

Neue Methoden für das Hochwasserrisikomanagement

New methods for flood risk management

Von G. Blöschl, Z. Horváth, A. Kiss, J. Komma, T. Nester,
R. A. P. Perdigão, A. Viglione und J. Waser, Wien

Mit 16 Abbildungen und 2 Tabellen



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



Dipl.-Ing.
Zsolt Horváth



Mag.
Dr. Andrea Kiss



Dipl.-Ing.
Dr. Jürgen Komma



Dipl.-Ing.
Dr. Thomas Nester



Mag.
Dr. Rui A. P. Perdigão, DSc



Dipl.-Ing.
Dr. Alberto Viglione



Dipl.-Ing.
Dr. Jürgen Waser

Kurzfassung

Der Umgang mit Hochwässern erfuhr in den letzten Jahren eine Weiterentwicklung von einer Konzentration auf einzelne Schutzbauwerke zu einer integralen Betrachtung des gesamten Flussgebietes und unterschiedlicher Maßnahmen im Rahmen des Hochwasserrisikomanagements. Für die Umsetzung dieser Maßnahmen sind geeignete Methoden erforderlich. Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über die neuen methodischen Entwicklungen zu den folgenden Maßnahmenthematiken: Gefahrenzonenplanung, überregionales Zusammenwirken von Hochwässern, Restrisiko (Hochwasservorsorge); Flächenrückhalt, lineare Schutzmaßnahmen, Hochwasserretention (Hochwasserschutz); Bürgerbeteiligung, Öffentlichkeitsarbeit und Bildung (Bewusstseinsbildung); Hochwasserwarnung, Katastrophenschutzpläne (Vorbereitung); Beurteilung von Hochwasserschäden, Ereignisdokumentation (Nachsorge). Die neuen Methoden sollen zu einem noch zuverlässigeren und effizienteren Management von Hochwasserrisiken beitragen.

Abstract

Flood risk management has recently evolved from a focus on individual flood protection structures to a more integrated approach at the river basin scale that considers a diversity of

management measures. Appropriate methods are needed to assist in the implementation of these measures. This paper reviews new methodological developments on the following themes: hazard mapping, large scale interactions of floods, residual risk (flood prevention); retaining water in the landscape, linear protection measures, flood retention (flood mitigation); public participation, outreach and education (awareness); flood warning, emergency plans (preparation); assessment of flood damage, event documentation (recovery). The new methods are intended to contribute to even more reliable and more efficient management of flood risks.

1. Viele Hochwässer in jüngster Zeit

Österreich hatte in den letzten Jahren viele große Hochwasserkatastrophen zu erleiden. Das Donauhochwasser im Juni 2013 richtete erheblichen Schaden an. Bei Passau war das Hochwasser fast so hoch wie das größte bekannte Ereignis der Geschichte im August 1501, Oberösterreich erlitt massive Überschwemmungen (Abb. 1), und in Wien betrug der Durchfluss 11000 m³/s, der Größtwert seit Beginn der Durchflussmessungen im Jahr 1828 (Blöschl et al., 2013a). Dieses Extremhochwasser ist jedoch kein Einzelfall in der jüngsten Zeit, denn mehrere – meist räumlich stärker beschränkte – Ereignisse waren seitdem zu verzeichnen, wie im Mai 2014 in Niederösterreich,



Abb. 1: Hochwasser 2013 in Oberösterreich.
Fotos: Bundesheer/Kermer.
Fig. 1: 2013 flood in Upper Austria. Photos: Bundesheer/Kermer.

im Juli 2014 im Pinzgau und im Juni 2015 im Bezirk Landeck, oder kurz zuvor im November 2012 im Süden Kärntens. Auch international waren die letzten Jahre äußerst hochwasserreich. 2011 traten Flutkatastrophen in Australien, am Mississippi und in Thailand auf; 2012 und 2013 in Großbritannien; 2014 am Balkan und in Pakistan; und 2015 in Südafrika, in Assam/Indien und an der Côte d'Azur, um nur einige der extremsten Ereignisse zu nennen.

Gegen den Hintergrund dieser Ereignisse, kommt dem Bauingenieurwesen die verantwortungsvolle und aktuelle Aufgabe zu, Lösungen für den Umgang mit den Hochwässern zu entwickeln und mitumzusetzen.

2. Die EU Hochwasserrichtlinie und Hochwasserrisikomanagement

Der Umgang mit Hochwässern war in den letzten Jahren einem deutlichen Wandel unterworfen, der durch die vielen jüngsten Hochwässer mitbestimmt war. Während in der Vergangenheit oft Einzelmaßnahmen im Zentrum des Interesses waren, ist die Betonung jetzt auf der Kombination vieler verschiedener Maßnahmen, die je nach Situation unterschiedlich gewichtet werden, sowie auf der Betrachtung des gesamten Flussgebietes mit Ober- und Unterliegern. Dementsprechend ist im Vokabular der Begriff „Hochwasserschutz“ dem aktuelleren Begriff des „integrierten Hochwasserrisikomanagements“ gewichen. Diese neue Sichtweise hat sich auch in der rechtlichen Situation niedergeschlagen. 2007 erschien die EU Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (EU, 2007). Diese Richtlinie schafft europaweit einen Rahmen für den Umgang mit Hochwasserrisiken. Die Zielsetzung ist die Verringerung der Auswirkung von Hochwässern auf die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das Kulturerbe und die wirtschaftlichen Tätigkeiten. Der grundsätzliche Ansatz sieht eine integrierte Sichtweise vor mit Betrachtung des gesamten Einzugsgebietes und Einsatz verschiedener Maßnahmen, wobei dem Hochwasserrückhalt eine besonders wichtige Bedeutung zukommt. Konkret sieht die Richtlinie drei Schritte bei der Umsetzung vor:

- Vorläufige Risikobewertung, bei der Gebiete mit potentiell Hochwasserrisiko ausgewiesen werden;

- Gefahren- und Risikokarten, die aus Überflutungsflächen (und -tiefen) für kleine, mittlere und extreme Hochwässer sowie den Nutzungen bestehen;
- Risikomanagementpläne, die die existierenden und geplanten Maßnahmen für Flussgebiete ausweisen.

Die Richtlinie sieht einen Konsultationsprozess mit Bürgerbeteiligung vor, sowie eine Aktualisierung aller Unterlagen in regelmäßigen Abständen. Die nationale Umsetzung erfolgte in Österreich im Wasserrechtsgesetz. So heißt es im § 55 beispielsweise: „§ 55f. (1) Der Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft hat mit Verordnung auf der Grundlage der gemäß § 55k erstellten Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten auf der Ebene der Flussgebietseinheiten für die Gebiete mit potenziellem signifikantem Hochwasserrisiko (§ 55j) bis zum 22. Dezember 2015 koordinierte Hochwasserrisikomanagementpläne zu erstellen und zu veröffentlichen.“ Der Konsultationsprozess ist etwa in BMLFUW (2015) dargestellt. Ähnliche Vorgangsweisen gibt es in anderen EU-Ländern bzw. Verwaltungseinheiten, z.B. in Bayern und Baden-Württemberg (StMUUV, 2014; UMBW, 2014).

Die Maßnahmen der Risikomanagementpläne folgen dem Hochwasserrisiko-Kreislauf. Die Idee ist dabei, nicht ein einzelnes Hochwasserereignis zu betrachten, sondern eine Abfolge von Ereignissen nach dem Grundsatz „nach dem Hochwasser ist vor dem Hochwasser“. Je nach Konzeptualisierung kann der Hochwasserrisiko-Kreislauf mit verschiedenen Elementen dargestellt werden. BMLFUW (2015) folgend zeigt Abb. 2 typische Elemente, bestehend aus Vorsorge, Schutz, Bewusstseinsbildung, Vorbereitung und Nachsorge.

Jedes der Elemente umfasst verschiedene Maßnahmen. Die Vorsorge, beispielsweise, umfasst die Gefahrenzonenplanung, regionale Planungen unter Berücksichtigung des räumlichen Zusammenwirkens von Hochwässern, und den Umgang mit dem Restrisiko. Abb. 2 zeigt typische Maßnahmen für jedes der Elemente des Risikokreislaufes.

Um diese Maßnahmen umzusetzen, sind geeignete Methoden erforderlich. Manche dieser Methoden wurden erst vor kurzem entwickelt bzw. sind derzeit in Entwicklung. Ziel dieses Artikels

ist es, die neuesten Methoden vorzustellen, die den Anforderungen gerecht werden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über typische Maßnahmen und jeweils dazu geeignete neue Methoden. Die vorliegende Arbeit ordnet die Methoden im Rahmen der Hochwasserrisikomanagementpläne ein und zeigt ihre Stärken und Grenzen auf. Die Methoden sind entsprechend den Maßnahmen der Elemente des Risikokreislaufes unter die Kapitel Vorsorge, Schutz, Bewusstseinsbildung, Vorbereitung und Nachsorge gegliedert.

3. Vorsorge

3.1. Gefahrenzonenplanung – Schnelle 2D-Simulationen

Während in der Vergangenheit die Gefahrenzonenplanung vor allem von beobachteten Hochwasserereignissen ausging, besteht heute die Vorgangsweise daraus, mit Hilfe hydrodynamischer Modelle die hochwassergefährdeten Flächen auszuweisen. Dafür werden meist zweidimensionale (2D) Simulationsmodelle herangezogen. Diese werden auf Basis digitaler Geländemodelle, der Geländerauigkeit und den entsprechenden hydrologischen Randbedingungen (Zuflusswellen) an beobachtete Ereignisse angepasst und damit Szenarien für zukünftige, größere Ereignisse simuliert. Ein beträchtliches Problem waren bisher bei diesen Modellen die langen Rechenzeiten. Bei mehreren hunderttausenden Rechenelementen – wie das für praktische Anwendungen oft erforderlich ist – dauert die Rechnung of länger als die tatsächlich ablaufende Zeit während des Hochwassers. Das ist für die Praxis keine befriedigende Situation.

Neue numerische Verfahren ermöglichen es nun in Verbindung mit der Nutzung von Graphikprozessoren die Rechenzeiten deutlich zu reduzieren. Die Reduktion hängt von der jeweiligen

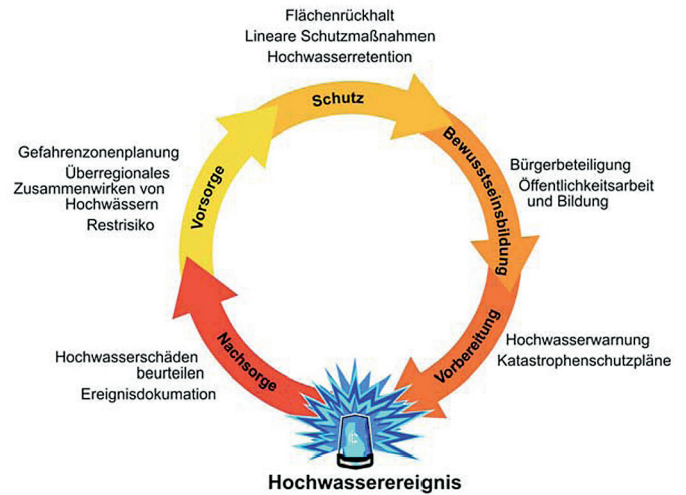


Abb. 2: Kreislauf des Hochwasserrisikomanagements.
Fig. 2: Flood risk management cycle.

