 https://doi.org/10.18171/1.087113

Infiltrationsbedingte Prozesse in der Abdeckung von See- und Ästuardeichen und deren Einfluss auf die Standsicherheit

Martin Achmus[1], Martin Pohl[2], Holger Schüttrumpf[3], Helmut Temmler † [4]

[1] *Leibniz Universität Hannover, Institut für Geotechnik*
[2] *Bundesanstalt für Wasserbau*
[3] *Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft*
[4] *Ehemals LANU, Flintbek*

Vorwort

Der Fachausschuss für Küstenschutzwerke (FAK) wurde 1972 als gemeinsamer Ausschuss der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), (vormals Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau), und der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. (HTG) gegründet und mit der Aufgabe betraut, Empfehlungen für die funktionelle und konstruktive Planung sowie wirtschaftliche Bauausführung von Küstenschutzwerken an Nord- und Ostsee nach dem neuesten Stand der Technik zu erarbeiten. Veröffentlicht wurden bisher die „Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken“ als EAK 1981, EAK 1993 und EAK 2002 (korrigierte Ausgabe 2020). Sie wurden durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) in „Die Küste“ 36/1981, 55/1993 und 65/2002 (88/2020) abgedruckt. Des Weiteren erfolgte in „Die Küste“ 76/2009 der Bericht einer FAK-Arbeitsgruppe zu Küstenschutzstrategien. Ende 2020 gehören dem Ausschuss folgende Damen und Herren an:

- Achmus, Martin, Prof. Dr.-Ing., Institut für Geotechnik, Leibniz Universität Hannover
- Baumgarten, Frederic, Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Weser-Jade-Nordsee, Wilhelmshaven
- Fröhle, Peter, Prof. Dr.-Ing., Institut für Wasserbau, Technische Universität Hamburg
- Goseberg, Nils, Prof. Dr.-Ing., Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig
- Heinrich, Jorne, Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein, Husum
- Heinrichs, Michael, Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein, Kiel
- Herr, Burghard, Dr.-Ing., Baustofflabor Hamburg GmbH
- Höhmann, Sebastian, F+Z Baugesellschaft, Hamburg
- Karg, Eric, Boskalis, Rostock
- Kerpen, Nils, Dr.-Ing., Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Hannover
- Lücht, Fabian, Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein, Husum

- Maudrich, Sven, Hamburg Port Authority
- von Mirbach, Clais, Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer, Hamburg
- Mohr, Axel, Senator für Umwelt, Bau, Verkehr und Europa der freien Hansestadt Bremen
- Peters, Karsten, Dr.-Ing., Ramboll Deutschland GmbH, Hamburg
- Pohl, Martin, Dr.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg
- Pries, Janne, BBG Bauberatung Geokunststoffe GmbH & Co. KG, Espelkamp
- Probst, Bernd, Melsdorf
- Schade, Daniel, Dr.-Ing., Ingenieurbüro Mohn GmbH, Husum
- Schimmels, Stefan, Dr.-Ing., Forschungszentrum Küste, Hannover
- Schirmacher, Rüdiger, Berding Beton
- Schlie, Siegmund, Boskalis, Rostock
- Schmidt, Ronny, Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt, Rostock
- Schüttrumpf, Holger, Prof. Dr.-Ing., Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen
- Sommermeier, Knut, Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt, Rostock
- Thorenz, Frank, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz, Norden
- Tzschach, Uwe, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg

Die Mitglieder des Ausschusses für Küstenschutzwerke wurden nach dem Grundsatz berufen, Küsteningenieure der Wasserbau- und Wasserwirtschaftsbehörden, der Universitäten, von Planungsbüros und von einzelnen Bauunternehmen zusammenzuführen, um sowohl Fragen der Bemessung als auch die funktionelle und konstruktive Gestaltung der Küstenschutzwerke zu behandeln.

Im Hinblick auf den Anstieg des Meeresspiegels wird die zutreffende Erfassung und Bewertung von Infiltrationsprozessen in der Abdeckung von See- und Ästuardeichen auf die Standsicherheit immer wichtiger. Eine zutreffende Bewertung lässt mögliche Risiken erkennen, so dass diesen begegnet werden kann. Andererseits können ggf. höhere Wellenüberlaufraten und Verweildauern erlaubt werden. Eine wirtschaftliche und sichere Ausbildung sowie eine zutreffende Zustandsbeurteilung von Deichen sollen durch den Bericht unterstützt werden.

Hierzu wurde eine Arbeitsgruppe mit folgenden Mitgliedern eingerichtet:

- Pohl, Martin, Dr.-Ing. (Obmann)
- Achmus, Martin, Prof. Dr.-Ing.
- Schüttrumpf, Holger, Prof. Dr.-Ing.
- Temmler, Helmut, Dr. †

Als externer Berater wurde Dr.-Ing. Roland Weißmann, Neukirchen-Vluyn hinzugezogen.

Der Bericht wurde am 19.02.2020 vom Fachausschuss mit einem herzlichen Dank an die Bearbeiter einstimmig verabschiedet und hiermit veröffentlicht. Besonders hervorzuheben und posthum zu danken ist dem Mitglied Dr. Helmut Temmler, der mit seinen umfangreichen Untersuchungen die Grundlage gelegt und weite Teile des Berichts geprägt hat.

Hamburg, im Dezember 2020

Martin Pohl	Karsten Peters
Obmann	Ausschussvorsitzender

Zusammenfassung

Der vorliegende Statusbericht behandelt die Vorgänge und Auswirkungen von Infiltrationsprozessen, wie sie sich insbesondere bei Wellenüberlauf an der Binnenböschung eines Deiches ergeben. Dieses Szenario ist bei dem prognostizierten Meeresspiegelanstieg entscheidend für die Deichsicherheit, sofern keine Deicherhöhung erfolgt.
Dahingehend werden im Überblick neuere Untersuchungen seit Erscheinen der „Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken“ (EAK 2002) diskutiert. Als erste Bewertungsgrundlage wird auf die Zustandsermittlung von Deichen mit Bewertungskriterien eingegangen. Weitergehend erfolgt eine Betrachtung zur Gefügebildung bei Deichabdeckböden, wobei auf das Wasserspeichervermögen sowie das Schrumpfverhalten, welches zur Rissbildung führt, eingegangen wird. Infolge der Risse kommt es zu einer hohen Durchlässigkeit der Deichabdeckung von etwa $1 \cdot 10^{-4}$ m/s. Bei einer Wasserinfiltration weicht die Deichabdeckung auf, wodurch die Scherfestigkeit und somit die Deichsicherheit herabgesetzt wird. Hohe Wasserstände im Deichkern wirken ebenfalls ungünstig auf die Standsicherheit. An beispielhaften Untersuchungsergebnissen werden die Effekte und Größenordnungen dargelegt.
Es werden Empfehlungen zu Berechnungsverfahren, Maßnahmen zur Sicherheitserhöhung und ein Ausblick angesichts des kommenden Klimawandels gemacht.

Schlagwörter

Infiltrationsprozesse, See- und Ästuardeiche, Deichsicherheit, Deichbewertung, Klimawandel

Summary

This status report deals with the processes and effects of infiltration, as they occur in particular during wave overflow on the inner slope of a dike. Given the predicted sea-level rise, this scenario is crucial for dike safety, provided that the existing dikes are not strengthened.
In this context, recent studies since the publication of the "Recommendations for the Execution of Coastal Protection Works" (EAK, 2002) are discussed. As a first basis for evaluation, the condition assessment of dikes using evaluation criteria is covered. In addition, the structure of the dike top soil is examined, whereby the water storage capacity and the shrinkage behaviour leading to crack formation are referred to. The cracks result in a high permeability of the dike cover of about $1 \cdot 10^{-4}$ m/s. In the event of water infiltration, the dike cover softens, reducing shear strength and thus dike safety. High water levels in the dike core also have an unfavourable impact on stability, the effects and scale are illustrated by means of exemplary test results.
Recommendations on calculation methods and measures to increase the dike safety are given as well as an outlook in respect of the coming climate change.

Keywords

infiltration process, sea and estuary dikes, dike safety, evaluation criteria, climate change

1 Einleitung

Die Erfahrungen aus den schweren Sturmfluten 1962 und 1976 finden sich in den Empfehlungen der EAK (2002) wieder. In diesem Statusbericht werden weitergehende Ausführungen gemacht und neuere Untersuchungsergebnisse beleuchtet, die die EAK (2002) sinnvoll ergänzen.

Dieser Statusbericht befasst sich mit Infiltrationsprozessen in See- und Ästuardeichen und deren Einfluss auf die Deichsicherheit. Im vorliegenden Beitrag soll zu dieser Thematik der Stand des Wissens dargelegt, Erfahrungen dokumentiert und damit das Verständnis geschärft werden.

Der Infiltrationsvorgang des Wassers ist insbesondere in der teilgesättigten bindigen Deichabdeckung ein hochkomplexer Vorgang, der nach wie vor Gegenstand der Forschung ist. Abhängig von Starkniederschlägen und Sturmflutereignissen sowie dem Zustand des Deiches beeinflusst der Infiltrationsvorgang entscheidend die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Deichquerschnitts sowie den Grundwasserstand im sandigen Deichkern. Die möglichen Auswirkungen von Infiltrationsvorgängen lassen sich wie folgt beschreiben:

- Aufweichen und Abrutschen der Deichabdeckung durch Starkniederschläge
- Aufweichen und Erosion der binnenseitigen Deichabdeckung durch Wellenüberlauf im Sturmflutfall
- Aufweichen und Erosion der seeseitigen Deichabdeckung durch Wellenangriff im Sturmflutfall
- Verlust der örtlichen Standsicherheit im Fußbereich der Deichbinnenböschung durch Wasserüberdruck im Deichkern

Einen entscheidenden Einfluss auf die aufgezeigten physikalischen Prozesse haben neben der Deichgeometrie und der Widerstandsfähigkeit der Grasnarbe, die Durchlässigkeit der Deichabdeckung sowie die Festigkeitsänderung der bindigen Deichabdeckung bei veränderlichem Wassergehalt. Die letzteren Punkte sind durch die mineralogische, kornanalytische und gefügekundliche Beschaffenheit des Bodens sowie durch Rissbildung, Bodenstruktur und Bioturbation geprägt.

Einen wichtigen Hinweis auf die Qualität des Abdeckbodens vermitteln die Ausführungen in der EAK 2002, Empfehlung G, Abschnitt 3.2, wobei die dort für Deichbauzwecke empfohlenen Grenzwerte der Bodeneignung zwar Altdeichböden mit einschließen, hauptsächlich jedoch für normalkonsolidierte bindige Schichten aus einer Bodenentnahme in der Deichnachbarschaft oder dem Sockel eines Kleideiches gelten, die noch nicht das typische witterungsbedingte Gefüge des „gereiften“ Abdeckbodens einer Deichabdeckung besitzen.

Im vorliegenden Beitrag wird vornehmlich auf Deichabdeckungen bestehend aus Klei eingegangen, wie sie an der Nordseeküste und deren Ästuaren vorkommen. Die physikalischen Prozesse und Erläuterungen lassen sich eingeschränkt auch auf andere Abdeckböden, wie Geschiebemergel (an der Ostsee) und bindiges gereiftes Baggergut, übertragen.

2 Stand der Technik und neuere Untersuchungen

2.1 Stand der Technik

An der deutschen Nordseeküste bestehen See- und Ästuardeiche in der Regel aus einem aufgespülten oder aufgeschütteten Sandkern, der mit einer Kleischicht abgedeckt ist. Auf der relativ flach geneigten Außenböschung (Neigung max. 1:6, in Schleswig-Holstein zusätzlich im Bereich 1 m unter- und oberhalb des Sturmflutwasserstands max. 1:8) beträgt die Dicke der Abdeckung 1,0 bis 2,0 m; auf der steileren Binnenböschung (Neigung max. 1:3) liegt die Schichtstärke meist zwischen 0,5 und 1,0 m.

An der Ostseeküste wird die Deichabdeckung meist von einer Mergelschicht gebildet. Die Außenböschung ist in der Regel steiler als bei Nordseedeichen. Die Deckschichtdicken betragen auf der Außenböschung 0,5 bis 1,2 m und auf der Binnenböschung 0,5 bis 0,7 m (vgl. EAK 2007, Empf. G, 2.1.2).

Die Deichabdeckung hat im Wesentlichen folgende funktionale Anforderungen zu erfüllen (vgl. EAK 2002, Empf. G, 3.2.2):

- Schutz des Sandkerns gegen Erosion durch Wellenschlag und Wasserüberlauf.
- Begrenzung der Infiltrationsrate in den Deich, da ein zu hoher Wasserstand im Deichkern die Standsicherheit des Deichs beeinträchtigen kann.
- Bildung eines Substrats für eine möglichst dichte Grasnarbe; eine dichte Grasnarbe schützt wirksam vor Erosion und erhöht die oberflächennahe Scherfestigkeit der Abdeckung.

Als Anforderungen an das Bodenmaterial ergeben sich daraus ein hoher Erosionswiderstand bzw. eine ausreichende Kohäsion sowie eine geringe Wasserdurchlässigkeit. Insbesondere hinsichtlich der Durchlässigkeit ist dabei zu beachten, dass die Abdeckschicht der Witterung ausgesetzt ist, was zu Schrumpf- und Quellvorgängen und damit zu Riss- und Aggregatbildungen führt. Die genannten Anforderungen müssen auch von der „gealterten" Abdeckschicht erfüllt werden.

<u>Kleiböden</u>
Ein hoher Tonanteil des Kleis ist günstig im Hinblick auf Erosionswiderstand und Kohäsion, bedingt aber auch eine höhere Schrumpfneigung des eingebauten Materials. Ein zu hoher Tonanteil führt deshalb zu verstärkter Rissbildung unter Witterungseinflüssen und ist somit ungünstig im Hinblick auf die Durchlässigkeit des gealterten bzw. aggregierten Bodens. Außerdem wirkt sich ein zu hoher Tonanteil ungünstig auf den Bewuchs, d. h. die Bildung einer dichten Grasnarbe aus. Jeweils entgegengesetzt wirkt sich ein hoher Sandanteil des Kleis aus.

In der Empfehlung G 2002, 3.2.2.1 der EAK (2002) werden erfahrungsbasiert als Bandbreiten für einen gut geeigneten Klei in einer Deichabdeckung folgende Werte (für die Kornzusammensetzung) angegeben:

- Tongehalt zwischen 20 und 40 %
- Sandgehalt zwischen 10 und 40 %

Eine bedingte Eignung besteht noch bei einem Tongehalt von mindestens 10 % und einem Sandgehalt von maximal 50 %.

In Abbildung 1 sind diese Grenzen zusammen mit einem Körnungsband für üblicherweise an der deutschen Nordseeküste anzutreffende Kleiböden dargestellt.

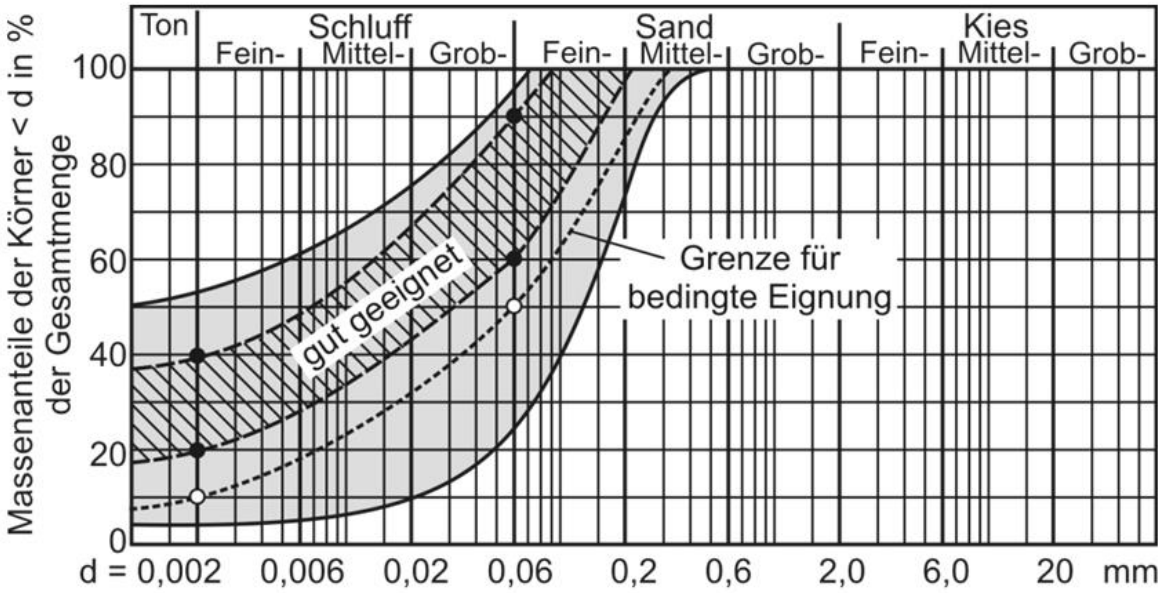

Abbildung 1: Körnungsband für Kleiböden (nach Weißmann 2003) und Eignungsgrenzen für Kleiabdeckungen gemäß EAK (2002).

Die Gefügestabilität bzw. der Erosionswiderstand ist nicht nur mit dem Tongehalt, sondern auch mit den plastischen Eigenschaften, konkret der Fließgrenze w_L und der Plastizitätszahl I_p des Bodens verknüpft. So erfährt ein ausgeprägt plastischer Boden geringere wassergehaltsabhängige Änderungen seiner Eigenschaften als ein leicht plastischer Boden. Darüber hinaus beeinflussen der Einbauwassergehalt und die Einbaudichte den Erosionswiderstand. Des Weiteren sind Anforderungen hinsichtlich der Einbaufähigkeit des Materials zu beachten. Bei einem zu hohen Einbauwassergehalt wird das Material klebrig, lässt sich nicht ausreichend verdichten und schrumpft überdies relativ stark im Zuge einer nachfolgenden Trocknung. Ein zu geringer Wassergehalt mit einer entsprechend hohen Festigkeit erschwert dagegen die Verdichtung. Günstig ist die Verarbeitung des Materials mit einem Wassergehalt an der Ausrollgrenze.

Die beschriebenen Zusammenhänge führten zu der in der EAK (2002), Empf. G 2002 angegebenen Tabelle G3, anhand der die Eignung von Kleiböden als Deichabdeckung beurteilt werden kann.

Dem gegenübergestellt werden in der niederländischen Richtlinie TAW (1996) u. a. folgende Forderungen an ein Deichabdeckmaterial aus Klei gestellt:

- Fließgrenze $w_L > 45$ % und Plastizitätszahl $I_p > 0{,}73 \cdot (w_L\text{-}20)$ sowie Sandanteil < 40 % für ein erosionsresistentes Material (Kat. 1, s. u.)
- Glühverlust $V_{gl} < 5$ %
- NaCl-Gehalt im Porenwasser <4 %
- Kalkgehalt $V_{ca} < 25$ %
- keine auffällige, leuchtende Farbe oder auffälliger Geruch (faulig, ölig, kohlig)
- Maximaler Einbauwassergehalt $w \leq w_L - 0{,}75 \cdot I_p$, d.h. Konsistenzzahl $I_c \geq 0{,}75$ (Deckzone; für die Unterschicht gilt $I_c \geq 0{,}60$)

Anforderungen an den Tongehalt werden nicht gestellt, da sie indirekt in den Grenzwerten für die Plastizitätsgrenzen enthalten sind. Für ein Abdeckmaterial mit zu hohem Ausgangswassergehalt wird vor dem Einbau eine Zwischentrocknung empfohlen.

Bezüglich der Erosionsfestigkeit ist in den Niederlanden eine Einteilung von Deichabdeckböden in drei Kategorien mit den nachfolgend genannten Kriterien verbreitet (TAW 1996):

- Kategorie 1 – erosionsresistent: Sandgehalt ≤ 40 %; $w_L \geq 45$ %; $I_p \geq 0.73 \cdot (w_L\text{-}20)$ entsprechend der Bodengruppe TA (tlw. TM) im Plastizitätsdiagramm
- Kategorie 2 – mäßig erosionsresistent: Sandgehalt ≤ 40 %; $w_L \leq 45$ %, $I_p \geq 18$ % (Bodengruppe TM)
- Kategorie 3 – geringe Erosionsresistenz: Sandgehalt ≥ 40 %, $I_p < 18$ % (Bodengruppen TL, TM und tlw. OU)

Die Grenzwerte für mäßig erosionsresistenten und erosionsresistenten Klei (Kat.1 u. 2) nach der TAW (1996) liegen in einem ähnlichen Größenbereich, wie die entsprechenden Grenzwerte für Klei der EAK 2002, Tabelle G2 und G3.

Geschiebelehm/-mergel, Schluffe und Tone

Geschiebelehme und -mergel sowie vereinzelt eiszeitliche Schluffe und Tone werden vor allem an den Ostseedeichen als Deckschichtmaterial eingesetzt. Für die Erosionsstabilität bei den relativ langen Verweilzeiten kritischer Sturmflutwasserstände sind insbesondere ein Mindest-Tongehalt, ausreichende plastische Eigenschaften und eine möglichst geringe Zerfallsgeschwindigkeit wichtig (EAK 2002, Empf. G, 3.2.2.2). Tabelle G4 der EAK (2002) enthält empfohlene Grenzwerte für Geschiebelehm und Geschiebemergel als Deichabdeckmaterial, Tabelle G5 enthält die entsprechenden Angaben für Beckensedimente.

Baggergut

Bindiges Baggergut wurde vereinzelt an einigen Deichabschnitten als Deichabdeckmaterial eingesetzt (EAK 2002, Empf. G, 3.2.3). Empfohlene Grenzwerte für bindiges Baggergut als Deichabdeckboden enthält Tabelle G5a der EAK (2002). Alternativ zur alleinigen Verwendung von Baggergut über die Dicke der Deichabdeckung bietet sich ein Einbau unter einer 30 cm mächtigen Abdeckung aus Klei an.

Grasnarbe

Die Anforderungen an die Grasnarbe sind in der Empf. G, 4.3.4 (EAK 2002) formuliert. In der Tabelle G8 sind Ansaatmischungen für die verschiedenen Deichabdeckböden wiedergegeben.

2.2 Überblick über neuere Untersuchungen

Nachfolgend wird ein kurzer (und nicht vollständiger) Überblick über wissenschaftliche Untersuchungen der letzten Jahre (d. h. insbesondere nach Erscheinen der EAK 2002) zum Thema Infiltrationsvorgänge in Seedeichen und Prozesse in der Deichabdeckung gegeben.

Im Rahmen einer Untersuchung zur Interaktion von Wellenüberlauf und den Eigenschaften von Deichabdeckböden wurden u. a. Großversuche an einem künstlichen Deich im Großen Wellenkanal (GWK) der Universitäten Hannover und Braunschweig mit unterschiedlichen Wellenüberlaufspektren und -mengen durchgeführt (Möller et. al. 2002). Bei allen drei untersuchten, verdichtet und erdfeucht eingebauten Deichböden – sandiger und toniger Klei sowie kleischlieriger Schluffsand aus dem Großraum Wilhelmshaven – war die Ausbildung tiefer Erosionsrinnen und -kolke die eigentliche Versagensursache während der ohne Grasbedeckung durchgeführten Versuche.

