

# Ein neues Modell für die Berechnung von Hochwassergefährdungskarten

Sergiy Vorogushyn <sup>1</sup>, Heiko Apel <sup>1</sup>, Karl-Erich Lindenschmidt <sup>2</sup>, Bruno Merz <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, <sup>2</sup> GFZ, jetzt Manitoba Water Stewardship, Kanada

*Hazard and risk assessments for river reaches protected by dikes have not adequately considered the inundation processes up to now. Particularly, the processes of dike failures and their influence on the hinterland inundation and flood wave propagation lack comprehensive consideration. This study focuses on the development and application of a new modelling system which allows a comprehensive flood hazard assessment along diked river reaches considering dike failures. The Inundation Hazard Assessment Model (IHAM) developed at the GFZ German Research Centre for Geosciences comprises three models interactively coupled at runtime. These are: (1) 1D unsteady hydrodynamic model for river channel and floodplain between dikes, (2) probabilistic dike breach model, which assesses dike breach probabilities, breach widths and flow rates through the breach, and (3) 2D raster-based diffusion wave storage cell model of the hinterland areas behind the dikes. IHAM generates probabilistic flood hazard maps that show spatial characteristics of inundation depths, flow velocities and other flood intensity indicators. These maps explicitly indicate uncertainties of these characteristics. Furthermore, IHAM enables the identification of endangered dike sections and computation of their failure probabilities. The knowledge gained with IHAM can significantly contribute to the planning of flood protection measures and risk analyses.*



Elbehochwasser  
2006 bei Meißen

## Deichbüche: Unzureichende Gefährdungsabschätzung

Flussdeiche bieten einen effizienten Schutz gegen kleine und mittlere Hochwasser. Unter der Last hoher Wasserstände sowie langer Anstaudauer können diese Flussdeiche jedoch versagen (Abb. 1). Die Schäden solcher Deichbrüche können dramatische Ausmaße erreichen. Denn entlang eingedeichter, inzwischen nur noch selten überfluteter Flussabschnitte haben sich hinter den Deichen die wirtschaftlichen Aktivitäten intensiviert und große Werte z. B. in Form von Wohngebäuden und Unternehmen akkumuliert. Hochwasserexperten berechnen daher nicht nur die Gefährdung, sondern auch das Schadenspotential einer Region, um das Risiko für die dort lebenden Menschen und ihren Besitz zu ermitteln und geeignete Maßnahmen für deren Schutz zu ergreifen.

Bisherige Methoden zur Gefährdungs- und Risikoabschätzung für die eingedeichten Flussstrecken sind jedoch noch unzureichend. Besonders Deichbrüche und deren Einfluss auf die Überflutung im Hinterland sind bisher wenig verstanden. Auch wurde nur selten untersucht, wie sich die Verringerung des Hochwasserscheitels infolge der Deichbrüche stromaufwärts auf die Deichstabilität im Unterlauf und die Gefährdung auswirkt (Apel et al. 2004, 2006). Die Berechnung von Überflutungscharakteristika wie Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Wie die Berücksichtigung von Deichbrüchen zu diesen Unsicherheiten beiträgt, wurde bisher wissenschaftlich nicht untersucht.

## IHAM – Inundation Hazard Assessment Model

Ein neuer, am GFZ entwickelter Modellierungsansatz schließt diese Lücke und ermöglicht eine genaue Abschätzung der Hochwassergefährdung entlang eingedeichter Flussstrecken unter Berücksichtigung von Deichbrüchen. Das Inundation Hazard Assessment Model (IHAM; Vorogushyn et al. 2010) besteht aus drei gekoppelten Einzelmodellen: (1) einem eindimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modell für den Fluss und die Vorländer zwischen den Deichen, (2) einem wahrscheinkeitsbasierten Deichbruchmodell, das die Wahrscheinlichkeiten von Deichbrüchen, mögliche Breschenbreiten und Breschenausflüsse ermittelt, und (3) einem zweidimensionalen raster-basierten Überflutungsmodell für das Hinterland, das auf dem sogenannten Speicherzellenansatz und der Diffusionswellengleichung basiert. Ein Schema des IHAM und des Simulationsablaufs ist in Abb. 2 dargestellt. Durch die Kopplung des Flussmodells mit dem Überflutungsmodell kann die Interaktion zwischen Fluss und Vorland abgebildet werden. Beispielsweise setzt ein Rückfluss aus Überflutungsflächen in den Fluss ein, wenn der Wasserstand im Fluss sinkt.