Konfiguration ab, kann aber bis zu einem Faktor von 20 und mehr betragen. Das neue numerische Verfahren von Horváth et al. (2015) löst das Saint-Venant System der Flachwasser-gleichungen. Das Verfahren ist massenerhaltend und stimmt mit den analytischen Lösungen der Gleichungen überein. Ein besonderer Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass an den Uferbereichen (Übergang trocken-nass) – im Gegensatz zu den meisten existierenden Verfahren – keine numerischen Artefakte mit überhöhten Fließgeschwindigkeiten auftreten. Diese realisti-schen Fließgeschwindigkeiten tragen zur Reduktionen der

Tabelle 1: Maßnahmen und neue Methoden des Hochwasser-risikomanagements.

Table 1: Measures and new methods of flood risk manage-ment.

Risiko-Kreislauf	Maßnahmen	Neue Methoden
Vorsorge:		
	Gefahrenzonenplanung	Schnelle 2D Simulationen
	Überregionales Zusammenwirken von Hochwässern	Von Szenarien zu Wahrscheinlichkeiten
	Restrisiko	Mit dem Unerwarteten rechnen
Schutz:		
	Flächenrückhalt	Simulation flächenwirtschaftlicher Maßnahmen
	Lineare Schutzmaßnahmen	Informationserweiterung zur Reduktion von Unsicherheiten der Bemessungsab-flüsse
	Hochwasserretention	Von Hochwasserscheiteln zur Wellenform
Bewusstseinsbildung:		
	Bürgerbeteiligung	Abschätzung des Mehrwertes
	Öffentlichkeitsarbeit und Bildung	Langfristige Interaktionen zwischen Hochwässern und menschlichen Aktivi-täten verstehen
Vorbereitung:		
	Hochwasserwarnung	Genauere längerfristige Prognosen mit Vertrauensbereichen
	Katastrophenschutzpläne	Simulationssoftware zur Unterstützung von Übungen
Nachsorge:		
	Beurteilung von Hochwasserschäden	Visualisierungen für Quick-Screening
	Ereignisdokumentation	Einordnung in den historischen Kontext

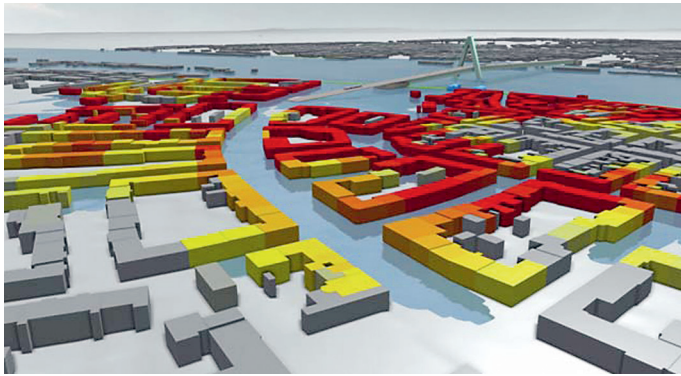


Abb. 3: Überflutungssimulation mit einem zweidimensionalen hydrodynamischen Modell. Die Gebäude wurden gemäß Einstauhöhe eingefärbt. Neue Technologien wie der Einsatz von Graphikprozessoren und neue numerische Schemata erlauben eine massive Verkürzung der Rechenzeiten. Nach Horváth et al. (2015).

Fig. 3: Flooding simulations of a two-dimensional hydrodynamic model. The buildings are colour coded according to water depth. New technologies such as the use of graphic processing units and new numerical schemes allow massive reductions in computation times. After Horváth et al. (2015).

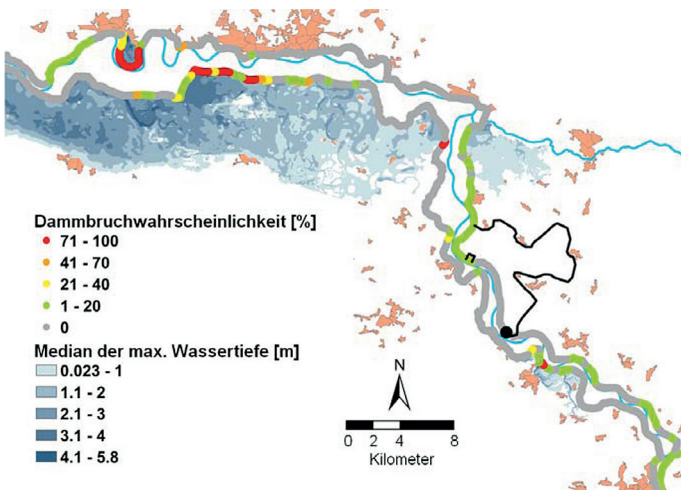


Abb. 4: Überflutungstiefen für eine Wahrscheinlichkeit von 1:500 in einem Jahr. Neue Monte Carlo Methoden erlauben es, das Zusammenwirken von Teileinzugsgebieten korrekt zu beschreiben. Aus Vorogushyn et al. (2012).

Fig. 4: Water depths according to a probability of 1:500 in a year. New Monte Carlo methods allow a consistent treatment of the interplay of tributaries at confluences. From Vorogushyn et al. (2012).

Rechenzeiten bei, da längere Rechenzeitschritte gewählt werden können. Zusätzlich implementierte Horváth et al. (2015) das neue Verfahren auf Graphikprozessoren (GPU) anstatt auf den Hauptrechenheiten (CPU), wodurch eine massive Parallelisierung möglich ist, und die Rechenzeit weiter erheblich verkürzt werden kann.

Abb. 3 zeigt ein Beispiel der Simulationen in einem städtischen Gebiet. Das Verfahren beschleunigt einerseits die Rechenläufe, andererseits ermöglicht es auch, größere Gebiete mit mehreren Millionen Rechenelementen in einem Lauf zu rechnen. Damit lässt sich, je nach Anforderung, eine bessere räumliche Auflösung (und damit eine detailliertere Abbildung von Abfluss- oder Rückhalteräumen) oder eine größere räumliche Abdeckung erzielen. Beides ist für die Erstellung von Gefahrenzonenplänen ein wesentlicher Vorteil.

3.2. Überregionales Zusammenwirken von Hochwässern – Von Szenarien zu Wahrscheinlichkeiten

Eine der wichtigen Zielsetzungen der Hochwasserrisikomanagementpläne ist es, das räumliche Zusammenwirken des Hochwassers in Teilgebieten im Zusammenhang mit Maßnahmen in die Planung aufzunehmen. Das ist besonders für großräumige Hochwässer wie das im Juni 2013 wichtig. Um dieses Zusammenwirken auch in Hinblick auf die Auftretenswahrscheinlichkeit zutreffend zu beschreiben, ist es nicht mehr ausreichend, einzelne Szenarien zu untersuchen. Stattdessen müssen eine Vielzahl von Hochwässern unterschiedlicher Größe und mit verschiedenen räumlichen Verteilungen simuliert werden. Die in der Hochwasserrichtlinie vorgesehenen kleinen, mittleren und extremen Hochwässer werden in der Regel über die Auftretenswahrscheinlichkeiten der Scheitelabflüsse definiert entsprechend Jährlichkeiten von 30, 100 bzw. 300 Jahren.

Neue Methoden, die derartige Simulationen erlauben, gehen von einem stochastischen Niederschlagsmodell (Wettergenerator) aus. Mit Hilfe von Monte Carlo Simulationen werden lange Zeitreihen des Niederschlages (und anderen Klimaparametern wie der Lufttemperatur) generiert, die als Eingangsgrößen in ein Niederschlag-Abflussmodell dienen. Aus langen Zeitreihen des simulierten Abflusses lassen sich die entsprechenden Auftretenswahrscheinlichkeiten bestimmen. Rogger et al. (2011, 2012) zeigte die Vorteile dieser Vorgangsweise für Gebiete in Tirol auf. In ähnlicher Weise kann man nun flächendetailliert verfahren mittels zweidimensionaler Niederschlagssimulation und flächendetaillierten Abflussmodellen (siehe z.B. Burton et al., 2008; Viglione et al., 2010). Aus der Vielzahl von Abflussereignissen wird eine Vielzahl von zweidimensionalen Überflutungssimulationen durchgeführt. Das Ergebnis ist dann nicht mehr, wie bisher, etwa ein Szenario für „ein hundertjährliches Ereignis“, sondern die Flächen die jeweils mit einer Jährlichkeit von 100 überflutet werden. Beim Zusammenwirken von Teilgebieten und verschiedenen Maßnahmen kann sich das Ergebnis des neuen, stochastischen Ansatzes von den bisherigen Szenarien wesentlich unterscheiden. Der stochastische Ansatz ist im Sinne der Hochwasserrichtlinie der Zutreffende.

Abb. 4 zeigt ein Beispiel für eine derartige stochastische Simulation. Dargestellt sind die Überflutungstiefen, die jeweils mit einer Jährlichkeit von 500 Jahren zu erwarten sind. In diesem Fall wird auch das Zusammenwirken des Wellenablaufes mit möglichen Dammbüchen statistisch zutreffend beschrieben. Gerade für überörtliche Planungen der Raumnutzung ist das eine wichtige Information.

3.3. Restrisiko – Mit dem Unerwarteten rechnen

Die Gefahrenzonenplanung wird laut EU Richtlinie für kleine, mittlere und extreme Hochwässer durchgeführt, wobei die extremen Hochwässer typischerweise mit einer Jährlichkeit von 300 Jahren beziffert werden. Allerdings gibt es größere Hochwässer. Dem Hochwasser im August 2002 im Kampgebiet wird beispielsweise eine größere Jährlichkeit zugeordnet. Der Höchstabfluss des Kamp bei Zwettl war damals 460 m³/s, das ist fast das Dreifache des größten in den hundert Jahren zuvor beobachteten Abflusses (160 m³/s im Jahr 1911, Gutknecht et al. 2002). Ein anderes Beispiel ist ein lokales Ereignis im Jahr 1913 im Stiftingtal bei Graz bei dem 650 mm Niederschlag in 4 Stunden gefallen sind (Forchheimer, 1913; Sivapalan und Blöschl, 1998). Solche außergewöhnlichen Ereignisse können auch in Zukunft auftreten. Im österreichischen Donauegebiet könnte ein Niederschlag wie im September 1899 mit hoher Vorfeuchte des Bodens wie im Juni 2013, ev. mit höherer Schnee-

