

Zeitabhängigkeit bei rückschreitender Erosion unterhalb von Deichen

André Koelewijn
Ulrich Förster

Rückschreitende innere Erosion oder „Piping“ unterhalb eines Deiches, entlang der Oberkante einer Sandschicht, ist einer der möglichen Versagensmechanismen von Deichen, welche eine Überflutung des Hinterlandes zur Folge haben können. Bei kürzer anhaltenden Hochwasserwellen, zum Beispiel im Bereich des Flussoberlaufs oder an der Küste, kann die Lastannahme reduziert werden. In diesen Beitrag werden vier Methoden zur Ermittlung des zeitabhängigen Aufbaus des Grundwasserdrucks unterhalb eines Deiches auf der Grundlage von Messungen sowohl des Pegelstandes als der Steighöhen unterhalb des Deiches präsentiert: drei analytische Methoden und eine numerische Methode. Diese Methoden wurden auf ein Fallbeispiel auf der niederländischen Wattenmeerinsel Ameland angewendet, bei der auf einem kurzen Streckenabschnitt gemäß stationärer Berechnungsergebnisse eine teure Deichertüchtigungsmaßnahme gegen rückschreitende Erosion erforderlich gewesen wäre. Eine nichtstationäre Analyse der Messungen zeigte jedoch auf, dass die Sicherheit des jetzigen Deiches ausreichend ist.

Stichworte: Piping, Zeitabhängigkeit, Deichsicherheit

1 Einleitung

Rückschreitende Erosion unterhalb eines Deiches, entlang der Oberkante einer Sandschicht, ist einer der möglichen Versagensmechanismen von Deichen, welche eine Überflutung des Hinterlandes zur Folge haben können. In seinen Veröffentlichungen gibt *Bligh (1910, 1916)* eine einfache Begrenzung an für die maximal zulässige Druckhöhendifferenz gegenüber der Sickerweglänge, wobei lediglich der Korndurchmesser der wasserführenden Sandschicht als Parameter eingeht. Seither wurden weitere Formeln und Modelle entwickelt, zum Beispiel die Formel von *Sellmeijer (1988)*, welche im Deutschen Merkblatt für Deiche an Fließgewässern (*DWA, 2011*) Eingang fand. Auf der Basis zahlreicher Experimente in den Niederlanden erfolgte eine Anpassung dieser Formel (*Förster et al., 2013*), die in Zukunft für die Beurteilung der gegenwärtigen Deichstandssicherheit und bei der Bemessung von Deichertüchtigungsmaßnahmen angewendet wird.

Dieser Beitrag behandelt den günstigen Einfluss der Zeitabhängigkeit bei rückschreitender Erosion, welche in der Praxis vor allem im Bereich des Flussoberlaufs und an der Küste relevant ist, wo die Belastungsdauer infolge des Hochwasserscheitels relativ kurz ist. Dies wird am Beispiel einer Fallstudie auf der niederländischen Wattenmeerinsel Ameland illustriert.

2 Zeitabhängige Analysemethoden

2.1 Übersicht

Es gibt mehrere Methoden, zeitabhängige Veränderungen des Grundwasserdrucks zu ermitteln und in der Analyse bezüglich ihres Einflusses auf rückschreitende Erosion zu berücksichtigen. Auf Basis der Druckhöhendifferenz, der vorhandenen Sickerweglänge und eines Kriteriums für das Auftreten rückschreitender Erosion kann die Standsicherheit des Deiches beurteilt werden.

In dieses Kapitel werden vier Methoden zur Ermittlung des Verlaufs nichtstationärer Grundwasserdrücke präsentiert: drei analytische Methoden und eine numerische Methode.

