

# Innovationen im Deichbau – Ausgewählte Beispiele

Holger Schüttrumpf

## 1 Einleitung

Hochwässer stellen immer wieder eine existentielle Bedrohung für Leben und Eigentum der Menschen sowie für Industrie, Landwirtschaft, Gebäude und Infrastruktureinrichtungen in hochwassergefährdeten Gebieten dar. Gerade in den letzten Jahren haben uns die Hochwasserereignisse in Sachsen, Sachsen-Anhalt, Bayern und Baden-Württemberg die Gefährdungen auch in Deutschland verdeutlicht, die trotz aller durchgeführten Maßnahmen im Rahmen eines vorsorgenden Hochwasserschutzes weiterhin bestehen.

Hochwasserereignisse entstehen als Teil des natürlichen Wasserkreislaufes durch starke Niederschlagsereignisse und Schneeschmelzen in Abhängigkeit der topographischen Eigenschaften im Einzugsgebiet sowie der Abflusseigenschaften der verzweigten Flusssysteme. Die Flüsse treten dabei über die Ufer und überfluten die Vorländer. Extreme Hochwasserereignisse hat es in der Vergangenheit immer gegeben und wird es auch in Zukunft immer wieder geben, allerdings spielen eine Reihe von Faktoren eine Rolle, die durch den Menschen beeinflusst werden und zu einer Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Hochwasserereignissen geführt haben. Hierzu zählen unter anderem veränderte Landnutzungen, Bodenerosion, Flurbereinigungen, Flussbegradigungen, Flächenversiegelung und die regionalen Auswirkungen globaler Klimaänderungen. Das Hochwasserrisiko oder gar die Hochwasserkatastrophe entstehen allerdings erst dadurch, dass sich der Mensch mit seinen diversen Aktivitäten, wie Wohnen, Arbeiten und Freizeit, in hochwassergefährdete Bereiche begibt und es durch Überschwemmungen zu Schäden kommen kann. Erst die dichte Besiedelung der Talflächen durch den Menschen macht das Naturereignis Hochwasser zur Katastrophe. Die Zunahme des gesellschaftlichen Wohlstands, die Industrialisierung und Urbanisierung sowie der demographische Wandel verbunden mit der Ansammlung von Werten in überflutungsgefährdeten Gebieten forcieren diese Entwicklung.

Das Hochwasserrisiko hängt von der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Wasserstandshöhe eines Hochwasserereignisses und den daraus resultierenden Schäden ab. Insbesondere Extremsituationen mit sehr hohen Wasserständen haben eine sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit, führen aber zu hohen Belastungen der Schutzbauwerke wie Deichen und Hochwasserschutzmauern. Bei extremen Hochwasserständen können diese Schutzbauwerke den Belastungen unter Umständen nicht mehr widerstehen und es kommt zum Bauwerksversagen wie Deichbruch und Breschenbildung mit Überflutung des nun ungeschützten Hinterlandes (Abbildung 1). Dabei gelangen

große Wassermengen vom Fluss ins Hinterland und verursachen dort große Schäden. Die Schadenshöhe ist charakterisiert durch die Größe der Überflutungsflächen, deren Ein-stauhöhe und -dauer sowie die Landnutzung unter Berücksichtigung ökonomischer, ökologischer und psycho-sozialer Aspekte.



Abb: 1: Deichbruch (Foto: Scholz, 1976)

Hochwasserschutz besteht heutzutage aus vielen Komponenten, von denen nur eine der technische Hochwasserschutz ist. Flächenvorsorge, Risikovorsorge, Bauvorsorge und Informationsvorsorge sind ebenfalls notwendige und wichtige Komponenten eines vorsorgenden Hochwasserschutzes. Auch wurde der Begriff des Hochwasserschutzes um den Risikobegriff erweitert, um neben den Gefährdungen auch die Konsequenzen eines Hochwassers in der Beurteilung und Bewertung von Maßnahmen zu berücksichtigen.