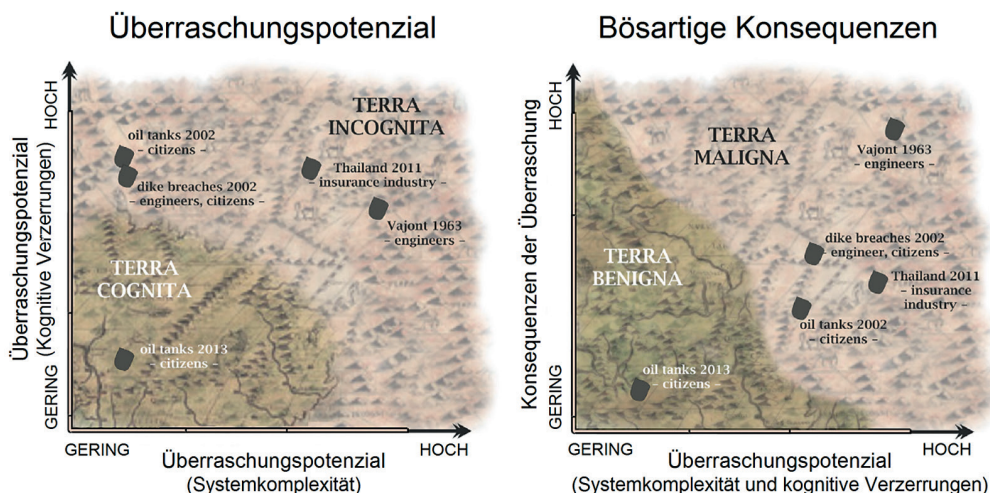
fallgrenze, zu einem deutlich größeren Hochwasser als 2013 führen (Blöschl et al., 2013a). Zu solchen Extremsituationen kommt es, wenn sich mehrere ungünstige Faktoren überlagern. Für den Fall, dass Extremhochwässer das Schutzniveau überschreiten, spricht man vom Restrisiko. Ein wichtiger Aspekt des Umganges mit dem Restrisiko ist die Abschätzung des damit zu erwartenden Schadens (d.h. das Risiko). Dieses wird als Produkt des Schadens eines Einzelereignisses und dessen Auftretenswahrscheinlichkeit ermittelt, gemittelt über alle möglichen Ereignisse. Kenntnis des Restrisikos ist z.B. erforderlich für die private Risikovorsorge durch Versicherungen. Das war auch eine der Zielsetzungen des HORA Projektes (Merz et al., 2008) in Österreich. Neue Schadensmodelle (z.B. Schröter et al., 2014) in Verbindung mit Monte Carlo Simulationen erlauben eine genauere Abschätzung des Restrisikos (ApeI et al., 2006). Neben den finanziellen Aspekten sind in Restrisikogebieten für den Überlastfall noch andere Vorsorgemaßnahmen zu treffen wie Beschilderung, hochwasserangepasstes Bauen und Alarmpläne. Der Überlastfall ist wegen der Überlagerung mehrerer ungünstiger Faktoren schwer zu greifen, denn es kommt oft das Überraschungsmoment hinzu. Merz et al. (2015) entwickelten ein Konzept für den Umgang mit Überraschungen bei Hochwässern. Sie machten zwei Ursachen für Überraschung aus: (1) die Komplexität des Hochwasserrisikosystems, wegen Nichtlinearitäten, Interdependenzen und Nichtstationarität und (2) kognitive Verzerrungen in der menschlichen Wahrnehmung und Entscheidungsfindung. Sie verwendeten die Metapher Terra incognita und Terra maligna, um unbekannte und bösartige Hochwasser-situationen aus der Sicht der Akteure (Ingenieure, Betroffene) zu veranschaulichen (Abb. 5). Das Aufschwimmen von Öltanks beispielsweise war beim Ereignis im August 2002 in der Terra incognita und in der Terra maligna anzusiedeln; beim Ereignis 2013 war letzteres nicht mehr der Fall, da Öltanks meist am Boden befestigt worden waren. Um die negativen Konsequenzen des Überraschungsmomentes möglichst hintanzuhalten sind robuste Instrumente des Risikomanagement wichtig, die unabhängig von den Ursachen, der Größe und dem Charakter zukünftiger Hochwasserereignisse eine positive Wirkung entfalten (z.B. überströmbare Dammstrecken, Blöschl et al., 2013b).

4. Schutz

4.1. Flächenrückhalt – Simulation flächenwirtschaftlicher Maßnahmen

Ein wichtiger Grundsatz im neuen Umgang mit Hochwässern ist es, die Hochwässer nicht erst dort, wo sie Schaden anrichten, sondern möglichst am Entstehungsort zu reduzieren.

Abb. 5: Umgang mit dem Restrisiko. Links: Überraschungspotenzial ausgedrückt als Metapher der Terra incognita. Jedes Ereignis wird aus der Perspektive einer bestimmten Gruppe von Akteuren wie Betroffene oder Ingenieuren dargestellt. Rechts: Potenzial bösartiger Folgen ausgedrückt als Metapher der Terra maligna. Aus Merz et al. (2015).
 Fig. 5: Dealing with residual risks. Left: Potential for surprise illustrated by the metaphor of terra incognita. Each event is linked to the perspective of a specific group of stakeholders such as citizens or engineers. Right: potential of malicious consequences illustrated by the metaphor of terra maligna. From Merz et al. (2015).



Dies kann – bis zu einem gewissen Grad – über flächenwirtschaftliche Maßnahmen erfolgen. In Siedlungsgebieten ist es sinnvoll, einen möglichst geringen Anteil der Flächen zu versiegeln, sodass während eines Ereignisses möglichst viel Wasser direkt in den Boden infiltrieren kann, und möglichst wenig Wasser an der Oberfläche abfließt. Auch die Umwandlung von landwirtschaftlichen Flächen in Wald wird manchmal als Maßnahme diskutiert (z.B. Kohl et al., 2008).

Mit Hilfe von numerischen Modellen lassen sich die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf Hochwässer simulieren (Blöschl et al., 2007). Neue Methoden berücksichtigen dabei nicht nur den Ereignisablauf selbst, sondern auch andere Einflussgrößen wie veränderte Verdunstung und die Bodenfeuchte zu Beginn des Ereignisses (z.B. Salazar et al., 2012). Ein typisches Beispiel für eine solche Untersuchung ist in Abb. 6 dargestellt. Jeder Punkt in der Abbildung entspricht einem Hochwasserereignis. Für jedes Ereignis wurden zwei Simulationen durchgeführt, eine mit der realen Landnutzung und eine mit veränderter Landnutzung (entweder weniger oder mehr Waldfläche). Die Unterschiede im Hochwasserabfluss zwischen diesen beiden Simulationen wurden in Prozent aufgetragen. Die Abbildung zeigt, dass, gemäß dieser Berechnungen, Aufforstung die Hochwasserspitzen reduziert (zufolge erhöhter Infiltration, Speicherung im Boden und Verdunstung). Abholzung erhöht hingegen die Hochwasserspitzen. Der Effekt ist etwas größer, wenn der Boden zu Beginn des Ereignisses trocken ist. Untersuchungen für andere Gebiete zeigen oft das gleiche Verhalten wie Abb. 6, d.h. eine starke Abnahme der Wirkung flächenwirtschaftlicher Maßnahmen mit der Größe des Ereignisses. In städtischen Einzugsgebieten kann der Effekt bei großen Ereignissen noch signifikant sein, in ländlichen Einzugsgebieten in Österreich ist dies aber oft nicht mehr der Fall. Darum werden flächenwirtschaftliche Maßnahmen in der Regel nur als flankierende Maßnahmen zusätzlich zu anderen Maßnahmen eingesetzt.

4.2. Lineare Schutzmaßnahmen – Informationserweiterung zur Reduktion von Unsicherheiten der Bemessungsabflüsse

Maßnahmen, die eine große, klar überschaubare Wirkung entfalten, sind lineare Schutzmaßnahmen, die auch in der Hochwasserrichtlinie weiterhin eine wichtige Rolle spielen. Dämme und mobile Wände können sehr effizient wirken, wenn sie richtig bemessen sind. Dafür ist es erforderlich, die Bemessungshochwässer für das Schutzziel – eine bestimmte Jährlichkeit – möglichst genau zu bestimmen.

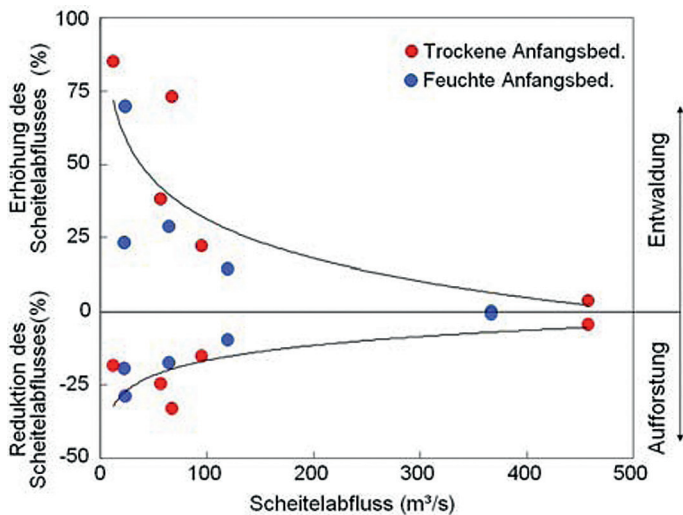


Abb. 6: Simulierte Wirkung von Aufforstung und Abholzung auf den Hochwasserabfluss für das Kampgebiet im Waldviertel (622 km² Einzugsgebietsfläche). Basis: 47% Waldfläche. Aufforstung: 86%. Entwaldung: 0% (Restfläche ist Grünland und Ackerland). Verändert nach Salazar et al. (2012).

Fig. 6: Simulated effect of afforestation and deforestation on flood peak runoff for the Kamp catchment in the Waldviertel region (622 km² catchment area). The baseline is 47% forest cover, afforestation increases it to 86%, deforestation decreases it to 0% (remaining area is pasture and cropland). Redrawn from Salazar et al. (2012).

Während in der Vergangenheit Bemessungswerte des Abflusses mit rein statistischen Methoden aus den gemessenen Abflussreihen ermittelt wurden, ziehen neue Methoden zusätzliche Informationen heran. Dementsprechend wurde der traditionelle Begriff der „Extremwertstatistik“ durch den aktuelleren Begriff „Extremwerthydrologie“ ersetzt (Blöschl und Merz, 2008; Merz und Blöschl, 2008). Die Informationserweiterung kann in zeitlicher (historische Hochwässer der letzten Jahrhunderte), räumlicher (Hochwässer in der gesamten Region) und kausaler (Beschreibung des Niederschlag-Abflussprozesses) Hinsicht erfolgen. Diese Vorgangsweise wird auch im neuen Merkblatt zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten empfohlen (DWA, 2012).

Die Kombination der verschiedenen Informationen kann durch Experteneinschätzung (z.B. Merz et al., 2008; Rogger et al., 2011) oder durch formale statistische Methoden erfolgen (z.B. Pires und Perdigo, 2012; Viglione et al., 2013). Abb. 7 zeigt

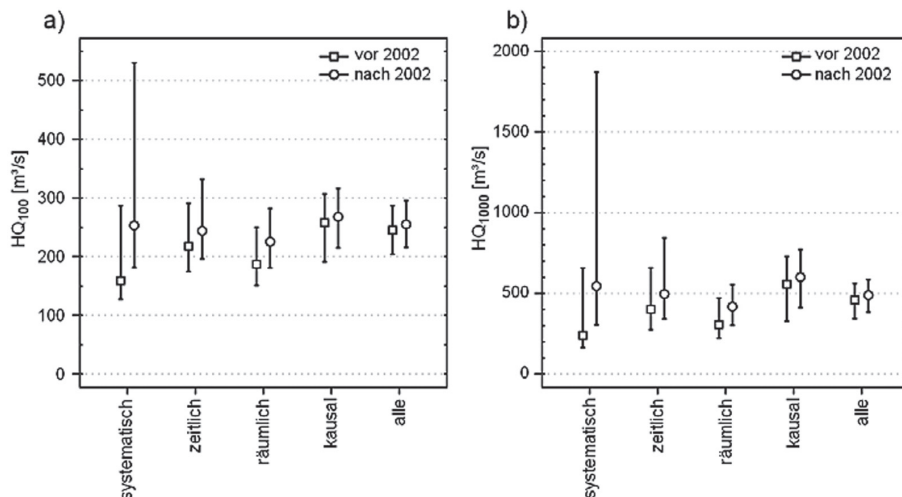


Abb. 7: Berechnung des HQ_{100} (a) und des HQ_{1000} (b) mit 90% Vertrauensbereichen für Zwetzl am Kamp vor und nach dem großen Ereignis 2002. Im ersten Fall jeweils links (systematisch) werden nur die systematischen Abflussmessungen verwendet. Die folgenden Fälle zeigen die Berechnungen mit Zusatzinformationen. Durch die Zusatzinformation wird die Unsicherheit wesentlich reduziert. Aus Viglione et al. (2013).

