



## 44. IWASA

Internationales Wasserbau-Symposium  
Aachen 2014

**Wasserbauliches Versuchswesen –  
Aus Anlass der Neuen Wasserbauhalle  
des IWW**

9. und 10. Januar 2014



# **DredgDikes – Experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von Baggergut im Deichbau**

Fokke Saathoff und Stefan Cantré

## **Abstract**

In the project DredgDikes with partners from Poland and Germany different dredged materials from the South Baltic Sea region are investigated with respect to their application in dike construction. Two large-scale experimental dikes have been built, one in Germany and one in Poland. Additionally, an extensive laboratory testing programme has been realised and a considerable monitoring test programme will be followed. Based on a general description of the project this paper covers the issue of installation technology for the dredged materials used, which geosynthetic elements are helpful to get a good dike cover layer, how about seepage and overtopping streaming and a discussion of geotechnical parameters to be determined for material evaluation and quality control.

## **Zusammenfassung**

Im Projekt DredgDikes werden verschiedene Chargen feinkörnigen, organischen Baggerguts auf ihre Eignung als Deichdeckschichtmaterialien untersucht. Das Projekt mit Partnern aus Deutschland und Polen wird vom South Baltic Programme der EU gefördert. In drei Hauptsäulen wird untersucht, wie sich das feinkörnige Baggergut nach ausschließlicher Reifung auf Trocknungsfeldern einsetzen lässt, welche Geokunststoff-Systeme verwendet werden können, um die Deckschichten noch sicherer zu gestalten und ob es Ziel führend ist, sowohl Deichkern als auch Deichdeckschicht aus Sand-Asche-Mixturen herzustellen. Während der Einsatz von Aschen maßgeblich an der TU Danzig untersucht wird, sind die ersten beiden Säulen Gegenstand der Forschung an der Universität Rostock. In diesem Beitrag wird ein Überblick über das Projekt gegeben und die wichtigsten Ergebnisse werden vorgestellt, darunter Ergebnisse von Einbautests, Durchsickerungs- und Überströmungsversuchen auf dem großmaßstäblichen Versuchsdeich, der eigens für das Projekt errichtet wurde.

## **1 Allgemeines**

Ostseedeiche werden in der Regel aus einem standsicheren Sandkern und einer erosionsicheren Deckschicht hergestellt. In Mecklenburg-Vorpommern sind die Deiche in vielen Fällen in ein mehrstufiges Küstenschutzkonzept integriert und liegen deshalb nicht schar. Dies lässt die Verwendung von Mergel und einer dünnen Oberbodenschicht

zur Begrünung als Deckschichtsystem zu. Da der Abbau von Mergelvorkommen für Deichsanierungen oder -neubauten einen großen Eingriff in die Umwelt darstellt, wird seit längerem überlegt, alternative Baustoffe zur Herstellung der Deckschichten einzusetzen.

Nassbaggergut fällt im Rahmen von Fahrrinneninstandhaltung und -vertiefung in Häfen und Wasserstraßen regelmäßig in großen Mengen an. Größtenteils besteht das Nassbaggergut aus unkontaminierten sandigen Sedimenten, die üblicherweise im Gewässer umgelagert bzw. in der Ostsee verklappt wird. Die feinkörnigen Sedimente müssen in der Regel an Land gebracht werden, wo sie dem Abfallrecht unterliegen, selbst wenn es sich um nicht kontaminierte Sedimente handelt. Als Abfall zur Verwertung steht bei Einhaltung der gesetzlichen Rahmenbedingungen (Bodenschutzrecht beim Einbau in der durchwurzelten Oberbodenzone, LAGA Richtlinie beim Einbau in Bauwerken unterhalb der Oberbodenzone) dem Einsatz als Baustoff jedoch nichts entgegen.

Die Hansestadt Rostock betreibt zwei große Spülfeldkomplexe, auf denen im Längsstromklassierverfahren die Sedimente in verschiedene Chargen (Sande, Mischböden, Schlick) aufgetrennt werden, was eine gezielte Verwertung ermöglicht. Nach der Entnahme des Nassbaggerguts aus den Spülpoldern wird das Material auf Mieten aufgesetzt und dort ausschließlich durch Witterung und Gravitation weiter entwässert (Reifung). Alle Mieten werden analysiert und zertifiziert und so eine zielführende Verwertung ermöglicht. Für eine Verwertung im Landschaftsbau, in der Landwirtschaft oder in Deponierekultivierungsprojekten genügt diese Aufbereitung erfahrungsgemäß. Jeder weitere Arbeitsschritt würde zusätzliche Kosten verursachen und so das Endprodukt verteuern, was die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von gereiftem Nassbaggergut einschränken könnte.

Aufgrund guter Erfahrungen bezüglich der Erosionsstabilität von feinkörnigem Baggergut und den trotz einem Organikgehalt von bis zu 10 % günstigen bodenmechanischen Eigenschaften (Anfangsscherfestigkeit, hydraulische Leitfähigkeit, etc.) wurde bereits seit längerem der Einsatz im Deichbau erwogen. Die Hansestadt Rostock und das Staatliche Amt für Landwirtschaft und Umwelt (StALU-MM) sowie die Bundesanstalt für Wasserbau in Hamburg verfolgten deshalb das Ziel, mit möglichst geringem Aufwand aufbereitetes Baggergut in Deichdeckschichten zu verwerten.

Da das anfallende Nassbaggergut nicht überall so wie in Rostock mit direktem Verwertungsziel aufbereitet wird, die Transportentfernungen von Rostock zu in den vergangenen Jahren durchgeführten Deichprojekten jedoch unwirtschaftlich waren, wurden bislang keine Deichdeckschichten aus gereiftem Nassbaggergut hergestellt. Dazu kommt, dass das gereifte feinkörnige Material Inhomogenitäten aufweist und auch nach mehrjähriger Entwässerung noch Wassergehalte weit auf dem nassen Ast der Proctor-Kurve besitzt, was eine erhebliche Gefahr der Schrumpfrissbildung in sich birgt. Deshalb waren es auch nicht zuletzt Vorbehalte von Seiten der Genehmigungsbehörden, die den Einsatz von Baggergut als Deichdeckschichtmaterial an der Ostseeküste bislang verhin-

derde, während es inzwischen mehrere Beispiele aus Bremen gibt, in denen solche Projekte erfolgreich umgesetzt wurden.