In der Vergangenheit konnte während einer Extremsturmflut ein Deichbruchgeschehen mit beginnender Aufweichung der Deichabdeckung nach einem Aufreißen der Kleidecke hinter der Deichkrone mit anschließendem en-bloc-Abgleiten (Blockrutschung) der Deichbinnenböschung bis hin zum teilweisen oder vollständigen Deichbruch beobachtet werden. In Versuchen im Großen Wellenkanal (GWK) konnte dies auch bei einem Test mit einer vorangegangenen Befeuchtung der „Deichoberfläche" nicht nachvollzogen werden (Schüttrumpf und Oumeraci 2002).

Weißmann und Richwien haben sich an der Universität Essen mit der Widerstandsfähigkeit von Kleideckschichten befasst (Weißmann 2003, Weißmann und Richwien 2003) und ein Bewertungsverfahren für Kleiböden als Abdeckschichten entwickelt. Hierbei wird vorgeschlagen, eine Eignungsbewertung auf Basis von vier Bodenparametern vorzunehmen:

- Die Wasserdurchlässigkeit k_f des eingebauten Kleis im kohärenten (nicht aggregierten) Zustand wird als Kennwert für Durchlässigkeit und Einbaudichte herangezogen. Je kleiner die Durchlässigkeit, desto größer ist der Bewertungsfaktor.
- Die Zerfallszeit $t_{30,V}$ wird als Maßzahl für den Erosionswiderstand sowie für ausreichende Festigkeit bei Wasserzutritt herangezogen. Der Parameter $t_{30,V}$ wird dabei aus einer eigens von Weißmann entwickelten Versuchsprozedur ermittelt. Er gibt die Zeit an, bei der eine in Wasser eingebrachte Probe mit einer anfänglichen Konsistenzzahl von Ic = 0,8 30 % ihres Gewichtes verloren hat. Eine hohe Zerfallszeit kennzeichnet ein sehr erosionsstabiles Material.
- Das Schrumpfmaß V_s wird als Maßzahl für die Schrumpfneigung und damit die Stärke der Rissbildung unter Witterungsbedingungen verwendet. Große Schrumpfmaße führen zu einem verringerten Bewertungsfaktor.
- Die Plastizitätszahl I_p wird für die Bewertung der Verarbeitbarkeit des Materials herangezogen. Je größer I_p, desto höher der von Weißmann empfohlene Bewertungsfaktor.

Das Verfahren wird in Achmus et al. (2013) – vorbehaltlich einer ergänzenden Validierung anhand von Erfahrungen – für eine ergänzende Eignungsbeurteilung von Kleiböden in Grenz- oder Zweifelsfällen als geeignet bewertet. Allerdings benutzt es ausschließlich Parameter, die an homogenen (d. h. nicht durch Witterungseinflüsse veränderten und damit gealterten) Proben bestimmt werden. Ein Ersatz des bewährten Bewertungsschemas der Empfehlungen G der EAK (2002) durch das Verfahren von Weißmann erscheint daher nicht angemessen, zumal auch die niederländischen Richtlinien (TAW 1996) ein Schema ähnlich dem der EAK (2002) enthalten.

An der Universität Essen bzw. Duisburg-Essen wurden außerdem Bemessungsverfahren für Deichdeckschichten unter Sturmfluteinwirkung entwickelt (Pohl 2010, Vavrina 2010, Richwien et al. 2010). Hierauf wird in Abschnitt 8 noch näher eingegangen. Bezüglich der Wasserdurchlässigkeit der gealterten Deckschicht wird von den genannten Forschern davon ausgegangen, dass diese in einen gerissenen oberen Bereich (Hauptrisszone) und einen annähernd ungestörten unteren Bereich unterteilt werden kann. Diese Vorstellung wird allerdings durch Ergebnisse niederländischer Untersuchungen an bindigen Deichabdeckungen nicht gestützt. Van Hoven et al. (2008) geben an, dass die Durchlässigkeit der aggregierten Deckschicht mit der Tiefe abnimmt. Sie unterscheiden dabei fünf Tiefenbereiche mit zunächst sehr lockerer Anordnung kleiner Aggregate und mit zunehmender

Tiefe engerer Anordnung und geringer werdendem Porenraum. Ein kohärentes Bodengefüge, in dem die Wasserdurchlässigkeit der des nicht gerissenen Kleibodens entspricht, ist demnach erst in Tiefen größer als 0,8 m zu erwarten.

Nach Erfahrungen von niederländischen Kollegen (Van Der Meer et. al. 2008) ist ein Abrutschen einer mit 1:3 oder flacher geneigten Deichbinnenböschung generell wenig wahrscheinlich. In der Vergangenheit war ein Abrutschen der Binnenböschung bei Neigungen von 1:1,5 oder 1:2 hingegen der Hauptversagensmechanismus für einen progressiven Deichbruch. Bei den Überlaufversuchen mit dem Wave Overtopping Simulator bei Groningen und in Zeeland traten Rutschungen jedoch nicht auf, da für die Ausbildung einer Bruchfuge ein größerer Bereich als die 4 m breite Testfläche erforderlich ist. Des Weiteren fanden die Versuche ohne vorherige Sättigung der Deichabdeckung statt, so dass die Deichabdeckung nicht aufgeweicht war und daher auch ein höheres Erosionspotential aufgewiesen haben dürfte.

Die zwischenzeitige Schlussfolgerung der Versuche an der Deichbinnenböschung ist, dass bei mit 1:3 geneigten Böschungen bis zu einer Überlaufrate von 30 l/s pro m keinerlei Erosionserscheinungen auftreten. Maßgeblich für die Widerstandsfähigkeit scheint die Grasnarbe zu sein und weniger die Qualität des Kleis. Der Einfluss von Störungen in der Grasnarbe, wie Einbauten oder Trampelpfade, soll zukünftig untersucht werden.

In den Niederlanden wird die Qualität der Grasnarbe nach den Gesichtspunkten Art der Bewirtschaftung (Mähen oder Weiden mit oder ohne Düngung), Vegetationszusammensetzung (Grassorten) und Durchwurzelung (Anzahl Wurzeln in einem definierten Probevolumen) bewertet. Die Qualität wird also im Wesentlichen erfahrungsbasiert bestimmt.

Vavrina (2010) hat ein Verfahren zur Bewertung der Qualität der Grasnarbe vorgeschlagen, in das verschiedene Messgrößen eingehen und mittels vorgeschlagener Bewertungsfunktionen gewichtet werden. Im Wesentlichen werden der Bedeckungsgrad (d. h. die Geschlossenheit des Bewuchses), die Durchwurzelungsintensität und das Verhältnis der Festigkeit des durchwurzelten und des nicht durchwurzelten Bodens berücksichtigt. Das entwickelte Verfahren bedarf noch einer Validierung anhand von Erfahrungswerten.

Ein Überblick über den Wissensstand zum Thema Böschungserosion wurde im Floodsite-Projekt erarbeitet (Collell 2009). Auf weitere im Rahmen des Floodsite-Projekts durchgeführte Untersuchungen und entsprechende Veröffentlichungen sei hier in allgemeiner Form verwiesen (www.floodsite.net).

Untersuchungen zur Verwendung von bindigem Baggergut mit oder ohne die Verwendung von Geotextilien wurden beim Dredgdike-Projekt (Saathoff et al. 2014, Saathoff und Cantré 2016) durchgeführt. Hierbei wurden großmaßstäbliche Deichquerschnitte eingestaut und überströmt. Ein instationärer Wellenauf und -überlauf wurde jedoch nicht simuliert. Geeignete Grasmischungen wurden auf das verwendete Baggergut abgestimmt. In den Überlaufversuchen bewiesen die Deichquerschnitte ein hohes Erosionspotential. Aufgrund der Projektlaufzeit repräsentieren die Ergebnisse ein frisches Deichbaumaterial, das noch keine Strukturbildung erfahren hat.

Der Verwendung von behandeltem Baggergut (METHA-Material) im Deichbau widmen sich Untersuchungen von Gebert et al. (2014). Das Hauptaugenmerkt der Untersuchungen liegt auf möglichen Schadstoffausträgen.

In den Niederlanden wurden seit dem Jahr 2000 fünf Versuche an bestehenden bzw. eigens hierfür errichteten Deichen, d. h. im Naturmaßstab, ausgeführt (Zwanenburg 2016).

Die Versuche dienen u. a.:

- der Herleitung und Überprüfung von Modellansätzen für den Nachweis gegen Auftrieb und Piping bei Deichen,
- der Ermittlung robuster Messtechnik, um ein Deichversagen frühzeitig erkennen zu können und
- der zutreffenden Bestimmung von lokal vorliegenden Bodeneigenschaften: Tragfähigkeitsverhalten von Torf.

3 Einflussgrößen auf die Deichsicherheit und deren Zustandsermittlung

3.1 Einflussgrößen auf die Deichsicherheit

Im vorherigen Kapitel wurde erläutert, unter welchen Kriterien und mit welchen geeigneten Materialien moderne See- und Ästuardeiche im Bereich der Nordsee errichtet werden. Untergeordnet wurde auch auf Ostseedeiche eingegangen.

Grundprinzip eines funktionalen Deiches ist eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegenüber den Einwirkungen. Die maßgeblichen Einwirkungen ergeben sich aus den hydraulischen Größen Wasserstand, Wellen und Strömung, deren Größenordnungen von diversen physikalischen Randbedingungen abhängig sind (EAK 2002, Empf. A). Des Weiteren können Starkregenfälle und Eisgang die Deichsicherheit beeinflussen. Auf der Widerstandsseite spielen die Deichkubatur, die Grasnarbe und die geotechnischen Eigenschaften des Deiches sowie der anstehende Baugrund an der Deichbasis die dominierende Rolle.

3.1.1 Einwirkungen

Quasi-stationäre hydraulische Belastung: Lang anhaltende hohe Außenwasserstände führen zu einer Aufweichung sowie einer Durchsickerung der Deichabdeckung. Letzteres kann zu einem Sickerwasseraufstau im nichtbindigen Deichkern und einem lokalen Aufbruch der Binnenböschung führen. Die Verweilzeiten hoher Wasserstände sind an der Ostsee von höherer Relevanz als an der Nordsee. Unter Anbetracht des säkularen Meeresspiegelanstiegs gewinnt diese Thematik jedoch auch für die Deiche an der Nordsee an Bedeutung.

Instationäre hydrodynamische Belastung: Druckschläge sowie auf- und überlaufendes Wasser können zu einer Erosion der Grasnarbe und der Deichabdeckung führen. Des Weiteren infiltriert das auf- und überlaufende Wasser in die bindige Deichabdeckung und weicht diese zudem auf. Diese Belastungsart war für die meisten Deichschäden der großen Sturmfluten der Jahre 1953, 1962 und 1976 ausschlaggebend.

Starkregenfälle: Starke Regenfälle weichen die Deichabdeckung auf und können zu einem hangparallelen Abrutschen der Deichabdeckung führen. Ein Deichbruch infolge von Starkregenfällen ist nicht zu erwarten, die Widerstandsfähigkeit wird jedoch deutlich reduziert. Dies kann insbesondere bei einer Überlagerung mit einem nachfolgenden Sturmflutereignis kritisch werden.

Eisbelastung: Eis kann bei Eisdrift zu einem Aufschlitzen des Deiches führen und auf diese Weise den Deich schädigen. Ein Deichbruch infolge Eisbelastung ist bei See- und Ästuardeichen nicht zu erwarten, die Widerstandsfähigkeit wird jedoch deutlich reduziert. Dies

kann insbesondere bei einer Überlagerung mit einem nachfolgenden Sturmflutereignis kritisch werden.

3.1.2 Deichwiderstand

Die Deichgeometrie hat einen unmittelbaren Einfluss auf die hydraulischen Belastungsgrößen am Deich und bestimmt ferner dessen geotechnische Standsicherheit. Geringe Deichneigungen reduzieren hydraulische Belastungen durch Wellenumformungen auf der seeseitigen Böschung. Eine ausreichende Kronenhöhe reduziert ferner die Gefahr des Wellenüberlaufs. Belastungsreduzierende Wirkung hat auch die Topographie des Deichvorlands aufgrund des wellenreduzierenden Einflusses. Geringe Böschungsneigungen erhöhen generell die Deichstandsicherheit, was jedoch mit einem vermehrten Flächenverbrauch einhergeht und zu erhöhten Belastungen des unterlagernden Bodens führt.

Als erstes widerstehendes Element am Deich wirkt die Grasnarbe. Eine gute Durchwurzelung der obersten Bereiche der Deichabdeckung führt, wie eine Bewehrung, zu einer erhöhten Scherfestigkeit, dämpft den Wellenangriff sowie die Erosion. Eine gut ausgebildete Grasnarbe bildet sich insbesondere auf nährstoffarmen Böden. Durch eine geeignete Wahl der Ansaat von Gras und Kräutern bzw. durch die Einarbeitung von Heu in die oberen Bereiche der Deichabdeckung kann eine Artenvielfalt mit unterschiedlichen Wurzelungstiefen erreicht werden (EAK 2002, Empf. G, Abschnitt 4.3.4; TAW 1999). Hohe Sulfidanteile im bindigen Deichbaumaterial führen durch Oxidation (H_2SO_4-Bildung) zur Versauerung und können bei niedrigem pH-Wert den Graswuchs erheblich behindern.

Die geforderten geotechnischen Eigenschaften einer bindigen Deichabdeckung, um einen ausreichenden Widerstand zu gewährleisten, sind im vorherigen Abschnitt 2 benannt. Neben einem geeigneten Deichbaumaterial ist hierbei ein ordnungsgemäßer Einbau entscheidend (EAK 2002, Empf. B, Abschnitt 3). Die geotechnischen Nachweise – auch für die nachstehenden Aspekte – sind in der EAK 2002, Empf. B, Abschnitt 4 bis 9 aufgeführt.

Der Herstellungsprozess des sandigen Deichkerns und dessen geohydraulischer Kontakt zum unterlagernden Boden haben Auswirkungen auf geohydraulische und bodenmechanische Prozesse. Bei aufgespülten Sandkernen und gering durchlässigen Bodenschichten an der Deichbasis besteht die Gefahr, dass Spülwasser im Deichkern verblieben ist. Bei hohen Wasserständen im Deichkern kann es dadurch zu einem lokalen Aufbruch der binnenseitigen Böschung und Ausfließen des Wassers kommen. Bei trocken eingebauten Sandkernen führen erstmalige Wassersättigungen zu Sackungen um bis zu 10 % der Schichtmächtigkeit. In diesem Fall können die Infiltrationspfade, die zur Sättigung führen, durch meteorologische Verhältnisse bedingt sein, d. h. Durchsickerung der Deichabdeckung, oder durch geohydraulische Kontakte zu nichtbindigen Schichten im Untergrund, d. h. tidebedingte Grundwasserpotentiale führen zu einem Ein-/Aufstau im Deichkern.

Der anstehende Baugrund im Bereich der Deichbasis hat weitere Auswirkungen. In Abhängigkeit des Außenwasserstandes und bei unterlagerndem nichtbindigem Boden können sich lokale Erosionsrinnen im Deichuntergrund bilden (Piping), die zu einer rückschreitenden Erosion im Untergrund und einem Deichbruch führen können. Zudem bestimmen die geotechnischen Eigenschaften des Baugrunds die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Deiches. Mittels erdstatischer Berechnungen sind die üblichen

Nachweise, wie Grundbruch und Böschungsbruch, zu führen. Weiche bindige Bodenschichten führen zu lang anhaltenden Deichsetzungen, wodurch die geplante Kronenhöhe langfristig abgesenkt wird (EAK 2002, Empf. B, Abschnitt 4 bis 9).

In Deichen sind mitunter Einbauten vorhanden, wie Treppen, Zäune, Bänke, Rohrleitungen. Im Nahbereich dieser Einbauten ist die Grasnarbe häufig geschwächt. Bei hydraulischen Einwirkungen kann es in diesen Bereichen zu einer deutlichen Kolkbildung und Fugenerosion kommen, wodurch die Infiltration und Erosion der Deichoberfläche begünstigt und der Deich geschwächt wird.

Eine fachgerechte Unterhaltung des Deiches gewährleistet, dass Treibgut zeitnah entfernt wird, um die Grasnarbe und die Deichabdeckung nicht negativ zu beeinträchtigen, dass Unkraut entfernt wird und Wühlgänge, die im Sturmflutfall einen unmittelbaren hydraulischen Kontakt mit den Außenwasserständen bis weit in den Deich hinein ermöglichen, zerstört werden.

3.2 Zustandsermittlung der Deichwiderstände

Zur Evaluierung der genannten kennzeichnenden Deichwiderstände bedarf es der Auswertung vorhandener Bestandsunterlagen, deren Abgleich mit dem tatsächlich hergestellten Bauwerk und der ggf. daraus ableitbaren Erfordernis zur Durchführung ergänzender Feld- und Laboruntersuchungen. Nachfolgende Auflistungen sollen eine Unterstützung zur zutreffenden Zustandsermittlung geben:

Deich: Bautyp und Geometrie

- massiver „homogener“ Deich
- Deich mit Sandkern und bindiger Abdeckung aus Klei, Geschiebeboden oder Baggergut
- Deich mit Kern aus Füllboden und bindiger Abdeckung
- see-/binnenseitige Kleikeile
- Ausdehnung: Höhen, Neigungen

Deichvorland

- scharliegender Deich
- Vorlandausdehnung und Bewuchs
- Deckwerk (Lage, Steinklasse, Bauart)
- Buhnen/Lahnungen

Deichabdeckung: Stärke und Material

- unbekannt
- Außenböschung/Krone/Binnenböschung (Sollmaße gem. Entwurf vs. Messwerte aus Aufschlüssen)
- Angabe der Bodenarten
- Eignung gemäß Tabelle G2G5a (EAK 2002)
- Besonderheiten (Sandnester, Gleitfugen, …)
- Zustand der Grasnarbe

Deichkern: Material, Dränagen und Wasserstand

- Material unbekannt

- Angabe der Bodenarten und Durchlässigkeiten
- Dränage unbekannt
- Dränage am Innendeichfuß
- Längs-/Querfilter an der Basis des Sandkerns vorhanden
- Rigole am Deichverteidigungsweg
- Innendeichgraben
- Foliendichtung am Sandkern
- Spüldeich aus bindigem Material
- Wasserstand

Scharliegende Deiche: Außendeichfuß

- durchlässiges, offenes Deckwerk (Steinklasse, Bauart)
- undurchlässiges Deckwerk (Steinklasse, Bauart)

Deichuntergrund

- unbekannt
- durchlässig (Sand)
- gering durchlässig
- setzungsempfindlich
- Schichtmächtigkeit/Schichtung (bis in Tiefen > 10 m)
- Grundwasserstand

Sonderbauwerke

- Deichmauern/Hochwasserschutzwände
- Übergänge
- Durchlässe
- Spülrohrleitungen
- Siele
- Deichscharte
- Sonstige Einbauten

Besondere Beobachtungen: diese liefern einen Hinweis auf kritische Zustände und sollten vorrangig untersucht bzw. die Bereiche vorrangig unterhalten werden

- Sickerwasseraustritt Lage (von Küsten-km … bis Küsten-k ….; Lage)
- Sickerwasseraustritt dauernd, vorübergehend, kurzzeitig
- Setzungen
- Trampelpfade
- Wühlgänge
- Sonstige Beobachtungen

In Temmler (2007) sind exemplarisch für zwei untersuchte Deichaufschlüsse in Schleswig-Holstein auszugsweise Angaben in Form eines „Deichkatasters für Infiltrationsvorgänge“ angegeben. Diese sind als Vorlage zu empfehlen. Die Ermittlung und Validierung der o. g. Angaben sollten mittels geotechnischer Feld- und Laboruntersuchungen nach EAK 2002, Empf. B, Abschnitt 2 erfolgen. Hierbei sollte auf eine ausreichende Probenqualität geachtet werden (Eurocode 7, DIN EN 1997-2:2010-10, Tabelle 3.1).

4 Entwicklung von Deichschäden

4.1 Grundlagen

In Fällen, bei denen die Einwirkungen größer sind als die Widerstände kommt es zu Schädigungen. Bei See- und Ästuardeichen bedeutet dies, dass die hydraulischen Einwirkungen zu einer Deichschädigung und somit einer Verringerung der Deichsicherheit führen. Bei fortschreitenden Prozessen kann dies zum Deichversagen führen. Die Einflussgrößen und die Anforderungen wurden in den vorherigen Abschnitten 2 und 3 beleuchtet. In diesem Abschnitt sollen die Entwicklungsstufen von Deichschäden bis hin zu Deichbrüchen für die unterschiedlichen Einwirkungsgrößen dargelegt werden.

Eine Beschreibung der wesentlichen Ursachen von Deichschäden basiert überwiegend auf Dokumentationen eingetretener Deichschäden und Deichbrüche, d. h. auf Erfahrungen früherer Sturmfluten von 1962 und 1976 (Die Küste, 1 und 2, 1962, Die Küste, 1979). Dies bedeutet aber auch, dass das verwendete Dokumentationsmaterial relativ alt ist, die damaligen Deichgeometrien nicht mit modernen Seedeichprofilen übereinstimmen und auch die Aussagen von Zeitzeugen nach meist mehreren Jahrzehnten verklärt sind. Hinzu kommt, dass es nur unter Lebensgefahr möglich ist, sich einem brechenden Deich zu nähern und somit Nahaufnahmen des Versagenszustandes nahezu unmöglich sind. Nach Deichbrüchen fand selten eine detaillierte Untersuchung der Ursachen statt, sondern der Wiederaufbau des zerstörten Deiches stand im Vordergrund. Diese Gründe führen dazu, dass eine ganzheitliche Beschreibung der Versagensmechanismen einem Puzzlespiel gleicht.

Die Ursachen und Versagensformen von Deichschäden sind zudem vielfältig und in ihrer komplexen Wechselwirkung häufig nicht zu trennen. Deichschäden entstehen selten als Ergebnis einer einzigen Belastungsart und einer Schadensursache. Bei den meisten Schadensfällen trifft die maßgebende Belastung (z. B. Sturmflutereignis) auf einen geschwächten Deich mit reduzierter Belastbarkeit. Der Deich kann somit der Belastung nicht den Widerstand entgegensetzen, der im Entwurf vorausgesetzt wurde. Auch eine Bemessung hilft hier nur unzureichend weiter, da der Einfluss einer Vorschädigung bzw. das Aufeinandertreffen verschiedener Belastungsarten und Schadensursachen mit großen Unsicherheiten verbunden ist, die nur mit Schwierigkeiten quantifizierbar sind. Ein weiteres Problem der Beschreibung der Prozesse von Deichschäden und Deichbrüchen besteht in der Übertragbarkeit der ermittelten Vorgänge auf moderne Seedeiche. Insbesondere die Versagensformen infolge Druckschlagwirkung, Wellenauflauf und Wellenüberlauf wurden auf der Grundlage alter Seedeiche mit steilen Böschungsneigungen, niedrigen Kronenhöhen und mitunter wenig geeigneten Deichbaustoffen sowie einem damals noch nicht ausgeprägten Verständnis für die Wirkung weiterer Schadensursachen ermittelt. Eine qualitative Beschreibung der Versagensformen für moderne Seedeiche ist nur eingeschränkt möglich. Daher sind nach wie vor entsprechende Forschungsarbeiten erforderlich, um das Versagen von modernen Seedeichen von der Initiation eines Deichschadens bis zum Deichbruch nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ zu beschreiben.