Fig. 7: Estimates of Q_{100} (a) and Q_{1000} (b) with 90% credible bounds for Zwetzl at the Kamp before and after the big 2002 event. In the first case (systematisch) just the systematic flood data are used. The following cases show the estimates using additional pieces of information (temporal, spatial, causal). The additional information reduces the uncertainty significantly. From Viglione et al. (2013).

als Beispiel die „Bayesian Markov-Chain-Monte-Carlo (MCMC) Methode“, die die in der Stichprobe der Hochwässer enthaltene Information und die Zusatzinformation mithilfe des Bayes'schen Theorems verknüpft. Der erste Fall (jeweils links in (a) und (b)) zeigt das HQ_{100} bzw. HQ_{1000} nur unter Verwendung der Abflussmessungen. Der Vertrauensbereich ist sehr breit und, je nachdem ob das Hochwasser 2002 berücksichtigt wird oder nicht (etwa für den Fall der Bestimmung des Bemessungshochwassers im Jahr 2001), unterscheiden sich die Berechnungen ganz wesentlich. Diese Unterschiede sind nicht wünschenswert. Wird nun Zusatzinformation berücksichtigt (zeitlich, räumlich, kausal getrennt, oder alle gemeinsam) wird der Vertrauensbereich wesentlich schmaler und das Einzelereignis 2002 hat kaum einen Einfluss auf das Ergebnis. Zusatzinformation erhöht also die Zuverlässigkeit der ermittelten Bemessungswerte erheblich.

Eine Frage, die ebenfalls aktuell diskutiert wird, ist, ob sich das Hochwasserregime ändert, und ob Bemessungswerte an sich ändernde Situationen angepasst werden sollten (Hall et al., 2014). Hochwässer können im Wesentlichen durch drei Faktoren verstärkt werden: Klima, Landnutzung und Wasserbauten. Ihr Einfluss hängt u.a. von der Größe des Ereignisses und von der Einzugsgebietsgröße ab (Blöschl et al., 2015). Der Einfluss des Klimas auf Hochwässer in Österreich wurde in Blöschl et al. (2011) quantifiziert, und dürfte vor allem bei Regen-auf-Schnee-Ereignissen relevant sein, z.B. im Innviertel. Landnutzung kann durch Versiegelung in (kleinen) städtischen Gebieten für Sturzfluten relevant sein. Wasserbauten wirken sich i.A. mehr auf kleinere als auf größere Ereignisse aus. Allerdings ist die Frage ob Hochwässer in Österreich größer werden oder nicht, derzeit nicht abschließend und global zu beantworten. Bedeutsam ist, dass viele Faktoren zusammenspielen, die die Größe und Eigenschaften von extremen Überschwemmungen und die Schäden bestimmen.

4.3. Hochwasserretention – Von Hochwasserscheiteln zur Wellenform

Eine weitere wichtige Maßnahme des Hochwasserschutzes ist die Dämpfung der Hochwasserwellen durch Hochwasserrückhalteanlagen. Die Wirksamkeit solcher Anlagen ist direkt proportional zum Verhältnis Rückhaltevolumen zu Hochwasservolumen. Deswegen ist es erforderlich, für den Bemessungsfall nicht nur den Hochwasserscheitel zu kennen, sondern auch das Wellenvolumen. Über die traditionelle Berechnung des Hochwasserscheitels einer bestimmten Jährlichkeit (z.B. dem HQ_{100}) hinausgehend ist aus diesem Grund eine statistisch zu-

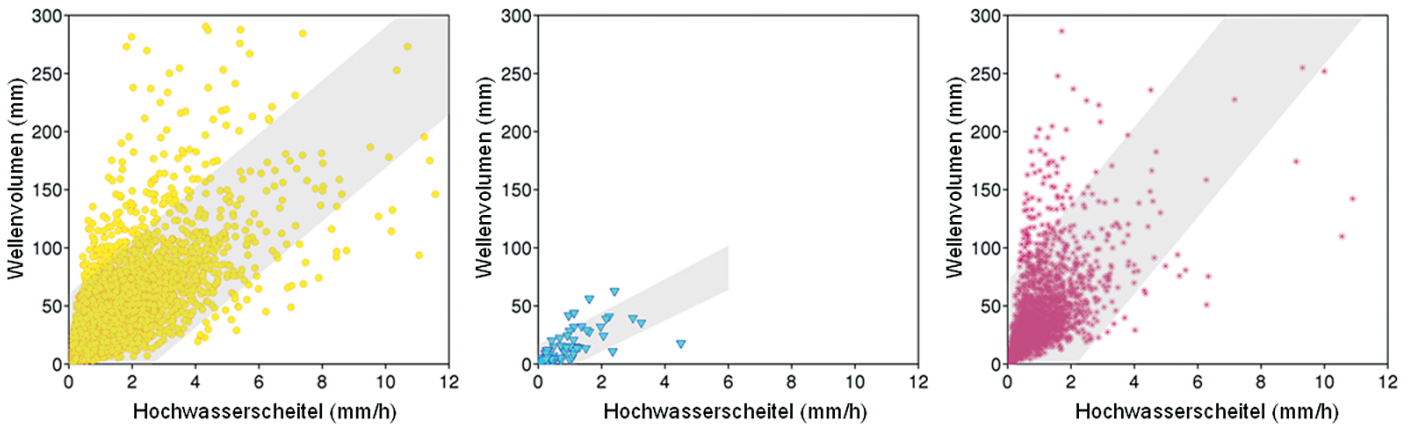


Abb. 8: Copulas: Zusammenhang zwischen Hochwasserscheiteln und Wellenvolumina für Ereignisse in 330 Einzugsgebieten in Österreich, unterschieden nach Prozesstyp: synoptische Hochwässer (gelbe Kreise), Sturzfluten (blaue Dreiecke) und Schneehochwässer (rote Sterne). Graue Flächen zeigen die 95% Prognoseintervalle. Copulas erlauben eine statistisch konsistente Dimensionierung von Rückhaltanlagen. Aus Gaál et al. (2015).

Fig. 8: Copulas: Relationship between flood peaks and event volumes in 330 catchments in Austria, stratified by process type: synoptic floods (yellow circles), flash floods (blue triangles) and snow melt floods (red asterisks). Grey areas indicate 95% prediction intervals. Copulas allow the sizing of retention structures in a statistically consistent way. From Gaál et al. (2015).

treffende Bestimmung der mit diesen Jährlichkeiten verbundenen Wellenformen von Interesse.

Zentrale Fragen in diesem Zusammenhang sind, wie stark Scheitel und Volumina korreliert sind, und ob sich diese Korrelation mit der Größe des Ereignisses ändert. Als Beispiel zeigt Abb. 8 für zahlreiche Ereignisse in Österreich den Zusammenhang zwischen Scheitel und Volumina, wobei nach dem Entstehungstyp der Hochwässer unterschieden wird. Die Sturzfluten zeigen eine flachere Steigung der Scheitel-Volumen-Beziehung, d.h. schlankere Wellen, als synoptische Hochwässer und Schneehochwässer. Die Sturzfluten zeigen auch die höchsten Korrelationen zwischen Scheitel und Volumina. Mit Hilfe statistischer Methoden können sogenannte Copula Modelle (z.B. Genest und Favre, 2007) an Daten wie in Abb. 8 angepasst werden, die es erlauben, Hochwasserrückhaltanlagen statistisch konsistent zu dimensionieren.

Die erzielbare Scheitelreduktion von Retentionsräumen nimmt mit dem Verhältnis Rückhaltevolumen zu Hochwasservolumen zu, hängt aber auch von anderen Einflussgrößen ab. Skublics et al. (2016) zeigte für die Bayerische Donau, dass der Zeitpunkt des Füllens des Rückhalterumes einen entscheidenden Einfluss hat. Für die aktuelle Situation nimmt die Retentionswirkung stark mit der Größe des Ereignisses zu (Abb. 9). Für die historische Situation (im Jahr 1800 vor der Durchführung von Flussregulierungsmaßnahmen) ist dies jedoch nicht der Fall, und die Dämpfung ist bei Extremhochwässern wesentlich kleiner als heute. Das liegt daran, dass das verfügbare Volumen im Vorland schon zu Beginn des Ereignisses in Anspruch genommen wird, und zum Zeitpunkt des Scheitels weniger Volumen zur Verfügung steht. Dementsprechend sind Rückhalteräume, die erst bei einer großen Jährlichkeit geflutet werden, effizienter für die Hochwasserabminderung als natürliche Überflutungsflächen, die schon bei geringen Hochwasserständen überschwemmt werden.

5. Bewusstseinsbildung

5.1. Bürgerbeteiligung – Abschätzung des Mehrwertes

Der Kreislauf des Hochwasserrisikomanagements schließt auch zahlreiche nicht-technische Maßnahmen ein. Mit der Dublin Er-

klärung und der Wasserrahmenrichtlinie (EU, 2000) hat die Bürgerbeteiligung bei wasserwirtschaftlichen Projekten an Bedeutung gewonnen; auch in der Hochwasserrichtlinie ist sie vorgesehen. Der Beteiligungsprozess erlaubt ein tieferes Verständnis der Probleme durch die Akteure, eine breitere Legitimationsbasis der Entscheidungen und Unterstützung bei der Konsensfindung. Insgesamt wird ein besseres Ergebnis im Vergleich zum einem von Einzelplanern erstellten Projekt angestrebt (van den Hove, 2006).

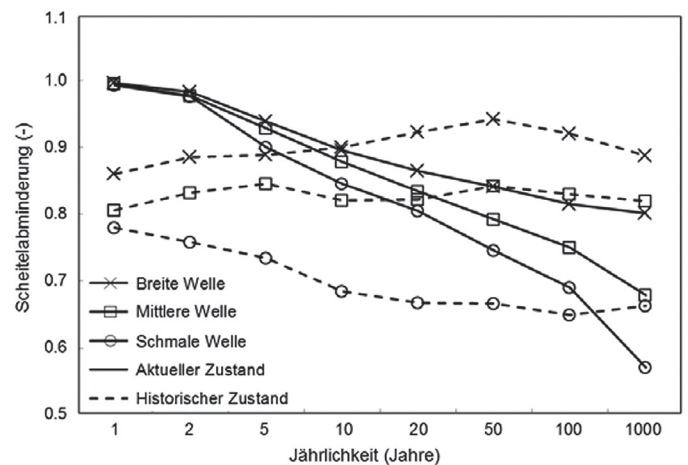


Abb. 9: Hochwasserretention für einen Abschnitt der Bayerischen Donau zwischen Neu-Ulm und Donauwörth. Scheitelabminderung ist definiert als Verhältnis zwischen Hochwasserdurchflussscheitel mit und ohne Retention. Für den aktuellen Zustand (durchgezogene Linie) nimmt die Retentionswirkung stark mit der Größe des Ereignisses zu, während dies für den historischen Zustand (strichlierte Linie) nicht der Fall ist. Aus Skublics et al. (2016).

Fig. 9: Flood retention for a reach of the Bavarian Danube between Neu-Ulm und Donauwörth. Flood peak retention is defined as the ratio of flood peak discharges with and without retention. For the current situation (solid lines) the retention effect decreases sharply with the flood magnitude, while for the historic situation (dashed lines) this is not the case. From Skublics et al. (2016).

Diesen Vorteilen steht aber die Erfahrung gegenüber, dass der Prozess oft zeitaufwändig ist, und es zu Verzögerungen, erhöhten Kosten und ineffizienter Ressourcennutzung kommen kann (z.B. Lubell, 2004; Irvin und Stansbury 2004; Carr et al., 2013). Es ist deshalb sinnvoll, bei solchen Beteiligungsverfahren zu bewerten, ob die Ziele der Beteiligung erreicht werden.

