

Bodenverflüssigung und Deiche

Maria Krumb
Leo Zwang
Martin van der Meer
Uli Zimmermann
Till Singhal-Bohrmann

Bei den Sturmfluten von 1953 an der niederländischen, englischen und teilweise auch belgischen Küste und 1962 an der deutschen Nordseeküste kam es jeweils zu einer verheerenden Flutkatastrophe. Bei diesen Katastrophen wurden nie vorher gemessene Pegelstände registriert, und das nicht nur an der Küste, sondern auch an den Unterläufen der Flüsse und deren kleineren noch ungesicherten Nebenflüssen.

Die Katastrophe von 1953 wurde in den Niederlanden zum Auslöser eines beispiellosen Hochwasserschutzprogramms, des Delta-Plans. Die niederländische Küste wurde durch die Anlage von Hunderten Kilometern neuer Deiche befestigt und die breiten und tiefen Mündungen von Maas und Schelde mittels Schleusen und Wehren von der See abgeriegelt.

Bereits nach der Hollandsturmflut waren die für den deutschen Küstenschutz verantwortlichen Stellen zu dem Schluss gekommen, dass die Küstenschutzanlagen an der deutschen Nordseeküste einer dringenden Überarbeitung und Verstärkung bedurften. Zum Zeitpunkt der Sturmflut 1962 war das Küstenschutzprogramm jedoch noch bei weitem nicht abgeschlossen. Wichtigstes Element des Küstenschutzprogramms war die Erhöhung und Verstärkung der Deiche sowie ihre konstruktive Anpassung.

Bei der Wartung der holländischen Deiche wurde die Bodenverflüssigung als großes Problem erkannt. Es ist ein bekanntes Phänomen in den südwestlichen Teilen der Niederlande. Seit Sicherheitsabschätzungen begonnen haben, die auf offiziellen Richtlinien basieren, scheint es, dass viel mehr Deiche die Sicherheitsnormen für Bodenverflüssigung nicht erfüllen. Seit 1997 sind die Deiche in drei offiziellen Sicherheitsabschätzungen geprüft worden. Obwohl sich die Richtlinien nicht geändert haben, ist die Anzahl der Deiche, die nicht sicher sind, gewachsen. Eines der Probleme ist das akzeptierte Risiko für Bodenverflüssigung, das aufgrund der hohen Sicherheitsstandards in den Niederlanden sehr niedrig angesetzt wird. Für die Bewertungen wird ein empirisches Wahrscheinlichkeitsverfahren zur Risikoermittlung verwendet. Für die Gewinnung der notwendigen Informationen sind Untersuchungen wie CPT und Bohrungen nötig. Wenn diese oder vergleichbare Daten fehlen, ist es unmöglich eine Sicherheitsbewertung vorzunehmen, was während der ersten und zweiten offiziellen Sicherheitsabschätzungen der Fall war.

In diesem Paper wird weiterhin ein Vergleich zwischen den deutschen und niederländischen Sicherheitsbeurteilungsmethoden für Bodenverflüssigung einschließlich der anerkannten Messverfahren und Entwicklungen angestellt.

Stichworte: statische Bodenverflüssigung, Deich, Böschung

1 Statische Bodenverflüssigung

Bodenverflüssigung ist ein Phänomen, bei dem sich der Scherwiderstand des Bodens unter statischer, zyklischer oder dynamischer Lasteintragung verringert, wobei das Volumen konstant bleibt. Der Boden unterliegt dabei einer sehr großen gerichteten Scherverformung (Fließen des Bodens), bis die Scherspannungen so niedrig oder niedriger als der reduzierte Scherwiderstand sind (Poulos et al. 1985).

Statische Bodenverflüssigung beschreibt eine Form der Bodenverflüssigung, bei der ein locker gelagerter Sand undrainiert unter konstanter Last versagt. Diese Form des Versagens ist ein maßgeblicher Faktor für die Stabilität von Böschungen, wenn diese aus lockergelagerten, wassergesättigten Sanden bestehen. Kontrolliert wird dieser Mechanismus durch das Spannungsverhältnis (stress ratio, η) im Boden. Um das Spannungsverhältnis zu erhöhen, muss entweder, die Deviatorspannung erhöht werden (z.B. durch Böschungsversteilung am Fuß als Folge von Erosion) oder die effektiven Hauptspannungen werden verkleinert als Folge erhöhter Porenwasserdruckspannungen. In beiden Fällen kann eine statische Verflüssigung eintreten, wenn der Boden locker genug gelagert und voll gesättigt ist (Jefferies and Been, 2006).