Trotz dieser Einschränkungen ist es möglich, die grundlegenden Prozesse von der Entstehung eines Deichschadens bis hin zum Deichbruch aufzuzeigen. Diese Beschreibung stellt eine wesentliche Grundlage für die Herleitung der analytischen Grenzzustandsgleichungen aus Einwirkung und Widerstand dar. Im Folgenden sollen die wesentlichen Ursachen von Deichschäden und die Entwicklung dieser beschrieben werden.

4.2 Entwicklung von Deichschäden und Deichbrüchen

4.2.1 Deichschäden durch quasi-stationäre hydraulische Einwirkungen

Deichschäden und Deichbrüche infolge quasi-hydrostatischer Belastung können infolge langanhaltender Außenwasserstände bzw. hoher Grundwasserstände im Deichkern auftreten. Die möglichen Ursachen für ein Deichversagen lassen sich auf Transportprozesse im Boden infolge einer Unterströmung und Durchsickerung des Deiches zurückführen sowie auf das Aufweichen der Deichabdeckung.

Hinsichtlich der Transportprozesse im Boden wird auf das MMB (2013) verwiesen, in dem die Grundlagen des Materialtransports für Suffosion und Erosion sowie die Nachweisformate dargelegt sind. Für See- und Ästuardeiche sind für quasi-hydrostatische Einwirkungen insbesondere die Fugenerosion an der Grenzfläche zwischen Bauteilen und Boden sowie die innere Erosion (Piping) unterhalb des Deiches von Bedeutung. Das Piping ist derzeit Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen.

Bei einer großen Ungleichförmigkeit nicht bindiger Böden bzw. eines signifikanten Korngrößenunterschieds benachbarter Böden besteht zudem die Gefahr der Suffosion und Kontakterosion.

Die Auswirkungen einer Unterströmung und Durchsickerung des Deiches sowie einer Aufweichung der Deichabdeckung sind durch die Nachweise nach EAK 2002, Empf. B, Abschnitt 6 bzw. den Angaben in Abschnitt 8 dieser Empfehlungen zu berücksichtigen. Dies sind insbesondere die Nachweise gegen Böschungsbruch, hangparalleles Gleiten, Auftrieb und hydraulischen Grundbruch.

Ergänzende Informationen für quasi-stationäre Einwirkungen finden sich auch im Merkblatt für Flussdeiche DWA-M 507-1 (2011) sowie in der DIN 19712 (2013). Hierbei sind die Unterschiede in der Deichausbildung sowie der anstehenden Böden bei der Übertragbarkeit der Aussagen auf See- und Ästuardeiche zu berücksichtigen.

4.2.2 Deichschäden durch instationäre hydrodynamische Einwirkungen

Der Entwicklungsverlauf von Deichschäden bei instationärer hydrodynamischer Belastung wurde im Wesentlichen auf der Grundlage von Berichten und Dokumentationen der großen Sturmfluten in den Jahren 1962 und 1976 hergeleitet. Dabei wird unterschieden in Schäden an der Deichaußenböschung, an der Deichkrone und der Deichbinnenböschung sowie in Deichbrüche. Letztere können sowohl infolge einer Schädigung der Deichaußenböschung als auch der Deichbinnenböschung auftreten. Initiiert werden Deichschäden durch die Wellenbelastung des auf- und überlaufenden Wassers, das zu einer (äußeren) Erosion und Infiltration der Deichböschung sowie Aufweichen der Deichabdeckung führt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die heutigen modernen See- und Ästuardeiche flachere Böschungsneigungen besitzen und daher der Wellenangriff reduziert sowie die geotechnische Standsicherheit erhöht sind.

Die Erosion wirkt zuerst an der Grasnarbe und im fortgeschrittenen Stadium auch am bindigen Material der Deichabdeckung. Durch die Infiltration steigt der Wassergehalt in der Deichabdeckung an und die Scherfestigkeit wird herabgesetzt. Bei gut durchwurzelten Böschungen ist der Einfluss der Erosion niedriger als der Einfluss der Infiltration (Temmler und Filipinski 1997, van der Meer et. al. 2008).

Die folgende Klassifikation beschreibt die Entwicklung eines Deichschadens von der Erosion der Deichoberfläche bis zum Deichbruch:

Schäden an der Deichaußenböschung:

(i) Rasenabschälen: Durch die Erosionskraft des auf- und ablaufenden Wassers wird die Grasdecke ausgewaschen und der Deich bekommt ein pockennarbiges Aussehen. Bei extremer Seegangsbelastung kann dies zu einer flächenhaften Erosion der bindigen Deichabdeckung führen.
(ii) Ausschläge: Durch die brechenden Wellen werden Brocken aus den Grassoden gelöst. Bei weiterer Wellenbelastung führt dies zu einem Herausssprengen von Teilen der Grassode aus der Deichaußenböschung. Es entstehen Ausschläge.
(iii) Ausschläge mit Kliffbildung: Bei weiterer Belastung der geschädigten Außenböschung schreitet die Auskolkung rückwärts vor und nimmt mit der Tiefe zu. Dadurch kommt es zur Ausbildung von Kolken mit horizontaler Sohle (Abrasionsfläche) und einer vertikalen Kliffkante (Abbildung 2). Die Kliffkante kann bis zu 3,0 m Höhe erreichen (Zitscher 1962)

Abbildung 2: Deichaußenböschung mit Kliffbildung (Zitscher 1962).

Schäden an der Deichbinnenböschung:

(i) Rasenabschälen: Durch die Erosionskraft des überlaufenden Wassers wird die Grasdecke ausgewaschen und der Deich bekommt ein pockennarbiges Aussehen.
(ii) Rasenabsetzen: Die Grasdecke löst sich mit der Wurzelschicht von der Krone und der bindigen Deckschicht ab, so dass an der Krone ein Abriss in Form von Längsrissen entsteht (Abbildung 3).
(iii) En-bloc-Rutschungen: Die inzwischen stark aufgeweichte Grasdecke rutscht auf der bindigen Abdeckschicht (oder einer anderen Gleitschicht) ab (Abbildung 4). Die Grasdecke rutscht auf den Deichbinnenfuß, wodurch es zu Wulstbildungen am Deichfuß kommt.

Abbildung 3: Deichbinnenböschung mit Rasenabsetzungen (Temmler und Filipinksi 1997).

Abbildung 4: Deichbinnenböschung mit en-bloc-Rutschungen (Zitscher 1962).

Deichbrüche:

(i) Teilbrüche: Beim durch Kappenstürze infolge Überströmung entstandenen Teilbruch ist die Krone vollständig zerstört (Abbildung 5). Der Deichfuß bleibt jedoch erhalten. Auf der Binnenseite entstehen Wehle.

(ii) Totalbruch: Beim Totalbruch, der als Fortschreibung eines Teilbruchs entsteht, wird der gesamte Deichquerschnitt zerstört und der verursachte Kolk reicht bis ins Deichvorland.

Abbildung 5: Teildeichbruch (Zitscher 1962).

4.2.3 Deichschäden durch Starkniederschläge

Starkregenfälle und Eisbelastung können zwar zu einem signifikanten Deichschaden führen, jedoch nicht zu einem Deichversagen mit Überflutung. Bedeutung haben Schäden infolge Starkregenfällen und Eisbelastung, wenn diese nicht bis zur nächsten Sturmflut beseitigt werden können und somit als Vorschädigung des Deiches zu berücksichtigen sind.

Starkregenereignisse und lang andauernde Landregen führen zu bodenmechanischen Veränderungen in der Deichabdeckung (Klinge 1962, Temmler und Filipinski 1997). Die Deichabdeckung weicht auf und die Scherfestigkeit wird herabgesetzt. Aufweichungen und auch Infiltrationsprozesse treten insbesondere an der Deichkrone und der oberen Böschungsschulter auf. Diese Bereiche sind besonders der Austrocknung durch Sonne und Wind ausgesetzt, wodurch die dort befindliche Deichabdeckung eine stärkere Rissbildung aufweist. Bei einem Wellenüberlauf wird dieser sensitive Bereich maßgeblich beansprucht und muss einen ausreichenden Widerstand aufweisen.

Bei „schwarzen Deichen“, die sich noch im Bau befinden und keine ausgebildete Grasnarbe aufweisen, können Erosionsrinnen resultieren. Ein frisch aufgefüllter bindiger Abdeckboden von ausreichender bis guter Kleiqualität gemäß EAK 2002, Tabelle G 3 übersteht auch ohne schützende Grasnarbe einen regenreichen Winter ohne nennenswerte Schäden. Hierbei bilden sich cm-tiefe Rillen im Abstand von etwa 15–20 cm aus, die sich vor der Grasaussaat problemlos einplanieren lassen. Bei weniger gut geeigneten Abdeckboden-Qualitäten kommt es auch während einer einjährigen Bauzeit gelegentlich zur Ausbildung zahlreicher, bis über 25 cm tiefer Erosionsrinnen in Abständen zwischen 1,0 und 1,5 m auf der Deichaußenböschung sowie etwas flacherer, engständiger auftretender Rinnen in der steileren Deichbinnenböschung. Deren Einebnung erfordert einen größeren technischen Aufwand.

Bei älteren Deichen wurden oberflächennahe Böschungsrutschungen und Böschungsfließen der 1:2 oder steiler geneigten Binnenböschung beobachtet. Hierbei ergaben sich mehrere Meter lange Geländeabrisse und Rasenversatze/Höhendifferenzen von 10–15 cm

unterhalb der Innenkante der Deichkrone (Temmler 2007). Bei modernen See- und Ästuardeichen, mit 1:3 geneigten Binnenböschungen, wurden bisher keine Rutschungs- oder Gleitvorgänge (Rasenversatz) beobachtet.

4.2.4 Deichschäden durch Eisbelastung

Deichschädigungen können eintreten, wenn Eisplatten mit der Strömung am Deich längs gezogen werden (Eisdrift). Das strömende Eis schneidet die Grasnarbe und Deichabdeckung auf und führt zu deren Störung. Daher sollte die Oberkante eines Fußdeckwerks möglichst so hoch liegen, dass das Deckwerk einen Widerstand gegenüber der Eisbelastung aufbringt. In der EAK 2002 wird eine Deckwerksausbildung bis 1,5 m über MThw empfohlen (Empf. G 2002, Abbildung G3).

Die sogenannten Eisschub-Berge, die durch eine küstennormale Drift des Eises entstehen, beanspruchen die Deichabdeckung durch Oberflächenerosion. Die Deichoberfläche wird „wundgerieben" und leistet einen verringerten Widerstand bei nachfolgenden Sturmfluten. In der Vergangenheit finden sich viele Eisfluten (z. B. 1625, 1718, 1757, 1789, 1940, 1947) (Petersen und Rohde 1991), die zwar niedrige Sturmflutscheitelhöhen hatten, jedoch auf einen vorgeschädigten Deich trafen und diesen gelegentlich brechen ließen.

Abbildung 6: Zerstörung der Grasnarbe an der Deichaußenböschung durch Eisdrift.

Eisstau tritt im Wesentlichen in Ästuaren (und Flüssen) auf, wenn Eismassen sich verkeilen und den Oberwasserabfluss blockieren. Dadurch kommt es zu einem lokalen Hochwasser mit der Gefahr, dass entweder die Deiche aufgrund der quasi-stationären Einwirkung brechen, bzw. dass bei plötzlichem Aufbrechen der Eisbarriere eine Hochwasserwelle flussab läuft. Einem Eisstau wird üblicherweise durch Eisbrecher entgegengewirkt. Ein dokumentierter Deichbruch infolge Eisstaus besteht für Kirchwerder-Hove im Jahr 1861 (Rödenbeek 1976).

Eisschub und Eisdrift finden bislang keine Berücksichtigung in der Bemessung von Ästuardeichen. Diesen Einwirkungen wird konstruktiv durch eine Deckwerksausbildung

begegnet. Hierbei ist zu beachten, dass lose Wasserbausteine durch die Eisbewegungen verlagert werden können und ein loses Deckwerk daher nachgearbeitet werden muss. Ergänzende Informationen zur Bemessung auf Eisbelastung finden sich in Carstensen (2008).

5 Merkmale von Deichabdeckböden

5.1 Zusammensetzung und Bodengefüge von Abdeckböden

5.1.1 Gefüge bindiger Böden

Das Bodengefüge bezeichnet die Anordnung der festen Bodenteilchen bzw. die Verteilung des Porenraums in einem Boden. Für bindige Böden ist hier zwischen dem Kohärentgefüge, bei dem die Bodenteilchen eine durch Kohäsion allseitig zusammengehaltene ungegliederte Masse formen und entsprechend auch die Poren relativ gleichmäßig verteilt sind, und dem z. B. durch Witterungseinwirkungen entstehenden Aggregatgefüge zu unterscheiden. Das Kohärentgefüge ist bei oberflächennahen Schichten in der Regel nicht von Dauer, sondern wandelt sich unter Witterungseinfluss oder infolge biologischer Vorgänge in verschiedene Formen des Aggregatgefüges.

Die bei Deichabdeckböden am häufigsten anzutreffenden Aggregatgefüge sind (siehe auch Abbildung 7):

- Rissgefüge: Es entsteht als Absonderungsgefüge aus einem Kohärentgefüge durch Trocknungs- und Schrumpfungsvorgänge unter Bildung von groben, prismenförmigen Gefügeelementen. Wegen der beständigen Restschrumpfung bleiben sie auch nach erneuter Vernässung und Quellung bestehen. Charakteristisch ist dies für gealterte Deichabdeckungen aus ursprünglich weichem tonigem Klei.
- Krümelgefüge: es besteht als biogenes Aufbaugefüge aus mehr oder weniger rundlichen Aggregaten zusammengeballter Bodenteilchen mit sehr rauer Oberfläche. Porosität und Stabilität der Krümel können sehr unterschiedlich sein. Typisch ist dies für die durchwurzelte stark humose Deckschicht.
- Subpolyedergefüge: Es besteht aus Aggregaten mit stumpfen Kanten und etwa gleichen Achsenlängen, die durch mehrere unregelmäßige, meist raue Flächen begrenzt sind. Die Aggregate sind überwiegend porös. Charakteristisch für Deichabdeckungen aus sandigem Klei.
- Polyedergefüge: Es besteht aus unterschiedlich porösen Aggregaten, die durch mehrere unregelmäßige Flächen begrenzt sind und überwiegend scharfe Kanten und etwa gleiche Achsenlängen besitzen. Charakteristisch für gealterte Deichabdeckungen aus ursprünglich weichem tonigem Klei.
- Prismengefüge: Es besteht aus prismenartigen, senkrecht im Boden stehenden Aggregaten mit einer langen, senkrechten Achse und kürzerer Querachse. Die Aggregate werden in der Regel von 5 oder 6 Seitenflächen begrenzt, auf denen oft Tonhäutchen ausgebildet sind. Die Prismen können weiter in Polyeder aufgeteilt sein. Unterhalb der humosen Deckschicht in Deichabdeckungen aus tonreichem, in sehr weichem Zustand eingebautem Klei ist das Prismengefüge verbreitet.

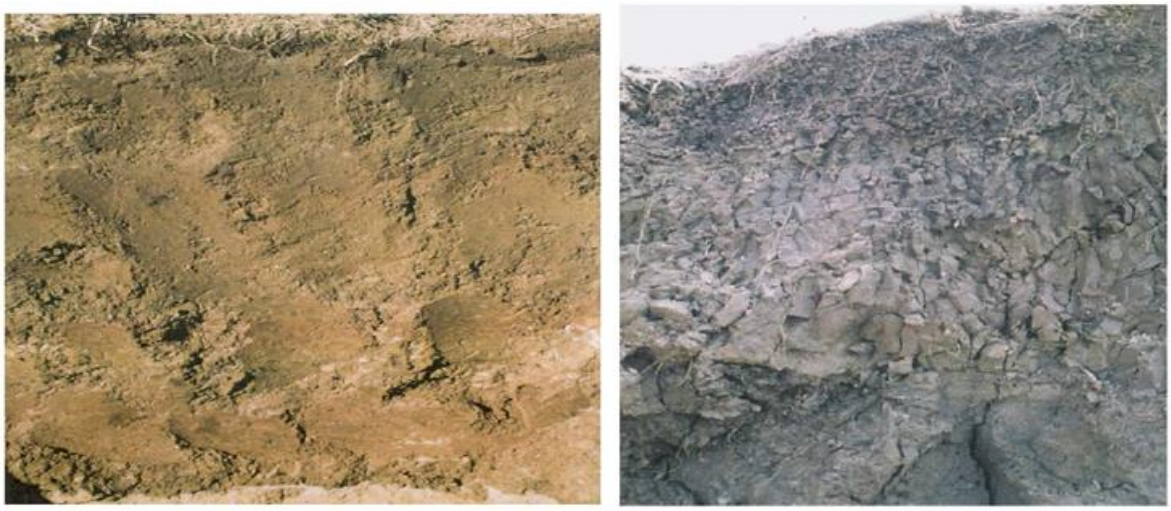

Abbildung 7: Beispiele für Bodengefüge von Deichabdeckböden: Subpolyeder- und Kohärentgefüge (links); Polyedergefüge über Prismengefüge (rechts).

5.1.2 Eigenschaften aggregierter Deichabdeckböden

Gemäß der visuellen Bewertung und der geotechnischen Klassifizierung lassen sich Deichabdeckböden in folgende drei Bodentypen unterteilen:

- Bodentyp 1: sandiger Klei (kornanalytisch = Schluff, tonig, sandig bis stark sandig), häufig mit schlieriger Schichtung, von 10 cm bis max. 25 cm unter GOK erdig-bröckelig (Krümelgefüge), örtlich mit Wühlgängen, tiefer im Wesentlichen Subpolyedergefüge; im Tiefenbereich zwischen 40 und 60 cm unter der Deichkrone bereichsweise stark verdichtet ggf. untergliedert in die Teilgruppen:
  Typ 1a: Schluff, feinsandig, tonig, mittelplastisch (Bodengruppe TM, bei höherem Anteil organischer Beimengungen auch OU bis OT)
  Typ 1b: Schluff, stark feinsandig, schwach tonig, schwach plastisch (Bodengruppe TL)
- Bodentyp 2: toniger Klei (kornanalytisch = Schluff + Ton, schwach feinsandig bis feinsandig), oben krümelig bis bröckelig, tiefer bröckelig-rissig mit ausgeprägtem Polyeder- oder Rissgefüge, häufig mit Wühlgängen, unten Kohärentgefüge mit einzelnen, bis zum unterlagernden sandigen Deichkern durchschlagenden Trockenrissen, Bodengruppe TA (tlw. TM)
- Bodentyp 3: Schluffsand (kornanalytisch = Schluff + Feinsand, schwach tonig), oben krümelig, häufig Gänge von Bodenwühlern, tiefer Einzelkorngefüge mit Wurmröhren, örtlich stark verdichtet, Bodengruppen ST, UL, SU*

Beim Bodentyp 1 sind bereichsweise bis zu metergroße, dm-starke Schlieren aus Schluffsand bzw. tonreichem Klei mit Einzelkorn- bzw. dem Austrocknungsgrad entsprechendem Polyeder- oder Prismengefüge zu erwarten. Der Schluffsand enthält nicht selten Brocken aus schluffigem oder tonigem Klei (Temmler 2007).

Vereinzelte Aufgrabungen sowie Feststellungen nach schweren Sturmfluten an partiell abgetragenen schleswig-holsteinischen Ostseedeichen ergaben zumeist einen sehr inhomogenen Bodenaufbau aus Geschiebelehm und -mergel mit teilweise großen und unregelmäßigen Hohlräumen über die gesamte Aufschlusstiefe. Der Deichkörper kann örtlich dm-

bis m-starke Schlieren aus Sanden wechselnder Körnung mit unterschiedlichen Schluffanteilen enthalten.

Untersuchungen zeigten nicht nur zwischen den einzelnen Deichstandorten beträchtliche Unterschiede in den geotechnischen Eigenschafen, sondern örtlich auch im Bereich eines einzelnen Schurfes (mit Abmessungen von ca. l/b/t ≈ 2,5/1,0/1,0 m) selbst.

Temmler (2006) hat Durchlässigkeitsversuche an Bodenproben aus gealterten Deichdeckschichten durchgeführt. In Abbildung 8 sind die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte einmal abhängig vom jeweiligen Wassergehalt an der Fließgrenze w_L der Probe und einmal abhängig von der Entnahmetiefe der Probe dargestellt. Starke Streuungen in den Wasserdurchlässigkeitswerten sind festzustellen, wobei keine signifikanten Abhängigkeiten von der Fließgrenze oder von der Probentiefe festzustellen waren. Dies ist auf Heterogenitäten sowie auf variierende Strukturbildungsprozesse in der Deichabdeckung zurückzuführen.

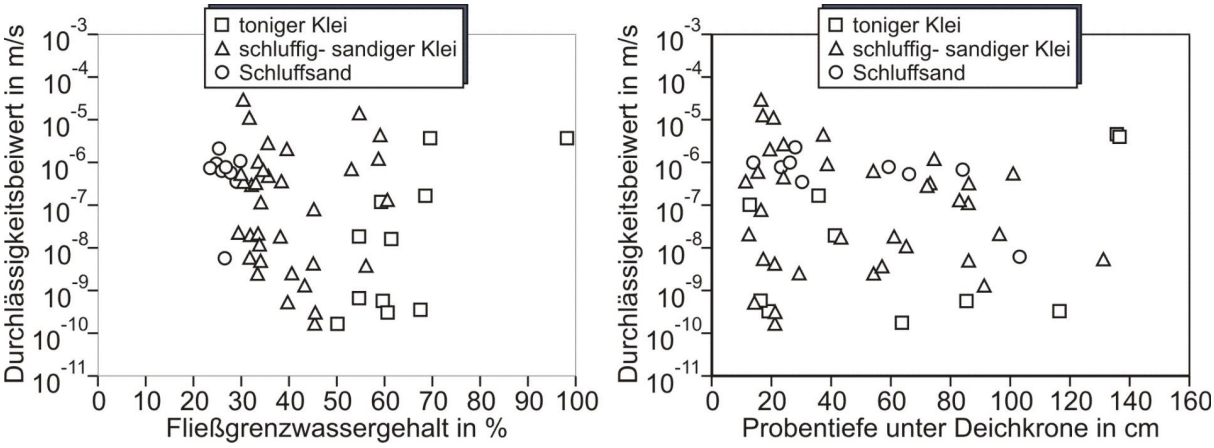

Abbildung 8: Gemessene Wasserdurchlässigkeiten gealterter Deichdeckschichten (Grundlage: Temmler 2006).