Ein erster Anlauf wurde vom Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau im Rahmen eines Projektes des WSA Stralsund in Zusammenarbeit mit der BAW Hamburg und dem StALU-MM in Rostock vorgenommen. Auf dem Spülfeld des WSA Stralsund auf Drigge (Rügen) wurde ein Versuchsdeich mit vier Querschnitten in gegliederter (Sandkern und Deckschicht) und homogener Bauweise aus kurz gereiftem Baggergut aus der Ostsee hergestellt und anfänglich geotechnisch untersucht. Aufgrund des hohen Einbauwassergehalts des Baggerguts kam es schnell zu erheblichen Schrumpfrissen. Ein zunächst geplanter groß angelegter hydraulischer Versuch zum Einstau, zur Überströmung und zur Wellenbelastung der Deichböschungen konnte nicht realisiert werden, weshalb die Deichböschungen bislang ausschließlich bezüglich der Begrünung, Rissbildung und Verformung qualitativ untersucht wurden.

Basierend auf den Kenntnissen des Drigge-Projektes entstand schließlich das EU-Projekt DredgDikes mit drei weiteren Deutschen Partnern (Wasser- und Bodenverband, Hansestadt Rostock, Steinbeis Transferzentrum), einem Partner aus Polen (TU Danzig) und 16 assoziierten Partnern aus Polen, Deutschland, Dänemark, Lettland und Litauen. Das Projekt wird vom South Baltic Programme (INTERREG IVA) kofinanziert. Während die Deutschen Partner vorwiegend den Einsatz von feinkörnigem, organischem Baggergut in Deichdeckschichten untersuchen und Möglichkeiten der Verwendung verschiedener Geokunststoffprodukte zur Einschränkung der Rissbildung, Erhöhung der Erosionssicherheit und definierten Dränung von Sickerwasser erforschen, beschäftigen sich die polnischen Partner vornehmlich mit der Verwendung von Gemischen aus sandigem Baggergut und verschiedenen Aschen.

Im Folgenden werden die untersuchten Materialien aus Rostock und Drigge beschrieben und deren Eignung als Deichdeckschichtmaterial bewertet. Der Rostocker Versuchsdeich wird ebenso beschrieben wie eine Auswahl an bereits durchgeführten Untersuchungen. Ausgewählte Ergebnisse werden abschließend diskutiert.

## **2 Untersuchte Materialien und Eignungsbewertung**

### **2.1 Geotechnische Charakterisierung**

Die geotechnische Untersuchung der Materialien aus Drigge und Rostock wurde größtenteils in Anlehnung an standardisierte DIN-Vorschriften für bodenmechanische Untersuchungen vorgenommen. Ausnahmen bilden die Körnungsanalyse und die Ermittlung des organischen Anteils, deren Bestimmung durch einen hohen Organik- und Kalkanteil erheblich beeinflusst wird. Daher wurde die Körnungsanalyse nach DIN ISO 11277 mit Zerstörung von Humus und Kalkanteilen durchgeführt und der

Anteil der organischen Substanz (OS) mit einem Elementaranalysator bestimmt. Ergebnisse siehe Tabelle 1.

Tab. 1: Eignungsgrenzwerte nach EAK 2002 und ermittelte Bodenkennwerte

Parameter	M1	M2	M3	Drigge	EAK Hafenschlick	EAK Geschiebelehm
Ton [%]	25–28	22–25	15	15-19	$\geq 15$	$\geq 15$
Sand [%]	29–34	40–47	54	43-51	$\leq 40$	$\leq 60$
Wassergehalt w [%]	61–68	55–73	46	62-76		
Organische Substanz OS [%]	10–11	9–10	6	5-6	$\leq 20$	$\leq 5$
Kalkgehalt [%]	9–10	8	10	4-7		
Undrän. Scherfestigkeit $c_u$ [kPa] <sup>1)</sup>	53–132	19–34	> 120	7-20	$\geq 15$	$\geq 25$
Winkel der inneren Reibung [ $^\circ$ ] <sup>2)</sup>	28–30	28–31	30	20-29		
Kohäsion c [kN/m <sup>2</sup> ] <sup>2)</sup>	35–47	13–19	59	7-15		
Proctordichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,1–1,2	1,3	1,4	1,3-1,4		
Optimaler Wassergehalt $w_{opt}$ [%]	40–43	32–35	31	24-32		
Hydraulische Leitfähigkeit $k_f$ [m/s]	$5 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-10}$ - $7 \cdot 10^{-9}$		
Zerfallszeit $T_{30}$ [s] <sup>3)</sup>	1320	2600	1120	-		
Schrumpfmaß $V_S$ [-]	0,42	0,33	0,16	0,18-0,54		
Plastizitätszahl $I_p$ [-]	0,35	0,2	0,07	0,5-0,7		

M1: Schlick, 5 Jahre gereift; M2: Schlick, 2 Jahre gereift; M3: Mischboden

1) Ergebnisse aus Flügelscherversuchen, M3 überschreitet obere Messgrenze des verwendeten Gerätes

2) Ergebnisse aus Rahmenscherversuchen

3) Mit natürlichem Wassergehalt, abweichend von der Prüfvorschrift nach Weißmann (2003)

## 2.2 Spezielle Laborversuche

Zur Untersuchung der Erosionsstabilität der ausgewählten Böden wurden in einer Laborströmungsrinne Untersuchungen mit und ohne Begrünung durchgeführt. Zudem wurden zur Bestimmung der Aggregatstabilität bei Wasserlagerung Zerfallstests nach Endell (in Weiterentwicklung der BAW) und Weißmann (2003) herangezogen. Dabei wird eine zylindrische, proctorverdichtete Probe mit verschiedenen Wassergehalten in einen Drahtkorb gestellt und in einem Wasserbad an eine elektrische Waage gehängt. Durch den Wassereintritt kommt es zur Ablösung von Bodenteilchen aus der Probe, die

durch die Maschen des Drahtkorbes fallen und damit das Gewicht der Probe reduzieren. Dieser Gewichtsverlust wird als Zerfall in Abhängigkeit von der Zeit aufgezeichnet.

Bei der Ermittlung der Konsistenzgrenzen nach DIN 18122 werden die Proben durch die Probenvorbereitung stark verändert, da das untersuchte Baggergut einen erheblichen Sandanteil aufweist, der bei der Prüfung entfernt wird, um reproduzierbare Ergebnisse zu generieren. Aus diesem Grund werden weitere Laborversuche durchgeführt, um die Plastizitätseigenschaften der Materialien besser beschreiben zu können, darunter einaxiale Druckversuche und Fallkegelversuche.