2 Geologie des Deltagebietes in Südholland

Um die Problematik der Verflüssigungsphänomene in den Niederlanden zu verstehen, muss ein kurzer Blick auf die Geologie geworfen werden. Die locker gelagerten Sande sind das Ergebnis irregulärer Sedimentationsprozesse in den Deltagebieten als Folge der Tideneinflüsse. Die locker gelagerten Sande sind Teil des Holozän und etwa 10 000 Jahre alt. Sie werden von Tonen und Torfen überlagert.

Das Problem der Verflüssigung entsteht durch die Erosionswirkung der Flüsse. Der Erosionsprozess entwickelt sich abhängig von den jeweiligen lokalen Bedingungen. An manchen Stellen wurde ein Erosionsfortschritt von 0,1 bis 0,5 m pro Jahr gemessen. Durch diese Erosion vertieft sich das Flussbett zunehmend und die Böschungen werden steiler, wodurch sich das Risiko für eine potentielle Verflüssigung vergrößert.

3 Management der Gezeitenrisiken in den Niederlanden

3.1 Einleitung

Um die Niederlande gegen Überflutungen zu schützen, existieren Wasser- schutzsysteme entlang der Küste, den Flussmündungen und Flüssen. Die Unter- wasserböschungen der Deiche bestehen oft aus locker gelagerten Sandschichten, die anfällig für Bodenverflüssigung sein können. Bodenverflüssigung kann zu großflächigen Fließbrutschungen und Deichversagen führen.

Für das Auftreten einer Bodenverflüssigung ist ein Trigger erforderlich. Erfah- rungsgemäß ist der wichtigste Trigger die mit Erosion verbundene Versteilung der Unterwasserböschung. Dieser Effekt ist besonders relevant für das Deltage- biet im Südwesten der Niederlande. Auch seismische Erschütterungen im Zu- sammenhang mit Gasfeldexploration können als Trigger wirken. Dieser Einfluss ist Gegenstand aktueller Forschung im Norden der Niederlande, wo große Ex- plorationsgebiete für Gas bestehen. In diesem Artikel wird der Fokus auf dem Effekt der Bodenverflüssigung aufgrund von Erosion, der auch als „statische“ Verflüssigung bezeichnet wird, liegen.

3.2 Historische Entwicklung

Der Südwesten Hollands weist ein Gezeitemsystem auf, dass sich in den letzten Jahrhunderten drastisch verändert hat. In Abbildung 1 werden Karten der letzten zwei Jahrhunderte gezeigt.

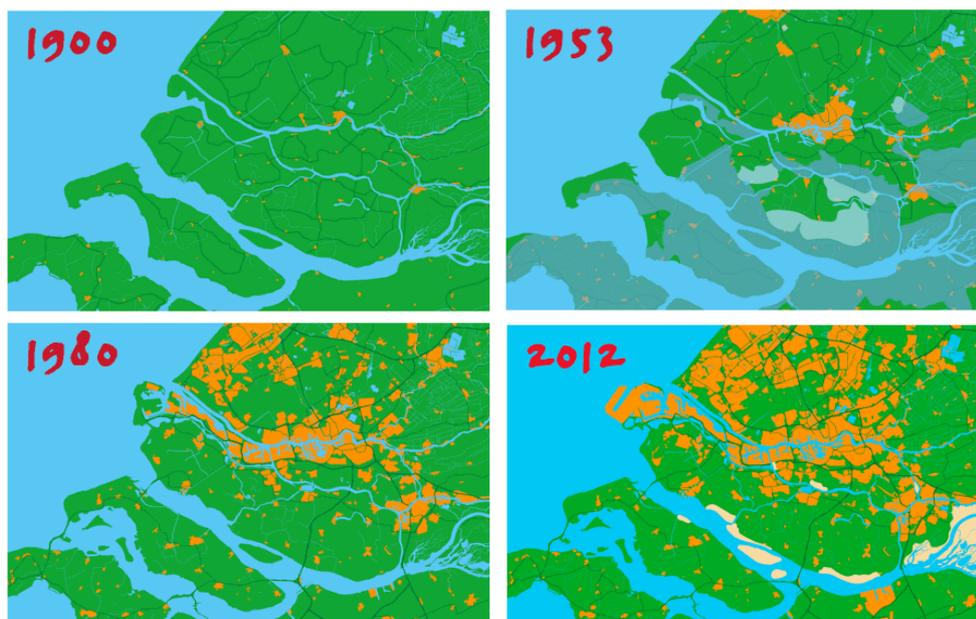


Abbildung 1 Historische Entwicklung des Südwestens Hollands
Quelle http://www.deiningindedelta.nl/dwalen_door_de_tijd/