5.2 Wasserspeichervermögen

Als Folge der Oberflächenspannung zwischen den Wasserhüllen und den Kornpartikeln herrscht im Boden eine Saugspannung als dynamisches Gleichgewicht zwischen der Schwerkraft des Bodenwassers, der Höhe des Grundwasserspiegels, den Niederschlagsverhältnissen, der Verdunstungsrate sowie der Form und Größe der Bodenporen. Neben der mineralogischen Zusammensetzung insbesondere der Feinkornfraktion (Tonmineralien) spielen organische Beimengungen in feinverteilter Form bei der Wasserspeicherkapazität des Bodens eine wichtige Rolle. Im Porenwasser gelöste Verbindungen können ebenfalls eine größere Wassermenge festhalten.

Die unter verschiedenen Witterungsbedingungen an die Feinkornfraktion gebundene Wassermenge hängt von der Wasserspannung und der Wasserbindungskapazität des Kleis ab. Dabei gibt die Saugspannungs-/Wassergehaltskurve des Bodens eine wichtige Information über das Verhalten eines Deichabdeckbodens unter ungesättigten Bedingungen, über die Anteile der Fein-, Mittel- und Grobporen im Boden sowie zur pflanzenverfügbaren Feldkapazität im Porenwasser.

Die Saugspannung wird üblicherweise als pF-Wert oder in Meter Wassersäule (mWS) angegeben. Je höher der pF-Wert bzw. geringer die Angabe in mWS, desto trockener der Boden. Infolge unterschiedlicher Saugspannungen findet im Boden ein dauernder, jedoch

diskontinuierlicher Wassertransport zwischen Deichkern, Deichoberfläche und Atmosphäre statt. So kann die Saugspannung in einem warmen trockenen Sommer als Folge der Verdunstung an der Bodenoberfläche (Evaporation) sowie über die Pflanzendecke (Transpiration) in der durchwurzelten bindigen Deckschicht geringer als -100 m Wassersäule bzw. ein pF = 4,0 erreichen, nach starken sommerlichen Niederschlägen aber auf Werte unter -5 mWS bzw. ein pF = 2,7 und in der kalten verdunstungsarmen Jahreszeit häufig auf Werte ≤ -1 mWS bzw. ein pF = 2,0 abfallen (TAW 1996). Nach winterlichen Starkniederschlägen sowie Wasserinfiltrationen bei Wellenauf- und -überlauf ist der Porenraum annähernd wassergesättigt und der pF-Wert liegt bei 0 bis 1.

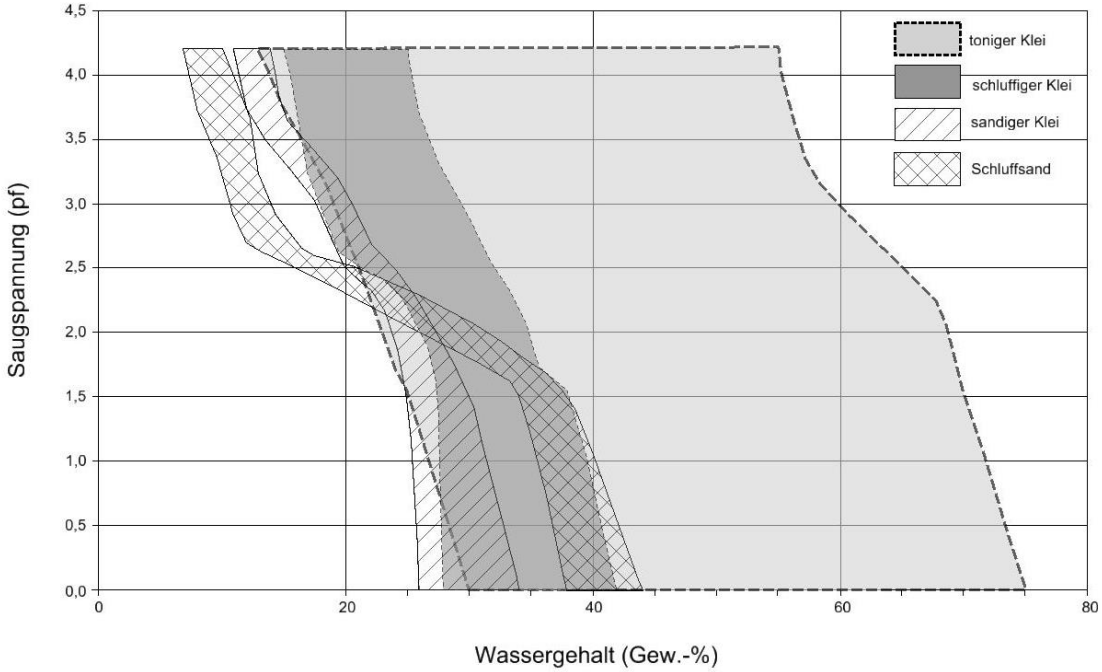

Abbildung 9: Bandbreite der Saugspannung vs. Wassergehalt von Deichabdeckböden in SH (Grundlage: Temmler 2006).

Nach den Ergebnissen zur Wasserspannungscharakteristik an entnommenen ungestörten Proben von Deichböden aus Schürfen (Temmler 2006) bestehen deutliche Unterschiede im Verlauf der pF-w-Kurven zwischen den verschiedenen Bodengruppen der Deichabdeckböden (Abbildung 9). Insgesamt stimmt der gemessene Kurvenverlauf mit niederländischen Daten recht gut überein, wobei dort die meisten Versuchskurven im Bereich des mittelplastischen, schluff- und sandreichen Kleis liegen (TAW 1996).

Nach niederländischen Erfahrungen (TAW 1996) erreicht die Saugspannung im sandigen Deichkern oberhalb des Grundwasserspiegels, abhängig von der Korngrößenverteilung und dem Schluff- und Ton-Anteil, Zahlenwerte von -1 bis -2 m WS, maximal bis zu -5 m WS. Für die tonreiche Kleideckschicht niederländischer Grasdeiche wird in der Sommerperiode eine Saugspannung von rd. -10 mWS (pF=3) als repräsentativ angesehen. Für sandreichen Klei ergaben Herbstmessungen mit Saugspannungen zwischen -3,1 und -6,3 mWS etwas niedrigere Zahlenwerte. S-förmig verlaufende Versuchskurven, allerdings mit deutlich höheren Einbauwassergehalten, hat Pohl (2010) an aufbereiteten Bodenproben typischer Deichbaustoffe mit gestörtem Bodengefüge ermittelt.

Das mit einer höheren Saugspannung als pF = 4,2 gebundene Totwasser ist für landwirtschaftliche Nutzpflanzen nicht mehr verfügbar. Beim Schluffsand sinkt der Wassergehalt bei einem Anstieg der Saugspannung von pF = 1,5 auf 3 stark ab. Bei einer geringen Stärke der Deichabdeckung und fehlendem kapillaren Wasseraufstieg aus einem tief liegenden Grundwasserspiegel im sandigen Deichkern kann in einem sehr trockenen Sommer an der Deichoberfläche der sog. permanente Welkepunkt bei pF = 4,2 erreicht werden, wo die Grasnarbe verbrennt, d. h. irreversibel zu welken beginnt und seine Widerstandsfähigkeit verliert. In Abbildung 10 ist beispielhaft die Bandbreite von gemessenen Saugspannungskurven an aufgespülten Sanden im Deichkern dargestellt.

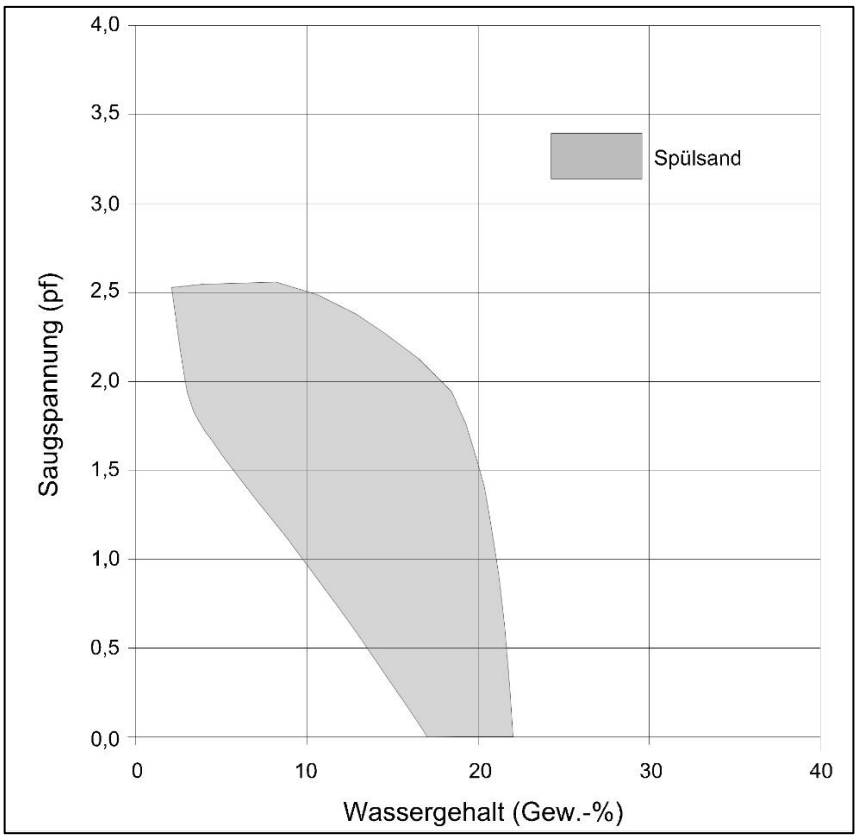

Abbildung 10: Bandbreite der Saugspannung vs. Wassergehalt an Spülsanden (Grundlage: Temmler 2009).

5.3 Schrumpfverhalten

5.3.1 Allgemeines

Bindige Böden erfahren bei einer Wassergehaltsverringerung eine Volumenreduktion. Bei starkem Wasserverlust, im Extremfall bis zur Austrocknung, entstehen wegen der begrenzten Zugfestigkeit des Bodens Schrumpfrisse. Dies ist mit einer – für Deichabdeckböden unerwünschten – Zunahme der Durchlässigkeit verbunden.

Abbildung 11 zeigt die Abhängigkeit des Gesamtvolumens einer bindigen Bodenprobe vom volumetrischen Wassergehalt. Bei hohen Ausgangswassergehalten tritt Normalschrumpfung auf, bei der sich der Porenraum einer Probe verringert, die Probe aber wassergesättigt bleibt. Wenn die Bodenteilchen einen Wasserverlust nicht mehr durch ein Aneinanderrücken, d. h. durch Reduktion des Porenvolumens, ausgleichen können, kommt

Luft in die Poren, womit die Probe nicht mehr wassergesättigt ist und deshalb im Allgemeinen ein Farbumschlag zu beobachten ist. Der Übergangsbereich zwischen Normalschrumpfung und Nullschrumpfung beginnt in der Regel etwa beim Wassergehalt an der Ausrollgrenze und endet, wenn der Wassergehalt der Schrumpfgrenze erreicht ist.

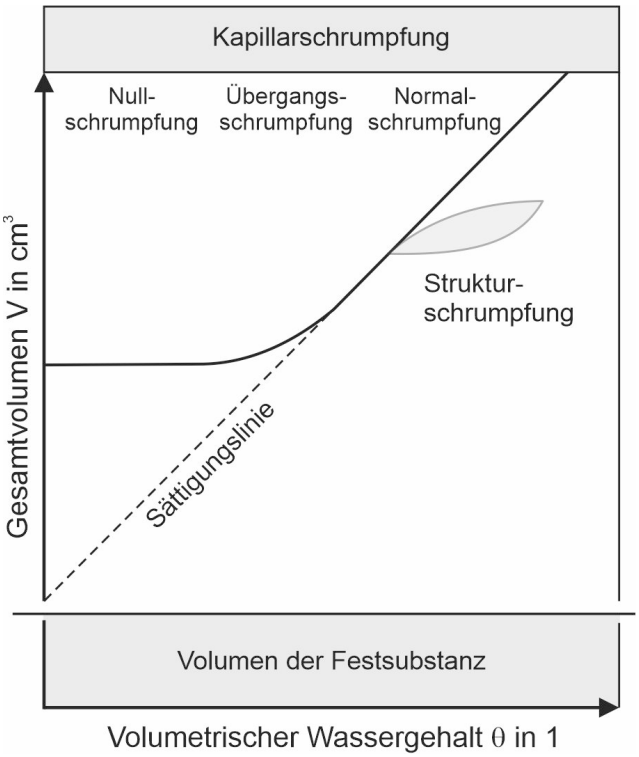

Abbildung 11: Phasen der Schrumpfung eines bindigen Bodens (Pohl 2010).

Der Umfang der Schrumpfung und damit möglicher Schrumpfrisse bei Austrocknung ist vom Ausgangswassergehalt des Bodens beim Einbau abhängig. Es spielen jedoch auch vorhergehende Be- und Entwässerungsprozesse eine Rolle, weil Schrumpfung kein vollständig reversibler Prozess ist. Dies verdeutlicht der in Abbildung 11 ebenfalls dargestellte Kurvenverlauf bei Be- und anschließend erneuter Entwässerung. Einmal durch Schrumpfen entstandene Risse schließen sich entsprechend bei Wiederaufsättigung im Allgemeinen nicht wieder vollständig. Insofern spielt bei der Beurteilung einer bereits vorhandenen Deckschicht bezüglich möglicher Schrumpfungserscheinungen auch der durchlaufene „Alterungsprozess“ eine wichtige Rolle. Des Weiteren hat auch die Art der Tonmineralien einen Einfluss (Nuber und Pohl 2014).

Pohl (2010) berichtet über Versuche des Staatlichen Amts für Wasser und Abfall (StAWA) Aurich, in denen untersucht wurde, ob sich Risse in einer Deichdeckschicht bei Vernässung wieder schließen. Zu Beginn der Versuche lagen Trockenrisse mit 5–8 cm Öffnungsweite und bis zu 30 cm Tiefe vor. An einem Versuchsfeld, das lediglich dem natürlichen Niederschlag (mit einer Regenspende von 56 mm) ausgesetzt war, hatten sich Breite und Tiefe der Risse um rd. 50 % verringert. An einem weiteren Versuchsfeld mit zusätzlicher künstlicher Beregnung (Gesamtregenspende 152 mm) hatten sich die Risse weitestgehend geschlossen. Pohl folgerte daraus, dass eine Rissschließung zwar offenbar möglich ist, dazu aber sehr hohe Niederschlagsmengen erforderlich sind. Außerdem weist Pohl darauf hin, dass der ehemalige Riss eine geschwächte Zone darstellt.

5.3.2 Schrumpfverhalten von Deichabdeckböden

Ergebnisse von Schrumpfversuchen an Bodenproben aus der Kleideckschicht von Nordseedeichen finden sich u. a. in Weißmann (2003). Demnach ergaben sich Schrumpfgrenzen zwischen w_S = 16 % und w_S = 28 % und Schrumpfmaße (bezogen auf den Ausgangswassergehalt im Versuch, d. h. dem 1,1-fachen der Fließgrenze) von V_S = 10,2 bis 46,1 %. Es ergab sich eine starke Abhängigkeit des Schrumpfmaßes vom Tongehalt des Bodens.

Mit den von Weißmann ebenfalls mitgeteilten Wassergehalten an der Fließgrenze w_L der Bodenproben zeigt sich außerdem eine eindeutige Korrelation von Schrumpfmaß und Fließgrenze (Abbildung 12).

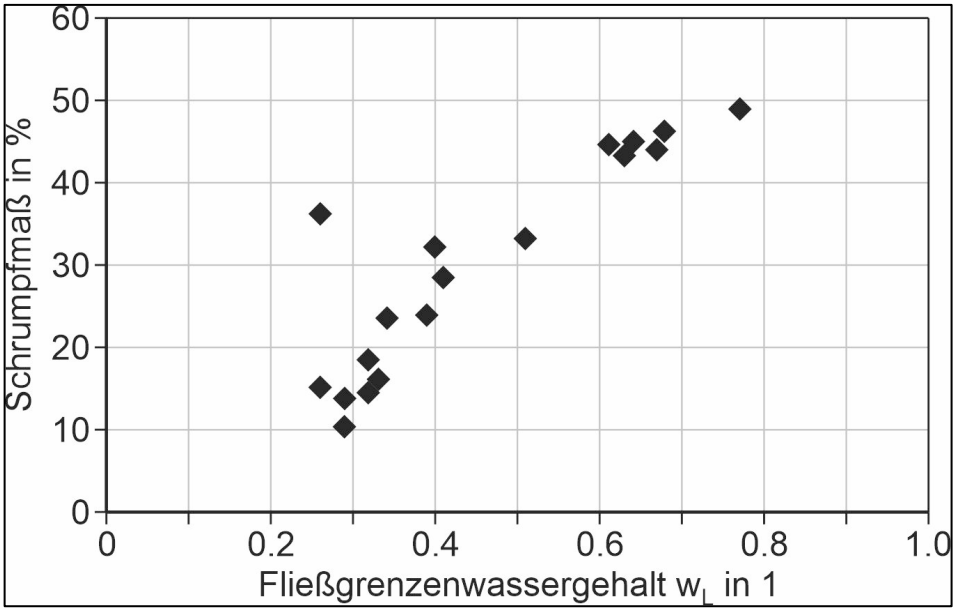

Abbildung 12: Abhängigkeit des Schrumpfmaßes von der Fließgrenze (Daten aus Weißmann 2003).

Die Versuchsergebnisse von Weißmann (2003) gelten für Bodenproben, die nach der Entnahme mit Wasser aufbereitet und entsprechend homogenisiert wurden und charakterisieren somit die Eigenschaften eines „frischen" Kleis vor bzw. beim Einbau.

Temmler (2007) berichtete über die Ergebnisse von Versuchen an „gealterten" bzw. konsolidierten Proben aus Kleideckschichten. Diese wurden in jeweils 3 Tiefen als Sonderproben aus der Deckschicht entnommen, im Labor aufgesättigt, anschließend stufenweise entwässert und die zugehörige Volumenschrumpfung, die sich somit auf den Ausgangszustand nach Aufsättigung des bereits gealterten Materials bezieht, gemessen. Die Messwerte sind als Mittelwerte aus mehreren Einzelversuchen abhängig von der Wasserspannung in Abbildung 13 wiedergegeben.

Es zeigte sich, dass das Schrumpfverhalten bei geringer bis mittlerer Austrocknung (d. h. solange die Wasserspannungen betragsmäßig kleiner als rd. 1,0 bar blieben) nicht bzw. nur geringfügig von der Art bzw. der Zusammensetzung des Deckschichtmaterials war. Das Schrumpfmaß lag in den meisten Fällen zwischen rd. 1 % und 2 %. Erst bei starker Austrocknung ist die weitere Zunahme des Schrumpfens abhängig von der Zusammensetzung des Deckschichtmaterials. Während beim Schluffsand die Schrumpfwerte unter 2 % blieben, traten im schluffig-sandigen Klei Schrumpfmaße zwischen 2 und 4 % und im tonigen Klei von 4 bis 8 % auf.

Zur Einordnung der oben genannten Wasserspannungen sei angemerkt, dass in den Niederlanden auf Grundlage von Saugspannungsmessungen an grasbewachsenen Kleiböden in situ festgestellt wurde, dass bereits in rd. 30 cm Tiefe die Saugspannung etwa -1 bar beträgt und mit zunehmender Tiefe weiter abnimmt (TAW 1996). Eine Wasserspannung von -1 bar wird deshalb als repräsentativer Wert für grasbewachsene Erddämme angesehen (vgl. auch Pohl 2010).

Mit einem Einbauwassergehalt oberhalb der Fließgrenze durchgeführte Schrumpfversuche ergaben zum Vergleich Schrumpfmaße von 10–20 % beim Schluffsand und 40–50 % beim tonreichen Klei, und somit Ergebnisse in einer ähnlichen Größenordnung wie bei Weißmann (2003). Die für die gealterte Deichabdeckung ermittelten maximalen Volumenschrumpfungen liegen also um etwa das 10-fache unter den Werten der Ergebnisse mit frischem Klei.

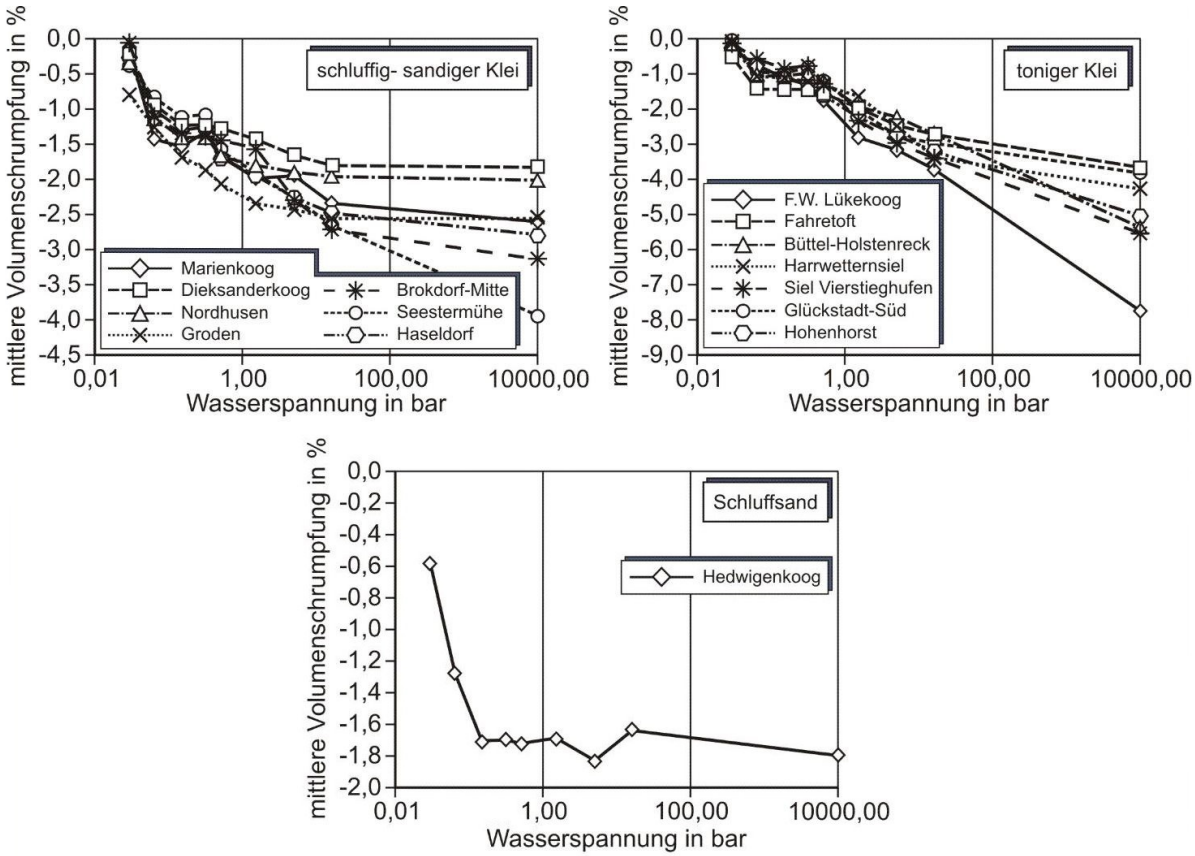

Abbildung 13: Gemessene Volumenschrumpfungen an gealterten Proben (Daten aus Temmler 2007).

