



42. IWASA

Internationales Wasserbau-Symposium
Aachen 2012

Hochwasser – eine Daueraufgabe!

12. und 13. Januar 2012

SBW / Flood Control 2015

Praktische Untersuchungen zur rückschreitenden Erosion am Versuchsdeich „Ikdijk“

Ulrich Förster

Abstract

Small-, medium- and full-scale experiments are performed to investigate the process of backward erosion (piping) and to validate the model of Sellmeijer. The observed processes are divided in four phases: seepage, backward erosion, widening of the pipe and levee failure. Initially the erosion activity consists of very limited not noticeable sand transport. Increase of hydrodynamic head results in backward erosion, marked by the occurrence of continuously sand transporting sand boils. The transition from backward erosion to widening of the pipe cannot be observed by the amount of transported sand or the flow rate. Failure can take place within a short time. The swift transformation of small sand boils to levee failure therefore appears to be extremely hazardous when determining the seriousness of piping underneath a levee.

Zusammenfassung

In klein-, mittel- und großmaßstäblichen Experimenten wurde der Versagensprozess der rückschreitenden Erosion (Piping) untersucht und das Modell von Sellmeijer validiert. Die in den Experimenten beobachteten Prozesse sind sehr ähnlich und können in vier Phasen unterteilt werden: Sickerwasseraustritt, rückschreitende Erosion, Aufweitung der Röhre und Deichversagen. Zu Beginn äußert sich die Erosionsaktivität in einem sehr begrenzten, kaum wahrnehmbaren Sandtransport. Eine Zunahme des Potentialunterschiedes resultiert in rückschreitender Erosion, die durch einen kontinuierlichen Sandtransport und die Entstehung von sandenden Auswurftrichtern gekennzeichnet ist. Der Übergang von rückschreitender Erosion zur Aufweitung der Röhre kann nicht anhand des transportierten Sandvolumens oder der Durchflussmenge erkannt werden. Versagen kann in kürzester Zeit eintreten. Der rasche Übergang von der Entstehung kleiner sandender Auswurftrichter zum Deichversagen erscheint daher äußerst gefährlich bezüglich der Ermittlung der Relevanz von Piping unterhalb eines Deiches.

1 Einleitung

Weltweit befinden sich die meisten dichtbevölkerten Gebiete in Deltas, entlang der Küsten, Seen und Flüsse. Diese Gebiete sind ökonomisch sehr bedeutend und entwi-

ckeln sich weiter. In vielen dieser Gebiete sinkt das Gelände infolge Grundwasserentnahme und geologischer Prozesse. Andererseits resultiert der Klimawandel in extremen Wetterbedingungen und einem Meeresspiegelanstieg. Diese sich verändernden Randbedingungen führen dazu, dass Hochwasserstände häufiger und extremer eintreten werden. Deshalb werden in Zukunft größere ökonomische Schäden und ein erhöhtes Risiko bezüglich des Verlustes von Menschenleben die Folge sein.

Hochwasserschutz ist daher in Deltagebieten wie den Niederlanden eine Daueraufgabe. Seit der großen Sturmflut 1953, bei der große Teile der Provinz Zeeland im Südwesten der Niederlande überströmt wurden und bei der 1835 Todesopfer zu beklagen waren, wurden eingreifende Hochwasserschutzmaßnahmen im Rahmen des sogenannten Deltaplanes getroffen mit dem Ziel vergleichbare Hochwasserkatastrophen in Zukunft zu verhindern. Doch die Hochwassergefahr droht nicht nur von der Nordsee, sondern auch entlang der großen Flüsse, wobei man im Rahmen der Klimaveränderung auch den größeren Abflussmengen Rechnung zu tragen hat.

Anhand des Versagensmechanismus der rückschreitenden Erosion (Piping) werden im Folgenden mit Flood Control 2015 und SBW zwei große niederländische Forschungsprojekte vorgestellt und die Relevanz der Forschungsergebnisse für den Hochwasserschutz in den Niederlanden aufgezeigt.

2 Flood Control 2015

2.1 Entwicklung von Informationssystemen zur Unterstützung des Hochwassermanagements

Die Verfügbarkeit relevanter Informationen in verständlicher Form und zum richtigen Zeitpunkt kann Leben retten. Durch eine Verbesserung der Verfügbarkeit und Genauigkeit der Informationen wird die Effektivität der Entscheidungsfindung in erheblichem Maße erhöht. Hierdurch wird die verfügbare Anlaufzeit zur Einleitung von Maßnahmen verlängert. Dies kann dazu beitragen, den Sachschaden zu begrenzen und die Opferzahl gering zu halten.

Flood Control 2015 ist ein Innovationsprogramm zur Entwicklung von Informationssystemen für die Unterstützung des Hochwassermanagements. Zu diesem Zweck wurde eine niederländische Arbeitsgemeinschaft auf dem Gebiet des Hochwasserkrisenmanagements zwischen privatem und öffentlichem Sektor eingerichtet. Insgesamt neun Forschungsinstitute und Ingenieurbüros entwickelt unter anderem auf dem Gebiet der Informations- und Kommunikationstechnologie gemeinsam innovative, integrierte Lösungen, die modular aufgebaut sind und somit in bestehende Prozess und Systeme weltweit integriert werden können.

Der Hochwasserschutz ist bisher hauptsächlich an die Stabilität der Hochwasserschutzbauwerke gekoppelt. Der große Vorteil des integralen Ansatzes, den Flood Control 2015 bei der Errichtung von Hochwasserschutzinformationssystemen verfolgt, liegt in der Verbesserung des Gesamtsystems, bestehend aus Hochwasserschutzbauwerk, Mensch und Umgebung. Hierbei werden unterschiedliche Disziplinen (unter anderem Meteorologie, Hydrologie, Geotechnik und Krisenmanagement) aneinander gekoppelt. Flood Control 2015 integriert diese Disziplinen in fortgeschrittenen Vorhersag- und Entscheidungshilfesystemen. Der Hochwasserschutz wird hierdurch transparenter, schneller und effektiver.

2.2 Die vier Säulen von Flood Control 2015

Mehr und bessere Information bezüglich des Wassersystems, bessere Vorhersagesysteme, die Unterstützung von Entscheidungsträgern und modular aufgebaute IT-Systeme verbinden alle Teile miteinander. Das Forschungsprogramm Flood Control 2015 ruht auf diesen vier Säulen.