### **2.3 Bewertung des Baggerguts aus Drigge und Rostock als Deich-Deckschichtmaterial**

Die beiden Bewertungsmaßstäbe, nach denen in Deutschland die grundsätzliche Eignung von Deichdeckschichtmaterial (Klei und Mergel) überprüft wird, finden sich in der EAK 2002 (2007) und bei Weißmann (2003). Aufgrund fehlender wissenschaftlicher Grundlagen und Erfahrungen empfiehlt HTG (2006) zur Auswahl von Baggergut für den Deichbau auf die Auswahlkriterien von Klei zurückzugreifen.

In der EAK 2002 wurden bereits Eignungsparameter für Baggergut definiert (Hafenschlick und Geschiebelehm/-mergel), allerdings beschränkt sich die Kriterienliste auf vier Elemente. Die Bewertung ist insgesamt angelehnt an die von Klei und Mergel, deren Kriterien zusätzlich herangezogen werden können. Diese Auswahlkriterien ersetzen nicht den Nachweis der geotechnischen Eignung des Materials. Allerdings können bekanntermaßen nicht alle geotechnischen Parameter von organischem Baggergut mit den genormten Laborversuchen verlässlich und reproduzierbar bestimmt werden und bislang fehlen genauere Angaben zu geeigneten Verfahren. Das Bewertungsverfahren für Deichdeckschichtmaterialien nach Weißmann (2003) wurde für Klei entwickelt und umfasst ebenfalls vier Kriterien (hydraulische Leitfähigkeit, Zerfallszeit im Zerfallsversuch, Schrumpfmaß und Plastizität). Beide Verfahren werden im Rahmen des Projektes DredgDikes hinsichtlich ihrer Eignung zur Auswahl von Baggergut für den Deichbau untersucht.

Nach den EAK-Auswahlkriterien ist nur M1 eindeutig als geeignet einzustufen (Tab. 1). Für die Bewertung wurden dabei die Werte für Hafenschlick herangezogen. Einschränkend kann das hohe Schrumpfmaß herangezogen werden, das eine hohe Schrumpfrisikoneigung erwarten lässt. Die Materialien M2, M3 und „Drigge“ sind nach EAK nicht bezüglich aller Parameter als geeignet zu bewerten. Zieht man die Vergleichswerte für Hafenschlick heran, überschreitet M2 den zulässigen Sandanteil knapp, M3 und „Drigge“ deutlich. Bezüglich der Vergleichswerte für Geschiebelehm (eine für Baggergut mit hohem Sandanteil gegebenenfalls sinnvollere Einstufung) überschreitet M2 den Wert für die organische Substanz (Glühverlust) deutlich, M3 nur knapp. Demnach sind auch M2 und M3 bedingt als geeignet einzustufen, insbesondere aufgrund ihrer geringeren

Schrumpfneigung. Das Material aus Drigge weist zusätzlich eine geringe Anfangsscherfestigkeit auf. Damit ist es als am wenigsten geeignet einzustufen. Kritisch ist jedoch anzumerken, dass der Glühverlust als ein Zielwert definiert ist, der bei marinen Sedimenten mit hohem Kalkanteil (vor allem Muschelschalenteilchen) nicht dem Anteil an organischer Substanz entspricht.

Nach Weißmann (2003) werden alle vier untersuchten Materialien als geeignet (Stufe 3, M1 und M2 an der Grenze zu Stufe 2 „gut geeignet“) bewertet (Tab. 2). Die Ergebnisse von M3 und „Drigge“ sind immerhin vergleichbar mit einem als Deichdeckschicht eingesetzten Mergel, der als Vergleichsvariante untersucht wurde. Allerdings ist einschränkend anzumerken, dass die Bestimmung der Zerfallszeit im von Weißmann vorgeschlagenen Zerfallsversuch lediglich für Proben mit natürlichem Wassergehalt sinnvolle und reproduzierbare Ergebnisse brachte. Da der natürliche Wassergehalt veränderlich ist und zudem die verschiedenen Materialien sehr unterschiedliche Wassergehalte aufweisen, ist noch zu diskutieren, ob dieses Verfahren überhaupt für feinkörniges, organisches Baggergut geeignet ist. Zudem existieren bislang keine Ergebnisse für das Material von Drigge, weshalb der geringste gemessene Wert (Vergleichsboden Mergel) angenommen wurde.

Tab. 2: Eignungsbewertung der untersuchten Materialien nach Weißmann (2003)

	M1	M2	M3	Drigge
B1 (hydr. Leitfähigkeit) <sup>1)</sup>	0,85	0,90	0,87	0,9
B2 (Zerfallszeit)	0,62	0,68	0,61	0,54 <sup>2)</sup>
B3 (Schrumpfmaß)	0,54	0,65	0,86	0,39
B4 (Plastizitätszahl)	1	0,7	0,43	1,00
Bewertungszahl N	0,73	0,73	0,67	0,66
Eignungsstufe	3	3	3	3
Eignungsbewertung	geeignet	geeignet	geeignet	geeignet

1) Zur Bewertung der Eignung wurden die im Labor ermittelten Werte wie folgt erhöht:

$$kf(M1) = 1E-7 \text{ m/s}, \quad kf(M2) = 1E-8 \text{ m/s}, \quad kf(M3) = 5E-8 \text{ m/s}; \quad kf(\text{Drigge}) = 1E-8 \text{ m/s}$$

2) Der Zerfallstest wurde noch nicht ermittelt. Es wurde der niedrigste Wert aller Böden (Mergel) angenommen

Aufgrund der wenigen und bislang nicht wissenschaftlich abgesicherten Bewertungskriterien in der EAK und der nachweislich nicht nach der Prüfvorschrift von Weißmann durchführbaren Zerfallsversuche ist die Eignungsbewertung von Baggergut für den Einsatz im Deichbau bislang mit keiner der beiden vorhandenen Methoden belastbar



durchführbar und somit in der Regel eine Einzelfallentscheidung. Die Untersuchungsergebnisse zeigen jedoch auch Möglichkeiten zur Anpassung vorhandener Kriterien, sodass zukünftig eine bessere Entscheidungsgrundlage erwartet werden kann.