5.4 Rissbildungen und Rissausbreitung in der Deichabdeckung

Risse infolge Schrumpfung entstehen durch Überschreitung der Zugfestigkeit des Bodens. Aufgrund der Witterungseinflüsse mit temporärer Trocknung des Deckschichtbodens kommt es im Laufe der Zeit zur Entstehung von Rissen, die ihren Ausgang an lokalen Schwachzonen wie z. B. Wühltiergängen oder einbaubedingten Inhomogenitäten nehmen. Es überwiegen in der Regel senkrecht zur Böschungsoberfläche gerichtete Risse. Wegen Materialanisotropie kann der Rissverlauf in die Abdeckung hinein aber auch von der Normalen zur Böschungsoberfläche abweichen (Pohl 2010).

In der durchwurzelten Hauptrisszone liegen die Haarrisse sehr engständig vor und können häufig mit bloßem Auge nicht erkannt werden. Auffällige Rissbildungen in der Deichabdeckung – örtlich bis an die Kleibasis rd. 1 m unter die Deichhaut herunterreichend – wurden bei der Detailaufnahme der Schürfgruben in den Untersuchungen von Temmler (2007) insbesondere im Bereich der Deichkrone bei gealterten, tonreichen, während des Einbaus sehr weichen bis breiigen Kleiauffüllungen beobachtet. Insbesondere bei alten Kleideichen existiert oft eine Grenzzone zwischen zwei Einzellagen innerhalb der Deichabdeckung unterschiedlicher Zusammensetzung oder Verdichtung während des Baus. Diese Grenzzone bildet im Bemessungslastfall mit einer aufgeweichten, durchnässten bindigen Deckschicht über einem wasserstauenden, anfangs nur erdfeuchten, verfestigten Untergrund im tieferen Teil der Kleiabdeckung häufig eine vorgeprägte Schwächezone sowohl beim Erosionsprozess (u. a. bei GWK-Versuchen in Hannover beobachtet, siehe Möller et al. 2002) wie auch bei der Infiltration und Blockrutschung einer zu steilen Deichinnenböschung.

Eine möglichst genaue Kenntnis der Risstiefe in Deichabdeckungen ist in mehrfacher Hinsicht von Bedeutung:

(i) Tiefe Risse, in größeren Abständen die Kleischicht durchschlagend, vergrößern die Gesamtdurchlässigkeit der bindigen Kleiabdeckung. Sie können bei lang anhaltenden Starkregenfällen und/oder bei hoch auflaufendem Sturmflutwasserstand mit entsprechendem Spritzwasseranfall oder Wellenüberlauf zu einem Aufstau des Innenwasserspiegels im sandigen Deichkern führen (Temmler 2004).

(ii) Flache, aber engständig vorkommende Risse, vor allem aber auch tierische Wühlgänge vermindern die Dichtwirkung in der oberen Zone der Kleideckschicht. Sie werden bei Starkniederschlägen und/oder Wellenüberlauf rasch mit Infiltrationswasser gefüllt. Dabei beansprucht ein hoch liegender Wasserspiegel insbesondere die steilere Deichinnenböschung mit einem erheblichen, die Deichstabilität u. U. gefährdenden Strömungsdruck.

(iii) Rissbildungen führen zu einem kürzeren Infiltrationsweg des Bodenmaterials in der gerissenen Deichabdeckung. Somit weicht das Deichabdeckmaterial in kürzerer Zeit auf und die Scherfestigkeit wird reduziert. Auf diese Zusammenhänge wird in den nachfolgenden Abschnitten 6 und 7 eingegangen.

6 Infiltrationsprozesse in Seedeichen: Grundsätze, Naturbeobachtungen und -messungen

6.1 Grundsatzüberlegungen

Der Infiltrationsprozess des Wassers in den Deich ist insbesondere in der teilgesättigten bindigen Deichabdeckung ein komplexer Vorgang. Zudem beeinflussen die instationären und quasi-stationären Randbedingungen, wie unterschiedliche Wasserstände infolge der Gezeiten, Wellenauflauf, Wellenüberlauf, sowie Starkregenereignisse, den Infiltrationsprozess. Die Infiltrationsvorgänge wirken im Deich gleich auf mehrfache Weise. Zum einen nimmt im bisher ungesättigten Boden der Wassergehalt infolge einer Infiltration zu. Diese Wassergehaltszunahme löst insbesondere bei bindigen Böden eine Abnahme der Scherfestigkeit aus. Zusätzlich wirken Strömungskräfte, die insbesondere in den Böschungen standsicherheitsrelevant werden können.

Als Grundvoraussetzung für die Infiltration muss ein Wasserangebot an der Deichoberfläche vorhanden sein. Ist die anfallende Wassermenge geringer als die Infiltrationsmenge, die der Boden aufnehmen kann, versickert das Wasser vollständig. Bei einem Wasserangebot, das größer ist als die Infiltrationsrate, läuft das nicht infiltrierte Wasser in Richtung der Neigung der Deichoberfläche ab.

Bei einer Sturmflut dringt das Wasser von der Oberfläche des Deiches her in den Deichkörper ein. Dabei werden zunächst durch das auf- und ablaufende Wasser oberflächennahe Bereiche auf der Außenböschung mit Wasser gesättigt. Durch den Hochwasserstand und starke Wellen kann es auch zum Wellenüberlauf kommen. Hierbei werden neben der Außenböschung auch die Deichkrone und die Deichbinnenböschung überströmt. In Abhängigkeit von den auftretenden Überströmungshöhen, dem im Boden bereits vorhandenen Wassergehalt und der Gravitation schreitet die sich ausbildende Infiltrationsfront in der bindigen Deckschicht voran.

Die Infiltration in die Deichböschung sowie die Durchsickerung des Deiches lassen sich mit der Finite Elemente Methode berechnen. Dabei gehen als Randbedingungen ein:

Sättigungsgrad:
In Abhängigkeit der o. g. instationären Randbedingungen variiert der natürliche Wassergehalt und damit auch der Sättigungsgrad örtlich und zeitlich in großem Umfang. Sind bei einem geringen Sättigungsgrad viele Poren in der Deichabdeckung lufterfüllt, wird der Infiltrationsvorgang in die Böschung bei einer raschen Wasserbeaufschlagung der Deichoberfläche verlangsamt. In einem durch vorangegangene Starkniederschläge aufgeweichten Boden schreitet dagegen die Infiltrationswasserfront bei einer Überflutung unter sonst gleichen Randbedingungen verhältnismäßig rasch voran.

Wasserdurchlässigkeit:
Die Wasserdurchlässigkeit ist der Parameter mit dem größten Einfluss auf die Infiltrationstiefe und beeinflusst vor allem den zeitlichen Verlauf der Infiltration. Generell ergibt sich, dass bei einem gering durchlässigen Boden mit $k_f \leq 1 \bullet 10^{-5}$ m/s (Abbildung 8) selbst eine konstante einstündige hydrostatische Belastung bei niedrigem Anfangswassergehalt nur zu einer geringen Infiltrationstiefe führt. Lediglich in der Folge zunehmender Anfangssättigungen können größere Infiltrationstiefen erreicht werden.

Überstauhöhe des Wellenauf- und -überlaufs bei unregelmäßigem Wellenspektrum:
Die Überstauhöhe bildet das Druckpotential des Wellenauf- und -überlaufs. Bei einem Wasserangebot an der Deichoberfläche ohne Überstau findet die Infiltration allein auf Grund vom Saugspannungs- und Gravitationspotential statt. Bei einer einstündigen Infiltration eines bindigen Bodens mit geringem Anfangswassergehalt und gleichmäßiger Wasserdurchlässigkeit von $k_f = 1 \bullet 10^{-5}$ m/s verdoppelt sich hingegen die Infiltrationstiefe. Die Erkenntnisse aus umfangreichen Berechnungen mit verschiedenen Wellenspektren (Weißmann 2003) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Nicht stationäre (wellenartige) Überstaurandbedingungen lassen sich durch konstante, über die Zeit gemittelte Überstaurandbedingungen ersetzen.
- Je undurchlässiger der Boden ist, desto weniger ist das tatsächliche Wellengeschehen von Bedeutung.
- Die Durchlässigkeit des Bodens besitzt einen deutlich größeren Einfluss auf die Infiltrationstiefe als die Überstaurandbedingungen.

- Die Wasseraufnahme von Kleiböden vollzieht sich im Vergleich zur Wasserabgabe relativ schnell.
- Eine Luftaufnahme findet während der Überströmphasen nur bei sehr durchlässigen Böden bzw. bei sehr großen Pausen zwischen den Einzelwellen statt. Mit der nächsten Welle wird der oberflächennahe Bereich wieder gesättigt.
- Durchlässigkeiten von kf > 1 • 10^{-4} m/s können innerhalb einer Sturmflutphase zur vollständigen Aufsättigung der Kleiabdeckung führen.

Für die konkrete Berechnung der Wassergehaltsänderung infolge von Infiltration des Wellenüberlaufes für einen bestimmten Deichabschnitt müssen die den Boden beschreibenden Durchlässigkeitsparameter (van Genuchten 1980) sowie die Wassergehaltsverteilung innerhalb des Deiches zu Beginn der Überströmung bekannt sein. Hierbei gilt es auch die Hinweise im Abschnitt 5 dieses Statusbericht zu berücksichtigen. Die wellenartigen Überstaurandbedingungen können näherungsweise durch äquivalente Überstauereignisse ersetzt werden.

6.2 Naturbeobachtungen

6.2.1 Wasserstände im Deich

In einem Deichkörper staut sich das Infiltrationswasser gegenüber dem Nachbargebiet mehr oder weniger auf, wobei die Form und Höhe der Wasserspiegeloberfläche im Deichkern durch die Deich-Geometrie, die Intensität vorangegangener Niederschläge, die Infiltrationsbedingungen im Deichkörper sowie durch den Aufbau des Deiches gesteuert wird. Der Wasserstand im Deich ist in verschiedenen Streckenabschnitten – bedingt durch den oft rasch wechselnden Bodenaufbau, Bauhilfsmaßnahmen wie Folieneinbau zur Spülfeldbegrenzung, unterschiedlich tiefe Spülfeldentwässerung u. Ä. – oft uneinheitlich. Er unterliegt auch jahreszeitlichen und – in geringerem Umfang bei durchlässigem Untergrund bzw. Außendeichfuß/Deckwerk auch sturmflutbedingten – Veränderungen.

Pegelmessungen an schleswig-holsteinischen See- und Ästuardeichen ergaben teilweise erhebliche zeitliche Höhenveränderungen des Wasserstandes im Deich. Im Inneren eines durchgängig aus Klei bestehenden Deiches bzw. in einem von schwerdurchlässigen Kleischichten allseits umgebenen sandigen Deichkern kann der mittlere Wasserspiegel in ungünstigen Fällen bis zu 3 m über MThw ansteigen (Temmler 2004). Unter extremen Sturmflutbedingungen liegen die nur mäßig erhöhten Wasserstände in einem breiten sandigen Deichkern bei offenem und geschlossenem Deckwerk relativ nahe beieinander.

In der Tabelle 1 sind die in schleswig-holsteinischen Deichkörpern gemessenen höchsten Wasserstände getrennt für unterschiedliche Bautypen aufgelistet.

Tabelle 1: Gemessene maximale Wasserstände in See- und Ästuardeichen (nach Temmler 2004).

Kleideiche, schmal	
Laglumsiel Föhr-Ost	+ 4,0 m NN
Alter Elbdeich Brokdorf-Arentsee	+ 4,5 m NN
Stördeich Kronsmoor	+ 2,3 m NN = 0,4 m u. GOK

Deiche mit Sandkern, Kleiabdeckung nach EAK, tiefliegendes Deichvor- und –hinterland	
Altdeich Neufelderkoog/Elbe	+ 2,0 m NN
Elbdeich Kreuzdeich-Pinnau-Sperrwerk	+ 2,0 m NN

Deiche mit Sandkern, bindiger Abdeckung und Kleikeilen unter der Außen- und Innenböschung	
Porrenkoogdeich bei Husum	ca. + 5,0 m NN
Elbdeich Nordhusen	ca. + 5,0 m NN
Elbdeich Haseldorf	+ 3,7 m NN
Norderhafen-Strucklahnungshörn/Nordstrand	ca. + 6,0 m NN (vor der Sanierungsmaßnahme)

Deiche mit durchlässigem Deckwerk auf Spülsand, teilweise mit Kleikeil innen	
Elbdeich Haseldorf, DSt. 11.0	+ 2,2 m NN
Elbdeich Brokdorf-Arentsee, 2. Bauphase	+ 2,4 bis + 2,8 m NN
Seedeich Hauke-Haienkoog	+ 2,8 m NN

Die Wasserstandsmaxima fallen überwiegend in die Winter- und Frühjahrsmonate, die Wasserstandsminima in die Herbstmonate (Abbildung 14). Eine Beziehung zum Außenwasserstand in der Nordsee ist häufig nicht erkennbar.

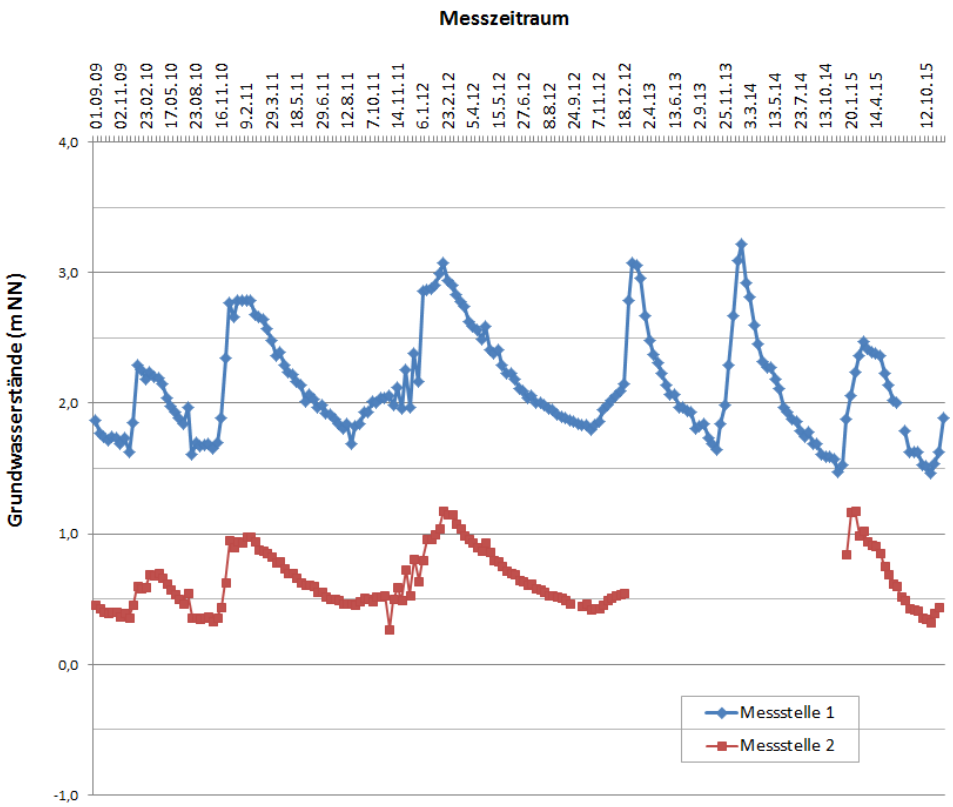

Abbildung 14: Wasserstände im Deich am Beispiel von Nordstrand.

Komplizierte Verhältnisse erfordern für den Einzelfall die Notwendigkeit direkter Messungen an Grundwasserstandspegeln im Baustellenbereich. Hohe Wasserstände im Deichkern führen nicht automatisch zu einem Verlust der Standsicherheit, jedoch können sie ein Versagen bei Wellenüberlauf im Sturmflutfall bei einem länger anhaltenden oder wiederholt eingetretenen hohen Außenwasserstand begünstigen.

Die Erfahrungen aus Wasserstandsmessungen in Deichen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Hoher Stauwasserspiegel in Kleideichen mit niederschlagsabhängigen zeitlichen Höhenveränderungen
- Tiefer Stauwasserspiegel mit geringen niederschlagsbedingten zeitlichen Höhenveränderungen (< 1 m) in massiven Schluffsanddeichen
- Hoher GW-Spiegel im seitlich nicht entwässerten, vollständig kleiumschlossenen sandigen Deichkern
    - ohne Sturmfluteinfluss bei einem breiten Deichquerschnitt
    - mit deutlichem Sturmfluteinfluss bei gering bis mäßig geeignetem Abdeckboden (insbesondere bei einem schmalen Deichquerschnitt)
- Tiefer GW-Spiegel im Sandkern beim durchlässigen Außen- und Innendeichfuß mit
    - geringem Sturmfluteinfluss beim breiten Deichquerschnitt
    - hohem Sturmfluteinfluss beim schmalen Deichquerschnitt

6.2.2 Beobachtungen von Vernässungsstellen am Beispiel von Deichen in Schleswig-Holstein

Langanhaltende Sickerwasseraustritte in Deichböschungen sind besonders aus den Wintermonaten bekannt und in aller Regel ein Anzeichen für einen verhältnismäßig hohen dauerhaften Grundwasserspiegel im Deichkern. Es handelt sich hierbei teilweise um örtlich begrenzte „Wasserblasen“ in Abmessungen von wenigen Metern, teils um langgestreckte Nassstellen. Im Rahmen der Untersuchungen an Deichabdeckböden in Schleswig-Holstein sind mit Stand vom September 2005 von den vier Baubetrieben des Amtes für Ländliche Räume Husum (heute Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein, LKN-SH) für die schleswig-holsteinische Elbmarsch und Westküste (einschließlich der Inseldeiche)

- im Bereich der Deichaußenböschung insgesamt 28 Nassstellen zwischen 5 und 1350 m Länge (Gesamtlänge ca. 8100 m) sowie
- im Bereich der Deichbinnenböschung insgesamt 23 Nassstellen zwischen 5 und 800 m Länge (Gesamtlänge ca. 6295 m)

aufgelistet worden. Auf die gesamte Deichlänge an der Unterelbe und Westküste in S-H von 439,1 km (Generalplan Küstenschutz 2001) bezogen sind dies 1,85 % (außen) bzw. 1,44 % (innen) der Küstenschutzbauwerke.

Eine zeitweilige Durchnässung des Binnendeichfußes wurde verschiedentlich bei einer Aufspülung des späteren Sandkerns bis auf +6 m NN im Zuge von Deichverstärkungsmaßnahmen beobachtet. Im Gegensatz zu den längerfristig vorhandenen Feuchtstellen (siehe oben) sind sturmflutbedingte Durchnässungsareale an Seedeichen nur selten registriert worden. Meistens handelte es sich um relativ schmale, noch nicht mit modernem

Bestick verstärkte Altdeiche mit einer bindigen Abdeckung von geringer Stärke oder mäßiger Kleiqualität. Für die Extremsturmflut vom 3.1.1976 ist für den durchgängig aus Schluffsand bestehenden, nach 1962 zuletzt verstärkten Seedeich vor dem Kaiser-Wilhelm-Koog in Dithmarschen, ein örtliches Ausfließen der flachen Außenböschung unmittelbar nach dem Rückgang des Hochwassers infolge eines hohen Binnenwasserdruckes dokumentiert (siehe Temmler und Filipinski 1997).

Aus den vorliegenden Erfahrungen in Schleswig-Holstein lassen sich die folgenden Erkenntnisse ableiten:

- Bei den in S-H in der Vergangenheit üblichen Außendeichverstärkungen mit einem ausgeprägten Altdeichrest (= Kleikeil) unter der Binnenböschung kommt eine Vernässung des Innendeichfußes deutlich häufiger vor als bei Altdeichen mit einem kompakten Bodenaufbau (häufig aus Schluffsand) oder geringmächtiger Kleiabdeckung über einem Sandkern.
- In der Außendeichböschung sind Nassstellen besonders häufig bei Vorlanddeichen mit hoch stehendem Grundwasserspiegel vor dem Außendeichfuß vorhanden.
- Nassstellen finden sich bei allen Deichtypen unabhängig von der Qualität des Abdeckbodens.
- In Streckenabschnitten mit weitgehend einheitlichem Deichabdeckboden aus Schluffsand bzw. tonreichem rissigem Klei fanden sich nur vereinzelte Nassstellen am Innendeichfuß.
- Die Grundwasserspiegelhöhe im sandigen Deichkern wird offenbar nicht entscheidend durch den Bodenaufbau der Deichabdeckung geprägt.

Im Winter kann es zu einem zusätzlichen Sickerwassereinstau im Deichkern infolge von eingeschränktem Sickerwasserabfluss durch Bildung eines Eispanzers auf der durchnässten Binnenböschung kommen (Abbildung 15).

Aus anderen Bundesländern mit See- und Ästuardeichen liegen keine dokumentierten Feststellungen vor, doch ist anzunehmen, dass Vernässungsstellen an Deichen auch anderenorts nicht selten vorkommen.

Bei Außendeichverstärkungen alter Kleideiche wurde gelegentlich massiv in den alten Kleideich eingeschnitten, um den Klei als bindigen Abdeckboden verwenden zu können. Der Einschnittbereich wurde mit Spülsand wiederaufgefüllt. Nicht selten kam es bei solchen Maßnahmen bereits während der Bauarbeiten zu einer Durchnässung des verbliebenen Altdeichrestes (insbesondere bei geringer bis mäßiger Kleiqualität des Altdeiches gemäß Tabelle G 3 EAK 2002) mit mehr oder weniger starkem Spülwasseraustritt im unteren Teil der Deichbinnenböschung (vgl. Temmler 2004). Auch durch Auflegen einer Erosionsschutzfolie auf die Einschnittsböschungen kann nach Erfahrungen an nach außen verstärkten Elbdeichen eine Durchsickerung nicht wesentlich reduziert werden.

Abbildung 15: Fließerscheinungen am Innendeichfuß bei Neufeld-Nordhusen.