In den Karten ist erkennbar, dass vor allem zwischen 1800 und 1900 dem Meer große Landflächen abgerungen wurden. Nach 1900 wuchs die Population rasch, was zu dicht besiedelten Gebieten entlang der Küste und Flüsse führte. Eine andere wichtige Veränderung war der Bau der Deltawerke. Diese sind ein System von Sturmflutbarrieren, die nach der verheerenden Flut von 1953 errichtet wurden. Einen Überblick über diese Barrieren gibt Abbildung 2.



Abbildung 2 Deltawerke, Quelle <http://www.deltawerken.com>



Abbildung 3 Leendert Abraham polder, Oosterschelde, März 1966.

Im Südwesten der Niederlande ereigneten sich zahlreiche Fließbrutschungen. Ein Beispiel ist in Abbildung 3 gezeigt.

3.3 Risikoeinschätzung

Damit eine statische Verflüssigung eintreten kann, müssen zwei Grundlagen erfüllt sein. Erstens muss ein wassergesättigter, lockergelagerter Sand anstehen und zweitens wird ein Auslöser der Verflüssigung benötigt. Bei den hier untersuchten Böschungen wurde beides untersucht und kartiert. Dabei wurde die Lagerungsdichte untersucht und die durch Erosion entstehende Versteilung der Fußböschung als Trigger verstanden.

Karten der Gefährdung für Bodenverflüssigung

Um das Deichverhalten entlang der Gezeitenströme einschätzen zu können, wurden Bodenuntersuchungen (CPTs) durchgeführt und die Bereiche festgestellt, in denen verflüssigungsfähige Böden anstehen. Ein Beispiel einer solchen Verflüssigungsgefährdungskarte ist in Abbildung 4 gegeben.

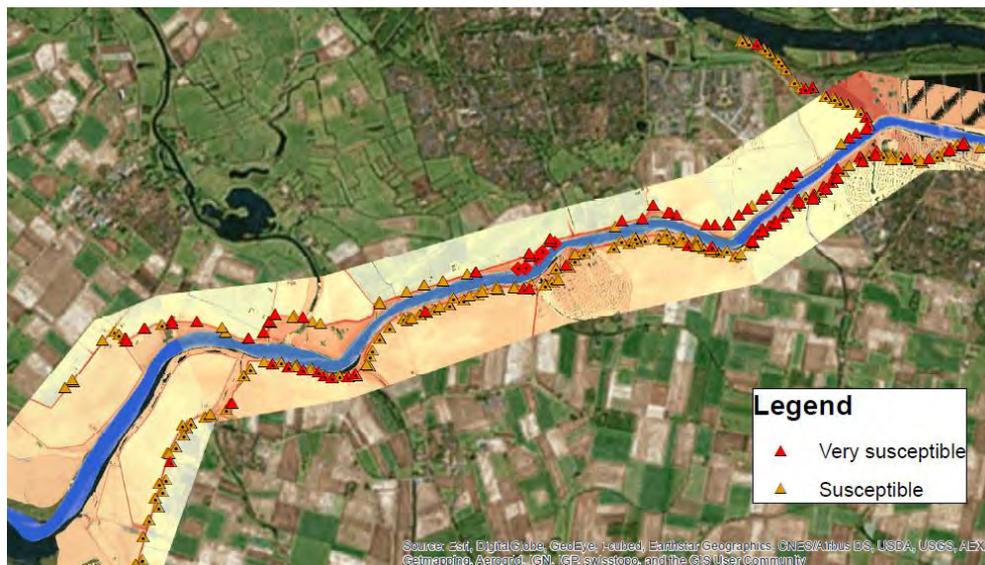


Abbildung 4 Verflüssigungsgefährdungskarte

Erosionskarten

Auf der Grundlage periodischer Sondierungen des Flussbetts wurden Bereiche signifikanter Erosion der Flussufer identifiziert. Ein Beispiel für eine Erosionskarte ist in Abbildung 5 dargestellt.