### 3 Der Rostocker DredgDikes-Versuchsdeich

Der DredgDikes-Versuchsdeich in Rostock-Markgrafenhede besteht aus zwei parallelen Deichen (Ost- und Westdeich), die durch vier querstehende Dämme zu einer Polderanlage verbunden sind. Die Anlage wurde auf dem Spülfeld „Radelsee“ der Hansestadt Rostock errichtet und ist 125 m lang und bis zu 45 m breit. Durch Befüllen der einzelnen Polder können Sickervorgänge in den Deichquerschnitten untersucht werden, während die abgesenkten Abschnitte auf dem Westdeich Überströmungsversuche zur Untersuchung der Erosionssicherheit der Binnenböschungen ermöglichen.



Abb. 1: Rostocker DredgDikes-Versuchsdeich, UAV-3D-Ansicht

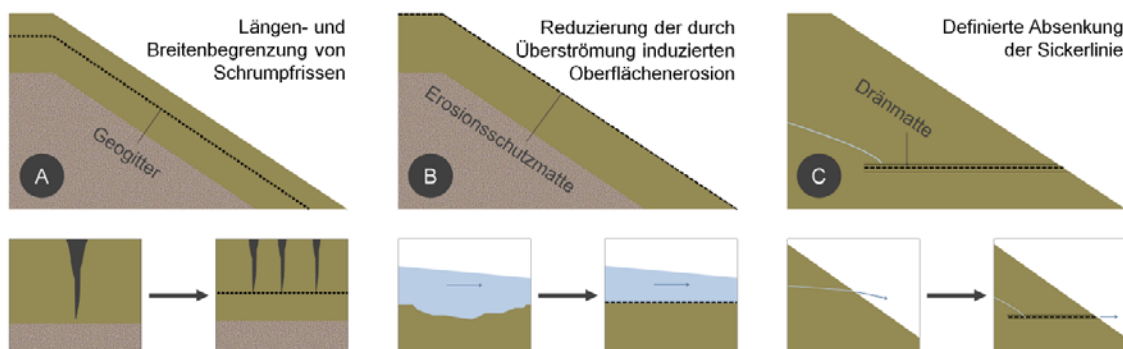


Abb. 2: Geokunststoffe zur Einschränkung von Schrumpfrissen (A) und Reduzierung von Oberflächenerosion (B) der Deckschichtmaterialien sowie zur definierten Absenkung der Sickerlinie im homogenen Querschnitt (C)

Acht verschiedene Querschnitte mit unterschiedlichem Aufbau und unterschiedlicher Böschungsneigung (A...H in Abb. 1) wurden im Versuchsdeich realisiert. Die Querschnitte A bis G wurden analog zum Regelquerschnitt eines Ostseediches mit einem Sandkern und einer erosionsstabilen Deckschicht hergestellt, die in diesem Fall aus gereiftem, feinkörnigem organischem Baggergut besteht (M1 und M2, Tabelle 1). Es wurden verschiedene Deckschichtmächtigkeiten realisiert und Geokunststoffe für Ero-

sionsschutz und zur Deckschichtbewehrung (Rissverminderung) installiert (Abb. 2a,b). Die Materialien M1 und M2 sind sich bezüglich Körnung und Organikgehalt sehr ähnlich, waren zum Zeitpunkt des Einbaus jedoch unterschiedlich lang gereift, was sich vor allem in den unterschiedlichen undrännierten Scherfestigkeiten zeigte. Material M3 (Tabelle 1) besitzt einen höheren Sandgehalt, weshalb nach EAK 2002 die Eignung als Deichdeckschichtmaterial nur bedingt gegeben wäre. Dieses Material wurde im homogenen Deichquerschnitt H in Verbindung mit einer Dränmatte zur kontrollierten Absenkung der Sickerlinie eingebaut (Abb. 2c).

Zur Messung der Sickerlinie bei verschiedenen Einstauszenarien wurde eine Vielzahl an Tensiometern, Feuchtesonden, Sickerwassermengenzählern und Pegeln installiert. Die Daten werden an drei Datenloggern gesammelt und an einen zentralen Messrechner mit Internetverbindung übertragen, der vom Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau fernsteuerbar ist. Das Messsystem zeichnet seitdem bodenhydrologische Daten auf, die zusammen mit der neben dem Versuchsfeld aufgestellten Klimastation auch Aussagen zum Wasserhaushalt der Deckschichten aus Baggergut zulassen.

## **4 Untersuchungen am Rostocker Versuchsdeich**

Am Rostocker Versuchsdeich werden Untersuchungen zur Durchfeuchtung und Durchsickerung der Deichquerschnitte, zur Erosionsstabilität der Deichkronen und Binnenböschungen bei Überströmung, zur Rissbildung und deren Verminderung unter Verwendung der Geokunststoffbewehrung sowie zur Verformung durchgeführt.

### **4.1 Erosionssicherheit der Deichböschungen**

Zur Prüfung der Erosionssicherheit der Deichdeckschichten aus Baggergut wurden am Versuchsdeich großmaßstäbliche Überströmungsversuche durchgeführt. Dazu wurde auf die Krone und Böschung des zu untersuchenden Querschnitts ein System aus drei parallelen Strömungsrinnen aufgebaut (Abb. 3). Der Aufbau ist angelehnt an die ASTM D-6460 und die Rinnenprüfungen an Erosionsschutzprodukten aus dem US amerikanischen NTPEP (NTPEP 2014). In den Rinnenversuchen wurden verschiedene Belastungsszenarien mit Durchflüssen zwischen 45 und 230 l/(s\*m) realisiert. Jede Laststufe wurde 45 Minuten lang aufrechterhalten und es wurden jeweils die Fließgeschwindigkeiten und Abflusshöhen auf den Böschungen sowie nach jeder Laststufe die Erosion auf der Böschung aufgezeichnet.

### **4.2 Durchfeuchtung des Versuchsdeiches**

Zur Untersuchung der Durchfeuchtung des Versuchsdeiches wurden die Querschnitte mit Standrohren und Feuchtesonden (im Sandkern) sowie Tensiometern (in den feinkörnigen Deckschichten) instrumentiert. In Abbildung 4 ist die Instrumentierung sche-

matisch dargestellt. Für die Versuche wurden die Polder abwechselnd gefüllt (Polder 1 und 3 in Abb. 1) und der höchste Wasserspiegel wurde in der Regel für eine Woche aufrechterhalten. In dieser Zeit wurden die fortschreitende Durchfeuchtung von Deckschicht und Sandkern sowie die Sickerwassermenge am Fuß der Binnenböschung aufgezeichnet.