Das wahrscheinkeitsbasierte Deichbruchmodell beschreibt Deichbrüche, die infolge von drei möglichen Bruchmechanismen auftreten: dem Überströmen, dem hydraulischen Grundbruch im Deichuntergrund und dem Versagen der landseitigen Böschung als Folge des Sickerflusses und der Erosion im Deichkörper (Mikroinstabilität). Diese drei Bruchmechanismen wurden als die wichtigsten Auslöser für Deichbrüche an heterogenen, über Jahrzehnte aufgebauten Deichen identifiziert (Nagy & Tóth 2005, Horlacher et al. 2005). Für jeden Bruchmechanismus wurden Deichbrüche auf der Basis von sogenannten Fragilitätsfunktionen simuliert, mit deren Hilfe die Versagenswahrscheinlichkeit eines Deichabschnitts unter bestimmter hydraulischer Last (Wasserstand und Anstaudauer) berechnet werden kann. Die Versagenswahrscheinlichkeit wird durch die Unsicherheiten bezüglich der geometrischen und geotechnischen Deichparameter beeinflusst. Bei der Erstellung der Fragilitätsfunktionen wird dies mittels Monte-Carlo-Simulation explizit berücksichtigt (Apel et al. 2004, Vorogushyn et al. 2009).

Das zweidimensionale Überflutungsmodell berechnet ein erweitertes Spektrum von Hochwasserintensitätsindikatoren wie Überflutungstiefe, Fließgeschwindigkeit, Impuls, Überflutungsdauer und Wasseranstiegsrate nach einem simulierten Deichbruch. Auch das IHAM-Kernmodul wird im Rahmen einer Monte-Carlo-Simulation ausgeführt (Abb. 2) und berücksichtigt die natürliche Variabilität der Hochwasserereignisse. Die Eingangsszenarien werden aus der Analyse von historischen Hochwasserabflussreihen mittels Extremwertstatistik und Clusteranalyse erstellt (Apel et al. 2004) und sind somit mit Wahrscheinlichkeiten belegt. Deichversagen wird als eine weitere stochastische Komponente im Modell berücksichtigt und wird auf der Grundlage von Fragilitätsfunktionen für jeden Deichabschnitt