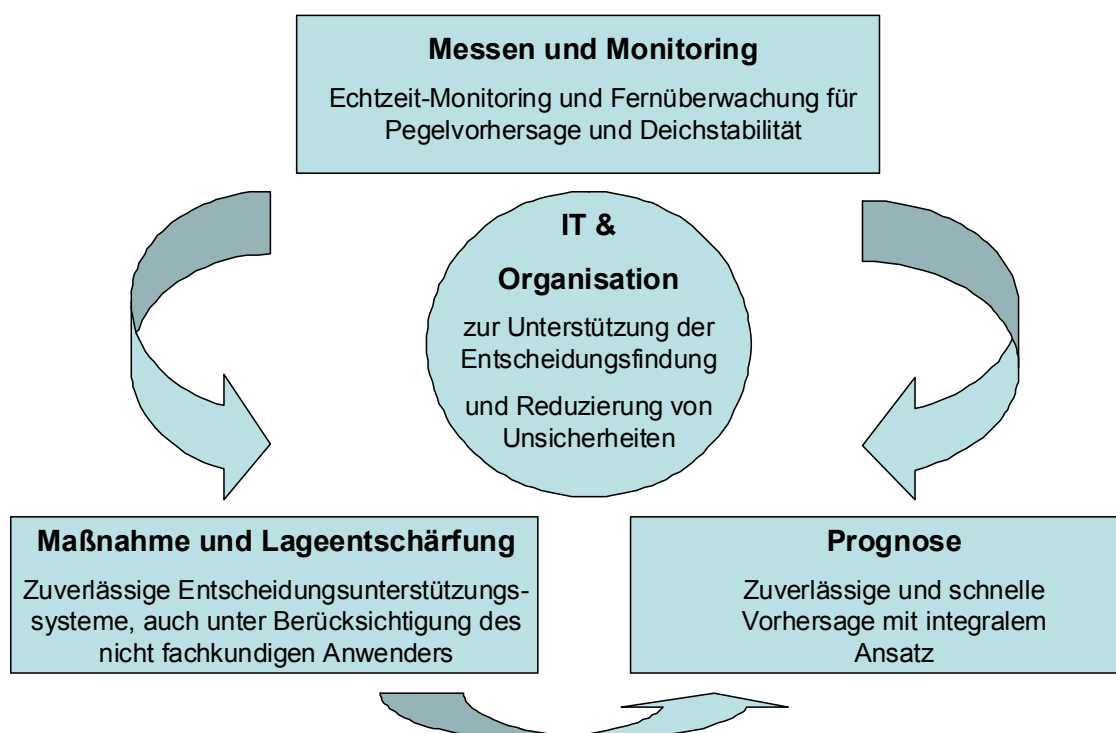


Abb. 1: 4 Säulen von Flood Control 2015

2.2.1 Messen und Monitoring

Flood Control 2015 beginnt mit Informationsgewinnung mit Hilfe von Sensornetzwerken in Deichen, die in Echtzeit Informationen zur Verfügung stellen bezüglich des Verhalten des Deiches und der möglichen Lage von Versagensbereichen und Satelliten, die in großen Gebieten permanent das Hochwasser und die Überflutungsgebiete monitoren.

Flood Control 2015 erschließt diese Informationen auf effektive Weise und entwickelt auch selbst neue Technologien, unter anderem auch in Zusammenarbeit mit dem IJdijk-Konsortium. So wird beispielsweise durch die Koppelung des Flood Early Warning Systems Delft-FEWS mit der Dike Analysis Modules Software (DAM) die aktuelle Stabilität eines Deichsystems für wahre Abflussmengen in Bezug auf rückschreitende Erosion (Piping) automatisiert und eigenständig in Echtzeit ermittelt.

2.2.2 Prognosen

In Flood Control werden Koppelungen zwischen vertrauten Systemen unterschiedlicher Arbeitsbereiche durchgeführt, wodurch die Verlässlichkeit der Vorhersagesysteme stark zunimmt.

2.2.3 Maßnahmen & Lageentschärfung

Entscheidungsträger sind bei Kalamitäten einer großen Anzahl von Impulsen ausgesetzt. Dies führt häufig dazu, dass aufgrund richtiger Informationen doch falsche Entscheidungen getroffen werden. Der Faktor Mensch ist daher von großer Bedeutung. Flood Control 2015 entwickelt darum Instrumententafeln, worauf relevante Informationen übersichtlich und verständlich präsentiert werden. Darüber hinaus werden auch spezielle entscheidungsunterstützende Hilfsmittel entwickelt, die es ermöglichen, die richtige Entscheidung zum richtigen Zeitpunkt zu treffen.

2.2.4 Informations- und Kommunikationstechnologien & Organisation

Die Informations- und Kommunikationstechnologie bildet das Rückgrat von Flood Control 2015. Durch die Verwendung einer offenen Architektur ist es möglich, dass die Technologien an bereits bestehende Systeme und Modelle, aber auch andere Standards und Arbeitsweisen gekoppelt werden können. So können über Organisationsgrenzen hinweg effizientere Entscheidungen getroffen werden.

3 SBW

3.1 Das Forschungsprogramm SBW

3.1.1 Der gesetzliche Hochwasserschutz

In den Niederlanden mit ihren tiefliegenden, dicht bevölkerten und hochwassergefährdeten Gebieten sind Hochwasserschutzbauwerke von entscheidender Bedeutung. Rund 66 % der Niederlande sind hochwassergefährdet infolge ihrer geringen Höhenlage (26 % liegen unterhalb des Meeresspiegels) oder infolge der hohen Stromabflussmenge (40 % des Gebietes).

