrum stehen große Variotafeln der Verkehrsleitzentrale die schnellste Hochwasserinformation verbreiten können.

### **3.19 Information der Mitarbeiter und Bürger über Info-Bildschirme im Stadthaus und bei den Stadtentwässerungsbetrieben, und auf den Infotafeln der Verkehrsleitzentrale**

Zur Sensibilisierung und zur Warnung der Mitarbeiter und der Besucher im Stadthaus Deutz und bei den Stadtentwässerungsbetrieben werden an geeigneter Stelle auf einem Bildschirm eine Pegelanzeige, eine Information über die Hochwasserentwicklung und die derzeitigen Hochwasserschutzmaßnahmen gezeigt. Dies kann automatisch über FLIWAS erfolgen. Der Info-Bildschirm im Stadthaus steht in der Ausstellung der Hochwasserschutzzentrale Köln, an der fast alle Mitarbeiter des Stadthauses und alle ratsuchenden Bürger vorbeikommen.

An den großen Einfallstraßen zum Kölner Stadtzentrum stehen 19 große Variotafeln der Verkehrsleitzentrale, auf denen Hochwasserinformationen schnell verbreitet werden können.

### **3.20 Optimierung der Kommunikation zum Hochwassereinsatz**

Die Aktualisierung und Ergänzung der Kommunikation zum Hochwassereinsatz muss jährlich vor der hochwassergefährdeten Zeit erfolgen. Die Funktionsfähigkeit der internen Kommunikation muss durch Übungen sichergestellt werden.

Das Kommunikationskonzept zum Hochwassereinsatz muss außerdem im Abstand von drei Jahren evaluiert werden, wobei alle Maßnahmen hinsichtlich Notwendigkeit, Änderungserfordernis und Optimierungsmöglichkeiten überprüft werden müssen.

### **3.21 Kommunikation außerhalb von Hochwasserereignissen**

Die Kommunikation außerhalb eines Hochwasserereignisses ist integraler Bestandteil des ganzheitlichen Hochwasserschutzkonzeptes zur Optimierung von Bau-, Flächen-

und Verhaltensvorsorge. Zur Verringerung und Verhinderung von Hochwasserschäden müssen nicht nur die besonders gefährdeten Bewohner auf Dauer sensibilisiert bleiben bzw. werden.

Die HSZ muss hier bezüglich Hochwasserkommunikation eine eigene Konzeption umsetzen. Dies bedingt aber eine Einbindung und Unterstützung der hochwasserschutzbeteiligten städtischen Dienststellen und der beteiligten Hilfsorganisationen!

Hier sind in der Realisierung der Hochwasserschutzkommunikation insbesondere die Gemeinsamkeiten mit der Berufsfeuerwehr und der Öffentlichkeitsarbeit zu nutzen, denn für andere Naturkatastrophen und Großschadensereignisse sind die Instrumentarien zur Schadensverringerung durch umfassende Kommunikation sehr ähnlich. Die Hochwasserschutzkommunikation muss analog zur Bewusstseinsbildung für andere Schadensereignisse zum Ziel haben, dass jedem Einzelnen bewusst wird, dass er im Rahmen seiner Möglichkeiten Vorsorge treffen muss. Es ist nicht nur eine moralische, sondern im Hochwasserfall auch eine gesetzliche Verpflichtung entsprechend dem „Gesetz zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes“ Artikel 1 Änderung des Wasserhaushaltsgesetzes § 31a,2 in dem es heißt: „Jede Person, die durch Hochwasser betroffen sein kann, ist im Rahmen des ihr Möglichen und Zumutbaren verpflichtet, geeignete Vorsorgemaßnahmen zum Schutz vor Hochwassergefahren und zur Schadensminderung zu treffen, insbesondere die Nutzung von Grundstücken den möglichen Gefährdungen von Mensch, Umwelt und Sachwerten durch Hochwasser anzupassen.“

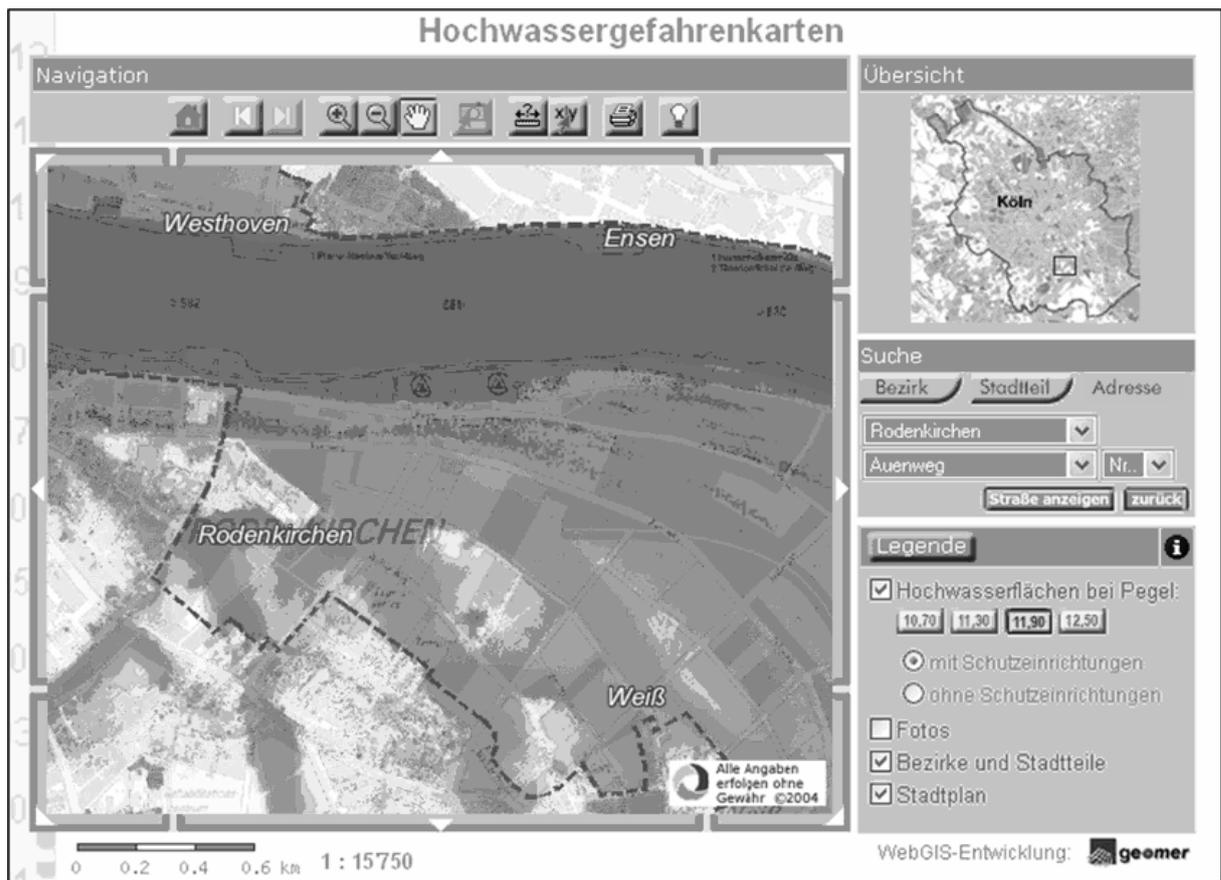
### **3.22 Internetseite**

Auf der Internetseite der HSZ (<http://www.hochwasserinfo-koeln.de>) kann sich jeder Kölner über eine Adresseingabemaske oder per Mausclick parzellengenau die Hochwassergefährdung seines Grundstücks bei unterschiedlichen Hochwasser- bzw. Katastrophenwasserständen anschauen und sich über unterschiedliche Vorsorgemaßnahmen detailliert informieren. Ein stets aktueller Rheinwasserstand am Kölner Pegel, eine ständig aktualisierte Hochwasservorhersage und viel Wissenswertes zum vorsorgenden Hochwasserschutz ergänzen die Internetseite. Grundlage für eine optimale Bau- und Verhaltensvorsorge ist die genaue Kenntnis von Wassertiefen beim betreffenden Grundstück bei verschiedenen Wasserständen. Diese Informationen können den Hochwassergefahrenkarten entnommen werden. Überschwemmungsgefährdete Gebiete bei einem 50-jährlichen, 100-jährlichen, 200-jährlichen und Extremhochwasser sind darin genauso dargestellt wie die geschützten Gebiete durch baulichen Hochwasserschutz. Diese Gefahrenkarten sind in den nächsten zwei Jahren zu überarbeiten, die in 2007 durchgeführte neue Laserscannerüberfliegung muss ausgewertet und Grundlage für die neuen aktualisierenden Gefahrenkarten bilden. Diese Gefahrenkarten müssen den Hochwasserschutz, die damit geschützten Flächen aber auch das Restrisiko bei Ausfall oder Überströmung des baulichen Hochwasserschutzes beinhalten. Lage und Funktion der Hochwasserschutzeinrichtungen, insbesondere ob es sich um feste oder mobilen

Hochwasserschutz handelt, müssen aus den Karten ersichtlich sein. Ein zusätzlicher Punkt auf der Internetseite sollte eine möglichst neutrale Information zu Auswirkungen der Klimaänderung beinhalten. Beispiele zum hochwasserangepassten Bauen ergänzen die neuen Seiten.