2.2 Analytische Methode entsprechend der niederländischen Richtlinie

In der niederländischen Richtlinie zur Berücksichtigung des Wasserdruckes bei Deichen (*TAW, 2004*) wird eine Methode beschrieben, wobei der Verlauf der Steighöhen in einer Sandschicht unterhalb einer Tonschicht mit mindestens zwei Messpunkten im Bereich der landseitigen Böschung zu schematisieren ist. Für einen Deich ohne Vorland ist der Respons zu beschreiben mit:

$$\phi(x) = H_0 + H_w \exp(-x / \lambda_w) \quad (1)$$

mit dem Druck ϕ in der Sandschicht, dem Abstand x zum Eintrittspunkt, der stationäre Steighöhe H_0 , der Amplitude der Hochwasserwelle H_w und dem sogenannten „Leckfaktor“ λ_w , welcher die Dämpfung und die Verzögerung des Grundwasserdruckaufbaus beschreibt. Die Parameterwerte können aus dem Respons auf eine Hochwasserwelle, zum Beispiel einem Tidehochwasser, ermittelt werden. Hierbei wird angenommen, dass die Sandschicht relativ steif und homogen ist und der Zustrom aus der Tonschicht zu vernachlässigen ist.

2.3 Statistische Methode „Scheldestromen“

Die Methode „Scheldestromen“ wurde zur Beurteilung von Deichen in der Nähe der Scheldemündung entwickelt, wo der Tideeinfluss relativ groß ist. Diese Methode erfordert Messreihen, welche viele Tiden umspannen, vorzugsweise über einen Zeitraum von mehr als einem Monat. Diese Methode teilt den Respons auf

in einen pseudo-statischen und einen dynamischen Anteil. Hierbei wird angenommen, dass eine länger andauernde Wasserstandserhöhung, wie sie während eines mehrere Tiden andauernden Sturmes auftritt, einen stärkeren Respons verursacht als eine normale Tide. Die Bemessungslinie wird durch Superposition des quasi-statischen und des dynamischen Anteils ermittelt.

Diese von *Bouw (2014)* beschriebene Methode umfasst die nachfolgenden Schritte:

1. Aufteilung der Messreihe in einen pseudo-statischen Anteil (Mittelwert über den Tidezyklus von 12 Stunden und 25 Minuten) und einen dynamischen Anteil.
2. Eliminierung der Phasenverschiebung im dynamischen Anteil. Infolge des Eintrittswiderstandes und des Abstandes zwischen dem Messpunkt innerhalb des Deiches und dem Pegelmesspunkt kommt es oft zu einer zeitlichen Versetzung zwischen den Spitzen in beiden Messungen. Durch Eliminierung dieser Phasenverschiebung wird der maximale dynamische Respons erzielt.
3. Bei einer graphischen Darstellung des gemessenen Respons in Bezug auf den Meerespiegel, korrigiert für die Phasenverschiebung aus dem vorigen Schritt, ist oft ein Knick zu erkennen. Dieser Knick ist auf den Einfluss des Grundwasserpegelstandes im Polder und Schwankungen in der Entwässerung zurückzuführen. Für die Bemessungssituation bei einem Sturm sind diese niedrigen Druckmesswerte von untergeordneter Bedeutung. Deshalb wird lediglich für die Messwerte jenseits des Knicks ein linearer Trend bestimmt, der einen Bezug herstellt zwischen dem dynamischen Anteil des Respons (ϕ_{dyn}) und dem dynamischen Anteil des Hochwasserstandes (H_{dyn}), in Folgenden definiert als $\phi_{dyn} = c H_{dyn} + d$.
4. Der Respons der Steighöhe unterhalb des Deiches auf den pseudo-statischen Anteil des Meerespegels wird für den Teil der Messreihe (ermittelt in Schritt 1) ermittelt, welcher Bezug hat auf Perioden mit Pegelanstieg. Der Respons ist schließlich alleine für diese Situation von Interesse. Der gemessene Respons als Funktion des Meerespegels wird graphisch dargestellt, wobei für jeden der steigenden Kurvenanteile der lineare Trend gemäß der Formel $\phi_{stat} = a H_{stat} + b$ ermittelt wird. Aus den hieraus resultierenden Werten für a und b wird anschließend, ausgehend von einer Normalverteilung, das 90%-Quantil als sichere Obergrenze verwendet. Der Spitzenwert unter Bemessungsbedingungen wird durch Superposition der Tide (H_{dyn}) und des Windstaus, welcher für H_{stat} maßgebend ist, ermittelt. Der Respons am Ort des Messpunkts unterhalb des Deiches kann ermittelt werden aus:

$$\phi = aH_{stat} + b + cH_{dyn} + d \quad (2)$$

Der Respons wird bei dieser Methode leicht überschätzt, da implizit davon ausgegangen wird, dass der Windstau permanent anwesend ist. Die Anwendung dieser Methode setzt voraus, dass der Meeresspiegel nahezu bei jedem Gezeitenzyklus bis an den Deich reicht. Darüber hinaus werden hydrostatischer Auftrieb und hydraulischer Grundbruch des Hinterlandes ausgeschlossen.