Ein wesentlicher Aspekt des Hochwasserrisikomanagements ist die Hochwasservorsorge. Hierzu zählen die Flächen- und Bauvorsorge durch angepasste Bebauung und Landnutzung in überschwemmungsgefährdeten Bereichen sowie die Erhöhung des Wasserrückhalts am Entstehungsort durch den Erhalt und die Reaktivierung natürlicher Retentionsflächen, also Überflutungsarealen. Auch die Informationsvorsorge und die Verhaltensvorsorge durch Warnung, Information und Ausbildung der betroffenen Bevölkerung gehören dazu. Ein weiterer wesentlicher Bestandteil des Hochwasserrisikomanagements ist die Bewältigung von Hochwasserereignissen durch Katastrophenschutz, Aufbauhilfe und Wiederaufbau. Alle Elemente des Hochwasserrisikomanagements müssen zur Gewährleistung eines optimalen Hochwasserschutzes berücksichtigt, optimiert und aufeinander abgestimmt werden, um die Auswirkungen von Hochwässern auf die betroffenen Personen und Werte so gering wie möglich zu halten.

Technischer Hochwasserschutz ist und bleibt in diesem Zusammenhang ein wichtiges Instrument des Hochwasserrisikomanagements. In diesem Zusammenhang sind es insbesondere die Deiche, die eine hohe Bedeutung für den Hochwasserschutz entlang unserer Flüsse, Ästuare und der Küsten haben.

Bei der Bemessung von Deichen oder (mobilen) Hochwasserschutzwänden hat durch die Erfahrungen in der Vergangenheit ein Umdenken stattgefunden. Wurden die Deiche anfangs nach Erfahrungswerten, das heißt nach den höchsten jemals gemessenen Hochwasserständen an einem Ort bemessen, so war in den letzten Jahrzehnten die deterministische Bemessung übliche Praxis. Dabei wird auf der Grundlage der verfügbaren Pegeldata statistisch ein Wasserstand ermittelt, der mit einer festgelegten Wahrscheinlichkeit eintritt, beispielsweise einmal in 100 Jahren. Heutzutage wird eine probabilistische und risikoorientierte Bemessung angestrebt. Dabei werden sämtliche Versagensmechanismen eines Hochwasserschutzbauwerkes in ihrer zeitlichen und räumlichen Abfolge berücksichtigt, um die Versagenswahrscheinlichkeit des Bauwerkes zu ermitteln. Vorteile dieser Vorgehensweise sind die Berücksichtigung aller relevanten Versagensmechanismen, die Identifikation von Schwachstellen und risikomindernder Maßnahmen im Deichquerschnitt aber auch in der Deichlinie, die Berücksichtigung von Unsicherheiten sowie die Möglichkeit zur Kostenoptimierung.

Trotz aller Anstrengungen und Maßnahmen wird es uns aber niemals gelingen, das Hochwasserrisiko vollständig zu reduzieren. Eine absolute Sicherheit wird und kann es nicht geben. Vielmehr sollte es das Ziel sein, das Hochwasserrisiko auf akzeptable Risikowerte zu reduzieren und alle Möglichkeiten einer Optimierung zu nutzen.

Daher muss es ein Ziel von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sein, alle Belastungen eines Deiches im Hochwasserfall besser zu kennen, Deiche widerstandsfähiger gegen diese extreme Belastungen zu machen und hochwasserbedingte Schäden an Deichen frühzeitig zu erkennen. Hier gibt es derzeit einige interessante Entwicklungen. Beispiele sollen im folgenden Beitrag vorgestellt werden.