Abb. 3: Überströmungsversuche am DredgDikes-Versuchsdeich

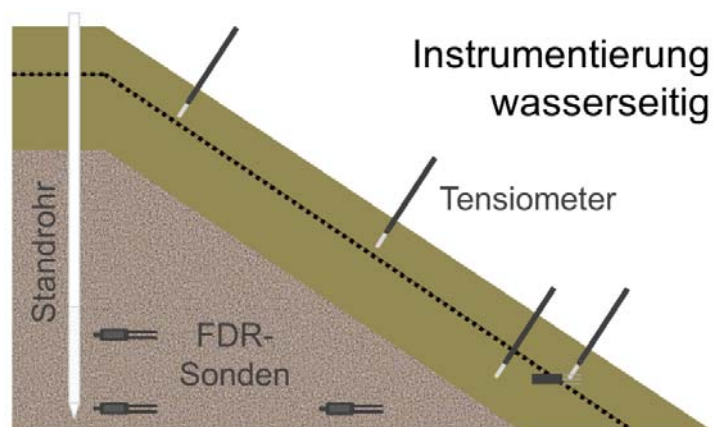


Abb. 4: Wasserseitige Instrumentierung zur Erfassung von Durchfeuchtung und Sickerlinie, schematisch

### 4.3 Verformungsmessungen

Die Deichoberfläche wurde bereits während der Bauzeit mit Setzungspegeln und Setzungsmesskabeln ausgestattet. Die Setzungspegel werden in festgelegten Abständen

tachymetrisch vermessen. Dazu wurde ein Festpunktnetz auf den Flächen um den Versuchsdeich angelegt. Direkt nach Fertigstellung des Deiches wurde die Oberfläche durch Laserscanning hoch genau vermessen. Bereits während der Bauzeit wurde zu mehreren Zeitpunkten der Baufortschritt durch eine Luftbilddokumentation dokumentiert. Die Luftbilder, die durch so genannte UAVs (unmanned aerial vehicles) aufgenommen wurden, konnten im Weiteren auch zur Erstellung dreidimensionaler Oberflächenmodelle des Deichbauwerks genutzt werden. Diese Methode wird in festgelegten Abständen genutzt, um die Oberflächenverformung des Deiches flächig aufzunehmen. Messkabel unter der Deichsohle und in den Grenzschichten zwischen Sandkern und Deckschicht werden genutzt, um die Schichtdicken und deren Veränderung zu bestimmen. Mit einem Kabelortungsgerät wird die Tiefenlage der verlegten Kabel unter der Deichoberfläche bestimmt und in Kombination mit den Oberflächenvermessungen kann so auf Schichtverformungen und Untergrundsetzungen geschlossen werden.

## 5 Ausgewählte Ergebnisse

Aufgrund der Vielzahl an Untersuchungen können hier nicht alle Ergebnisse präsentiert werden. Beispielhaft werden je ein ausgewähltes Ergebnis der Erosionsuntersuchungen und der Durchfeuchtungsversuche präsentiert. Für weitere Ergebnisse wird auf weitere Artikel zum Projekt DredgDikes (z. B. Cantré et al. 2013, Cantré & Saathoff 2014 oder Große & Saathoff 2013) und auf die DredgDikes-Webseite [www.dredgdikes.eu](http://www.dredgdikes.eu) verwiesen. Nachfolgend werden exemplarisch zwei ausgewählte Ergebnisse erläutert.

Die Erosionsstabilität der Materialien wurde in einer Laborströmungsrinne, in großmaßstäblichen Rinnen auf den Deichböschungen und in Zerfallstests nach Endell und Weißmann untersucht. Während der Durchführung beider Zerfallsversuche wurden Einschränkungen in der Anwendung von Zerfallstests für feinkörniges Baggergut festgestellt.

Beim Zerfallstest nach Endell wurde innerhalb kürzester Zeit ein erheblicher Zerfall aller Baggergutproben beobachtet (Abb. 5, oben). Die Versuche unterscheiden sich vorrangig in der Probengröße, Probenvorbereitung, den Versuchszuständen und der Ergebnisauswertung.

Das beste Zerfallsverhalten besitzen grundsätzlich die Proben bei natürlichem Wassergehalt, die ohne Probenvorbereitung eingebaut wurden. Die Beurteilung der Erosionsstabilität anhand des Ausgangswassergehaltes kann aber bei einer Bewertung einzelner Baggergutproben nicht herangezogen werden, da der Wassergehalt je nach jahreszeitlicher Entnahme großen Schwankungen unterliegt. Ein weiteres Problem trat auch in Bezug zur Maschenweite des Drahtkorbes auf, den größere abgefallene Agglomerate nicht passieren konnten, weshalb kein Masseverlust von der Waage registriert wurde. Beim Zerfallstest nach Weißmann führten vorrangig die Probenvorbereitung und die Versuchszustände zu erheblichen Schwierigkeiten. Im Vorfeld durchgeführte Unter-

suchungen zeigten, dass es durch die Einstellung des Proctorwassergehaltes und der damit verbundenen Trocknung des Materials zu einer erheblichen Verringerung der Aggregatstabilität kommt. Für weiterführende Versuche wurde daher der Ausgangswassergehalt zur Verdichtung und weiteren Probenvorbereitung gewählt. Im Ergebnis des Zerfallstests konnte die von Weißmann angeführte Abhängigkeit von steigender Zerfallszeit mit zunehmendem Wassergehalt nicht bestätigt werden, da die ofentrockene Probe keinen Masseverlust zeigte. Im Gegenteil wurde bei diesem Versuchszustand lediglich eine erhebliche Massezunahme im Versuchsverlauf aufgezeichnet, trotz sichtbar abfallender Bodenteilchen (Abb. 5, unten). Aufgrund dieser fehlenden Abhängigkeit konnte auch die Berechnungsgrundlage nach Weißmann zur Ermittlung der Zerfallszeit nicht verwendet werden. Insgesamt können beide Zerfallstests in der angegebenen Form zur Bewertung der Erosionsstabilität von Baggergut bei Wasserlagerung vorerst nicht empfohlen werden.