Der Hochwasserschutz ist in den Niederlanden im sogenannten Wassergesetz gesetzlich verankert. In den Niederlanden sind 95 sogenannte Deichringgebiete zu unterscheiden, jedes umgeben von einem durchgehenden System aus Hochwasserschutzbauwerken, wenn möglich in Kombination mit höher gelegenen Gelände. Das Wassergesetz schreibt für jedes dieser Gebiete Sicherheitsnormen vor. Diese primären Hochwasserschutzbauwerke entlang der ökonomisch wichtigsten und dicht bevölkerten Gebiete müssen Bedingungen standhalten, die nur eine Eintrittswahrscheinlichkeit von einmal in 10 000 Jahren haben. Die Norm den nördlichen und südwestlichen Teil des Landes beträgt einmal in 4000 Jahren. Entlang der Flüsse wird eine Norm von einmal in 1250 Jahren hantiert. Alle sechs Jahre werden die primären Hochwasserschutzbauwerke bewertet, um sicher zu sein, dass die Hochwasserschutznorm auch tatsächlich eingehalten wird. Wenn die Hochwasserschutzbauwerke den Normen nicht genügen, werden Ertüchtigungsmaßnahmen eingeleitet. Dies betrifft primäre Deiche mit einer Länge von 3500 km. Darüber hinaus verfügen die Niederlande noch über 14 000 km regionale Deiche entlang der Kanäle. Jährlich werden etwa 600 Millionen Euro in Unterhalt und Instandsetzung von Hochwasserschutzbauwerken investiert.

3.1.2 Bewertung der Hochwassersicherheit und Forschungsbedarf

Die Bewertungen dienen der Ermittlung, welche Hochwasserschutzbauwerke einer Ertüchtigung bedürfen. Die sozialen, politischen und ökonomischen Belange sind sehr groß. Für eine korrekte Bewertung müssen sowohl hydraulische Randbedingungen (Pegelstände und Wellen) als auch Beanspruchbarkeit (Höhe und Stabilität) der primären Hochwasserschutzbauwerke gut beschrieben werden. Es bestehen noch immer Unsicherheiten und Wissenslücken bezüglich bestimmter Phänomene. Sowohl eine Unter- als auch eine Überschätzung der Hochwasserrisiken müssen vermieden werden. Daher hat das niederländische Ministerium für Infrastruktur und Umwelt entschieden, ein fortdauerndes Forschungsprogramm mit circa fünf Millionen Euro jährlich zu finanzieren. Deltares realisiert dieses große Forschungsprogramm „Strength and Loading on Flood Defense Structures“ (niederländischer Titel: „Sterkte & Belastingen Waterkeringen“, kurz „SBW“) im Auftrag von Rijkswaterstaat – Centre for Water Management. Die lange Laufzeit dieses Forschungsprogramms ermöglicht es, kontinuierlich an den nötigen Verbesserungen des Bewertungsinstrumentariums für Hochwassersicherheit zu arbeiten.

3.1.3 Forschungsschwerpunkte innerhalb des Forschungsprogramms SBW

Die Forschungsprojekte innerhalb des Forschungsprogramms haben sowohl die einwirkenden Lasten als auch die Widerstand bietenden Eigenschaften der Hochwasserschutzbauwerke zum Thema. Dies betrifft die ordnungsgemäße und zuverlässige Ermittlung der hydraulischen Randbedingungen (extreme Pegelstände und Wellen), der wichtigsten Versagensmechanismen bei Hochwasserschutzbauwerken (unter anderem

der Einfluss von Wellenschlag und Wellenüberlauf auf das Deckwerk, Piping, Makroinstabilität, Setzungsfließen, Dünenerosion, Reststabilität) und Feldmessungen zur Erhebung der für Hindcasts und Validierungen erforderlichen Daten. Das Ziel von SBW ist, die wichtigsten Wissenslücken zu ergänzen, um letztendlich eine bessere Einschätzung bezüglich der Sicherheit von Hochwasserschutzbauwerken geben zu können.

3.2 Das Forschungsprojekt SBW Piping

3.2.1 Hintergrund

Im letzten Jahrzehnt wurde die Sicherheit der Deiche in den Niederlanden untersucht, wobei Piping als dominierender Versagensmechanismus hervortrat, welcher einen erheblichen Beitrag liefert bezüglich der Versagenswahrscheinlichkeit bei Überflutung (Rijkswaterstaat, 2005). Dies entsprach nicht den Erwartungen der Deichverwaltungen. In vielen Situationen wurde den Ergebnissen der Pipingstabilitätsberechnungen ungenügend Vertrauen entgegengebracht. Es gab Zweifel, ob rückschreitende Erosion tatsächlich zu einem Deichversagen führen kann. Es stellte sich daher die Frage, ob der Mechanismus korrekt modelliert und das Problem korrekt abgebildet wird. Ziel des Teilprojektes SBW Piping ist es, die Unsicherheiten innerhalb des heutigen Berechnungsmodells für Piping zu identifizieren, die Qualität des Berechnungsmodells und der Testmethoden nachzuweisen und, wenn möglich, zu verbessern und den Mechanismus besser zu beschreiben.

In der Bewertungsrunde aus dem Jahre 2006 waren 66,5 km von insgesamt 2375 km primärer Hochwasserschutzbauwerke der Kategorie A unzureichend bezüglich des Versagensmechanismus Piping. Für 425 km war eine Beurteilung nicht möglich, da beispielsweise nicht genügend Bodeninformationen zu diesem Zeitpunkt verfügbar waren.



Abb. 2: Durch Risse in der Deckschicht austretendes Qualmwasser (links) und die Bildung sandender Auswurftrichter (rechts) sind Anzeichen für rückschreitende Erosion

Qualmwasser und sandende Auswurftrichter (Abb. 2) sind Anzeichen drohenden Versagens infolge rückschreitender Erosion. In den Niederlanden werden diese häufig wahrgenommen. Die Bewertungsvorschriften zielen bisher darauf ab, die Bildung einer durchgehenden Erosionsröhre unterhalb eines Deiches zu verhindern. Bisher ging man davon aus, dass der Pipingprozess bei einer Erosionsröhrenlänge unterhalb der halben Sickerweglänge wieder zum Stillstand kommt und dass man sandende Auswurftrichter durch den Einsatz von Qualmdeichen ausreichend unter Kontrolle bringen kann.

3.2.2 Der Prozess der rückschreitenden Erosion

Beim Prozess der rückschreitenden Erosion werden Sandpartikel infolge Sickerwasserströmung unter der Schichtgrenze von bindigem zu nichtbindigem Boden ausgespült. Hierbei werden vier Phasen unterschieden. Der Prozess ist in Abbildung 3 allgemein beschrieben. Der Wasserdruck im Aquifer verursacht eine Rissbildung im darüber liegenden bindigen Boden, wodurch Qualmwasser austreten kann (Phase 1).