## **2 Widerstandsfähigkeit von Deichen**

Deiche sind Längsbauwerke von vielen Kilometern Länge. Eine Vielzahl von hydraulischen Untersuchungen, die heutzutage die Grundlage unserer Deichbemessung darstellen, wurde in Strömungsrinnen und Wellenkanälen von Wasserbaulichen Versuchshallen unter Laborbedingungen durchgeführt. Hieraus ergibt sich ein wesentlicher Nachteil. Untersuchungen fanden und finden überwiegend im Labor statt und berücksichtigen damit nicht bzw. unzureichend Aspekte wie Vegetation, Oberflächenbeschaffenheit und Alterung der Grasnarbe sowie des Oberbodens. Eine große Unsicherheit besteht insbesondere in der Reaktion der Deichböschungen selber auf die Strömungs- und Wasserstandsbelastung insbesondere bei Überströmung. Diese Reaktionen der Deichböschungen und der Deichkrone sind nach dem Stand der Wissenschaft physika-

lisch-mathematisch derzeit nicht exakt beschreibbar und auch auf der Grundlage empirischer Ansätze aus Modelluntersuchungen kaum quantifizierbar. Eine besondere Schwierigkeit in diesem Zusammenhang stellt auch die Übertragbarkeit klein- oder großmaßstäblicher Modellversuche auf die Natur dar. Somit ist es zwingend erforderlich, entsprechende Untersuchungen zur Bestimmung der tatsächlichen Widerstandsfähigkeit von Deichen z. B. gegen Überströmung in der Natur an realen Deichen durchzuführen. Nur hier können Vegetations- und Witterungseffekte sowie Alterungseffekte naturnah untersucht werden, um die tatsächliche Widerstandsfähigkeit von Deichen gegen Überströmung zu ermitteln.

Abbildung 2 zeigt den sogenannten Overtopping-Simulator, der derzeit sehr erfolgreich in den Niederlanden, Belgien, den USA und Vietnam eingesetzt wird, um die Widerstandsfähigkeit von Deichen gegen Wellenüberlauf zu ermitteln. Untersuchungen mit dem Overtopping Simulator haben zu einem erheblichen Erkenntnisgewinn geführt. Untersuchungen in den Niederlanden an Rhein- und Küstendeichen haben gezeigt (z. B. van der Meer et al., 2010), dass der Deichwiderstand in Bezug auf Strömungsbelastungen deutlich höher als bislang angenommen ist. Dies hat große Auswirkungen auf die Festlegung der Deichsicherheit, denn einerseits sind viele bestehende Deiche somit deutlich sicherer, andererseits können aber auch Deicherhöhungen gegebenenfalls zurückgestellt werden.



Abb. 2: Der Overtopping Simulator (Foto: Schüttrumpf, 2007)

Die kritischen Bereiche von Deichen sind jedoch nicht die großen Überströmstrecken, sondern Bereiche mit Vorschädigungen, Einbauten, unzureichende Grasnarben oder anderen Singularitäten wie Treppen, Bäume oder Zäune im Deich (Schüttrumpf und Oumeraci, 2002). Sie stellen das „schwächste Glied der Kette“ dar und sind somit

maßgebend für den Deichwiderstand und damit die Deichsicherheit. Auch hier konnten die Untersuchungen mit dem Overtopping-Simulator einen erheblichen Erkenntnisgewinn bringen, da sich insbesondere für die kritischen Bereiche konstruktive Maßnahmen zur Erhöhung der Deichsicherheit aus den Untersuchungen herleiten lassen.

Ähnliche Untersuchungen wie in den Niederlanden wurden in Deutschland bislang nicht an realen Deichen im Binnenland sowie an der Küste durchgeführt. Dabei wäre genau dies wichtig, um die tatsächliche Widerstandsfähigkeit unserer Deiche im Hochwasserfall zu kennen und Deiche damit weiter zu optimieren. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den Niederlanden ist aufgrund unterschiedlicher Vegetation, Bodenbeschaffenheiten und Deichgeometrien nicht direkt möglich. Nur wenn bekannt ist, wie und wo Deiche versagen, können entsprechende Gegenmaßnahmen getroffen werden. Aufgrund der Seltenheit des Ereignisses „Deichbruch“ sollten auch bei uns in-situ-Untersuchungen wie in den Niederlanden veranlasst und durchgeführt werden.