Abb. 1: Deichbruch im Elbeinzugsgebiet während des Hochwassers 2002

Fig. 1: Dike breach in the Elbe catchment during the flood of 2002



**Kontakt:** Sergiy Vorogushyn  
(vorogus@gfz-potsdam.de)

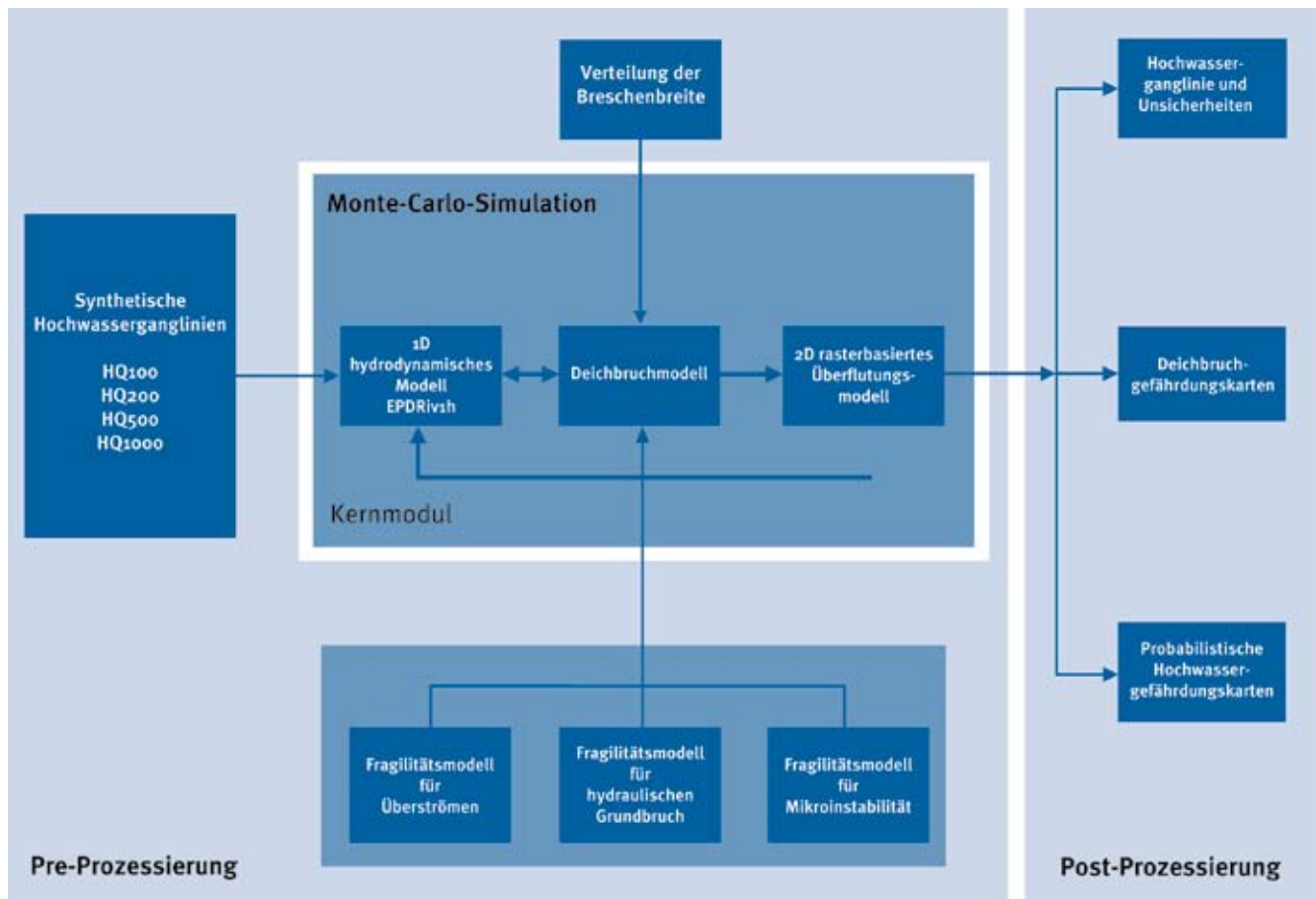


Abb. 2: Schematische Darstellung des IHAM-Modellierungssystems und Simulationsablaufs (Vorogushyn et al. 2010)

Fig. 2: Schematic representation of the IHAM modelling system and simulation workflow (Vorogushyn et al. 2010)