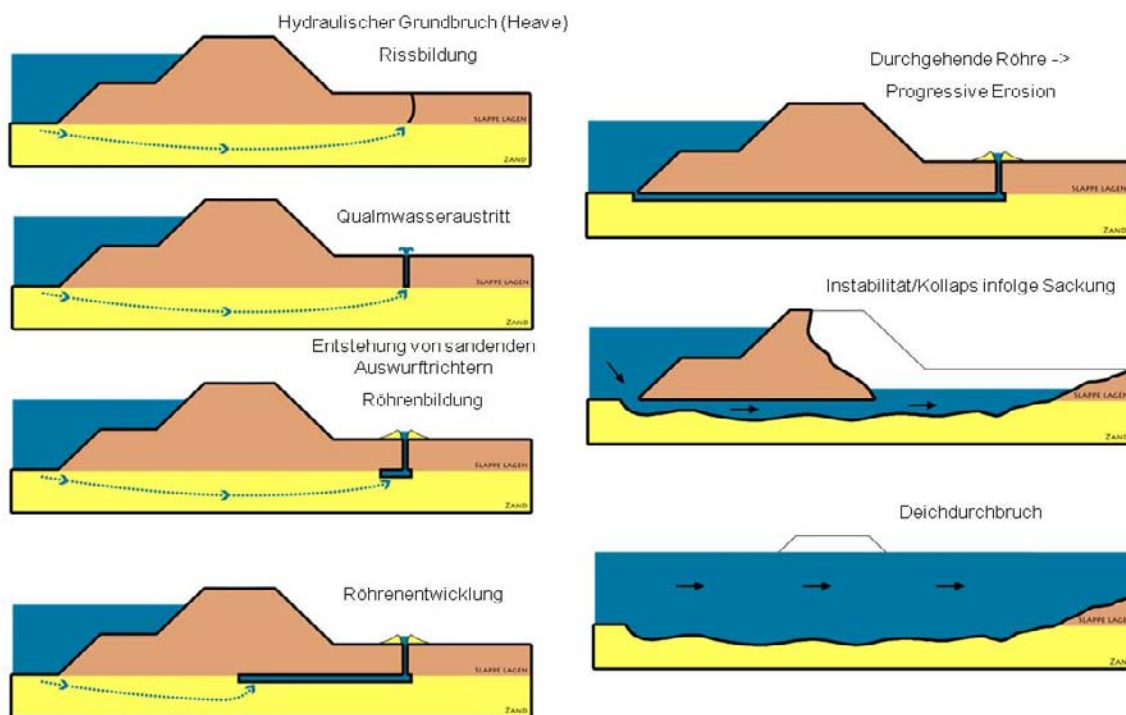


Abb. 3: Phasen der rückschreitenden Erosion

Wenn die Fließgeschwindigkeit in der Sandschicht hoch genug ist, werden Sandpartikel mit dem Wasser mitgeführt, wodurch sich unterhalb des Deiches, beginnend an der unterstromigen Seite, eine Röhre ausbilden kann (Phase 2). Die Röhre bildet sich an der Grenzschicht von Aquifer und bindiger Deckschicht aus, wobei letztere den First der Röhre formt. An der Geländeoberkante treten sandende Auswurftrichter auf, in deren Zentrum der Sand infolge der vertikal nach oben gerichteten Strömung fluidisiert und sich am Rand der Trichter absetzt.

Sobald die kritische Druckhöhe überschritten ist, bildet sich die Röhre bis zur Wasserseite des Deiches aus. Die kritische Druckhöhe ist definiert als der Flusswasserstand, bei dem die rückschreitende Erosion nicht mehr stabilisiert. Sobald die Röhre die oberstromige Seite erreicht hat, resultiert der Erosionsprozess in einer Aufweitung der Röhre (Phase 3) und schließlich in einem Versagen des Deiches und Deichbruch (Phase 4).

Zur Prognose der rückschreitenden Erosion sind mehrere Modelle und empirische Relationen aufgestellt worden. Die empirische Vorschrift von Bligh (1912) und das Modell von Sellmeijer (1988) sind die bekanntesten. Das Modell von Sellmeijer gibt eine Prognose der kritischen Druckhöhe als Funktion geometrischer Parameter und Sandcharakteristiken, insbesondere der Sicherweglänge, der Mächtigkeit des Aquifers, der Korngröße (charakterisiert durch d_{70}), der spezifischen Permeabilität und einiger morphologischer Eigenschaften, die den Rollwiderstand des Sandkorns in der Röhre definieren.

Das Modell von Sellmeijer wurde anhand von kleinmaßstäblichen (Wit, 1981) und großmaßstäblichen Experimenten (Silvis, 1991) validiert und daraus eine Entwurfsvorschrift für eine Standarddeichkonfiguration abgeleitet (Weijers & Sellmeijer, 1993), die Eingang fand in die Niederländischen Richtlinien. (Technical Advisory Committee on Flood Defenses, 1999).

3.2.3 Experimentelle Untersuchungen im Labor

Zur Ermittlung des Einflusses der Sandcharakteristiken auf die kritische Druckhöhe und des Prozesses der Röhrenbildung, die zu Deichversagen führt, und zur Validierung der Beurteilungsvorschrift wurde eine Serie von klein-, mittel- und großmaßstäblichen Experimenten ausgeführt. Kleinmaßstäbliche Versuche (Abb. 4) wurden ausgeführt, um den Einfluss der Sandcharakteristiken, wie Korngröße und Korngrößenverteilung, relative Dichte und Durchlässigkeit, zu untersuchen und den Initial- und Folgeprozess der rückschreitenden Erosion (Validierung von Phase 2 und 3) zu erforschen.