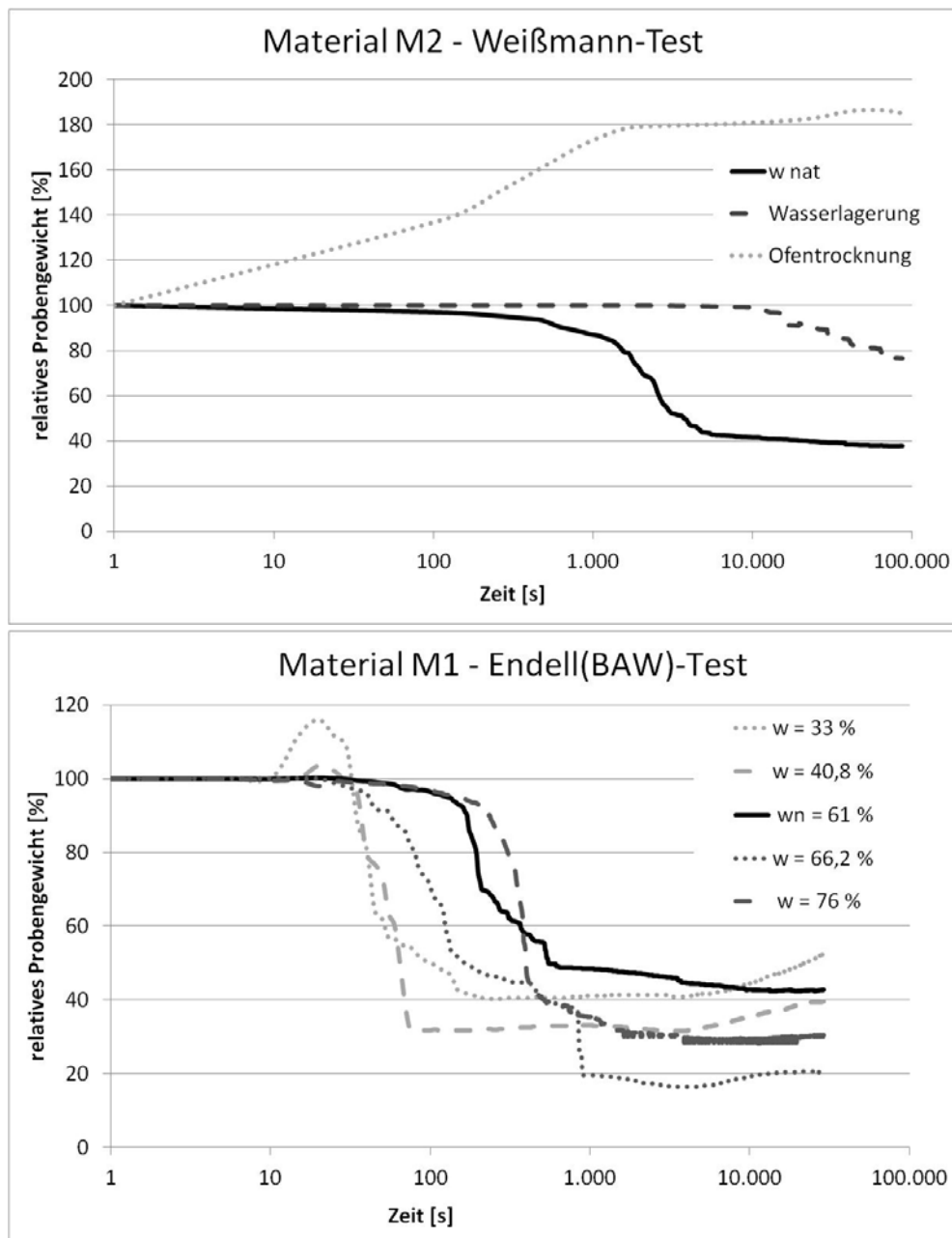


Abb. 5: Beispiele für Ergebnisse der Zerfallstests nach Endell (o) und Weißmann (u)

Im Zeitraum Mai bis September 2013 wurden zahlreiche Einstauversuche durchgeführt. Polder 2 wurde in diesem Zeitraum vier Mal gefüllt. Um die erhobenen Daten auszuwerten, wurde eine Matrix zur qualitativen Auswertung erstellt (Abb. 6).

Anhand der folgenden Darstellungen soll exemplarisch die Auswertung eines Einstauereignisses gezeigt werden, um die Validierung für die Matrix zu verdeutlichen (Abb. 6). Für die Bewertung der erhobenen Daten wurde visuell anhand der erstellten Diagramme beurteilt, welcher Querschnitt am schnellsten durchfeuchtet. Dieser Querschnitt wurde für die jeweilige Sonde mit 3 bewertet, der Querschnitt, der am langsamsten durchfeuchtete, erhielt die Bewertung 1. Die Kurven in den Diagrammen, die zwischen der

schnellsten und langsamsten eintretenden Durchfeuchtung verlaufen, erhielten den Wert 2. Fehlende Datensätze sind mit dem beliebigen Wert 1,5 belegt.

		TEN 04B	Theta	TEN 02M	EC5 B1	TEN 02T	TEN 04M	TEN 05T	Standrohr	Kippzähler
<b>D</b>	F1	2	2	3	2	1	3	3	2	2
	F2	2	3	3	3	2	3	3	2	2
	F3	2	2	3	2	2	3	3	2	3
	F4	2	3	3	3	2	3	3	2	1,5
<b>E</b>	F1	1	2	2	2	2	2	2	1	1
	F2	1	1	2	1	3	3	2	1	1
	F3	2	3	2	2	3	2	2	1	1
	F4	2	2	2	1	3	2	2	1	1,5
<b>F</b>	F1	2	1	1	1	2	1	1	2	1
	F2	2	2	1	2	1	1	1	2	2
	F3	2	1	1	1	1	1	1	2	2
	F4	2	2	1	2	1	1	1	2	1,5
<b>G</b>	F1	1,5	3	2	3	3	2	2	3	3
	F2	1,5	2	2	2	2	2	2	3	3
	F3	1,5	2	3	3	2	2	2	3	3
	F4	1,5	2	3	2	2	2	2	3	1

Abb. 6: Matrix zu Füllversuchen 2013 in Polder 2

In Abbildung 7 links wurden die Daten des Tensiometers 04 M beim Wasserspiegelanstieg des Füllversuchs 2 am 24.06.2013 bewertet. Der Sensor ist 0,4 m unter der Böschungsoberfläche auf halber Böschungshöhe eingebaut (vgl. Abb. 4). Anhand der Abbildung ist ersichtlich, dass die Sensoren in den Querschnitten D und E zuerst die Sättigung erfassten. Daher erhielten im Füllversuch 2 (F2) die Querschnitte D und E für das Tensiometer 04 M den Wert 3. Der Querschnitt F zeigt die Sättigung zuletzt und wird somit mit 1 bewertet. Folglich erhält Querschnitt G beim Füllversuch 2 in der Spalte des Tensiometers 04 M den Wert 2 (vgl. Abb. 6).