6.2.3 Ergebnisse von Infiltrationsversuchen

Sowohl Richwien und Weißmann (1996; 1998) als auch Temmler (2007) haben an Kleiabdeckungen deutscher Deiche in situ-Versuche mit Doppelring-Infiltrometern durchgeführt:

- Die Ergebnisse von Richwien und Weißmann aus Versuchen an Kleideckschichten von Nordseedeichen in Niedersachsen und Schleswig-Holstein zeigt Abbildung 16. Es ergaben sich Infiltrationskapazitäten q ($m^3/(m^2\ s)$ zwischen rd. $5 \cdot 10^{-4}$ und $10^{-7}\ m^3/(m^2\ s)$. Die Versuchsendwerte lagen in den meisten Fällen zwischen 10^{-5} und $10^{-4}\ m^3/(m^2\ s)$.
- Ergebnisse von Temmler (2007) aus Versuchen an Deichen in Schleswig-Holstein im Winter sind in Abbildung 17 wiedergegeben. Auch hier lagen die Werte meist zwischen 10^{-5} und $10^{-4}\ m^3/(m^2\ s)$, örtlich wurden auch deutlich kleinere Infiltrationskapazitäten gemessen. Ein nennenswerter Unterschied zwischen den Kapazitäten am Anfang und am Ende des Versuchs war gemäß Temmler (2007) nur dann feststellbar, wenn die Versuche unmittelbar nach einer Witterungsphase mit Rissbildung (z. B. Frosteinwirkung oder Trockenperiode) durchgeführt wurden.

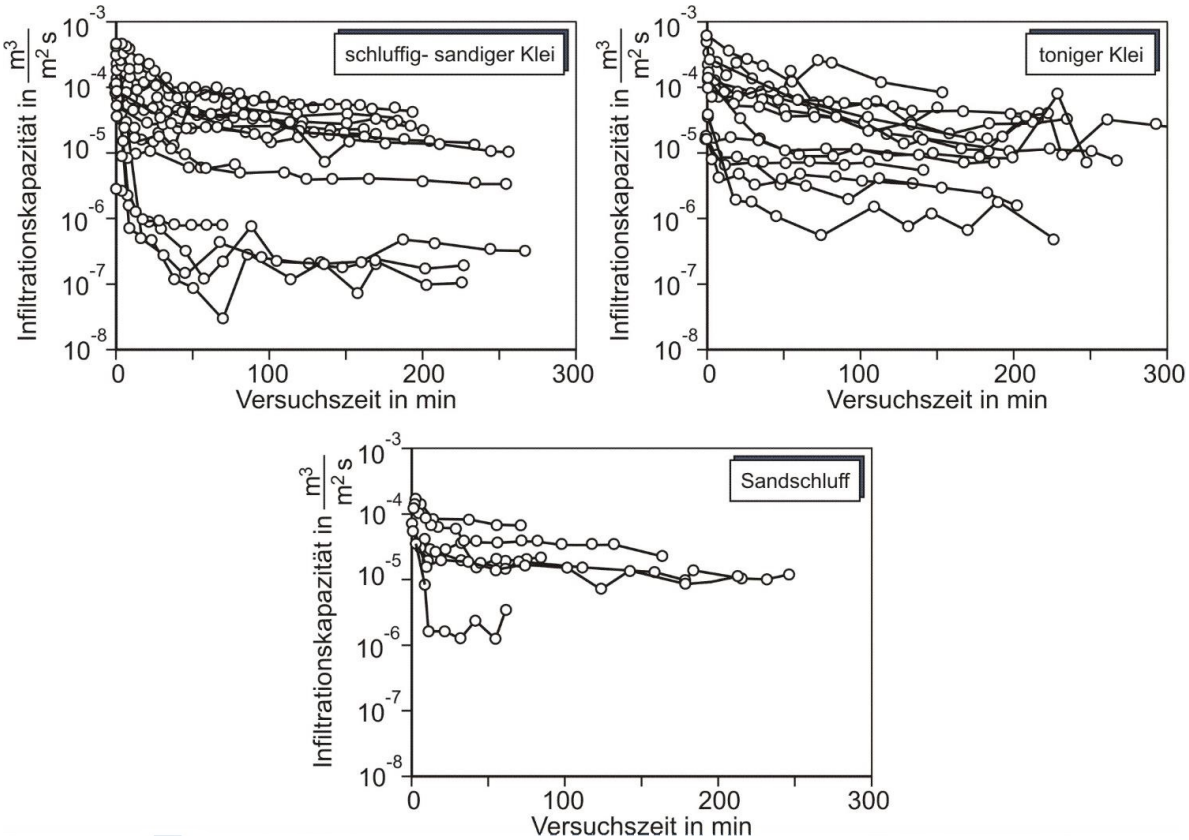

Abbildung 16: Von Richwien und Weißmann (1996; 1998) gemessene Infiltrationskapazitäten an Kleideckschichten.

In Temmler (2007) sind die gemessenen Wassergehalte über die Deckschichthöhen vor und nach der Infiltration dokumentiert. Für den Zustand vor der Infiltration ergaben sich relativ hohe Schwankungsbreiten. Der natürliche Wassergehalt in einer Deckschicht zu Beginn einer Extremsturmflut hängt von zahlreichen Faktoren ab (u. a. Bodenart, Vegetationsperiode, Intensität vorangegangener Niederschläge, Grundwasserstand im Deichkern, Lage der Messstelle im Deichquerschnitt). Als Gesamtergebnis lässt sich folgendes feststellen:

- Große Wassergehaltsdifferenzen während des Versuchs fanden sich insbesondere beim stark geklüfteten tonigen Klei mit ausgeprägtem Polyeder- oder Rissgefüge sowie beim schwach tonigen Schluffsand.
- Bei allen Bodentypen bestand hinsichtlich der tiefenbezogenen Wassergehaltsverteilung eine große Variationsbreite, die eine rechnerische Vorhersage als sehr problematisch erscheinen lässt.
- An Hand des unterschiedlichen oder gleichartigen Verlaufs der gemessenen Wassergehalte lässt sich in etwa die Sickerwasser-Eindringtiefe während eines Versuchs abschätzen.

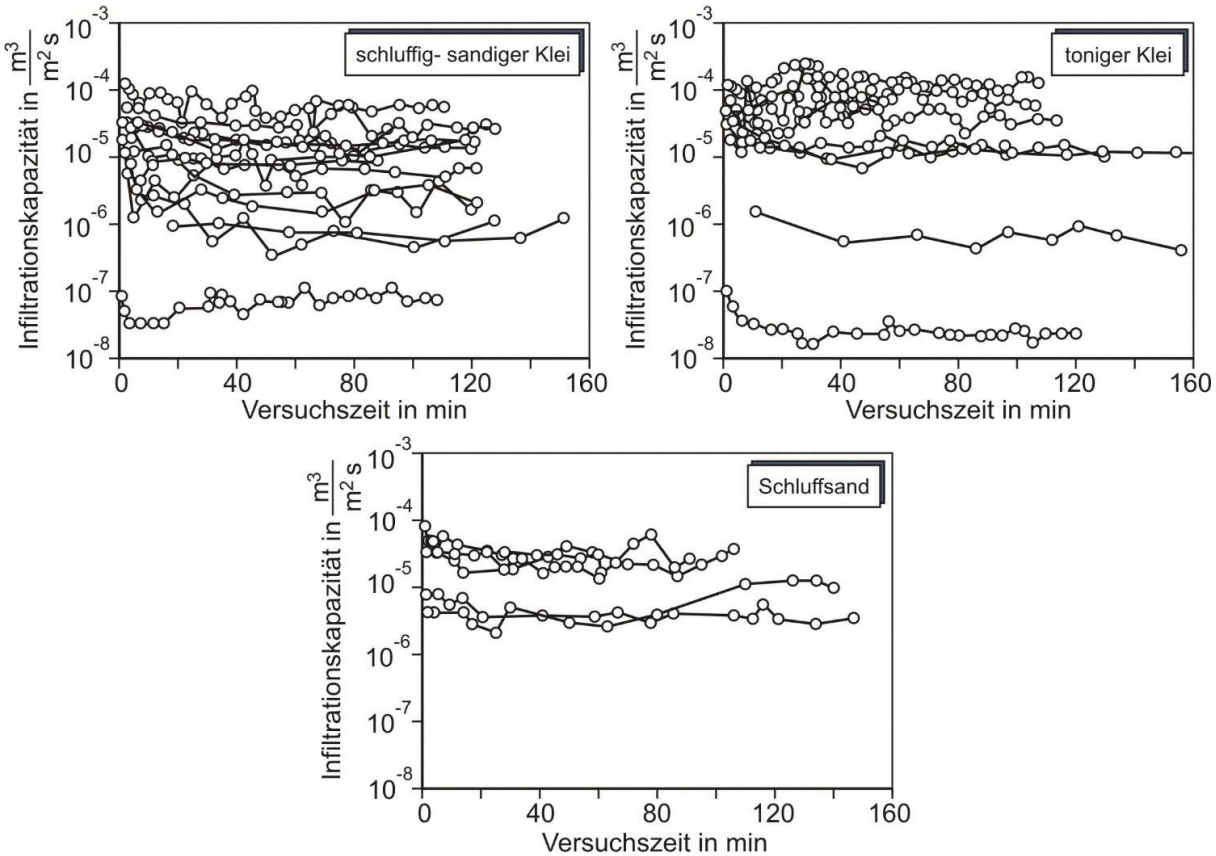

Abbildung 17: Von Temmler (2007) gemessene Infiltrationskapazitäten an Kleideckschichten.

Bei einem im März 2007 im Bereich der Innenböschung eines Deiches bei Groningen/NL durchgeführten 10-stündigen Wellenüberlaufversuch stellten sich die in der tonigen Deichabdeckung unter der Innendeichböschung gemessenen Höchststände des Wasserdrucks (8 kPa in 0,8 m bzw. 12 kPa in 1,2 m Tiefe) bei einer anfänglichen Wellenüberlaufrate von 1 l/s/lfdm bereits rd. 20 Minuten nach Versuchsbeginn ein, während der Druckabfall nach dem Versuchsende deutlich langsamer verlief (Akkerman et. al. 2007). Daraus lässt sich eine hohe rechnerische Durchlässigkeit von $2 \cdot 10^{-3}$ bzw. $1 \cdot 10^{-4}$ m/s ableiten.

Van Hoven et al. (2010) berichten über die Ergebnisse von 21 Infiltrationsversuchen an aggregierten Deichdeckschichten in den Niederlanden. Die Infiltration erfolgte über Rohre mit einem Durchmesser von 0,4 m, welche vertikal über die gesamte Schichtdicke in die Deckschicht eingedrückt worden waren. Der Mittelwert der gemessenen Infiltrationskapazitäten lag bei $q = 2{,}4 \cdot 10^{-5}$ m³/(m² s), der maximal gemessene Wert betrug $q = 6 \cdot 10^{-5}$ m³/(m² s). Gemäß van Hoven et al. bestätigten die Ergebnisse damit die Angabe in der niederländischen Richtlinie TAW (1996), dass die Infiltrationskapazität aggregierter bindiger Deckschichten allgemein zwischen 10^{-5} und 10^{-4} m³/(m² s) liegt. Dagegen ist die Durchlässigkeit einer Kleischicht unmittelbar nach dem Einbau gemäß TAW (1996) mit rd. 10^{-6} m/s nennenswert geringer.

Die Ergebnisse von Infiltrationsversuchen an einer Deckschicht aus Geschiebelehm bzw. -mergel eines Deiches bei Dahme/Ostholstein sind in Abbildung 18 wiedergegeben. Für den Altdeich ergab sich eine Bandbreite der Infiltrationskapazitäten von etwa 10^{-6} bis $5 \cdot 10^{-5}$ m³/(m² s), für den Neudeich dagegen zwischen $5 \cdot 10^{-7}$ bis 10^{-5} m³/(m² s), d. h. etwa um eine Zehnerpotenz kleiner.

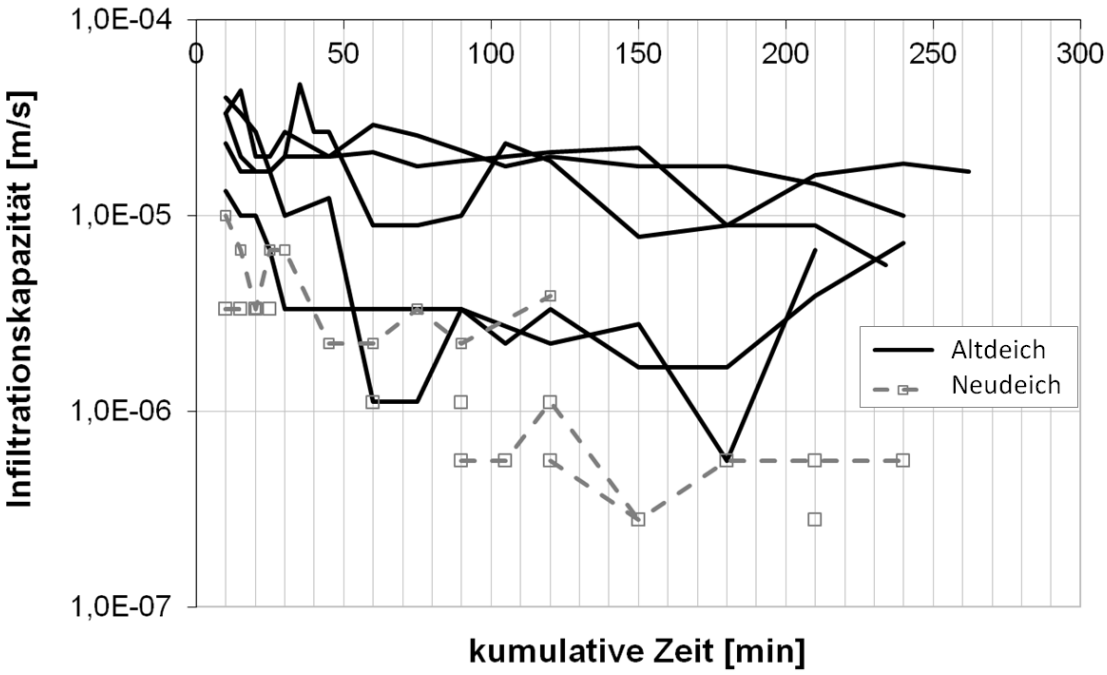

Abbildung 18: Gemessene Infiltrationskapazitäten an Deckschichten aus Geschiebelehm bzw. -mergel.

Die Durchlässigkeiten aggregierter Deckschichten weisen somit große Schwankungsbreiten auf, wobei keine signifikante Abhängigkeit von der Art des eingebauten Deckschichtmaterials erkennbar ist. Vor diesem Hintergrund scheint eine rechnerische Abschätzung der Infiltrationskapazität, mit bezüglich der Parameteridentifikation aufwendigen Modellen, derzeit nicht zielführend zu sein. Die Durchlässigkeit der Deckschicht scheint allenfalls von den Eigenschaften des kohärenten (nicht gealterten) Bodens untergeordnet abhängig zu sein.

Es empfiehlt sich deshalb derzeit – wie auch von van Hoven et al. (2010) vorgeschlagen – entweder konservativ mit einer Infiltrationskapazität von ca. 10^{-4} $m^3/(m^2\ s)$ zu rechnen oder genauere Werte mittels Feldmessungen zu ermitteln. Bei Planung und Auswertung von Feldmessungen sollten auch vorhergehende Witterungsverhältnisse berücksichtigt werden.

7 Veränderung der Scherfestigkeit von bindigen Deichabdeckböden bei Wasserzutritt

7.1 Allgemeines zur Scherfestigkeit

Wellenauf- und -überlauf sowie starke Regenereignisse führen zu einer Infiltration in die bindige Deichabdeckung und damit zu einer Zunahme des Wassergehaltes. Für nicht aggregierte bindige Böden mit gestörtem Gefüge kann ein Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt eines Bodens und seiner Scherfestigkeit hergestellt werden (Schulze und Muhs 1967). Dabei wächst die Anfangsscherfestigkeit mit abnehmendem Wassergehalt und erreicht ihren Höchstwert bei völliger Austrocknung. Mit einer Reduktion der Anfangsscherfestigkeit ist hingegen eine Abnahme des Erosionswiderstandes verbunden. Das Maß der Anfangsscherfestigkeit wird stark durch die innere Oberfläche des Bodens beeinflusst

und ist umso größer, je höher der Anteil an feinkörnigen Bestandteilen im Boden ist. Tritt nun Wasser in den Porenraum ein, umgeben sich die Bodenteilchen in zunehmendem Maße mit dünnen Wasserfilmen. Dabei nimmt die Kohäsion des Bodens und damit auch die Scherfestigkeit, trotz der durch die Wasserfilme neu entstehenden Adhäsion, ab. Durch weitere Wasseraufnahme entfernen sich die Bodenteilchen untereinander immer mehr, bis es zum völligen Festigkeitsverlust kommt.

Beim vorkonsolidierten bindigen Boden bleibt jedoch auch bei einem Wassergehalt an der Fließgrenze eine erhebliche Restfestigkeit bestehen. Solch eine Teilkonsolidation ergibt sich bei Deichabdeckungen durch ein Überfahren beim lagenweisen Einbau mit schwerem Gerät. Des Weiteren sind die physikalischen Zusammenhänge bei gealterten Deichabdeckböden mit Aggregatgefüge (siehe Abschnitt 5) deutlich komplexer als bei nicht aggregierten (frischen) bindigen Böden, so dass einige Untersuchungsergebnisse nur bedingt auf Deiche übertragbar sind.

Zur Ermittlung der undränierten Scherfestigkeit werden üblicherweise Flügelsondierungen im Feld oder Labor durchgeführt. Zur Ermittlung der dränierten Scherfestigkeit werden Triaxialversuche oder direkte Scherversuche verwendet. Während beim Triaxialversuch die Bodenprobe nach DIN 18137-2:2011-04 durch „back-pressure“ annähernd voll wassergesättigt werden muss, liegen bei den anderen Versuchen eher teilgesättigte Verhältnisse vor. Entsprechend liefert der Triaxialversuch weit auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse.

7.2 Messungen zur undränierten Scherfestigkeit

7.2.1 Felduntersuchungen

Mit einer Handflügelsonde lässt sich die undränierte Scherfestigkeit auf einfache Weise im Feld messen. Da die Drehvorrichtung des Flügels nicht automatisiert ist, kann jedoch nicht von einer gleichmäßigen und kontrollierbaren Drehgeschwindigkeit nach DIN EN ISO 22476-9:2014-04 ausgegangen werden. Folglich sind die somit ermittelten Werte mit Vorsicht zu bewerten; sie liefern jedoch hilfreiche Angaben zur Größenordnung der undränierten Scherfestigkeit.

Zur Abschätzung der beim Infiltrationsvorgang veränderten, wassergehaltsabhängigen undrainierten Scherfestigkeit c_u wurden die Anfangs- und Restscherwiderstände (τ_{fl}, $\tau_{fl\text{-}rest}$) an verschiedenen Deichabschnitten vor und nach einem Infiltrationsversuch auf der Deichkrone gemessen. Die Infiltrationsdauer betrug nach Regenereignissen im Winter lediglich 2 Stunden und simuliert somit einen „Wasseraufstau“ im oberen Deichbereich. Vor dem Infiltrationsversuch wurden Anfangsscherwiderstände τ_{fl} zwischen 60-110 kPa mit einer deutlichen Zunahme zur Tiefe hin ermittelt. Die Restscherwiderstände $\tau_{fl\text{-}rest}$ betrugen 20-40 kPa. Nach dem Infiltrationsversuch wurden die in Abbildung 19 dargestellten Scherwiderstände erfasst. Die zugehörigen, tiefenbezogenen Wassergehaltsveränderungen sind jeweils als Begleitmessung zum Infiltrationsversuch bestimmt worden (Abbildung 20). Beide Auswertungen zeigen eine große Schwankungsbreite der Versuchsergebnisse. Dies lässt sich u. a. auf Unterschiede in der Aggregatstruktur und Heterogenitäten im Deichbaumaterial zurückführen.

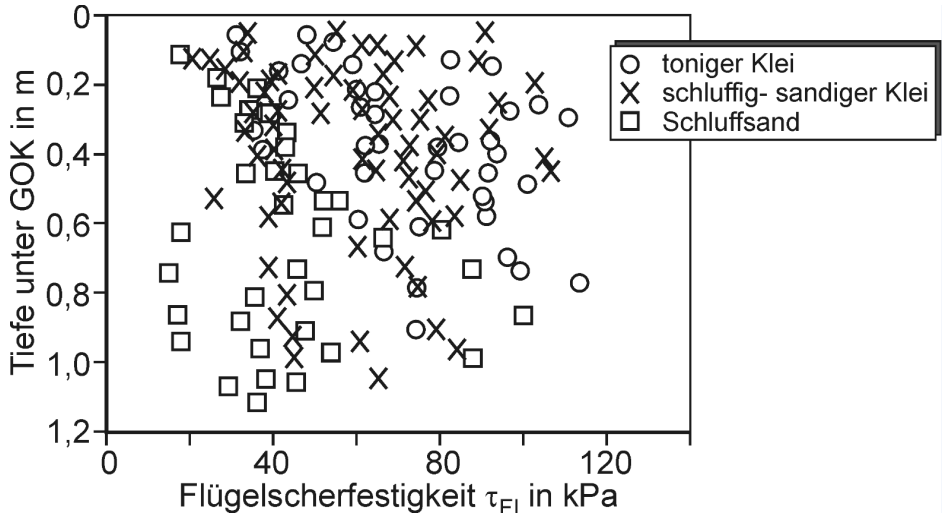

Abbildung 19: Verteilung der Anfangsscherfestigkeit nach 2-stündiger Infiltration.