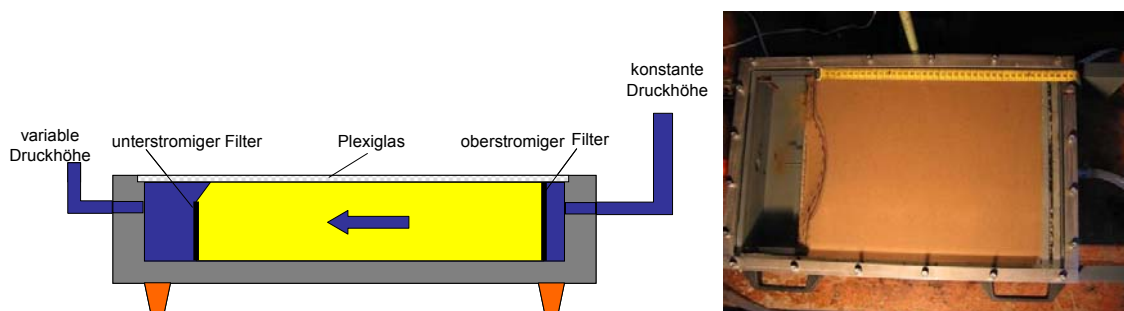


Abb. 4: Versuchsaufbau des kleinmaßstäblichen Experiments

Die Versuchsanordnung besteht aus einem PVC-Behälter (Innenmaße von $0,5\text{ m} * 0,3\text{ m} * 0,1\text{ m}$). Der Behälter ist mit Sand gefüllt, der durch zwei Filter gehalten wird, so dass eine Sickerweglänge von $0,35\text{ m}$ erzielt wird. Eine konstante Druckhöhe im Bereich von $0 - 1\text{ m}$ kann angelegt werden. Eine transparente Acrylglasscheibe, die

die Funktion der bindigen Deckschicht erfüllt, ermöglicht es, dem Pipingprozess visuell zu folgen.

Bei der Präparierung des Sandpakets wird die sogenannte nasse Methode angewendet, bei der trockener Sand in den mit Wasser gefüllten, senkrecht stehenden Behälter gestreut wird. Die Verdichtung erfolgt durch Stoßimpuls beziehungsweise Stampfen, wobei eine relative Dichte von 70 % beziehungsweise 80-100 % erzielt werden kann.

Bei der Ausführung der Experimente wurde die Druckhöhe alle 5 Minuten um 1 cm erhöht, bis eine Erosion der Sandpartikel beobachtet werden konnte. Im Falle eines beobachteten Sandtransports wurde die Zunahme der Druckhöhe solange verzögert, bis sich die Röhre mindestens 2 Minuten stabilisiert hatte. In den Experimenten wurde die Druckhöhe beim Durchbruch gemessen, was bedeutet, dass sich die Röhre von der unterstromigen zur oberstromigen Seite entwickelt hat.

In den Experimenten wurde eine Vielzahl von Erosionsmustern beobachtet. Zu Beginn sind dies kleine Neuordnungen, Bewegungen individueller Sandpartikel durch die Matrix und die Bildung sehr kleiner Röhren. Diese Form der Erosion setzt sich nicht fort, solange die Druckhöhe nicht erhöht wird. Bei zunehmender Druckhöhe entstehen geradlinige oder verzweigte Röhren mit einer Breite von 5 mm bis 50 mm. Sobald sich eine Röhre gebildet hat, hält der Erosionsprozess an bis die Röhre eine Verbindung zwischen der unter- und der oberstromigen Seite hergestellt hat. Während der Entwicklung dieser Röhren nimmt der Durchflussrate nur geringfügig zu. Sobald die Verbindung hergestellt ist, nimmt die Erosionsrate stark zu. Dieser Prozess resultiert in einer Aufweitung der Röhre, wobei die Röhre etwa 50 mm breit und mehrere mm tief wird. Mäanderbildung und Verstopfung der Röhre werden in dieser Phase auch beobachtet. Der Erosionsprozess hält an, bis sich die Röhre von der ober- zur unterstromigen Seite aufgeweitet hat. In diesem Moment nimmt die Durchflussrate stark zu.

Mittelmaßstäbliche Versuche (Abb. 5) dienen der Untersuchung des Einflusses des Modellmaßstabs (Verhältnis Korngröße zu Sickerweglänge) auf die kritische Druckhöhe und der Verifizierung der Untersuchungsergebnisse der kleinmaßstäblichen Experimente. Hierfür wurden zwei Sandsorten getestet, die sich hauptsächlich in der Korngröße und der Durchlässigkeit unterscheiden. Alle Versuche wurden jeweils zweimal ausgeführt. Der Versuchsaufbau ist vergleichbar mit dem in den kleinmaßstäblichen Versuchen. Die Abmessungen des Sandbehälters sind etwa viermal so groß (Innenmaße 2,00 m * 0,88 m * 0,40 m). Der Sand wurde in der gleichen Weise präpariert wie in den kleinmaßstäblichen Versuchen. Während der Experimente wurde die Druckhöhe alle 5 Minuten um 0,02 m erhöht. Ab einer Druckhöhe von 0,10 m wurde die Druckhöhe um 0,01 m erhöht, bis Sandtransport beobachtet werden konnte. Bei auftretender Erosion wurde die Erhöhung der Druckhöhe verzögert bis sich die Röhre mindestens 2 Minuten stabilisiert hatte. Die Druckhöhe bei Versagen ist in gleicher Weise definiert wie bei den kleinmaßstäblichen Experimenten.



Abb. 5: Versuchsaufbau des mittelmaßstäblichen Experiments

In den mittelmaßstäblichen Experimenten wurden die gleichen Prozesse beobachtet wie in den kleinmaßstäblichen Versuchen. Der rückschreitende Pipingprozess resultiert in vergleichbaren Röhren, wobei in den meisten Fällen multiple parallele Röhren sich ausgebildet haben, während in den kleinmaßstäblichen Versuchen oft nur eine einfache Röhre beobachtet wurde. Die unterschiedlichen Prozesse benötigen jedoch längere Zeiträume. Der Aufweitungsprozess benötigte in den mittelmaßstäblichen Versuchen etwa 15 Minuten, wobei sich auch breitere und tiefere Röhren ausbildeten.

3.2.4 Experimentelle Untersuchungen am Versuchsdeich „IJKdijk“

Zur Validierung der im Laboratorium erzielten Ergebnisse und zur Erforschung des Versagensverhaltens des Deiches wurden am Ende großmaßstäbliche Versuche auf dem Versuchsdeichsgelände „IJKdijk“ im Nordosten der Niederlande bei Nieuweschan in Groningen durchgeführt.

Ein weiteres Ziel der großmaßstäblichen Experimente, auch im Rahmen von Flood Control 2015, war die Erforschung der Eignung unterschiedlicher Monitoringssysteme, den Prozess der rückschreitenden Erosion zu detektieren.