2.4 Direkte Extrapolation

Eine viel einfachere Methode ist die sogenannte direkte Extrapolation. Hierbei wird für eine aufkommende Flut die Differenz ermittelt zwischen dem Pegelstand bei Flut und dem vorherigem Pegelstand bei Ebbe. Die Differenz zwischen Bemessungshochwasserstand und demselben Pegelstand bei Ebbe geteilt durch die vorgenannte Differenz ergibt einen Extrapolationsfaktor. Der Respons bei Bemessungshochwasserstand am Ort der Wasserdruckmessung unterhalb des Deiches wird dann folgendermaßen ermittelt: Der Extrapolationsfaktor wird multipliziert mit der Differenz der jeweils infolge derselben Tide korrespondierenden Messungen der Steighöhe bei Flut und Ebbe und anschließend mit dem hiermit korrespondierenden Wert der Steighöhe bei Ebbe addiert.

Diese Methode führt jedoch zu einer Unterschätzung des Responses, vor allem weil diese Methode nicht den größeren Einfluss des Windstaus auf die Steighöhe unterhalb des Deiches verglichen mit dem Einfluss der Tidewelle berücksichtigt. Außerdem gibt es in der Praxis eine Beschränkung für die Anwendung dieser Methode: Diese kann nicht bei gedeckelten Extremen angewendet werden, wie beispielsweise bei zeitweisem, partiellem Trockenfallen des Vorlandes.

2.5 PlaxFlow

Bei der Methode der finiten Elemente (FEM) handelt es sich um eine numerische Methode, womit das Untersuchungsgebiet räumlich in kleine Elemente aufgeteilt wird, wenn nötig mit jeweils anderen Eigenschaften, wobei die Parameterwerte für jedes Element mit einfachen Funktionen berechnet werden. PlaxFlow, womit sowohl stationäre als auch zeitabhängige Grundwasserströmungsberechnungen ausgeführt werden können, ist hierfür ein Beispiel. Zum Zweck zeitabhängiger Berechnungen kann ein Wasserstand in maximal 100 Belastungsintervalle aufgeteilt werden. Für ein konkretes Fallbeispiel können verfügbare Messreihen von Wasserdruckmessungen mit den Ergebnissen von Modellberechnungen verglichen werden. Anschließend können iterative Anpassungen der Geometrie und der Durchlässigkeiten durchgeführt werden, bis eine ausreichende Übereinstimmung zwischen Messung und Modellberechnung erzielt ist. Mit Hilfe des hiermit erhaltenen Modells können dann die Bemessungszustände berechnet werden.

Dass mit einem derartigen Modell die tatsächliche Geometrie und Schichtenfolge modelliert werden kann, bedeutet nicht zwangsläufig, dass auf eine eindeutige Weise auch ein genaues Modell erzielt wird, da der Schichtenaufbau und die hydraulischen Eigenschaften ja oft nicht im Detail bekannt sind. Häufig ist auch nicht bekannt, in wie weit und wo die Schichten enden. Darüber hinaus gibt es sehr viele Freiheitsgrade bei der iterativen Anpassung der Eigenschaften, um zu einem besseren Fitting zu kommen.

Im Idealfall sollte das Modell auch ein Erosionkriterium beinhalten, womit beurteilt werden kann, ob Versagen infolge rückschreitender Erosion auftreten kann. Diese kann dann auch schrittweise, oder besser gesagt elementenweise, evaluiert werden, so dass auch Abweichungen in den Eigenschaften entlang des Sickerweges berücksichtigt werden können. In PlaxFlow ist dies noch nicht möglich. Deltares entwickelt im Rahmen der Standsicherheitsbeurteilung von Deichen ein derartiges Modell mit dem Namen DgFlow (*Van Esch, 2013*), welches nach eingehender Validierung im Laufe des Jahres 2015 zur Verfügung gestellt werden soll.