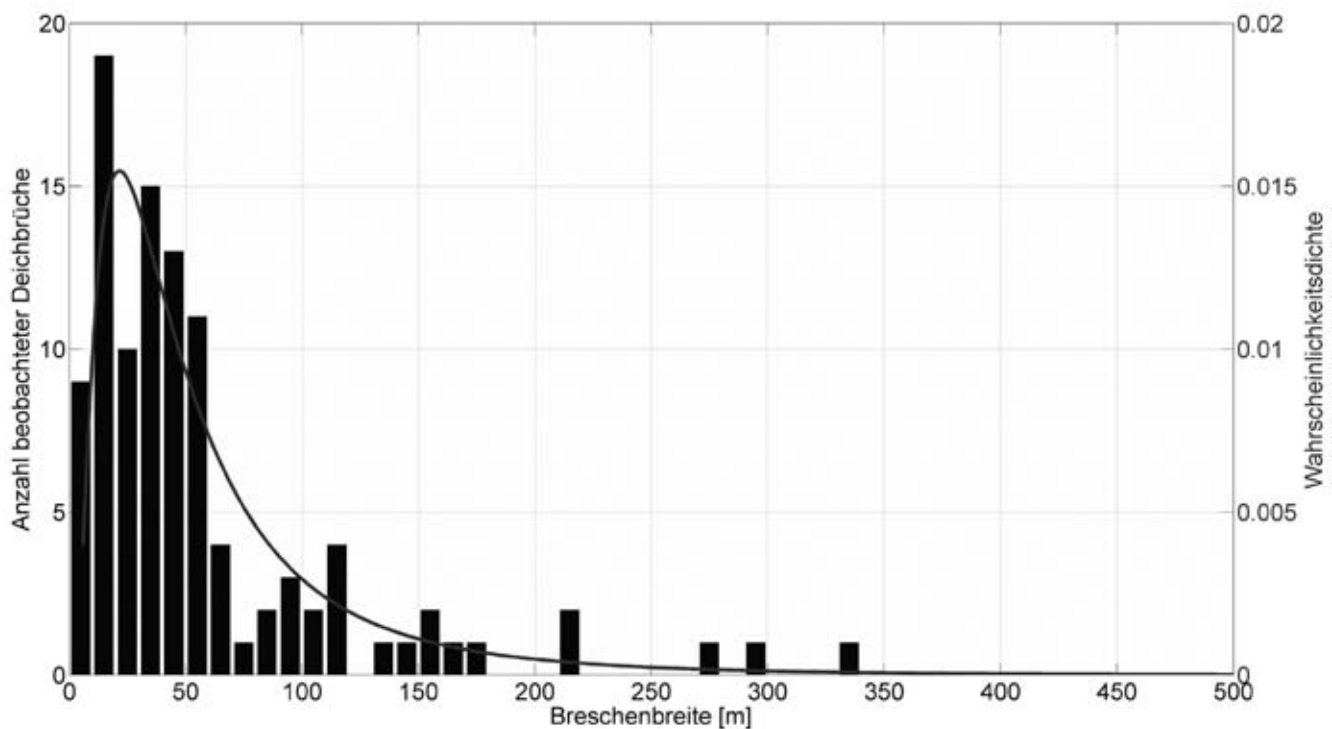


Abb. 3: Häufigkeitsverteilung der Breschenbreiten im Elbeinzugsgebiet während des Hochwassers 2002 und angepasste Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (Vorogushyn et al. 2010). Datenquelle: Gocht 2002, Horlacher et al. 2005

Fig. 3: Frequency distribution of breach widths in the Elbe catchment during the flood event of 2002 and fitted probability density function (Vorogushyn et al. 2010). Data source: Gocht 2002, Horlacher et al. 2005