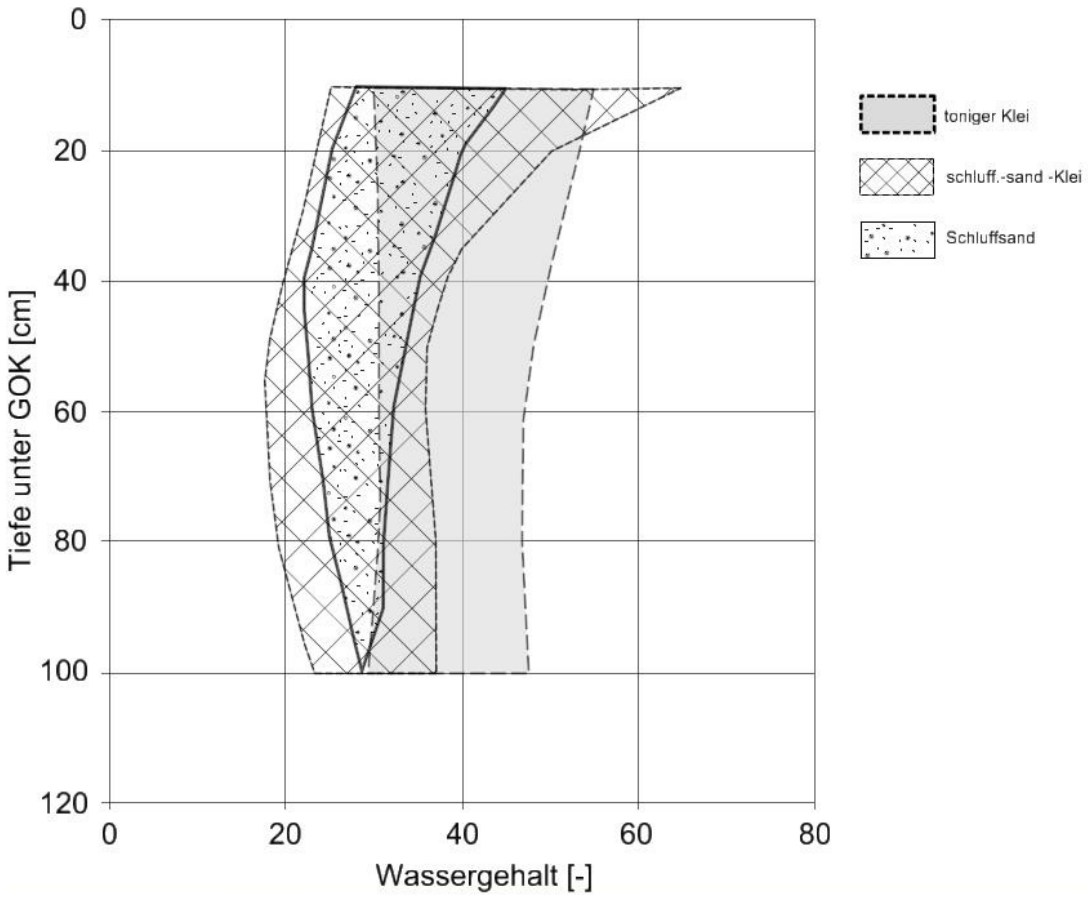

Abbildung 20: Verteilung der Wassergehalte nach 2-stündiger Infiltration.

In Abhängigkeit von der Bodenart lassen sich dennoch folgende allgemeine Aussagen treffen:

- Ein verhältnismäßig geringer Festigkeitsabfall gegenüber dem Ausgangswert vor der Infiltration ergibt sich beim tonigen Klei.
- Deutlich niedrigere, aber immer noch ausreichend hohe Anfangsscherfestigkeiten (c_u > 20 kPa) weist der sandige Klei auf.
- Im Schluffsand erfolgen starke Festigkeitsverluste.

Untersuchungen mit einer Handflügelsonde nach einem Starkregenereignis zeigen exemplarisch, dass die Scherfestigkeiten an der binnenseitigen Böschung (Bi) (Abbildung 21) am geringsten sind und keine Zunahme mit der Tiefe zuverlässig zu verzeichnen ist. An der Deichkrone (DK) sind die Scherfestigkeiten demgegenüber höher.

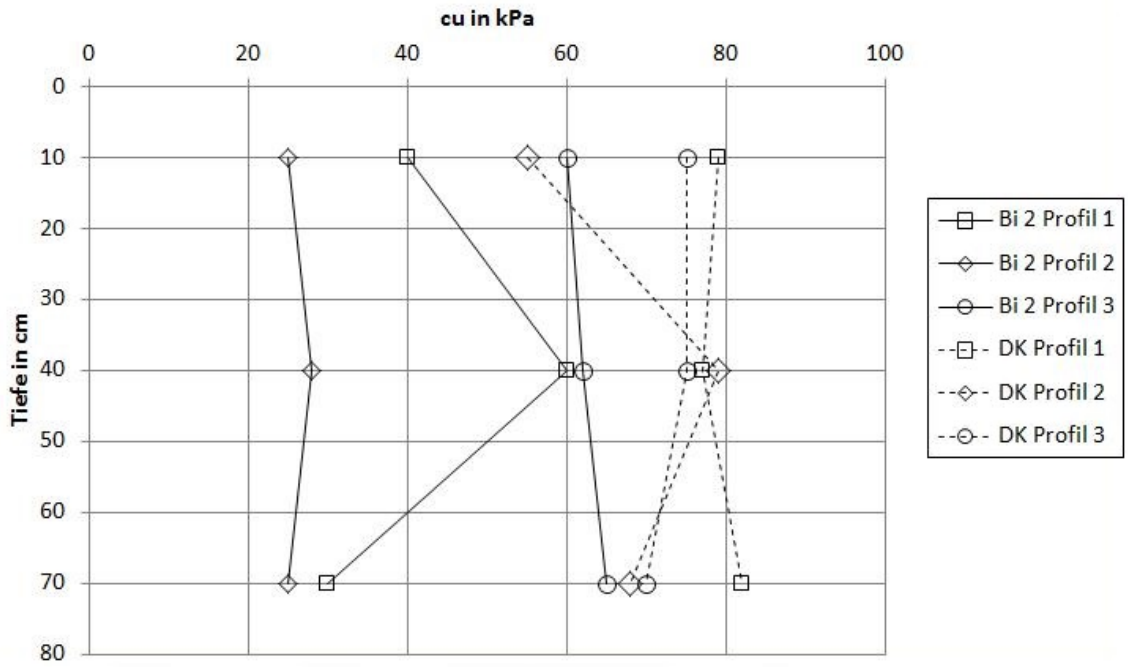

Abbildung 21: Messwerte für undränierte Scherfestigkeiten nach einem Starkregenereignis: Binnenböschung (Bi) und Deichkrone (DK).

Die gemessenen Scherfestigkeiten an der Außenböschung oberhalb der Treibselgrenze (AB6) sind bis zur Erkundungstiefe tendenziell geringer als unterhalb der Treibselgrenze (AB2) (Abbildung 22). Die lineare Zunahme bis zur Erkundungstiefe deutet darauf hin, dass eine oberflächennahe Aufweichung stattgefunden hat.

Die dargestellten Ergebnisse lassen sich dadurch erklären, dass die Deichabdeckung im Bereich unterhalb der Treibselgrenze im Rahmen der Deichpflege vermehrt befahren wird und dadurch der Boden eine Verdichtung erfährt. Dies geschieht in den übrigen Deichbereichen nicht, wodurch dort die Lagerungsdichte geringer ist und dadurch mehr Wasser bis in größere Tiefen infiltrieren kann. Diese prinzipiellen Beobachtungen wurden ebenfalls nach der Xaver-Sturmflut 2013 am gleichen Deich gemacht.

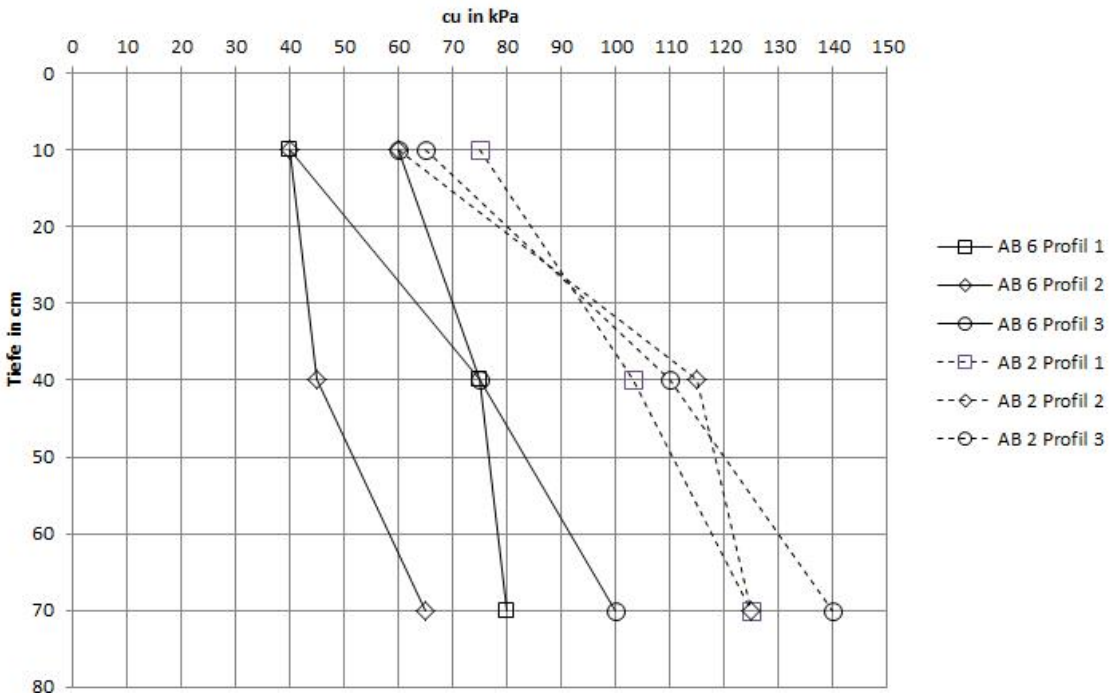

Abbildung 22: Messwerte für undränierte Scherfestigkeiten nach einem Starkregenereignis: Außenböschung (AB).

7.2.2 Laboruntersuchungen

Auch an annähernd ungestört entnommenen Bodenproben, die anschließend mehrere Tage im Labor bewässert wurden, bestätigen die mittels einer Handflügelsonde gemessenen Versuchsergebnisse die Bandbreite der Scherfestigkeitswerte der Abbildung 19 (siehe Temmler 2007).

7.2.3 Untersuchungen an Geschiebemergel

Bei aufgefüllten Geschiebeböden in Ostseedeichen handelt es sich kornanalytisch zumeist um schwachplastische Sande, Schluffe und Tone. Wegen der darin enthaltenen Kies- und Steinanteile lässt sich bei diesen Bodenarten die Anfangsscherfestigkeit vor Ort oder im Erdbaulabor i.d.R. nicht mit der Flügelsonde ermitteln. Hilfsweise wurde die undrainierte Scherfestigkeit in der Vergangenheit vielfach mit Hilfe eines Taschenpenetrometers an Proben ermittelt. Die Variationsbreite der untersuchten Proben mit einer erheblichen Streubreite der plastischen Eigenschaften reicht vom stark sandigen bis zum tonigen Lehm/ Mergel mit einigen Stichproben aus Beckenschluff.

Nach stichprobenartigen Untersuchungen an alten Ostseedeichen in Ostholstein kann zur Abschätzung der in Abhängigkeit von der Plastizität abzumindernden Anfangsscherfestigkeit c_u der bindigen Deckschicht näherungsweise auf die Zahlenwerte der Abbildung 23 zurückgegriffen werden.

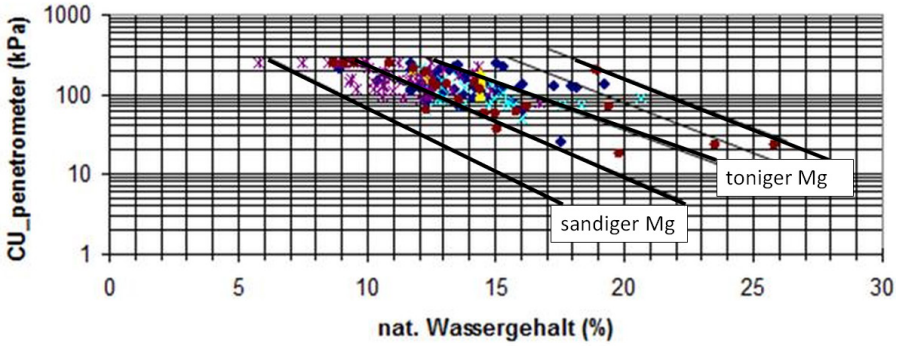

Abbildung 23: Anfangsscherfestigkeit vs. nat. Wassergehalt (Geschiebemergel).

8 Berechnungsverfahren

8.1 Vorbemerkungen

Generell sind bei der Bemessung eines Ästuar- oder Seedeiches gegen Wellenauf- und -überlauf die folgenden Bemessungssituationen zu unterscheiden:

(1) Bemessungssituation „A“
Untersuchung für den Ist-Zustand eines vorhandenen Deiches mit witterungsbedingt gealterter Deichabdeckung mit charakteristischen geotechnischen Eigenschaften und gefügebedingter Durchlässigkeit (vgl. Abschnitt 6.2.3) unter Berücksichtigung

- des Zustandes der Grasnarbe im Hinblick auf die Erosionsempfindlichkeit der bewachsenen Deichoberfläche,
- einer Durchnässung der bindigen Abdeckung mit Aufweichung des Bodens unter dem Wurzelfilz hinsichtlich der Gleitsicherheit der Binnenböschung,
- eines Grundwasseraufstaus im Deich mit jahreszeitlich hohem Wasserstand im Deichkern wegen fehlender Drainage.

(2) Bemessungssituation „B“
Planung einer Deichverstärkung auf der Grundlage des Deich-Istzustandes und des vorhandenen Deichbaustoffes aus einer Bodenentnahme unter Berücksichtigung

- eines zulässigen Grundwasseraufstaus im sandigen Deichkern,
- der Erosionsempfindlichkeit des Deichbaustoffes ohne schützende Grasnarbe,
- der zu erwartenden witterungsbedingten Veränderungen der ursprünglichen geotechnischen Eigenschaften und des Bodengefüges im Deichbaumaterial,
- ggf. vergleichender Untersuchungen verschiedener Bodenentnahmen im Hinblick auf ein für die Deichabdeckung bei den vorhandenen Gegebenheiten optimales Baumaterial (Qualität, Transportentfernung, Vorbehandlung von wassergesättigtem Boden durch Zwischentrocknung in Mieten (Zeitfaktor)). Zu diesem Punkt wird auf die Ausführungen in der EAK 2002 verwiesen.

Für den Stabilitätsnachweis eines Altdeiches mit seiner charakteristischen Bodenstruktur gegen Wellenauf- und -überlauf ist die rechnerische Ermittlung einer zulässigen Infiltrationsrate (Weißmann 2003, Richwien et. al. 2010) als Kriterium unbrauchbar; vielmehr müssen bei der Standsicherheitsanalyse die örtlichen Besonderheiten, speziell die Ist-Mächtigkeit und das Gefüge der vorhandenen Deichabdeckung, berücksichtigt werden.

Die Nachweise gegen Schäden durch Wellenschlag und das Abrutschen der Binnenböschung (hangparalleles Gleiten) sind Nachweise des Verlustes der Gesamtstandsicherheit (GEO-3) nach DIN 1054:2010-12. Der Ausnutzungsgrad gibt das Verhältnis des Bemessungswertes der Einwirkungen zum Bemessungswert der Widerstände an, wobei der Teilsicherheitsbeiwert auf der Widerstandsseite auf die Scherfestigkeit bezogen wird. Formal wird bei der statischen Bemessung das Kräftegleichgewicht in vorgegebenen bzw. ungünstigen Gleitfugen überprüft.

Die Standsicherheitsberechnung für Böschungen erfolgt nach der DIN 4084:2009-01 unter Berücksichtigung der DIN 1054:2010-12 in Verbindung mit dem Eurocode 7 (DIN EN 1997-1:2009-09). Dabei sind alle, die Standsicherheit des Deiches beeinträchtigenden Fälle zu untersuchen und nachzuweisen.

In der bodenmechanischen Literatur über Deichabdeckböden werden für den Nachweis gegen böschungsparalleles Gleiten der Grasnarbe auf der Deichbinnenböschung bei starker Durchnässung infolge von lang anhaltenden Starkniederschlägen oder Wellenüberlauf die folgenden Rechenansätze verwendet:

(i) die undrainierte Scherfestigkeit c_u bzw. τ_{fl} in Verbindung mit Partialsicherheiten nach DIN 1054:2010-12 (Richwien und Niemeyer 2008, Richwien 2009)
(ii) die effektiven Scherfestigkeitsparameter φ' und c' (Weißmann 2003) mit Ansatz einer zusätzlichen Kohäsion zur Berücksichtigung der Festigkeit von Graswurzeln im Übergangsbereich zwischen der Grasnarbe und dem oberflächlich gerissenen bindigen Deichabdeckboden (Young 2005).

Die Berechnung mit effektiven dränierten Scherparametern wird damit begründet, dass das Verhalten des tonreichen Deichabdeckbodens durch seine Rissstruktur bestimmt wird und deshalb durch die geringen Dränagewege eine dränierte Reaktion auf eine Zusatzbelastung zu erwarten ist. Des Weiteren erfolgen die Prozesse für die geotechnischen Nachweise nicht so schnell, dass undränierte Reaktionen im Boden zu erwarten sind. Dennoch ist es ratsam, die Nachweise für undränierte sowie dränierte Verhältnisse zu führen. Beim Ansatz der Wurzelkohäsion sind die Werte nach dem MSD (2011) zu empfehlen.

8.2 Abrutschen und Abheben

8.2.1 Abrutschen

Bei wiederholtem Wellenüberlauf über die Deichkrone kommt es zu einer Überströmung und zur Aufsättigung der bindigen Deckschicht auf der Binnenböschung. Für eine hangparallele Gleitfuge in der Tiefe d_G einer homogenen, gesättigten Bodenschicht ergibt sich mit den Bezeichnungen aus Abbildung 24 folgende Gleichung für den Ausnutzungsgrad μ (siehe auch Richwien et al. 2010):

$$\mu = \frac{\gamma_G\,(\gamma_r\, d_G \sin\beta + i\,\gamma_w\, d_G \sin\alpha) + \gamma_Q\,\gamma_w\, h_w\, I_E}{\frac{c_u}{\gamma_{cu}}} \qquad (1)$$

mit $i = \frac{h_w}{h_w + d_G}$

Hierin sind γ_G, γ_Q und γ_{cu} die Teilsicherheitsbeiwerte für den GEO 3-Nachweis gemäß DIN 1054. I_E ist das Energiegefälle des überströmenden Wassers.

Der Winkel α kennzeichnet die Strömungsrichtung des in die Deckschicht infolge Wasserüberstau einsickernden Wassers. In einer homogenen Schicht wäre hier α = 0 (Eindringen senkrecht zur Böschungsoberfläche) anzusetzen. Bei einem stark aggregierten, mit Rissen durchsetzten Boden kann aber im ungünstigsten Fall auch ein Winkel von α = 90° und damit eine böschungsparallele Durchströmung anzusetzen sein (Pohl 2010). Die übrigen Abkürzungen ergeben sich aus der Abbildung 24.

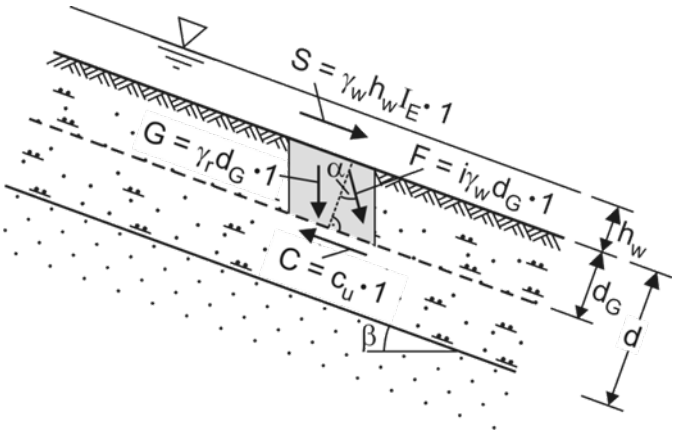

Abbildung 24: Systembild für hangparalleles Gleiten der Deckschicht (in Anlehnung an Richwien et al. 2010).

Ein entscheidender Parameter im oben dargestellten Nachweis ist die undränierte Scherfestigkeit des Kleibodens c_u. In einer homogenen Bodenschicht nimmt der Ausnutzungsgrad mit zunehmender Dicke der betrachteten Schicht d_G bzw. Tiefe der Gleitfuge zu; maßgebend wäre entsprechend die tiefest mögliche Gleitfugenlage, d. h. die Unterkante der betrachteten Deckschicht.

Tatsächlich ist die undränierte Scherfestigkeit aber nicht konstant. Sie ist wassergehaltsabhängig und deshalb unter Berücksichtigung der (zeitabhängigen) Aufsättigung der Deckschicht zu ermitteln. Eine Aufsättigung erfolgt durch Vordringen der Infiltrationsfront bei Wellenüberlauf der Deichkrone bzw. nach vorangegangenen intensiven Niederschlägen hauptsächlich in der Winterperiode. Ausführungen zur Wassergehaltsabhängigkeit der undränierten Scherfestigkeit enthält Abschnitt 7.

Wegen der im Allgemeinen starken Reduktion der Scherfestigkeit bei Aufsättigung wird die kritische Gleitfuge in der Regel die Unterkante des infiltrierten Bodenbereichs sein. Nach Pohl (2010) kann d_G näherungsweise mit der Dicke der Hauptrisszone d_R gleichgesetzt werden, da die Infiltrationsfront im Zuge eines in der Regel nur wenige Stunden dauernden Wellenüberlaufs bei Sturmflut nur unwesentlich vorankommt.

Wertet man Gleichung (1) hinsichtlich der für ausreichende Standsicherheit erforderlichen undränierten Scherfestigkeit aus, so ergibt sich für eine Böschungsneigung von 1:3 (β = 18,4°), dass selbst bei einer Gleitfugentiefe von 1,5 m (und entsprechend tief reichender Aufsättigung des Bodens) ausreichende Standsicherheit für c_u > 10 kPa besteht (ermittelt mit Sättigungswichte γ_r = 18 kN/m³, Schichtdicke des ablaufenden Wassers h_w = 0, Wichte des Wassers γ_w = 10 kN/m³). Für eine Gleitfugentiefe von 1 m wäre entsprechend bereits c_u = 7 kPa ausreichend. Selbst bei Ansatz einer Überstauhöhe von h_w = 0,2 m und eines Winkels der Strömungskraft von α = 90° sind die erforderlichen undränierten Scherfestigkeiten nur geringfügig größer, nämlich rd. 13 kPa für d_G = 1,5 m und rd. 10 kPa für d_G = 1 m.

Bei für Deichabdeckschichten geeigneten Bodenarten nach EAK (2002) kann deshalb davon ausgegangen werden, dass im Allgemeinen ausreichende Standsicherheit gegen hangparalleles Gleiten bei den üblichen Neigungen der Binnenböschung von 1:3 besteht. Ein rechnerischer Nachweis wäre demnach nur in Ausnahmefällen erforderlich. In solchen Fällen empfiehlt sich die Bestimmung der Scherfestigkeit durch in situ- oder Laborversuche.

Es sei ergänzend darauf hingewiesen, dass die Standsicherheit gemäß niederländischen Richtlinien (TAW 2001) nach dem „Edelman-Joustra"-Kriterium und damit unter Zugrundelegung der effektiven Scherparameter φ' und c' der Deckschicht zu bewerten ist. Für den Bruchzustand (ohne Teilsicherheitsbeiwerte) gilt hiernach (van Hoven et al. 2008):

$$\frac{d \tan\varphi'(\gamma_r - \gamma_w) \cos\beta + c'}{d\, \gamma_r \sin\beta} = 1 \qquad (2)$$

Diese Gleichung ergibt sich unter Ansatz einer böschungsparallelen Durchströmung der Deckschicht.