Die erforderlichen Überarbeitungen, Ergänzungen, Optimierungen und Neuentwicklungen sollten bis Ende 2011 abgeschlossen sein und spätestens 2015 evaluiert werden.

Jährlich muss eine Aktualisierung und Bereinigung der Daten erfolgen.



**Abb. 3:** Die Hochwassergefahrenkarte auf der Internetseite der HSZ.

### 3.23 Beiblatt zum Grundbesitzabgabenbescheid

Alle Grundbesitzer in Köln sollen künftig mit dem Grundbesitzabgabenbescheid über die Informationsmöglichkeit zur Grund- und Hochwasserbetroffenheit informiert werden. Das Beiblatt soll folgendes beinhalten:

- Vorsorgepflicht nach dem Wasserhaushaltsgesetz (§ 31a)
- Hinweise zu Informationsveranstaltungen
- Möglichkeiten zur Beschaffung von Hochwasserinformationsbroschüren
- Möglichkeiten zur Information über andere Medien.

Die Grundbesitzer werden des Weiteren angehalten ihre Mieter bei Grund- und/oder Hochwasserbetroffenheit entsprechend zu informieren.

### **3.24 Veranstaltungen zum weitergehenden Hochwasserschutz**

Im Rahmen von jährlich zwei großen Bürgerinformationsveranstaltungen werden die Hochwassergefahrenkarten vorgestellt. Dazu werden Hinweise zur neuen Grundwassergefährdung gegeben werden, Vorsorgemaßnahmen wie die Höherlegung von Stromverteilerkästen, Sicherungsmöglichkeiten für Öltanks und andere Verhaltenstips werden erläutert.

Diese Informationsveranstaltungen, die nach und nach in allen gefährdeten Gebieten in Zusammenarbeit mit Energieversorgern, Haustechnik-, Stadtentwässerungsfachleuten und Fachberatern zum Thema Dichtungsmaterialien durchgeführt werden, leisten Hilfestellung zur Selbsthilfe.

Die Veranstaltungen werden in Kombination mit Informationen und einer Ausstellung zur Hochwasservorsorge veranstaltet werden. Eine Zusammenarbeit soll mit Versicherungen und Bausparkassen, die vor Ort eine Bauberatung durchführen erreicht werden. Der Neudruck einer Übersichtskarte mit den Risikogebieten zum Verteilen in Bürgerveranstaltungen ist zur Gefährdungseinschätzung der betroffenen Bürger unerlässlich.

Zu den Veranstaltungen wird eine Hochwasser-Info-Mappe mit Informationen über vorsorgende bauliche Maßnahmen am und im Gebäude (Objektschutz) und über sinnvolle Sicherungsmaßnahmen sowie über Verhaltensregeln verteilt.

Der Film „Hochwasser – was tun“, der auch in der „Sendung mit der Maus“ gezeigt wurde, und auch in englisch und französisch zur Verfügung steht, wird immer wieder an Interessierte verteilt und dient auch in diesen Veranstaltungen als Highlight.

#### **Film und Flyer zur Grundwasserproblematik**

In der Öffentlichkeit, aber auch bei den Hochwasserschutz direkt Beteiligten bestehen hinsichtlich der Grundwasserproblematik bei Hochwasser große Defizite in der Information und Wissensvermittlung. Die Gefährdung bei ansteigendem Grundwasser im Zusammenhang mit Flusshochwasser wird meist unterschätzt und das Schadensausmaß der unterirdischen Gefährdung ist oft größer als das der Schäden durch oberflächliche Überflutung.

Zur Sensibilisierung der Bevölkerung, der Politik, der Verwaltung und der Hilfskräfte werden baldmöglichst ein Flyer, und Infowände, etc. zur Grundwasserproblematik erstellt. Dies erleichtert auch die Medienarbeit der HSZ und hilft, Veranstaltungen zur Hochwasserproblematik einschließlich der Grundwasserinformationen interessanter und begreifbarer zu gestalten.

#### **Hochwasser-Merksteine (Hochwassermarken)**

In einigen hochwassergefährdeten Kommunen wird die Hochwasserbedrohung durch Hochwasser-Merksteine an unterschiedlichen Punkten im Stadtgebiet dargestellt.

Diese Merksteine (z. B. Findlinge oder Sitzgelegenheiten) haben eine Kennzeichnung, die zeigt wie hoch das Wasser ohne Hochwasserschutz stehen würde und sensibilisiert dadurch den Betrachter für die latente Hochwassergefahr. Ein Gestaltungsentwurf und eine Planung zur bedarfsgerechten Aufteilung der Merksteine werden erstellt und weitere Überlegungen zu Hochwasser-Merkmarken (z.B. an Laternenpfählen) entwickelt. Die Finanzierung der Steine kann über Sponsoren erfolgen und die Einrichtung jedes Steins könnte von Politik, Verwaltung und Bürgerinitiativen als Steinchen in der gesamten Hochwasser-Vorsorge genutzt werden

Die bereits bestehenden Hochwassermarken werden über unterschiedliche Medien (Kalender, Flyer etc.) bekannt gemacht.

### **Haus des Rheins**

In die Planungen zur Ausgestaltung des Haus des Rheins werden von der HSZ Köln interessante Materialien, Bilder und Ausstellungsstücke eingebracht. Historisches und Neues zum Hochwasser des Rheins in Köln aber auch die Ursachen, die Schadenspotentiale in Köln und in der Region müssen anschaulich, Bürger- und Kindgerecht dargestellt werden.

Im Außengelände am Haus des Rheins könnte ein großes erlebnisgerechtes Modell, bei dem man selbst klein- und großräumige Hochwassermaßnahmen durchführen kann, erstellt werden (Ein ähnliches Modell wurde in Karlsruhe im Naturschutzzentrum Rappenhörth gebaut).

Da das Haus des Rheins zur Umsetzung des Masterplans Köln gehört, sind zeitliche Planungen derzeit nicht realitätsnah möglich.

### **Hochwassererlebnisweg**

Der Hochwassererlebnisweg wird im Jahr 2009 geplant und sollte spätestens Ende 2010 umgesetzt werden. Eine erste Studie hierzu wurde von dem Büro IMAGO erstellt und im Arbeitskreis mit einigen hochwasserbeteiligten, sport- und umwelterzieherischen Dienststellen und Institutionen ein erster Entwurf erstellt. An nur wenigen gut erreichbaren Plätzen im Stadtgebiet in der Nähe des Rheins sollen familiengerechte Freizeitgestaltung mit Spiel, Sport und gemeinsamen Tun mit dem Erleben von Umwelt/Hochwasserwissen vereint werden.

Der von der EU geförderte und im Jahre 2000 erstellte und mit Infotafeln ausgestattete Rundweg in der Altstadt „Huhwasser-wenn de Flut kütt“ und der dazugehörige Radweg Langel-Stammheim ist nicht mehr aktuell und muss sowieso neu konzipiert, überarbeitet und aktualisiert werden. Die Infotafeln entsprechen nicht mehr den heutigen Hochwasserschutzgegebenheiten und werden bis Ende 2009 aktualisiert und erneuert. Wie bereits an einigen Infotafeln geschehen, müssen die Tafeln auch Informationen in englischer Sprache enthalten.