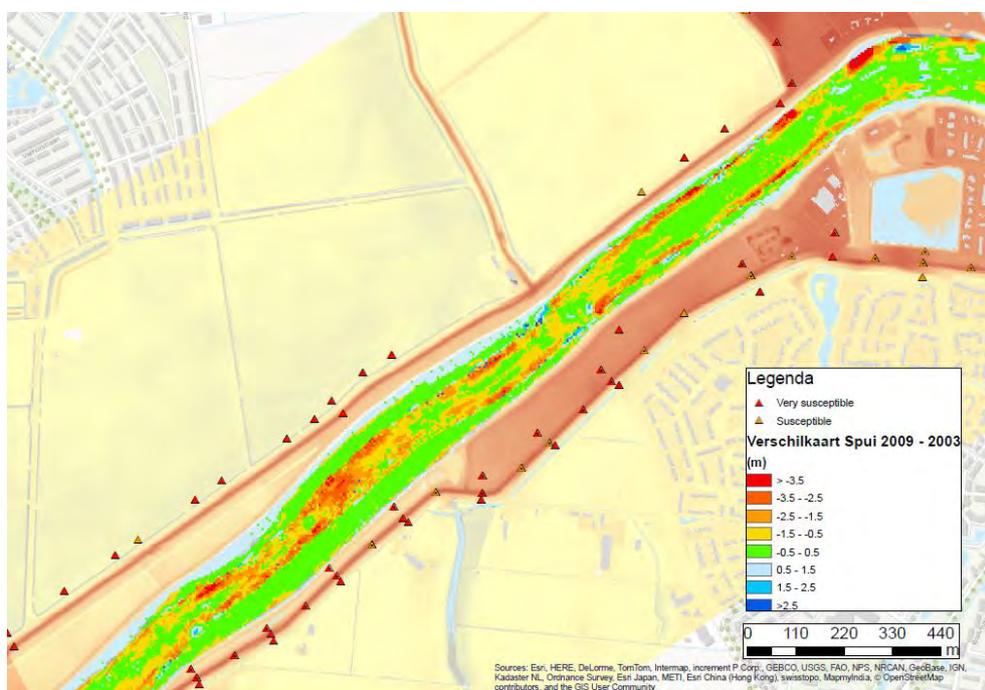


Abbildung 5 Beispiel für eine Erosionskarte

Beurteilung

Durch Kombination dieser hochqualitativen Datensätze werden Risikokarten erstellt und Regionen, wo regulierende Maßnahmen ergriffen werden sollten, bestimmt.

Für die Beurteilung wurde eine Wahrscheinlichkeitsanalyse durchgeführt. In dieser Analyse wurde die Wahrscheinlichkeit der Beschädigung des Deiches bestimmt und mit der zulässigen Wahrscheinlichkeit der Beschädigung des Deiches verglichen. Die Wahrscheinlichkeit der Überflutung ist das Produkt der Wahrscheinlichkeiten dreier Ereignisse, wobei das Risiko einer Beschädigung des Deiches das Produkt der ersten beiden Ereignisse darstellt:

- Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Fließrutschung eintritt
- Die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass eine Fließrutschung den Deich erreicht, gesetzt eine Bodenverflüssigung tritt ein
- Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Hochwassersituation eintritt, bevor die Beschädigung des Deiches durch eine Fließrutschung repariert ist

Wie diese Wahrscheinlichkeiten ermittelt wurden, wird im Folgenden ausgeführt.

• Wahrscheinlichkeit, dass eine Fließrutschung eintritt

Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit, dass eine Fließrutschung eintritt, basiert auf einer Datenbank gemeldeter Fließrutschungen im Südwesten der Niederlande.

$$P(zv) = \left(\frac{H_r}{25m} \right)^2 \times \left(\frac{3.5}{\cot \alpha_r} \right)^6 \times \left(\frac{1}{10} \right)^{10 \times (R_e - 0.4)} \cdot 0.1 / km / Jahr \quad [-/km/Jahr] \quad (1)$$

H_r = fiktive Höhe der Böschung [m]

$\cot \alpha_R$ = Kotangens des fiktiven Böschungswinkels [-]

R_e = niedrigster Wert der durchschnittlichen spezifischen Dichte über 3 m [-]

• **Bedingte Wahrscheinlichkeit, dass eine Fließbrutschung den Deich erreicht, gesetzt eine Bodenverflüssigung tritt ein**

Eine Fließbrutschung ist nur relevant für die Wasserschutzfunktion, wenn sie den Deich erreicht. Das Schadensprofil stützt sich ebenfalls auf eine Datenbank gemeldeter Fließbrutschungen im Südwesten der Niederlande. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Fließbrutschung den Deich beschädigt, basiert auf einer statistischen Analyse dieser Daten.