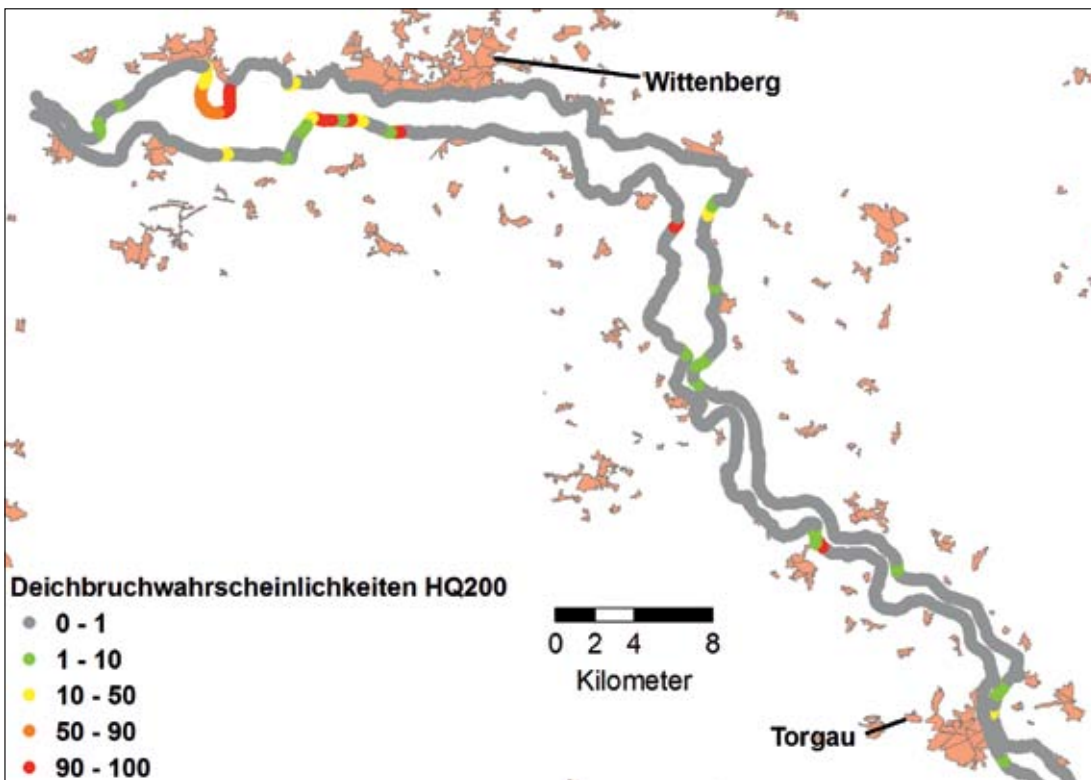


Abb. 4: Wahrscheinlichkeitsbasierte Deichgefährdungskarte für ein Hochwasserszenario, das – statistisch gesehen – im Schnitt ein Mal in 200 Jahren auftritt.

Fig. 4: Probabilistic dike hazard map for a flood scenario which statistically occurs on average once in 200 years.