### **Hochwassertag und Wanderausstellung**

Alle zwei Jahre findet, wie bereits mehrfach geschehen, ein Hochwassertag in Köln statt. Gemeinsam mit den Hilfsorganisationen und den Beteiligten am

Hochwasserschutzdienst wird hier die Leistungsfähigkeit des Kölner Hochwasserdienstes dargestellt und spielerisch erlebbar gemacht. Dieser Familienevent wird gemeinsam mit den Bürgervereinen und den Bürgerinitiativen vor Ort durchgeführt.

Die Wanderausstellung an hochfrequentierten Punkten im Stadtgebiet soll in den KölnArcaden oder im neueröffneten Colloneum, in einem linksrheinischem Einkaufszentrum und im Hauptbahnhof gezeigt werden. Danach könnte die Wanderausstellung im Kölner Norden und Süden in hochfrequentierten Bereichen weitergeführt werden, um dann im neuen Deutzer Bahnhof und im neuen U-Bahnhof der Nord-Süd-U-Bahn-Strecke unterschiedlichste Besucher anlocken. Ein Hochwasserboot, Stege, Sandsackkino, mobile Wände, Hochwasserschieber usw. machen die Ausstellung anfassbar. Hier an diesen hochfrequentierten Punkten erreicht man auch weniger Hochwasserinteressierte, die sich gerne die Wartezeit auf den nächsten Zug oder die einkaufende Ehefrau im Sandsackkino oder auf Stegen sitzend mit viel interessanter Information vertreiben.

Die ständige Hochwasserausstellung im Stadthaus wird mindestens alle drei Monate durch wechselnde Ausstellungsgegenstände geändert, um die Neugierde an dieser Ausstellung wach zu halten. Ein von der RWTH Aachen gebautes, 7m großes Flußgebietsmodell mit der Möglichkeit, spielerisch in 3 Szenarien (ungebändigter Fluss - begradigter Fluss - begradigter Fluss mit Retentionsmaßnahmen) Hochwasser und die Auswirkungen von Flussbaumaßnahmen richtig originalgetreu mit Wasserabfluss und Regenereignis nachzuvollziehen.

Die Hochwasserkulissenstadt und die Hochwasserausstellung in der Deutzer Brücke wird mit ehrenamtlicher Unterstützung durch die DLG und mit Hilfe des THW, renoviert und durch eine entsprechende Beleuchtung attraktiver gestaltet.



**Abb. 4:** Hochwassertag 2000



**Abb. 5:** Hochwassertag 2004

### **Regionale und überregionale Besuchergruppen**

Aufgrund des hohen Bekanntheitsgrades des Hochwasserschutzes Köln wird sehr häufig von Schulen, Kindergärten, Fachhochschulen und Universitäten, aber auch von Fachgruppen aus dem In- und Ausland angefragt, ob ein Besuch der HSZ, eine Hochwasserinformationsveranstaltung oder eine Besichtigung des Hochwasserschutzes vor Ort mit Besuch der Hochwasserausstellung in der Brücke möglich sind.

Die Sensibilisierung der Bevölkerung für den vorbeugenden Hochwasserschutz war schon immer eins der wichtigsten Projekte der Hochwasserschutzzentrale Köln, wurde von der EU im Programm IRMA gefördert und war außerdem anerkanntes Projekt der Weltausstellung Expo 2000. Ein kleiner Teil dieses Projektes war und ist eine Ausstellung in der Deutzer Brücke in Köln. Über originale Hochwasserstege wandert der Besucher durch überflutete Gassen oder kann sich ein Hochwasserboot setzen. In dieser Atmosphäre lässt sich leicht Informationen und Wissen aufnehmen, die über Schautafeln, Videofilm und ähnliches gezeigt werden.

Das Foto zeigt einen Teil – Ausschnitt aus diesen Ausstellungen und soll in Kontext mit Infotafeln über Ursachen und Gefahren das Hochwasserbewusstsein fördern, Hintergrundwissen vermitteln über Vorsorgemaßnahmen mit dem Ziel, Hochwasser gar nicht erst entstehen zu lassen.

Die Unterstützung von Projektwochen, Workshops und Besichtigungen des Kölner Hochwasserschutzes wird seitens der HSZ deutlich intensiviert. Die Darstellung des Kölner Hochwasserschutzes in der Öffentlichkeit, im Unterricht und in der internationalen Fachwelt ist aus den unterschiedlichsten Gründen äußerst wichtig und notwendig!



**Abb. 6:** Aufbau der neuen mobilen Schutzwand. (Ferienprogramm der SK-Stiftung, Ostern 2009)



**Abb. 7:** Bau eines Sandsackdamms. (Ferienprogramm der SK-Stiftung Ostern 2009)

### **Veranstaltungsreihe Gesamtrhein**

Gemeinsam mit der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR), der Hochwassernotgemeinschaft Rhein (HWNG Rhein), dem HochwasserKompetenzCentrum (HKC) und mit dem Rheinkolleg könnten in den kommenden Jahren insgesamt 6 Informationsveranstaltungen oder Workshops zum vorsorgenden Hochwasserschutz an unterschiedlichsten Orten am Gesamtrhein durchgeführt werden.

Von der Quelle in der Schweiz bis zur Mündung in den Niederlanden „Sitzen ALLE in einem Boot“!

Ein Floß aus Geschwemmselgut eines Kölner Aktionskünstlers, der bereits Geschwemmselkunst in Bezirksrathäusern zeigte, könnte die Hauptattraktion ebenso wie die Künstler Kooperation Acqua Alta und die Klammer dieser Veranstaltungsreihe sein.

### **Broschüre und Internetauftritt zur Vorsorge bei Naturkatastrophen**

Gemeinsam mit der Stadtverwaltung Köln wird die Hochwasserschutzzentrale Köln eine Broschüre und einen Internetauftritt zum Verhalten bei allen Naturkatastrophen und bei Großschadensereignissen zur Vorsorge und Nachsorge erarbeiten.

### **Infoscreen**

Eine weitere Möglichkeit zur Sensibilisierung für den vorbeugenden Hochwasserschutz und zur Bekanntmachung von Veranstaltungen zu Hochwasserschutz ist die Darstellung im Infoscreen.

Diese Möglichkeit wurde bereits mehrfach genutzt. Mit dem Presseamt werden eine gemeinsame Aktion zur Gefahr von Naturkatastrophen bzw. Großschadensereignissen und auch die Nutzung des Infoscreens bei einem Hochwasser- oder Großschadensereignis geklärt.

### **Weitere Aktivitäten zur Bewusstseinsbildung**

Ein spezielles Spiel mit Überflutungsszenarien, aber auch mit Möglichkeiten des Hochwasserschutzes speziell für Köln, könnte gemeinsam mit Radio Köln erstellt werden.

Mit Schriftstellern, die Köln-Krimis oder Köln-Geschichten schreiben, sollte Kontakt aufgenommen werden, um die Hochwasserproblematik interessant einem breiten, großen Publikum vorzustellen.

Gemeinsam mit der HWNG Rhein, der Stadt Köln und dem HochwasserKompetenzCentrum werden Wettbewerbe (Mal- und Kunstwettbewerbe, Foto- und Ideenwettbewerbe u. a.) ausgeschrieben werden und die Preisvergabe öffentlichkeitswirksam bekannt gemacht werden.

Derzeit wird ein Kartenspiel mit Hochwasserbetroffenheit verschiedener Flüsse zur kostenlosen Verteilung erstellt. Ein T-Shirt mit einem Überschwemmungsszenario aufgrund einer Laserscannerüberfliegung mit dem Aufdruck „Et kütt wie et kütt“ ist

ein äußerst beliebtes Mitbringsel für überregionale Besuchergruppen, aber auch für Schulklassen aus Köln.



**Abb. 8:** Das Hochwasser-T-Shirt.



**Foto 10:** Kulissenstadt, Deutzer Brücke

Wie vielschichtig die Kommunikation des Hochwasserschutzes in Köln ist, zeigen die Beispiel „Längste Pegellatte der Welt“, die am denkmalgeschütztem Messturm von

Bergsteigern befestigt und wochenlang mit 54 m Länge ein Wahrzeichen für überregionalen, europäischen vorsorgenden Hochwasserschutz war und die Taufe eines Hochwassereinsatzbootes mit Karnevalsprinzen, Kindertanzcorps und Funkemariechen.



Abb.9: Die längste Pegellatte der Welt.

