

# Schriftenreihe Umweltingenieurwesen

Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät

Band 128

Dissertation

*Jan Olschewski*

## Ein Beitrag zur Bestimmung der Erosionsstabilität von Deichbinnenböschungen

PROFESSUR

Geotechnik und  
Küstenwasserbau

Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio

# Schriftenreihe Umweltingenieurwesen

Band 128

Dissertation

*Jan Olschewski*

## Ein Beitrag zur Bestimmung der Erosions- stabilität von Deichbinnenböschungen

Professur

Geotechnik und  
Küstenwasserbau

Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät

Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio

Dissertation

HERAUSGEBER

Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff  
Universität Rostock  
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät  
Professur Geotechnik und Küstenwasserbau  
18051 Rostock

CIP-KURZTITELAUFNahme

Dissertation Jan Olschewski  
Universität Rostock  
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät  
Rostock, 2024

© Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät,  
18051 Rostock

BEZUGSMÖGLICHKEITEN

Universität Rostock  
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät  
Professur Geotechnik und Küstenwasserbau  
Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock  
Tel.: 0381/498-3701, Fax: 0381/498-3702

ISBN 978-3-86009-563-8

DOI [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00004629](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004629)

Universität Rostock  
Professur Geotechnik und Küstenwasserbau

Gedruckt in Deutschland auf Recyclingpapier.

Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio

Aus der Professur Geotechnik und Küstenwasserbau  
der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

**Ein Beitrag zur Bestimmung der Erosionsstabilität  
von Deichbinnenböschungen**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät  
der Universität Rostock

vorgelegt von  
M.Sc. Jan Olschewski  
aus Huckstorf

## **Gutachter**

**Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff**

Professur Geotechnik und Küstenwasserbau  
Universität Rostock

**Prof. Dr.-Ing. Norbert Meyer**

Chair of Geotechnical Engineering  
Technische Universität Clausthal

**Prof. Dr.-Ing. Ulrich Turczynski**

ehemals Hochschule Magdeburg-Stendal

Tag der Einreichung: 1. Dezember 2023

Tag der öffentlichen Verteidigung: 12. März 2024

---

## Kurzfassung

Deiche dienen dem Schutz vor Überschwemmungen. Um dies zu gewährleisten, sind Dichtung und Stützkörper sowie landseitige Dränkörper für die Stabilität und Funktionalität unerlässlich. Darüber hinaus schützen technische oder vegetative Maßnahmen die landseitigen Böschungen wirksam vor Erosion durch Überströmung oder Wellenüberlauf, meist nur bei sehr begrenzten zulässigen Überströmungsgeschwindigkeiten. So trägt die Stabilität gegen Erosion von Binnenböschungen von Fluss- und Seedeichen wesentlich zur Gesamtstabilität des Bauwerks und unmittelbar zum Schutz des Hinterlandes bei. Insbesondere Deiche, die über einen längeren Zeitraum wasserseitig aufgestaut und stark durchnässt werden, laufen Gefahr, durch Überströmungsprozesse zu versagen. Neben den Eigenschaften der Deichbaustoffe bestimmen auch Größe und Einwirkzeit der durch Überströmung verursachten hydraulischen Kräfte die Stabilität.

Im Gegensatz zu in nur sehr geringem Maß tolerierbaren Wellenüberläufen von Seedeichen gilt ein Stabilitätsverlust aufgrund unkontrollierter und dauerhafter Überströmung von Flussdeichen nach verschiedenen Empfehlungen, Regelwerken oder Merkblättern in der Regel als häufigster Versagensfall. Noch immer gibt es keine Angaben oder lediglich Schätzwerte zu tolerierbaren spezifischen Abflüssen. Das sich aus diesem Mangel ergebende Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung einer Möglichkeit zur Ermittlung der Erosionsstabilität von Deichbinnenböschungen. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen denen auf die Böschungsoberfläche einwirkenden hydraulischen Strömungsgrößen Fließgeschwindigkeit und Schleppspannung. Methoden zur Ermittlung, Beschreibung und Bewertung von Oberflächenerosionserscheinungen und -prozessen auf Deichbinnenböschungen sowie das US-amerikanische Verfahren ASTM D6460 zur großmaßstäblichen Bewertung der Funktionsfähigkeit von geosynthetischen Erosionsschutzprodukten auf Kanalsohlen werden für die Anwendbarkeit zur Prüfung der Erosionsstabilität von Deich- und Dammbauwerken untersucht und erprobt.

In dieser Arbeit wird gezeigt, dass auch die Überprüfung von Deichbinnenböschungen auf Grundlage des US-amerikanischen Standards ASTM D6460 grundsätzlich möglich ist. Insgesamt beweisen die 158 durchgeführten In-situ-Einzelversuche die ausgezeichnete Anwendbarkeit auf originalmaßstäblichen Deichen. Zudem sind grundsätzlich mehrere Versuche gleichzeitig bzw. Einzelversuche mit vergleichsweise sehr hohen spezifischen Abflüssen möglich.

---

## Abstract

Dikes serve to protect against flooding. To ensure this, the sealing and the supporting body as well as the land side drainage are essential for stability and functionality. In addition, technical or vegetative measures effectively protect the landside embankments against erosion caused by overflow or wave overtopping, usually only at very limited permissible overflow velocities. Thus, the stability against erosion of inner slopes of river and sea dikes contributes significantly to the overall stability of the structure and leads directly to the protection of the hinterland. Dikes with a high water levels over a longer period of time can be heavily soaked and run the risk of failing due to overflow processes. In addition to the properties of the dike construction materials, the size and exposure time of the hydraulic forces caused by overflow also determine stability.

In contrast to wave overtopping of sea dikes, which can only be tolerated to a very small extent, a loss of stability due to uncontrolled and permanent overflowing of river dikes is generally considered to be the most frequent failure case according to various recommendations, regulations or leaflets. There is still no information or only estimated values for tolerable specific discharges. The aim of this work resulting from this lack is the investigation of a possibility to determine the erosion stability of inner slopes. The focus lies on the investigation of interactions between the hydraulic flow variables (flow velocity and shear stress) effect on the slope surface. Methods for the determination, description and evaluation of surface erosion phenomena and processes on dike slopes as well as the US-American method ASTM D6460 for the large-scale evaluation of the functional capability of geosynthetic erosion protection products on channel beds are investigated and tested for their applicability for testing the erosion stability of dike and dam structures.

This dissertation demonstrates that it is also possible in principle to test dike embankments on the basis of the US-American standard ASTM D6460. Overall, the 158 individual in-situ tests carried out prove the excellent applicability to full-scale dikes. In addition, several simultaneous tests or individual tests with comparatively very high specific discharges are possible.

---

## Vorwort

Die vorliegende Publikation ist die gedruckte Fassung der Dissertation von Herrn

**Dr.-Ing. Jan Olschewski,**

die er am 12.03.2024 an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock mit **magna cum laude** verteidigt hat.

Die Arbeit wurde von **Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff**, dem Inhaber der Professur Geotechnik und Küstenwasserbau betreut und begutachtet. Weitere Gutachter waren **Prof. Dr.-Ing. Norbert Meyer** (Technische Universität Clausthal) und **Prof. Dr.-Ing. Ulrich Turczynski** (ehemals Hochschule Magdeburg Stendal).

Herr Dr.-Ing. Olschewski stellte sich in der Dissertation die Aufgabe, eine Methode zur Bestimmung der Erosionsstabilität von Deichbinnenböschungen unter Verwendung mobiler Strömungsrinnen zu überprüfen. Überströmungsvorgänge und deren Auswirkungen auf Deichbinnenböschungen werden beurteilt. Dazu wird ein Verfahren zur Ermittlung des Widerstandes gegen überströmungsinduzierte Erosion mit im Feld zuverlässig reproduzierbaren Methoden zur Ermittlung von Erosion weiterentwickelt, auf großmaßstäblichen Versuchsdeichen angewandt und bewertet.

Eine unkontrollierte und dauerhafte Überströmung von (Fluss-) Deichen wird nach verschiedenen Empfehlungen, Regelwerken oder Merkblättern meist als häufigster Versagensfall definiert und sollte unterbunden werden. So gibt es momentan keine Angaben oder Schätzwerte zu tolerierbaren spezifischen Abflüssen.

Im Zuge großmaßstäblicher Überströmungsversuche stellt Herr Dr.-Ing. Olschewski fest, dass die Überprüfung von Deichbinnenböschungen auf Grundlage des US-amerikanischen Standards ASTM D6460 grundsätzlich möglich ist. Die geometrischen Randbedingungen wie Böschungslänge, Anzahl der Testabschnitte oder Böschungsneigung sind abhängig vom zu überprüfenden Erdbauwerk bzw. dessen Böschungsoberfläche – hier muss von den ASTM-Vorgaben abgewichen werden. Auch ist der definierte kritische Bodenabtrag nicht zwingend auf Deichbinnenböschungen anzuwenden. Eine Definition seitens Betreiber bzw. zuständiger Behörde ist hier notwendig.

Herr Dr.-Ing. Olschewski zeigt in dieser Arbeit, dass ein bestehendes und angepasstes Prüfverfahren, das ursprünglich für die Bewertung von Erosionsschutzprodukten entwickelt wurde, erfolgreich angewendet werden kann. Die neue Fokussierung auf Erdbauwerke ermöglicht es, die Erosionsstabilität – beispielsweise der landseitigen Deckschicht oder des Dränkörpers – wiederholgenau zu testen und zu überprüfen. Dadurch kann erheblich zur Prognose der Stabilität des Bauwerks beigetragen werden.



Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff

---

## Danksagung des Verfassers

Diese Dissertation entstand während und nach meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Professur Geotechnik und Küstenwasserbau der Universität Rostock. Die großmaßstäblichen Überströmungsversuche waren Teil des durch das *South Baltic Programme* geförderten *Interreg*-Projektes *DredgDikes*.

Mein aufrichtiger Dank geht an meinen Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff für seine fachliche Anleitung, seine wertvollen Einsichten und seine kontinuierliche Unterstützung während meiner gesamten Promotionszeit. Ebenfalls möchte ich den Gutachtern Prof. Dr.-Ing. Norbert Meyer und Prof. Dr.-Ing. Ulrich Turczynski für die konstruktiven Rückmeldungen und ihr Interesse an meiner Arbeit danken.

Ein herzliches Dankeschön gilt Dr.-Ing. Stefan Cantré für seinen fachlichen Austausch und seine wertvollen Anregungen. Außerdem möchte ich mich bei allen weiteren Kolleginnen und Kollegen der Professur Geotechnik und Küstenwasserbau bedanken, die mich während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl unterstützt und inspiriert haben, auch allen ehemaligen wissenschaftlichen Hilfskräften der Professur, allen voran M.Sc. Tobias Schubert, ein herzliches Dankeschön für die engagierte Unterstützung und die Hilfe bei verschiedenen Arbeiten, vor allem während der Überströmungsversuche auf dem Rostocker Forschungsdeich.

Für meine Zeit in Danzig und die Unterstützung während der dort durchgeführten Versuche möchte ich mich bei den Kollegen der Gdańsk Tech dr inż. Rafał Ossowski, dr inż. Remigiusz Duszyński und dr hab. inż. Marcin Cudny bedanken.

Abschließend möchte ich meiner Ehefrau Ulli und meinem Sohn Artur danken, die mich während meiner Promotionszeit bedingungslos unterstützt und ermutigt haben.



Dr.-Ing. Jan Olschewski

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iv</b>
<b>Vorwort Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff</b> .....	<b>v</b>
<b>Danksagung des Verfassers</b> .....	<b>vi</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>vii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>x</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>xv</b>
<b>Formelverzeichnis</b> .....	<b>xviii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>xviii</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>xix</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>xx</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation und Problemstellung der Arbeit .....	1
1.2 Zielstellung und Einordnung der Arbeit .....	2
<b>2. Grundlagen</b> .....	<b>4</b>
2.1 Deiche in Deutschland .....	4
2.1.1 Flussdeiche .....	5
2.1.1.1 Deichquerschnitt.....	5
2.1.1.2 Empfohlene Baustoffe .....	5
2.1.2 Seedeiche .....	6
2.1.2.1 Deichquerschnitte.....	6
2.1.2.2 Empfohlene Baustoffe .....	7
2.1.3 Nachweise und mögliche Versagensformen .....	9
2.2 Erosion.....	11
2.2.1 Relevante Erosionsprozesse.....	12
2.2.1.1 Erosion nichtbindiger Böden.....	12
2.2.1.2 Erosion bindiger Böden .....	14
2.2.1.3 Erosion grasbewachsener Böschungen .....	15
2.2.2 Möglichkeiten zur Ermittlung und Messung von Bodenerosion .....	16
2.2.2.1 Ermittlung von Erosion .....	17
2.2.2.2 Erosionsrate .....	18
2.2.2.3 Mögliche Grenzwerte zur Beschreibung überströmungs- induzierter Oberflächenerosion von Deichbinnenböschungen ....	19

---

2.2.3	Maßnahmen zum Schutz vor Erosion von Deichbinnenböschungen.....	20
2.2.3.1	Vegetative Maßnahmen.....	20
2.2.3.2	Konstruktive Maßnahmen.....	21
2.3	Fazit.....	25
<b>3.</b>	<b>Zur Überströmung von Deichen .....</b>	<b>27</b>
3.1	Grundlagen der Deichüberströmung.....	27
3.1.1	Die Kräfte fließenden Wassers.....	28
3.1.1.1	Durchfluss.....	28
3.1.1.2	Fließgeschwindigkeit.....	29
3.1.1.3	Schleppspannung.....	30
3.1.1.4	Weitere Eigenschaften einer Strömung.....	32
3.1.2	Deichüberströmungsmodell.....	34
3.1.3	Einfluss einer Überströmung auf den Boden und dessen Eigenschaften.....	35
3.1.4	Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf Überströmungen .....	36
3.2	ASTM D6460 .....	38
3.3	Bisherige Untersuchungen.....	42
3.3.1	Überströmungsversuche .....	44
3.3.1.1	Koelewijn et al. (2022).....	44
3.3.1.2	NTPEP (2015).....	46
3.3.1.3	Hsieh und Chen (2014).....	48
3.3.1.4	Turner et al. (2011) und Thornton et al. (2009).....	49
3.3.1.5	Westrich et al. (2003).....	50
3.3.1.6	Dornack (2001).....	52
3.3.1.7	Hanson (1991a) und Hanson und Cook (2004).....	53
3.3.1.8	Zanke et al. (2009) und Steuernagel (2008).....	54
3.3.2	Kombinierte Überströmungs- und Wellenüberlaufversuche .....	54
3.3.3	Wellenüberlaufversuche.....	57
3.4	Fazit.....	60
<b>4.</b>	<b>Hydraulische Untersuchungen .....</b>	<b>62</b>
4.1	Das Projekt DredgDikes.....	62
4.1.1	Laborströmungsrinne .....	63
4.1.1.1	Versuchsaufbau und Messtechnik.....	63
4.1.1.2	Versuchsprogramm .....	64
4.1.2	Forschungsdeich in Rostock .....	65
4.1.3	Forschungsdeich in Danzig.....	67
4.2	Großmaßstäbliche Überströmungsversuche .....	69
4.2.1	Versuchsaufbau .....	69
4.2.1.1	Versuchsaufbau in Rostock.....	69
4.2.1.2	Versuchsaufbau in Danzig .....	72

---

4.2.2	Messtechnik .....	73
4.2.2.1	Erosion .....	73
4.2.2.2	Fließgeschwindigkeit und Abflusstiefe.....	75
4.2.2.3	Bodenfeuchte und Saugspannung .....	76
4.2.3	Ermittlung und Berechnung maßgeblicher hydraulischer Parameter und des Bodenabtrags.....	77
4.2.4	Modellähnlichkeit.....	79
4.2.5	Versuchsprogramm .....	80
4.3	Fazit zur Methodik der großmaßstäblichen Überströmungsversuche .....	81
<b>5.</b>	<b>Ergebnisdarstellung der hydraulischen Untersuchungen .....</b>	<b>83</b>
5.1	Ergebnisse der Laborüberströmungsversuche .....	83
5.2	Ergebnisse der großmaßstäblichen Überströmungsversuche in Rostock.....	85
5.3	Ergebnisse der großmaßstäblichen Überströmungsversuche in Danzig.....	93
5.4	Fazit zur Ergebnisdarstellung der Überströmungsversuche .....	100
<b>6.</b>	<b>Diskussion der Methoden und Ergebnisse.....</b>	<b>103</b>
6.1	Zu den Laborüberströmungsversuchen – Überprüfung der Messmethoden .....	103
6.2	Zum Versuchsaufbau.....	103
6.3	Zur Versuchsdurchführung .....	105
6.3.1	Versuchsdauer .....	105
6.3.2	Erosionsmessung.....	106
6.4	Zur Versuchsauswertung .....	106
6.4.1	Rostock .....	106
6.4.2	Danzig.....	107
6.5	Hinweise zu den großmaßstäblichen Überströmungsversuchen .....	111
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>113</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>117</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1.	Darstellung des methodischen Vorgehens der vorliegenden Arbeit .....	3
Abbildung 2-1.	Flussdeich nach DWA-Merkblatt 507: Schematischer Aufbau und Begriffe (Darstellung nach DWA-M 507-1).....	5
Abbildung 2-2.	Querschnittselemente des 3-Zonen-Deichs: Dränkörper; Stützkörper und Dichtung (Darstellung nach DIN 19712 und DWA-M 507-1).....	5
Abbildung 2-3.	Landesschutzdeich nach dem Regelwerk Küstenschutz MV: Schematischer Aufbau und Begrifflichkeiten. Darstellung nach LU MV (2009).....	7
Abbildung 2-4.	Darstellungen des Bewegungsbeginns eines Bodenteilchens in Form von: (a) <i>Rutschen</i> und (b) <i>Rollen</i> .....	14
Abbildung 2-5.	Schematische Darstellungen des Bewegungsbeginns eines Bodenteilchens ( <i>Hüpfen</i> ).....	14
Abbildung 2-6.	Ausprägungen überströmungsinduzierter Erosion begrünter Böschungen .....	16
Abbildung 2-7.	Versagen einer Geomatte (GMA).....	16
Abbildung 2-8:	Erosionskategorien nach Briaud (2008).....	19
Abbildung 2-9.	Empfohlene Entwurfsparameter ausgewählter Erosionsschutzmaßnahmen auf Böschungen nach Hewlett et al. (1987).....	23
Abbildung 3-1.	Darstellung maßgeblicher Gerinneparameter und hydraulischer Größen .....	29
Abbildung 3-2.	Geschwindigkeitsprofile einer laminaren und einer turbulenten Strömung sowie Angabe der Lage der mittleren Fließgeschwindigkeit.....	30
Abbildung 3-3.	Verteilung und Herleitung der Schleppspannung ( $\tau_i$ ).....	31
Abbildung 3-4.	Darstellung der Deichüberströmung und der jeweiligen Fließzustände <i>Strömen</i> ( $Fr < 1$ ) sowie <i>Beschleunigt Schießend</i> und <i>Normalabfluss Schießend</i> ( $Fr > 1$ ).....	35
Abbildung 3-5.	Manning-Strickler-Beiwerte $k_{St}$ [ $m^{1/3}m^{-1}$ ] und Rauheiten $k$ [mm] für ausgewählte Gerinneoberflächen.....	37
Abbildung 3-6.	Einfluss der Sohlbeschaffenheit auf die oberflächennahe Fließgeschwindigkeit.....	37
Abbildung 3-7.	Abhängigkeit des Stricklerbeiwerts $k_{St}$ vom spezifischen Abfluss $q$ unter Berücksichtigung verschiedener Grashalmhöhen. Darstellung nach Hewlett et al. (1987).....	38
Abbildung 3-8.	Darstellungen verschiedener Deichüberströmungsformen .....	42
Abbildung 3-9:	Versuchsaufbau der <i>Polders2C</i> 's-Überströmungsversuche (Foto: Koelewijn et al. 2022).....	45
Abbildung 3-10:	Schematischer Deichquerschnitt mit Darstellung der verwendeten Messtechnik (Koelewijn et al. 2022).....	46

Abbildung 3-11:	Beispielhafte 3D-Darstellung einer Punktwolke als Ergebnis einer LiDAR-Messung einer Schadstelle (Koelewijn et. al. 2022). .....	46
Abbildung 3-12.	Beispiel der NTPEP-Auswertung vier aufeinanderfolgender Einzelversuche zur Bewertung einer Erosionsschutzmatte. ....	48
Abbildung 3-13.	Erosionsraten [ $\text{gm}^{-2}\text{min}^{-1}$ ] (Ordinate) unbehandelten Lößlehms in Abhängigkeit von spezifischen Durchflüssen $q$ [ $\text{ls}^{-1}\text{m}^{-1}$ ] über der Zeit $t$ [min] (Abszisse).....	52
Abbildung 3-14.	Soll-Ist-Lage einer Messpunktauswahl zur Darstellung von Erosionsschäden nach den RIMAX-Überströmungsversuchen. Darstellung nach Zanke et al. (2009). ....	55
Abbildung 3-15.	Grundriss der Deichkrone und -binnenböschung einschließlich der Messpunkte für Bodenerosion der Versuche von Pan et al. (2013). ....	56
Abbildung 3-16.	Mittlerer Gesamtbodenabtrag je Festpunkt und je Einzelversuch der Überströmungsversuche von Pan et al. (2013).....	57
Abbildung 3-17.	Definition von Strömungsgrößen des Wellenüberlaufs auf Deichkrone und Deichböschung .....	58
Abbildung 3-18.	Prinzip des Wellenüberlaufsimulators nach Van der Meer et al. (2007). ....	59
Abbildung 3-19:	Wellüberlaufsimulator während eines Versuchs bei dem $14 \text{ m}^3$ Wasser innerhalb weniger Sekunden über die Deichböschung geleitet werden (Foto: Van der Meer et al (2007)) .....	59
Abbildung 4-1.	Laborströmungsrinne nach Lesch (2012).....	64
Abbildung 4-2.	Versuchsdeich in Rostock. ....	66
Abbildung 4-3.	Im Rostocker Forschungsdeich verwendete Geokunststoffe .....	66
Abbildung 4-4.	Versuchsdeich in Danzig. ....	68
Abbildung 4-5.	Ursprünglicher geplante Version des Versuchsdeichs Danzig .....	68
Abbildung 4-6.	Überströmungsstrecken auf dem Rostocker Forschungsdeich im September 2013 (blau) und im Mai 2014 (orange-gestreift).....	69
Abbildung 4-7.	Standardaufbau der Rinnen für die Überströmungsversuche auf dem Rostocker Forschungsdeich.....	70
Abbildung 4-8.	Grundriss einer beliebigen Rinne auf einer Deichbinnenböschung der Forschungsdeiche mit $n$ Testabschnitten .....	71
Abbildung 4-9.	Wasserkreislauf während der Versuche in Rostock.....	71
Abbildung 4-10.	Standardaufbau der Rinnen für die Überströmungsversuche auf dem Danziger Forschungsdeich.....	72
Abbildung 4-11.	Wasserkreislauf während der Versuche in Danzig: 1) Pumpe → 2) Bassin → 3) Hubschütze → 4) Rinnen → 5) Entwässerungsrinne/ Vorflut → 1) Pumpe. ....	73
Abbildung 4-12.	Pin-Profilier/ Spitzentaster zur Ermittlung des Bodenabtrags. ....	74
Abbildung 4-13.	Prinzip der Messungen von Strömungsgrößen senkrecht zur Böschungsoberfläche. Hier: Messung der Fließgeschwindigkeit in einem Testabschnitt. ....	75
Abbildung 4-14.	Anordnung der Feuchtemesstechnik unter einer Rinne im September 2013.....	76

---

Abbildung 4-15:	Parameter bei freiem Auslauf unter Schützen zur Abschätzung einzustellender Abflüsse.....	78
Abbildung 4-16:	Darstellung zur Messung der Erosion an fünf Messpunkten (A, B, C, D und E, rot markiert) eines Testabschnitts (transparent rot) vor und nach einem Einzelversuch. Fließrichtung von rechts nach links.....	79
Abbildung 4-17:	Darstellungen künstlich angelegter Schadstellen im Rahmen der Überströmungsversuche im Mai 2014.....	81
Abbildung 5-1:	Vollständige Erosion einer begrünten Probe aufgrund eines Querrisses.....	83
Abbildung 5-2:	Darstellung der Ergebnisse der Laserscannmessungen nach Einzelversuchen vier verschiedener Versuchsreihen.....	84
Abbildung 5-3:	Erosionsraten vier verschiedener Materialien (M1–M3, mit und ohne Erosionsschutz (Geomatte)).....	85
Abbildung 5-4:	Ergebnisse der Überströmungsversuche im September 2013.....	87
Abbildung 5-5:	Ergebnisse der Überströmungsversuche im September 2013.....	88
Abbildung 5-6:	Ergebnisse der Überströmungsversuche im Mai 2014; Querschnitte D–G.....	88
Abbildung 5-7:	Ergebnisse der Überströmungsversuche im Mai 2014; Querschnitte D–G.....	89
Abbildung 5-8:	Ergebnisse der Überströmungsversuche im September 2013.....	90
Abbildung 5-9:	Ergebnisse der Überströmungsversuche im September 2013.....	90
Abbildung 5-10:	Ergebnisse der Überströmungsversuche im Mai 2014; Darstellung als Häufigkeitsverteilung aller Einzelversuche auf den Deichquerschnitten D–G; Kategorisierung der Messergebnisse gemäß Tabelle 5-4; Ordinate $\triangleq$ Anzahl der Bodenabtragsmessungen; Abszisse $\triangleq$ Kategorie des Bodenabtrags ( $SL$ ).....	91
Abbildung 5-11:	Ergebnisse der Überströmungsversuche im Mai 2014; Darstellung als Häufigkeitsverteilung aller Einzelversuche auf den Deichquerschnitten D–G; Kategorisierung der Messergebnisse gemäß Tabelle 5-4; Ordinate $\triangleq$ Anzahl der Bodenabtragsmessungen; Abszisse $\triangleq$ Kategorie des Bodenabtrags ( $CSLI$ ).....	91
Abbildung 5-12:	Darstellung des mittleren kumulierten Bodenabtrags ( $SL_{cum}$ ) in Abhängigkeit von der auf der Böschungsoberfläche wirkenden Schleppspannung ( $\tau$ ) aller Versuchsreihen auf den Querschnitten D–G.....	92
Abbildung 5-13:	Darstellung des mittleren kumulierten Clopper Soil Loss Index ( $CSLI_{cum}$ ) in Abhängigkeit von der auf der Böschungsoberfläche wirkenden Schleppspannung ( $\tau$ ) aller Versuchsreihen auf den Querschnitten D–G.....	92
Abbildung 5-14:	Versuchsdurchführung mit hergestellten Schadstellen auf und in der Böschungsoberfläche.....	93
Abbildung 5-15:	Ergebnisse der Überströmungsversuche im September 2014; Rinnen 1 & 2, begrünt; linke Ordinate $\triangleq$ spezifischer Abfluss ( $q$	