Die Länge des Versagensprofils ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt.

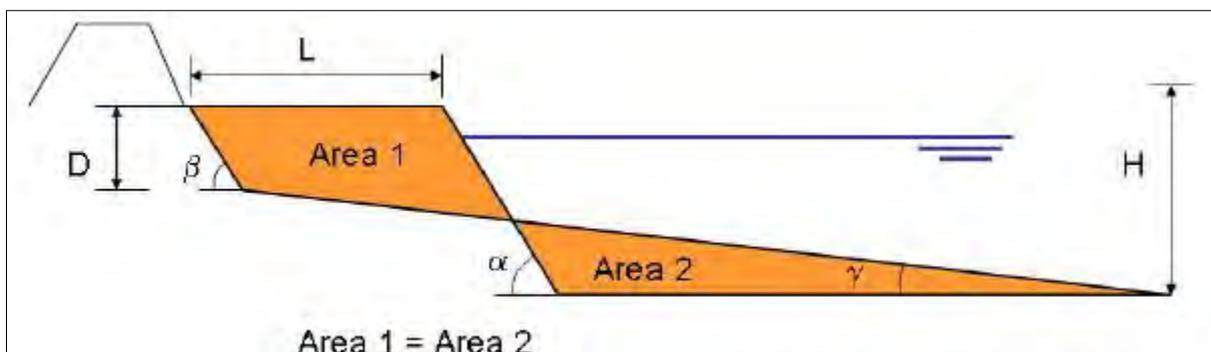


Abbildung 6 Länge des Versagensprofils

Das Versagensprofil wird durch die folgenden Parameter bestimmt:

- $\cot(\gamma)$ = untere Böschung des Profils nach der Fließbrutschung [-]
- $\cot(\alpha)$ = Böschung des Profils vor der Fließbrutschung [-]
- $\cot(\beta)$ = obere Böschung des Profils nach der Fließbrutschung [-]
- c = Verhältnis von Fläche A1 zu Fläche A2 ($A_1=cA_2$, $c=1$, während des Fließens) [-]
- H = Höhe der Böschung vor dem Versagen (entspricht in etwa der Tiefe des Flusses) [m]
- D = Höhe des steilen Teils des Versagensprofils [m]

Von den drei unbekanntenen Parametern β , γ und D , ist der Einfluss der Unsicherheit des Parameters γ auf die berechnete Ausdehnung der Fließbrutschung dominant. Daher wird nur die Unsicherheit dieses Parameters für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit der Überschreitung der zulässigen Länge des Schadensprofils verwendet. Basierend auf der statistischen Analyse von Fließbrutschungen im

Südwesten Hollands wird eine Normalverteilung für diesen Parameter angenommen mit $E_{\cot(\gamma)} = 15,9$ und $\sigma_{\cot(\gamma)} = 4,6$.

Die Zuverlässigkeitsfunktion kann nun definiert werden:

$$Z = L_{\text{zulässig}} - L \quad (2)$$

L = Länge des Schadensprofils [m]

$L_{\text{zulässig}}$ = zulässige Länge des Schadensprofils [m]

Die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer Fließbrutschung das Schadensprofil länger ist als zulässig, kann folgendermaßen bestimmt werden:

$$P(L > L_{\text{zulässig}} | ZV) = P(Z < 0) = \Phi(-\beta) \quad [-]$$

Wahrscheinlichkeit, dass eine Fließbrutschung den Deich erreicht

Die Wahrscheinlichkeit der Beschädigung des Deiches wird nun ermittelt:

$$P(\text{Damage to ZV}) = P(ZV)_{\text{rep}} \cdot P(L > L_{\text{zulässig}} | ZV) \quad [-/\text{Jahr}] \quad (3)$$

$P(\text{Damage to ZV})$ = Wahrscheinlichkeit einer Beschädigung des Deiches durch eine Fließbrutschung [-/Jahr]