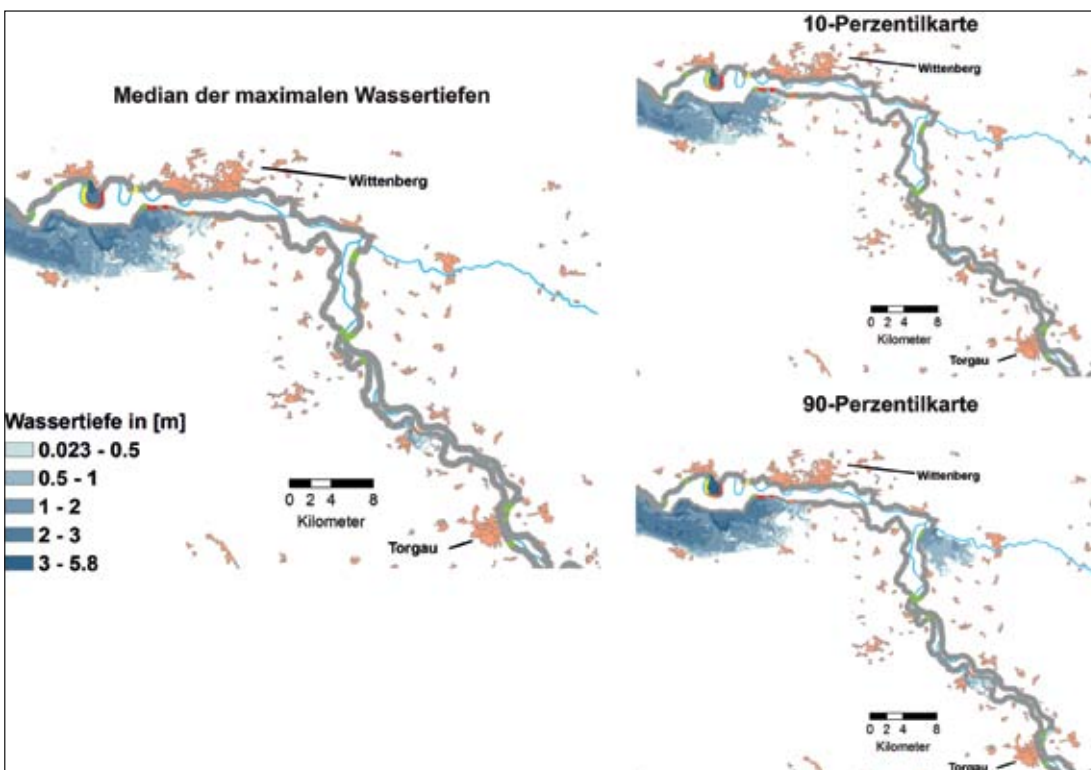


Abb. 5: Wahrscheinlichkeitsbasierte Hochwassergefährdungskarten für ein Hochwasserszenario mit der Wiederkehrperiode von 100 Jahren. Als Hochwasserintensitätsindikator wird die maximale Wassertiefe dargestellt.

Fig. 5: Probabilistic flood hazard map for a scenario with the return period of 100 years flood event at gauge Torgau. Maximum inundation depth is used as flood intensity indicator.

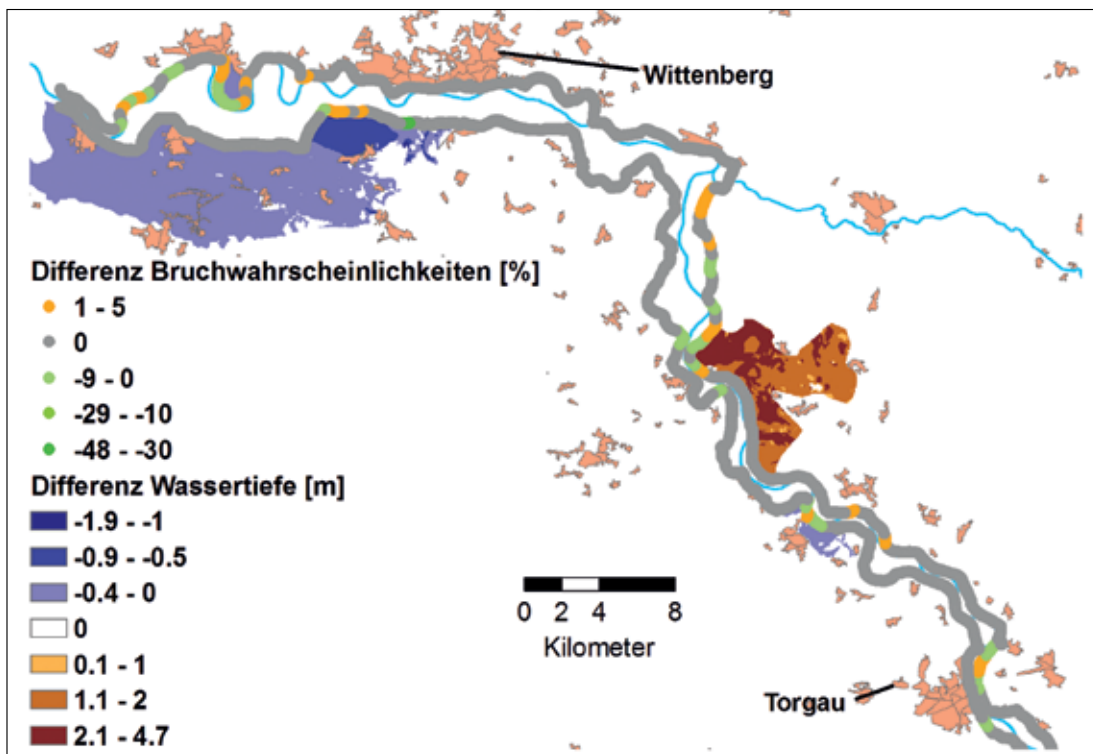


Abb. 6: Differenz zwischen den Bruchwahrscheinlichkeiten und maximalen Wassertiefen in 100-jährigen Szenarien mit und ohne Polder.