	[ $l \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ ] und kumuliertes Überströmungsvolumen ( $V$ [ $m^3$ ]); rechte Ordinate $\triangleq$ kumulierter Bodenabtrag ( $SL_{cum}$ [cm]); Abszisse $\triangleq$ Gesamtversuchsdauer ( $t$ [h]).....	95
Abbildung 5-16:	Ergebnisse der Überströmungsversuche im September 2014; Rinnen 1 & 2, begrünt; linke Ordinate $\triangleq$ spezifischer Abfluss ( $q$ [ $l \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ ]) und kumuliertes Überströmungsvolumen ( $V$ [ $m^3$ ]); rechte Ordinate $\triangleq$ kumulierter Bodenabtrag als Clopper Soil Loss Index ( $CSLI_{cum}$ [cm]); Abszisse = Gesamtversuchsdauer $t$ [h]. .....	95
Abbildung 5-17:	Ergebnisse der Überströmungsversuche im September 2014; Rinnen 1 & 2, unbegrünt; linke Ordinate $\triangleq$ spezifischer Abfluss ( $q$ [ $l \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ ]) und kumuliertes Überströmungsvolumen ( $V$ [ $m^3$ ]); rechte Ordinate $\triangleq$ kumulierter Bodenabtrag ( $SL_{cum}$ [cm]); Abszisse $\triangleq$ Gesamtversuchsdauer ( $t$ [h]).....	96
Abbildung 5-18:	Ergebnisse der Überströmungsversuche im September 2014; Rinnen 1 & 2, unbegrünt; linke Ordinate $\triangleq$ spezifischer Abfluss ( $q$ [ $l \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ ]) und kumuliertes Überströmungsvolumen ( $V$ [ $m^3$ ]); rechte Ordinate $\triangleq$ kumulierter Bodenabtrag als Clopper Soil Loss Index ( $CSLI_{cum}$ [cm]); Abszisse = Gesamtversuchsdauer $t$ [h]. .....	96
Abbildung 5-19:	Darstellung des Bodenabtrags ( $SL_{cum}$ , links) sowie des Clopper Soil Loss Index (rechts, $CSLI_{cum}$ ) in Abhängigkeit von der auf der Böschungsoberfläche wirkenden Schlepptension ( $\tau$ ) aller Versuchsreihen auf den Rinnen 1 & 2.....	97
Abbildung 5-20:	Darstellungen gemittelten Erosionsnummern in Abhängigkeit von der Schlepptension ( $\tau$ ) aller Versuchsreihen auf den Rinnen 1 & 2 im begrüntem (links) und unbegrüntem (rechts) Zustand der Böschungsoberflächen.....	98
Abbildung 5-21a/b:	Fotografische Darstellungen jeder Versuchsreihe unter Berücksichtigung der einzelnen Testabschnitte in Rinne 1 und 2. Jeweilige Nummerierung: (1) = Testabschnitt 1 an der Deichkrone, [...], (9) = Testabschnitt 9 am Deichfuß. Jeweilige Reihenfolge von links nach rechts: Rinnenausgangszustand, Versuche 1, 2, 3, 4, 5, 6. ....	98
Abbildung 6-1:	Ergebnisdarstellung des Bodenabtrags $SL$ [m] in Rinne 1 mit Unterscheidung der oberen drei (TA 1–3) und der unteren sechs (TA 4–9) Testabschnitte.....	108
Abbildung 6-2:	Ergebnisdarstellung des Bodenabtrags $SL$ [m] in Rinne 2 mit Unterscheidung der oberen drei (TA 1–3) und der unteren sechs (TA 4–9) Testabschnitte.....	108
Abbildung 6-3:	Entwicklung des Oberflächenzustandes der Rinne 1 im Bereich der Testabschnitte TA 4 und TA 5.....	110
Abbildung 6-4:	Zustand des Deichfußes im Testabschnitt TA 9 (rechts: Rinne 1; links: Rinne 2) nach der fünften Überströmung. ....	111
Abbildung 6-5:	Beispiel zum Vergleich der berechneten Schlepptension mit dem gravitationsbasierten Ansatz (rote Linie, eckig-waagerechte Marker) und dem impulsbasierten Ansatz (blaue Linie, eckig-gedrehte Marker) nach ASTM D6460. Die grüne	

---

dicke Linie entspricht der Abflusshöhe entlang des  
Rinnenverlaufs, die schwarze dünne Linie stellt die gemittelte  
impulsbasierte Schleppspannung dar. Hier: Versuch Nummer  
E-N3.6, Rostock, Mai 2014. .... 112

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1.	Zusammenstellung ausgewählter Querschnittelemente von Haupt- und Landesschutzdeichen.....	7
Tabelle 2-2.	Zusammenstellung der relevanten Eigenschaften der Erdbaustoffe Klei, Geschiebelehm und -mergel in Deichdeckschichten und deren empfohlenen Grenzwerte (EAK 2020).....	8
Tabelle 2-3.	Zusammenstellung der relevanten Eigenschaften von Baggergut zur Verwendung in Deichdeckschichten und der empfohlenen Grenzwerte (EAK 2020).....	9
Tabelle 2-4.	Grenzwerte von Materialparameter zur Bestimmung der Erosionsbeständigkeit von Klei als Oberflächendichtung von Deichbauwerken nach niederländischer VTV 2004. ....	21
Tabelle 2-5.	Zusammenstellung kritischer Strömungsparameter ausgewählter Oberflächenbeschaffenheiten nach Bollich (2013) zur Ausführung von Deichböschungen nach DWA-M 507-1.....	24
Tabelle 2-6.	Bezeichnungen und Besonderheiten von Erosionsschutzprodukten und Vegetationshilfen nach prEN 189224 und DIN EN ISO 10318-1.....	24
Tabelle 3-1.	Definitionen des Strömungs- und Grenzzustandes mit Fließgeschwindigkeit ( $v$ ) und Grenzgeschwindigkeit ( $v_{gr}$ ), der Abflusstiefe ( $h$ ) und der Grenztiefe ( $h_{gr}$ ) sowie der Froude-Zahl ( $Fr$ ).....	33
Tabelle 3-2.	Empfohlene Zieldurchflüsse bzw. zu mobilisierende Schleppspannung $\tau_o$ [Pa; psf] nach ASTM D6460 (2012) in Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Sohloberfläche der Versuchsrinne. ....	40
Tabelle 3-3.	Zusammenstellung großmaßstäblicher Überströmungs- und Wellenüberlaufversuche unter Berücksichtigung der jeweiligen hydraulischen Parameter spezifischer Abfluss $q$ , Schleppspannung $\tau$ und Fließgeschwindigkeit $v$ . ....	43
Tabelle 3-4.	Bodenmechanische Eigenschaften des bei den NPTTP-Versuchen (2015) am häufigsten verwendeten Versuchsbodens.....	47
Tabelle 3-5.	Geometrien der Versuchsrinnen und bodenmechanische Eigenschaften der verwendeten Versuchsböden (Thornton et al. 2009; Turner et al. 2011).....	49
Tabelle 3-6.	Geometrien und Form des Probeneinbaus sowie Informationen zu den Versuchsabläufen und weiteren Besonderheiten der im Rahmen von Westrich et al. (2003) durchgeführten Überströmungsversuche.....	51
Tabelle 3-7.	Geometrie und Form der Versuchsrinne und des Dammmodells sowie Informationen zu den Versuchsabläufen und weitere Besonderheiten der im Rahmen von Dornack (2001) durchgeführten Überströmungsversuche.....	53
Tabelle 3-8.	Durch Hanson (1990a) sowie Hanson und Cook (2004) verwendete Strömungsrinnen für Überströmungsversuche.....	53

---

Tabelle 3-9.	Geometrie und Form des Wellenkanals und des Deichmodells, Versuchsablauf der im Rahmen von Pan et al. (2013) durchgeführten kombinierten Überströmungs- und Wellenüberlaufversuche.....	55
Tabelle 4-1.	Versuchsprogramm in der Laborströmungsrinne – unbegrünte Proben.....	64
Tabelle 4-2.	Versuchsprogramm in der Laborströmungsrinne – begrünte Proben.....	65
Tabelle 4-3.	Rostocker Forschungsdeich. Polder, Querschnitte und verwendete Materialien (M1, M2 und M3) sowie die Angabe des jeweiligen Teildeiches (O $\triangleq$ Ostseite, W $\triangleq$ Westseite) (Saathoff et al. 2015). .....	67
Tabelle 4-4.	Zusammenstellung ausgewählter Bodenparameter der im Rostocker Forschungsdeich verwendeten Baggergutmaterialien (M1, M2 und M3), bestimmt an 2013 aus dem Deich entnommener Proben (Saathoff et al. 2015). .....	67
Tabelle 4-5.	Zusammenstellung ausgewählter Bodenparameter der im Danziger Forschungsdeich verwendeten Materialien (Ton, Asche-Schluff- und Asche-Sandgemisch) (Saathoff et al. 2015). .....	69
Tabelle 4-6.	Zusammengefasste Parameter aller Rinnen auf den jeweiligen Überströmungsstrecken der Deichquerschnitte des Rostocker Forschungsdeiches. ....	70
Tabelle 4-7.	Standardabweichung als Genauigkeit einer Einzelmessung des Spitzentasters zur Messung der Bodenerosion.....	74
Tabelle 4-8.	Übersicht der verwendeten Messgeräte zur Bestimmung der Strömungsgrößen Fließgeschwindigkeit $v$ und Abflusstiefe $h$ . .....	76
Tabelle 4-9.	Übersicht der verwendeten Messgeräte zur Bestimmung von Bodensaugspannung und Bodenwassergehalt.....	76
Tabelle 4-10.	Beispiel für die Ermittlung des mittleren Bodenabtrags an fünf Messpunkten (A, B, C, D und E) eines Testabschnitts .....	79
Tabelle 4-11.	Übersicht zu den zwischen 2013 und 2014 durchgeführten Überströmungsversuchen in Rostock-Markgrafenheide und Danzig. ....	80
Tabelle 5-1:	Mittlere Werte des spezifischen Abflusses ( $\bar{Q} q$ ), der Fließgeschwindigkeit ( $\bar{Q} v$ ), der Abflusshöhe ( $\bar{Q} h$ ) und der Schleppspannung ( $\bar{Q} \tau$ ) sowie die Froude- ( $Fr$ ) und Reynoldszahl ( $Re$ ) einzelner Überströmungsstufen der Versuche in Rostock (September 2013 und Mai 2014).....	86
Tabelle 5-2:	Mittlere Maximalwerte des spezifischen Abflusses ( $\bar{Q} q_{max}$ ), der Fließgeschwindigkeit ( $\bar{Q} v_{max}$ ), der Abflusshöhe ( $\bar{Q} h_{max}$ ) und der Schleppspannung ( $\bar{Q} \tau_{max}$ ) sowie des Gesamtbodenabtrags ( $\bar{Q} SL_{cum}$ ) und des Clopper Soil Loss Index ( $\bar{Q} CSLI_{cum}$ ) der einzelnen Strömungsrinnen der Kurzzeitversuche in Rostock (September 2013 und Mai 2014).....	86
Tabelle 5-3:	Mittlere Werte des spezifischen Abflusses ( $\bar{Q} q$ ), der Fließgeschwindigkeit ( $\bar{Q} v$ ), der Abflusshöhe ( $\bar{Q} h$ ) und der Schleppspannung ( $\bar{Q} \tau$ ) sowie des Gesamtbodenabtrags	

---

	( $\emptyset SL_{cum}$ ) und des Clopper Soil Loss Index ( $\emptyset CSLI_{cum}$ ) der einzelnen Strömungsrinnen der Langzeitversuche in Rostock ..... 87
Tabelle 5-4:	Klassierung bzw. Kategorisierung der Ergebnisse der Bodenabtragsmessungen; gültig für Bodenabtrag ( $SL$ ) und Clopper Soil Loss Index ( $CSLI$ ); ..... 89
Tabelle 5-5:	Mittlere Werte des spezifischen Abflusses ( $\emptyset q$ ), der Fließgeschwindigkeit ( $\emptyset v$ ), der Abflusshöhe ( $\emptyset h$ ) und der Schleppspannung ( $\emptyset \tau$ ) sowie die Froude- ( $Fr$ ) und Reynoldszahl ( $Re$ ) einzelner Überströmungsstufen der Versuche in Danzig (September 2014) ..... 94
Tabelle 5-6:	Mittlere Maximalwerte des spezifischen Abflusses ( $\emptyset q_{max}$ ), der Fließgeschwindigkeit ( $\emptyset v_{max}$ ), der Abflusshöhe ( $\emptyset h_{max}$ ) und der Schleppspannung ( $\emptyset \tau_{max}$ ) sowie des Gesamtbodenabtrags ( $\emptyset SL_{cum}$ ) und des Clopper Soil Loss Index ( $\emptyset CSLI_{cum}$ ) ..... 94
Tabelle 5-7:	Zusammenstellung der gemittelten Erosionsnummern aller Versuchsreihen auf den Rinnen 1 & 2 ..... 98
Tabelle 6-1:	Mittlere Maximalwerte des spezifischen Abflusses ( $\emptyset q$ ), der Fließgeschwindigkeit ( $\emptyset v$ ), der Abflusshöhe ( $\emptyset h$ ) und der Schleppspannung ( $\emptyset \tau$ ) sowie des Gesamtbodenabtrags ( $\emptyset SL_{cum}$ ) und des Clopper Soil Loss Index ( $\emptyset CSLI_{cum}$ ) der beiden Strömungsrinnen 1 und 2 in Danzig (September 2014). Hier Unterscheidung in die drei oberen Testabschnitte TA 1–3 und die sechs unteren Testabschnitte TA 4–9. .... 107

---

## Formelverzeichnis

(3-1) Kontinuitätsgleichung .....	27
(3-2) Bernoulli-Gleichung .....	27
(3-3) Impulssatz .....	27
(3-4) Zum hydraulischen Radius .....	28
(3-5) Durchfluss .....	28
(3-6) Spezifischer Abfluss .....	28
(3-7) Schleppspannung (stationär) .....	31
(3-8) Schleppspannung (instationär) .....	31
(3-9) Schubspannungsgeschwindigkeit .....	32
(3-10) Reynoldszahl .....	32
(3-11) Grenztiefe .....	33
(3-12) Grenzgeschwindigkeit .....	33
(3-13) Froude-Zahl .....	33
(3-14) Überfallformel nach Poleni .....	34
(3-15) Scherfestigkeit .....	35
(3-16) Scherfestigkeit unter Berücksichtigung des Porenwasserdrucks .....	36
(3-17) Schleppspannung nach ASTM D6460 .....	41
(3-18) CSLI nach ASTM D6460 .....	41
(3-19) Mittlere Abflussgeschwindigkeit in einem Testabschnitt nach ASTM .....	41
(3-20) Rauheit nach Manning (ASTM D6460) .....	42
(3-21) Überlaufwassermenge .....	57

## Abkürzungsverzeichnis

® .....	Registrierte Warenmarke
3-D .....	dreidimensional
AASHTO .....	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM .....	American Society for Testing Materials
<i>const.</i> .....	Konstant
GBL .....	Erosionsschutzmatte ( <i>geoblanket</i> )
GCE .....	Geozelle ( <i>geocells</i> )
GMA .....	Geomatte ( <i>geomat</i> )
GMA-R .....	Verstärkte Geomatte ( <i>reinforced geomat</i> )
GTX .....	Geotextil ( <i>geotextile</i> )
HPTRM .....	High Performance Turf Reinforcement Mat
INTERREG .....	Europäische territoriale Zusammenarbeit
LIDAR .....	Light Detecting and Ranging
NTPEP .....	National Transportation Product Evaluation Program
RECP .....	Erosionsschutzprodukt ( <i>rolled erosion control product</i> )
USCS .....	Unified Soil Classification System
USLE .....	Universal Soil Loss Equation

## Symbolverzeichnis

$A_T$	Wetted channel area (Grundfläche eines Testabschnitts) nach ASTM D6460 [m <sup>2</sup> ]
$b$	Breite [m], Gerinnebreite [mm; cm; m]
$c$	Kohäsion [Pa, Nm <sup>-2</sup> ], (Stör-) Wellenausbreitungsgeschwindigkeit [ms <sup>-1</sup> ]
$C$	Umrechnungsfaktor, const. 1 [-]
$CSLI$	Clopper Soil Loss Index [cm]
$C_T$	total cut (Bodenabtrag) nach ASTM D6460 [m <sup>3</sup> ]
$F_G$	Gewichtskraft [N], Reibungskraft [N]
$F_I$	Impuls [N]
$Fr$	Froude-Zahl [-]
$g$	Gravitationsbeschleunigung [ms <sup>-2</sup> ]
$h$	Abflusstiefe [mm; cm; m]
$h_E$	Energiehöhe [m]
$h_{gr}$	Grenztiefe [m]
$h_u$	Überfallhöhe [m]
$h_v$	Energieverlusthöhe [m]
$I_S$	Sohlgefälle [%; ‰; °; H:V]
$k$	Absolute Rauheit einer Gerinnoberfläche [mm]
$k_{SI}$	Manning-Strickler-Beiwert [m <sup>1/3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$l$	Länge [m]
$l_u$	Benetzter Umfang [m]
$m$	Masse [kg]
$n$	Manning-Beiwert [-]
$p$	Hydrostatischer Druck [Pa]
$p_i$	Hydrostatischer Druck [Pa; Nm <sup>-2</sup> ]
$q$	Spezifischer Abfluss [ls <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ; m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ; m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ]
$Q$	Durchfluss (Zu-/ Abfluss) [ls <sup>-1</sup> ; m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ; m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ]
$Re$	Reynoldszahl [-]
$Re_{krit}$	Kritische Reynoldszahl [-]
$Sf$	Reibungsrelevantes Gefälle nach ASTM D6460 [m·m <sup>-1</sup> ]
$SL$	Bodenabtrag, Soil loss [m; cm]
$t$	Zeit [s; min; h]
$u$	Porenwassedruck [Pa, Nm <sup>-2</sup> ]
$v$	Fließgeschwindigkeit [ms <sup>-1</sup> ]
$V$	Volumen [l; m <sup>3</sup> ]
$\dot{V}$	Volumenstrom [ls <sup>-1</sup> ; m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ; m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ]
$v^*$	Schubspannungsgeschwindigkeit [ms <sup>-1</sup> ]
$v_0$	Fließgeschwindigkeit [ms <sup>-1</sup> ]
$v_{crit}$	Kritische Fließgeschwindigkeit [ms <sup>-1</sup> ]
$V_{esave}$	Mittlere Abflussgeschwindigkeit in einem Testabschnitt nach ASTM D6460 [ms <sup>-1</sup> ]
$v_{gr}$	Grenzgeschwindigkeit [ms <sup>-1</sup> ]
$W$	Gesamte hydraulische Energie Masse [J; kWh]
$z$	Geodätische Höhe [m]
$Z$	Erosionsrate nach Briaud (2001) [mmh <sup>-1</sup> ]
$\alpha$	Böschungseigungswinkel [°]
$\gamma$	Wichte [Nm <sup>-3</sup> ]

---

$\dot{e}$ .....	Erosionsrate nach Shaikh et al. (1988) [ $\text{Nm}^2\text{min}^{-1}$ ]
$e_r$ .....	Erosionsrate nach Hanson (1990a/b) [ $\text{cm}^3\text{h}^{-1}\text{cm}^{-2}$ ]
$\mu$ .....	Überfallbeiwert für Wehre [-]
$\nu$ .....	Viskosität [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ; $\text{Nsm}^{-2}$ ; $\text{Kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ]
$\rho_W$ .....	Dichte des Wasser [ $\text{kgm}^{-3}$ ]
$\sigma$ .....	Normalspannung [ $\text{Pa}$ , $\text{Nm}^{-2}$ ]
$\tau_0$ .....	Effektive Schleppspannung [ $\text{Pa}$ ; $\text{Nm}^{-2}$ ]
$\tau_{crit}$ .....	Kritische Schleppspannung [ $\text{Pa}$ ; $\text{Nm}^{-2}$ ]
$\varphi$ .....	Winkel der inneren Reibung [ $^\circ$ ]
$\varphi'$ .....	Lagewinkel [ $^\circ$ ]

## Anhang

*Vorbemerkung: Alle angegebenen Anhänge befinden sich im digitalen Anhang als \*.xlsx- oder \*.pdf-Dateien.*

*Die Anhänge können als Daten-CD/-DVD am Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau der Universität Rostock eingesehen werden.*

1. Diese Arbeit als \*.pdf-Dokument.
2. Zusammenfassung der Ergebnisse aus Rostock und Danzig
  - *Zusammenfassung\_HRO-Danzig\_2013-2014.xlsx*
    - Zsfg. HRO 2013-09
    - Zsfg. HRO 2014-05
    - Zsfg. Gdansk-2014-09 BEGRÜNT
    - Zsfg. Gdansk-2014-09 UNBEGRÜNT
    - Zsfg. NTPEP 2009... UNBEGRÜNT
    - Zsfg. NTPEP 2009... 6wo BEGRÜNT
    - Zsfg. NTPEP 2009... 1a BEGRÜNT
    - Zsfg. NTPEP 2009... 6wo-1a BEGRÜNT
3. Versuchsprotokolle Rostock, September 2013
  - *Skalen für Pin Profiler v.02.pdf*
  - *2013-07-18 – Q und tau.xlsx* zur Berechnung des erwartbaren Durchflusses sowie der Schleppspannung
  - *2013-09-06 – Querschnitt G.xlsx*
    - G-S1.1; G-S1.2; G-S1.3; G-S1.4; G-S1.1
    - G-S2.1; G-S2.2; G-S2.3
    - G-S3.1; G-S3.2; G-S3.3; G-S3.4; G-S3.5
  - *2013-09-03 – Querschnitt H.xlsx*
    - H-N1.1; H-N1.2; H-N1.3; H-N1.1
    - H-N2.1; H-N2.2; H-N2.3-LANG
    - H-N3.1; H-N3.2; H-N3.3; H-N3.1;
  - *Tab.-Zusammenfassung aller Versuche.xlsx*

- 
- *Öffnung-Wassertiefe-Durchfluss – AUSWAHL.xlsx*
4. Versuchsprotokolle Rostock, Mai 2014 (jeweils Versionen *mit* und *ohne* Berücksichtigung von Akkumulation)
- *2014-05-07-09 – Querschnitt D-N.xlsx*
    - D-N1.1; D-N1.2; D-N1.3; D-N1.4
    - D-N1.5-Lang1; D-N1.6-Lang2; D-N1.7-Lang3
    - D-N2.1; D-N2.2; D-N2.3
    - D-N2.4-LANG1; D-N2.5-LANG2; D-N2.6-LANG3
    - D-N3.1; D-N3.2; D-N3.3; D-N3.4; D-N3.5
  - *2014-05-14&15 – Querschnitt G-N.xlsx*
    - G-N2.1; G-N2.2; G-N2.3
    - G-N2.4-LANG1; G-N2.5-LANG2
    - G-N3.1; G-N3.2; G-N3.3; G-N3.4; G-N3.5
    - G-N3.6-Qmax
  - *2014-05-20&21 – Querschnitt E-N.xlsx*
    - E-N1.5-LANG1; E-N1.6-LANG2; E-N1.7-LANG3
    - E-N2.4-LANG1; E-N2.5-LANG2; E-N2.6-LANG3
    - E-N1.8-Schad
    - E-N1.1; E-N1.2; E-N1.3; E-N1.4
    - E-N2.1; E-N2.2; E-N2.3
    - E-N3.1; E-N3.2; E-N3.3; E-N3.4; E-N3.5; E-N3.6
  - *2014-05-26&27 – Querschnitt F-N.xlsx*
    - F-N1.1; F-N1.2; F-N1.3; F-N1.4
    - F-N1.5-LANG
    - F-N2.1; F-N2.2; F-N2.3
    - F-N2.4-LANG
    - F-N3.1; F-N3.2; F-N3.3; F-N3.4; F-N3.5
    - F-N3.6-LANG
  - *Zusammenfassung\_MAI.xlsx*
  - *2016-01-20-Einzeldaten+Auswertung (2014).xlsx*
  - *Zsfg\_2014\_ weitere Auswertung*
5. Versuchsprotokolle Danzig, September 2014
- *2014-09 – overflowing experiments Flumes 1 + 2 – vegetated.xlsx*
    - 1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.5
    - 2.1; 2.2; 2.3; 2.4; 2.5
    - SL vs. CSLI
    - Evaluation 1-9
    - Evaluation 1-9, 1-3, 4-8
  - *2014-09 – overflowing experiments Flumes 1 + 2 – unvegetated.xlsx*
    - 1.1; 1.2
    - 2.1; 2.2; 2.3; 2.4; 2.5; 2.6
    - Evaluation 1-9, 1-3, 4-8
    - Sämtliche Fotos der Überströmungsversuche in Danzig, sortiert nach Rinnen, Laststufen sowie *vorher* und *nachher*
6. Unterlagen zur Genauigkeitsermittlung Spitzentaster

- 
- Fotos Versuchsaufbau
  - *2016-07-06 – Pin Profiler Genauigkeit\_v0.1.xlsx*

7. Vorlagen der Protokolle für die Überströmungsversuche

---

# 1. Einleitung

## 1.1 Motivation und Problemstellung der Arbeit

Deiche dienen dem Schutz vor Hochwasser. Um diesen gewährleisten zu können, sind die Elemente Dichtung und Stützkörper sowie gegebenenfalls ein landseitiger Filter- bzw. Dränfuß für die Standfestigkeit und die Funktionstüchtigkeit unverzichtbar. Zusätzlich schützen technische oder vegetative Maßnahmen die landseitigen Deichböschungen effektiv vor Erosion durch Überströmung oder Wellenüberlauf bei sehr begrenzten zulässigen Überströmungsraten. Somit trägt die Stabilität gegen Erosionsprozesse auf Binnenböschungen von Fluss- und Seedeichen maßgeblich zur Gesamtstandsicherheit des Bauwerks und direkt zum Schutz des Hinterlandes bei – außer, es wird keine Überströmung zugelassen. Vor allem wasserseitig über einen längeren Zeitraum eingestaute und stark durchfeuchtete Deichkörper laufen Gefahr, durch Überströmungsprozesse zu versagen. Sowohl die Eigenschaften der Deichbaumaterialien als auch die Größe und Einwirkungszeit hydraulischer Kräfte aufgrund von Überströmung bestimmen dabei die Standfestigkeit. Auch die großen Flusshochwasser der letzten Jahrzehnte an Oder und Elbe haben gezeigt, dass Deichüberströmungen häufig das Zünglein an der Waage in Bezug auf die Standsicherheit von Deichen oder einzelnen Deichabschnitten darstellen (Niesche und Krüger 1998; Oumeraci et al. 2001; Koll und Wiemann 2002; Buß et al. 2012; Henning 2013).

Das Hauptaugenmerk der Betrachtung landseitiger Deichböschungsstabilitäten lag in der Vergangenheit vor allem auf Untersuchungen der Einflüsse periodischer Vernässung landseitiger Böschungsoberflächen, also auf Wellenüberlauf infolge von Extremwetter- bzw. Hochwasserereignissen (Oumeraci et al. 2001; Schüttrumpf 2001; EurOtop 2007; Geisenheiner und Oumeraci 2008; Piontkowitz et al. 2009; Schmocker und Hager 2009; Van der Meer et al. 2010; Vavrina 2010; Hughes et al. 2012; Thornten et al. 2012; Li et al. (2022); DWA-M 507-1). Im Zentrum der Forschung standen vor allem Nordseedeiche. Weniger Beachtung fanden dagegen Untersuchungen in Bezug auf nicht-periodische bzw. dauerhafte Überströmung, wie beispielsweise an Flussedeichen möglich. Hier lag der Fokus neben Deichen vor allem auf Dämmen oder Böschungen als Erdbauwerke im Allgemeinen (Westrich et al. 2003; Bieberstein 2004; ILIT 2006; Thornton et al. 2009; Zanke et al. 2009; Turner et al. 2011; ASTM D6460; Hsieh und Chen 2014; NTPEP 2015).

Diese Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, die Erosionsstabilität von Deichbinnenböschungen unter Verwendung mobiler Strömungsrinnen zu bestimmen sowie Überströmungsvorgänge und deren Auswirkungen auf Deichbinnenböschungen zu beurteilen. Dazu wird ein Verfahren zur Ermittlung des Widerstandes gegen (über-) strömungsinduzierte Erosion mit im Feld zuverlässig reproduzierbarer Methoden zur Ermittlung von Erosion weiterentwickelt, auf großmaßstäblichen Versuchsdeichen angewandt und bewertet.

## 1.2 Zielstellung und Einordnung der Arbeit

Bei Wellenüberläufen und somit diskontinuierlichen Überströmungen mit spezifischen Abflüssen von  $q = 1 - 10 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$  werden keine Schäden (EurOtop 2007) bzw. erste Schäden (EAK 2020) auf Binnenböschungen grasbewachsener Seedeiche erwartet. Da eine unkontrollierte und dauerhafte Überströmung von Flussdeichen nach verschiedenen Empfehlungen, Regelwerken oder Merkblättern meist als häufigster Versagensfall gilt und in erster Linie unterbunden werden sollte (LU MV 2009; DWA-M 507-1), gibt es momentan keine Angaben oder Schätzwerte zu tolerierbaren spezifischen Abflüssen. Das sich aus diesem Mangel ergebende Ziel dieser Arbeit liegt auf der Untersuchung einer Möglichkeit zur Ermittlung der Stabilität von Deichbinnenböschungen. Der Fokus liegt hierbei auf der Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen hydraulischen Belastungen und Böschungsoberflächen. Erst werden verschiedene Methoden zur Ermittlung, Beschreibung sowie Bewertung von Oberflächenerosionserscheinungen und -prozessen auf Deichbinnenböschungen untersucht und ausgewertet. Außerdem wird das US-amerikanische Verfahren ASTM D6460 zur großmaßstäblichen Untersuchung der Funktionsfähigkeit von geosynthetischen Erosionsschutzprodukten auf Kanalsohlen für die Anwendbarkeit zur Prüfung der Erosionsstabilität von Deich- und Dammbauwerken erprobt. Darüber hinaus soll beurteilt werden, ob dieser Standard bezüglich Versuchsaufbau, Versuchsablauf und Auswertungsmethoden gegebenenfalls angepasst werden muss.