In diesen Experimenten wurden zwei Sandsorten untersucht (fein mit $d_{50} = 150 \mu\text{m}$ und grob mit $d_{50} = 200 \mu\text{m}$). Insgesamt wurden vier Experimente ausgeführt, wobei drei der Validierung des Pipingprozesses galten. Im vierten Versuch durften die verwendeten Monitoringssysteme auch den Pipingprozess beeinflussen.

Zu diesem Zweck wurden zwei große Bassins errichtet und mit zwei verschiedenen Sandsorten befüllt. Trockener Sand wurde lagenweise eingebracht und verdichtet bis eine relative Dichte von 50 % erreicht war. Anschließend wurde die Sandschicht mit

Wasser gesättigt. (Abb. 6). Ein Kleideich mit einer Höhe von 3,5 m und einem Böschungsgefälle von 1:2 wurde auf dem Sandkörper durch Verdichtung kleinerer Kleibrocken errichtet, wodurch eine Sicherweglänge von 25 m erzielt wurde (Abb. 7).



Abb. 6: Blick auf das IJkdijk-Versuchsgelände (links oben), Füllen eines der Bassins mit Sand (rechts oben), Errichtung des Kleideichs (links unten) und Blick auf die unterstromige Seite des Deichs (rechts unten)

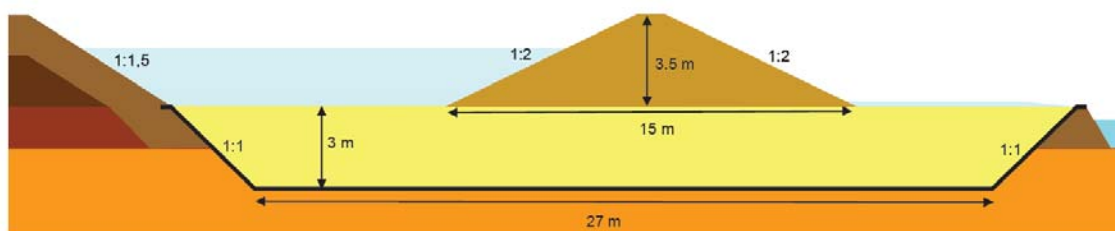


Abb. 7: Schematischer Querschnitt des großmaßstäblichen Experiments

Auf der unterstromigen Seite wurde ein Überlauf angelegt, um den unterstromigen Wasserstand konstant zu halten. An der oberstromigen Seite kann ein Wasserstand bis zu einer Höhe von 3 m oberhalb des Aquifers erreicht werden. In der Grenzfläche zwischen Sand und Klei wurden mehrere Reihen von Porenwasserdruckmessern eingebaut, um die vollständige Röhrenbildung monitoren zu können.

Zusätzlich wurden an der Grenzfläche Glasfaserkabel eingebaut, um Temperaturunterschiede und Verformungen zu messen. Zur Messung des Wasserdrucks wurden ober- und unterstromig in Tiefen von 1 und 2 m Piezometer eingebaut.

Jedes Experiment wurde auf die gleiche Weise durchgeführt. Die Druckhöhendifferenz wurde mit 0,1 m pro Stunde erhöht (15 Minuten füllen und 45 Minuten monitoren) bis eine Erosion der Sandpartikel am luftseitigen Deichfuß zu beobachten war oder bis eine Änderung des Porenwasserdrucks unterhalb des Deichs gemessen wurde, was auf die Bildung einer Röhre schließen lässt. Sobald sich eine Veränderung hervortat, wurde mit der Erhöhung der Druckhöhendifferenz gewartet bis der Erosionsprozess wieder stoppte. Sandkrater, die oberhalb des Wasserspiegels hervortraten, wurden entfernt, um einen konstanten Gradienten über den Deich zu erzielen. In allen Versuchen wurde die kritische Druckhöhe ermittelt, bei der sich die Röhre in oberstromiger Richtung ausbreitet ohne dass sich ein Gleichgewicht einstellt.

Die ersten Anzeichen von Erosion bestehen aus kleinen Sandspuren, die entlang des gesamten luftseitigen Deichfußes sichtbar sind (Abb. 8, links). Einige Sandspuren verschwinden wieder nach einiger Zeit. Die Menge Sand in diesen Spuren beschränkt sich auf einige Kubikzentimeter. Der gemessene Porenwasserdruck und die Durchflussrate ändern sich nicht infolge dieses Erosionstyps.

Nach einer Zunahme der Druckhöhendifferenz bilden sich Sandkrater aus (Abb. 8, rechts). Der Gesamtdurchfluss unter dem Deich nimmt während der Kraterbildung nicht signifikant zu. Der Wasserdruck unterhalb der unterstromigen Seite des Deichs nimmt ab. Der Wasserdruck fällt dort, wo sandende Auswurftrichter aktiv sind.



Abb. 8: Fotos von Sandspuren (links) und sandenden Auswurftrichtern (rechts)

Bei weiterer Zunahme der Druckhöhendifferenz wird Sand über die Auswurftrichter ausgetragen. Sobald dieser Erosionsprozess beobachtet wird, kommt der Sandtransport nicht mehr zum Erliegen. Die Menge des ausgetragenen Sandes variiert ändert sich im Laufe der Zeit. Einige sandende Auswurfkrater versiegen. Zur gleichen Zeit bilden sich an anderen Stellen entlang des Deichfußes neue Krater aus.

Sobald die Röhre den oberstromigen Deichfuß erreicht zeigen die Porendruckmesser an der oberstromigen Seite eine Zunahme des Porenwasserdrucks an (Abb. 9). An der unterstromigen Seite nimmt der Sandtransport nicht signifikant zu. Die Durchflussrate nimmt nur leicht zu. Erst nach längerer Zeit nimmt die aus den Kratern ausgetragene Sandmenge deutlich zu (kg bis Tonnen) und auch die Durchflussrate steigt deutlich an.