### **Verwaltungsinterne Aktivitäten**

Stadtinterne Veranstaltungen zum Klimaschutz, zum weitergehenden vorsorgenden Hochwasserschutz, zur Hochwasserbedrohung und zu notwendigen Vorsorgemaßnahmen werden durchgeführt. Diese stadtinternen Veranstaltungen sind für die Bau- und Planungsänderungen besonders wichtig. Da oft Stadtplaner und Architekten Informationsbedarf hinsichtlich hochwasserangepasstem Planen und Bauen haben. Dazu erfolgt eine allgemeine Information über die Gefährdung städtischer Grundstücke im Intranet und über die Zeitung „Stadtintern“.

### **Das HochwasserKompetenzCentrum**

Das HochwasserKompetenzCentrum (HKC) verbindet seit dem 17. September 2007 in einem internationalen Netzwerk Theorie und Praxis im Hochwasserschutz. Schwerpunktaufgaben sind die Informationsweitergabe sowie die Vorbereitung, Entwicklung und Durchführung von Projekten, Forschungsvorhaben und Studien zum nachhaltigen, wirtschaftlichen und praxisgerechten Umgang mit dem Thema Hochwasser. In den drei Beiräten „Grundlagen des Hochwasserschutzes“, „Hochwassermanagement“ und „Risikomanagement/ Strategie“ werden Projekt, Kooperationen und Zusammenwirken im Gesamtspektrum des Hochwasserschutzes initiiert. Das Besondere ist das Zusammenwirken unterschiedlicher Ebenen aus Theorie und Praxis. Zwischen Bürgern, Firmenvertreter, Verwaltungsangehörigen aus Kommunen und übergeordneten Behörden, Ingenieurbüros und Finanzfachleuten gibt es keine Berührungängste.

Die ersten im HKC entwickelten Projekte werden ein Hochwasserpass für private Objekte mit einer grundstücksbezogenen Risikoanalyse, Gefahrenkarten für Starkregenereignisse und eine Computeranimation sein, bei der man an einem virtuellen Haus durch unterschiedliche Maßnahmen Risikominimierung durchführen kann.

Mit einer intensiven Hochwasserkommunikation kann erreicht werden, dass der Mensch gerade in Zeiten des Klimawandels lernt, mit dem Hochwasser zu leben. Denn Hochwasser lassen sich auch in Zukunft nicht abschaffen, sie werden sogar noch häufiger.

**Anschrift des Verfassers:**

**Reinhard Vogt**

Stadtentwässerungsbetriebe Köln, AöR

StEB-HSZ

Hochwasserschutzzentrale

Willy-Brandt-Platz 2

D - 50679 Köln

Tel.: +49 221 221-25810

E-Mail: reinhard.vogt@steb-koeln.de

Internet: <http://www.steb-koeln.de>





# 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	<b>Das Wasser (1968)</b> Kresser W.	vergriffen
2	<b>Die Gesetzmäßigkeiten der stationären Flüssigkeitsströmung durch gleichförmig rotierende zylindrische Rohre (1968)</b> Breiner, H.	vergriffen
3	<b>Abwasserreinigung - Grundkurs (1969)</b> von der Emde, W.	vergriffen
4	<b>Abwasserreinigungsanlagen - Entwurf-Bau-Betrieb (1969)</b> 4. ÖWWV-Seminar, Raach 1969	vergriffen
5	<b>Zukunftsprobleme der Trinkwasserversorgung (1970)</b> 5. ÖWWV-Seminar, Raach 1970	vergriffen
6	<b>Industrieabwässer (1971)</b> 6. ÖWWV-Seminar, Raach 1971	vergriffen
7	<b>Wasser- und Abfallwirtschaft (1972)</b> 7. ÖWWV-Seminar, Raach 1972	vergriffen
8	<b>Das vollkommene Peilrohr (Zur Methodik der Grundwasserbeobachtung) (1972)</b> Schmidt, F.	vergriffen
9	<b>Über die Anwendung von radioaktiven Tracern in der Hydrologie (1972)</b> Pruzinsky, W. <b>Über die Auswertung von Abflußmengen auf elektronischen Rechenanlagen</b> Doleisch, M.:	18,-
10	<b>1. Hydrologie-Fortbildungskurs (1972)</b>	vergriffen

Band Nr		Preis €
11	<b>Vergleichende Untersuchungen zur Berechnung von HW-Abflüssen aus kleinen Einzugsgebieten (1972)</b> Gutknecht, D.	vergriffen
12	<b>Uferfiltrat und Grundwasseranreicherung (1973)</b> 8. ÖWWV-Seminar, Raach 1973	vergriffen
13	<b>Zellstoffabwässer-Anfall und Reinigung (1972)</b> von der Emde W., Fleckseder H., Huber L., Viehl K.	vergriffen
14	<b>Abfluß - Geschiebe (1973)</b> 2. Hydrologie-Fortbildungskurs 1973	vergriffen
15	<b>Neue Entwicklung in der Abwassertechnik (1983)</b> 9. ÖWWV-Seminar, Raach 1974	vergriffen
16	<b>Praktikum der Kläranlagentechnik (1974)</b> von der Emde W.	vergriffen
17	<b>Stabilitätsuntersuchung von Abflußprofilen mittels hydraulischer Methoden und Trendanalyse (1974)</b> Behr, O.:	18,-
18	<b>Hydrologische Grundlagen zur Speicherbemessung(1975)</b> 3. Hydrologie-Fortbildungskurs 1975	vergriffen
19	<b>Vorhersagen in der Wasserwirtschaft (1976)</b> 1. Hydrologisches Seminar des ÖWWV 1976	10,-
20	<b>Abfall- und Schlammbehandlung aus wasserwirtschaftlicher Sicht (1976)</b> 11. ÖWWV-Seminar, Raach 1976	vergriffen
21	<b>Zur Theorie und Praxis der Speicherwirtschaft (1977)</b> 2. Hydrologisches Seminar des ÖWWV 1977	22,-
22	<b>Abwasserreinigung in kleineren Verhältnissen (1977)</b> 12. ÖWWV-Seminar, Raach 1977	vergriffen
23	<b>Methoden zur rechnerischen Behandlung von Grundwasserleitern (1977)</b> Baron W., Heindl W., Behr O., Reitinger J.	vergriffen
24	<b>Ein Beitrag zur Reinigung des Abwassers eines Chemiefaserwerkes, eines chemischen Betriebes und einer Molkerei (1978)</b> Begert A.	vergriffen
25	<b>Ein Beitrag zur Reinigung von Zuckerfabrikabwasser (1978)</b> Kroiss H.	vergriffen

Band Nr		Preis €
26	<b>Methoden der hydrologischen Kurzfristvorhersage (1978)</b> Gutknecht D.	vergriffen
27	<b>Wasserversorgung-Gewässerschutz (1978)</b> 13. ÖWWV-Seminar, Raach 1978	vergriffen
28	<b>Industrieabwasserbehandlung - Neue Entwicklungen (1979)</b> 14. ÖWWV-Seminar, Raach 1979	vergriffen
29	<b>Probleme der Uferfiltration und Grundwasseranreicherung mit besonderer Berücksichtigung des Wiener Raumes (1979)</b> Frischherz H.	vergriffen
30	<b>Beiträge zur Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft (1979)</b> o. Univ.-Prof. DDr. Werner Kresser zum 60. Geburtstag	vergriffen
31	<b>Grundwasserzuströmungsverhältnisse zu Horizontalfilterrohrbrunnen (1980)</b> Schügerl W.	vergriffen
32	<b>Grundwasserwirtschaft (1980)</b> 3. Hydrologisches Seminar des ÖWWV 1980	25,-
33	<b>Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (1) (1980)</b>	vergriffen
34	<b>Behandlung und Beseitigung kommunaler und industrieller Schlämme (1980)</b> 15. ÖWWV-Seminar, Raach 1980	vergriffen
35	<b>Faktoren, die die Inaktivierung von Viren beim Belebungsverfahren beeinflussen (1980)</b> Usrael G.	vergriffen
36	<b>Vergleichende Kostenuntersuchungen über das Belebungsverfahren (1980)</b> Flögl W.	vergriffen
37	<b>Ein Beitrag zur Reinigung und Geruchsfreimachung von Abwasser aus Tierkörperverwertungsanstalten (1980)</b> Ruider E.	vergriffen
38	<b>Wasserwirtschaftliche Probleme der Elektrizitätserzeugung (1981)</b> Schiller, G.:	vergriffen
39	<b>Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (1981)</b> Teil 2	vergriffen
40	<b>Wasseraufbereitung und Abwasserreinigung als zusammengehörige Techniken (1981)</b> 16. ÖWWV-Seminar, Raach 1981	vergriffen