In den Kapiteln 2 und 3 werden allgemeine sowie themenspezifische Grundlagen dargestellt. Von generellen Informationen zu Deichen in Deutschland über Grundlagen zu Erosionsprozessen aufgrund von Überströmung werden Inhalte in Bezug auf großmaßstäbliche Überströmungsversuche vor allem zur Ermittlung der Stabilität von Dämmen oder Deichen bzw. deren Fähigkeiten, Erosion zu widerstehen, zusammengetragen. Die durchgeführten klein- und großmaßstäblichen Versuche zur Beschreibung und Ermittlung des Widerstands gegen Erosion werden im Kapitel 4 präsentiert. Dies umfasst kleinmaßstäbliche Versuche in einer Laborströmungsrinne sowie Versuche im Originalmaßstab auf Versuchsdeichen sowohl in Rostock als auch in Danzig. Darauf aufbauend werden die Ergebnisse der Untersuchungen im 5. Kapitel dargestellt. Schließlich werden die Ergebnisse sowie die Anwendbarkeit des Standards ASTM D6460 zur Beschreibung der Erosionsstabilität von landseitigen Deichböschungen im Kapitel 6 diskutiert und Empfehlungen zur Bewertung der Überströmbarkeit von Deichbinnenböschungen gegeben. Diese Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung.

Das methodische Vorgehen zur Bearbeitung des Themas ist in Abbildung 1-1 dargestellt.

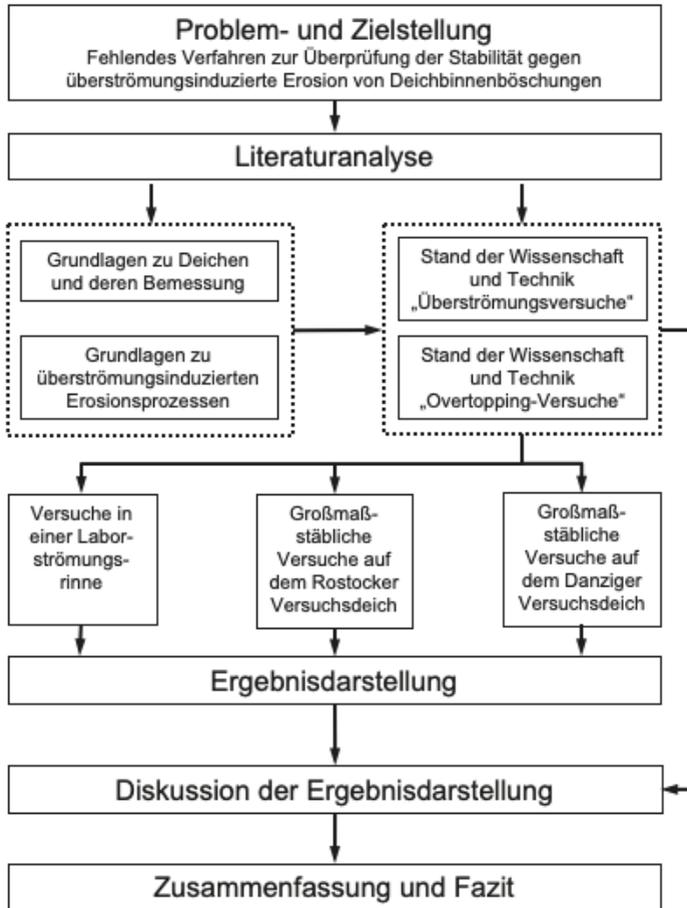


Abbildung 1-1. Darstellung des methodischen Vorgehens der vorliegenden Arbeit.

---

## 2. Grundlagen

Dieses Kapitel widmet sich der Zusammenfassung der wichtigsten Grundlagen zu den Themen Fluss- und Seedeiche in Deutschland sowie überströmungsinduzierter Erosion. Dafür werden in beiden Abschnitten die für eine spätere Diskussion wichtigen Begriffe und Informationen aus relevanten wissenschaftlichen und ingenieurtechnischen Veröffentlichungen zusammengetragen, darunter unter anderem Zanke (1982, 2002), Richter (1998), Saathoff und Werth (2003), Briaud (2008), EAK (2020), DIN 4047-2, DIN EN 1997-1, DIN 19712, DWA-M 507-1.

### 2.1 Deiche in Deutschland

Schon immer versucht der Mensch an Nord- und Ostsee sowie an Flüssen sich und seinen Besitz vor periodisch wiederkehrendem aber auch unregelmäßig auftretendem Hochwasser zu schützen. So dienen unter anderem Deiche seit Jahrhunderten dem Schutz von Ländereien und werden – falls notwendig – an Küsten und entlang von Fließgewässern errichtet. Im Laufe der Zeit hat sich das Wissen um Planung und Konstruktion von Deichen zu einer eigenen Ingenieurdisziplin entwickelt und auch in der Wissenschaft eröffneten sich viele Forschungsschwerpunkte. Grundsätzlich sind Deiche Dammbauwerke zum Hochwasserschutz, vornehmlich aus Bodenmaterialien errichtet und unterliegen nur temporär einem Einstau (DIN 19712; DWA-M 507-1; EAK 2020). Die Geometrie eines Deiches wird einerseits durch mögliche Belastungen im Hochwasserfall und andererseits durch Stabilitätskriterien definiert. Im Gegensatz zu einem Deich dient ein Damm hauptsächlich der dauerhaften Stützung eines Wasserstandes, z.B. als Staudamm oder Stauhaltungsdamm an Wasserstraßen, ggf. auch zum Schutz vor Hochwasser (MSD 2011).

Charakteristisch definiert sich die Querschnittsform eines Deiches vor allem durch die Neigung der land- und wasserseitigen Böschungen und durch die Breite seiner Krone (DIN 19712). Aufgrund großer Unterschiede regional anzutreffender Untergrundverhältnisse und der Qualität sowie Verfügbarkeit von Baumaterialien, aber auch durch verschiedener Zuständigkeiten kann kein allgemeingültiger Regelquerschnitt eines Deiches bestimmt werden (EAK 2020; DWA-M 507-1). Gegenwärtig obliegt der Hochwasserschutz in Deutschland der Hoheit der Bundesländer, welche jeweils in eigenen Gesetzen (z.B. LWaG MV; LWG SH), Ordnungen (z.B. DeichO HH) und Leitfäden oder Regelwerken (z.B. LU MV 2009) rechtliche und technische Rahmenbedingungen festlegen. Begrifflichkeiten, Bemessungsansätze und Entwurfsrichtlinien sind in verschiedenen Empfehlungen, Merkblättern, Normen und Regelwerken zusammengefasst (DIN 4047-2; DIN 19712; DWA-M 507-1; EAK 2020; EurOtop 2007). In folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Unterschiede zwischen Fluss- und Seedeichen herausgearbeitet.

## 2.1.1 Flussdeiche<sup>1</sup>

### 2.1.1.1 Deichquerschnitt

Die Kronenbreite eines Flussdeiches sollte mindestens 3 m – in Ausnahmefällen 2 m – und jede Böschung nicht steiler als 1 : 3 sein. Begriffe zur Beschreibung der Querschnittsgeometrie sind der Abbildung 2-1 zu entnehmen. Generell lassen sich nach DWA-M 507-1 homogene und zionierte Deiche unterscheiden: Ein homogener Deich besteht dabei ausschließlich aus einem die Dichtfunktion übernehmenden und in den Untergrund grenzenden Stützkörper. Wird ein dichtender Stützkörper landseitig durch einen stark durchlässigen Dränkörper erweitert, handelt es sich um einen 2-Zonen-Deich. Als 3-Zonen-Deiche (Abbildung 2-2) werden Deiche bezeichnet, die aus den drei Querschnittselementen Dichtung, durchlässigem Stützkörper und sehr durchlässigem Dränkörper bestehen.

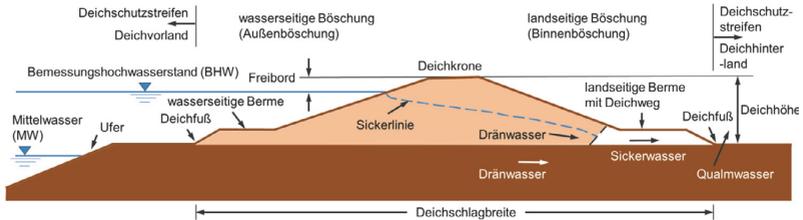


Abbildung 2-1. Flussdeich nach DWA-Merkblatt 507: Schematischer Aufbau und Begriffe (Darstellung nach DWA-M 507-1).



Abbildung 2-2. Querschnittselemente des 3-Zonen-Deiches: Dränkörper; Stützkörper und Dichtung (Darstellung nach DIN 19712 und DWA-M 507-1).

### 2.1.1.2 Empfohlene Baustoffe

Deiche werden hauptsächlich aus regional verfügbaren Erdbaustoffen errichtet. Je nach Anwendungsbereich kommen bindige Böden (Dichtung, Stützkörper) oder nichtbindige Böden (Dräns, Filter, Stützkörper) zum Einsatz. Zusätzlich ist die

<sup>1</sup> Überwiegend aus DWA-M 507-1 und DIN 19712

Verwendung von technischen Materialien oder Materialmischungen möglich, wie z.B. Stahlbeton für Stützwände, Böschungssicherungen oder Wege; Ton-Bindemittel-Gemische für Dichtungen oder zur Bodenverbesserung; und Baustoffrecyclingmaterialien für Stützkörper, Wege oder Dräns (DWA-M 507-1). Schutz der Oberfläche bietet in der Regel eine dicht ausgeprägte und dauerhaft geschlossene Grasnarbe, welche sich am besten auf einem bindigen, mindestens 20 - 30 cm starkem Oberbodenauftrag entwickelt (DIN 19712). Des Weiteren können Geokunststoffe eingesetzt werden, um verschiedene Funktionen wie beispielsweise Dichten, Erosionsschutz oder Entwässern zu unterstützen oder zu verbessern (Saathoff und Werth 2003; Saathoff und Bräu 2009). Darüber hinaus kann unter anderem die Verwendung feinkörnigen Baggerguts als alternatives Deichbaumaterial in Betracht gezogen werden (Saathoff et al. 2015; Große 2016; Jurisch 2023).

## 2.1.2 Seedeiche<sup>2</sup>

### 2.1.2.1 Deichquerschnitte

Je nach Bundesland werden See- und Tidestromdeiche<sup>3</sup> des höchsten Schutzgrades als *Hauptdeiche* (Bremen, Hamburg, Niedersachsen) oder als *Landesschutzdeiche* (Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein) bezeichnet. Groß bemessene Deiche mit hohen Schutzgraden lassen sich nach ihrer Nähe zum Gewässer einteilen: *Schardeiche* mit Lage direkt an der Wasserkante und *Vorlanddeiche*, die hinter seegangsdämpfendem Vorland errichtet werden (EAK 2020). Geringer bemessene Deiche mit niedrigeren Schutzgraden können als *sonstige Deiche*, *Sommerdeiche* oder *Strandwälle* bezeichnet werden (EAK 2020). Eine Zusammenstellung relevanter Querschnittelemente von Haupt- bzw. Landesschutzdeichen ist Tabelle 2-1 zu entnehmen. Abbildung 2-3 zeigt Begriffe zur Beschreibung der Querschnittelemente am Beispiel eines Landesschutzdeiches.

---

<sup>2</sup> Überwiegend aus EAK 2020 und dem Regelwerk Küstenschutz MV (LU MV 2009)

<sup>3</sup> Deiche an durch Gezeiten beeinflussten Fließgewässern

Tabelle 2-1. Zusammenstellung ausgewählter Querschnittelemente von Haupt- und Landesschutzdeichen in Mecklenburg-Vorpommern (MV), Schleswig-Holstein (SH) und Niedersachsen (Nds) (EAK 2020)

Querschnittelement	Nordseedeiche (Nds und SH)	Ostseedeiche (MV, SH)	Bemerkungen
Breite Deichkrone	2,5 - 3,0m	2,5 - 3,5m	
Neigung Außenböschung	1 : 10 - 1 : 6	1 : 15 - 1 : 7	
Deckschichtdicke Außenböschung	1,0 - 1,5m	0,5 - 1,2m	MV: inkl. 0,2m Kulturboden mit Rasensaat
Neigung Binnenböschung	1 : 3	i.d.R. 1 : 3	MV: Ggf. 1 : 2 möglich
Deckschichtdicke Binnenböschung	Min. 0,5 - 1,0m	Min. 0,5 - 0,7m	MV: inkl. 0,2m Kulturboden mit Rasensaat

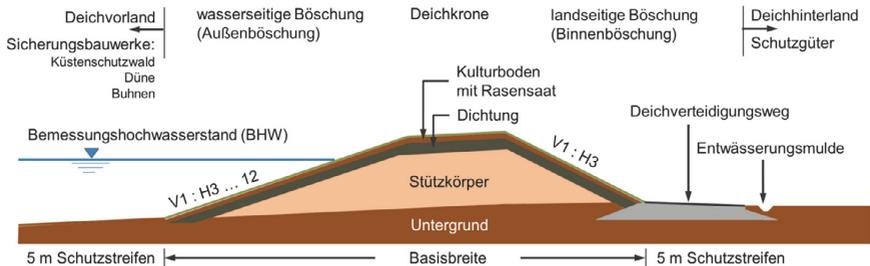


Abbildung 2-3. Landesschutzdeich nach dem Regelwerk Küstenschutz MV: Schematischer Aufbau und Begrifflichkeiten. Darstellung nach LU MV (2009).

### 2.1.2.2 Empfohlene Baustoffe

Wie auch bei Flussdeichen wird aus wirtschaftlichen Gründen bei der Verwendung von Baumaterialien für Seedeiche traditionell auf regional verfügbare Bodenmaterialien zurückgegriffen. Nach der Empfehlung für Küstenschutzwerke dient in der Regel ein geschütteter oder gespülter Sandkern als Stützkörper, welcher ausreichende bautechnische Eigenschaften hinsichtlich Standsicherheit, Setzung und Einbau besitzt (EAK 2020). Dieser Deichkern ist von einer Deckschicht überlagert. Die Deichdeckschicht übernimmt mehrere Funktionen: Einerseits dient sie als Oberflächendichtung und reduziert die Menge an anfallendem Sickerwasser im Deichkörper. Andererseits ist sie als Schutzschicht anzusehen, welche die hydraulischen Kräfte überströmenden Wassers aufzunehmen hat, ohne dabei zu erodieren. Neben Klei an der Nordsee und Geschiebelehm oder -mergel an der Ostsee, wird unter bestimmten Voraussetzungen, z.B. die ökologische Unbedenklichkeit hinsichtlich chemischer und organischer Inhaltsstoffe, die

Verwendung von Baggergut gestattet (EAK 2020). Die relevanten Eigenschaften der Erdbaustoffe für Deichdeckschichten und deren Grenzwerte sind in Tabelle 2-2 (Klei, Lehm/ Mergel) und in Tabelle 2-3 (Baggergut) zusammengefasst. Unabhängig von der Art der Deckschicht ist, falls Überströmung zugelassen wird, eine Begrünung in Form einer dichten und geschlossenen Grasnarbe erforderlich, um die mechanischen Eigenschaften in Bezug auf Erosionsstabilität, Zug- und Scherfestigkeit zu erhöhen und die Austrocknung der Deckschicht zu verhindern, aber auch die Entwässerung des bindigen Materials zu unterstützen (EAK 2020). In seltenen Fällen und nur bei besonderen Anforderungen werden Deckschichten vollständig aus anderen Materialien hergestellt. Des Weiteren können bei See- deichen zur Unterstützung oder Verbesserung bestimmter Funktionen wie Dichten, Erosionsschutz oder Entwässern ebenfalls Geokunststoffe eingesetzt werden (Saathoff und Werth 2003; Saathoff und Bräu 2009). Auch steht die Verwendung feinkörnigen Baggerguts als alternativer Deichbaustoff zur Diskussion (Saathoff et al. 2015; Große 2016).

Tabelle 2-2. Zusammenstellung der relevanten Eigenschaften der Erdbaustoffe Klei, Geschiebelehm und -mergel in Deichdeckschichten und deren empfohlene Grenzwerte (EAK 2020)

Bodeneigenschaft	Grenzwerte		
	Gut geeignet	Geeignet	Bedingt geeignet
<i>Klei</i>			
Bodenart	schluff./ ton. Klei	sandiger Klei	stark sandiger Klei
Tonanteil ( $d < 0,002 \text{ mm}$ )	20 - 40 %	15 - 20 %	10 - 15 %
Sandanteil ( $d > 0,063 \text{ mm}$ )	10 - 40 %	25 - 50 %	30 - 50 %
Fließgrenze $w_L$	35 - 70 %	30 - 55 %	25 - 40 %
Plastizitätszahl $I_P$	20 - 45 %	15 - 20 %	10 - 15 %
Einbauwassergehalt $w$	25 - 60 %	25 - 50 %	25 - 45 %
Trockendichte $\rho_d$	1,10 - 1,45 $\text{gcm}^{-3}$	1,15 - 1,50 $\text{gcm}^{-3}$	1,25 - 1,55 $\text{gcm}^{-3}$
Anfangsscherfestigkeit $c_u$	$\geq 25 \text{ kPa}$	$\geq 30 \text{ kPa}$	$\geq 40 \text{ kPa}$
Glühverlust $V_{gl}$	$\leq 10 \%$	$\leq 10 \%$	$\leq 5 \%$
<i>Geschiebelehm und -mergel</i>			
Bodenart	Lehm/ Mergel	sandiger Lehm/ Mergel	stark sandiger Lehm/ Mergel
Tonanteil ( $d < 0,002 \text{ mm}$ )	$\geq 15 \%$	9 - 15 %	4 - 9 %
Sandanteil ( $d > 0,063 \text{ mm}$ )	25 - 55 %	35 - 65 %	60 - 75 %
Fließgrenze $w_L$	$\geq 22 \%$	18 - 27 %	15 - 20 %
Plastizitätszahl $I_P$	$\geq 12 \%$	6 - 12 %	4 - 10 %
Einbauwassergehalt $w$	8 - 18 %	8 - 13 %	7 - 12 %
Trockendichte $\rho_d$	1,70 - 2,05 $\text{gcm}^{-3}$	1,95 - 2,05 $\text{gcm}^{-3}$	1,95 - 2,05 $\text{gcm}^{-3}$
Anfangsscherfestigkeit $c_u$	50 - 300 kPa	50 - 300 kPa	100 - 300 kPa

Tabelle 2-3. Zusammenstellung der relevanten Eigenschaften von Baggergut zur Verwendung in Deichdeckschichten und der empfohlenen Grenzwerte (EAK 2020)

Bodeneigenschaft	Grenzwerte	
	Geschiebelehm/ -mergel	Hafenschlick
Glühverlust $V_g$	$\leq 5 \%$	$\leq 20 \%$
Tonanteil ( $d < 0,002 \text{ mm}$ )	$\geq 15 \%$	$\geq 15 \%$
Sandanteil ( $d > 0,063 \text{ mm}$ )	$\leq 60 \%$	$\leq 40 \%$
Anfangsscherfestigkeit $c_u$	$\geq 25 \text{ kPa}$	$\geq 15 \text{ kPa}$

### 2.1.3 Nachweise und mögliche Versagensformen

„Binnenböschungen müssen so ausgebildet werden, dass der Deich erdstatisch standsicher ist und ein entsprechend der jeweiligen Bemessung zugelassener Wellenüberlauf keine Schäden durch Erosion oder Durchfeuchtung bewirken kann“ (EAK 2020). Neben der ständigen Einwirkung aus Eigenlast unterliegen Deiche im Hochwasserfall hydraulischen Belastungen in Form von Strömung, Wasserdruck und Wellenangriff. Seedeiche können vor allem Einwirkungen aus Tiden und Sturmfluten, Seegang und Brandung sowie Strömungen infolge von Tiden oder Wellen, aber auch Eisgang, Treibgut und Ähnlichem ausgesetzt sein (EAK 2020). Flussdeiche unterliegen im Hochwasserfall ähnlichen Belastungen wie Stauhaltungsdämme an Kanälen. Dazu zählen die aus einem Hochwasserstand resultierenden Druck- und Strömungskräfte sowie beispielsweise Lasten eines über das Bemessungshochwasser hinausgehenden Hochwassers<sup>4</sup> (MSD 2011). Sowohl Extremwerte einzelner Einwirkungen als auch Kombinationen mehrerer Einwirkungen können zum Teil- oder Totalversagen eines Deichbauwerkes führen, im schlimmsten Fall zur Überflutung des zu schützenden Hinterlandes. Daher müssen zur Bemessung von Fluss- und Seedeichen hydraulische Berechnungen und geotechnische Nachweise erbracht werden.

Erdstatische Nachweise für ein Deichbauwerk sind nach Eurocode 7 (DIN EN 1997-1) und DIN 1054 durchzuführen. So müssen eine ausreichende Sicherheit gegen Gelände- und Böschungsbruch, hydraulischem Grundbruch, Materialtransport infolge innerer Erosion und Piping sowie Aufschwimmen nachgewiesen werden. Des Weiteren ist ein Nachweis der ausreichenden Dimensionierung der dränenden Querschnittelemente bzw. Bauteile notwendig (MSD 2011; EAK 2020). In Bezug auf die Deckschichtdicke gibt es derzeit noch keine Bemessungskriterien (EAK 2020).

<sup>4</sup> Neben ständigen und vorübergehenden ist dies eine außergewöhnliche Bemessungssituation nach MSD 2011 bzw. DIN 1054.

Die Deichhöhe ist abhängig vom Bemessungshochwasser (*Bemessungswasserstand, maßgebender Sturmflutwasserstand, Bemessungshochwasserstand* (Ostsee)). Für die deutsche Ostseeküste ergibt sich der Bemessungshochwasserstand (BHW) aus dem Scheitelwert des größten Ereignisses zuzüglich eines Zuschlags, der den säkularen Meeresspiegelanstieg berücksichtigt (LU M-V 2022). Für die Berechnung des Bemessungshochwassers an Nordsee, Tidestromflüssen oder sonstigen Fließgewässern wird auf EAK 2020 bzw. DWA-M 507-1 verwiesen.

Trotz gründlich geführter Nachweise kann es zum Teil- oder Totalversagen eines Deiches aufgrund äußerer Belastungen kommen. Verschiedene Schadens- und Versagensmechanismen von Nordsee- und Tidestromdeichen wurden bereits von Korthenhaus (2003) und Rechtern (2003) recherchiert und zusammengefasst. Korthenhaus (2003) unterscheidet in globale Versagensmechanismen, also Versagen des gesamten Bauwerks bzw. dessen Hauptfunktion (dem Schutz des Hinterlandes vor Überflutung) und in Versagensmechanismen der einzelnen Querschnittselemente Außenböschung, Binnenböschung und Deichkern.

Übersteigt ein Hochwasser die Höhe des Freibords und somit die see- und landseitige Deichoberkante, kommt es zur kontinuierlichen Überströmung der Binnenböschung. Bereits die Überströmung ohne Schädigung des Deichs oder eines Querschnittselementes kann als Totalversagen eingeordnet werden (Korthenhaus 2003), sollte es sich nicht um eine geplante Überlaufstrecke z.B. nach DWA-M 507-1 handeln. Ähnlich verhält es sich mit Wellenüberläufen, welche tolerierbar sein können, solange das Hinterland nicht überflutet wird und es nicht zu Schäden am Deichbauwerk kommt (EAK 2020). Ein Versagen der Binnenböschung kann eintreten, wenn die mobilisierten Kräfte des abfließenden, durchströmenden oder infiltrierenden Wassers die widerstehenden Kräfte der Binnenböschung, einschließlich der Deckschicht, des Oberbodens und der Rasensaat übersteigen. Korthenhaus (2003) beschreibt Versagensmechanismen von Binnenböschungen als Vorstufe des Deichbruchs am Beispiel von Nordseedeichen:

- Erosion der Grasnarbe und Erosion der Kleischicht jeweils als Beitrag zur Zerstörung der den Stützkörper schützenden Deckschicht;
- Infiltration und Durchströmung als Beitrag zur Änderung des Wassergehaltes im Deichkern, was eine Erhöhung des Porenwasserdrucks im Stützkörper verursacht, eine Reduzierung der Scherfestigkeit nach sich zieht und im Auftrieb des Kleis, im Abrutschen des Kleis oder gar im Böschungsbruch resultieren kann sowie die
- Gesamterosion der Binnenböschung.

Hanson et al. (2003) und Korthenhaus (2003) beschreiben mehrere Erosionsstufen bis zum Deichbruch aufgrund Überströmung einer aus bindigem Material hergestellten Deichbinnenböschung:

- *Stufe 1:* Oberflächliche Erosion im Bereich des Böschungsfußes, erste Bodenpartikel und -aggregate werden gelöst und bewegen sich;
- *Stufe 2:* Rückschreitende Erosion vom Böschungsfuß aufwärts;
- *Stufe 3:* Absenkung der Deichkrone durch Erosion, Entwicklung einer Bresche auf der Böschung, weiter rückschreitende Erosion;
- *Stufe 4:* Erosion in der entstandenen Bresche durch den hier begünstigten kritischen Abfluss, Vergrößerung der Bresche bis zur Deichkrone;
- *Stufe 5:* Bresche entwickelt sich zum Bruch, was ein Totalversagen des Deiches nach sich zieht.

Das *International Levee Handbook* (CIRIA 2013) unterscheidet zwei Formen des Deichversagens: *Hydraulisches Versagen*, also Versagen aufgrund von Wasser, welches in den Deich eindringt oder ihn überströmt und *strukturelles Versagen* aufgrund des Versagens eines oder mehrerer Bauwerkselemente. Strukturelles Versagen kann hydraulisches Versagen nach sich ziehen. Des Weiteren wird in CIRIA (2013) in technisches und funktionelles Versagen unterschieden: Beim technischen Versagen verschleißten Bauwerkskomponenten bis zum Komponentenschaden. Beim funktionellen Versagen verschlechtern sich die Funktionen eines Deiches. Beides kann sich gegenseitig begünstigen und zum Gesamtversagen führen. Der Faktor Zeit spielt eine entscheidende Rolle: Hier wird in progressives und plötzliches Versagen unterschieden.

## 2.2 Erosion

Hauptversagensgrund von Böschungen, Dämmen oder Deichen ist Erosion aufgrund von Überströmung, Wellenüberlauf oder inneren Erosionsprozessen (Bonelli 2013). Dabei ist Erosion als Ablösung (Abtragung, Deflation, Denudation), Transport und Ablagerung (Sedimentation, Akkumulation) von Bodenteilchen oder -aggregaten zu verstehen (Richter 1998; Krauter 2001; Blume et al. 2002). Auslöser und treibende Kräfte dieses Massenversatzes können Wasser oder Wind sein, aber auch Gravitation oder Gletscherbewegungen. In jedem Fall ist Erosion ein natürlicher Prozess, häufig durch den Einfluss des Menschen beschleunigt oder überhaupt erst ermöglicht (DVWK-M 239/1996).

Richter (1998) und Blume et al. (2002) gehen ausgiebig auf Prozesse und Wirkungen der Bodenerosion ein. So werden u.a. Ablöse- und Transportprozesse aufgrund von Niederschlägen erläutert (*Tropfenerosion*, *flächenhafte Erosion*, *Rillenerosion* und *Graben- oder Gullyerosion*). Auch gravitationsbedingte Erosionsformen und deren mögliche Ursachen, also Formen des Massenseibstversatzes ohne das Einwirken eines erosiven Mediums, existieren (*Stürze*, *Translations-* und *Rotationsrutsche* sowie *Massenfließen*). Außerdem gibt es Erosion aufgrund von Schneeschmelze, Wind oder Bodenbearbeitung. Zu Fragen des Sedimenttransports in Küstenzonen sei beispielsweise auf die Empfehlung für Küstenschutzwerke (EAK 2020) oder Zanke (1982, 2002) verwiesen. Beiträge zu den

Phänomenen der inneren Erosion oder des Piping sind u.a. Bonelli (2012, 2013) Förster (2012), Bouziane et al. (2019) oder Jurisch (2023) zu entnehmen.