### 3 Frühwarnsysteme für Deiche

Viele technische Infrastrukturen sind heutzutage mit Sensoren ausgestattet, um ein Versagen oder einen Ausfall der Funktion einzelner Elemente sowie des Gesamtsystems frühzeitig zu erkennen. Beispielsweise werden Talsperren mit zahlreichen Sensoren (z. B. Piezometer, Inklinometer, Sicherwassermessungen) permanent online überwacht, um Veränderungen in der Talsperre selber frühzeitig zu erkennen und gegebenenfalls Gegenmaßnahmen zu treffen.

In Deichen finden sich derzeit keine Sensoren zur dauerhaften Überwachung von Wasserständen, Verformungen, Festigkeiten, etc., obwohl im Falle eines Deichversagens mit erheblichen Schäden im Hinterland zu rechnen ist. Derzeit findet die Deichüberwachung im Hochwasserfall entweder durch Deichläufer oder aus der Luft mit Drohnen, Helikoptern oder Tornados statt. Zwar sind Befliegungen insbesondere mit Tornados spektakulär, erlauben aber nicht den Blick in den Deich zur frühzeitigen Detektion von unerwünschten Prozessen.

Das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University bearbeitet hier derzeit zusammen mit den Instituten für Textiltechnik und Geodäsie der RWTH Aachen University, dem Institut für Wasserbau der TU Hamburg Harburg, dem Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau der Universität Siegen sowie der Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg an der Entwicklung eines Frühwarnsystems für Deiche auf der Grundlage von Carbonfasern, die in den Deich implementiert werden sollen (Abbildung 3). Im Rahmen des BMBF-Projektes „Earlydike“ wurde ein Modelldeich mit einem Geotextil versehen, auf welches Carbonfasern gestickt wurden. Diese Carbonfasern ermöglichen einerseits die Detektion von Wassergehaltsänderungen, andererseits können auch Verformungen im Deich unmittelbar erkannt werden.