Band Nr		Preis €
41	<b>Filterbrunnen zur Erschließung von Grundwasser (1981)</b> ÖWWV-Fortbildungskurs 1981	29,-
42	<b>Zur Ermittlung von Bemessungshochwässern im Wasserbau (1981)</b> Kirnbauer R.	22,-
43	<b>Wissenschaftliche Arbeiten, Zeitraum 1977 bis 1981 (1981)</b>	25,-
44	<b>Kulturtechnik und Wasserwirtschaft - heute (1981)</b> Teil 3	25,-
45	<b>Verbundwirtschaft in der Wasserversorgung (1982)</b> ÖWWV-Fortbildungskurs 1982	29,-
46	<b>Gewässerschutzplanung, deren Umsetzung und Zielkontrolle im Einzugsgebiet des Neusiedler Sees (1982)</b> Stalzer W.	vergriffen
47	<b>Wechselwirkung zwischen Planung und Betrieb von Abwasserreinigungsanlagen, Erfahrungen und Probleme (1982)</b> 17. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1982	vergriffen
48	<b>Kleinwasserkraftwerke - Notwendigkeit und Bedeutung (1982)</b> Flußstudien: Schwarza, kleine Ybbs, Saalach	vergriffen
49	<b>Beiträge zur Wasserversorgung, Abwasserreinigung, Gewässerschutz und Abfallwirtschaft (1982)</b> o. Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. v.d. Emde zum 60. Geburtstag	vergriffen
50	<b>Kulturtechnik und Wasserwirtschaft - heute (1982)</b> Teil 4	vergriffen
51	<b>Sicherung der Wasserversorgung in der Zukunft (1983)</b> 18. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1983	vergriffen
52	<b>Thermische Beeinflussung des Grundwassers (1983)</b> ÖWWV-Fortbildungskurs, 1983	vergriffen
53	<b>Planung und Betrieb von Regentlastungsanlagen (1984)</b> ÖWWV-Fortbildungskurs, 1984	vergriffen
54	<b>Sonderabfall und Gewässerschutz (1984)</b> 19. ÖWWV-Seminar, Gmunden 1984	vergriffen
55	<b>Naturnahes Regulierungskonzept "Pram" (1984)</b>	26,-

Band Nr		Preis €
56	<b>Blähschlamm beim Belebungsverfahren (1985)</b> ÖWWV-Fortbildungskurs, 1985	vergriffen
57	<b>Chemie in der Wassergütewirtschaft (1985)</b> ÖWWV-Fortbildungskurs, 1985	vergriffen
58	<b>Klärschlamm - Verwertung und Ablagerung (1985)</b> 20. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1985	vergriffen
59	<b>Wasserkraftnutzung an der Thaya (1985)</b> Pelikan B.	23,-
60	<b>Seminar "Wasser - Umwelt - Raumordnung" (1985)</b>	16,-
61	<b>Gewässerschutz im Wandel der Zeit Ziele und Maßnahmen zu ihrer Verwirklichung (1985)</b> Fleckseder, H.	vergriffen
62	<b>Anaerobe Abwasserreinigung (1985)</b> Kroiss H.	vergriffen
63	<b>Kleine Belebungsanlagen mit einem Anschlußwert bis 500 Einwohnergleichwerte (1985)</b> Begert A.	vergriffen
64	<b>Belüftungssysteme beim Belebungsverfahren (1986)</b> ÖWWV-Fortbildungskurs, 1986	vergriffen
65	<b>Planung und Betrieb von Behandlungsanlagen für Industrieabwässer (1986)</b> 21. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1986	vergriffen
66	<b>Ausspracheseminar Grundwasserschutz in Österreich (1986)</b> ÖWWV-Fortbildungskurs, 1986	29,-
67	<b>Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (5) (1986)</b>	vergriffen
68	<b>Zur mathematischen Modellierung der Abflueßentstehung an Hängen (1986)</b> Schmid B.H.	22,-
69	<b>Nitrifikation - Denitrifikation (1987)</b> ÖWWV-Fortbildungskurs, 1987	vergriffen
70	<b>Flußbau und Fischerei (1987)</b>	vergriffen
71	<b>Wasserversorgung und Abwasserreinigung in kleinen Verhältnissen (1987)</b> 22. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1987	vergriffen

Band Nr		Preis €
72	<b>Wasserwirtschaft und Lebensschutz (1987)</b> Wurzer E.	vergriffen
73	<b>Anaerobe Abwasserreinigung Grundlagen und großtechnische Erfahrung (1988)</b> ÖWWV-Fortbildungskurs, 1988	vergriffen
74	<b>Wasserbau und Wasserwirtschaft im Alpenraum aus historischer Sicht (1988)</b>	22,-
75	<b>Wechselbeziehungen zwischen Land-, Forst und Wasserwirtschaft (1988)</b> ÖWWV-Fortbildungskurs, 1988	vergriffen
76	<b>Gefährdung des Grundwassers durch Altlasten (1988)</b> 23. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1988	vergriffen
77	<b>Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (6) (1987)</b>	vergriffen
78	<b>Wasserwirtschaftliche Planung bei mehrfacher Zielsetzung (1988)</b> Nachtnebel, H.P.	25,-
79	<b>Hydraulik offener Gerinne (1989)</b> Symposium, 1989	vergriffen
80	<b>Untersuchung der Fischaufstiegshilfe bei der Stauhaltung im Gießgang Greifenstein (1988)</b> Jungwirth M., Schmutz S.	vergriffen
81	<b>Biologische Abwasserreinigung (1989)</b> ÖWWV-Fortbildungskurs, 1989, TU-Wien	vergriffen
82	<b>Klärschlamm Entsorgung (1989)</b> 24. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1989	vergriffen
83	<b>Viruskontamination der Umwelt und Verfahren der Kontrolle (1990)</b> 2. Symposium	18,-
84	<b>Schadstofffragen in der Wasserwirtschaft (1989)</b> ÖWWV-Fortbildungskurs 1989, TU-Wien	29,-
85	<b>Schlußbericht zum Forschungsvorhaben Trinkwasseraufbereitung mit Ultraschall, Projekt Abschnitt I (1989)</b> Frischherz H.; Benes E.; Ernst J.; Haber F.; Stuckart W.	18,-
86	<b>Umfassende Betrachtung der Erosions- und Sedimentationsproblematik (1989)</b> Summer W.	25,-

Band Nr		Preis €
87	<b>Großräumige Lösungen in der Wasserversorgung (1990)</b> 25. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1990	vergriffen
88	<b>Revitalisierung von Fließgewässern (1990)</b> Beiträge zum Workshop Scharfling, 1989	vergriffen
89	<b>Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (1990)</b> Teil 9	vergriffen
90	<b>A Study on Kinematic Cascades (1990)</b> Schmid B.H.	18,-
91	<b>Snowmelt Simulation in Rugged Terrain - The Gap Between Point and Catchment Scale Approaches (1990)</b> Blöschl G.	18,-
92	<b>Dateninterpretation und ihre Bedeutung für Grundwasserströmungsmodelle (1990)</b> Blaschke A.P.	nicht erschienen
93	<b>Decision Support Systeme für die Grundwasserwirtschaft unter Verwendung geografischer Informationssysteme (1990)</b> Fürst J.	18,-
94	<b>Schlußbericht zum Forschungsvorhaben Trinkwasseraufbereitung mit Ultraschall; Projekt-Abschnitt 1990 (1990)</b> Frischherz H., Benes E., Stuckhart W., Ilmer A., Gröschl M., Bolek W.	18,-
95	<b>Anaerobe Abwasserreinigung - Ein Modell zur Berechnung und Darstellung der maßgebenden chemischen Parameter (1991)</b> Svardal K.	22,-
96	<b>EDV-Einsatz auf Abwasserreinigungsanlagen (1991)</b> ÖWWV-Fortbildungskurs 1991, TU-Wien	29,-
97	<b>Entfernung von Phosphorverbindungen bei der Abwasserreinigung (1991)</b> ÖWWV-Fortbildungskurs 1991, TU-Wien	25,-
98	<b>Auswirkungen der Wasserrechtsgesetznovelle 1990 auf Behörden, Planer und Betreiber kommunaler Abwasserreinigungsanlagen - aus technischer, rechtlicher und wirtschaftlicher Sicht (1991)</b> 26. ÖWWV-Seminar, Ottenstein 1991	36,-
99	<b>Geruchsemissionen aus Abwasserreinigungsanlagen (1991)</b> ÖWWV-Fortbildungskurs 1991,	22,-
100	<b>Anpassung von Kläranlagen an den Stand der Technik (1992)</b> ÖWWV-Fortbildungskurs 1992, TU-Wien	vergriffen