Die Standrohrpegeldaten zeigen, dass die Sickerlinie im Sandkern des Querschnitts G am schnellsten ansteigt (Abb. 7 rechts); dieser Pegel erhält folglich wieder die Bewertung 3 in der Matrix. Die Sickerlinie im Kern des Querschnitts E steigt dagegen am langsamsten an und erhält die Bewertung 1.

Diese Bewertung wurde für je neun Messpunkte (Sensoren und Pegel) aus den vier Querschnitten D–E für alle vier durchgeführten Füllversuche vorgenommen. Abschließend wurde für jeden Füllversuch in jedem Querschnitt die Summe der Bewertungen gebildet. Das Ergebnis der so erhaltenen Bewertungssummen ist in Tabelle 3 dargestellt. Es wird deutlich, dass Querschnitt F am langsamsten durchfeuchtet und Querschnitt D am schnellsten.

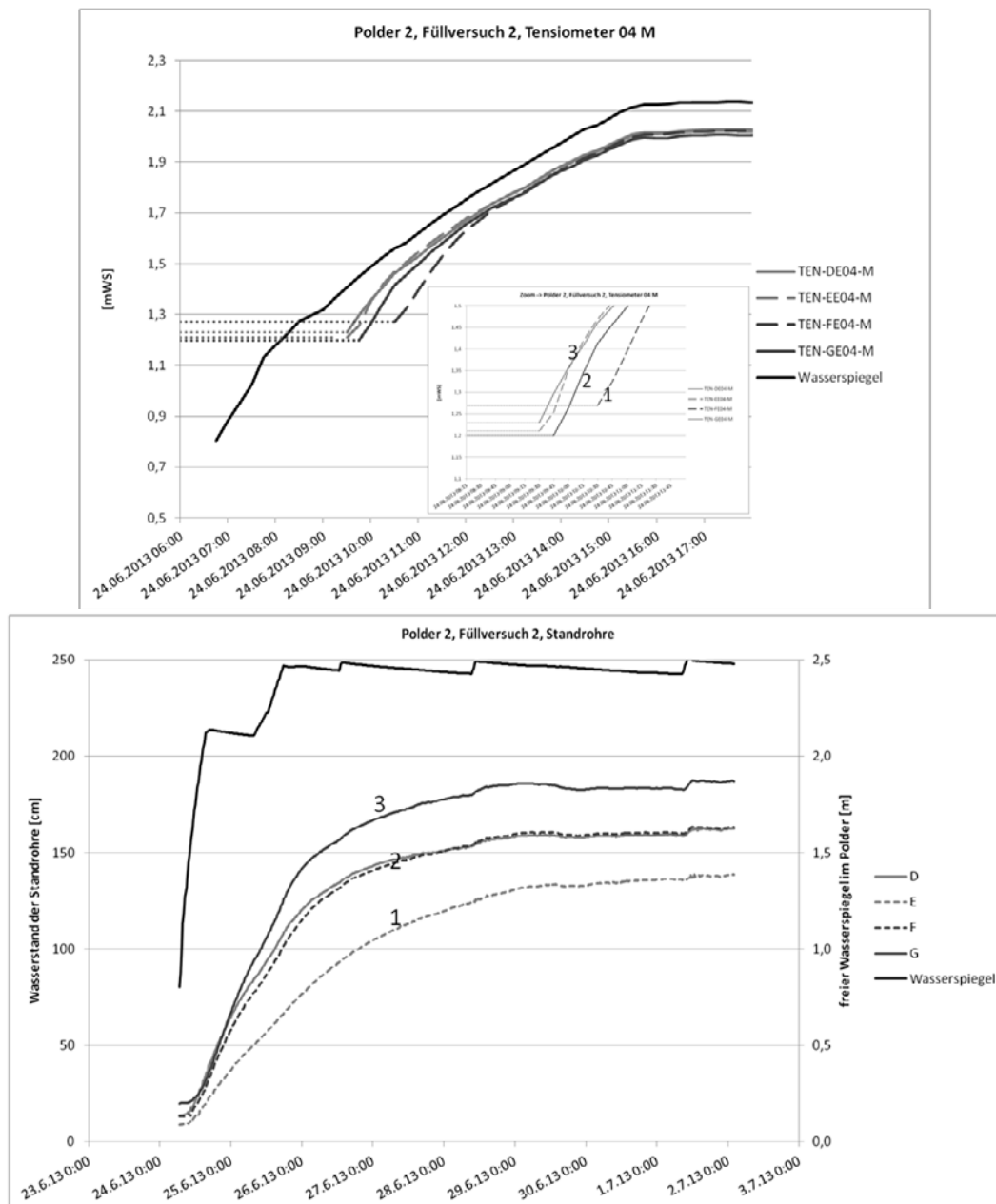


Abb. 7: Polder 2, Füllversuch 2, Vergleich Querschnitte: Tensiometer 04 M (l) und Pegeldata (r)

Tab. 3: Bewertungssummen D–G, mit und ohne Wichtung

	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>
Ohne Wichtung	87,5	64,5	51,5	82
Mit Wichtung	114	79	72	114