$P(ZV)$ = Wahrscheinlichkeit einer Fließbrutschung [-/Jahr]

$P(L > L_{\text{zulässig}} | ZV)$ = Wahrscheinlichkeit, dass bei einer Fließbrutschung das Schadensprofil den Deich erreicht [-]

- **Wahrscheinlichkeit einer Hochwassersituation bevor die Beschädigung des Deiches durch eine Fließbrutschung repariert ist**

Das Eintreten einer Fließbrutschung steht nicht in Beziehung zu einer Hochwassersituation. Studien der vergangenen Fließbrutschungen scheinen im Gegenteil zu belegen, dass diese eher eintreten, wenn der Wasserspiegel fällt. Nur wenn eine Hochwassersituation eintritt, bevor die Beschädigung des Deiches durch eine Fließbrutschung repariert ist, wird dies zu einer Überflutung des Hinterlandes

führen. Daher kann die Wahrscheinlichkeit der Überflutung aufgrund einer Fließbrutschung wie folgt bestimmt werden:

$$P(\text{Überflutung wegen ZV}) = P(ZV) \cdot P(L > L_{\text{zulässig}} | ZV) \cdot P(H > H_{\text{Schadensprofil}}) \quad [-/\text{Jahr}] \quad (4)$$

$P(\text{Überflutung wegen ZV})$ = Wahrscheinlichkeit der Beschädigung des Deiches durch eine Fließbrutschung [-/Jahr]

$P(ZV)$ = Wahrscheinlichkeit einer Fließbrutschung [-/Jahr]

$P(L > L_{\text{zulässig}} | ZV)$ = Wahrscheinlichkeit, dass das Schadensprofil des Deich erreicht, wenn die Fließbrutschung eintritt [-]

$P(H > H_{\text{Schadensprofil}})$ = Wahrscheinlichkeit eines Hochwassers höher als die verbleibende Deichhöhe während der Reparaturzeit des Deiches [-]

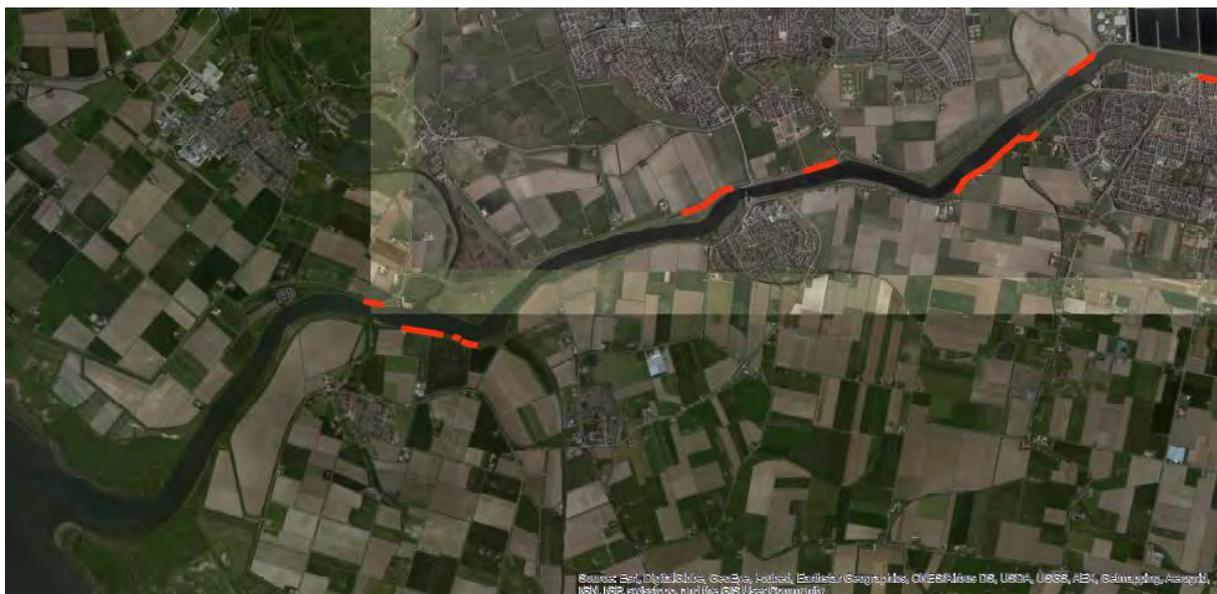


Abbildung 7 Beispielergebnisse einer Karte zur Analyse von Fließbrutschungsabschätzungen

3.4 Maßnahmen zur Risikominderung

Für Bereiche, in denen die berechnete Überflutungswahrscheinlichkeit größer ist als die nach niederländischem Recht zulässige Versagenswahrscheinlichkeit, werden risikomindernde Maßnahmen ergriffen. In diesem Fall werden die Unterwasserböschungen mit Verkleidungen aus Bewehrungssteinen geschützt.