Band Nr		Preis €
101	<b>Umweltbezogene Planung wasserbaulicher Maßnahmen an Fließgewässern (1992)</b> Pelikan B.	18,-
102	<b>Erfassung hydrometeorologischer Elemente in Österreich im Hinblick auf den Wasserhaushalt (1992)</b> Behr O.	i.V.
103	<b>Wasser- und Abfallwirtschaft in dünn besiedelten Gebieten (1992)</b> 27. ÖWWV-Seminar Ottenstein 1992	36,-
104	<b>Virus Contamination of the Environment (1992)</b> Methods and Control	vergriffen
105	<b>Fließgewässer und ihre Ökologie (1993)</b> ÖWAV-Fortbildungskurs 1992, TU-Wien	22,-
106	<b>Festlegung einer Dotierwassermenge über Dotationsversuche (1992)</b> Mader H.	22,-
107	<b>Wasserrechtsgesetznovelle 1990 und neue Emissionsverordnungen (1992)</b> Vorträge anlässlich der UTEC 1992	29,-
108	<b>Chemische Analytik für einen zeitgemäßen Gewässerschutz (1992)</b> Vorträge anlässlich der UTEC 1992	29,-
109	<b>Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (1994)</b> Teil 10 - Beiträge zum Seminar an der Universität für Bodenkultur im November 1994	i.V.
110	<b>Bemessung u. Betrieb von Kläranlagen zur Stickstoffentfernung (1993)</b> ÖWAV-Seminar 1993, TU-Wien	36,-
111	<b>Wasserreserven in Österreich - Schutz und Nutzung in Gegenwart und Zukunft (1993)</b> 28. ÖWAV-Seminar Ottenstein 1993	vergriffen
112	<b>Contamination of the Environment by Viruses and Methods of Control (1993)</b>	18,-
113	<b>Wasserkraft ()</b> O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. S. Radler anlässlich seiner Emeritierung	vergriffen
114	<b>Klärwärter-Grundkurs (1994)</b> 2. Auflage 1994	vergriffen

- 
- |            |  |      |
|------------|--|------|
| <b>115</b> | <b>Beitrag zur Reduzierung der Abwasseremissionen der Bleicherei beim Sulfatverfahren (1994)</b><br>Urban W.<br>ISBN 3-85234-001-2                         | 22,- |
| <b>116</b> | <b>Eigenüberwachung von Abwasserreinigungsanlagen für den Gewässerschutz (1994)</b><br>ÖWAV-Seminar 1994, TU-Wien<br>ISBN 3-85234-002-0                    | 25,- |
| <b>117</b> | <b>Abwasserreinigungskonzepte - Internationaler Erfahrungsaustausch über neue Entwicklungen (1995)</b><br>ÖWAV-Seminar 1994, TU Wien<br>ISBN 3-85234-003-9 | 25,- |
| <b>118</b> | <b>3 Jahre WRG-Novelle (1994)</b><br>29. ÖWAV-Seminar: Ottenstein 1994<br>ISBN 3-85234-004-7   | 19,- |
| <b>119</b> | <b>Landeskulturelle Wasserwirtschaft (1994)</b><br>anlässlich der Emeritierung von o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. H. Supersperg vergriffen                   |      |
| <b>120</b> | <b>Gewässerbetreuungskonzepte - Stand und Perspektiven (1994)</b><br>Beiträge zur Tagung an der BOKU 1994<br>ISBN 3-85234-010-1                            | 32,- |
| <b>121</b> | <b>Generelle Entwässerungsplanung im Siedlungsraum (1996)</b><br>ÖWAV-Seminar 1995, TU Wien<br>ISBN 3-85234-011-X  | 29,- |
| <b>122</b> | <b>Bedeutung von geowissenschaftlicher Zusatzinformation für die Schätzung der Transmissivitätsverteilung in einem Aquifer (1994)</b><br>Kupfersberger H.  | 18,- |
| <b>123</b> | <b>Modellierung und Regionalisierung der Grundwassermengenbildung und des Bodenwasserhaushaltes (1994)</b><br>Holzmann, H.                                 | 22,- |
| <b>124</b> | <b>Pflanzenkläranlagen - Stand der Technik, Zukunftsaspekte (1995)</b><br>ÖWAV-Seminar, BOKU Wien<br>ISBN 3-85234-014-4                                    | 22,- |
| <b>125</b> | <b>Abwasserreinigung - Probleme bei der praktischen Umsetzung des Wasserrechtsgesetzes, (1995)</b><br>ÖWAV-Seminar 1995, TU-Wien<br>ISBN 3-85234-015-2     | 32,- |
-

Band Nr		Preis €
126	<b>Konfliktfeld Landwirtschaft - Wasserwirtschaft (1995)</b> 30. ÖWAV-Seminar, Ottenstein 1995 ISBN 3-85234-016-0	29,-
127	<b>Alte und neue Summenparameter (1995)</b> ÖWAV-Seminar 1995, TU-Wien ISBN 3-85234-017-9	29,-
128	<b>Viruskontamination der Umwelt und Verfahren der Kontrolle (deutsch oder englisch) (1995)</b> 4. Symposium Univ.Prof.Dr. R. Walter ISBN 3-85234-019-5	gratis
129	<b>Einfluß von Indirekteinleitungen auf Planung und Betrieb von Abwasseranlagen (1996)</b> ÖWAV-Seminar 1996, TU-Wien ISBN 3-85234-020-9	vergriffen
130	<b>Zentrale und dezentrale Abwasserreinigung (1996)</b> 31. ÖWAV-Seminar, Ottenstein 1996 ISBN 3-85234-021-7	36,-
131	<b>Methoden der Planung und Berechnung des Kanalisationssystems (1996)</b> ÖWAV-Seminar 1996, BOKU-Wien ISBN 3-85234-022-5	29,-
132	<b>Scale and Scaling in Hydrology (1996)</b> Blöschl G. ISBN 3-85234-023-3	vergriffen
133	<b>Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (11) (1996)</b> Integrale Interpretation eines zeitgemäßen Gewässerschutzes ISBN 3-85234-024-0	12,-
134	<b>Ein Beitrag zur Charakterisierung von Belüftungssystemen für die biologische Abwasserreinigung nach dem Belebungsverfahren mit Sauerstoffzufuhrmessungen (1996)</b> Frey W. ISBN 3-85234-025-X	22,-
135	<b>Nitrifikation im Belebungsverfahren bei maßgebendem Industrieabwassereinfluß (1996)</b> Nowak O. ISBN 3-85234-026-8	36,-
136	<b>1. Wassertechnisches Seminar (1996)</b> Nebenprodukte von Desinfektion und Oxidation bei der Trinkwasseraufbereitung ISBN 3-85234-027-6	i.V.

Band Nr	Preis €
<b>137 Modellanwendung bei Planung und Betrieb von Belebungsanlagen (1997)</b> ÖWAV - Seminar 1997, TU-Wien ISBN 3-85234-028-4	32,-
<b>138 Nitrifikationshemmung bei kommunaler Abwasserreinigung (1997)</b> Schweighofer P. ISBN 3-85234-029-2	25,-
<b>139 Ein Beitrag zu Verständnis und Anwendung aerober Selektoren für die Blähschlammvermeidung (1997)</b> Prendl L. ISBN 3-85234-030-6	22,-
<b>140 Auswirkungen eines Kläranlagenablaufes auf abflußschwache Vorfluter am Beispiel der Kläranlage Mödling und des Krottenbaches (1997)</b> Franz A. ISBN 3-85234-031-4	25,-
<b>141 Neue Entwicklungen in der Abwassertechnik (1997)</b> ÖWAV - Seminar 1997, TU-Wien ISBN 3-85234-032-2	36,-
<b>142 Kulturtechnik und Wasserwirtschaft heute (11) (1997)</b> Abfallwirtschaft und Altlastensanierung morgen ISBN 3-85234-033-0	18,-
<b>143 Abwasserbeseitigung und Wasserversorgung in Wien (1997)</b> Eine ökonomische Beurteilung der Einnahmen, Ausgaben und Kosten Kosz M. ISBN 3-85234-034-9	22,-
<b>144 Raum-Zeitliche Variabilitäten im Geschiebehaushalt und dessen Beeinflussung am Beispiel der Drau (1997)</b> Habersack H. ISBN 3-85234-035-7	29,-
<b>145 Fortbildungskurs: Biologische Abwasserreinigung (1998)</b> ÖWAV - Seminar 1998, TU-Wien ISBN 3-85234-036-5	40,-
<b>146 2. Wassertechnisches Seminar (1998)</b> Desinfektion in der Trinkwasseraufbereitung ISBN 3-85234-037-3	i.V.
<b>147 Eigenüberwachung und Fremdüberwachung bei Kläranlagen (1998)</b> 32. ÖWAV-Seminar , Linz 1998 ISBN 3-85234-038-1	36,-