Van Hoven et al. (2010) berichten, dass die in Überströmungsversuchen in situ gemessenen Porenwasserdrücke in einer bindigen Deckschicht über einem Sandkern insgesamt kleiner waren als der zu Gleichung (2) gehörende Porenwasserdruck. Sie schließen daraus, dass für den untersuchten Fall kein Standsicherheitsproblem besteht.

8.2.2 Abheben

Infolge des Aufstaus von Wasser im Deichkern kommt es zu einem Wasserdruck an der Unterkante der bindigen Deckschicht. Der größte Wasserdruck entsteht am Fuß der Böschung, weshalb der maßgebende Gleitkörper dort seinen Ausgangspunkt nimmt.

Richwien et al. (2010) haben einen Bruchkörper der Breite b betrachtet (Abbildung 25), für den sich folgende treibende und haltende Kräfte ergeben:

- treibend: $$W = \gamma_w\,(h - 0{,}5\, b \sin\beta)\, b \qquad (3)$$
- haltend: $$G \cos\beta + 2\, C = \gamma_r\, b\, d \cos\beta + 2\, c_u\, d \qquad (4)$$

Richwien et al. (2010) schlagen vor, einen GEO 3-Sicherheitsnachweis gemäß DIN 1054 zu führen. Die treibende Kraft W wäre hierin als ungünstige Einwirkung mit $\gamma_Q = 1{,}2$ (Bemessungssituation BS-T) und die Komponente G cos β der Gewichtskraft als günstige Einwirkung mit $\gamma_{G,inf} = 1{,}0$ zu berücksichtigen. Auf der Widerstandsseite wäre die undränierte Kohäsion mit $\gamma_{cu} = 1{,}15$ abzumindern. Der Ausnutzungsgrad ergibt sich dann wie folgt:

$$\mu = \frac{\gamma_{G,inf}\, G \cos\beta + \gamma_Q\, W}{2\, C/\gamma_{cu}} = \frac{\gamma_{G,inf}\, \gamma_r\, b\, d \cos\beta + \gamma_Q \gamma_w\, (h - 0{,}5\, b \sin\beta)\, b}{2\, \frac{c_u}{\gamma_{cu}}\, d} \qquad (5)$$

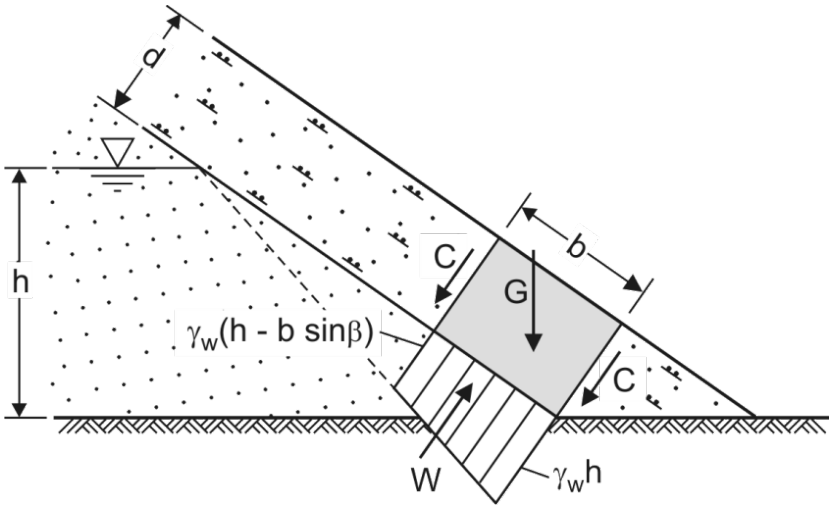

Abbildung 25: Systembild für Abheben der Abdeckung (nach Richwien et al. 2010).

Die Breite des betrachteten Bruchkörpers b ist zu variieren, um den maßgebenden Bruchkörper mit dem größten Ausnutzungsgrad zu finden.

Nach den Vorstellungen von Richwien et al. (2010) wäre der im Sturmflutfall zu erwartende Aufstau im Deichkern unter Berücksichtigung der Deckschichtdurchlässigkeit bzw. der durchsickernden Wassermenge zu berechnen und dem zulässigen Aufstau gegenüberzustellen. Eine ähnliche Vorgehensweise schlagen auch van Hoven et al. (2010) vor, allerdings unter Ansatz einer konservativ geschätzten bzw. anhand von Messungen ermittelten Infiltrationsmenge.

Ein ganz entscheidender Faktor hinsichtlich des Wasserstands im Deich ist – abgesehen vom Bauzustand mit einem über längere Zeit wirksamen sehr hohen Spülwasserstand – natürlich der zu Beginn einer Sturmflut vorhandene Wasserstand. Der Wasserstand im Deichkern ist entscheidend von den Dränagemöglichkeiten im Deichuntergrund und Deichkern, der Deichgeometrie und den vorangegangenen Witterungsverhältnissen abhängig.

Es ist zu bedenken (siehe Abschnitt 6.2.1), dass die Eigenschaften der Deckschicht erst in zweiter Linie maßgeblich für die Höhe des Wasserstands im Deich und damit für die Standsicherheit gegen Abheben sind. Außerdem kann die Durchlässigkeit der aggregierten bindigen Deckschicht auch nicht entscheidend beeinflusst werden, vgl. Zitat in TAW (1996): „Based on the above, it does not seem possible to influence the permeability of clay coverings in the longer term by applying a certain type of natural clay. The permeability of the clay top layers will almost always lie between 10^{-6} and 10^{-5} m/s for the above reasons."

Im Regelfall erscheint die funktionale Bemessung der Kleideckschicht hinsichtlich eines zulässigen Aufstaus im Deichkern daher verzichtbar. Der Nachweis gegen Abheben der Abdeckung ist natürlich zu erbringen, nur lässt sich das Ergebnis nicht bzw. kaum zuverlässig durch die Wahl eines speziellen Abdeckmaterials beeinflussen. In der Vergangenheit äußerte sich ein unzureichender Nachweis gegen Abheben durch ein lokales Aufbrechen und somit einer kleinräumigen Entlastung an der Binnenböschung (siehe Abschnitt 6.2.2).

8.3 Grasnarbe

Jüngste Naturuntersuchungen mit dem „Wave Overtopping Simulator" an Seedeichen in den Niederlanden und den USA (van der Meer et. al. 2008, 2009), wie auch neue an einem sodenbedeckten Versuchsdeich im Großen Wellenkanal der Universitäten Hannover und

Braunschweig (Piontkowitz et. al. 2009) im Rahmen des EroGRASS Projekts durchgeführte Wellenüberlaufversuche, zeigten die große Widerstandsfähigkeit einer guten Grasnarbe bis hin zu Überlaufraten von 30 l/s/lfdm.

Vavrina (2011) hat ein Verfahren zur Bewertung der Qualität der Grasnarbe entwickelt, in dem der Bedeckungsgrad (d. h. die Geschlossenheit des Bewuchses), die Durchwurzelungsintensität und das Verhältnis der Festigkeit des durchwurzelten und des nicht durchwurzelten Bodens berücksichtigt werden.

Bis zum Erreichen der optimalen Grasnarbe in der Natur muss jedoch der Abdeckboden selbst eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen Aufweichen, Erosion und Abheben im Bereich des Böschungsfußes infolge eines Wasserüberdrucks im sandigen Deichkern aufweisen. Eine frisch geschüttete und verdichtete Deichabdeckung besitzt im Gegensatz zu einem durch Witterungsvorgänge gealterten Abdeckboden eine deutlich geringere Wasserdurchlässigkeit bzw. Infiltrationsrate. Die Scherfestigkeit (Kohäsion bzw. Anfangsfestigkeit) kann jedoch deutlich geringer sein, so dass für den Zustand nach der Deichfertigstellung ein Nachweis der Erosionsbeständigkeit unter der Grenzbelastung ohne Grasnarbe angebracht ist. Dies ist nicht Gegenstand dieses Statusbericht; hierzu wird auf die Untersuchungen von van der Meer et. al. (2009) und Pohl (2010) verwiesen.

9 Maßnahmen zur Sicherheitserhöhung

Als Ergebnis der Zustandsermittlung (Abschnitt 3.2) können sich Zweifel an einer ausreichenden Deichsicherheit ergeben. In diesem Fall sind weitergehende Untersuchungen zur Erlangung genauerer Informationen (siehe Abschnitt 3.2) bzw. die nachfolgenden Maßnahmen zur Sicherheitserhöhung zu empfehlen.

In Anbetracht der prognostizierten Klimaänderungen mit einhergehendem Meeresspiegelanstiegs sowie Klimaextremen (Dürre, lokale Starkniederschläge) gewinnen die nachfolgenden empfohlenen Maßnahmen zudem an Bedeutung (siehe Abschnitt 10).
Als Maßnahmen zur Sicherheitserhöhung kommen beispielsweise in Betracht:

- Ertüchtigung der Grasnarbe und deren Versorgung mit ausreichenden Nährstoffen
- Filterstabile Drainierung beobachteter Nass-Stellen am Binnendeichfuß mittels Rigolen oder durch Tiefendränage
- Regelmäßige Zerstörung/Verfüllung der Gänge von Bodenwühlern (Wühlmäuse, Maulwürfe)
- Verwendung von geeignetem bis gut geeignetem Abdeckboden gemäß EAK 2002 im Zuge einer weiteren Deichverstärkung (Erhöhung, Abflachung der Böschungen) bei ausreichender Verzahnung der neu aufgebrachten Deckschicht mit dem unterlagernden Abdeckboden
- Verstärkung der bindigen Abdeckung der Deichbinnenböschung auf eine Mindeststärke von ca. 1,0 m (soweit nicht bereits erfolgt) als langfristige Maßnahme
- Stichprobenartige Qualitätskontrolle der vorhandenen Deichabdeckung durch Bohrungen in den bisher nicht untersuchten bzw. nach modernen Gesichtspunkten verstärkten Deichabschnitten zur vorausschauenden Vorplanung bzw. Abgrenzung gefährdeter Deichabschnitte mit zugehörigen Standsicherheitsbetrachtungen
- Für die Deichabschnitte mit unzureichender Qualität des Abdeckbodens kommen besondere Sicherungsmaßnahmen z. B. mit Geotextilien in Betracht, für die jedoch noch detaillierte Eignungsnachweise zu erbringen sind.

- Verringerung der hydraulischen Belastung durch Anhebung des Vorstrandniveaus, Wellenbrecher, Bermen, etc.
- Ggf. Ertüchtigung des Deichuntergrundes
- Ein widerstandsfähiges Deckwerk bei scharliegenden Deichen und als Vorlandschutz

10 Empfehlungen und Ausblick

Als erstes empfiehlt es sich Informationen über die Deichquerschnitte/-abschnitte (Abschnitt 3.2) zusammenzutragen, auszuwerten und somit deren Zustand zu bewerten. Aus dem Ergebnis resultieren ggf. weitere erforderliche Schritte (Abschnitt 3.2 und 9) und Detailanalysen (Abschnitt 8).

Zur Risikobeurteilung der Deichstandsicherheit unter dem besonderen Aspekt des Wellenüberlaufs empfiehlt es sich dabei, für die vorhandene Deichabdeckung die folgenden allgemeinen Bewertungskriterien zu Grunde zu legen:

(1) Empfohlene Grenzwerte für Deichabdeckungen nach EAK 2002
(2) Annahme der gealterten Deichabdeckung mit einer Durchlässigkeit k_f-Wert $1x10^{-4}$ m/s
(3) Annahme der Scherfestigkeit aufgrund von Erfahrungswerten gemäß dieses Statusberichts bzw. durch gemessene undrainierte Scherfestigkeiten nach dem Infiltrations- oder Bewässerungsversuch
(4) Beobachtete Sickerwasseraustritte aus der Deichböschung als Hinweis auf einen hohen Grundwasserstand im sandigen Deichkern und andere Auffälligkeiten
(5) Berechnung der Deichstandsicherheit unter Zugrundelegung der aktuellen bzw. prognostizierten physikalischen Zustandsgrößen

In Anbetracht der prognostizierten Klimaänderungen mit einhergehendem Meeresspiegelanstieg sowie Klimaextremen (Dürre, lokale Starkniederschläge) ergeben sich folgende Herausforderungen für die existierenden Deiche:

- Ohne eine Deicherhöhung werden höhere Wellenüberlaufraten auftreten. Wie in den vorangehenden Abschnitten hergeleitet, spielen für die Widerstandsfähigkeit des Deiches eine intakte Grasnarbe und eine ausreichende Qualität der Deichabdeckung eine maßgebende Rolle.
- Durch Dürreperioden kann die Grasnarbe jedoch nachhaltig geschädigt werden. Hierbei spielen das Wasserspeichervermögen des Deichabdeckmaterials sowie der Deichaufbau (Sandkern) eine Rolle. Ferner werden Schrumpfrisse in der Deichabdeckung entstehen.
- Bei nachfolgenden Starkniederschlägen oder Sturmflutereignissen (Sommersturmflut) kann Wasser durch die Schrumpfrisse tiefer und schneller in die Deichabdeckung vordringen und die Scherfestigkeit herabsetzen, wodurch die Deichsicherheit reduziert wird.
- Gleiches gilt im übertragenen Sinne auch für die seeseitige Deichabdeckung unter Wellenangriff.

Weitere Untersuchungen mit messtechnischen Instrumentierungen an bestehenden Deichen sollten durchgeführt werden, um die Überlaufraten für diverse Randbedingungen

quantifizieren und eingrenzen zu können, denen der Deich widerstehen kann. Hierbei bietet sich eine interdisziplinäre wissenschaftliche Zusammenarbeit an.

Für erforderliche Deicherhöhungen bietet es sich an, geeignetes Material aus dem bestehenden Deich wieder zu verwenden. Bei Mindermengen sollte auch die Verwendung von geeignetem Baggergut in Erwägung gezogen werden.

11 Literaturverzeichnis

Achmus, M.; Pohl, M.; Temmler, H.: Sickervorgänge in Seedeichen – Eigenschaften von Kleiabdeckungen und ihre Auswirkungen auf die Standsicherheit der Binnenböschung. Kolloquium des Forschungszentrums Küste (FZK), Hannover, 2013.

Akkermann, G. J.; Van Gerven, K. A. J.; Schaap, H. A.; van der Meer, J. W.: Wave Overtopping Erosion Tests at Groningen Sea Dike. ComCoast WP3-16, 2007.

Carstensen, D.: Die Bedeutung von Eisbelastungen für die Planung und konstruktive Gestaltung wasserbaulicher Anlagen. Technische Universität Dresden, 2008.

Collell, M. C.: Erosion of embankments. Floodsite Report T04-08-03, HR Wallingford, 2009.

DIN 1054:2010-12: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1.

DIN 4084:2009-01: Baugrund – Geländebruchberechnungen.

DIN 18137-2:2011-04: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 2: Triaxialversuch.

DIN 19712:2013-01: Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern

DIN EN ISO 22476-9:2014-04: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen – Teil 9: Flügelscherversuch.

DIN EN 1997-1:2014-03: Eurocode 7 – Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1:2004 + AC:2009 + A1:2013.

DIN EN 1997-2:2010-10: Eurocode 7 – Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds; Deutsche Fassung EN 1997-2:2007 + AC:2010.

DWA-M-507-1: Deiche an Fließgewässern – Teil 1: Planung, Bau und Betrieb, 2011.

EAK: Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken durch den Ausschuss für Küstenschutzwerke. Die Küste, 65, 2002, korrigierte Ausgabe 2007.

Gebert, J.; Timmers, V.; Gröngröft, A.; Grabe, J.: Verwertung von behandeltem Baggergut als Ersatzbaustoff im Deichbau. In: Tagungsband HTG-Kongress 2014, Berlin, 21.–23. Mai, 2014.

Klinge, W.: Betrachtungen zu den Höhen der Deiche an Elbe und Weser. In: Die Küste, 10, 2, 69–85, 1962.

Die Küste. Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee, 10, 1, 1962.

Die Küste. Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee, 10, 2, 1962.

Die Küste. Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee, Sturmfluten, 33, 1979.

Möller, J.; Weißmann, R.; Schüttrumpf, H.; Grüne, J.; Oumeraci, H.; Richwien, W.; Kudella, M.: Interaction of Wave Overtopping and Clay Properties for Seadikes. Proceedings of the 28th International Conference Coastal Engineering, 2002.

MMB: Merkblatt Materialtransport im Boden, Bundesanstalt für Wasserbau, 2013.

MSD: Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen, Bundesanstalt für Wasserbau, 2011.

Nuber, T.; Pohl, M.: Geotechnical investigations on dike materials as a basis for a holistic numerical model, Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction, Rostock, 10.–12. April 2014.

Petersen, M.; Rhode, H.: Sturmflut – Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe. Karl Wachholtz Verlag, 1991.

Piontkowitz, T.; Verhagen, H. J.; Verheij, H.; Mai Cao, T.; Dassanayake, D.; Zielinski, M.; Roelvink, D.; Kont, A.; Ploompu, T.: EroGRASS – Failure of Grass Cover Layers at Seaward and Shoreward Dikle Slopes. Design, Construction and Experimental Procedure, EroGrass User Group, Lemvig/Denmark, 2009.

Pohl, C.: Witterungsbedingte Gefügebildung bei See- und Ästuardeichen und ihr Einfluss auf die Deichsicherheit. VGE Verlag GmbH, Report Geotechnik, Universität Duisburg-Essen, 38, 2010.

Richwien, W.; Weißmann, R.: Untersuchung zur Quantifizierung der Sicherheitsreserven von Seedeichen, im Auftrag des Amtes für Landwirtschaft und Wasser Heide und des III. Oldenburgischen Deichbandes, Untersuchungsberichte der Feldmessungen in Schleswig-Holstein (Teil 1; 1996) und Niedersachsen (Teil 3; 1998).

Richwien, W.; Niemeyer, D.: INTBEM „Integrierte Bemessung von See- und Ästuardeichen“, Förderkennzeichen: 03 KIS 061, 03 KIS 062, Statusbericht 9/2008.

Richwien, W.: INTBEM A – Analyse bodenmechanischer Prozesse zur funktionalen Optimierung von Deichelementen. – Vortrag 14. KFKI Seminar zur Küstenforschung in Bremerhaven, 28.10.2009.

Richwien, W.; Pohl, C.; Vavrina, L.: Bemessung von Deichen gegen Einwirkungen aus Sturmfluten. In: Die Küste, 77, 1–45, 2010.

Rödenbeek, G.: Über Deichbau und Überflutungen in den Hamburger Elbmarschen (vor der Flut von 1962). In: Die Küste, 29, 1976.

Saathoff, F.; Große, A.; Nitschke, E.: Deichdeckschichten aus feinkörnigem Baggergut aus dem Ostseeraum, Tagungsband HTG-Kongress 2014, Berlin, 21.–23. Mai 2014.

Saathoff, F.; Cantré, S.: Empfehlungen zur Verwendung von Baggergut im Deichbau. In: Geotechnik, 2, 2016.

Schulze, E.; Muhs, H.: Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. Springer Verlag 1967.

Schüttrumpf, H.; Oumeraci, H.: Schäden an See- und Stromdeichen. In: Mitteilungen des Leichtweiss-Institutes der Technischen Universität Braunschweig, 149, 128–171, 2002.

TAW : Technical Report „Clay for Dikes“. Technical Advisory Committee for Flood Defence in The Netherlands, Delft, 1996.

TAW: Technical Report on Soil Structures. Technical Advisory Committee for Flood Defence in The Netherlands, Delft, 2001.

Temmler, H.: Über Grundwasserstandsbeobachtungen in Deichen. In: Hansa, 141, 8, 51–58, 2004.

Temmler, H.: Untersuchungen an Deichabdeckböden in Schleswig-Holstein zur Durchsickerung und Aufweichung infolge Wellenüberlaufs bei Extremsturmfluten. Gutachtliche Stellungnahme (unveröffentlicht), Altenholz, 2006.

Temmler, H.: Neue Untersuchungen zur Schrumpfung, Durchsickerung und Aufweichung von Deichabdeckböden bei Extremsturmfluten in Schleswig-Holstein. In: Die Küste, 72, 27–63, 2007.

Temmler, H.: Sickervorgänge in Deichen und ihre Auswirkungen auf die Sturmflutsicherheit. Workshop „Aus der Arbeit des Fachausschusses Küstenschutzwerke, Strategien, Sicherheit und Bemessung“, 11.2., Hamburg, 2009.

Temmler, H.; Filipinski, M.: Gutachten des Landesamtes für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein. Abt. Geologie/Boden zur Stabilität von Landesschutzdeichen bei Wellenüberlauf an der Westküste und Elbe in Schleswig-Holstein. Teilbericht I: Untersuchungen an vorhandenen Deichen, 1997.

van der Meer, J.; Steendam, G.; de Raat, G.; Bernardini, P.: Further developments on the wave overtopping simulator. Proceedings of the 31st International Conference Coastal Engineering, 2008.

van der Meer, J.; Schrijver, R.; Hardeman, B.; Van Hoven, A.; Verheij, A.; Steendam, G.: Guidance on erosion resistance of inner slopes of dikes from three years of testing with the Wave Overtopping Simulator. Stand: 25.01.2021: http://www.vandermeerconsulting.nl/downloads/2009_vandermeer_schrijver.pdf, 2009.

van Genuchten, M.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. SOIL SCI. SOC. AM. J., 44, 1980.

van Hoven, A.; Zwanenburg, C.; Kruse, G. A. M.: Strength of clay with soil structure during wave overtopping. 11th Baltic Sea Geotechnical Conference, Gdansk/Poland, 2008.

van Hoven, A.; Hardeman, B.; van der Meer, J. W.; Steendam, G. J.: Sliding stability of landward slope clay cover layers of sea dikes subject to wave overtopping. International Conference of Coastal Engineering (ICCE), Shanghai/China, 2010.

Vavrina, L.: Bewertung der Schutzfunktion bewachsener Deichbinnenböschungen gegen Erosion. VGE Verlag GmbH, Report Geotechnik, Universität Duisburg-Essen, 39, 2011.

Weißmann, R.: Die Widerstandsfähigkeit von Seedeichbinnenböschungen gegenüber ablaufendem Wasser. Verlag Glückauf GmbH, Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik der Universität Duisburg-Essen, 30, 2003.

Weißmann, R.; Richwien, W.: Ein Bewertungsverfahren für Klei im Deichbau. In: Hansa, 7, 140. Jg., 2003.

Young, M.: Wave Overtopping and Grass Cover Layer Failure on the Inner Slope of Dikes. UNESCO-IHE, Institute for Water Education. 06.2005.

Zitscher, F.-F.: Analyse zur Bemessung von Außenböschungen scharliegender Seedeiche gegenüber Wellenbeanspruchung. Bericht (unveröffentlicht), 1962.

Zwanenburg, C.: Full scale stability tests, BAW-Kolloquium am 29.09.2016. Stand: 25.01.2021: https://izw.baw.de/publikationen/kolloquien/0/08_D%C3%A4mme-und-Deiche_Gesamtband.pdf, 2016.