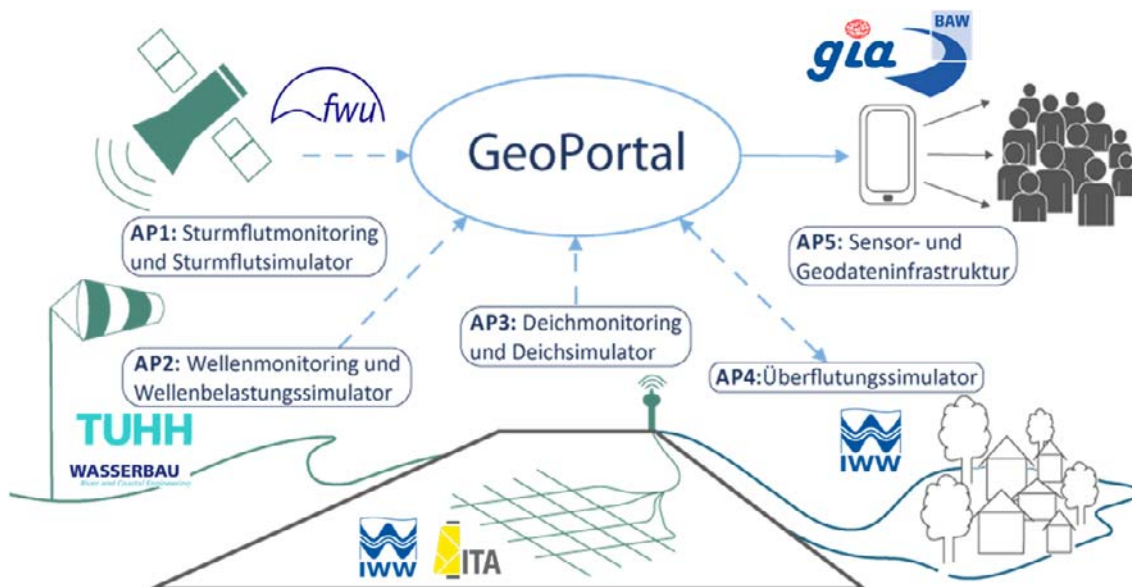


Abb. 3: Struktur des Projektes Earlydike

Die Geosensoren sind allerdings nur ein Teil des Systems „Earlydike“. Die Signale der Sensoren werden an ein Geoportal weitergegeben, wo sie mit Wasserstandsdaten kombiniert werden, um die Wahrscheinlichkeit eines Deichversagens am Ort der Messung über einen Deichsimulator zu bestimmen. Die Daten werden dann über eine Geodateninfrastruktur an mögliche Nutzer weitergegeben bzw. können von den Nutzern über Apps oder Internetseiten abgerufen werden. Dem Nutzer ermöglicht ein einfaches Ampelsystem die einfache Erkennung des Ortes möglicher Deichschäden entlang einer Deichstrecke. Damit können Maßnahmen zur Wiederherstellung der Deichsicherheit zielgerichtet und sofort eingeleitet werden.

## 4 Überströmbare Deiche

Die klassische Ausführung von Deichen sowohl im Binnen- als auch im Küstenbereich stellt der Dreizonendeich mit einer Dichtungsschicht, einem Stützkörper sowie einem landseitigen Filter dar. In Deutschland werden sowohl innenliegende (Kerndichtung) wie auch außenliegende Dichtungsschichten verwendet, auf denen entweder eine grasbewachsene Böschung oder ein Deckwerk aufgebracht wird. Um einen effektiven Erosionsschutz für das Erdbauwerk im Fall eines Überströmereignisses zu gewährleisten, sind in der Regel flach geneigte Böschungen erforderlich. Nur so können die hydraulischen Einwirkungen wie Fließgeschwindigkeit bzw. Schubspannung auf die Böschung entsprechend niedrig gehalten werden. Neben der Erosionsbeanspruchung durch überströmendes Wasser ist auch die Infiltrationsbelastung zu berücksichtigen, wobei die Infiltrationsrate im Wesentlichen durch die Dichtung beeinflusst wird. Daher sind die Anforderungen an die Dichtungsschicht hoch, um ein Piping, eine rückschreitende Erosion und gegebenenfalls ein Versagen des Deiches zu vermeiden.

Zusätzliche oder alternative Sicherungsmaßnahmen können deshalb eingesetzt werden, um einen erhöhten Widerstand der landseitigen Böschung bei einem Überströmereignis auch bei steileren Böschungen zu erreichen. Mögliche Bauweisen unterscheidet LFU (2003) in:

- Deckwerke in Lockerbauweise, wie Steinsatz oder Steinschüttung;
- kohärente Deckwerke, wie Geogittermatrasen oder Mastix-Schotter-Deckwerke;
- Bodenverfestigung, durch das Einmischen von Bindemittel zum Deichbaustoff;
- Verbundbauweisen, durch das Einbringen von Geogitter oder Geogewebe.

Diese unterschiedlichen Bauweisen finden vor allem in der Ausführung von überströmbar-dämmen und Dammscharten bei Hochwasserrückhaltebecken Anwendung, werden in den letzten Jahren aber auch verstärkt bei Deichen eingesetzt. Damit besteht zum einen die Möglichkeit, planmäßig überströmbare Deichstrecken anzuordnen, um im Hinterland vorhandenes Retentionsvolumen zu nutzen, zum anderen unplanmäßige Überlaufstrecken entsprechend zu verstärken, um einen Deichbruch im Fall eines Überströmereignisses zu verhindern. Letzt genannte Möglichkeit sollte dann in Betracht gezogen werden, falls das Schadenspotential im Hinterland entsprechend hoch ist. Die DIN 19712 charakterisiert die Aufgabe von Überlaufstrecken wie folgt: „Eine Gefährdung und Versagensgefahr wegen Überströmen und rückschreitender Erosion von Deichen lässt sich z. B. durch Überlaufstrecken (lokale Kronenabsenkungen mit Sicherung der landseitigen Böschung gegen Erosion) verringern“ (DIN 19712, 2011).

Verfahren zur Bemessung dieser überströmbaren Deichstrecken existieren für verschiedene Bauweisen. So fasst beispielweise LFU (2004) Verfahren zur generellen Bemessung von Deckwerke in Lockerbauweise, kohärenten Deckwerke und Bodenverfestigung zusammen. Für Sonderbauweisen jedoch liegen keine Bemessungsverfahren vor. Deshalb müssen für diese Sonderbauweisen entweder spezielle Bemessungsverfahren entwickelt werden oder die Übertragbarkeit der existierenden Verfahren auf diese Sonderbauweisen muss überprüft werden.