3 Fallstudie Ameland

3.1 Übersicht

Auf der Wattseite der niederländischen Wattenmeerinsel Ameland wurde die Sicherheit eines Deichabschnitts von 300 m bezüglich des Versagensmechanismus Piping noch auf Basis der ursprünglichen Berechnungsformel von Sellmeijer, welche auch im Merkblatt DWA-M 507-1 (*DWA, 2011*) aufgeführt ist, als unzureichend beurteilt. Wegen eines Gehöfts, welches sich direkt hinter dem Deich befindet, ist eine Verlängerung der Sicherweglänge durch eine Verbreiterung der Berme an der Landseite des Deichs nicht möglich. Zudem befindet sich an der Wasserseite des Deiches ein Naturschutzgebiet. Für den Entwurf der Deichertüchtigung wurde daher zur Verlängerung des Sickerweges eine Spundwand gewählt. Die hierfür benötigten Kosten belaufen sich auf etwa € 900.000.

Anhand eines im Jahre 2012 gestartetes Monitoringsprojekts (Kosten inklusive Analyse etwa € 200.0000) sollte untersucht werden, ob der Einbau der Spundwand bei Anwendung einer zeitabhängigen Analyse überflüssig werden könnte. Zu diesem Zweck wurden drei Messreihen mit jeweils vier Wasserdruckmessselementen und einem Pegelrohr in der Sandschicht unterhalb einer Tondeckschicht, welche sich unter dem gesamten Deich erstreckt, eingerichtet. Abbildungen 1 und 2 zeigen eine Draufsicht und ein repräsentatives Querschnittsprofil.



Abbildung 1: Draufsicht inklusive Gehöft, Wassergraben und Nes



Abbildung 2: Querschnitt des Deichs am Ort der mittleren Messreihe

3.2 Messungen

Unter alltäglichen Bedingungen ist der gedämpfte Respon auf die Tide deutlich sichtbar, wie es beispielsweise die Messungen der mittleren Messreihe vom 3. und 4. November 2013 (Abbildung 3) zeigen. In dieser Abbildung sind zum Vergleich auch der Bemessungswindstau und der dazugehörige idealisierte Pegelverlauf angegeben, wie in der niederländischen Richtlinie für Küsten- und Seedeiche (*TAW, 1999*) beschrieben. Der Windstau beträgt 3,82 m und die Sturmdauer 45 Stunden. Die mittlere Gezeitenamplitude beträgt 1,15 m und der mittlere Wasserpegel NAP + 0,03 m.

Anfang Dezember 2013 kam in diesem Gebiet ein Sturm auf, der den höchsten Wasserstand während der gesamten Messperiode zur Folge hatte: NAP +3,35 m. Abbildung 4 zeigt die Messungen der mittleren Messreihe.