Nach Analyse der 144 Messkurven musste festgestellt werden, dass die Auswertung der Standrohrpegel-, der Kippzähler- und der EC5-Sensordaten gut erkennbare Unterschiede zwischen den einzelnen Querschnitten zeigt. Die Tensiometer, die in Polder 2 ausschließlich in den ersten 0,4 m der Deckschicht eingebaut sind, zeigen dagegen kein so klares Bild, was ein neues Setup der Sensorik für Folgeuntersuchungen nötig macht. Beispielhaft soll die Problematik kurz beschrieben werden: Beim Vergleich zwischen den Querschnitten D und E wurde deutlich, dass beide Tensiometer 05B nahe am Deichfuß zur gleichen Zeit den Anstieg der Sickerlinie in der Deckschicht detektierten. Die beiden höher liegenden Tensiometerpaare 02M und 04M zeigen eine um etwa 15 Minuten verzögerte Durchfeuchtung von Querschnitt E gegenüber Querschnitt D, während das noch höher liegende Tensiometerpaar 02T eine schnellere Durchfeuchtung von E anzeigt. Dies zeigt, dass die Tensiometerdaten eines Querschnitts keine sichere Aussage bezüglich der schnelleren bzw. langsameren Durchfeuchtung zulassen, was die Bewertung erschwert. Aufgrund der besseren Abbildung der Realität wurden deshalb die Pegel, Kippzähler und EC5 Sensoren doppelt gewichtet. Nach Summierung über alle Füllversuche (Tabelle 2) zeigt sich, dass die beiden Querschnitte ohne die eingebaute Geogitterbewehrung tendenziell schneller durchfeuchten als die mit Bewehrung, sodass der Ansatz der Bewehrung zur Rissverminderung bzw. Erhöhung der Verdichtungswirkung weiter verfolgt werden muss.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die bisherigen Forschungsergebnisse in den Projekten Drigge und DredgDikes (Abb. 8) zeigen, dass das untersuchte Baggergut ein hohes Potential zur Verwendung als Deckschichtmaterial im Seedeichbau besitzt. Eine ausreichend geringe hydraulische Leitfähigkeit (bestimmt in Laborversuchen und Infiltrationsversuchen im Feld) und eine – in Verbindung mit einer sich schnell entwickelnden Grasnarbe – hohe Erosionsstabilität sind zusammen mit einer vergleichsweise guten Verarbeitbarkeit die wichtigsten Voraussetzungen zum Einsatz des Baggerguts aus Rostock im Deichbau. Die vielfach im Zusammenhang mit Baggergut kritisierte Neigung zu Schrumpfrissen konnte im Projekt zunächst bestätigt werden. Wie sehr sich diese jedoch auf die Stabilität der Böschung auswirken, ist noch Gegenstand weiterer Untersuchungen bis Ende 2014.

Die qualitative Bewertung der Durchfeuchtungsmessungen zeigt, dass die Querschnitte mit der zur Rissverminderung eingesetzten Geokunststoffbewehrung weniger schnell durchfeuchten als die Querschnitte mit unbewehrten Deckschichten. Auch dies wird Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Als Dichtungsschicht im Flussdeichbau können die im Projekt DredgDikes untersuchten Materialien aufgrund der Schrumpfeigung, der (mit Ausbildung von Schrumpfrissen und Wühltiergängen deutlich) ansteigenden hydraulischen Leitfähigkeit sowie der Salzauslaugung und Verockerung bislang nicht ohne weitere Aufbereitung oder zusätzliche Barriere empfohlen werden. Da auch auf Flussdeichböschungen ein erosions-

stabiler, gut begrünbarer Oberboden vorteilhaft ist, kann das Baggergut gegebenenfalls in der durchwurzelten Oberbodenschicht Einsatz finden, wenn der Salzgehalt des marinen Sediments unproblematisch ist. Auch diesbezüglich scheint eine Verwertung in Bauwerken entlang küstennaher Gewässer die bessere Wahl.



Abb. 8: Der DredgDikes-Versuchsdeich in Rostock-Markgrafenheide im September 2013

Ab April 2014 werden weitere Feldversuche zur Messung der Sickerlinie und Überströmungsversuche mit extremen Belastungen auf die Böschungen durchgeführt werden. Zudem sind weitere Einbauversuche geplant, um den Einfluss von In-Situ-Homogenisierung auf die Verdichtbarkeit zu untersuchen. Die Begrünung wird weiterhin einem Monitoring unterzogen.

Im Dezember 2013 wurde mit der Herstellung des im Projekt DredgDikes geplanten Pilotdeiches begonnen, einem Abschnitt von knapp 500 m einer zu rekonstruierenden Deichtrasse am Körkwitzer Bach nordwestlich von Rostock. Mit einer zum Versuchsdeich analogen Instrumentierung werden im Rahmen eines langfristigen Monitoring-Programms Daten über den Pilotdeich gesammelt.

Alle Informationen zum Projekt und den projektbegleitenden Veranstaltungen finden sich auf der Internetseite [www.dredgdikes.eu](http://www.dredgdikes.eu).

## 7 Literatur

Cantré, S. & Saathoff, F.: Untersuchungen zum Einsatz von Baggergut im Deichbau am Rostocker DredgDikes-Versuchsdeich. Wasser & Abfall Heft 3, S. 14-20, 2014

Cantré, S.; Große, A.-K.; Neumann, R.; Nitschke, E.; Henneberg, M. & Saathoff, F.: Fine-grained organic dredged materials for dike cover layers - material characterisation

and experimental results. Proceedings of the WODCON XX World Dredging Congress and Exhibition, 3-7 June 2013, Brussels, Belgium. 14 S.

EAK 2002. Empfehlungen für Küstenschutzwerke. Die Küste, Heft 65. 589 S., 2013

Große, A.-K. & Saathoff, F.: Soil mechanical aspects in characterizing fine-grained, organic dredged material from the Baltic Sea area. Proceedings of the GeSed International Conference, S. 36 – 44, 2013

HTG: Verwertung von feinkörnigem Baggergut im Bereich der deutschen Küste, Fachbericht des Fachausschuss Baggergut der Hafentechnischen Gesellschaft. 37 S., 2006

Köthe, H. & de Boer, P. : Dutch-German Exchange (DGE) on Dredged Material – Part 1 – Dredged Material and Legislation. 97 S., 2003

NTPEP: National Transportation Product Evaluation Programme. [www.ntpep.org](http://www.ntpep.org), 2014

Pohl, C.: Die Bemessung der Kleiabdeckung von Deichaußenböschungen – Ein Konzept zum Entwurf gleichermaßen sicherer wie wirtschaftlicher Seedeiche. HTG-Kongress 2005. 10 S., 2005

RPW: Richtlinien für die Prüfung von mineralischen Weichdichtungen im Verkehrswasserbau, 2006

Weißmann, R.: Die Widerstandsfähigkeit von Seedeichbinnenböschungen gegenüber ablaufendem Wasser. Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Universität Duisburg-Essen, 147 S., 2003

### **Anschrift der Autoren**

Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff

Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau der Universität Rostock

Justus-von-Liebig-Weg 6

18059 Rostock

<http://www.auf-gk.uni-rostock.de/>

Dr.-Ing. Stefan Cantré

Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau der Universität Rostock

Justus-von-Liebig-Weg 6

18059 Rostock

<http://www.auf-gk.uni-rostock.de/>