3.5 Forschung und Entwicklung

Neben Risikominderung wird die Erforschung der Bodenverflüssigung betrieben. Im Scheldedelta wurde ein großräumiger Verflüssigungsversuch vorbereitet. Dieser Test fand im September 2014 statt.

4 Vergleich und Ausblick

Es wurde durch Gönner et al. (2012) eine umfangreiche Studie zu den Rahmenbedingungen des Küstenschutzes in den sturmflutgefährdeten Regionen der Nordseeanrainerstaaten erstellt. Diese umfasst die gesetzlichen Grundlagen, die Bemessungsverfahren und ihre Sicherheitsstandards sowie Angaben zum Klimazuschlag sowohl derzeit als auch für die zukünftige Bemessung.

Die Abbildung 8 zeigt, dass die Sicherheitsstandards in Dänemark und Großbritannien relativ niedrige Standards haben, im Vergleich zu den Niederlanden und auch Belgien. Schaut man sich jedoch die Standards für die Bereiche von Großstädten bzw. Ballungsräumen an, sind sie ähnlich hoch.



Abbildung 8 Internationaler Vergleich der Küstenschutzstrategien der Nordseeanrainerstaaten heute (GÖNNERT et al. 2012)



Abbildung 9 Internationaler Vergleich der zukünftigen Küstenschutzstrategien der Nordseeanrainerstaaten (GÖNNERT et al. 2012)

Die Klimaänderung wird in allen Ländern als Herausforderung der Zukunft betrachtet. Somit wird überall geprüft, mit welchen Konzepten und Klimazuschlägen ihr begegnet werden kann. Abbildung 9 zeigt die zukünftigen Entwicklungen in den zum Vergleich herangezogenen Ländern. Während Großbritannien,

Dänemark und Belgien ihre Sicherheitsstandards beibehalten, heben die Niederlande ihren Standard deutlich an. In der Konsequenz bedeutet ein Beibehalten der Sicherheitsstandards, dass in Anpassung an den steigenden Meeresspiegel und zunehmende Sturmaktivität die Küstenschutzbauwerke erhöht werden bzw. weitere Anpassungsstrategien durchgeführt werden, um den angegebenen Standard zu erhalten.

Die Niederländer müssten ihren Küstenschutz erheblich ausbauen, um den Anforderungen, die aus der Klimaänderung und den erhöhten Sicherheitsstandards resultieren, gerecht werden zu können. Der sehr hohe Sicherheitsanspruch der Niederlande begründet sich durch die Lage der großen Städte: Rotterdam, Den Haag und auch Amsterdam liegen zu großen Teilen unterhalb des Meeresspiegels (siehe Abb. 8 und Abb. 9).

Vergleicht man die geologische Situation an der deutschen Nordseeküste mit den untersuchten Deltagebieten in Südwestholland, gibt es grundlegende Unterschiede.

Die Deutsche Bucht, mit relativ flachem Wasser, welches ca. 50 km in die Nordsee hinaus ragt, schützt die deutsche Küste (Wattenmeer). Dieses Gebiet war das Schüttungsdelta des Rheins und der Weser, und ist daher sandig dominiert. Die Überflutung dieser 50 km Material fand aber erst vor ca. 10.000 Jahren statt, und ist als südliche Randauswirkung der Entstehung des Wiking- und des Nordsee-Grabens zu interpretieren. Infolge dessen entwickelte sich das Deutsche Wattenmeer, mit einem sehr flachen Gradienten zur See hin. Dies dient heute als "Puffer", so dass energetisch und aufgrund des Sedimentationsraumes, die holländischen Probleme in der oben geschilderten Form nicht auftreten. In Südwest-Holland hat sich die holozäne Tektonik nicht mehr so ausgewirkt, so dass dort heute schneller tieferes Wasser zur Nordsee hin auftritt. Demzufolge hat die holländische Küste - außer in Friesland - kein Wattenmeer.