Das DVWK Merkblatt M-244/1997 definiert Erosion in Fließgewässern. Unterschieden wird hier in Sohlen- und Ufererosion. Sohlenerosion bildet bei hoher Schleppspannung V-förmige Täler aus. Es können Kolke, Stromschnellen oder Wasserfälle entstehen. Durch z.B. zu enge Ausbauquerschnitte, Erhöhung des Gefälles oder Hochwasser innerhalb von Bedeichungen kann Sohlenerosion anthropogen ermöglicht werden. Ufererosion tritt vor allem an den Prallufren von Krümmen an Fließgewässern auf, welche in vegetationsfreien Bereichen der Wasserwechselzone am häufigsten zu beobachten ist. Hier kommt es vermehrt zu Aus- und Unterspülungen, was Nachbrechen von Böschungen zur Folge haben kann (DVWK M-244/1997).

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die überströmungsinduzierte Erosion auf Deichböschungen, also Erosion aufgrund oberflächlich abfließender Wassermengen, die nicht durch Niederschlag ausgelöst sind. Die folgenden Abschnitte gehen nunmehr auf Details wie relevante Erosionsprozesse und Messverfahren bzw. Möglichkeiten zur Beschreibung von Erosion ein.

## **2.2.1 Relevante Erosionsprozesse**

Böschungsoberflächen müssen bei Überströmungen die Kräfte des fließenden Wassers aufnehmen (vgl. Abschnitt 3.1.1). Übersteigen die hydraulischen Kräfte die Widerstandskräfte von Bodenteilchen oder -aggregaten, Pflanzen oder anderen Erosionsschutzmaßnahmen, so kommt es zu Schäden (Gerstgraser 2000). Die in dieser Arbeit relevanten Erosionsprozesse aufgrund von Überströmung geböschter Erdbauwerke – vor allem Binnenböschungen von Deichen – sind deutlich von den Prozessen der Oberflächenerosion infolge Niederschlags abzugrenzen. Einerseits unterscheiden sie sich im Allgemeinen durch die hydraulischen Parameter des erosiven Abflusses, vor allem in der Intensität der effektiven Schleppspannung, andererseits u.a. im Fehlen der niederschlagstypischen Tropfenerosion. Neben den Kräften des fließenden Wassers unterliegen Bodenteilchen zusätzlich der Gravitation und je nach Bodenart auch elektromagnetischen Wechselwirkungen. Um die relevanten Bodenerosionsphänomene zu betrachten, wird nachfolgend in *nichtbindige* und *bindige Böden* sowie in *Erosion bewachsener Böschungen* unterschieden.

### **2.2.1.1 Erosion nichtbindiger Böden**

Bereits in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts wurde in Versuchen dem Bewegungsbeginn von Sedimenten und der Ermittlung von wirkenden Kräften nachgegangen (u.a. Hjulström 1935; Shields 1936; White 1940; Einstein und El-

Samni 1949). Hauptaugenmerk der Untersuchungen lag u.a. auf dem Bewegungswiderstand eines Kornes sowie auf Ermittlung der Kraftgröße, die eine Strömung auf ein Korn bzw. die oberste Kornlage ausübt (Shields 1936). Beide Fragestellungen stehen noch immer im Fokus, wenn es um die Beschreibung des Bewegungsbeginns und somit der Erosion nichtbindiger Böden geht.

Reine Sande und Kiese erodieren Korn für Korn (Briaud et al. 2001). Dabei unterscheiden Briaud et al. (2001) die Bewegungsarten *Rutschen* und *Rollen* und treffen zur Beschreibung folgende Annahmen: (1) Das Einzelkorn eines nichtbindigen Bodens hat die Form einer Kugel, (2) die mobilisierte Schleppspannung wirkt parallel zur Korn- bzw. Bodenoberfläche, (3) benachbarte Bodenteilchen beeinflussen sich aufgrund der selben Bewegungsrichtung nicht und (4) elektromagnetische sowie elektrostatische Kräfte zwischen den Bodenteilchen werden aufgrund ihrer Größe vernachlässigt. Übersteigt nun aufgrund einer stärker werdenden Strömung die auf das Bodenteilchen wirkende Schleppspannung  $\tau$  die Reibung zwischen übereinanderliegenden Bodenteilchen, kommt es zum *Rutschen* (Abbildung 2-4 (a)). Beim *Rollen* eines Kornes nehmen Briaud et al. (2001) zusätzlich an, dass diese Bewegung um den Berührungspunkt eines darunterliegenden Bodenteilchens geschieht. Die Bewegung beginnt, wenn das Moment aus *Reibungskraft multipliziert mit dem Abstand zum Berührungspunkt* größer bzw. gleich dem Moment aus *Gewichtskraft multipliziert mit dem Abstand zum Berührungspunkt* ist (Briaud et al. 2001) (Abbildung 2-4 (b)).

Zur Beschreibung der Bewegungsart *Hüpfen* geht Zanke (2002) in einem analytischem Ansatz zunächst davon aus, dass der Bewegungsbeginn, ausgelöst durch eine kritische Schleppspannung  $\tau_{crit}$  in einer turbulenzfreien Strömung ausschließlich durch den Winkel der inneren Reibung  $\varphi$  bzw. den Lagewinkel  $\varphi'$  der Bodenteilchen bestimmt ist. In einer turbulenten Strömung hingegen entstehen lokal turbulenzbedingte Änderungen der Fließgeschwindigkeit  $v'$  sowie der Schleppspannung  $\tau'$ , deren Fluktuationen den Bewegungsbeginn auslösen können (Zanke 2002; Briaud 2008). Hinzu kommen bereits durch Einstein und El-Samni (1949) als hydrostatische Druckdifferenzen zwischen Kornoberkante und Kornunterkante beschriebene Auftriebskräfte. Um ein Bodenteilchen bewegen zu können, muss die Druckdifferenz zwischen dem oben und unten wirkendem Druck größer bzw. gleich als das durch den Auftrieb reduzierte Gewicht des Kornes sein. Diese Auftriebskräfte sind eine weitere Ursache dafür, dass in einer Strömung die effektive Schleppspannung  $\tau_{crit} + \tau'$  am Korn größer ist als die mittlere Schleppspannung  $\tau$  der Strömung und darüber hinaus die Einzelkörner effektiv leichter sind (Zanke 2002). Mit der Bernoullischen Energiegleichung (vgl. Abschnitt 3.1) beschreibt Briaud (2008) einen weiteren Auslöser des Bewegungsbeginns ähnlich der Auftriebskraft: Wie die eine Flugzeugtragfläche umströmende Luft erzeugt das eine gewölbte Kornoberfläche überströmende Wasser eine Auftriebskraft, die zur Bewegung des Bodenteilchens führen kann. Infolge dieser Prozesse können Einzelkörner aus einem Verbund *hüpfen* (Abbildung 2-5).

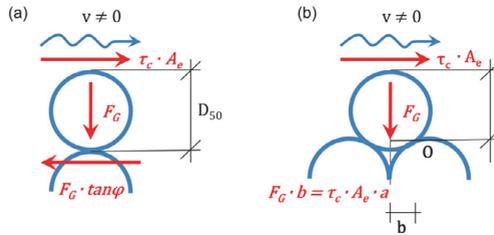


Abbildung 2-4. Darstellungen des Bewegungsbeginns eines Bodenteilchens in Form von:

(a) *Rutschen* und (b) *Rollen*.

- $F_G$  = Um durch den Auftrieb reduzierter Anteil der Gewichtskraft;
- $v$  = Fließgeschwindigkeit;  $\tau_c$  = kritische Schleppspannung;
- $A_e$  = Effektive Fläche am Korn auf der eine Schleppspannung mobilisiert wird;
- $\varphi$  = Reibungswinkel zwischen den Bodenteilchen;
- $D_{50}$  = Korndurchmesser einer Probe bei 50 % Massenanteil;
- $O$  = Berührungspunkt;  $a$  = Abstand  $\tau \cdot A_e$  zu  $O$  und  $b$  = Abstand  $G$  zu  $O$ .

Darstellungen nach White (1940) und Briaud et al. (2001).

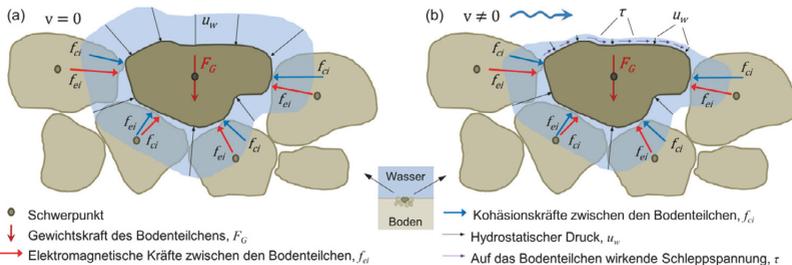


Abbildung 2-5. Schematische Darstellungen des Bewegungsbeginns eines Bodenteilchens (*Hüpfen*): (a) ohne Strömungseinfluss ( $v = 0$ ), (b) unter Strömungseinfluss ( $v \neq 0$ ). Darstellungen nach Briaud (2008).

### 2.2.1.2 Erosion bindiger Böden

Im Gegensatz zu nichtbindigen Böden erodieren bindige Böden nicht Korn für Korn. Vielmehr werden zusammenhängende Agglomerate aus einem Verbund abgetragen und je nach Größe der Aggregate in Suspension oder rollend transportiert (Zanke 1982). Ursache dafür ist ein höherer Anteil an Fein- bzw. Feinstkorn. Dessen Tonminerale sind i.d.R. aus  $\text{SiO}_4$ -Tetraedern und -Oktaedern in zwei- oder dreischichtigen Kristallstrukturen aufgebaut (Blume et al. 2002) und neigen dazu, unter Einfluss der *Van-der-Waals*-Bindungskräfte größere, feste Strukturen zu bilden (Schmidt 1996). Die zwischen den tonigen Bestandteilen wirkenden Haftkräfte (*Kohäsion*) sind je nach Art und Zusammensetzung der Tonminerale mehr oder weniger stark ausgeprägt (hierzu wird auf das Schrifttum

der Bodenkunde verwiesen, z.B. Blume et al. (2002)). Der eigentliche Prozess des Abtrags ist mit den unter Abschnitt 2.2.1.1 beschriebenen Vorgängen *Rutschen*, *Rollen* oder *Hüpfen* (Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5) vergleichbar (ILIT 2006). Ferner besitzen tonige Böden aufgrund der Tonmineraleigenschaften mit steigendem Wassergehalt eine feste, plastische oder flüssige Konsistenz (Soos 2001). Das führt dazu, dass die Oberfläche eines bindigen Bodens elastisch auf Fluktuationen angreifender Strömungen ausweichend reagieren kann und somit die erosive Wirkung des Wassers unter Umständen vermindert (Zanke 1982).

### 2.2.1.3 Erosion grasbewachsener Böschungen

Pflanzen oder Pflanzenteile unterliegen erosiven Prozessen (Gerstgraser 2000). Trotz Erosionsschutzes in Form von Bewuchs oder geosynthetischen Erosionsschutzprodukten auf Deichbinnenböschungen kann es zum Abtrag von Bodenteilchen oder -aggregaten sowie von ganzen Pflanzen kommen. Hewlett et al. (1987) beschreiben bezüglich Erosion grasbewachsener Böschungen sechs Ausprägungen, die auch in Kombination oder nacheinander auftreten können: (1) Erosion loser Pflanzenteile, (2) lokale Bodenerosionen (Kolke), (3) Erosion einzelner Pflanzen, (4) Ablösung des durchwurzelten Oberbodens, (5) Abgleiten des durchwurzelten Oberbodens und (6) Auftrieb des durchwurzelten Oberbodens durch Sickerwasser (Abbildung 2-6).

Bewachsene Böschungsoberflächen, welche zusätzlich beispielsweise durch Geomatten (GMA, vgl. Abschnitt 2.2.3) gesichert sind, können ebenfalls auf verschiedene Arten überströmungsbedingt versagen (Pan et al. 2015): (1) Abriss der GMA von der Oberfläche einschließlich des Füllbodens, dadurch Abriss des oberirdischen Teils der Pflanzen, (2) vollständige Erosion des Füllbodens aus der GMA und (3) teilweise Erosion des Füllbodens und Auftrieb bzw. Abriss der GMA von der Oberfläche (Abbildung 2-7).

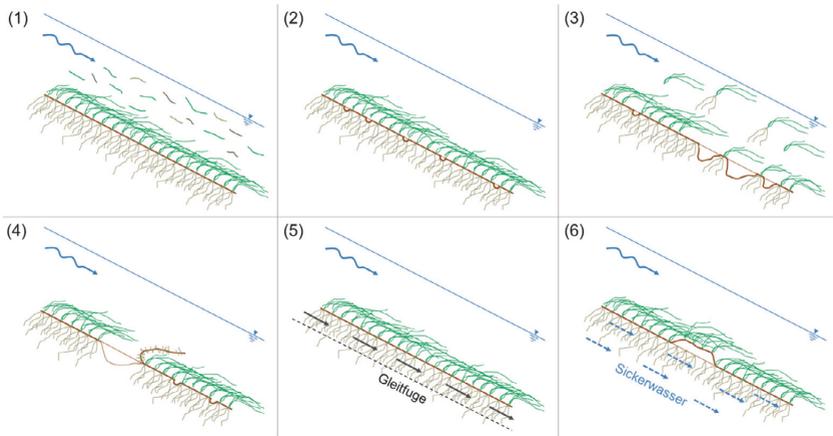


Abbildung 2-6. Ausprägungen überströmungsinduzierter Erosion begrünter Böschungen: (1) Erosion loser Pflanzenteile, (2) lokale Bodenerosionen (Kolke), (3) Erosion einzelner Pflanzen, (4) Ablösung des durchwurzelten Oberbodens, (5) Abgleiten des durchwurzelten Oberbodens und (6) Auftrieb des durchwurzelten Oberbodens durch Sickerwasser. Darstellung nach Hewlett et al. (1987).

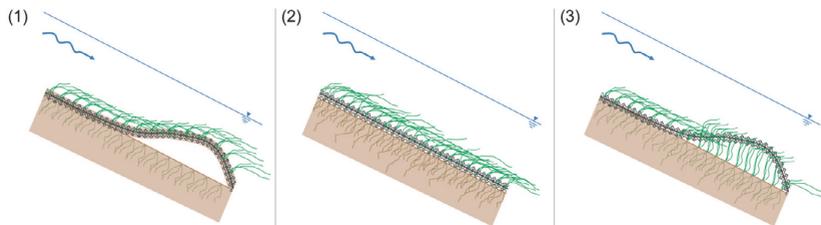


Abbildung 2-7. Versagen einer Geomatte (GMA): (1) Abriss der GMA von der Oberfläche einschließlich Füllbodens und oberirdischer Teile der Pflanzen, (2) Erosion des Füllbodens aus der GMA und (3) teilweise Erosion des Füllbodens, Abriss der GMA von der Oberfläche. Darstellungen nach Pan et al. (2015).

## 2.2.2 Möglichkeiten zur Ermittlung und Messung von Bodenerosion

Zur quantitativen Ermittlung erodierten Bodenmaterials oder dessen Erosionsrate bzw. Erodierbarkeit gibt es weder national noch international einheitliche Regelungen. Grundsätzlich lassen sich Erosionsmessungen im Labor und im Feld sowie im kleinen und im großen Maßstab durchführen.

### 2.2.2.1 Ermittlung von Erosion

Stroosnijder (2005) definiert vier wesentliche Methoden, um Erosion direkt zu messen: (1) Bestimmung der Massenänderung des erodierbaren Mediums, (2) Ermittlung der Höhendifferenz einer Oberfläche, (3) Bestimmung der Querschnittsänderung von Gerinnen und (4) Auffangen von Sediment.

(1) Die Ermittlung der Massenänderung durch Wiegung einer Laborprobe vor und nach einem Versuch stellt eine effektive Methode zur Bestimmung einer erodierten Bodenmenge dar (z.B. Shaikh et al. 1988; ECTC Test Method 2; ECTC Test Method 3). Des Weiteren kann durch das Wassersatzverfahren das Volumen des erodierten Materials ermittelt und somit indirekt über die Dichte und den Wassergehalt der verbliebenen Probe die abgetragene Bodenmasse bestimmt werden (Westrich et al. 2003).

(2) Bei der Ermittlung der Oberflächenhöhe wird vor und nach einem Versuch die Lage der Oberfläche zu einem festen Bezugspunkt bestimmt. Das kann beispielsweise bei großen Probeflächen über die Mittelung mehrerer Messungen (Hanson 1990b, 1990a; NTPPEP 2015; ASTM D6460) oder über die Lagebestimmung eines einzelnen Messpunktes (z.B. Hanson und Cook 2004; Wahl 2010) geschehen. Weitere exakte Messmethoden sind Laserscananalysen. Hierbei werden Probeflächen in einem definierten Raster mit einem Laser abgetastet. Durch einen Vorher-Nachher-Vergleich der Bodenoberflächenlage kann das erodierte Volumen und daraus die abgetragene Masse errechnet werden (Bauer 2011; Lesch 2012).

(3) Gill (1981) beschreibt Messungen in Laborrinnenversuchen die maximale *Erosionstiefe*  $d_s$  (*scour depth*) nach jedem Versuchsdurchlauf und somit die Änderung des Rinnenquerschnitts. Eine Besonderheit ergibt sich bei Versuchen zur Ermittlung der Erosion von Deckwerken bzw. Deckwerkssteinen. Hier können aufgrund der Steingrößen die Bewegungen einzelner Steine verfolgt, deren Bewegungspfade dokumentiert und Korrelationen zu den hydraulischen Parametern aufgestellt werden (Dornack 2001; Westrich et al. 2003).

(4) Durch das Auffangen erodierten Materials kann die abgetragene Bodenmenge durch Wiegen oder Messen der Sedimentkonzentration bestimmt werden. In Strömungsrinnen können sehr hohe Abflüsse generiert und ggf. große Mengen Boden erodiert werden, daher bietet sich dieses Verfahren vielmehr bei Versuchen mit geringeren Abflüssen an, beispielsweise bei Untersuchungen zu niederschlags-induzierter Erosion (Grunewald et al. 1997; Bryan 2000; Németh et al. 2011).

Eine weitere Methode ist die Beurteilung der Probenoberfläche nach optischem Zustand. Van der Meer et al. (2013a) schlagen vier Bewertungskategorien für die Beschaffenheit von Deichbinnenböschungen nach durchgeführten Wellenüberlaufversuchen vor:

- Ohne Schäden.
- Einzelner Schaden / erste Schadstelle.
- Mehrere Schadstellen unterschiedlicher Größe.
- Versagen der Deichböschung, großflächige Freilegung des Deichkerns.

Diese Form der Bewertung kann sehr subjektiv sein und ist von der Erosionswahrnehmung der prüfenden Person abhängig.

Eine allgemeine Ermittlung von Erosion ist unter anderem mit der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (USLE) gegeben (Wischmeier und Smith 1978). Prinzipiell ergibt sich nach der USLE ein geschätzter Bodenabtrag (A) aus der Multiplikation der Informationen zur Niederschlagsintensität (R), Bodenerodierbarkeit (K) sowie Daten zur Untersuchungsfläche, wie Geländeneigung (S), Bodenbearbeitung (P), Vegetation (C) und Größe (L). Das Modell gilt als das älteste, bekannteste und im Bereich der Landwirtschaft am meisten genutzte (Blume et al. 2002). Es dient der Abschätzung durchschnittlicher Erosionsraten aufgrund flächenhafter Erosion und Rillenerosion, kann jedoch nach Wischmeier und Smith (1978) keine Erosionsprozesse in Gullys oder Fließgewässern berücksichtigen und ist somit auch für die Beschreibung der Erosion in Gerinnen ungeeignet.

#### 2.2.2.2 Erosionsrate

Die *Rate* ist definiert als ein „meist in Prozent ausgedrücktes Verhältnis zwischen zwei [...] Größen, das die Häufigkeit eines bestimmten Geschehens [bzw.] das Tempo einer bestimmten Entwicklung angibt“ (Duden 2014).

In großmaßstäblichen Rinnenversuchen ermittelt Hanson (1990a) die *Erosionsrate*  $e_r$  verschiedener Böden und definiert sie als das abgetragene Bodenvolumen je Zeit und Fläche, wobei ein Erodierbarkeitskoeffizient die Erosionsrate einer Schlepplspannung gegenüberstellt. Als *Erosion* wird die mittlere Reduzierung der Oberflächenhöhe einer Versuchsfläche festgelegt (Hanson 1990a) (vgl. Abschnitt 3.3.1.7). Zur Bestimmung einer Erosionsrate im Labor verfolgen Briaud et al. (2001) mit dem *Erosion Function Apparatus (EFA)* und Crowley et al. (2012) mit dem *Sediment Erosion rate Flume (SERF)* den gleichen Ansatz. Darauf aufbauend beschreibt Briaud (2008) mit der Erosionsfunktion die *Erodierbarkeit* eines Bodenmaterials als das Verhältnis zwischen einer *Erosionsrate*  $\dot{Z}$  und der Schlepplspannung  $\tau$  oder der Fließgeschwindigkeit  $v$  (Abbildung 2-8) auf der Probeoberfläche ( $\dot{Z} = f(\tau)$ ).

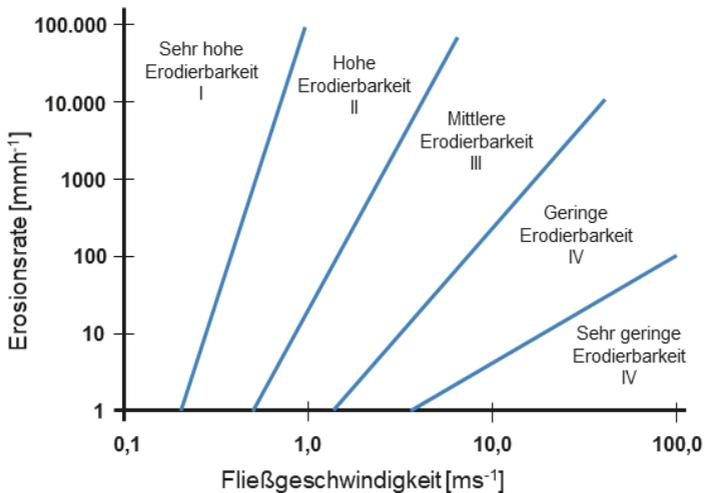


Abbildung 2-8: Erosionskategorien nach Briaud (2008). Abszisse  $\hat{=}$  Fließgeschwindigkeit [ $\text{ms}^{-1}$ ]; Ordinate  $\hat{=}$  Erosionsrate [ $\text{mh}^{-1}$ ]. Briaud (2008).

Gill (1981) misst in Laborrinnenversuchen maximal auftretende *Erosionstiefen*  $d_s$  (*scour depth*) und stellt sie verschiedenen hydraulischen Parametern gegenüber, darunter die *Transportrate in Masse transportierten Sands je Sekunde*. Ähnlich der Transportrate beschreiben Westrich et al. (2003) die *Erosionsrate* als *abgetragene Bodenmasse je Zeit*.

Ebenfalls in Laborrinnenversuchen messen Shaikh et al. (1988) die *Erosionsrate*  $\dot{\epsilon}$  dispersiver Tone als eine *Reduzierung der Gewichtskraft einer Probe je Fläche und Minute*.

### 2.2.2.3 Mögliche Grenzwerte zur Beschreibung überströmungsinduzierter Oberflächenerosion von Deichbinnenböschungen

Wie schon in den vorhergehenden Abschnitten dargelegt, beginnt Erosion grundsätzlich schon mit der ersten Bewegung eines Einzelkorns oder Bodenaggregats. Es stellt sich die Frage, ob sämtliche (Kleinst-) Erosionsvorgänge auf einer Deichbinnenböschung hinsichtlich der Stabilität des Bauwerks bzw. einzelner Elemente in Betracht gezogen werden müssen. Darüber hinaus limitieren verschiedene Faktoren die Möglichkeiten zur Erfassung von Erosionsvorgängen im Rahmen großmaßstäblicher Feldversuche, darunter z.B. die Sichtbarkeit der gelösten Bodenteilchen und -aggregate, die Ables- und Messgenauigkeit des Messgerätes, die Anzahl von Messpunkten im Untersuchungsbereich oder die

Einschätzung des Versuchsdurchführenden zu den Erosionsprozessen. Um z.B. bei der Durchführung von Überströmungsversuchen zur Ermittlung des Widerstandes gegen Erosion den logistischen, wirtschaftlichen und zeitlichen Aufwand bewältigbar zu halten, ist es darüber hinaus zielführend, obere Grenzwerte hinsichtlich Erosionserscheinungen wie

- eine maximale Anzahl umgelagerter Steine oder Betonelemente je Zeit und Fläche,
- eine kritische Kolktiefe,
- eine maximale Menge transportierten Materials (CIRIA 2013) oder
- eine mittlere Bodenabtragshöhe über die gesamte Untersuchungsfläche (ASTM D6460)

zu definieren. Diese Grenzwerte können außerdem den Übergang von einem *tolerierbaren Maß an Erosion* zum *Versagen des Bauwerkselementes* darstellen.

### **2.2.3 Maßnahmen zum Schutz vor Erosion von Deichbinnenböschungen**

In Abschnitt 2.1.3 wird darauf hingewiesen, dass eine Deichbinnenböschung einen gewissen Wellenüberlauf aushalten sollte, ohne durch Erosion oder Durchfeuchtung geschädigt zu werden. Dafür stehen Maßnahmen zur Verfügung, die die Widerstandsfähigkeit gegen Erosion von Deichbinnenböschungen unterstützen.

#### **2.2.3.1 Vegetative Maßnahmen**

Eine dauerhafte, geschlossene und dichte Grasnarbe schützt nachhaltig vor Witterungseinflüssen und mechanischen Angriffen (EAK 2020; DWA-M 507-1).

Neben dem Schutz der Deckschicht vor Oberflächenerosion erhöht die Durchwurzelung der Grasnarbe die Zugfestigkeit und Scherfestigkeit der oberen Bodenschichten. Vor allem wird die Standsicherheit flacher, örtlich begrenzter Bodenschollen erhöht, die auf oberflächennahen Gleitflächen abrutschen können (EAK 2020).

Als Saatgutmischungen werden vor allem Gräser- und Leguminosenarten mit unterschiedlichen prozentualen Gewichtsanteilen verwendet (Deutsches Weidelgras (*Lolium perenne*), Wiesenrispe (*Poa pratensis*) und Rotschwingel (*Festuca rubra*)) (EAK 2020). Folgende Saatgutmischungen werden nach DIN 19657 als übliche Verfahren zur Deichbegrünung empfohlen (DWA-M 507-1):

- Normalsaaten, ggf. mit Bindemitteln,
- Decksaaten bei erosionsgefährdeten Standorten (Saatgut in Kombination mit natürlichen Faserstoffen oder Kunststoffen),

- Nasssaaten bei keinem oder nur geringem Oberbodenauftrag (Saatgut, Bindemittel, Wasser, Dünger, ggf. Zuschlagstoffe),
- Fertigrasen von ähnlichen Standorten oder von benachbartem Gelände oder
- Saatmatten.

### 2.2.3.2 Konstruktive Maßnahmen

Bereits die Auswahl geeigneter bindiger Bodenmaterialien kann die Erosionsbeständigkeit einer Deichoberfläche erhöhen (Tabelle 2-4).

Auch die Geometrie eines Deichquerschnitts trägt in gewisser Hinsicht zum Erosionsschutz bei: Je flacher die Böschungsneigung, desto geringer wirken sich die hydraulischen Kräfte auf die Oberfläche aus (vgl. Abschnitt 3.1.1). Darüber hinaus sind Unstetigkeiten in begrünten Deichböschungen zu vermeiden, da starke Neigungswechsel oder Einbauten, wie z.B. Pfähle, zusätzliche Turbulenzen hervorrufen (EAK 2020).

Tabelle 2-4. Grenzwerte von Materialparametern zur Bestimmung der Erosionsbeständigkeit von Klei als Oberflächendichtung von Deichbauwerken nach niederländischer VTV 2004.