Carr et al. (2012) schlagen vor, den Beteiligungsprozess in dreifacher Weise zu bewerten: (i) die Bewertung des Prozesses beurteilt die Qualität des Beteiligungsprozesses, z.B. in Hinblick auf dessen Legitimität; (ii) die Bewertung der Zwischenergebnisse beurteilt die Erreichung nicht-tangibler Ergebnisse, wie Vertrauen und Kommunikation, sowie kurz- bis mittelfristige tangible Ergebnisse, wie Vereinbarungen und institutioneller Wandel; (iii) die Bewertung der Projektergebnisse beurteilt die Erreichung von Veränderungen, wie eine Verbesserung des Hochwasserschutzes im Vergleich zu einem Projekt ohne Bürgerbeteiligung (Tab. 2).

Carr et al. (2012) argumentieren, dass besonders den Zwischenergebnissen mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden

Bewertung des Prozesses	Bewertung der Zwischenergebnisse	Bewertung der Projektergebnisse
Rechenschaftspflicht	Entwicklung des Sozialkapitals: Interaktion, Netzwerkentwicklung und Vertrauen	ökologische Verbesserungen
Kosten-Effizienz		wirtschaftliche Verbesserungen
Fristen und Meilensteine	Produkte des Prozesses: Vereinbarungen, Ende einer Pattsituation, Innovation, institutioneller Wandel, gemeinsames Wissen und Information	Verbesserung betreffend menschliche Gesundheit und Wohlbefinden
Prozesserleichternde Maßnahmen		Implementierung eines akzeptierten Plans
Einbeziehung vorhandenen Wissens		Vermeidung von Konflikten
Legitimität		
Machtverhältnisse		

Tabelle 2: Bewertung von Beteiligungsprozessen bei wasserwirtschaftlichen Projekten. Aus: Carr et al. (2012).

Table 2: Evaluation of participatory processes of water resources management projects. From: Carr et al. (2012).

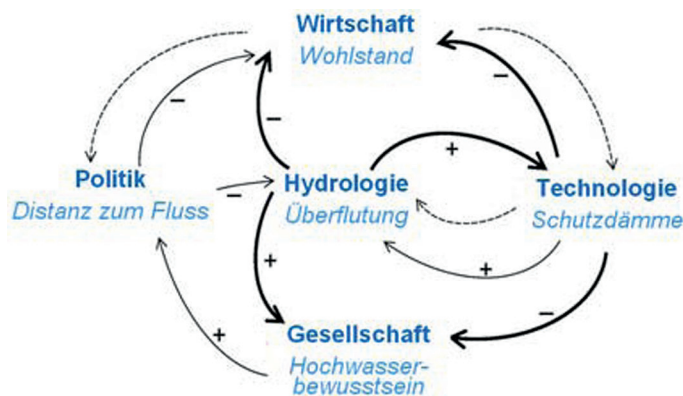


Abb. 10: Wirkungsdiagramm der Kopplung hydrologischer, wirtschaftlicher, politischer, technologischer und gesellschaftlicher Prozesse für die Überflutung einer Stadt durch Hochwässer. Dicke Pfeile zeigen direkte abrupte Koppelung, dünne Pfeile allmähliche Koppelung, gestrichelte Pfeile indirekte Kontrollmechanismen. Nach Di Baldassarre et al. (2013).

Fig. 10: Loop diagram of the coupling of hydrological, economical, political, technological, and social processes associated with the flooding of a city. Thick arrows indicate abrupt coupling, thin arrows gradual coupling, dashed arrows more indirect control mechanisms. After Di Baldassarre et al. (2013).

sollte, da dadurch echte Erfolge und positive Nebeneffekte des Beteiligungsprozesses rasch aufgezeigt werden können. Dadurch kann sichergestellt werden, dass der Dialog durch Einrichtung von Plattformen und anderen Kommunikationsmaßnahmen zielgerichtet erfolgen kann.

5.2. Öffentlichkeitsarbeit und Bildung – Langfristige Interaktionen zwischen Hochwässern und menschlichen Aktivitäten verstehen

Ein anderer wichtiger Bestandteil der Bewusstseinsbildung besteht aus Öffentlichkeitsarbeit, sowohl bei den Betroffenen als auch bei der allgemeinen Öffentlichkeit. Besonders wichtig ist es dabei, die Wirkzusammenhänge zwischen Hochwässern, deren Ursachen und den Maßnahmen aufzuzeigen. Eine treffende Darstellung von „Populären Forderungen auf dem Prüfstand“ zum natürlichen Rückhalt und technischen Hochwasserschutz findet sich z.B. in StMUV (2014, Seite 47).

Die Einordnung in einen breiten Zusammenhang, sowohl räumlich (Oberlieger, Unterlieger) als auch zeitlich (langfristiges Ver-

halten), und in Hinblick auf mögliche Wechselwirkungen ist dabei essentiell. Während die üblichen Szenarienrechnungen meist einzelne Einflussfaktoren (Rückhaltebecken, Dämme, Flächenversiegelung) getrennt betrachten, hat sich die neue Disziplin der Soziohydrologie zum Ziel gesetzt, die Wechselwirkung zwischen den sozio-ökonomischen, technischen und natürlichen Systemkomponenten zu verstehen und modellmäßig zu beschreiben (Sivapalan et al., 2012; Sivapalan and Blöschl, 2015). Abb. 10 zeigt ein typisches Diagramm der Wechselwirkungen für die Überflutung einer Stadt durch Hochwässer. Jede dieser Wechselwirkungen kann durch eine Differentialgleichung beschrieben werden, wodurch es möglich wird, numerische Simulationen durchzuführen. Als Beispiel zeigt Abb. 11 simulierte Hochwasserschäden über einen Zeitraum von 200 Jahren. Das gekoppelte Modell simuliert die Entwicklung der Stadt in diesem Zeitraum, und zwar ob die Bürger sich entscheiden, in der Nähe des Flusses zu bauen (was wirtschaftliche Vorteile mit sich bringt) oder weit weg vom Fluss (wodurch Hochwasserschäden vermieden werden), und sie können sich entscheiden, Hochwasserschutzdämme zu bauen (aber diese können von großen Hochwässern überflutet werden).

In Abb. 11a gab es nur die Option, den Siedlungsbereich vom Fluss wegzuverlegen, aber keine Dämme zu errichten; in Abb. 11b war auch letzteres erlaubt. Für den Fall ohne Hoch-

wasserschutzdämme (Abb. 11a) führt jedes Hochwasser zu einem entsprechenden Schaden. In hochwasserreichen Perioden treten demgemäß mehr und größere Schäden auf.

Für den Fall mit Hochwasserschutz (Abb. 11b) werden im Modell Dämme vor allem um das Jahr 50 gebaut, die die Schäden erheblich reduzieren im Vergleich zum Szenario (a). Wenn die hochwasserreichen Jahre beginnen (Jahre 80–130), wurden bereits Häuser in der Nähe der Dämme errichtet. Diese werden jedoch überflutet, sodass der Schaden größer ist als im Fall (a) ohne Hochwasserschutz.

Dieses Beispiel beschreibt eine hypothetische Stadt, doch bereitet es die grundsätzlichen Wechselwirkungen zwischen Hochwässern und menschlichen Aktivitäten in leicht verständlicher Form auf, wodurch sich dieser Ansatz gut für die Öffentlichkeitsarbeit und Bildung eignet.

6. Vorbereitung

6.1. Hochwasserwarnung – Genauere längerfristige Prognosen mit Vertrauensbereichen

Technische Maßnahmen können nur bis zu einem gewissen Niveau schützen. Das Schutzniveau ist für bebaute Gebiete meist das 100 jährliche Hochwasser, kann aber wegen der örtlichen Gegebenheiten deutlich niedriger sein. Um Schäden und Gefahren bei größeren Ereignissen zu begrenzen, sind eine frühzeitige Warnung von Betroffenen und die rechtzeitige Mobilisierung von Einsatzkräften wichtig. Dadurch sind eine rechtzeitige Evakuierung, Schutzmaßnahmen am Objekt und etwa das Errichten mobiler Schutzwände möglich. Die Bundesländer Österreichs haben deshalb Hochwasserwarndienste eingerichtet, die Hochwasservorhersagemodelle betreiben.

Neue Vorhersagemodelle zeichnen sich durch einen gestuften Vorhersageansatz für lange Prognosefristen aus (Blöschl et al., 2008). 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. Mit einem Niederschlag-Abflussmodell, das beobachtete Niederschläge und Lufttemperaturen als Eingangsdaten verwendet, kann die Vorhersagefrist verlängert werden; mittels Niederschlagsprognosen kann die Prognosefrist weiter ausgedehnt werden. Allerdings sind in diesem Fall die Unsicherheiten am größten. Um diese Unsicherheiten abzuschätzen, werden Ensembleprognosen erstellt, die einen Vertrauensbereich der prognostizierten Abflüsse angeben (Blöschl, 2008; Nester et al., 2012; Blöschl et al., 2014). Damit steht für die Einsatzplanung nicht nur der wahrscheinlichste Wert, sondern auch ein „worst case“ innerhalb einer Bandbreite zur Verfügung.

Ein Beispiel solcher Ensembleprognosen während des Hochwassers 2013 an der Salzach ist in Abb. 12 dargestellt. Die Bandbreite lässt erkennen, dass die Prognosen für eine kurze Frist am genauesten sind, und die Unsicherheit mit zunehmender Frist zunimmt. Für dieses Ereignis wird bereits 72 Stunden vor dem Scheitel der steile Anstieg vorausgesagt, und 48 Stunden vor dem Scheitel wird dieser mit guter Genauigkeit prognostiziert.

Prognosen der Zubringer, wie in Abb. 12 gezeigt, dienen auch dazu, die Prognosen für die großen Flüsse zu erzeugen. Abb. 13 zeigt die Hochwasserprognose für die Donau am Pegel Kienstock, die am 3. Juni 2013 erstellt wurde und den Abfluss über 48 Stunden vorhersagt. Zu diesem Zeitpunkt wurde ein Maximalabfluss von 11400 m³/s prognostiziert. Der tatsächlich aufgetretene Maximalabfluss betrug dann ca. 11200 m³/s. Der Unterschied zwischen Prognose und Beobachtung war demnach nur 2% bei einer Prognosefrist von 48 Stunden. Für die Einsatzplanung stehen intern zusätzlich zu den wahrschein-

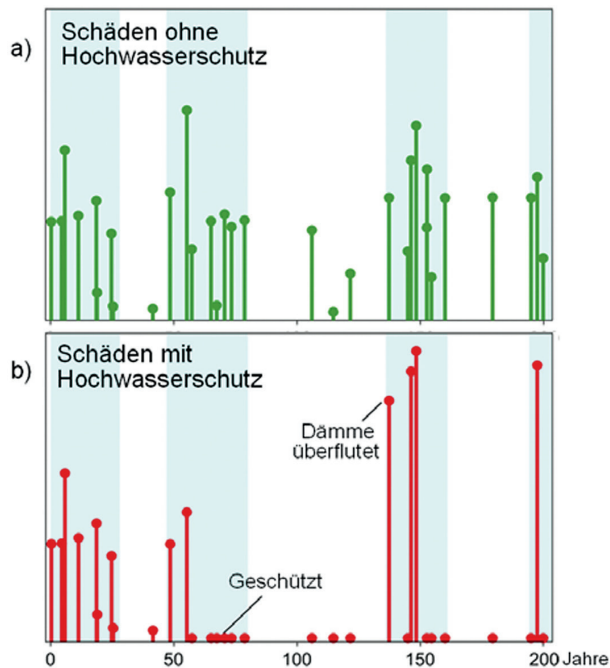


Abb. 11: Zwei Szenarien der Hochwasserschäden für eine hypothetische Stadt. (a) Hochwassermanagement beinhaltet raumplanerische Maßnahmen aber keine technischen Schutzmaßnahmen. (b) Auch Schutzdämme werden gebaut. Hellblaue Bereiche zeigen hochwasserreiche Perioden. Dieser Ansatz eignet sich gut für die Unterstützung von Öffentlichkeitsarbeit und Bildung. Aus Blöschl et al. (2015), basierend auf Di Baldassarre et al. (2013) und Viglione et al. (2014).