Band Nr		Preis €
148	<b>Grundwasserdynamik (1998)</b> ISBN 3-85234-039-C	36,-
149	<b>Die Tradition in der Kulturtechnik (1998)</b> Kastanek F. <b>Simulationsanwendung bei der Störung durch poröses Medium (1998)</b> Loiskandl W. ISBN 3-85234-040-4	22,-
150	<b>Auswirkungen von Niederschlagsereignissen und der Schneeschmelze auf Karstquellen (1998)</b> Steinkellner M. ISBN 3-85234-041-1	36,-
151	<b>Experiences with soil erosion models (1998)</b> ISBN 3-85234-042-X	29,-
152	<b>Ein Beitrag zur Optimierung der Stickstoffentfernung in zweistufigen Belebungsanlagen (1998)</b> Dornhofer K. ISBN 3-85234-043-8	25,-
153	<b>Hormonell aktive Substanzen in der Umwelt (1998)</b> ÖWAV / UBA Seminar 1998, BOKU Wien ISBN 3-58234-044-6	vergriffen
154	<b>Erfassung, Bewertung und Sanierung von Kanalisationen (1998)</b> ÖWAV Seminar 1999, BOKU Wien ISBN 3-8523-045-4	29,-
155	<b>Nährstoffbewirtschaftung und Wassergüte im Donauraum (1999)</b> ÖWAV - Seminar 1999, TU-Wien ISBN 3-85234-046-2	32,-
156	<b>Der spektrale Absorptionskoeffizient zur Bestimmung der organischen Abwasserbelastung (1999)</b> UV-Seminar 1998, Duisburg ISBN 3-85234-047-0	22,-
157	<b>Bedeutung und Steuerung von Nährstoff- und Schwermetallflüssen des Abwassers (1999)</b> Zessner M. ISBN 3-85234-048-9	25,-
158	<b>Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Stoffbilanzen in der Abfallwirtschaft (1999)</b> Rechberger H. ISBN 3-85234-049-7	vergriffen

Band Nr		Preis €
<b>159</b>	<b>Sicherheit und Gesundheitsschutz auf Abwasseranlagen und deren Evaluierung (2000)</b> ÖWAV – Seminar 2000, TU-Wien ISBN 3-85234-050-0	22,-
<b>160</b>	<b>Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hydrologie alpiner Einzugsgebiete (2000)</b> Hebenstreit K. ISBN 3-85234-051-9	25,-
<b>161</b>	<b>Innovative Messtechnik in der Wasserwirtschaft (2000)</b> <b>Präsentation eines Forschungsprojektes</b> ÖWAV – Seminar 2000, BOKU – Wien ISBN 3-85234-052-7	vergriffen
<b>162</b>	<b>Sickerwasser und Oberflächenabdichtung auf Reaktordeponien (2000)</b> ÖWAV - Seminar 2000, Wirtschaftskammer Wien ISBN 3-85234-053-5	25,-
<b>163</b>	<b>Abfall- und Abwasserentsorgung in kleinen Verhältnissen (2000)</b> ÖWAV - Seminar 2000, Ottenstein ISBN 3-85234-054-3	25,-
<b>164</b>	<b>Niederschlag-Abfluss-Modellierung – Simulation und Prognose (2000)</b> ÖWAV-Seminar 2000, TU Wien ISBN 3-85234-055-1	i.V.
<b>165</b>	<b>Mehrdimensionale Abflussmodellierung am Beispiel der Lafnitz (2000)</b> Habersack, H. / Mayr, P. / Girlinger, R. / Schneglberger, St. ISBN 3-85234-056-x	25,-
<b>166</b>	<b>Anpassung von Kläranlagen – Planung und Betrieb (2001)</b> ÖWAV-Seminar 2001, TU Wien ISBN 3-85234-057-8	40,-
<b>167</b>	<b>Bepflanzte Bodenfilter zur weitergehenden Reinigung von Oberflächenwasser und Kläranlagenabläufen (2001)</b> Laber J. ISBN 3-85234-058-6	25,-
<b>168</b>	<b>Kanalbetrieb und Niederschlagsbehandlung (2001)</b> ÖWAV-Seminar 2001, BOKU Wien. ISBN 3-85234-059-4	29,-

Band Nr	Preis €
<b>169</b> <b>Development of a Simulation Tool for Subsurface Flow Constructed Wetlands (Entwicklung eines Simulationsmodells für bepflanzte Bodenfilter) (2001)</b> Langergraber G. ISBN 3-85234-060-8	25,-
<b>170</b> <b>Simulation von Niederschlagszeitreihen mittels stochastischer Prozess-modelle unter Berücksichtigung der Skaleninvarianz (2001)</b> Bogner ISBN 3-85234-061-6	i.V.
<b>171</b> <b>Sewage Sludge Disposal – Sustainable and/or Reliable Solutions (2001)</b> ÖWAV / EWA Workshop 2001, TU-Wien ISBN 3-85234-062-4	25,-
<b>172</b> <b>Stickstoffentfernung mit Biofiltern (2002)</b> Nikolavcic B. ISBN 3-85234-063-2	30,-
<b>173</b> <b>Anaerobe Abwasserreinigung: Beeinflussende Faktoren der Versäuerung eines Zitronesäurefabrikabwassers (2002)</b> Moser D. ISBN 3-85234-064-0	20,-
<b>174</b> <b>Gewässerschutz bei Entlastungsbauwerken der Mischkanalisation (2002)</b> Fenz R. ISBN 3-85234-065-9	25,-
<b>175</b> <b>Wechselwirkung von physikalischen, chemischen und biotischen Prozessen in aquatischen Systemen (2002)</b> Kreuzinger N. ISBN 3-85234-066-7	i.V.
<b>176</b> <b>Benchmarking in der Abwasserentsorgung (2002)</b> ÖWAV Workshop Februar 2002, TU-Wien ISBN 3-85234-067-5	30,-
<b>177</b> <b>Klärschlamm (2002)</b> <b>Möglichkeiten und Verfahren zur Verwertung / Entsorgung ab 2004</b> ÖWAV Seminar April 2002, Wirtschaftskammer Österreich <b>Schlammbehandlung und Entsorgung</b> ÖWAV / TU – Workshop September 2000, TU-Wien ISBN 3-85234-068-3	30,-
<b>178</b> <b>Arzneimittel in der aquatischen Umwelt (2002)</b> ÖWAV Seminar 2002, BOKU Wien ISBN 3-58234-069-1	30,-