Kategorie	Kriterium / Materialeigenschaft
c1 – erosionsbeständig	$w_L > 45\%$ und $I_p > 0,73 \cdot (w_L - 20)\%$ und $Z_k < 40\%$
c2 – mäßig erosionsbeständig	$w_L < 45\%$ und $I_p > 18\%$ und $Z_k < 40\%$
c3 – wenig erosionsbeständig	$I_p < 0,73 \cdot (w_L - 20)\%$ und/ oder $I_p < 18\%$ und/ oder $Z_k > 40\%$
$w_L$ = Fließgrenze [%] $I_p$ = Plastizitätsindex [%] $Z_k$ = Sandgehalt als Anteil Masseprozent der Gesamtkörnung (63 µm bis 2 mm) [%]	

An Flussdeichen können nach DWA-M 507-1 Überlaufstrecken mit geringer Kronenhöhe und spezieller Erosionssicherung zur Hochwasserentlastung vorgesehen werden. Zur Sicherung der gefährdeten Binnenböschungen sind z.B. durch Dornack (2001), Westrich et al. (2003), Bieberstein und Wörsching (2004), Queißer (2006), Bieberstein (2004), Haselsteiner et al. (2007) Untersuchungen durchgeführt worden. Ausführungs- sowie Bemessungsmöglichkeiten sind u.a. in LfU BW (2004) oder im MAR (2008) beschrieben. Verschiedene Ausführungsformen werden empfohlen:

Nach DWA-Merkblatt 507-1 können

- Deckwerke in Lockerbauweise (Steinschüttung, Steinsatz),
- kohärente Deckwerke (Mastix-Schotter-Deckwerke, verbundene Rasengittersteine, Geogittermatratzen),

- Bodenverfestigung durch Bindemittelzugabe oder
- Verbundbauweisen

ausgeführt werden. Nach EAK 2020 sind möglich:

- Asphaltbetondeckwerke,
- offene Deckwerke aus Mastixgestein,
- Asphaltmastixmatten,
- Betondeckschichten oder
- teilvergossene Schüttsteindeckwerke.

An Flussdeichen sind aufgrund statischer Erfordernisse die Binnenböschungen von Überlaufstrecken sehr flach zwischen 1 : 10 und 1 : 5 auszuführen (DWA-M 507-1).

Analog zur Sicherung wasserseitiger Böschungen gegen Oberflächenerosion in Bereichen, die nicht als Überlaufstrecken geplant sind, soll die Sicherheit von Binnenböschungen mit der maximal zulässigen Fließgeschwindigkeit bzw. Schleppspannung des überströmenden Wassers für die gewählten Böschungsmaterialien beispielsweise nach Bollrich (2013) nachgewiesen werden (DWA-M 507-1). Beispiele für kritische hydraulische Parameter ausgewählter Materialien bzw. Ausführungen von Böschungsoberflächen nach Hewlett et al. (1987) und Bollrich (2013) sind Abbildung 2-9 und Tabelle 2-5 zu entnehmen.

Die Installation von Geokunststoffen auf oder direkt unter die Oberfläche von Deichböschungen kann eine weitere effektive Methode zum Erosionsschutz oder zur Unterstützung der Vegetation sein (Saathoff und Werth 2003; Saathoff und Bräu 2009). Geosynthetische Erosionsschutzprodukte sind als wasserdurchlässige Geokunststoffe den Geotextilien (GTX) zuzuordnen<sup>5</sup>. Nach MAEBEL (2022), prEN 189224 und DIN EN ISO 10318-1 können verschiedene Erosionsschutzprodukte unterschieden werden (Tabelle 2-6).

---

<sup>5</sup> Geogitter fallen unter die Kategorie *geotextilverwandte Produkte (GTP)* und können je nach Produkt auch als Erosionsschutz geeignet sein und eingesetzt werden.

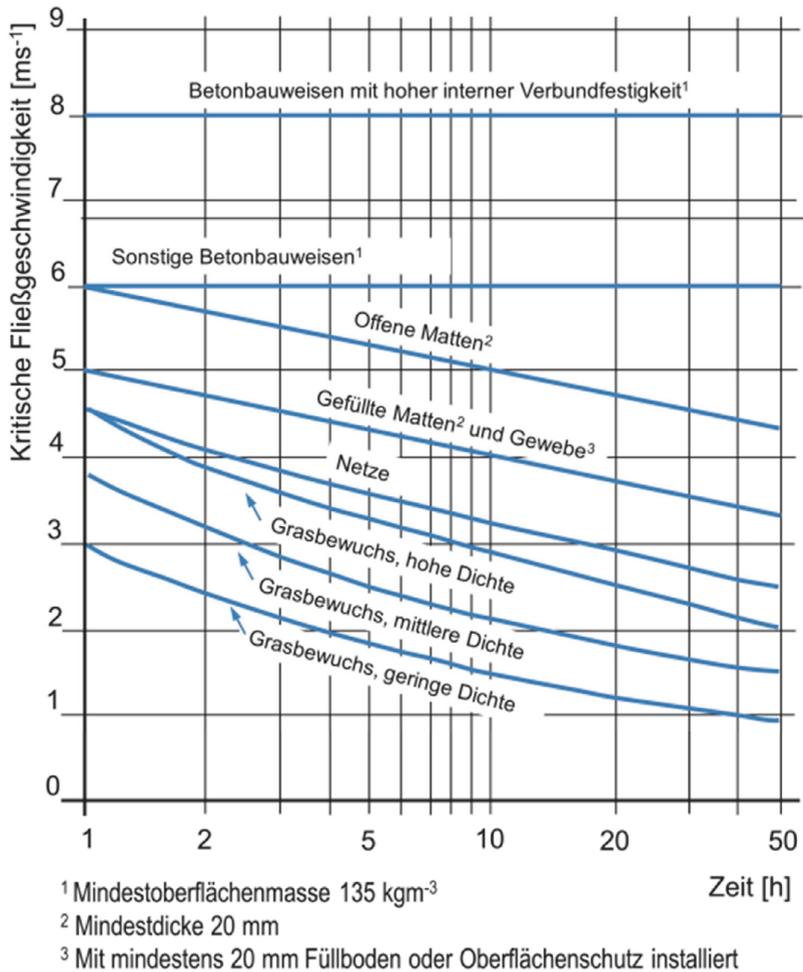


Abbildung 2-9. Empfohlene Entwurfsparameter ausgewählter Erosionsschutzmaßnahmen auf Böschungen nach Hewlett et al. (1987). Abszisse  $\triangleq$  Zeit [h]; Ordinate  $\triangleq$  kritische Fließgeschwindigkeit [ $\text{ms}^{-1}$ ]. Darstellung nach Hewlett et al. (1987).

Tabelle 2-5. Zusammenstellung kritischer Strömungsparameter ausgewählter Oberflächenbeschaffenheiten nach Bollrich (2013) zur Ausführung von Deichböschungen nach DWA-M 507-1.

Oberflächenbeschaffenheit	Korngröße bzw. Kantenlänge [mm]	Kritische Schleppspannung $\tau_{crit}$ [Pa]	Kritische Fließgeschwindigkeit $v_{crit}$ [ms <sup>-1</sup> ]
Bindige Böden - lehmiger Sand - Ton		2,0 12,0	0,70 ... 1,0
Nichtbindige Böden - als Einzelkorngefüge - Schluff - Sand - Kies - Schotter/ Geröll	0,02 ... 0,063 0,063 ... 2,0 2,0 ... 63 50 ... 100	0,5 ... 6,0 8,0 ... 45	0,10 ... 0,20 0,20 ... 0,60 0,60 ... 1,60 1,7 ... 2,0
- als Gemisch oder im Verband - Steinschüttung - Steinpackung - Steinpflasterung	32/63 ... 63/125 100 ... 150 150 ... 200 200 ... 300	30 ... 100 40 ... 75 53 ... 73 73 ... 160	1,9 ... 3,40 2,6 ... 3,80
Befestigungen - Rasen, gut verwurzelt - Betongitterplatten mit Rasen - Beton mit Sand oder Kies - ohne Geschiebebewegung mit Geschiebebewegung - Bruchsteinpflaster in Zementmörtel		15 ... 30 108 40 ... 100	1,5 ... 1,8 4,0 2,5 5,0

Tabelle 2-6. Bezeichnungen und Besonderheiten von Erosionsschutzprodukten und Vegetationshilfen nach M AEBEL (2022), prEN 189224 und DIN EN ISO 10318-1.

Produkt	Abkürzung	Bemerkung
Erosionsschutzmatte <sup>1</sup>	GBL	- Durchlässige Struktur loser natürlicher und/ oder synthetischer Fasern und anderen (natürlichen/ synthetischen) Elementen, zu einer regelmäßigen Bahn verbunden
Geomatte <sup>1</sup>	GMA	- Dreidimensionale, durchlässige Struktur aus polymeren Monofilamenten und/ oder anderen Elementen (synthetisch oder natürlich), die mechanisch und/oder thermisch und/oder chemisch und/oder anderweitig verfestigt werden
Verstärkte Geomatte <sup>1</sup>	GMA-R	- Ein Geoverbundstoff (GCO) aus GMA und beispielsweise einem Geogitter (GGR) zur Erhöhung der Zugfestigkeit

Produkt	Abkürzung	Bemerkung
Geozellen	GCE	- Dreidimensionale, durchlässige, polymere (synthetische oder natürliche) Waben- oder ähnliche Zellstruktur, hergestellt aus miteinander verbundenen Geokunststoffstreifen - Ausschließlich mit Boden gefüllt und meist mit Oberboden bedeckt
Geotextil <sup>1</sup>	GTX	- Flächenhaftes, durchlässiges (synthetisches oder natürliches) Textil - Vliesstoff (GTX-NW), Maschenware (GTX-K) oder Gewebe (GTX-W) - Als Erosionsschutz kommen vor allem GTX-K oder GTX-W zum Einsatz
<sup>1</sup> Kann mit Boden gefüllt und/ oder mit Oberboden bedeckt, aber auch direkt auf der Oberfläche mit oder ohne Bodenfüllung installiert sein		

## 2.3 Fazit

*Bemessungswasserstände* und *maßgebende Sturmflutwasserstände* an der Nordsee bzw. *Bemessungshochwasserstände* an Ostsee und Fließgewässern sind neben wirtschaftlichen Zwängen sowie der Schutzwürdigkeit des Hinterlandes maßgeblich für die Entwicklung einer Deichgeometrie verantwortlich. Die Querschnittsgeometrie kann geotechnisch nach dem Stand der Technik hinsichtlich Standsicherheit nachvollziehbar bemessen werden (vgl. Abschnitt 2.1.3), wohingegen beim Entwurf von begrünten Deichbinnenböschungen in Bezug auf Erosionsstabilität keine rechnerischen Bemessungsansätze existieren.

In diesem Kapitel 2 der Grundlagen zu *Deichen* und *Erosion* wird sonst gezeigt, dass

- überströmungsinduzierte Erosion von Deichbinnenböschungen zu einem Totalversagen von Deichbauwerken führen kann, jedoch
- Überströmungen bzw. Wellenüberläufe in einem gewissen Maß tolerierbar sein sollten;
- Erosion ein natürlicher Prozess ist, der bereits bei sehr geringen Überströmungsraten ausgelöst werden kann, was dazu führt, dass der Abtrag von Bodenpartikeln einer Deichbinnenböschung ebenfalls in einem bestimmten Maß vertretbar sein sollte bzw. sein muss;
- eine dauerhafte, geschlossene und dichte Grasnarbe nachhaltig vor Witterungseinflüssen und mechanischen oder hydraulischen Angriffen und somit vor Erosion schützt;
- eine homogene, vegetationsfreundliche bzw. -fördernde Deckschicht die Widerstandsfähigkeit gegen Erosion begünstigt;

- als Möglichkeiten zum Erosionsschutz für Deichbinnenböschungen viele vegetative und konstruktive Maßnahmen zur Verfügung stehen;
- bisher weder in nationalen noch internationalen Regelwerken und Empfehlungen Bemessungsansätze für die Erosionsstabilität grasbewachsener Deichbinnenböschungen existieren, aber
- Tabellenwerte zur Beschreibung der Erosionsbeständigkeit von Dichtungsmaterialien (VTV 2004) oder zur Abschätzung kritischer hydraulischer Kräfte für bestimmte Baustoffe und -elemente (Bollrich 2013) zur Verfügung stehen,
- doch diese Grenzwerte sich teilweise auf initiale Bewegungsvorgänge beziehen (Bollrich 2013), somit sehr niedrig und daher weniger auf großmaßstäbliche wasserbauliche Fragenstellung anwendbar sind;
- sich bei der Messung von Erosion je nach Umfang und Dauer bzw. Versuchsgröße für eine angepasste und somit effektive Mess- oder Bewertungsmethode entschieden werden muss, die in hinreichender Genauigkeit einen Bodenabtrag quantifiziert, eine plausible Auswertung ermöglicht und sich somit eine Erosionsrate oder ein Erosionswert ableiten lässt.

---

### 3. Zur Überströmung von Deichen

In diesem Kapitel sind relevante hydraulische Grundlagen zur Deichüberströmung zusammengetragen. Im Mittelpunkt stehen stationäre Fließvorgänge in offenen Gerinnen und Beschreibungen von Deichüberströmungsmodellen. In den darauffolgenden Abschnitten werden die Wirkungen von Wasser auf Boden unter Berücksichtigung der Bodeneigenschaften geschildert und der Einfluss von Erosionsschutzmaßnahmen auf Überströmungsprozesse dargestellt. Abschließend wird eine Auswahl internationaler wissenschaftlichen Forschung in Hinblick auf Überströmungsversuche sowie zu Wellenüberlaufversuchen zusammengefasst.

#### 3.1 Grundlagen der Deichüberströmung

Für die folgenden Betrachtungen gelten die *Kontinuitätsgleichung* (Massenerhaltung), die *Bernoulli-Gleichung* (Energieerhaltung) sowie der *Impulssatz*. Die Kontinuitätsgleichung besagt, dass wenn einem Strömungsvorgang keine Masse abgezogen oder hinzugeführt wird, die Masse konstant bleibt ( $m = const.$ ) und demzufolge auch der Durchfluss  $Q$  als konstant anzusehen ist (z.B. Zanke 2002):

$$Q = const. \quad (3-1)$$

Die Bernoulli-Gleichung drückt aus, dass die gesamte hydraulische Energie  $W$  einer Masse einer verlustfreien Strömung konstant ist ( $W = const.$ ) und sich aus der Lageenergie ( $= m \cdot g \cdot z$ ), der Druckenergie ( $= m \cdot p \cdot \rho_w^{-1}$ ) und der kinetischen Energie ( $= m \cdot v^2 \cdot 0,5$ ) zusammensetzt. Somit gilt unter Berücksichtigung etwaiger Reibungsverluste  $h_v$  (Zanke 2002):

$$h_E = z + \frac{p}{\rho_w \cdot g} + \frac{v^2}{2g} + h_v = const. \quad (3-2)$$

mit der Energiehöhe  $h_E = W \cdot (m \cdot g)^{-1}$ , der Gravitationsbeschleunigung  $g$ , der geodätischen Höhe  $z$ , dem hydrostatischen Druck  $p$ , der Dichte des Wassers  $\rho_w$  und der Fließgeschwindigkeit  $v$  (Abbildung 3-1).

Mit dem Impulssatz lassen sich die Widerstandskräfte ermitteln, welche zur Änderung der Fließgeschwindigkeit des Kontrollvolumens<sup>6</sup> einer Strömung führen. D.h., dass eine in Bewegungsrichtung wirkende Kraft  $F_I$  die Fließgeschwindigkeit einer Masse erhöht und eine gegen die Bewegungsrichtung wirkende Kraft die Fließgeschwindigkeit reduziert. Der Impulsstrom wird mit dem Impulssatz als

$$\vec{F}_I = \rho_w \cdot Q \cdot \vec{v} \quad (3-3)$$

---

<sup>6</sup> Kontrollvolumen: Festgelegter endlicher Ausschnitt eines durchströmten Raums

ausgedrückt (Zanke 2002; Bollrich 2013), mit  $\rho_w$  für die Wasserdichte,  $Q$  für den Durchfluss und die Fließgeschwindigkeit  $v$ .

### 3.1.1 Die Kräfte fließenden Wassers<sup>7</sup>

Ein Augenmerk der experimentellen Untersuchungen (vgl. Kapitel 4) liegt auf stationären<sup>8</sup> Strömungen in offenen Rechteckgerinnen. Maßgebende hydraulische Größen, die aufgrund strömenden Wassers auf eine Gerinnesohle einwirken, sind die *Fließgeschwindigkeit*  $v$  und die *Schleppspannung*  $\tau$ . Diese sind abhängig vom Durchfluss  $Q$  und den Gerinneparametern Abflusstiefe  $h$ , Gerinnebreite  $b$ , Querschnittsform und -größe (auch Fließfläche)  $A$ , benetzter Umfang  $l_u$ , Gefälle  $I_S$  sowie der Gerinnewandbeschaffenheit bzw. -rauheit (Abbildung 3-1). Eine aus den Gerinneparametern abgeleitete Größe ist der hydraulische Radius  $r_{hy}$ , welcher der Quotient aus Fließfläche und benetztem Umfang ist ( $r_{hy} = A \cdot l_u^{-1}$ ) und als die hydraulisch wirksame Wassertiefe angenommen werden kann. Dabei gilt für Gerinne mit einem Rechteckquerschnitt, dass  $r_{hy} = b \cdot h \cdot (b + 2h)^{-1} = h \cdot (1 + 2h \cdot b^{-1})^{-1}$ , falls

$$h \ll b \implies r_{hy} \rightarrow h \quad (3-4)$$

zutrifft.

#### 3.1.1.1 Durchfluss

Bei Flüssigkeiten beschreibt die kinematische Größe *Durchfluss* (auch *Zu- oder Abfluss*)  $Q$  einen Volumenstrom  $\dot{V} = dV \cdot dt^{-1}$ , der sich senkrecht zu einer Fließfläche  $A$  bewegt. Die mittlere Fließgeschwindigkeit ergibt sich zu  $v = \dot{V} \cdot A$  und somit gilt

$$Q = d\dot{V} \cdot dt^{-1} \cdot A = v \cdot A \quad (3-5)$$

Zur Vergleichbarkeit verschiedener Ereignisse wird ein Volumenstrom häufig als Abfluss pro laufenden Meter als spezifischer Abfluss  $q$  dargestellt:

$$q = \frac{Q}{b} \quad (3-6)$$

---

<sup>7</sup> Wenn nicht anders angegeben überwiegend aus Zanke 1982, 2002 und Bollrich 2013

<sup>8</sup> Im Gegensatz zu instationären Strömungen ändert sich bei stationären Strömungen der Abfluss in einem spezifischen Gerinnequerschnitt mit fortlaufender Zeit nicht.

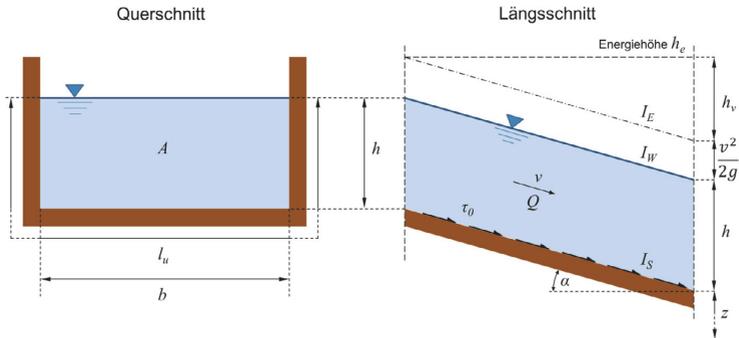


Abbildung 3-1. Darstellung maßgeblicher Gerinneparameter und hydraulischer Größen: Fließquerschnitt ( $A$ ), benetzter Umfang ( $l_u$ ), Abflusstiefe ( $h$ ), Gerinnebreite ( $b$ ), Durchfluss ( $Q$ ), Gefälle ( $I_{Energie}$ ,  $I_{Sohle}$ ,  $I_{Wasserspiegel}$ ) und Neigungswinkel ( $\alpha$ ), Fließgeschwindigkeit ( $v$ ), Schleppspannung ( $\tau_0$ ), Reibungsverlusthöhe ( $h_v$ ), kinetische Energie ( $v^2 \cdot (2g)^{-1}$ ) und geodätische Höhe ( $z$ ). Darstellung nach Bolrich (2013).

### 3.1.1.2 Fließgeschwindigkeit

Die *Fließgeschwindigkeit*  $v$  ist die Geschwindigkeit, mit der sich ein Flüssigkeitsvolumen  $V$  senkrecht durch eine Fließfläche  $A$  in einer bestimmten Zeit  $t$  verschiebt. In experimentellen Untersuchungen wird sich in der Regel auf die mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_m$  bezogen, welche idealerweise zwischen Wasserspiegel und Gerinnesohle bzw. -wandung an jedem Punkt gleich hoch ist. Dagegen ist in einer realen Flüssigkeit die Fließgeschwindigkeit an den begrenzenden Wandungen auf Grund der vorhandenen Reibung stets null und steigt in Abhängigkeit der Laminarität bzw. Turbulenz (vgl. Abschnitt 3.1.1.4) zu einem Maximum in Richtung Wasserspiegel (Abbildung 3-2). Zanke (1982; 2002) zeigt, dass die mittlere Fließgeschwindigkeit von der Sohle aus bei etwa 40 % der Abflusstiefe zu messen ist (Abbildung 3-2).

Die vertikale Verteilung der Geschwindigkeit in einem Gerinne ist stark von der Breite der Fließfläche abhängig: Bei großen Breiten ( $b > 10h$ ) und turbulenten Abflüssen stellt sich meist eine logarithmische Verteilung ein; je geringer die Breite im Verhältnis zur Abflusstiefe und je rauer die Rinnensohle bzw. -wandung (vgl. Abschnitt 3.1.4), desto stärker wirkt sich dies auf die Geschwindigkeitsverteilung aus (Naudascher 1992).

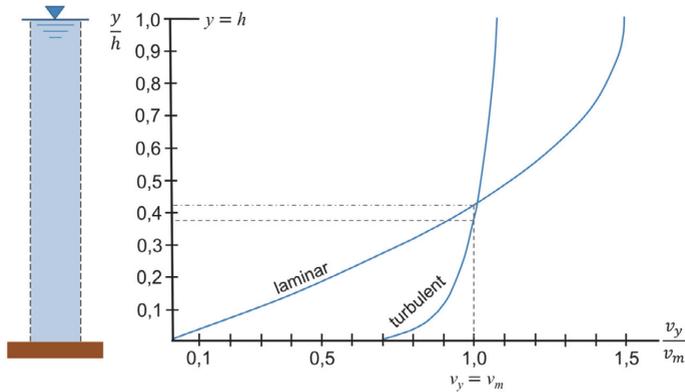


Abbildung 3-2. Geschwindigkeitsprofile einer laminaren und einer turbulenten Strömung sowie Angabe der Lage der mittleren Fließgeschwindigkeit. Abszisse  $\triangleq$  Verhältnis der Fließgeschwindigkeit  $v_y$  in einer beliebigen Wassertiefe ( $y$ ) zur mittleren Fließgeschwindigkeit ( $v_m$ ), wobei  $v_y = v_m \triangleq 1,0$ ; Ordinate  $\triangleq$  Verhältnis einer beliebigen Wassertiefe ( $y$ ) zur (Gesamt-) Abflusstiefe ( $h$ ), wobei  $y = h \triangleq 1,0$  (Zanke 2002).

Abbildung 3-2 zeigt, dass sich in einer turbulenten Strömung (1) die Verteilung der Fließgeschwindigkeit über die Abflusstiefe vergleichmäßigt, (2) sohlennah höhere Fließgeschwindigkeiten einstellen als in laminaren Strömungen und somit (3) höhere Widerstände bzw. Reibungskräfte auf die Sohle einwirken.

### 3.1.1.3 Schleppspannung

Die *Schleppspannung* (auch *Sohl- oder Wandschubspannung* bzw. *Scher-spannung*)  $\tau$  ist die Spannung, die eine Strömung infolge der Grenzflächenreibung und der Grenzflächenwiderstände auf die Gerinnesohle bzw. -wandung ausübt. Ursache dafür ist einerseits die Eigenheit von Flüssigkeiten, an festen Wänden zu haften. Andererseits erzeugen Unregelmäßigkeiten auf Sohle oder Wandung Druckunterschiede, deren Resultierende ebenfalls zur Schleppspannung beitragen (Zanke 1982).

In einem Gerinne mit freier Wasseroberfläche hat die Schleppspannung an der Gerinnesohle ihren höchsten Wert  $\tau_0 = \max.$  und an der Wasseroberfläche den Wert  $\tau_y = 0$ . Der Schleppspannungsverlauf zwischen der Wasseroberfläche und der Gerinnesohle ändert sich linear. Die Linearität der Schleppspannungsverteilung kommt dadurch zustande, dass es zu einer Scherung sowohl zwischen Flüssigkeit und Gerinnewandung, als auch im Inneren der Flüssigkeit kommt. D.h., dass wandnahe Flüssigkeitsteilchen eine geringere Geschwindigkeit besitzen als wandferne (Zanke 2002) (Abbildung 3-3). Abbildung 3-3 zeigt ein Kontrollvolumen in Form einer Wassersäule der Höhe  $h$  und Länge  $l$  in einer geneigten Rinne der Breite

$b$ , welche durch die hydrostatischen Drücke  $p_1 = p_2$  bzw. die Druckkräfte  $F_{p,1} = F_{p,2}$  und die Impulskräfte  $F_{l,1} = F_{l,2}$  begrenzt ist. Zusätzlich wirkt eine Reibungskraft  $F_R = \tau_0 \cdot A$  auf die Rinnensohle. Die Wassersäule selbst mobilisiert eine Gewichtskraft  $F_G = m \cdot g = \rho_W \cdot g \cdot l \cdot b$ . Im Falle einer stationären Strömung gilt  $F_{p,1} = F_{p,2}$ , was dazu führt, dass ausschließlich die Reibungskraft  $F_R$  den stromabwärts gerichteten Anteil der Gewichtskraft ( $F_G \cdot \sin \alpha$ ) ausgleicht – es herrscht *Normalabfluss*. Wird nun der sohlparallele und stromabwärts gerichtete Anteil der Gewichtskraft als Scherkraft auf einer Fläche betrachtet, ergibt dies unter Berücksichtigung der Flüssigkeitsdichte  $\rho_W$  die Dimension einer Schleppspannung:

$$\begin{aligned} \tau_0 &= \frac{F_G \cdot \sin \alpha}{A} = \frac{m \cdot g \cdot \sin \alpha}{A} = \frac{\rho_W \cdot V \cdot g \cdot \sin \alpha}{A} = \frac{\rho_W \cdot l \cdot b \cdot h \cdot g \cdot \sin \alpha}{A} \\ \tau_0 &= \rho_W \cdot h \cdot g \cdot \sin \alpha = \rho_W \cdot h \cdot g \cdot I \end{aligned} \quad (3-7)$$

mit:

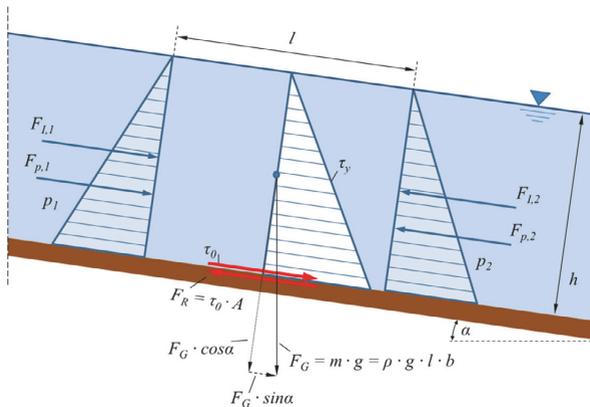


Abbildung 3-3. Verteilung und Herleitung der Schleppspannung ( $\tau$ ), mit der Grenzflächenreibung ( $F_R$ ), der Abflusstiefe ( $h$ ), der Länge der Wassersäule ( $l$ ), der Gewichtskraft der Wassersäule ( $F_G$ ), dem hydrostatischem Druck ( $p_i$ ), der hydrostatischen Druckkraft ( $F_{p,i}$ ), den Impulskräften ( $F_{l,i}$ ) und dem Gefälle ( $\alpha$ ). Vgl. Zanke (2002).