Fig. 11: Two scenarios of flood damage for a hypothetical city. (a) Flood management options involve the choice of building close or far away of flood prone river but no levees. (b) Flood management options also involve the construction of levees. Light blue areas indicate flood rich periods, white areas flood poor periods. This approach is well suited for assisting outreach and education activities. From Blöschl et al. (2015), based on Di Baldassarre et al. (2013) and Viglione et al. (2013).

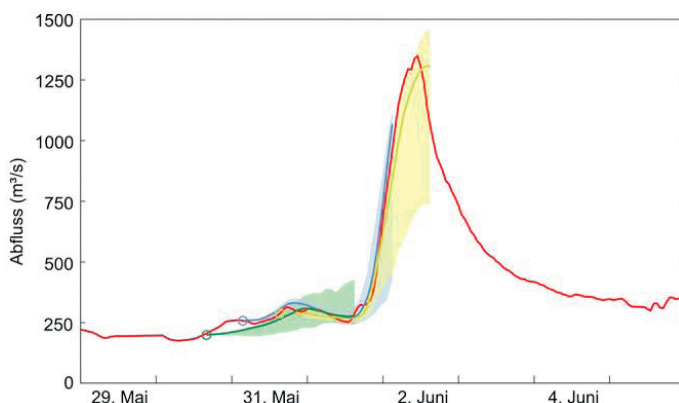


Abb. 12: Hochwasserprognose für die Salzach bei Golling während des Hochwassers 2013. Prognosezeitpunkte: 30.5. 15h, 31.5. 3h, 31.5. 15h. Zeitpunkt des Hochwasserscheitels 2.6. 13h. Schattierte Flächen zeigen Vertrauensbereich der Prognose. Rote Linie ist die beobachtete Abflusssganglinie. Basierend auf Nester et al. (2012).

Fig. 12: Flood forecasts for the Salzach at Golling during the 2013 flood. Forecast times: 30 May, 3 pm; 31 May, 3 am; 31 May, 3 pm. Timing of the flood peak: 2 June, 1 pm. Shaded areas indicate confidence intervals of the forecasts. Red line indicates observed hydrograph. Based on Nester et al. (2012).

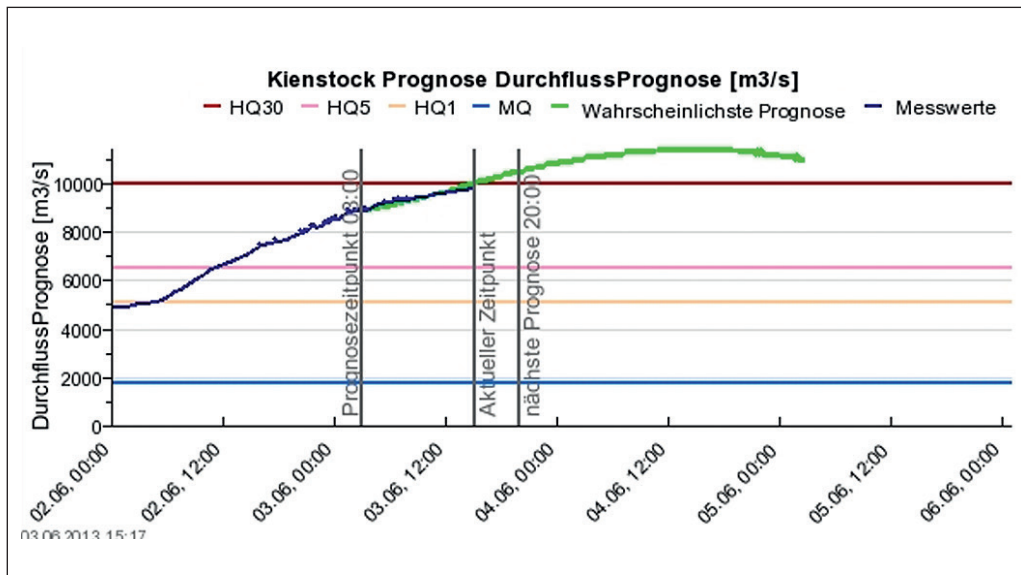


Abb. 13: Publierte Abflussprognose der Donau am Pegel Kienstock erstellt am 3. Juni 2013, 3 Uhr. Grün: Prognose. Blau: Messung. Eine Prognose von maximal 11400 m³/s gegenüber dem tatsächlich aufgetretenen Wert von ca. 11200 m³/s entspricht einem Unterschied von nur 2% bei einer Prognosefrist von 48 Stunden. Aus <http://www.noel.gv.at/>

Fig. 13: Published runoff forecast for the Danube at the Kienstock gauge published on 3 June 2013, 3 am. Green: forecast. Blue: observed runoff. A forecasted maximum of 11400 m³/s compared to an observation of 11200 m³/s represents a difference of 2% for a lead time of 48 hours. From <http://www.noel.gv.at/>

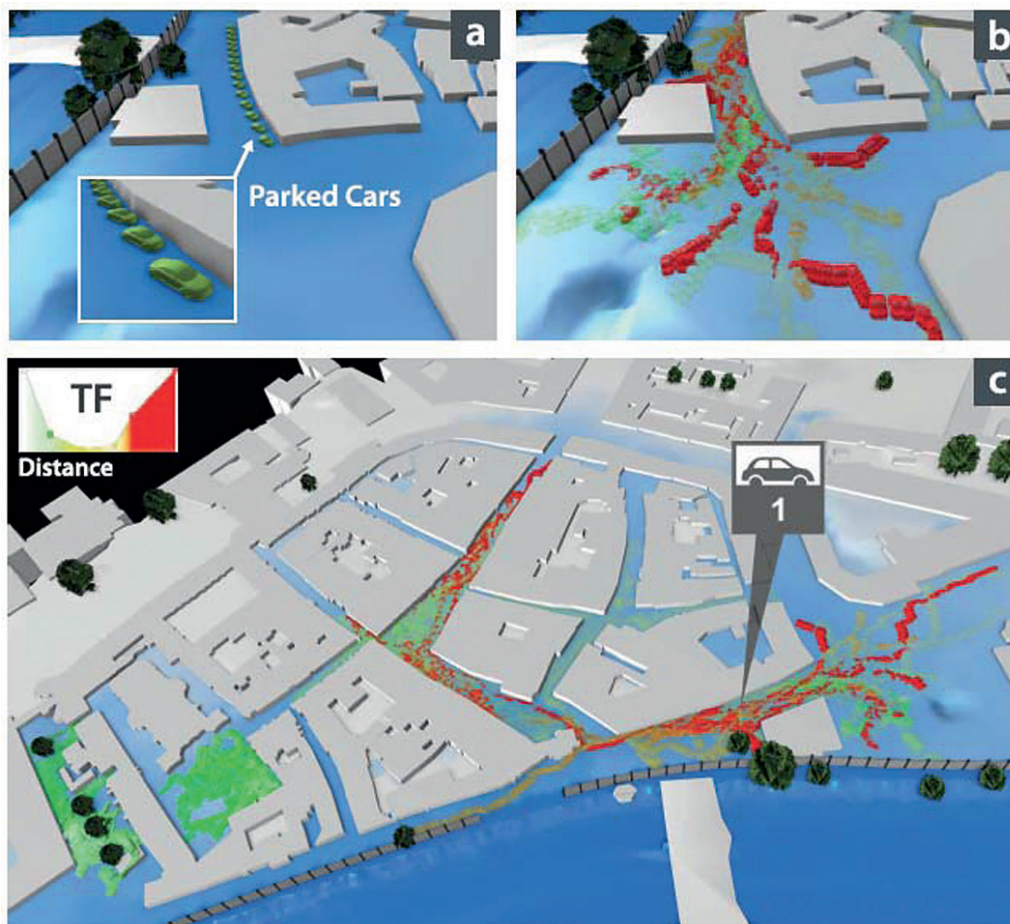


Abb. 14: Beispiel für die Ablaufsteuerung und Visualisierung mit Visdom. In diesem Fall wird die Bewegung von durch das Hochwasser mitgeschwemmten Autos dargestellt. Die Software eignet sich gut für die Unterstützung von Übungen von Katastrophenschutzplänen. Aus Ribičić et al. (2013).

Fig. 14: Example of steering and visualisation using Visdom. In this case, the movement of cars swept away by the flood is shown. The software is well suited for supporting drills of disaster management plans. From Ribičić et al. (2013).

lichsten Werten (grüne Linie in Abb. 13) auch die Vertrauensbereiche zur Verfügung.

6.2. Katastrophenschutzpläne – Simulationssoftware zur Unterstützung von Übungen

Für den Fall, dass eine Hochwasserwarnung ausgegeben wird, kommen Einsatzpläne zur Anwendung, die im Detail die verschiedenen Handlungsabläufe vorgeben. Der Vorteil der lang-

fristigen Hochwasserwarnungen ist, dass die Vorbereitungen bereits frühzeitig erfolgen können. Für die erfolgreiche Ausführung der Katastrophenschutzpläne ist es aber nicht nur erforderlich, dass vorab alle Abläufe aufeinander abgestimmt sind und dass alle Informationen auf dem aktuellen Stand sind. Ebenso wichtig ist es, dass das Personal entsprechend ausgebildet ist und den Einsatz regelmäßig übt. Dabei ist es auch sinnvoll, die betroffene Bevölkerung einzubeziehen.

Zur Unterstützung der realistischen Durchführung derartige Übungen kann neue Simulationssoftware zum Einsatz kommen. Bei dem komplexen Zusammenspiel der vielen beteiligten Prozesse ist das Verhalten des Gesamtsystems ohne Softwareunterstützung nicht immer offensichtlich. Die Software bildet die Hochwasserdynamik, erforderliche bzw. durchgeführte Maßnahmen, sowie die logistischen Prozesse der Einsatzpläne ab. Wichtig ist dabei, dass die Mensch-Maschine-Schnittstelle der Software eine optimale Integration in den Übungsprozess ermöglicht.

Visdom (Waser et al., 2010; 2011; <http://visdom.at>) ist eine derartige Software, die eine volle Integration der Benutzersteuerung, hydrodynamischer Simulationen und der dreidimensionalen Visualisierung erzielt. Alternative Verteidigungsmaßnahmen (z.B. mobile Wände, Sandsäcke) können getestet werden und die Auswirkung auf den Wasserstand unmittelbar visualisiert werden. Ebenso kann der Effekt unerwarteter Szenarien ausgelotet werden (Abb. 14). Unsicherheiten werden klar visualisiert, indem ein Ensemble zahlreicher Rechenläufe aggregiert wird. Visdom ist so intuitiv, dass die Benutzersteuerung und Visualisierung auch für Nicht-Experten unmittelbar einsichtig sind, eine wichtige Voraussetzung für den effizienten Einsatz bei Übungen von Katastrophenschutzbehörden und Einsatzorganisationen.

7. Nachsorge

7.1. Beurteilung von Hochwasserschäden – Visualisierungen für Quick-Screening

Zahlreiche Aufgaben des Hochwasserrisikomanagements sind durchzuführen, nachdem ein Ereignis abgelaufen ist. Eine der Aufgaben ist die Beurteilung der Hochwasserschäden an Bauwerken. Die Beurteilung der Schäden ist oft ein zeitkritischer Prozess, wenn rasch mit der Sanierung begonnen werden soll, um weitere Schädigungen des Bauwerkes zu vermeiden und bald die Funktionstüchtigkeit wieder herzustellen (Nicholas et al., 2001).