Flüsse, wie z.B. die Elbe haben, auf Grund der flachen Mündungen, relativ geringe Fließgeschwindigkeiten. Die Elbe hat weiterhin eine kürzere Flut- als Ebephase und damit höhere Fließgeschwindigkeiten flussaufwärts, infolge derer viel Material in die Elbe transportiert wird. Während des Wasserrücklaufs der Ebbe wird dieses Material abgelagert und nicht mehr zurücktransportiert. Dies führt effektiv zu Ablagerungsprozessen und nicht zur Erosion im Flussbett. Außerdem wird die Fließgeschwindigkeit zusätzlich durch das durch Ausbaggern tiefergelegte Flussbett im Hamburger Hafen und der Fahrrinne abgemindert, wodurch die Sedimentation zusätzlich verstärkt wird. Infolgedessen müssen Fahrrinne und Hafenbecken beständig weiter ausgebagert werden. (BAW, 2002).

Die Ton- und Torf-Folgen gibt es in der Deutschen Bucht auch, - als Zeugen einer Elbe-Sedimentation. Nur sind diese Folgen seit knapp 10.000 Jahren geflutet, zum Großteil erodiert oder durch jüngere Sande überdeckt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Böschungsverflüssigung, wie die an holländischen Deichen, an der deutschen Küste und Zuflüssen keine Rolle spielt, da die Bedingungen dafür nicht vorhanden sind. Allerdings gibt es auch im Landesinneren von Deutschland, speziell in ehemaligen Tagebaugebieten, schlecht verfestigte Sandschichten, die möglicherweise ein Bodenverflüssigungsrisiko darstellen. Mit einer tiefergehenden probabilistischen Analyse könnten hier entsprechende Risikogebiete ermittelt und durch weitergehende Untersuchungen verifiziert werden.

5 Literatur

- Bundesanstalt für Wasserbau (2002). "Potenzialuntersuchung zur Unter- und Außenelbe, 1. Teilbericht – Prinzipielle Vorabschätzungen zu möglichen Auswirkungen einer weiteren Fahrrinnenvertiefung“, BAW-Nr. 5 03 10015 00
- Concept technische rapport voorland zettingsvloeiing (SBW), 1200503-001, Deltares, 2011
- ‘Geavanceerde Toetsing op Zettingsvloeiing: Faalkansanalyse 3de fase’, CO 369841.298v3, Deltares, augustus 2008
- Gönnert, G., Bremer J.-A., Müller J.-M. (2012). "Internationaler Vergleich der Bemessungsverfahren im Küstenschutz.“, Berichte des Landesbetriebs für Straßen, Brücken und Gewässer Nr. 12
- Jefferies M., Been K. (2006). "Soil liquefaction: a critical state approach." Taylor & Francis, ASIN: B00HS7VU1G
- Poulos, S., Castro, G., and France, J. (1985). "Liquefaction Evaluation Procedure." Journal of Geotechnical Engineering, 111(6), 772–792.
- ‘Zettingsvloeiing in het beheersgebied van Waterschap de Hollandse Delta’, CO1995.005v2, GeoDelft, mei 2006

Autoren:

L.W.A. Zwang, MSc.

M.T. van der Meer, MSc.

Fugro GeoServices B.V.
Flood defence
Archimedesbaan 13
3439 ME Nieuwegein

Tel.: +31 306028175
Fax: +31 306028199
E-Mail: l.zwang@fugro.nl
m.vdmeer@fugro.nl

Dr.-Ing. A.M. Krumb

Fugro Consult GmbH
Wolfener Straße 36 U
12681 Berlin
Germany

Tel.: +49 (0)30 93651-290
Fax: +49 (0)30 93 651-350
E-Mail: m.krumb@fugro.de

U. Zimmermann, Dipl.-Ing.

Fugro Consult GmbH
Hauptstraße 103
04416 Markkleeberg
Germany

Tel.: +49 (0)341 35017-71
Fax: F +49 (0)341 35017-70
Email: u.zimmermann@fugro.de

T. Singhal-Bohrmann, Dipl.-Geol.

Fugro Consult GmbH
Wolfener Straße 36 U
12681 Berlin
Germany

Tel.: +49 (0)30 93 651-319
Fax: +49 (0)30 93 651-350
Email: t.singhal@fugro.de