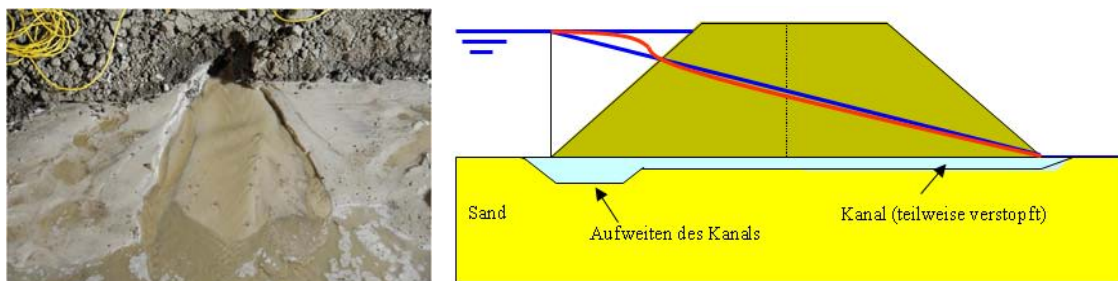


Abb. 9: Beginn des Aufweitungsprozesses der Röhre

Die Zunahme des Sandtransports führt letztendlich zum Versagen des Deiches und zum Deichdurchbruch. Die plötzliche Zunahme des Sandtransports geht über in eine Schlammfontäne, die Sand und Wasser mit großer Gewalt aus der Röhre ausspült (Abb. 10, links). Es entstehen Risse im Deich und der Deich sinkt ein. Der Fuß des Kleideiches erodiert an der unterstromigen Seite und der Deich senkt sich an der oberstromigen Seite. Letztendlich bricht der Deich (Abb. 10, rechts).



Abb. 10: Endphase: Zunahme des Sandtransports und des Durchflusses kurz vor Beginn des Deichbruchs (links) und der durchgebrochene Deich mit Breschenbildung (rechts)

In einem anderen Versuch resultierte der Sandtransport nicht unmittelbar in Versagen. Der Deich setzte sich, Risse bildeten sich aus und sowohl der Sandtransport als auch der Durchfluss schwächten sich ab. Nach einiger Zeit fand eine erneute Sanderuption statt. In dieser Periode zeigten der Porenwasserdruck und die Durchflussrate heftige Schwankungen. In den darauffolgenden Tagen erfolgten mehrere Sanderuptionen. Einige Tage nach der ersten Sanderuption versagte der Deich.

Der Versagensprozess dauert in etwa 20 Minuten. Infolge des großen Abflusses während des Versagensprozesses konnte der Wasserstand an der oberstromigen Seite aufrechterhalten werden. Eine Absenkung um mindestens 0,60 m wurde in allen Experimenten beobachtet. In Wirklichkeit wird diese Absenkung nicht eintreten, wodurch der Schaden am Deich noch zunehmen wird.

3.2.5 Fazit

Piping ist ein sehr gefährlicher Versagensmechanismus, der letztendlich zum Kollaps des Deiches führt. Sobald sich ein sandender Auswurftrichter ausbildet, ist der kritische Gradient nahezu erreicht. Der Unterschied zwischen rückschreitender Erosion und dem Aufweitungsprozess der Röhre ist von außen für die Deichwacht mit bloßem Auge nicht erkennbar. Die Kanalaufweitungsphase nimmt sehr viel Zeit in Anspruch.

Trotz der unterschiedlichen Maßstäbe sind die in den klein-, mittel- und großmaßstäblichen Versuchen beobachteten Prozesse sehr ähnlich. Aus der Validierung gelangt man zu dem Schluss, dass das angepasste Modell von Sellmeijer vertrauenswürdiger ist als das alte Modell. Die empirisch ermittelte Vorschrift von Bligh nicht vertrauenswürdig.

Eine mehr detaillierte Beschreibung der Versuche ist nachzulesen in Beek et al. (2010 und 2011). Die Konsequenzen der experimentellen Resultate für das Bewertungskonzept werden in Sellmeijer et al. (2011) diskutiert.

4 Notwendige Schritte für den Hochwasserschutz

Rijkswaterstaat arbeitet im Rahmen des sogenannten „Corporate Innovationprogram“ (CIP) zusammen mit anderen Behörden, Marktparteien und Forschungsinstituten. Durch die Bündelung von Wissen und Erfahrung gelangen werden gemeinsam Konzepte erarbeitet, die den Bedürfnissen und Wünschen aller Parteien entgegenkommen. Ideen für Verbesserungen und Erneuerungen werden in der Praxis getestet. Deltares ist als Partner von Rijkswaterstaat stark beteiligt bei der Gestaltung und Ausführung dieses Programms.

Innerhalb des nächsten Jahrzehnts hat man im niederländischen Hochwasserschutz mit einem Milliardendefizit zu rechnen. Dieses Defizit geht größtenteils zu Lasten des Hochwasserschutzprogramms, aus dem die Deichertüchtigungsmaßnahmen finanziert werden. Da in den Niederlanden in Rahmen der öffentlichen Ausschreibungen bei Deichertüchtigungen in Zukunft nicht mehr der Staat alleine, sondern auch die Wasserverbände die Finanzierung mit übernehmen und auch andere Ausschreibungsverfahren gelten werden, wobei Kosteneinsparungen hauptsächlich durch preisgünstigere (innovative) Projektrealisierungen erzielt werden können.

Das Corporate Innovationprogram wurde ins Leben gerufen, um innerhalb des Hochwasserschutzprogramms durch Anwendung innovative Techniken und Prozesssteuerun-

gen eine Kostenersparnis von etwa 10 % bezogen auf die hohen Investitionskosten von einigen hundert Millionen Euro zu erzielen. Im Allgemeinen gilt, dass die Baukosten 80-90 % der Kapitalinvestitionen betragen, wobei 50-60 % als Materialkosten zu veranschlagen sind. Die übrigen 10-20 % sind Kosten für Entwurf und Ausschreibung.

Für Deichertüchtigungsmaßnahmen gegen Piping werden im Rahmen des aktuellen Hochwasserschutzprogramms für circa 100 km Deich etwa 100 Millionen Euro benötigt. Deichabschnitte, die in früheren Bewertungsrunden als sicher beurteilt wurden, werden aufgrund der neuen Erkenntnisse und im Zuge des Klimawandels in einigen Fällen nicht mehr als sicher bewertet werden können. Das Bewertungsinstrumentarium wird alle sechs Jahre erneut festgelegt mit dem Risiko, dass Bewertungsergebnisse auch ungünstiger ausfallen als in früheren Bewertungsrunden. Obwohl man danach strebt, Randbedingungen für einen längeren Zeitraum zur Verfügung zu stellen, die für einen längeren Planungszeitraum ihre Gültigkeit behalten, werden die Anforderungen infolge neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse in vielen Fällen höher ausfallen als im Moment des Entwurfs der Deichertüchtigung. Bei jeder Bewertungsrunde kann es daher vorkommen, dass ein Deichabschnitt, der anlässlich einer früheren Beurteilungsrunde verstärkt wurde, erneut angepasst werden muss.