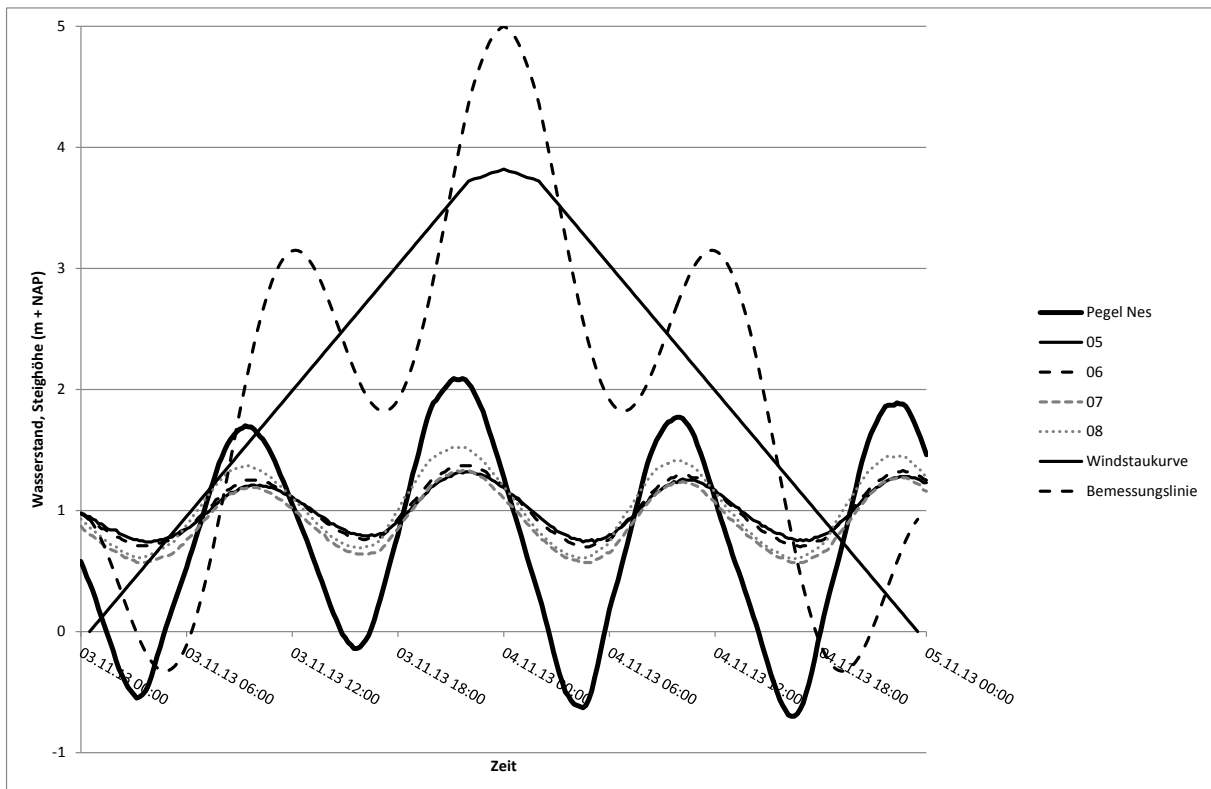


Abbildung 3: Messungen vom 3. und 4. November 2013 für die mittlere Messreihe in Kombination mit Bemessungsturm