Zur raschen Dokumentation und Beurteilung der Schäden (Quick-Screening) bieten sich neue dreidimensionale Visualisierungsmethoden an. Dabei geht es um eine visuell und geometrisch exakte Dokumentation der Gebäudeoberfläche in einer virtuellen Realität. Die Beschreibung der Geometrie erfolgt mit Laser Scanning Daten, die Beschreibung der Textur mit Daten von bildgebenden Sensoren. Gebäudeschäden wie Risse oder Verschiebungen von Gebäudeteilen werden entweder automatisch erkannt oder semi-automatisch eingepflegt. Sie können dann automatisch mit Merkmalen belegt werden (Abb. 15).

Geeignete Visualisierungssoftware (z.B. Ortner et al., 2011) erlaubt es auch, mit den großen Datenmengen aus unterschiedlichsten Quellen zu interagieren, und sie in Hinblick auf die Fragestellung auszuwerten. Durch Virtualisieren weiterer Arbeitsabläufe können langfristig papierbasierte Abläufe ersetzt werden. Solche Dokumentationen sind nicht nur sinnvoll für die Sanierung, sondern wären auch für die Schadensabgeltung aus Mitteln des Katastrophenfonds einsetzbar.

7.2. Ereignisdokumentation – Einordnung in den historischen Kontext

Eine weitere Aufgabe der Nachsorge ist die Ereignisdokumentation. Dokumentationen der großen, regionalen Hochwässer wurden in Österreich sorgfältig durchgeführt (siehe z.B. Blöschl et al., 2013a). Ein Aspekt, dem in der letzten Zeit vermehrt Aufmerksamkeit gewidmet wird, ist die Einordnung der Hochwässer in den historischen Kontext, d.h. die Frage wie das aktuelle Hochwasser im Vergleich zu den Hochwässern an der gleichen Stelle in den letzten Jahrhunderten liegt. Mittels

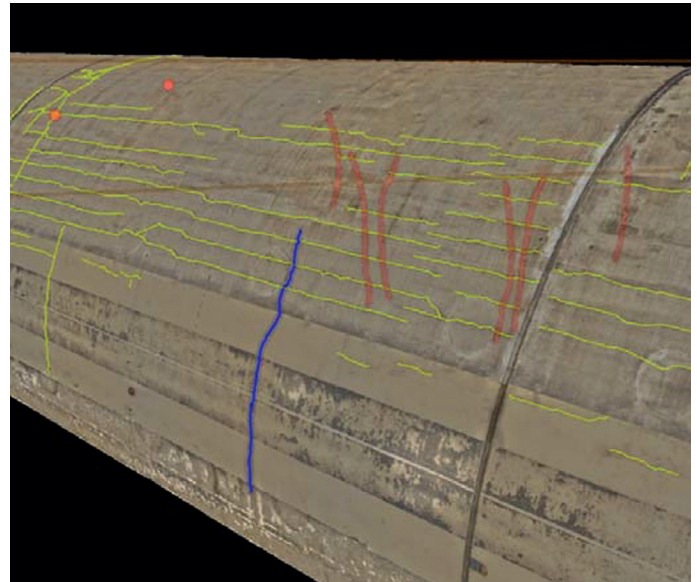


Abb. 15: Visualisierung von Schäden an einem Tunnelbauwerk. Die Risse sind je nach Typ unterschiedlich farblich markiert. Aus Ortner et al. (2011).

Fig. 15: Damage visualisation of a tunnel lining. The cracks have been colour coded according to their type. From Ortner et al. (2011).

Methoden der historischen Hochwasserforschung wird auf historisches Quellenmaterial zurückgegriffen, wie Chroniken, Zeitungen, private und amtliche Korrespondenz, Rechnungen, Steueraufzeichnungen und amtliche Protokolle (siehe z.B. Kiss et al., 2015). Die Quellen können Informationen über den Zeitpunkt des Hochwassers, die meteorologisch-hydrologischen Ursachen und die Folgen wie Todesopfer und Sachschäden enthalten. Hochwassermarken an Gebäuden geben Auskunft über den höchsten Wasserstand eines Hochwassers. Mittels mathematischer Modelle lässt sich näherungsweise der Abfluss rekonstruieren (z.B. Kjeldsen et al., 2014).

Abb. 16 zeigt als Beispiel die Hochwassergeschichte für die Stadt Szeged am Zusammenfluss von Theiß und Maros. Seit dem Jahr 2000 war die Stadt von fünf bedeutenden Überschwemmungen betroffen, von denen das Hochwasser im April 2006 das größte war. Der Wasserstand war so hoch, dass er für einige Tage einen Meter über der höchsten Erhebung der Innenstadt lag. Allerdings ist eine derartige Situation nicht vollkommen neu. Die größte Hochwasserkatastrophe, die praktisch die ganze Stadt zerstörte, trat im Jahre 1879 auf. Die Überflutung kam damals nicht direkt aus dem in der Stadt liegenden Flussabschnitt, sondern über niedrig gelegene Auen aus dem Norden, wo die Schutzdämme weniger gewartet wurden. Der darauf folgende Wiederaufbau der Stadt und die systematischen Flussregulierungen führten in der Folge zu einer Reduktion des Hochwasserrisikos. Für die heutige Situation bedeutet die historische Einordnung, dass die letzten Jahre – auch langfristig – als hochwasserreiche Periode anzusehen sind. Dementsprechend sind auch in der nächsten Zukunft große Hochwässer zu erwarten. Derartige lange Zeitreihen von Hochwässern lassen sich auch für die Ermittlung von Hochwasserdurchflüssen großer Jährlichkeiten heranziehen (z.B. Salinas et al., 2016).

8. Schlussbemerkungen

Auch in der Zukunft sind in Österreich große Hochwässer zu erwarten. Das integrierte Hochwasserrisikomanagement bildet das Instrumentarium, mit diesen Hochwässern in geeigneter

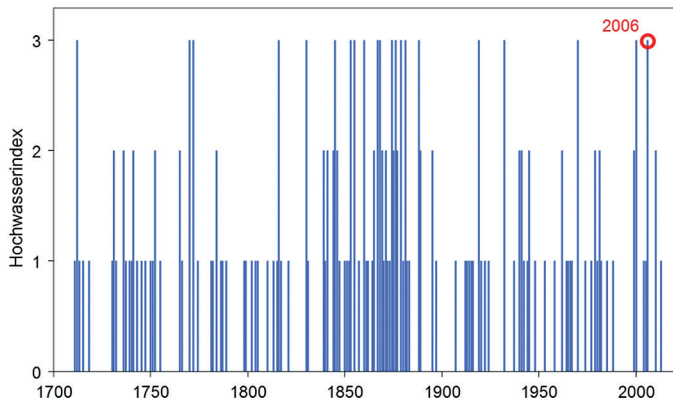


Abb. 16: Historische Hochwässer der Theiß bei Szeged. Je größer der Hochwasserindex desto größer waren die Hochwässer. Die Einordnung aktueller Ereignisse in den historischen Kontext schafft bessere Planungsgrundlagen für das Hochwasserrisikomanagement. Aus Salinas et al. (2016).

Fig. 16: Historic floods of the Tisza at Szeged. The flood index indicates the magnitude of the flood events. Putting current events into the context of historic floods strengthens the planning basis of flood risk management. From Salinas et al. (2016).

Weise umzugehen, wie im nationalen Hochwasserrisikomanagementplan dargestellt (siehe BMLFUW, 2015). Statt einzelner Schutzmaßnahmen steht dabei ein Portfolio unterschiedlicher Maßnahmen und die Betrachtung des gesamten Flussgebietes im Vordergrund. Um die damit verbundenen neuen Anforderungen zu bewältigen, kann sich das Hochwasserrisikomanagement auf neue methodische Entwicklungen stützen.

Diese Arbeit gab einen Überblick über die neuen Entwicklungen für die einzelnen Teilbereiche des Hochwasserrisikomanagement – Vorsorge, Schutz, Bewusstseinsbildung, Vorbereitung und Nachsorge. Selbstverständlich gibt es zwischen diesen Bereichen zahlreiche Synergien. Beispielsweise sind die neuen Methoden der Hochwasserwarnung (Bereich Vorbereitung) auch erforderlich für die Optimierung der Hochwasserretention mit gesteuerten Rückhalteanlagen (Bereich Schutz). Die Ereignisdokumentation (Bereich Nachsorge) ist eine wichtige Grundlage für die Dimensionierung linearer Schutzmaßnahmen (Bereich Schutz). Neue, schnelle 2D Simulationen wie sie für die Gefahrenzonenplanung (Bereich Vorsorge) entwickelt wurden, finden auch Einsatz im Bereich Bewusstseinsbildung und bei der Übung von Katastrophenschutzplänen (Bereich Vorbereitung).

Es ist zu erwarten, dass mit den neuen Methoden das Hochwasserrisikomanagement noch zuverlässiger und effizienter als bisher durchgeführt werden kann.

Danksagung

Die hier zusammengefasste Forschung wurde u.a. gefördert durch einen ERC Advanced Grant (no 291152), IMPALA (FP7-PEOPLE, 301953), FWF (Projekte W1219, P23723, P22543-N23), ÖAW (Vorhersagbarkeit; Gebirgshochwasser) und WWTF (Projekt ICT12-009).

9. Literatur

[1] Apel, H., A.H. Thielen, B. Merz and G. Blöschl (2006) A probabilistic modelling system for assessing flood risks. *Natural Hazards*, 38, pp. 79–100.
 [2] Blöschl, G. (2008) Flood warning – on the value of local information. *International Journal of River Basin Management*, 6 (1), 41–50.