Fig. 6: Difference in dike breach probability and maximum inundation depth between flood scenarios with and without detention areas (100-year flood scenarios).

und den simulierten hydraulischen Verhältnissen modelliert. Im Fall eines simulierten Deichbruchs wird die Breschenbreite im Modellsystem stochastisch aus der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (Abb. 3) bestimmt.

### Testgebiet Elbe

Das Modell wurde für einen etwa 91 km langen Flussabschnitt entwickelt und getestet. Dieser Flussabschnitt ist durchgängig eingedeicht und befindet sich an der deutschen Elbe zwischen den Pegeln Torgau und Vockerode. Die Fließstrecke hat ein relativ geringes Gefälle sowie besonders breite und flache Hinterlandbereiche. Nach Deichbrüchen werden diese Hinterlandflächen sehr großräumig überflutet, wie zum Beispiel während des Hochwassers im August 2002.

Das eindimensionale hydrodynamisch-numerische Modell wurde für die Fließstrecke aufgesetzt, kalibriert und validiert. Die geometrischen und geotechnischen Deichparameter wurden aus verschiedenen Literaturquellen bezogen (Kanowski 1977, Macke 2001, Gocht 2002, Kortenhaus & Oumeraci 2004, LTV 2006) und beziehen sich auf die unsanierten Deichzustände vor dem August-Hochwasser 2002. Sie entsprechen daher nicht dem heutigen Schutzniveau. Die Szenarioberechnungen

wurden von synthetischen Hydrographen für den Hauptstrom und die Nebenflüsse angetrieben, die für Hochwässer mit Wiederkehrintervallen von 100, 200, 500, und 1000 Jahren entwickelt wurden (Abb. 2).

Mit der Monte-Carlo-Simulation werden die Hochwasserabflüsse entlang der Strecke berechnet. Die berechneten Deichbruchhäufigkeiten werden durch wahrscheinlichkeitsbasierte Deichgefährdungskarten visualisiert (Abb. 4).

Diese Deichgefährdungskarten bilden die Versagenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Deichabschnitte für jedes modellierte Hochwasserszenario ab. Die Versagenswahrscheinlichkeiten lassen sich auch separat für jeden Bruchmechanismus (Überströmen, hydraulischer Grundbruch und Mikroinstabilität) berechnen und darstellen. Karten dieser Art können für die Planung von Deichaufbaumaßnahmen genutzt werden sowie Hinweise darauf geben, welche Deichstrecken während extremer Hochwasserereignisse besonders geschützt bzw. verstärkt werden müssen.

Als ein weiteres Ergebnis der Simulation werden wahrscheinlichkeitsbasierte Hochwassergefährdungskarten erstellt (Abb. 5). Diese Karten stellen räumliche Muster von Überflutungstiefen, Fließgeschwindigkeit, Überflutungsdauern und

anderen Hochwasserintensitätsindikatoren für Szenarien mit verschiedenen Wiederkehrperioden dar. IHAM ermöglicht die Erstellung sogenannter Perzentilkarten der Hochwassergefährdung, die den Median und die Unsicherheitsbänder der Hochwasserintensitätsindikatoren darstellen (Abb. 5). Die Unsicherheiten resultieren aus der natürlichen Variabilität der Hochwasserganglinien und der Zufälligkeit der Deichbruchprozesse wie Bruchstelle am Fluss, Bruchzeitpunkt, und Breschenbreite.