Baustoffe, die somit in Deiche eingebaut werden, müssen auf ihre Funktionsfähigkeit im Hochwasserfall geprüft werden, um dann von einer entsprechenden Zertifizierungsstelle (z. B. DIBt) eine Zulassung zu erhalten. An dieser Stelle bietet sich eine Prüfung durch wasserbauliche Modellversuche im Prototypmaßstab als Grundlage für eine Zertifizierung an. Entscheidend ist die Prüfung im Prototypmaßstab bzw. im Maßstab 1:1, da nur so sämtliche Prozesse (Hydraulik, Bodenmechanik, Strukturmechanik, etc.) erfasst werden können.

Derzeit laufen am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University großmaßstäbliche Modellversuche zur Widerstandsfähigkeit von verzahnten Deckwerksteinen (Gier et al., 2011) gegen Überströmung an einem Überströmdeich.

Dazu wurde die Binnenböschung eines Überströmdeiches im Modell nachgebildet. Der Deichkern besteht aus Sand mit einem Geotextil, einer Filterschicht und den verzahnten Deckwerksteinen als oberste Abdeckschicht. Im Versuch wird dann die Strömungsbelastung schrittweise bis zu einer Überströmrate von rd.  $1 \text{ m}^3/\text{m/s}$  erhöht. Deichinnendrücke, Sickermenge, Strömungsgeschwindigkeiten, Schichtdicken und Verformungen werden an mehreren Positionen auf Deichkrone und Deichbinnenböschung sowie im Deichkern kontinuierlich aufgezeichnet. Auf diese Weise können sämtliche Prozesse im Deichkern, am Geotextil sowie an den Deckwerksteinen gemessen und analysiert werden. Zusätzlich werden Vorschädigungen aufgebracht, um auch die Restwiderstandsfähigkeit nach einem Initialschaden bestimmen zu können. Bislang konnte im Rahmen der aufwändigen Untersuchungen trotz extremer Belastungen kein Versagen der verzahnten Deckwerksteine verursacht werden.

Die getesteten Deckwerksteine haben inzwischen sowohl eine deutsche wie auch eine europäisch technische Zulassung erhalten. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen erlauben dem Planer somit eine sichere Bemessung und Planung, da das Produkt über seinen Lebenszyklus von der Herstellung bis zum Rückbau zugelassen ist und entsprechende Qualitätsanforderungen erfüllen muss.

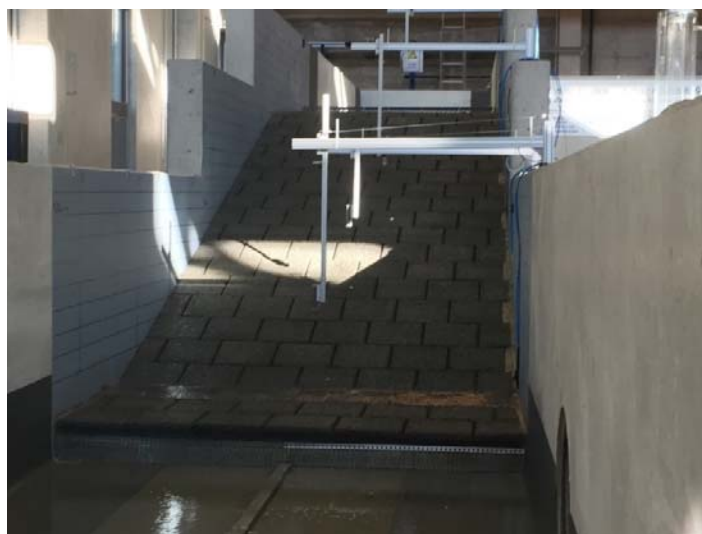
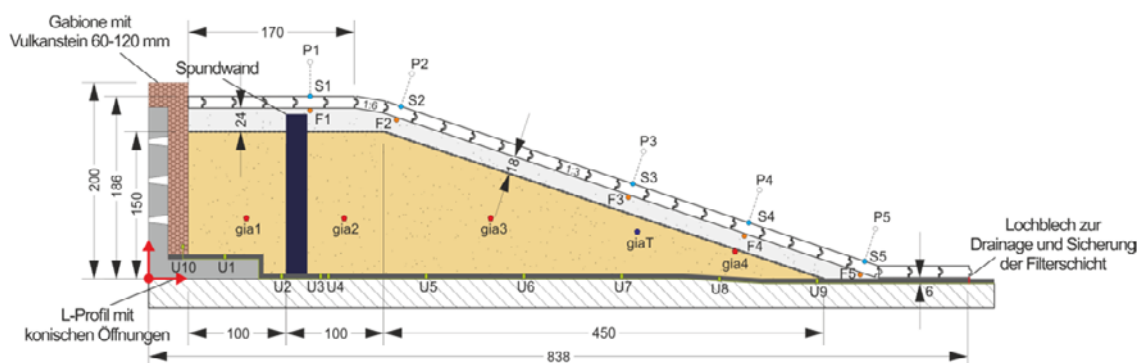