Formel (3-7) ist bei stationären Überströmungen anzuwenden. Für die Berechnung der Schleppspannung  $\tau_0$  von instationären Strömungen auf Böschungsoberflächen, also Strömungen, die einer zeitlichen Änderung unterliegen (vgl. z.B. Abschnitt 3.3.2), ist unter Berücksichtigung von Formel (3-2) auf folgende Formel zurückzugreifen (z.B. Hughes et al. 2012):

$$\tau_0 = \gamma_W \cdot h \cdot \left[ \sin \theta - \frac{\delta h}{\delta s} - \frac{\delta}{\delta s} \left( \frac{v^2}{2g} \right) - \frac{1}{g} \frac{\delta v}{\delta t} \right] \quad (3-8)$$

mit der Wichte des Wasser  $\gamma_w$ , der Abflusstiefe  $h$ , dem Böschungswinkel  $\theta$ , einer böschungsparellen Koordinate  $s$ , der böschungsparellen Fließgeschwindigkeit  $v$ , der Gravitationsbeschleunigung  $g$  sowie der Zeit  $t$ .

Zur Beschreibung des Fließwiderstandes wird als Maß die Schubspannungsgeschwindigkeit  $v^*$  als Wurzel des Quotienten aus Schleppspannung und Flüssigkeitsdichte definiert:

$$v^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_w}} = \sqrt{g \cdot h \cdot I} \quad (3-9)$$

mit der Schleppspannung  $\tau_0$ , der Dichte des Wassers  $\rho_w$ , der Gravitationsbeschleunigung  $g$ , der Abflusstiefe  $h$  und dem Gefälle  $I$ .

#### 3.1.1.4 Weitere Eigenschaften einer Strömung

Bewegen sich Flüssigkeitsteilchen nebeneinander auf voneinander getrennten Bahnen, die sich gegenseitig nicht durchdringen, spricht man von einer *laminaren Strömung*. Es stimmt also die Geschwindigkeitsrichtung eines jeden Teilchens mit der Hauptfließrichtung der Strömung überein. Bei höheren Fließgeschwindigkeiten kommt es zur Durchmischung der Flüssigkeitsschichten, so dass sich die einzelnen Flüssigkeitsteilchen auf völlig regellosen Bahnen bewegen. Die Flüssigkeitsteilchen haben also von der Hauptfließrichtung abweichende Geschwindigkeitsrichtungen. Man spricht von einer *turbulenten Strömung*. Osborne Reynolds wies nach, dass es vom Verhältnis wirkender Trägheits- und Zähigkeitskräfte abhängt, ob Laminarität oder Turbulenz vorliegt. Sind in einer Flüssigkeit die Trägheitskräfte im Vergleich zu den Reibungskräften infolge der Zähigkeit  $\nu$  kleiner, desto stabiler ist eine laminare Strömung. Als Maßstab des Verhältnisses von Trägheits- und zäher Reibungskraft wird die Reynoldszahl  $Re$  eingeführt. Sie ermöglicht einen Vergleich zwischen zwei geometrisch ähnlichen Strömungen. Unterhalb einer bestimmten Reynoldszahl  $Re_{krit}$  ist die laminare Strömung stabil ( $Re_{krit} \leq 2320$ ). Für Strömungen in offenen Gerinnen gilt:

$$Re_{krit} = \frac{v \cdot 4 \cdot r_{hy}}{\nu} = 2320 \quad (3-10)$$

mit der Fließgeschwindigkeit  $v$ , dem hydraulischen Radius  $r_{hy}$  sowie der kinematischen Viskosität  $\nu$ .

Um eine spezifische Wassermenge abfließen zu lassen, muss eine Mindestenergiehöhe  $h_{E,min}$  vorhanden sein. Andernfalls steigt der Wasserstand solange, bis die Energiehöhe ihren Mindestwert erreicht hat. Ist  $h_E > h_{E,min}$ , hat das Wasser zwei Möglichkeiten abzufließen (Bollrich 2013):

- *Strömen*: Abfluss mit großer Wassertiefe, geringer Fließgeschwindigkeit und niedrigem Gefälle. Störungen (Stau, Querschnittsänderungen) wirken sich stromaufwärts aus.
- *Schießen*: Abfluss mit geringer Wassertiefe, großer Fließgeschwindigkeit und hohem Gefälle. Störungen breiten sich nicht stromaufwärts aus. Es kommt zu einer starken Sohlbeanspruchung.

Der Übergang zwischen Strömen und Schießen wird als Grenzzustand bezeichnet und kann als *Grenztiefe*  $h_{gr}$  oder *Grenzgeschwindigkeit*  $v_{gr}$  ausgedrückt werden:

$$h_{gr} = \sqrt[3]{\left(\frac{Q^2}{g \cdot b^2}\right)} = \sqrt[3]{\left(\frac{q^2}{g}\right)} \quad (3-11)$$

$$v_{gr} = \sqrt{g \cdot h_{gr}} \quad (3-12)$$

Die Froude-Zahl  $Fr$  beschreibt den Fließzustand als Verhältnis zwischen Trägheitsreaktion des Wassers und der Schwerkraft:

$$Fr = \frac{v}{c} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} = \sqrt{\left(\frac{h_{gr}}{h}\right)^3} \quad (3-13)$$

mit der Fließgeschwindigkeit  $v$ , der Störwellenausbreitungsgeschwindigkeit<sup>9</sup>  $c = (g \cdot h)^{1/2}$ , der Abflusstiefe  $h$  und der Grenztiefe  $h_{gr}$ . Der Grenzzustand kann somit als  $Fr = 1$  bzw. mit  $v = v_{gr} = c$  oder  $h = h_{gr}$  beschrieben werden (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1. Definitionen des Strömungs- und Grenzzustandes mit Fließgeschwindigkeit ( $v$ ) und Grenzgeschwindigkeit ( $v_{gr}$ ), der Abflusstiefe ( $h$ ) und der Grenztiefe ( $h_{gr}$ ) sowie der Froude-Zahl ( $Fr$ )

Strömen	Grenzzustand	Schießen
$v < v_{gr}$	$v = v_{gr}$	$v > v_{gr}$
$h > h_{gr}$	$h = h_{gr}$	$h < h_{gr}$
$Fr < 1$	$Fr = 1$	$Fr > 1$

Der Übergang vom Strömen zum Schießen verläuft kontinuierlich. D.h. Gegebenheiten der Strömung an der Stelle des Fließwechsels machen sich sowohl stromauf als auch stromab bemerkbar. Bereiche mit strömendem Abfluss können sich jedoch nicht in einem im stromaufwärts befindlichen schießenden Bereich hinein auswirken. Aus diesem Grund kann sich das Wasser im schießenden Bereich nicht kontinuierlich an die Bedingungen im stromabwärts liegenden Bereich

<sup>9</sup> Sich kreisförmig ausbreitende Wellen, die z.B. nach einem Steinwurf in ein Gewässer entstehen, werden in diesem Zusammenhang als Störwellen bezeichnet.

anpassen. Somit ist der Übergang vom Schießen zum Strömen diskontinuierlich. Die schießende Strömung läuft quasi ungehindert in den strömenden Bereich, welcher vom stromabwärts abfließenden Wasser gestaut wird. Die frei werdende Energie entlädt sich in einem *Wechselsprung*.

### 3.1.2 Deichüberströmungsmodell

Steigt ein Hochwasserspiegel über die Deich- oder Dammkrone hinaus, kommt es zur Überströmung des Bauwerks (Abbildung 3-4). Dabei sind verschiedene Phasen zu unterscheiden: Nach dem Anströmen senkt sich auf der Deichkrone die Abflusstiefe auf die Grenztiefe  $h_{gr}$  ab. Der Fließwechsel von Strömen auf Schießen verläuft kontinuierlich bis zur landseitigen Kante des Übergangs von der Deichkrone zur Deichbinnenböschung. Ab der Kante zur Deichbinnenböschung fließt das Wasser zunächst beschleunigt schießend ab, um anschließend auf der Böschung in einen schießenden Normalabfluss überzugehen. Der Fließwechsel von Schießen zu Strömen passiert diskontinuierlich am Deichfuß in einem Wechselsprung mit Lufteintrag. Der kontinuierliche Fließwechsel an der Deichkrone führt dazu, dass der Wasserspiegel schon auf der Deichkrone absinkt, d.h. sich die Information des Fließwechsels stromaufwärts ausbreitet. Beim diskontinuierlichen Fließwechsel am Deichfuß hingegen breiten sich keine Informationen stromaufwärts aus. Unter Berücksichtigung der experimentellen Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit (Kapitel 4) ist die Deichüberströmung hydraulisch als vollkommener Überfall eines breitkronigen Wehrs zu betrachten. Der Abfluss  $Q$  während der Überströmung ist von der Überfallhöhe  $h_u$  sowie der Breite  $b$  des überströmten Abschnitts abhängig und kann mit der Überfallformel nach Poleni bestimmt werden (Bollrich (2013)):

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h_u^{2/3} \quad (3-14)$$

mit dem Überfallbeiwert  $\mu = 1 \cdot 3^{-1/2} = 0,577$ , der Breite  $b$ , der Gravitationsbeschleunigung  $g$ , sowie der Überfallhöhe  $h_u$ .

Im Gegensatz zur kontinuierlichen Überströmung werden bei Wellenüberläufen Deichbinnenböschungen periodisch vernässt. Für einen Überblick zur Forschung bezüglich Deichüberströmung und Wellenüberlauf von Deichen wird auf Abschnitt 3.3 verwiesen.

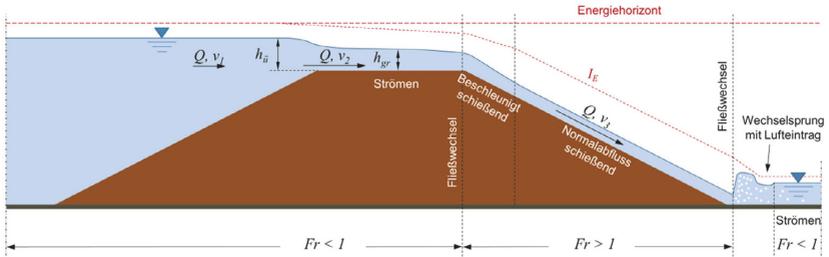


Abbildung 3-4. Darstellung der Deichüberströmung und der jeweiligen Fließzustände *Strömen* ( $Fr < 1$ ) sowie *Beschleunigt schießend* und *Normalabfluss schießend* ( $Fr > 1$ ). Unter Berücksichtigung von  $Q = const.$  und  $v_1 < v_2 < v_3$ . Mit der Froude-Zahl ( $Fr$ ), der Fließgeschwindigkeit ( $v$ ), dem Durchfluss ( $Q$ ), dem Energieliniengefälle ( $I_E$ ), der Überfallhöhe ( $h_{ui}$ ) und der Grenztiefe ( $h_{gr}$ ). Darstellung u.a. nach Zanke (2002) und Bollrich (2013).

### 3.1.3 Einfluss einer Überströmung auf den Boden und dessen Eigenschaften<sup>10</sup>

Bodentransport beginnt durch verschiedene Prozesse. Neben chemischen Prozessen, welche dazu führen können, dass bestimmte Stoffe in Lösung gehen und abtransportiert werden, sind sowohl Erosion als auch Schwerkraft Ursachen für den Transportbeginn (Patt et al. 2009). So wirkt neben der Kraft des fließenden Wassers zusätzlich noch die Gravitationskraft auf die Bodenteilchen eines Gerinnes. Wenn die Scherfestigkeit des Bodens durch dessen Eigengewicht und die Belastung des Wassers zu sehr beansprucht wird, kann es zu Rutschungen kommen (vgl. Abschnitt 2.2.1). Nach Coulomb ist die Scherfestigkeit des Bodens  $\tau_S$  durch eine lineare Beziehung gegeben. Die Kohäsion  $c$  (bei bindigen Böden) und der Reibungswinkel  $\varphi$  stehen hierbei für Eigenschaften des Bodens und die Normalspannung  $\sigma$  für die äußere Belastung:

$$\tau_S = c + \tan\varphi \cdot \sigma \quad (3-15)$$

Ist ein Boden stark durchfeuchtet, z.B. nach langanhaltenden Regenereignissen, Wassereinstau oder andauernder Überströmung, verringert sich die Scherfestigkeit des Bodens, weil sowohl die Körner als auch das Porenwasser die Normalspannung  $\sigma$  aufnehmen. Ursache dafür ist, dass einerseits der Porenwasserdruck  $u$  die abschiebenden Kräfte verstärkt und sich die von Korn zu Korn wirkende Normalspannung  $\sigma$  reduziert. Andererseits wird mit steigender Wassersättigung die

<sup>10</sup> Wenn nicht anders angegeben überwiegend aus Simmer (1994) und Schmidt (1996)

Konsistenz des Bodens weicher, wodurch die Kapillarkohäsion<sup>11</sup> und damit auch die Scherfestigkeit  $\tau_S$  abnimmt. Formel (3-15) ergänzt sich somit zu:

$$\tau_S = c + \tan\varphi \cdot (\sigma - u) \quad (3-16)$$

Auch kann die Auswirkung einer Überströmung auf die Bodeneigenschaften mit dem im BAW-Merkblatt GBB (2010) beschriebenen Schiffsverkehr bedingtem Absink in Kanälen vergleichbar sein: Mit einer Reduzierung des Wasserspiegels nimmt der Porenwasserdruck im Boden ab. Ist die Durchlässigkeit des Bodens  $k_f$  größer als die Absinkgeschwindigkeit  $v_{za}$ , so ist das Druckgefälle zwischen Bodenporen und Atmosphäre bzw. Bodenoberfläche ebenfalls gering und die Strömungskräfte können hinsichtlich Standsicherheit der Böschungsoberfläche vernachlässigt werden. Ist der  $k_f$ -Wert des Bodens kleiner als die Sinkgeschwindigkeit  $v_{za}$  des Wasserspiegels, führt dies zu einem Porenwasserüberdruck im Boden. Dieser Überdruck kann eine Sickerströmung in Richtung Bodenoberfläche auslösen, was den Zusammenhalt der Bodenteilchen und Bodenaggregate verringert, die Entstehung einer Bruchfläche fördert und somit Erosion begünstigt (GBB, 2010).

### 3.1.4 Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf Überströmungen<sup>12</sup>

„Die bindige Abdeckschicht übernimmt bei einem Deich die Funktion der Erosionssicherheit [...] und ist in Abhängigkeit von der auftretenden Seegangsbelastung unterschiedlich stark auszubilden“ (LU MV 2009). Zudem kann die Erosionssicherheit und somit der Schutz vor Einwirkungen hydraulischer Belastungen auf Deichbinnenböschungen durch konstruktive oder vegetative Maßnahmen (siehe Abschnitt 2.2.3) erhöht werden. Aufgrund ihrer Beschaffenheit und Geometrie können diese Maßnahmen die oberflächennahe Fließgeschwindigkeit und Schleppspannung verändern und den Erosionswiderstand erhöhen. Größen zur Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheit sind die absolute Rauheit  $k$  und der Manning-Strickler-Beiwert<sup>13</sup>  $k_{St}$  bzw.  $n$  ( $=k_{St}^{-1}$ ). Beide Parameter lassen Rückschlüsse auf das Reibungsverhalten zwischen Strömung und Oberfläche zu: Je größer  $k_{St}$  bzw. kleiner  $k$ , desto rauer die Oberfläche und somit größer die Reibung zwischen Wasser und Rinnenwandung (Abbildung 3-5).

---

<sup>11</sup> Scheinbare Kohäsion zwischen den Kornoberflächen nichtbindiger Böden.

<sup>12</sup> Wenn nicht anders angegeben aus Bollrich (2013).

<sup>13</sup> Im folgenden Stricklerbeiwert. Bei  $n$  handelt es sich um den vor allem im angloamerikanischen Sprachraum verwendeten reziproken Stricklerbeiwert.

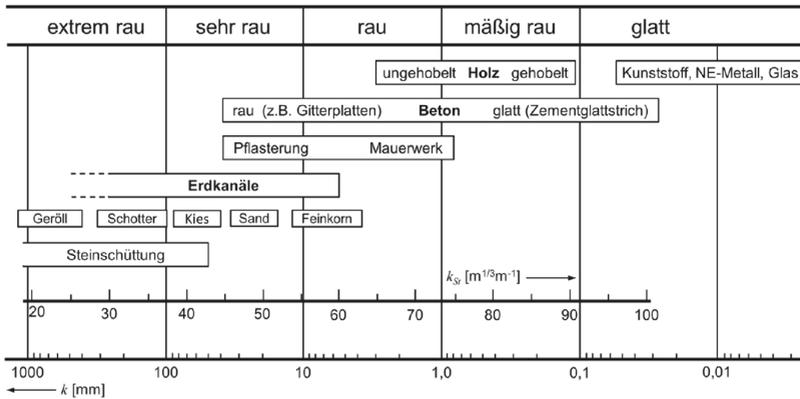


Abbildung 3-5. Manning-Strickler-Beiwerte  $k_{Sr}$  [m<sup>1/3</sup>m<sup>-1</sup>] und Rauheiten  $k$  [mm] für ausgewählte Gerinneoberflächen. Darstellung nach Bollrich (2013).

Den Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit und Rauheit der Sohl- oberfläche zeigen experimentelle Untersuchungen an einem Kokosgewebe in einer rezirkulierenden Strömungsrinne (Abbildung 3-6): Im Vergleich zu einer ungeschützten Sandoberfläche führt ein oberflächlich installiertes Erosions- schutzprodukt (Kokosgewebe, 700 gm<sup>-2</sup>) zu einer Verringerung der mittleren Fließ- geschwindigkeit einer sohnnahen Schicht (Olschewski 2010).

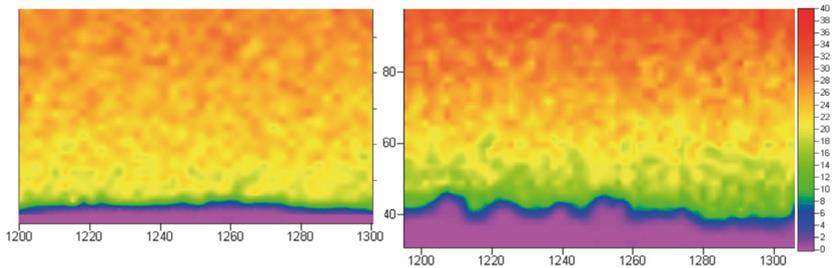


Abbildung 3-6. Einfluss der Sohlbeschaffenheit auf die oberflächennahe Fließgeschwindigkeit. Links: Strömung über Sand ohne oberflächlichen Erosionsschutz. Rechts: Strömung über ein Kokosgewebe (700 gm<sup>-2</sup>) auf Sand. Abszisse  $\triangleq$  Länge des Untersuchungsabschnitts [mm]; Ordinate  $\triangleq$  Höhe des Untersuchungsabschnitts [cm]. Der Farbverlauf gibt die Fließgeschwindigkeit an: Violett  $\triangleq$  0 bis Rot  $\triangleq$  40 cms<sup>-1</sup>.

Für die Rauheit von grasbewachsenen Oberflächen ist eine Beschreibung aufgrund verschiedener Faktoren schwierig, wie Höhe und Bewuchsdichte der Graspflanzen sowie ihre Steifigkeit (Steuernagel 2008). Darüber hinaus beschreiben Hewlett et

al. (1987) die Entwicklung unterschiedlicher Rauheiten grasbewachsener Oberflächen aufgrund steigender hydraulischer Belastungen (Abbildung 3-7):

- Die Abflusstiefe ist geringer als die Höhe der Graspflanzen, welche sich bei geringer Geschwindigkeit nicht umlegen.
- Erhöhung von Abflusstiefe und Fließgeschwindigkeit führen zur Bewegung der Graspflanzen und zum teilweisen Umlegen der Grashalme in Strömungsrichtung.
- Durch weitere Erhöhung von Abflusstiefe und Fließgeschwindigkeit werden alle Grashalme in Strömungsrichtung umgelegt. Dieser Zustand kann einerseits zu einer relativ glatten Böschungsoberfläche führen, andererseits zu einer bedeckenden und somit schützenden Schicht zwischen Wasser und Boden.

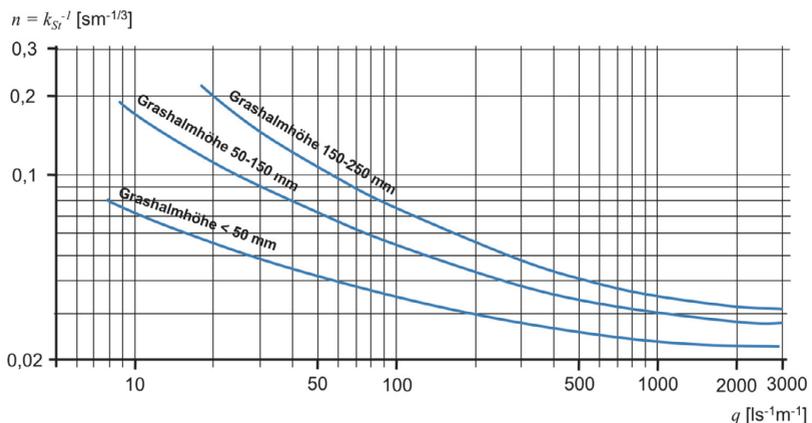


Abbildung 3-7. Abhängigkeit des Stricklerbeiwerts  $k_{St}$  vom spezifischen Abfluss  $q$  unter Berücksichtigung verschiedener Grashalmhöhen. Darstellung nach Hewlett et al. (1987).

### 3.2 ASTM D6460

Die internationale Standardisierungsorganisation ASTM International mit Sitz in den USA hat den Standard ASTM D6460 (2012, 2019)<sup>14</sup> veröffentlicht. Die Testmethode

<sup>14</sup> ASTM D6460 (2012, 2019): *Standard Test Method for Determination of Rolled Erosion Control Product (RECP) Performance in Protecting Earthen Channels from Stormwater-Induced Erosion*

schildert einen großmaßstäblichen Versuch, mit dem reale Bedingungen von Überströmungsereignissen auf Erdbauwerken simuliert werden. Inhaltlich zielt der Standard auf die Bewertung der Eignung von Erosionsschutzprodukten (RECP) zum Schutz vor überströmungsinduzierter Erosion von bewachsenen und unbewachsenen Bodenoberflächen in Rinnen und auf Böschungen. Um eine Bewertung nach ASTM vornehmen zu können, muss durch aufeinanderfolgende Überströmvorgänge mit steigender hydraulischer Belastung ein Versagen der Rinnensohle erreicht werden. Dieser Versagensfall ist durch einen mittleren Bodenabtrag definiert, dem *Clopper Soil Loss Index (CSLI)* von  $CSLI \geq 1,27 \text{ cm}$  (0,5 in), gemittelt über einen maßgeblichen Untersuchungsbereich der Versuchsrinne.

Der ASTM-Standard beschreibt, wie schwebstofffreies und ungetrübtes Wasser in definierten Maximalabflüssen in einem Kreislauf durch eine oder mehrere Rinnen mit durch RECP versehene Sohlen geleitet werden kann. Die Versuchsrinnen sind als Erdbauwerke mit Rechteck- oder Trapezquerschnitt zu errichten. In jedem Fall ist die Sohle mit einer Mindestbreite von 0,61 m (2 ft) auszuführen. Für den Fall eines Trapezquerschnittes sind die Rinnenwände mit einer Neigung von 1 : 2 zu erstellen. Die Mindestlänge einer Rinne soll 12,2 m (40 ft) betragen, wobei der Fokus für Untersuchungen auf den maßgeblichen mindestens 6,1 m (20 ft) langen Abschnitt im Mittelbereich der Versuchsrinne liegt. Die zu prüfende Oberfläche der Rinnensohle soll aus einem homogenen Lehm, Ton oder Sand bestehen. Dieser Prüfboden ist anschließend den geforderten Feldbedingungen hinsichtlich Bodenbearbeitung oder Installation der RECP anzupassen. Die auszuführende Rinnenneigung ist abhängig von der zu prüfenden Sohloberfläche. So sind eine eher flache Neigung bei unbegrünter Oberfläche und eine steilere Neigung bei begrünter zu wählen. Alle folgenden Angaben dieses Abschnitts beziehen sich ausschließlich auf Rinnen mit Rechteckquerschnitt.

Als Standardmesstechnik empfiehlt ASTM D6460

- einen Durchflussmesser zur Bestimmung des Abflusses,
- ein Fließgeschwindigkeitsmessgerät,
- ein Messgerät zur Ermittlung der Erosion bzw. der relativen Höhe der Sohloberfläche (z.B. Spitzentaster bzw. *Pin-Profilier*),
- ein Messgerät zur Ermittlung der Abflusstiefe,
- eine Foto- und Filmkamera,
- Ausrüstung zur Messung der Vegetation (Anzahl und Höhe der Graspflanzen) sowie
- sonstige Ausrüstung z.B. zur Ermittlung meteorologischer Daten.

Nach der Aufnahme aller Standort- und Probeninformationen (geotechnische und meteorologische Parameter, Informationen zur Sohloberfläche der Rinne einschließlich des RECP und der Vegetation) werden im relevanten Untersuchungs-

bereich mindestens acht aufeinanderfolgende Testabschnitte mit einem Maximalabstand von jeweils 0,61 m (2ft) in Strömungsrichtung festgelegt und markiert. An jedem dieser Testabschnitte ist an mindestens drei definierten Messpunkten die relative Höhe der Sohloberfläche zu einem festen Bezugspunkt zu bestimmen. Die eigentliche Versuchsreihe besteht aus mehreren, mindestens vier aufeinanderfolgenden, 30-minütigen Einzelversuchen mit jeweils größer werdendem Abfluss und somit steigender Fließgeschwindigkeit und Schleppspannung. Die Höhe des Anfangs- und Endabflusses ist durch die Oberflächenbeschaffenheit der Rinnensohle bestimmt (Tabelle 3-2). Der Abfluss im Bereich der Testabschnitte sollte so gleichförmig und laminar wie möglich sein (Normalabfluss). Während jedes Einzelversuchs werden in jedem Testabschnitt die Fließgeschwindigkeit sowie die Abflusstiefe bestimmt. Ziel ist es, dass mindestens die drei ersten Einzelversuche im Untersuchungsbereich einen mittleren  $CSLI < 1,27$  cm verursachen und der letzte Versuch zu einem Versagen der Rinnensohle führt (mittlerer  $CSLI \geq 1,27$  cm). Nach jedem Einzelversuch wird an jedem Testabschnitt wieder die relative Höhe der Sohloberfläche zum festen Bezugspunkt bestimmt sowie eine generelle Bewertung der Oberflächenbeschaffenheit der Rinnensohle vorgenommen. Insgesamt sollen drei Versuchsreihen mit jeweils mindestens vier Einzelversuchen durchgeführt werden, um einen Durchschnittswert der Leistungsfähigkeit eines RECP bestimmen zu können.

Die RECP werden nach jeweils einer Versuchsreihe hinsichtlich ihres Vermögens

- den Bodenabtrag sowie den Sedimenttransport unter verschiedenen Voraussetzungen zu reduzieren,
- die Vegetation in ihrem Wachstum zu unterstützen und
- die Wasserqualität hinsichtlich Trübung und Sedimentfracht zu verbessern

bewertet. Um diese Fähigkeiten eines Erosionsschutzes zu beschreiben, werden äquivalent dazu die Verhältnisse zwischen Schleppspannung  $\tau_0$  und Bodenabtrag  $CSLI$ , zwischen Fließgeschwindigkeit  $v_0$  und Bodenabtrag  $CSLI$  sowie zwischen den kritischen hydraulischen Parametern ( $\tau_{crit}$ ,  $v_{crit}$ ) und dem Versagen des Versuchskanals aufgestellt. Hierfür wird der jeweils mittlere  $CSLI$  der Einzelversuche über die jeweils gemittelten hydraulischen Parameter ( $\tau_0$ ,  $v_0$ ) aufgetragen. Durch die Punkte der Wertepaare ( $CSLI_i$ ;  $\tau_i$ ) bzw. ( $CSLI_i$ ;  $v_i$ ) wird eine Trendlinie gelegt (*best fit*) und der kritische hydraulische Parameter kann am Schnittpunkt von  $CSLI = 1,27$  cm abgelesen werden.

Tabelle 3-2. Empfohlene Zieldurchflüsse bzw. zu mobilisierende Schleppspannung  $\tau_0$  [Pa; psf] nach ASTM D6460 (2012) in Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Sohloberfläche der Versuchsrinne: (1) Boden ohne Vegetation, ohne Erosionsschutz

(RECP); (2) Boden mit RECP, ohne Vegetation; (3) Boden mit Vegetation, ohne RECP; (4) Boden mit Vegetation, mit RECP.