Schließlich wurden mit IHAM Szenarien im Hinblick auf die Aktivierung eines geplanten Polders an der mittleren Elbe simuliert. Die Minderung des Abflussscheitels durch den Polder führt zu einem leichten Rückgang der Bruchwahrscheinlichkeiten flussabwärts des Polders (Abb. 6). Das resultiert in einer Verringerung der Überflutungstiefe bis zu 1,9 m.

Die Beispiele zeigen, dass das IHAM-Modellierungssystem wichtige Informationen zur Effizienzbewertung von Hochwasserschutzmaßnahmen liefern kann.

## Werkzeug für ein modernes Hochwassermanagement

Das am GFZ entwickelte IHAM-Modellierungssystem stellt ein neues wissenschaftliches Werkzeug für die Untersuchung fluvialer Überflutungsdynamik in extremen Hochwassersituationen unter Berücksichtigung des Einflusses technischer Hochwasserschutzmaßnahmen dar. Das System hat eine hohe praktische Bedeutung für die Entscheidungsunterstützung im modernen Hochwassermanagement. Die neuartigen wahr-scheinlichkeitsbasierten Deichbruch- und Hochwassergefährdungskarten können effizient bei der Risikokommunikation eingesetzt werden. Die Gefährdungskarten zeigen erstmalig die Unsicherheiten, mit denen die Gefährdungsaussagen behaftet sind und tragen damit zu einer wirksamen Verbesserung der Gefahrenabwehr bei.

## Literatur

- Apel, H., Thieken, A. H., Merz, B., Blöschl, G. (2004): Flood risk assessment and associated uncertainties. – *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 2, 295-308, 10.5194/nhess-4-295-2004
- Apel, H., Thieken, A. H., Merz, B., Blöschl, G. (2006): A probabilistic modelling system for assessing flood risks. – *Natural Hazards*, 38, 1-2, 79-100, 10.1007/s11069-005-8603-7
- Gocht, M. (2002): Deichbrüche und Deichüberströmungen an Elbe und Mulde im August 2002, Final Report, Berlin, Water & Finance, 56 S.
- Horlacher, H.-B. (2005): Analyse der Deichbrüche an der Elbe und Mulde während des Hochwassers 2002 im Bereich Sachsen, (Forschungsbericht ; Fo2005/03), Technische Universität Dresden, 82 S.
- Kanowski, H. (1978): Ein Beitrag zur zerstörungsfreien Untersuchung von Flusdeichen, Dresden
- Kortenhaus, A., Oumeraci, H. (Eds.) (2002): Probabilistische Bemessungsmethoden für Seedeiche (ProDeich), (Bericht ; 877), Leichtweiss-Institut für Wasserbau, [Abteilung] Hydromechanik und Küsteningenieurwesen, Technische Universität Braunschweig, 205 S., <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/eo1fbo2/374243034.pdf>
- Landestalsperrenverwaltung (2006): HWSK-Arbeitsdaten, Landestalsperrenverwaltung (LTV) Sachsen.
- Macke, E. (2001): Bewertung von Zustand und Hochwasserschutzgrad der Elbedeiche, (Bericht), Ingenieurgesellschaft Prof. Dr.-Ing. E. Macke mbH, 118 S.
- Nagy, L., Tóth, S. (2005): Detailed technical report on the collation and analysis of dike breach data with regards to formation process and location factors, EU-IMPACT-Projekt, H-EURAU Ltd.
- Vorogushyn, S., Merz, B., Apel, H. (2009): Development of dike fragility curves for piping and micro-instability breach mechanisms. – *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHES)*, 9, 4, 1383-1401, 10.5194/nhess-9-1383-2009
- Vorogushyn, S., Merz, B., Lindenschmidt, K.-E., Apel, H. (2010): A new methodology for flood hazard assessment considering dike breaches. – *Water Resources Research*, 46, W08541, 10.1029/2009WR008475