- 
- |            |  |      |
|------------|--|------|
| <b>179</b> | <b>Untersuchungen zur Entfernung natürlicher radioaktiver Stoffe aus Trinkwasser und Überblick zu deren Verbreitung in Österreich (2002)</b><br>Staubmann, K.<br>ISBN 3-85234-070-5  | 25,- |
| <b>180</b> | <b>Zum Fließwiderstandsverhalten flexibler Vegetation (2002)</b><br>Stephan, U.<br>ISBN 3-85234-071-3  | 30,- |
| <b>181</b> | <b>Understanding and Estimating Floods at the Regional Scale (2002)</b><br>Merz, R.<br>ISBN 3-85234-072-1  | 30,- |
| <b>182</b> | <b>Kanalmanagement - Neues Schlagwort oder alte Herausforderung ? (2003)</b><br>ÖWAV Seminar 2003, BOKU Wien<br>ISBN 3-85234-073-X   | 30,- |
| <b>183</b> | <b>Fortbildungsseminar Abwasserentsorgung (2003)</b><br>ÖWAV Seminar Februar 2003, TU-Wien<br>ISBN 3-85234-074-8   | 40,- |
| <b>184</b> | <b>Klärschlamm (2003)</b><br>ÖWAV Seminar November 2003, TU-Wien<br>ISBN 3-85234-075-6   | 30,- |
| <b>185</b> | <b>Nachhaltige Nutzung von Wasser (2003)</b><br>Endbericht zu Modul MU11 im Rahmen des Forschungsschwerpunktes „Nachhaltige Entwicklung österreichischer Kulturlandschaften“<br>ISBN 3-85234-076-4                                       | 30,- |
| <b>186</b> | <b>Inspektion von Kanalisationen (inkl. Umsetzung ÖNORM EN 13508-2)</b><br>ÖWAV-Informationsveranstaltung 2004, BOKU Wien<br>ISBN 3-85234-077-2  | 30,- |
| <b>187</b> | <b>Datengewinnung, -verwaltung und -nutzung in der Wassergütwirtschaft (2004)</b><br>ÖWAV Seminar März 2004, TU-Wien<br>ISBN 3-85234-078-0   | 40,- |
| <b>188</b> | <b>CSB-Elimination in höchstbelasteten Belebungsstufen und ihre Auswirkung auf die Stickstoffelimination von zweistufigen Anlagen unter dem Gesichtspunkt der mathematischen Modellierung (2004)</b><br>Haider, S.<br>ISBN 3-85234-079-9 | 30,- |
| <b>189</b> | <b>Beitrag zum Benchmarking von Abwasserreinigungsanlagen (2004)</b><br>Lindtner, S.<br>ISBN 3-85234-080-2   | 25,- |
-

Band Nr		Preis €
<b>190</b>	<b>Öffentlichkeitsarbeit auf Kläranlagen (2004)</b> ÖWAV Seminar Juni 2004, St. Pölten ISBN 3-85234-081-0	30,-
<b>191</b>	<b>Das Verhalten ausgewählter organischer Spurenstoffe bei der biologischen Abwasserreinigung (2004)</b> Clara, M. ISBN 3-85234-082-9	25,-
<b>192</b>	<b>Chemie in der Wassergütewirtschaft (2005)</b> ÖWAV Seminar Februar 2005, TU Wien ISBN 3-85234-083-7	45,-
<b>193</b>	<b>Three dimensional numerical modelling of turbulent river flow using polyhydral finite volumes (2005)</b> Trithart, M. ISBN 3-85234-084-5	30,-
<b>194</b>	<b>Abwasserentsorgung im ländlichen Raum (2005)</b> ÖWAV Seminar November 2005, BOKU Wien ISBN 3-85234-085-3	Preis auf Anfrage
<b>195</b>	<b>Betriebserfahrungen moderner Kläranlagen (2006)</b> ÖWAV Seminar Februar 2006, TU-Wien ISBN 3-85234-086-1	40,-
<b>196</b>	<b>Kanalmanagement 2006 – Praxisberichte und Projektergebnisse (2006)</b> ÖWAV-Informationsveranstaltung 2006, BOKU ISBN 3-85234-087-X	30,-
<b>197</b>	<b>Methoden der hydrologischen Regionalisierung (2006)</b> ÖWAV-Seminar 2006, TU Wien ISBN 3-85234-088-8	30,-
<b>198</b>	<b>Process based regionalisation of low flows (2006)</b> Laha, G. ISBN-10 3-85234-089-6 ISBN-13 978-3-85234-089-0	30,-
<b>199</b>	<b>Hochwasservorhersage – Erfahrungen, Entwicklungen &amp; Realität (2006)</b> ÖWAV-Seminar 2006, TU Wien ISBN-10 3-85234-090-X ISBN-13 978-3-85234-090-6	30,-

- 
- |            |   |      |
|------------|---|------|
| <b>200</b> | <b>Scale and stream network structure in geostatistical hydrological analyses (Geostatistische hydrologische Analysen unter Berücksichtigung von Skalenaspekten und Gewässernetzstruktur) (2007)</b><br>Skøien, J. O.<br>ISBN-10 3-85234-091-8<br>ISBN-13 978-3-85234-091-3 | i.V. |
| <b>201</b> | <b>Der kombinierte Ansatz, das Wechselspiel zwischen Emission und Immission - Neue Herausforderungen bei Abwasserentsorgung und Gewässerschutz (2007)</b><br>ÖWAV Februar Seminar 2007, TU-Wien<br>ISBN-13 978-3-85234-093-7  | 45,- |
| <b>202</b> | <b>Betrieb von Kläranlagen - Grundkurs (2007)</b><br>völlige Neubearbeitung - 3. Auflage 2007<br>ISBN-13 978-3-85234-094-4  | 70,- |
| <b>203</b> | <b>Kanalmanagement 2007 – Unterirdische Kanalsanierung (2007)</b><br>ÖWAV Infoveranstaltung 17. April 2007 an der BOKU Wien<br>ISBN-13 978-3-85234-095-1  | 30,- |
| <b>204</b> | <b>Leitungskataster für Trink - und Abwassernetze (2007)</b><br>ÖWAV Infoveranstaltung 30. Mai 2007, Wien<br>ISBN-13 978-3-85234-096-8  | 30,- |
| <b>205</b> | <b>Geruchs- und Korrosionsprobleme in der Kanalisation (2007)</b><br>ÖWAV-Seminar 2007, TU Wien<br>ISBN 978-3-85234-097-5   | 35,- |
| <b>206</b> | <b>Extreme Abflussereignisse: Dokumentation – Bedeutung – Bestimmungsmethoden (2007)</b><br>ÖWAV-Seminar 2007, TU Wien<br>ISBN 978-3-85234-098-2  | 30,- |
| <b>207</b> | <b>1. Österreichischer Kleinkläranlagentag (2007)</b><br>ÖWAV-Seminar 2007, BOKU<br>ISBN 978-3-85234-099-9  | 30,- |
| <b>208</b> | <b>Biologische Abwasserreinigung - Aktuelle Entwicklungen</b><br>ÖWAV Februar Seminar 2008, TU-Wien<br>ISBN 978-3-85234-100-2   | 45,- |
| <b>209</b> | <b>Kanalmanagement 2008 – Betrieb und Mischwasser (2008)</b><br>ÖWAV Infoveranstaltung 27. März 2008 an der BOKU Wien<br>ISBN 978-3-85234-101-9   | 30,- |
| <b>210</b> | <b>2. Österreichischer Kleinkläranlagentag</b><br>ÖWAV-Seminar 2008, BOKU<br>ISBN 978-3-85234-102-6   | 30,- |
-

- 
- |            |   |      |
|------------|---|------|
| <b>211</b> | <b>Zur Kenntnis der Schwefelwasserstoffbildung und -vermeidung in Abwasserdruckleitungen</b><br>Saračević E.<br>ISBN 978-3-85234-103-3  | 30,- |
| <b>212</b> | <b>Neue Herausforderungen an die Wassergütewirtschaft</b><br>ÖWAV Februar Seminar 2008, TU-Wien<br>ISBN 978-3-85234-104-0   | 45,- |
| <b>213</b> | <b>Hochwasserentstehung in der nördlichen Grauwackenzone</b><br><b>Beobachtung - Messung - Modellierung</b><br>Endbericht für Forschungsprojekte im Zeitraum 1990 bis 2008<br>ISBN: 978-3-85234-105-7 | 30,- |
| <b>214</b> | <b>Linking Land Use to Stream Pollution: Pollutant Dynamics and Management Implications</b><br>Yillia, Paul T.<br>ISBN 978-3-85234-106-4  | i.V. |
| <b>215</b> | <b>Kanalmanagement 2009</b><br>ÖWAV-Seminar 2009, BOKU<br>ISBN 978-3-85234-107-1  | i.V. |
| <b>216</b> | <b>Hochwässer</b><br><b>Bemessung, Risikoanalyse und Vorhersage</b><br>ÖWAV-Seminar 2009, TU Wien<br>ISBN 978-3-85234-108-8   | 30,- |

## **Die Bände sind zu beziehen bei:**

Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement 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, 208, 211, 212, 214

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie  
der Technischen Universität Wien  
Karlsplatz 13/222, 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, 213, 216

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 Siedlungswasserbau, Industrierwasserwirtschaft und Gewässerschutz  
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, 207, 209, 210, 215

Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft  
der Universität für Bodenkultur  
Muthgasse 18, A-1190 Wien

**Band:** 119, 149, 151, 170