Wie in Abschnitt 3 beschrieben, hat die Forschung auf dem Gebiet der rückschreitenden Erosion zu der Erkenntnis geführt, dass die bisher hantierten Bewertungs- und Entwurfsvorschriften nicht so konservativ sind, wie ursprünglich angenommen. Das bedeutet, dass die Versagenswahrscheinlichkeit bezüglich Piping größer ist als bisher erwartet. Dies hat zur Folge, dass bei einer Anpassung des derzeitigen Bewertungs- und Entwurfsvorschriften mehr Deichkilometer bezüglich des Versagensmechanismus Piping beanstandet werden sollen als bei Anwendung des alten Instrumentariums. Die zusätzlichen erforderlichen Deichertüchtigungsmaßnahmen werden daher mit einem großen finanziellen Aufwand verbunden sein. Die Kommission Vrijling (Vrijling et al., 2010) schätzt, dass dies für das zukünftige Hochwasserschutzprogramm nochmals 1,4 Milliarden Euro an zusätzlichen Kosten erfordern wird.

Es ist daher sinnvoll, nach Möglichkeiten der Kostenreduzierung Ausschau zu halten, sowohl auf technischem als auch auf verwaltungstechnischem Gebiet, aber auch im Umgang mit gebietsspezifischen Risiken und darauf abzustimmenden Maßnahmen. Durch die Anwendung innovativer, flexibler und nachhaltiger Techniken, die der Ausbildung des Pipingmechanismus entgegenwirken können, kann die Pipingproblematik sowohl mittelfristig als auch langfristig finanziell beherrschbar bleiben.

Bei pipingreduzierenden Maßnahmen wird zunächst an Techniken gedacht, die sich in der Vergangenheit bewährt haben, wie beispielsweise der Bau breiterer Deiche und breiterer Bermen. Bermen sind relativ preiswert und einfach an sich verändernde Randbedingungen anzupassen. Jedoch müssen für den Bau dieser Bermen im Flächennutzungsplan zusätzliche Flächen reserviert werden und es fallen hohe Kosten für Enteignung, Entschädigung und Abriss der Bebauung an, was bei den Grundeigentümern auf

großen Widerstand stößt. Darüber hinaus nehmen Pipingbermen so viel Raum in Anspruch, dass ihr Bau einen sehr großen Einfluss auf die Landschaftsarchitektur, was zu einer geringen gesellschaftlichen Akzeptanz führt. Wenn nur noch wenig Raum für breitere Bermen zur Verfügung steht, werden meistens sehr kostenintensive, wenig flexible konstruktive Lösungen gewählt, wie beispielsweise das Anbringen einer wasserundurchlässigen Schicht im Flussbett oder das Einbringen einer Dichtwand, welche die Piping- bzw. Qualmwasserproblematik sichtlich beheben, die auf der anderen Seite aber auch ungewünschte langfristige Effekte mit sich bringen können.

Es gibt eine Vielzahl von möglichen präventiven Maßnahmen. Der Pipingprozess kann beispielsweise auch dadurch verhindert werden, dass dem Sandtransport durch den Einbau von Filterkonstruktionen (vertikal eingebaute Geotextilien und Vliese, geometrisch dichte Kiesfilter) vorgebeugt wird. Um die Chancen der tatsächlichen Anwendung eines innovativen Alternativkonzepts zu vergrößern, müssen Garantien bezüglich der Durchführbarkeit, Funktionalität, Robustheit und Sicherheit gegeben werden können. Die Kopplung von Monitorings- und Kontrollmaßnahmen zusammen mit Prognosen für die Standsicherheit, sowohl in der Bau- als auch in der Nutzungsphase der Deichertüchtigungsmaßnahme, und einem entsprechenden Risikomanagement erhöhen dabei die Akzeptanz der neuen Techniken.

5 Literatur

Beek, V.M. van, Bruijn, H.T.J. de, Knoeff, J.G., Bezuijen, A., Förster, U. (2010): Levee Failure due to Piping: A Full-Scale Experiment. In: Fifth International Conference on Scour and Erosion, 2010, San Francisco, pp 283-292.

Beek, V.M. van, Knoeff, J.G., Sellmeijer, J.B. (2011): Observations on the process of backward erosion piping in small-, medium- and full-scale experiments. In: European Journal of Environmental and Civil Engineering, No. 15, pp 1115-1137.

Bligh, W.G. (1910): Dam Barrages and Weirs on Porous Foundations. In: Engineering News, No. 64 (26), pp 708-710.

Rijkswaterstaat (2005): Main report of "Flood Risks and Safety in the Netherlands (Floris)". DWW-2006-014. - ISBN 90-369-5604-9.

Sellmeijer, J.B. (1988): On the Mechanism of Piping under Impervious Structures. Dissertation. Delft University of Technology, Delft.

Sellmeijer, J.B., Lopéz de la Cruz, J., Beek, V.M. van, Knoeff, J.G. (2011): Fine-tuning of the piping model through small-scale, medium-scale and IJkdijk experiments. In: European Journal of Environmental and Civil Engineering, pp 1139-1154.

Silvis, F. (1991): Verificatie Piping Model: Proeven in de Deltagoot – Evaluatierapport. In: Report Grondmechanica Delft.

Weijers, J.B.A, Sellmeijer, J.B. (1993): A new model to deal with the piping mechanism. In: Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, pp 349-355.

Vrijling, J.K., Kok, M., Calle, E.O.F., Epema, W.G., Meer, M.T. van der, Berg, P. van den, Schweckendiek, T. (2010): Piping – Realiteit of Rekenfout? In: ENW-report, Expertise Network for Flood Protection (ENW). www.enwinfo.nl.

Technical Advisory Committee on Flood Defenses (1999): Technical Report on Sand Boils (Piping). www.enwinfo.nl.

Wit, J.M. de, Sellmeijer, J.B., Penning, A. (1981): Laboratory Testing on Piping. In: Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp 517-520.

Anschrift des Verfassers

Deltares
Dipl.-Ing. U. Förster
Postfach 177
NL-2600 MH Delft