Versuchsnummer	Boden ohne Vegetation/RECP	Boden mit RECP, ohne Vegetation	Vegetation ohne RECP	Vegetation mit RECP
1	24 Pa (0,5 psf)	24 Pa (0,5 psf)	48 Pa (1,0 psf)	96 Pa (2,0 psf)
2	36 Pa (0,75 psf)	48 Pa (1,0 psf)	96 Pa (2,0 psf)	192 Pa (4,0 psf)
3	48 Pa (1,0 psf)	72 Pa (1,5 psf)	144 Pa (3,0 psf)	288 Pa (6,0 psf)
4	60 Pa (1,25 psf)	96 Pa (2,0 psf)	192 Pa (4,0 psf)	384 Pa (8,0 psf)
5	72 Pa (1,5 psf)	120 Pa (2,5 psf)	240 Pa (5,0 psf)	480 Pa (10,0 psf)
6	84 Pa (1,75 psf)	144 Pa (3,0 psf)	288 Pa (6,0 psf)	576 Pa (12,0 psf)
7	96 Pa (2,0 psf)	168 Pa (3,5 psf)	336 Pa (7,0 psf)	672 Pa (14,0 psf)

Der *Clopper Soil Loss Index CSLI* ist nach ASTM D6460 zur Beschreibung des Bodenabtrags heranzuziehen. Wie bei allen Verfahren zur Ermittlung einer Oberflächenhöhe (vgl. Abschnitt 2.2.2.1) wird auch hier zunächst der Bodenauf- bzw. -abtrag nach einem erosiven Ereignis bestimmt. Anschließend werden sämtliche Werte, welche Akkumulation von Bodenteilchen suggerieren, auf 0 gesetzt. Dies hat zur Folge, dass ausschließlich Ereignisse des Bodenabtrags in eine Bewertung einfließen (Clopper 2016). Der bewertungsrelevante Bodenabtrag bzw. Clopper Soil Loss Index *CSLI* wird als Verhältnis zwischen dem mittleren Bodenabtrag eines Testabschnitts  $C_T$  und dessen Grundfläche  $A_T$  dargestellt:

$$CSLI = \frac{C_T}{A_T} \quad (3-17)$$

Abschließend werden alle Einzel-*CSLI* der Testabschnitte einer Versuchsrinne zu einem Gesamt-*CSLI* gemittelt.

Die Schleppspannung  $\tau_0$  wird als Mittelwert des sich in einem Testabschnitt befindlichen Kontrollvolumens auf Grundlage der Impulskräfte berechnet:

$$\tau_0 = \frac{\gamma}{2} \cdot (h_1 + h_2) \cdot \sin\alpha + \frac{1}{l} \left[ \frac{\gamma}{2} \cdot (h_1^2 - h_2^2) \cdot \cos\alpha - \rho q^2 \left( \frac{1}{h_2} - \frac{1}{h_1} \right) \right] \quad (3-18)$$

mit der Wichte  $\gamma$  und Dichte des Wassers, der Abflusstiefe zu Beginn  $h_1$  und am Ende  $h_2$  des Testabschnitts, der Länge  $l$  des Testabschnitts, dem Sohlneigungswinkel  $\alpha$  sowie dem spezifischen Abfluss  $q$ .

Zu jedem Versuch sind die Profile der Sohloberflächenhöhe  $y$ , der mittleren Abflusstiefe  $h$  und des Energieliniengefälles  $h_E$  darzustellen. Zusätzlich wird die mittlere Abflussgeschwindigkeit in einem Testabschnitt  $V_{csave}$  berechnet:

$$V_{csave} = \frac{Q}{A} \quad (3-19)$$

mit dem Durchfluss  $Q$  sowie dem Fließquerschnitt  $A$  des Testabschnitts.

Zur Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheit eines Testabschnitts wird die Rauheit nach Manning berechnet:

$$n = \frac{C}{V_{csave}} \cdot h_{csave}^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{S_f} \quad (3-20)$$

mit einem konstanten Einheitenumrechnungsfaktor  $C = 1$ , der mittleren Abflussgeschwindigkeit des Kontrollvolumens  $V_{csave}$ , der mittleren Abflusstiefe  $h_{csave}$  sowie dem reibungsrelevanten Gefälle  $S_f$ .

### 3.3 Bisherige Untersuchungen

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Zusammenstellung großmaßstäblicher Versuche an geböschten Erdbauwerken zur Ermittlung von Erosionsraten, Ermittlung von Böschungsstabilitäten oder Bewertung der Erosionsschutzfähigkeit von Erosionsschutzprodukten. Verschiedene Versuchsdurchführungen, Messmethoden und Möglichkeiten zur Auswertung von Bodenerosion werden vorgestellt. Grundsätzlich wird in Hinblick auf Deich- und Dammbauwerke in diesem Abschnitt in Überströmung, Wellenüberlauf und eine Kombination aus beidem unterschieden (Abbildung 3-8). Eine Übersicht der vorgestellten Literatur einschließlich der Darstellung relevanter hydraulischer Parameter sowie der Informationen zu den Erosionsmessmethoden gibt Tabelle 3-3.

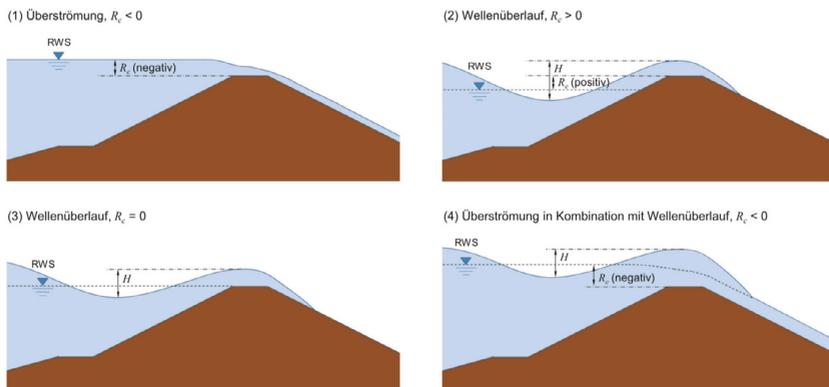


Abbildung 3-8. Darstellungen verschiedener Deichüberströmungsformen. Mit Freibord ( $R_e$ ), Wellenhöhe ( $H$ ) und Ruhewasserspiegel (RWS). Vgl. Schütterumpf (2001), EAK (2020), EurOtop (2007) und Pan et al. (2013).

Tabelle 3-3. Zusammenstellung großmaßstäblicher Überströmungs- und Wellenüberlaufversuche unter Berücksichtigung der jeweiligen hydraulischen Parameter spezifischer Abfluss  $q$ , Schleppspannung  $\tau$  und Fließgeschwindigkeit  $v$ .

Veröffentlichung	Hydraulische Parameter			Erosionsmessung	Bemerkung
	$q^{(1)}$ [ls <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ]	$\tau$ [Pa]	$v$ [ms <sup>-1</sup> ]		
Überströmungsversuche					
Koelewijn et al. (2022)	≈ 50 bis ≈ 550	—	—	Visuelle und akustische Erfassung, Berührung und Vermessung erodierter Bereiche, LiDAR	Untersuchung der Schutzwirkung einer Grasnarbe auf Deichdeckschichten aus Ton. Vorstellung erster Ergebnisse.
NTPEP (2015)	≈ 110 bis ≈ 2500	≈ 23 bis ≈ 640	≈ 0,3 bis ≈ 7,9	Spitzentaster	Ermittlung der Erosionsschutzfähigkeit von geosynthetischen Erosionsschutzprodukten nach ASTM D6460
Hsieh und Chen (2014)	≈ 111 bis ≈ 228	—	≈ 0,7 bis ≈ 1,3	Wiegung der Proben	Ermittlung der Erosionsschutzfähigkeit eines geosynthetischen Erosionsschutzprodukts in Anlehnung an ASTM D6460
Turner et al. (2011), Thornton et al. (2009)	≈ 22 bis ≈ 2575	≈ 306 bis ≈ 700	≈ 2,9 bis ≈ 6,9	Spitzentaster, visuelle Erfassung	Ermittlung der Erosionsschutzfähigkeit von Erosionsschutzprodukten
Zanke et al. (2009); Steuernagel (2008)	≈ 500 bis ≈ 1000	≈ 400 bis ≈ 500	≈ 5 bis ≈ 7	Visuelle Erfassung, Ermittlung Soll-Ist-Lage der Böschung	Überströmungsversuche an einem Versuchsdeich, Entwicklung eines überströmungssicheren Deckwerks
Hanson und Cook (2004)	≈ 398 bis ≈ 1606	—	—	—	Ermittlung der Erosionsrate eines Bodens in Rinnenversuchen
Westrich et al. (2003)	≈ 25 bis ≈ 330	—	≈ 2,0 bis ≈ 2,5	Visuelle Erfassung, Wiegung der Proben	Ermittlung der Erosionsstabilität verschiedener Deckwerkstypen sowie kalkstabilisierten Lehms
Dornack (2001)	≈ 22 bis ≈ 65	≈ 1,5	—	Visuelle Erfassung	Ermittlung der Erosionsstabilität eines Deckwerks (Steinsatz)
Hanson (1990a)	≈ 22 bis ≈ 352	≈ 2 bis ≈ 36	—	Spitzentaster	Ermittlung der Erosionsrate verschiedener Böden in Rinnenversuchen
Kombinierte Überströmungs- und Wellenüberlaufversuche					

Veröffentlichung	Hydraulische Parameter			Erosionsmessung	Bemerkung
	$q^{1/}$ [ $\text{ls}^{-1}\text{m}^{-1}$ ]	$\tau$ [Pa]	$v$ [ $\text{ms}^{-1}$ ]		
Pan et al. (2013)	—	$\approx 100$ bis $\approx 350$	$\approx 1,0$ bis $\approx 2,4$	Spitzenaster	Ermittlung der Stabilität gegen Erosion einer geosynthetisch gesicherten und begrünten Deichbinnenböschung im großmaßstäblichen Laborversuch
Wellenüberlaufversuche					
Schüttrumpf (2001)	—	—	—	—	Ermittlung hydraulischer Strömungsparameter des Wellenüberlaufs
z.B. Van der Meer (2007); Van der Meer et al. (2010)	0,1; 1; 10; 20; 30; 50; 75	—	max. $\approx 6$	Beschreibung des Böschungszustandes	In situ Wellenüberlaufversuche mit wechselnden Wellenüberlaufraten auf Deichbinnenböschungen
Piontkowitz et al. (2009)	Bis zu 30	—	—	Beschreibung des Böschungszustandes	
Thornten et al. (2012)	Bis zu 370	—	—	Beschreibung des Böschungszustandes	Wellenüberlaufversuche mit wechselnden Wellenüberlaufraten auf verschiedenen Böschungen mit und ohne Begrünung/ mit und ohne Erosionsschutz
<sup>1)</sup> Überströmungsversuche: $q \triangleq$ spezifischer Abfluss Wellenüberlaufversuche: $q \triangleq$ mittlere Wellenüberlauftrate eines Sturmereignisses					

### 3.3.1 Überströmungsversuche

Allen im Folgenden vorgestellten Versuchen ist die Überströmung einer geeigneten Fläche aus Erdstoffen oder verschiedenen Erosionsschutzprodukten bzw. -techniken gemein. Grundsätzlich stehen die Stabilitäten der Sohloberflächen hinsichtlich Überströmungen im Fokus der Untersuchungen. Unterschiede bestehen vor allem in verschiedenen Versuchsaufbauten und -abläufen sowie in der jeweiligen Versuchsauswertung. Im Fokus der Beschreibungen liegen in erster Linie Böschungen, Kanäle und Dammbinnenböschungen.

#### 3.3.1.1 Koelewijn et al. (2022)

Um die Widerstandsfähigkeit grasbewachsener Deichböschungen gegen Erosion zu untersuchen, führten Koelewijn et al. (2022) im *Polders2C's-Interreg-Projekt 27* Überströmungsversuche auf einem Polderdeich (Hedwige-Prosperpolder) durch. Dazu wurden 2 m breite Rinnen direkt auf die Deichoberfläche von Deichkrone zum

Deichfuß installiert und mit Messtechnik versehen (u.a. LiDAR-Systeme (Light Detecting and Ranging), Fließgeschwindigkeitssensoren und Kameras; Abbildung 3-9 und Abbildung 3-10). Die Rinnenelemente aus Hartfaserplatten wurden an die Böschungsoberfläche bis zu 15 cm tief eingeschlagnene Pflöcke befestigt. Die Dauer der 27 Einzelversuche betrug jeweils zwischen etwa 30 min bis zu 25 h. Verschiedene Szenarien fanden Berücksichtigung:

- Ungestörte Böschungsoberflächen,
- Bäume im in der Böschungsoberfläche,
- Tierhöhlen bzw. Wühlspuren sowie
- instandgesetzte Böschungsoberflächenbereiche.

Koelewijn et al. (2022) zeigen, dass Deiche mit einer dichten und gut ausgebildeten Grasnarbe vergleichsweise hohen Überströmungsbelastungen über lange Zeiträume standhalten können. Besondere Aufmerksamkeit wurde auf die Auswirkungen von o.g. Unregelmäßigkeiten auf die Stabilität der Deichdecke gelegt, da diese zu einer früher einsetzenden und schnellen Erosion führen können. Solche Oberflächen- oder Deckschichtanomalien führen zu hydraulischen Pfaden, von denen aus die Deichdecke unterspült wird, was erhebliche Auswirkungen auf die Erosionsstabilität von Deichen haben kann.



Abbildung 3-9: Versuchsaufbau der *Polders2C*'s-Überströmungsversuche (Foto: Koelewijn et al. 2022).

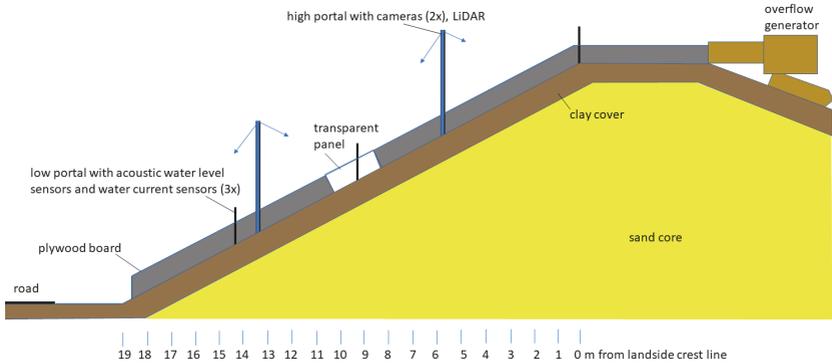


Abbildung 3-10: Schematischer Deichquerschnitt mit Darstellung der verwendeten Messtechnik (Koelewijn et al. 2022).

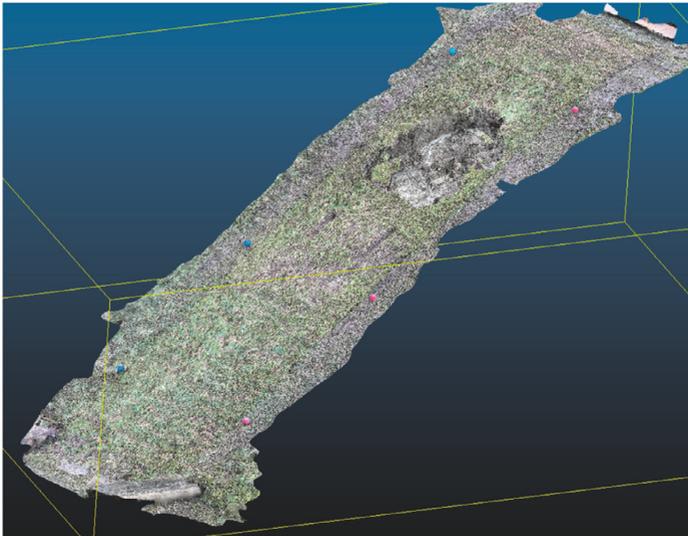


Abbildung 3-11: Beispielhafte 3D-Darstellung einer Punktwolke als Ergebnis einer LiDAR-Messung einer Schadstelle (Koelewijn et al. 2022).

### 3.3.1.2 NTPEP (2015)

Die US-amerikanische *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) initiierte das *National Transportation Product Evaluation*

*Program* (NTPEP). Dieses Programm dient unter anderem der Bewertung von im Straßenbau eingesetzten Baustoffen. Im Rahmen dessen wurden unter anderem mehr als 45 geosynthetische Erosionsschutzprodukte (RECP) verschiedener Hersteller hinsichtlich ihrer Fähigkeit, überströmungsinduzierte Erosion standzuhalten großmaßstäblichen Überströmungsversuchen unterzogen. Die Ergebnisse sind der Öffentlichkeit zugänglich (NTPEP 2015).

Grundlage für die NTPEP-Überströmungsversuche ist der Standard ASTM D6460. In Anlehnung daran werden alle Versuche dreifach in Rinnen mit Rechteckquerschnitt durchgeführt. Standardmäßig sind bisher Versuche mit RECP auf einem Boden ohne Bewuchs bei 10 % Sohlgefälle durchgeführt worden. Darüber hinaus wurde teilweise nach einer mehr als sechswöchigen sowie nach einer weiteren mehr als einjährigen Vegetationsperiode bei 20 % Sohlgefälle getestet. Als Versuchsboden kommt in der Regel ein Lehm zum Einsatz (Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4. Bodenmechanische Eigenschaften des bei den NTPTP-Versuchen (2015) am häufigsten verwendeten Versuchsbodens „Lehm“.

Sandgehalt	45 %
Schluffgehalt	35 %
Tongehalt	20 %
Fließgrenze	41 %
Plastizitätsindex	5 %
Proctordichte	~ 1,5 gcm <sup>-3</sup>
Optimaler Wassergehalt	~ 20 %

Wie bei ASTM D6460 beschrieben, hat jede Versuchsrinne eine Länge von 12,1 m (40 in) und einen definierten Untersuchungsbereich von 6,1 m (20 in). Dieser wiederum ist in zehn etwa 60 cm lange Testabschnitte unterteilt. In den Testabschnitten werden die Messungen aller relevanten hydraulischen Parameter sowie der Bodenabtragshöhe vorgenommen.

Die Dauer eines Einzelversuchs beträgt jeweils 30 Minuten (unbegrünt) bzw. 60 Minuten (begrünt). Die Versuche einschließlich der notwendigen Messungen (Durchfluss, Fließgeschwindigkeit, Abflusstiefe und Bodenabtrag) werden nach dem in ASTM D6460 empfohlenem Ablauf durchgeführt und ausgewertet (Abbildung 3-12).

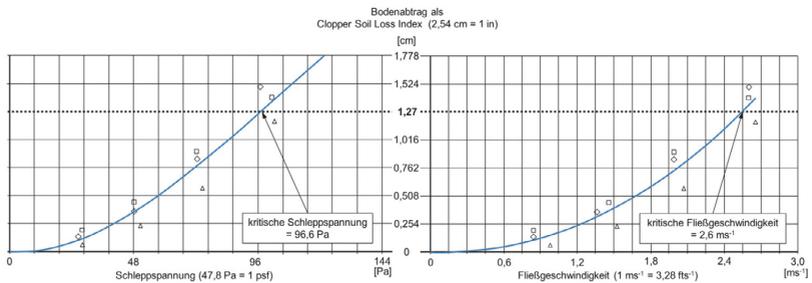


Abbildung 3-12. Beispiel der NTPEP-Auswertung vier aufeinanderfolgender Einzelversuche zur Bewertung einer Erosionsschutzmatte: Der mittlere Bodenabtrag (Clopper Soil Loss Index *CSLI*) im Versagensfall beträgt 1,27 cm bei einer kritischen Schleppspannung  $\tau_{krit} = 96,6 \text{ Pa}$  und einer kritischen Fließgeschwindigkeit  $v_{krit} = 2,6 \text{ ms}^{-1}$ . Darstellung nach NTPEP (2015), Testbericht zu *East Coast Erosion Blanket, ECSC-2, Double Net Straw-Coconut Blanket, July 2010*.

Neben Angaben zur jeweils kritischen Schleppspannung und Fließgeschwindigkeit gehört zur NTPEP-Auswertung zusätzlich die Darstellung der Entwicklung der Manning-Strickler-Rauigkeit in Abhängigkeit vom Durchfluss. Die Ergebnisse zeigen, dass die kritischen Parameter  $\tau_{krit}$  und  $v_{krit}$  je nach getesteten RECP und RECP-Kombinationen unterschiedliche Werte aufweisen, die für einen gemittelten Bodenabtrag von 1,27 cm (0,5 in) ermittelt wurden.

### 3.3.1.3 Hsieh und Chen (2014)

Hsieh und Chen (2014) führten Überströmungsversuche in einer Laborströmungsrinne mit Fokus auf der Ermittlung der Erosionsschutzfähigkeit einer Erosionsschutzmatte (GBL) durch. So wurden (1) ungeschützter Boden, (2) durch eine GBL geschützter Boden, (3) Boden mit Vegetation und (4) durch Vegetation und einer GBL geschützter Boden überströmt. Bei den Versuchsreihen wurden verschiedene Empfehlungen der ASTM D 6460 abgewandelt. Für Untersuchungen ist ein 14,4 m langer Bereich in der 0,6 m breiten Strömungsrinne vorbereitet worden. Innerhalb dessen wurden drei 80 cm lange Versuchsboxen als Probenträger installiert, von denen ausschließlich die mittlere Box für die Ergebnisverwertung betrachtet worden ist. Als Ergebnis wurde die Bodenerosionsrate als erodierte Bodenmasse je Gesamtmasse zu Beginn des Versuchs über der Fließgeschwindigkeit aufgetragen. Werte effektiver Schleppspannung ( $\tau_0$ ) oder kritischer hydraulischer Parameter ( $\tau_{crit}$ ,  $v_{crit}$ ) wurden nicht bestimmt.

Im Fazit ihrer Versuche beschreiben Hsieh und Chen (2014) vor allem, dass

- Bodenerosion mit steigendem Abfluss und steigendem Gefälle ansteigt,
- Bodenerosion durch Installation einer GBL reduziert wird,

- Bodenerosion durch Vegetation sowie Vegetation in Kombination mit einer GBL stark reduziert wird sowie
- eine 4–6 Monate alte Vegetation erforderlich ist, um einen ausreichend hohen Schutz in Kombination mit einer GBL zu gewährleisten.

### 3.3.1.4 Turner et al. (2011) und Thornton et al. (2009)

Ähnlich den NTPEP-Versuchen zur Bewertung der Erosionsschutzfähigkeit von Erosionsschutzprodukten wurden an der US-amerikanischen Colorado State University Überströmungsversuche an durch verschiedene RECP geschützten Gerinnesohloberflächen im begrünten (Thornton et al. 2009) und unbegrünten (Turner et al. 2011) Zustand durchgeführt. Grundlage für die Durchführung war ein selbst entwickeltes Versuchsprogramm, welches den Vorgaben des Standards ASTM D6460 ähnelt. So wurden begrünte und mit einer Geomatte (GMA) versehene Proben in mobilen Pflanzkästen für die Dauer einer Vegetationsperiode vorbereitet. Die unbegrünten Proben wurden ebenfalls in Probenkästen hergestellt. Die Länge der Versuchskästen entsprach in beiden Fällen den maßgeblichen Untersuchungsbereichen von  $l = 12,2$  m (40 ft.) bzw.  $l = 9,1$  m (30 ft.). Als Versuchsböden wurden schluffige bzw. tonige Sande nach USCS verwendet. Eine Zusammenstellung der Informationen zu Rinnengröße und den bodenmechanischen Eigenschaften der Versuchsböden ist Tabelle 3-5 zu entnehmen.

Tabelle 3-5. Geometrien der Versuchsrinnen und bodenmechanische Eigenschaften der verwendeten Versuchsböden (Thornton et al. 2009; Turner et al. 2011)

	Thornton et al. (2009)	Turner et al. (2011)	
Rinnenlänge	12,2 m (40 ft)	9,1 m (30 ft)	
Rinnenbreite	1,22 m (4 ft)	1,22 m (4 ft)	0,61 m (2 ft)
Rinnenneigung	1 : 2	0–50 %	0–10 %
Sandgehalt	64 %	ca. 29 %	
Schluffgehalt	20 %	ca. 15 %	
Tongehalt	14 %	ca. 15 %	
Fließgrenze	24 %	30 %	
Plastizitätsindex	-	10 %	
Proctordichte	-	1,95 gcm <sup>-3</sup>	
Optimaler Wassergehalt	-	10,5 %	

Eine Versuchsreihe bestand aus zwei bis sieben aufeinanderfolgenden Einzelversuchen bis zum Erreichen eines Versagensfalls. Die Dauer eines Einzelversuchs betrug in jedem Fall eine Stunde. Der Versagensfall wurde wie bei ASTM D6460 mit dem Clopper Soil Loss Index und einem mittleren Bodenabtrag von  $SL = 1,27$  cm (0,5 in) definiert. Zudem wurden etwaige Erosionserscheinungen visuell aufgenommen. Messungen (vor allem Bodenabtrag vor und nach jedem Einzelversuch, Abflusstiefe und Fließgeschwindigkeit) wurden im Untersuchungsbereich in ca. 60 cm (2 ft) langen Testabschnitten vorgenommen.

Ohne auf ASTM D6460 zu verweisen, werten Thornton et al. (2009) und Turner et al. (2011) die Ergebnisse auf die gleiche Weise aus: (1) Mittelung der gemessenen Fließgeschwindigkeit sowie der nach Formel (3-18) berechneten Schleppspannung über den Untersuchungsbereich. (2) Diesen Werten wird der jeweils mittlere Bodenabtrag gegenübergestellt.

### 3.3.1.5 Westrich et al. (2003)

Naturnahe Bauweisen für überströmbare Dämme wurden im Rahmen des *Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung* (BWPLUS) durch Westrich et al. (2003) untersucht. Im Kern der Forschung lag die Ermittlung der Wechselwirkung zwischen einer tolerierten Überströmung und der luftseitigen Bauwerksböschung sowie der daraus folgenden Ableitung erforderlicher qualitativer und quantitativer Bemessungsgrößen für Planung und Errichtung überströmbarer Dämme. Zwei wesentliche Annahmen bzgl. der Ausführung des Erosionsschutzes überströmbarer Dämme wurden getroffen:

- Schutzwirkung durch ein auf der luftseitigen Dammböschung installiertes Deckwerk, welches die hydraulischen überströmungsinduzierten Belastungen aufnimmt;
- Stabilisierung des Dammkörpers (1) mit hydraulischen Bindemitteln (z.B. Zement, Weißfeinkalk) oder (2) durch die Anwendung von Verbundbauweisen (z.B. sandgefüllte Geotextilschläuche oder Geogitter).

Unter anderem wurden Versuche in unterschiedlich großen Rinnen zur Ermittlung des Widerstandes gegen überströmungsinduzierte Erosion durchgeführt (Tabelle 3-6).

Bei Überströmungsversuchen an Steinschüttungen wurden Steinbewegungen bzw. -verschiebungen fotografisch dokumentiert und die rinnenparallele, abwärts gerichtete Kraft gemessen, welche zum Abgleiten des Deckwerks führt. Bei Messungen im Rahmen der Überströmungsversuche mit geogitterummantelten Steinmatratzen lag der Fokus auf der Ermittlung von Verformungen der Matratzen in allen Richtungen ( $e_x$ ,  $e_y$  und  $e_z$ ) sowie auf der Reibungskraft zwischen Steinmatratze und Unterbau.

Die Überströmungsversuche an den bindigen Deckschichten mit und ohne Bindemittelstabilisierung fanden in einer vergleichsweise schmalen, aber längeren Strömungsrinne statt. Zur Bestimmung der Erosionsrate als Masse je Probenfläche je Zeit wurde die Menge an Bodenverlust der Proben während und nach den Versuchen durch das Wasserersatzverfahren ermittelt. Für die Analyse werden behandelte und unbehandelte Proben miteinander verglichen. Abbildung

3-13 zeigt die Ergebnisse der Versuche an unbehandelten Lößlehmproben mit abnehmender Erosionsrate bei steigendem Abfluss.

Tabelle 3-6. Geometrien und Form des Probeinbaus sowie Informationen zu den Versuchsabläufen und weiteren Besonderheiten der im Rahmen von Westrich et al. (2003) durchgeführten Überströmungsversuche unter Angabe der mittleren Abflussgeschwindigkeiten  $v$  und der spezifischen Durchflüsse  $q$ .