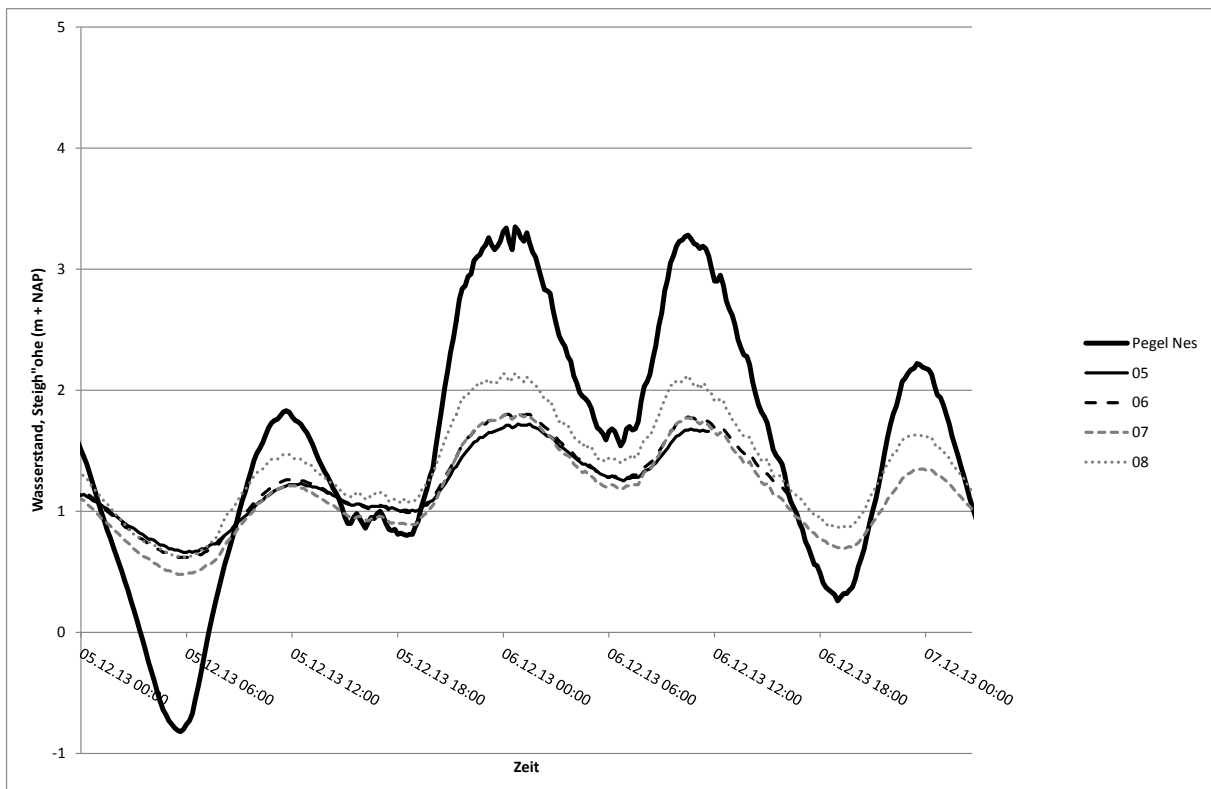


Abbildung 4: Messungen der St.-Nikolaus-Flut 2013 für die mittlere Messreihe

3.3 Analyse

Die Messungen zeigen deutlich, dass der Respons unterhalb des Deiches stark gedämpft ist. Der Widerstand wasserseitig des Wasserdruckmessers 08 ist sichtbar groß.

Die Anwendung der in §2.2 genannten Methode auf die Gezeitenresponsmessungen von Anfang November 2013 ergibt für λ_w einen Wert von 148m. Aus der Messung während des Sturms einen Monat später ergibt sich selbst ein Wert von $\lambda_w = 220$ m. Diese hohen Werte werden jedoch nicht dadurch verursacht, dass sich der Eintrittspunkt weit entfernt vom Wassergraben befinden würde, sondern durch die beinahe uniforme Amplitude der hintersten Wasserdruckmessinstrumente. Diese werden durch den Grundwasserpegel im Polder mit beeinflusst, welcher gerade bei Sturm aufgrund der Entwässerungsproblematik extra hoch ist.

Ebenso gilt auch für die anderen Methoden, dass eine vertretbare Anwendung nur möglich ist, wenn die örtlichen Gegebenheiten in die Analyse mit einbezogen werden.

Die obengenannten Methoden ergeben unter Bemessungsbedingungen eine reduzierte Steighöhe unterhalb des Deiches am Ort der Messpunkte oder, im Falle der erstgenannten Methode, unterhalb des gesamten Deiches. Für die an der äußersten Wasserseite gelegenen Messpunkte sind die Steighöhenmesswerte sowohl für eine stationäre Situation als auch gemäß den angegebenen Methoden in Tabelle 1 wiedergegeben.

Tabelle 1 Auf Bemessungsbedingungen extrapolierte Steighöhen für Messpunkt 08

Modell	Steighöhe bei Messpunkt 08 [m + NAP]
stationär	4,30
TAW (2004)	3,18
„Scheldestromen“	3,00
direkte Extrapolation	2,15
PlaxFlow	2,84

Anschließend stellt sich die Frage, ob rückschreitende Erosion bei einem solchen Wasserdruck überhaupt noch auftreten kann. Infolge der starken Dämpfung im Untergrund auf der Wasserseite des Wasserdruckmessinstrumentes 08 ist die Reduktion des Gradienten der Wasserdruckmessung derart, dass das Zuwenig an Sickerweglänge bei einer stationären Analyse bei allen Methoden in einen Überschuss umschlägt, wenn von der ursprünglichen Formel von Sellmeijer (*DWA, 2011*)

ausgegangen wird. Mit der angepassten neuen Formulierung aus *Förster et al. (2013)* ist lediglich bei Anwendung der konservativsten Methode noch Rede von einem Zuwenig an Sickerweglänge, siehe Tabelle 2.