Abb. 4: (a) Querschnitt durch den Modelldiich des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, (b) Foto des Modelldeihs bei Überströmung



## 5 Zusammenfassung

Deiche stellen sowohl im Binnenland wie auch an der Küste das zentrale Element des technischen Hochwasserschutzes dar. Eine absolute Deichsicherheit wird es nie geben, aber auch andere Elemente eines Hochwasserrisikomanagements wie Hochwasservorsorge, Flächenvorsorge, Informationsvorsorge und Risikovorsorge ermöglichen keinen hundertprozentigen Schutz. Ziel muss es vielmehr sein, den Hochwasserschutz weiter zu optimieren und zu verbessern.

Auch bei Deichbemessung, Deichplanung, Deichbau und Deichüberwachung sind Optimierungspotentiale vorhanden. Beispielhaft wurde anhand aktueller Forschungsvorhaben gezeigt, wo Optimierungspotentiale bestehen und wie diese durch entsprechende Forschungs- und Entwicklungsvorhaben bearbeitet werden können. Durch Umsetzung dieser Forschungsergebnisse kann nicht nur die Deichsicherheit erhöht werden, vielmehr können auch Kosten sowohl beim Bau wie auch für potentielle Hochwasserschäden reduziert werden.

## 6 Schrifttum

Gier, Fabian; Mönnich, Jens; Schüttrumpf, Holger; van der Meer, Jentsje (2011): Experimentelle Untersuchungen zur Stabilität von verzahnten Setzsteindeckwerken. In: Kleine und Große Steine: 41. IWASA, Internationales Wasserbau-Symposium 2011 / Hrsg. v. Holger Schüttrumpf. - Aachen : Shaker, 2011. - (Mitteilungen / Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen ; 164). - ISBN: 978-3-8440-0542-4, S./Art.: 39-58

LFU (2003) BW-Plus Forschungstransfer Informationsveranstaltung. Überströmbare Dämme, Dammscharten und Flussdeiche. Fachtagung am 11. November 2003

Schüttrumpf, H.; Oumeraci, H. (2002) Deichschäden. Mitteilungen des Leichtweiss-Instituts für Wasserbau. H. 149

van der Meer, Jentsje; Hardeman, Bianca; Bornschein, Antje; Steendam, Gosse Jan; Schüttrumpf, Holger; Verheij, Henk (2010): Flow depths and velocities at crest and inner slope of a dike, in theory and with the wave overtopping simulator. In: The 32nd International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2010): book of abstracts, June 30 - July 5, 2010, Shanghai, China. - [Shanghai, China] : [ICCE], 2010. - ISSN: 2156-1028, S./Art. Paper No. 193

### **Anschrift des Verfassers**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University  
Mies-van-der-Rohe-Str. 17, 52056 Aachen