[3] Blöschl, G. und R. Merz (2008) Bestimmung von Bemessungshochwässern gegebener Jährlichkeit – Aspekte einer zeitgemäßen Strategie. *Wasserwirtschaft*, 98 (11) 12–18.
 [4] Blöschl, G., A. Viglione and A. Montanari (2013b) Emerging approaches to hydrological risk management in a changing world. In: *Climate Vulnerability: Understanding and Addressing Threats to Essential Resources*. Elsevier Inc., Academic Press, 3–10.
 [5] Blöschl, G., A. Viglione, R. Merz., J. Parajka, J. Salinas und W. Schöner (2011) Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 63, (1–2), 21–30.
 [6] Blöschl, G., Ch. Reszler und J. Komma (2008) Hydrologische Hochwasservorhersage für den Kamp – Erfahrungen mit den Ereignissen 2006 und 2007. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 60 (3–4), a13–a18.
 [7] Blöschl, G., L. Gaál, J. Hall, A. Kiss, J. Komma, T. Nester, J. Parajka, R. A. P. Perdigão, L. Plavcová, M. Rogger, J. L. Salinas and A. Viglione (2015) Increasing river floods: fiction or reality? *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. doi: 10.1002/wat2.1079
 [8] Blöschl, G., S. Ardoin-Bardin, M. Bonell, M. Dörninger, D. Goodrich, D. Gutknecht, D. Matamoros, B. Merz, P. Shand and J. Szolgay (2007) At what scales do climate variability and land cover change impact on flooding and low flows? *Hydrological Processes*, 21, pp. 1241–1247.
 [9] Blöschl, G., T. Nester, J. Parajka and J. Komma (2014) Hochwasserprognosen an der österreichischen Donau und Datenassimilation. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 58 (2), 64–72; DOI: 10.5675/HyWa_2014_2_1
 [10] Blöschl, G., T. Nester, J. Komma, J. Parajka and R.A.P. Perdigão (2013a) Das Juni-Hochwasser 2013 – Analyse und Konsequenzen für das Hochwasserrisikomanagement. *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*, 158, 141–152.
 [11] BMLFUW (2015) 1. Nationaler Hochwasserrisikomanagementplan. Sicher leben mit der Natur. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, bmlfuw.gv.at
 [12] Burton, A., C. G. Kilsby, H. J. Fowler, P. S. P. Cowpertwait and P. E. O’Connell (2008) RainSim: A spatial-temporal stochastic rainfall modelling system. *Environmental Modelling & Software*, 23(12), 1356–1369.
 [13] Carr, G., D. P. Loucks and G. Blöschl (2013) An analysis of public participation in the Lake Ontario – St. Lawrence River Study. Chapter 4 in: V. I. Gover and G. Kratzenberg (Eds.) *Water Co-management*. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, USA, pp. 48–77.
 [14] Carr, G., G. Blöschl and D. P. Loucks (2012) Evaluating participation in water resource management: A review. *Water Resources Research*, 48, W11401 DOI: 10.1029/2011WR011662
 [15] Di Baldassarre, G., A. Viglione, G. Carr, L. Kuil, J. L. Salinas and G. Blöschl (2013) Socio-hydrology: conceptualising human-flood interactions. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 3295–3303, doi:10.5194/hess-17-3295-2013
 [16] DWA (2012) Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, Merkblatt DWA-M 552, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef, Deutschland
 [17] EU (2000) Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften* L 327/1-L 327/72.
 [18] EU (2007) 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–L288/34.
 [19] Forchheimer, Ph. (1913) Der Wolkenbruch im Grazer Hügelland vom 16. Juli 1913. *Sitzungsberichte Österr. Akad. Wiss., Math.-naturwiss. Kl. Sitzungsber. Bd. CXXII, Abt., 2A*, pp. 2099–2109.
 [20] Gaál, L., J. Szolgay, S. Kohnová, K. Hlavčová, J. Parajka, A. Viglione, R. Merz and G. Blöschl (2015) Dependence between flood peaks and volumes: a case study on climate and hydrological controls. *Hydrological Sciences Journal*, 60:6, 968–984, doi: 10.1080/02626667.2014.951361
 [21] Genest, C., and A. C. Favre (2007) Everything you always wanted to know about copula modeling but were afraid to ask. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(4), 347–368.
 [22] Gutknecht, D., Ch. Reszler und G. Blöschl (2002) Das Katastrophenhochwasser vom 7. August 2002 am Kamp – eine erste Einschätzung. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 119 (12), pp. 411–413.

- [23] Hall, J., B. Arheimer, M. Borga, R. Brázdil, P. Claps, A. Kiss, T. R. Kjeldsen, J. Kriaučiūnienė, Z. W. Kundzewicz, M. Lang, M. C. Llasat, N. Macdonald, N. McIntyre, L. Mediero, B. Merz, R. Merz, P. Molnar, A. Montanari, C. Neuhold, J. Parajka, R. A. P. Perdigão, L. Plavcová, M. Rogger, J. L. Salinas, E. Sauquet, C. Schär, J. Szolgay, A. Viglione and G. Blöschl (2014) Understanding Flood Regime Changes in Europe: A state of the art assessment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 2735–2772, doi:10.5194/hess-18-2735-2014.
- [24] Horváth, Z., J. Waser, R. A. P. Perdigão, A. Konev and G. Blöschl (2015) A two-dimensional numerical scheme of dry/wet fronts for the Saint-Venant system of shallow water equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 77, 159–182.
- [25] Irvin, R. A. and J. Stansbury (2004) Citizen participation in decision making: Is it worth the effort?, *Public Admin. Rev.*, 64, 55–65.
- [26] Kiss, A., R. Brázdil and G. Blöschl (2015) Floods and their changes in historical times - a European perspective. *Special Issue of Hydrology and Earth System Sciences*, http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/special_issue191.html
- [27] Kjeldsen, T.R., N. Macdonald, M. Lang, L. Mediero, T. Albuquerque, E. Bogdanowicz, R. Brázdil, A. Castellarin, V. David, A. Fleig, G.O. Gül, J. Kriaučiūnienė, S. Kohnová, B. Merz, O. Nicholson, L.A. Roald, J.L. Salinas, D. Saraukiene, M. Šraj, W. Strupczewski, J. Szolgay, A. Toumazis, W. Vanneuville, N. Veijalainen, D. Wilson (2014) Documentary evidence of past floods in Europe and their utility in flood frequency estimation. *Journal of Hydrology*, 517, 963–973.
- [28] Kohl, B., K. Klebinder, G. Markart, F. Perzl, H. Pirkl, F. Riedl und L. Stepanek (2008) Analyse und Modellierung der Waldwirkung auf das Hochwasserereignis im Paznauntal vom August 2005. www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2008_2_505.pdf
- [29] Lubell, M. (2004) Resolving conflict and building cooperation in the National Estuary Program, *Environ. Manage.*, 33(5), 677–691.
- [30] Merz, R., G. Blöschl and G. Humer (2008) Hochwasserabflüsse in Österreich – das HORA Projekt. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 60, (9–10) 129–138.
- [31] Merz, B., S. Vorogushyn, U. Lall, A. Viglione and G. Blöschl (2015) Charting unknown waters – On the role of surprise in flood risk assessment and management, *Water Resour. Res.*, 51, 6399–6416, doi:10.1002/2015WR017464.
- [32] Merz, R. und Blöschl, G. (2008) Informationserweiterung zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 52, (6) 300–309
- [33] Nester, T., J. Komma, A. Viglione and G. Blöschl (2012) Flood forecast errors and ensemble spread – a case study, *Water Resources Research*, 48, W10502, 19 pp doi:10.1029/2011WR011649.
- [34] Nicholas, J., G.D. Holt and D.G. Proverbs (2011) Towards standardising the assessment of flood damaged properties in the UK, *Structural Survey*, Vol. 19 Iss: 4, pp.163–172
- [35] Ortner, T., G. Hesina, H. Kontrus und R. Glatzl (2011) Hochoauflösende flächendeckende Dokumentation von Tunneloberflächen. In: *Proceedings of Symposium und Fachmesse für Angewandte Geoinformatik (AGIT 2011)*: pp. 914–923.
- [36] Pires, C.A.L. and R.A.P. Perdigão (2012) Minimum mutual information and non-Gaussianity through the maximum entropy method: theory and properties. *Entropy*, 14(6), 1103–1126; doi:10.3390/e14061103.
- [37] Ribičić, H., J. Waser, R. Fuchs, G. Blöschl and E. Gröller (2013) Visual analysis and steering of flooding simulations. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19 (6) 1062–1075 doi: 10.1109/TVCG.2012.175
- [38] Rogger, M., B. Kohl, H. Pirkl, M. Hofer, R. Kirnbauer, R. Merz, J. Komma, A. Viglione und G. Blöschl (2011) HOWATI – HochWasser Tirol – Ein Beitrag zur Harmonisierung von Bemessungshochwässern in Österreich. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 63, (7–8), 153–161.
- [39] Rogger, M., B. Kohl, H. Pirkl, A. Viglione, J. Komma, R. Kirnbauer, R. Merz and G. Blöschl (2012) Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation in Austria - Do they tell a consistent story?, *Journal of Hydrology*, 456–457, pp. 30–43, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.05.068.
- [40] Salazar, S., F. Francés, J. Komma, T. Blume, T. Francke, A. Bronstert and G. Blöschl (2012) A comparative analysis of the effectiveness of flood management measures based on the concept of „retaining water in the landscape“ in different European hydro-climatic regions, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 3287–3306, doi:10.5194/nhess-12-3287-2012.
- [41] Salinas, J. L., A. Kiss, A. Viglione, R. Viertel and G. Blöschl (2016) A fuzzy Bayesian approach to flood frequency estimation with unprecise historical information. Submitted to *Water Resources Research*.
- [42] Schröter, K., H. Kreibich, K. Vogel, C. Riggelsen, F. Scherbaum and B. Merz (2014) How useful are complex flood damage models?. *Water Resources Research*, 50(4), 3378–3395.
- [43] Sivapalan, M. and G. Blöschl (1998) Transformation of point rainfall to areal rainfall: intensity-duration-frequency curves. *Journal of Hydrology*, 204, pp. 150–167.
- [44] Sivapalan, M. and G. Blöschl (2015) Time scale interactions and the coevolution of humans and water. *Water Resour. Res.*, 51, 6988–7022, doi:10.1002/2015WR017896.
- [45] Sivapalan, M., H. H. G. Savenije and G. Blöschl (2012) Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrological Processes*, 26, 1270–1276, doi: 10.1002/hyp.8426
- [46] Skublics, D., G. Blöschl and P. Rutschmann (2016) Effect of river training on flood retention of the Bavarian Danube. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, in press.
- [47] StMUV (2014) Hochwasserschutz, Aktionsprogramm 2020plus. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, München, www.wasser.bayern.de
- [48] UMBW (2014) Strategie zur Minderung von Hochwasserrisiken in Baden-Württemberg. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart, www.hochwasserbw.de
- [49] van den Hove, S. (2006) Between consensus and compromise: Acknowledging the negotiation dimension in participatory approaches, *Land Use Policy*, 23, 10–17.
- [50] Viglione, A., G. B. Chirico, R. Woods and G. Blöschl (2010) Generalised synthesis of space-time variability in flood response: An analytical framework. *Journal of Hydrology*, 394 (1–2), 198–212. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.05.047.
- [51] Viglione, A., G. Di Baldassarre, L. Brandimarte, L. Kuil, G. Carr, J. L. Salinas, A. Scolobig and G. Blöschl (2014) Insights from socio-hydrology modelling on dealing with flood risk – roles of collective memory, risk-taking attitude and trust. *Journal of Hydrology*, 518, Part A, 71–82, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.018>.
- [52] Viglione, A., R. Merz, J. S. Salinas and G. Blöschl (2013) Flood frequency hydrology: 3. A Bayesian analysis, *Water Resources Research*, 49, doi:10.1029/2011WR010782
- [53] Vorogushyn, S., K.E. Lindenschmidt, H. Kreibich, H. Apel and B. Merz (2012) Analysis of a detention basin impact on dike failure probabilities and flood risk for a channel-dike-floodplain system along the river Elbe, Germany. *Journal of Hydrology*, 436, 120–131.
- [54] Waser, J., H. Ribičić, R. Fuchs, C. Hirsch, B. Schindler, G. Blöschl and E. Gröller (2011) Nodes on Ropes: A Comprehensive Data and Control Flow for Steering Ensemble Simulations, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17 (12), 1872–1881, pp. doi:10.1109/TVCG.2011.225
- [55] Waser, J., R. Fuchs, H. Ribičić, B. Schindler, G. Blöschl and E. Gröller (2010) World Lines. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16 (6), 1458–1467.

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Günter Blöschl¹⁾
 Dipl.-Ing. Zsolt Horváth^{1,2)}
 Mag. Dr. Andrea Kiss¹⁾
 Dipl.-Ing. Dr. Jürgen Komma¹⁾
 Dipl.-Ing. Dr. Thomas Nester¹⁾
 Mag.rer.nat. Dr. Rui A. P. Perdigão, DSc¹⁾
 Dipl.-Ing. Dr. Alberto Viglione¹⁾
 Dipl.-Ing. Dr. Jürgen Waser²⁾

¹⁾ Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
 Technische Universität Wien
 Karlsplatz 13, 1040 Wien
 Tel: +43-1-58801-22301
 E-Mail: bloeschl@hydro.tuwien.ac.at

²⁾ VRVis Zentrum für Virtual Reality
 und Visualisierung Forschungs-GmbH
 Donau-City-Straße 1, 1220 Wien
 Tel: +43(0)1 20501 30803
 E-Mail: jwaser@vrvis.at