Für die ebenfalls relativ konservative Methode „Scheldestromen“ ergibt sich auch eine überschüssige Sickerweglänge. Die günstigsten Werte erhält man mit der direkten Extrapolationsmethode, was auch bei einer Methode zu erwarten ist, die den Respons systematisch unterschätzt. Übrigens kann der Mehrwert dieser Methode in der Tatsache liegen, dass hiermit eine Untergrenze bestimmt wird. Wenn nur wenige Messungen verfügbar sind, kann hiermit schnell eine Schätzung des durch in Betracht nehmen von Zeitabhängigkeit maximal zu erzielenden Gewinns abgegeben werden. Wenn dies der Fall ist, kann eine kostspielige Folgeuntersuchung ohne Resultat vermieden werden.

Tabelle 2 Unter Bemessungsbedingungen benötigte Sickerweglängen und Sickerweglängendefizite bei Messpunkt 08

Modell	Sellmeijer, wie in <i>DWA (2011)</i>		Sellmeijer, wie in <i>Förster et al. (2013)</i>	
	$L_{\text{benötigt}}$ [m]	Rest [m]	$L_{\text{benötigt}}$ [m]	Rest [m]
stationär	68,9	-13,9	90,0	-35,0
TAW (2004)	44,9	+10,1	57,1	-2,1
„Scheldestromen“	40,0	+15,0	50,5	+4,5
Direkte Extrapolation	22,5	+32,5	27,6	+27,4
PlaxFlow	37,4	+17,6	47,1	+7,9

Auf Basis der Messungen und der Analyse wurde entschieden, dass der Bau der Spundwand unterlassen werden kann und eine Deichertüchtigung nicht erforderlich ist. Diese Entscheidung basiert primär auf der ursprünglichen Formel von Sellmeijer, welche für das heutige Deichertüchtigungsprogramm im Moment noch geltend ist. Angesichts der günstigen Resultate bei Anwendung der neuen Formulierung der Sellmeijerformel, erscheint dieser Entschluss auch in Hinblick auf die zukünftige Richtlinie durchaus akzeptabel.

4 Fazit

Durch Berücksichtigung der kurzen Hochwasserdauer unter anderem in Küstengebieten kann die zu berücksichtigende Belastung von Deichen für unterschiedliche Versagensmechanismen deutlich reduziert werden. In diesem Beitrag

wurden unterschiedliche Methoden präsentiert, die es ermöglichen, den zeitabhängigen Aufbau von Grundwasserdrücken unterhalb eines Deiches im Bemessungszustand auf der Basis von Meeresepegelständen und Steighöhen unterhalb des Deiches zu ermitteln. Diese Methoden wurden auf eine Situation bei der Wattenmeerinsel Ameland angewendet, wo auf einer kurzen Strecke eine teure Deichertüchtigungsmaßnahme wegen der aus stationären Berechnungen folgenden Pipinggefahr nötig erschien. Auf der Grundlage von Messungen konnte jedoch gefolgert werden, dass der heutige Deich eine ausreichende Standsicherheit aufweist.

5 Literatur

- Bligh, W.G. (1910): Dams, barrages and weirs on porous foundations, Engineering News 64(26):708-710.
- Bligh, W.G. (1916): Dams and weirs, American Technical Society, Chicago.
- DWA (2011): Merkblatt DWA-M 507-1, Deiche an Fließgewässern, Teil 1: Planung, Bau und Betrieb, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef, ISBN 978-3-941897-76-2.
- Esch, J.M. van, Sellmeijer, J.B. & Stolle, D. (2013): Modelling transient groundwater flow and piping under dikes and dams, ComGeo III, Krakau.
- Förster, U., Ham, G. van den, Calle, E. & Kruse, G. (2013): Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen, rapportage 1202123-003-GEO-0002v3, Deltares, Delft.
- Sellmeijer, J.B. (1988): On the mechanism of piping under impervious structures, Ph.D. thesis, Technische Universiteit Delft.
- TAW (1999): Leidraad zee- en meerdijken - basisrapport, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft.
- TAW (2004): Technisch rapport waterspanningen bij dijken, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft, ISBN 90-369-5565-3.

Autoren:

Dr.ir. André Koelewijn
Dipl.-Ing. Ulrich Förster

Deltares
Boussinesqweg 1
NL-2629 HV Delft

Tel.: +31 88 335 8273
Fax: +31 88 335 8582
E-Mail: andre.koelewijn@deltares.nl
ulrich.forster@deltares.nl