	Steinschüttung	Geogitterummantelte Steinmatratzen	Bindemittelstabilisierte Deckschicht
Rinnenlänge	7,5 m	7,5 m	8,0 m
Rinnenbreite	1,5 m	1,5 m	0,8 m
Rinnenneigung	1 : 8	1 : 8	1 : 6
(Proben-) Unterbau	- Filterkies (8/32) - Keil aus tonigem Bodenmaterial (dadurch Neigung 1 : 6)		—
Probeinbau	Steinschüttung ( $\approx 1100$ durchnummerierte Steine in Höhen von 25 cm und 40 cm)	- Mit Steinen gefüllte Geogitterkörbe ( $B = 1,5$ m; $L_1 = 2,5$ m, $L_2 = 5,0$ m, $L_3 = 7,5$ m; $H = 0,25$ m) - 2 verschiedene Geogitter: Gestreckt (Typ I, PEHD) und verschweißt (Typ II, PP)	Installation von Probenbehältern ( $B = 0,65$ m, $L = 1,0$ m, $T = 0,3$ m) im oberen (Dammkrone) und unteren (Normalabfluss) Rinnenbereich möglich
Versuchsablauf	- 6 Versuchsreihen - sukzessive Erhöhung des Abflusses - Variation der Abflussdauer	- 5 Versuchsreihen (3 $\times$ Typ I; 2 $\times$ Typ II) - sukzessive Erhöhung des Abflusses - Variation der Abflussdauer	Untersuchungen - unbehandelten Lößlehms und - kalkstabilisierter Proben - 60 min, 90 min und 120 min Überströmungsdauern (jeweils Unterbrechung nach 30 min zur Erosionsquantifizierung)
$v$	2,0 ms <sup>-1</sup> bis 2,5 ms <sup>-1</sup>		$\approx 2,0$ ms <sup>-1</sup>
$q$	- 360 ls <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> im Versuch ( $\approx 1000$ ls <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> in der Natur (Maßstab 1 : 2))	- 350 ls <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> im Versuch	25 ls <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> bis 200 ls <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> unter gleichbleibender $v$ , aber steigender Abflusstiefe

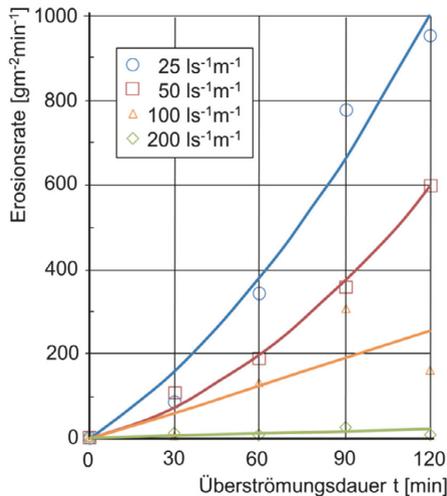


Abbildung 3-13. Erosionsraten [gm<sup>-2</sup>min<sup>-1</sup>] (Ordinate) unbehandelten Lößlehms in Abhängigkeit von spezifischen Durchflüssen  $q$  [ls<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>] über der Zeit  $t$  [min] (Abszisse). Die mittlere Abflussgeschwindigkeit betrug bei allen Versuchen  $v \approx 2 \text{ ms}^{-1}$  bei Abflusstiefen  $h$  von  $h = 1,3 \text{ cm}$  ( $q = 25 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$ ),  $h = 2,7 \text{ cm}$  ( $q = 50 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$ ),  $h = 4,7 \text{ cm}$  ( $q = 100 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$ ) und  $h = 8,7 \text{ cm}$  ( $q = 200 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$ ). Darstellung nach Westrich et al. (2003).

### 3.3.1.6 Dornack (2001)

Im Fokus der Untersuchungen von Dornack (2001) standen ebenfalls überströmbare Dämme sowie großmaßstäbliche Modellversuche in Strömungsrinnen mit Steinschüttungen. Ziel war es, eine Bemessungsgrundlage in Form einer Bemessungsgleichung für Steingrößen in Deckwerken zu entwickeln. Hydraulische Modellversuche sollten zur Klärung folgender Sachverhalte beitragen:

- Zulässige Anzahl von Steinverlusten,
- Bestimmung der kritischen spezifischen Abflüsse,
- Einfluss des Unterbaus auf die Erosionssicherheit des Deckwerks sowie
- Ermittlung der maßgeblichen hydraulischen Belastungsgrößen des Deckwerks.

Die Überströmungsversuche wurden in einer Versuchsrinne an einem überströmbaren Dammmodell durchgeführt (Tabelle 3-7).

Die Bewegung einzelner Steine sowie das Versagen des gesamten Deckwerks wurden während der Versuche beobachtet und die böschungsabwärts gerichtete Kraft, welche zum Abgleiten des Deckwerks führt, mit Kraftmessdosen gemessen.

Tabelle 3-7. Geometrie und Form der Versuchsrinne und des Dammodells sowie Informationen zu den Versuchsabläufen und weitere Besonderheiten der im Rahmen von Dornack (2001) durchgeführten Überströmungsversuche unter Angabe der spezifischen Durchflüsse  $q$ .

Rinne und Dammodell	
Rinnenlänge	8,0 m
Rinnenbreite	0,68 m; 0,80 m und 0,92 m
Rinnenhöhe	1,35 m
Rinnenneigung	waagrecht
Probereinbau	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einbau des Dammodells mittig in die Rinne</li> <li>- Dammkronenhöhe <math>h = 1,0</math> m</li> <li>- Dammkronenbreite <math>B = 1,1</math> m aus Kalksandstein</li> <li>- Dammböschung 1V : 2H aus Sand 02/05 mm</li> <li>- Deckwerk aus Bruchstein (drei Steinsätze mit <math>d_S = 30, 40</math> und <math>50</math> mm)</li> <li>- Filter am Dammfuß aus Bruchstein (Material <math>d_S = 20 \dots 50</math> mm)</li> <li>- Unterbau für das Deckwerk: Splitt 4/8 mm mit und ohne Geotextil (<math>O_{90,W} = 0,12</math> mm, <math>k_V = 5,4 \cdot 10^{-3}</math> ms<sup>-1</sup>, 350 gm<sup>-2</sup>)</li> </ul>
Versuchsablauf	<ul style="list-style-type: none"> <li>- stufenweise Erhöhung der hydraulischen Belastung (<math>\Delta Q = 10</math> ls<sup>-1</sup>), zwischen durch Beharrungsphasen (<math>Q = \text{const.}</math>)</li> <li>- Bestimmung des spezifischen Durchflusses bei Beginn eines Steinverlusts</li> <li>- Ermittlung der Abflussgeschwindigkeiten jeweils in drei Höhenlagen (Steinspitzen, Wasserspiegel und dazwischen) der Abflussquerschnitte</li> </ul>
$q$	22; 44 und 65 ls <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>

### 3.3.1.7 Hanson (1991a) und Hanson und Cook (2004)

Im Zuge der Entwicklung eines mobilen in-situ-Messgerätes<sup>15</sup> zur Bestimmung bodenspezifischer Erosionsraten führten Hanson (1990a) sowie Hanson und Cook (2004) Überströmungsversuche in großen Strömungsrinnen durch (Tabelle 3-8). Ziel der Versuche war es, spezifische Erosionsraten von gewählten Standardböden zur Kalibrierung von in-situ-Messgeräten zu bestimmen.

Tabelle 3-8. Durch Hanson (1990a) sowie Hanson und Cook (2004) verwendete Strömungsrinnen für Überströmungsversuche unter Angabe der mittleren Schleppspannungen  $\tau$  und den spezifischen Durchflüssen  $q$ .

	Hanson (1990a)	Hanson und Cook (2004)
Rinnenlänge	30,5 m	29,0 m
Rinnenbreite	0,91 m	1,8 m
Rinnenneigung	0,5%; 1,5% und 3,0%	3,0%
Probereinbau	- Lagenweiser Einbau der Versuchsböden (8 cm – 13 cm je Lage) und Verdichtung auf ( $\rho_{dr} \approx 1,6$ Mgm <sup>-3</sup> ) mit einer Schafffußwalze	- Lagenweiser Einbau des Versuchsbodens (15 cm je Lage) und Verdichtung ( $\rho_{dr} = 1,85$ Mgm <sup>-3</sup> ) mit einer Vibrationswalze

<sup>15</sup> Vertical submerged water jet device for in situ testing (Hanson 1990b) bzw. dessen Weiterentwicklung in situ jet test apparatus (Hanson und Cook 2004)

	Hanson (1990a)	Hanson und Cook (2004)
Versuchsablauf	- 10 Versuchsreihen mit insgesamt 4 Versuchsböden - bis zu 5 Einzelversuche je Versuchsreihe - 240 min Versuchsdauer je Einzelversuch (2 × 120 min) - stufenweise Erhöhung des Abflusses	- 2 Versuchsreihen (1 × 1089 min bei $q = 395 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$ und 1 × 415 min bei $q = 1606 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$ )
$\tau$	- 1 Pa bis 36 Pa	—
$q$	$\approx 22 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$ bis $\approx 352 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$	$\approx 395 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$ und $1606 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$

Bei Hanson (1990a) wurde die Bodenoberflächenhöhe, die Fließgeschwindigkeit und die Abflusstiefe an acht Messpunkten mit einem Abstand von jeweils 2,4 m entlang der Rinnenachse ab 6,1 m hinter dem Wassereinlassbereich bestimmt. Die Fließgeschwindigkeit und die Höhe der Bodenoberfläche wurden durch Hanson und Cook (2004) entlang der Rinnenachse in einem 6 m langen Messbereich ermittelt. Ohne Angabe der Messpunktanzahl wurde so eine mittlere Erosionstiefe bestimmt. Ergebnisse der Bodenabtragsmessungen wurden in beiden Publikationen einerseits als Höhen der Bodenoberfläche im Verhältnis zu einem festen Bezugspunkt und andererseits als Erosionsrate  $\varepsilon_r$  in Volumen abgetragenen Bodens je Zeit und je Fläche [ $\text{cm}^3\text{h}^{-1}\text{cm}^{-2}$ ] angegeben.

### 3.3.1.8 Zanke et al. (2009) und Steuernagel (2008)

Zanke et al. (2009) führten Überströmungsversuche über breiten Deichkronenbereichen auf einem 60 m langen Forschungsdeich durch. Die Vorplanung für die Versuche wurde bereits durch Steuernagel (2008) beschrieben. Auf zwei maximal 20 m breiten Überströmungsbereichen wurde jeweils ein Deckwerk als Kombination aus Geogitter, Vliesstoff und Erosionsschutzmatte installiert und mit Bodennägeln fixiert. Die Instrumentierung beschränkte sich zunächst auf Wasserstandspegel. In zwei fünfminütigen Versuchsintervallen wurden Abflusshöhen von  $h = 15 \text{ cm}$  bzw.  $h = 10 \text{ cm}$  erreicht. Erosion und Schadensausprägungen wurden vor allem visuell erfasst und beschrieben. An einem Deichböschungsquerschnitt wurde ein Soll-Ist-Lagevergleich vorgenommen, mit dem Erosionsschäden durch die Aufnahme von Messpunkten nach den Überströmungsversuchen grafisch dargestellt wurden (Abbildung 3-14).

Im Ergebnis wurde festgestellt, dass trotz installierten Deckwerks größere Kolke und Rinnen entstanden und erhebliche Bodenmengen bis zu einer Tiefe von  $t = 60 \text{ cm}$  über den gesamten Untersuchungsbereich abgetragen wurden.

### 3.3.2 Kombinierte Überströmungs- und Wellenüberlaufversuche

Übersteigt der Ruhewasserspiegel (RWS) die Deichkrone, führt zusätzlicher See-gang zu einer Kombination aus Überströmung und Wellenüberlauf. Hierbei wirkt neben der Belastung des kontinuierlichen Abflusses eine diskontinuierliche

Beanspruchung durch Wellen auf die Deichbinnenböschung. So wurden von Pan et al. (2013) kombinierte Überströmungs- und Wellenüberlaufversuche durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, die hydraulischen Parameter und die Erosionseigenschaften einer geosynthetisch stabilisierten Deichbinnenböschung unter kombinierter Überströmungs- und Wellenüberlaufbelastung in einem großmaßstäblichen Laborversuch zu untersuchen und darüber hinaus die Erosionsschutzfähigkeit des verwendeten Erosionsschutzproduktes (*high-performance turf reinforcement mat*, HPTRM) zu bestimmen. Für die Versuche wurde ein Deichmodell im Maßstab 1 : 1 in einen Wellenkanal eingebaut (Tabelle 3-9).

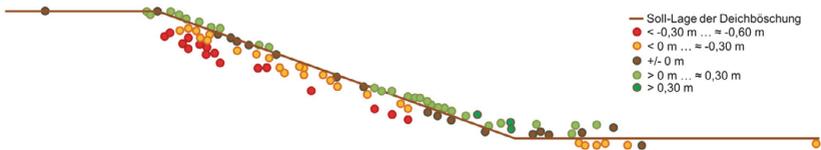


Abbildung 3-14. Soll-Ist-Lage einer Messpunktauswahl zur Darstellung von Erosionsschäden nach den RIMAX-Überströmungsversuchen. Darstellung nach Zanke et al. (2009).

Tabelle 3-9. Geometrie und Form des Wellenkanals und des Deichmodells, Versuchsablauf der im Rahmen von Pan et al. (2013) durchgeführten kombinierten Überströmungs- und Wellenüberlaufversuche.

	Wellenkanal und Deichmodell
Kanallänge	104 m (342 ft)
Kanalbreite	3,658 m (12 ft)
Kanaltiefe	4,572 m (15 ft)
Kanalneigung	waagrecht
Deichmodell	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einbau des Deichmodells 44,28 m hinter der Wellenmaschine</li> <li>- Deichkronenhöhe <math>h = 3,25</math> m</li> <li>- Deichkronenbreite <math>B = 2,57</math> m</li> <li>- Wasserseitige Böschung 1 : 4,25</li> <li>- Landseitige Böschung 1 : 3</li> <li>- Landseitige Böschungsoberfläche wurde in einem Stahlträger vorbereitet und nachträglich in das Deichmodell eingebaut (verdichteter Tonboden, HPTRM, Grassaat, 6-monatige Vegetationsperiode)</li> <li>- Fließgeschwindigkeitsmessung entlang der Kanalachse mit <i>Acoustic Doppler velocimeters</i> (ADV) an 2 Stellen auf der Deichkrone und an 2 Stellen auf der landseitigen Böschung</li> <li>- Messung der Abflusstiefe entlang der Kanalachse mit Ultraschallsensoren an einer Stelle auf der Krone und an 3 Stellen auf der landseitigen Böschung</li> </ul>
Versuchsablauf	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 9 Testreihen mit variierenden Abflüssen, signifikanten Wellenhöhen und Wellenperioden</li> <li>- Während der Versuche Messung von Abflusstiefe und -geschwindigkeit</li> <li>- Vor, zwischen und nach den Einzelversuchen Ermittlung der Bodenerosion an insgesamt 64 festen Messstellen auf Krone und Böschung</li> </ul>

Auf Krone und Böschung wurden in Strömungsrichtung 16 Testabschnitte mit einem Abstand von jeweils 0,6 m festgelegt. Auf jedem Testabschnitt lagen vier Messpunkte quer zur Strömungsrichtung zur Ermittlung der Bodenoberflächenhöhe. Für die Bewertung der Erosion wurden Mittelwerte an definierten Punkten auf Krone und Böschung herangezogen (Festpunkte): Zweimal acht Messpunkte auf der Krone (P1, P2) und dreimal acht Messpunkte auf der Böschung (P3–P4, Abbildung 3-15). Die beiden untersten Testabschnitte waren auch zwischen den Einzelversuchen dauerhaft wassergesättigt, wodurch ein erhöhter Bodenabtrag ermittelt wurde. Die Messpunkte im oberen Böschungsbereich und auf der Krone zeigten nach der vierten Testreihe keine weiteren Änderungen der Bodenoberflächenhöhe (Abbildung 3-16).

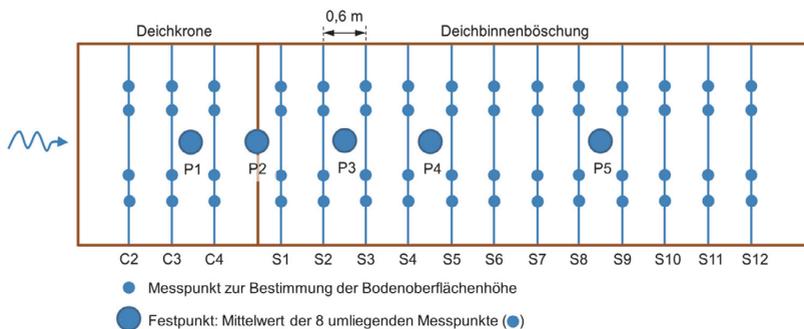


Abbildung 3-15. Grundriss der Deichkrone und -binnenböschung einschließlich der Messpunkte für Bodenerosion der Versuche von Pan et al. (2013). Darstellung nach Pan et al. (2013).

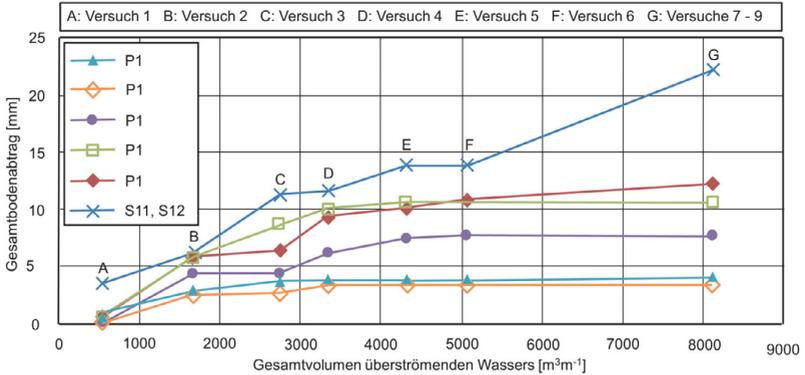


Abbildung 3-16. Mittlerer Gesamtbodenabtrag je Festpunkt und je Einzelversuch der Überströmungsversuche von Pan et al. (2013). Abszisse: Kumuliertes Gesamtvolumen überströmenden Wassers [m³m⁻¹]; Ordinate: Mittlerer Gesamtbodenabtrag [mm]. Darstellung nach Pan et al. (2013).

Die Ergebnisse zeigen, dass

- durch die HPTRM die Fließgeschwindigkeit signifikant reduziert wird,
- die HPTRM nach allen Testreihen keine Defekte aufweisen,
- der Boden über der HPTRM nahezu vollständig erodiert wurde,
- Erosion in den oberen Böschungsbereichen nur bis zum sechsten Versuchsdurchgang festgestellt werden konnte, aber darüber hinaus
- Erosion am Deichfuß bis zu den letzten Versuchen kontinuierlich ermittelt werden konnte.

### 3.3.3 Wellenüberlaufversuche

Im Unterschied zu einer kontinuierlichen Deichüberströmung kann bei einer periodischen Überströmung (Wellenüberlauf) der Hochwasserstand unter der Kronenhöhe des Deichbauwerks liegen. Ist die Freibordhöhe  $R_c$  eines Deiches zu gering, kann es aufgrund von Seegang zum Wellenüberlauf kommen. Dieser ist in tolerierbaren Mengen bei der Bemessung zuzulassen (EAK 2020). Die bodenmechanischen Prozesse wurden bereits in Abschnitt 3.1.3 beschrieben ( $k_f < v_{za}$ ). Zur Bemessung eines Deichbauwerks hinsichtlich Wellenüberlauf sind Kenntnisse zu den Überlaufmengen  $V$  [m³m⁻¹] als Produkt der mittleren Überlauftrate  $q$  [m³s⁻¹m⁻¹] und der Zeitdauer eines Sturmereignisses  $t_s$  [s] notwendig:

$$V = q \cdot t_s = \sum_{i=1}^N V_i(H_i, T_i) \quad (3-21)$$



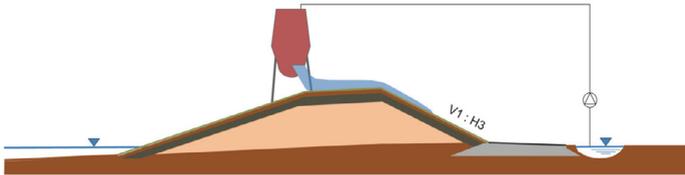


Abbildung 3-18. Prinzip des Wellenüberlaufsimulators nach Van der Meer et al. (2007).



Abbildung 3-19: Wellüberlaufsimulator während eines Versuchs, bei dem  $14 \text{ m}^3$  Wasser innerhalb weniger Sekunden über die Deichböschung geleitet werden (Foto: Van der Meer et al. (2007))

Ein 4 m breiter und  $14 \text{ m}^3$  großer Versuchsbehälter wird kontinuierlich mit Wasser gefüllt. Wellenüberlaufzeiten von bis zu  $q = 75 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$  auf der Deichbinnenböschung können simuliert werden. Der Untersuchungsfokus liegt vor allem auf der Beobachtung potenzieller Oberflächenerosion grasbewachsener Deckschichten mit und ohne künstliche Schad- und Störstellen. U.a. geben Van der Meer et al. (2006), Van der Meer et al. (2013b) oder Hai et al. (2014) Informationen zur Entwicklung, Kalibrierung und weiteren Daten zum Wellenüberlaufsimulator und zu Versuchen, welche auf begrüntem und unbegrüntem, nicht eingestauten Deichen durchgeführt wurden. Aufbauend auf den Entwicklungen von Van der Meer entwickelten Thornten et al. (2012) einen Wellenüberlaufsimulator an einem Versuchsstand (vgl. Van der Meer et al. 2013b). Bei allen Versuchen werden Erosionsausprägungen vor allem beschrieben. Systematische Messungen von Bodenabtrag oder Kolk-tiefen entlang der Böschung wurden nicht vorgenommen. Vavrina (2010) fasst die Ergebnisse verschiedener Wellensimulatorversuchsreihen zusammen.

Piontkowitz et al. (2009) führten Wellenauflauf- und Wellenüberlaufversuche an einem Modelldeich in einem großen Wellenkanal durch. Dazu wurde ein Deichmodell nahezu im Originalmaßstab errichtet: Auf einem Sandkern wurde eine 0,6m dicke Tondichtung eingebaut und darauf aus einem Originaldeich entnommene Grassoden installiert. Diese waren jeweils etwa 20 cm dick, 2,35 m breit, 1,25 m lang und wogen durchschnittlich 1.100 kg. Insgesamt wurde eine 190 m<sup>2</sup> große Deichdeckschicht realisiert. Für die Versuche wurden Wellenüberlauf-raten von bis zu  $q = 30 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$  eingestellt. Erosionsbeobachtungen fanden sowohl auf der wasserseitigen Böschung als auch auf der landseitigen Böschung statt. Letztere wies nach den Versuchen kaum bzw. keine Schäden auf. Auf der Außenböschung hingegen wurde einige Schäden durch Wellenauflauf und -ablauf festgestellt, vermessen und beschrieben. Systematische Messungen auf den Böschungsoberflächen fanden nicht statt.

Auch u.a. auf Grundlage einiger zuvor beschriebener Wellenüberlaufversuche werden in den einschlägigen Regelwerken oder Empfehlungen Informationen zum Einfluss von Wellenüberläufen auf Deichbinneböschungen gegeben. So wird in der EurOtop (2007) im Hinblick auf spezifische Abflüsse als mittlere Wellenüberlauf-raten auf Deichbinnenböschungen angegeben, dass

- bei  $q = 0,1 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$  keine Schäden auf ungesicherten,
- bei  $q = 1\text{--}10 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$  keine Schäden auf grasbewachsenen und
- bei  $q = 50\text{--}200 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$  keine Schäden auf gut geschützten Deichbinnenböschungen entstehen.

Auch in der EAK 2020 werden Anhaltswerte für mittlere Wellenüberlauf-raten auf Graseichen als Schätzungen angegeben:

- Bei  $q = 0,1 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$  meist keine Schäden;
- bei  $q = 1\text{--}10 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$  erste Schäden und
- bei  $q > 10 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$  Schäden.

### 3.4 Fazit

Überströmungsinduzierte Erosion auf Deichbinnenböschungen ist direkt von den messbaren hydraulischen Strömungsgrößen Abfluss  $Q$  bzw.  $q$ , Fließgeschwindigkeit  $v$  und der Abflusstiefe  $h$  sowie der sich daraus ergebenden Schleppspannung  $\tau$  abhängig. Weitere Eigenschaften wie Laminarität und Turbulenz oder der Strömungszustand wirken sich ebenfalls auf die Erosivität einer Strömung aus. Die Zusammenstellung verschiedener Forschungs- und Standardisierungsvorhaben bezüglich Überströmungsversuche zeigt, dass je nach Bedarf auf eigens entwickelte Methoden zur Bestimmung der Erosionsstabilität von Böschungsoberflächen zurückgegriffen wird. Jede vorgestellte Überströmungs-

versuchsreihe ermittelt Erosion mit eigenen Methoden, sowohl in Qualität als auch in Quantität der Messungen. Die US-amerikanische ASTM D6460 beschreibt als einziges ein standardisiertes Verfahren zur Ermittlung kritischer Strömungsparameter für geosynthetische Erosionsschutzprodukte, lässt aber dem Anwender z.B. in der Wahl der Methode zur Ermittlung von Erosion hinreichend viel Spielraum und ist grundsätzlich auch für ungeschützte Böschungen jeglicher Erdbauwerke anwendbar. Auch die beschriebenen Wellenüberlaufsversuchsreihen haben jeweils eigene Ansätze zur Beurteilung von Erosion. In erster Linie werden erosive Prozesse bzw. die Folgen von Überströmungsereignissen auf Deichböschungen beschrieben. Letztendlich lassen sich auch hier die Vorgehensweisen nur auf die jeweilige Versuchsreihe bzw. die jeweiligen Autoren beziehen. Ein weiterer Nachteil der meisten vorgestellten Versuche ist, dass Überströmungen oder Wellenüberlaufversuche an nicht eingestauten Deichen, Dämmen oder Böschungen durchgeführt wurden und somit weniger den realen Bedingungen eines Extremwetter- oder Hochwasserereignisses entsprechen.

In diesem Kapitel wird vor allem dargestellt, dass

- durch Modellierung im Labor oder in groß- bzw. originalmaßstäblichen Feldversuchen Rückschlüsse auf die Erosionsstabilitäten bzw. mögliche Erosionsraten von Bodenmaterialien für Deichbinnenböschungen gezogen werden können;
- die hydraulischen Strömungsgrößen Abfluss  $Q$  bzw.  $q$ , Fließgeschwindigkeit  $v$ , und Schubspannung  $\tau$  große Relevanz für die Beschreibung erosiver Prozesse auf Böschungen besitzen und
- der Bodenabtrag in Abhängigkeit dieser Strömungsgrößen dargestellt wird;
- die Einwirkungsdauer  $t$  eine wesentliche Rolle spielt;
- es kein einheitliches und systematisches Messverfahren für Erosion auf Deichbinnenböschungen gibt und
- verschiedene Darstellungsformen zur Ergebnisbeschreibung nach erosiven Ereignissen vorgeschlagen werden.

Die vorliegende Arbeit leistet auf Grundlage der ASTM D6460 und unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Versuchsreihen einen Beitrag zur Beschreibung eines Verfahrens zur Bestimmung der Stabilität gegen Erosion von Deichbinnenböschungen. Dabei soll der Fokus auch auf Ermittlung und Beschreibung von Erosion sowie auf Möglichkeiten der Aus- und Bewertung liegen.

---

## 4. Hydraulische Untersuchungen

An der Professur Geotechnik und Küstenwasserbau wird im Rahmen von Forschungsprojekten und studentischen Abschlussarbeiten an den Themen Erosion und Erosionsschutz gearbeitet. Diverse Arbeiten befassten sich mit der Entwicklung und Anwendung von Regensimulatoren (Irrgang 2008; Knubbe 2011; Markiwitz 2022) sowie der Vorbereitung und Durchführung von Überströmungsversuchen (Olschewski 2010; Lesch 2012; Schubert 2014). Auch erste Ansätze zur Bemessung von geosynthetischen Erosionsschutzprodukten wurden erarbeitet (Cantré et al. 2012; Olschewski et al. 2012, 2013). Mit der Untersuchung von Böschungsstabilitäten konnte im Rahmen des Interreg-Projektes DredgDikes (Saathoff et al. 2015) die Forschung zur Erosion an der Professur fortgeführt werden. Dieses Kapitel widmet sich vor allem den Feldversuchen, welche zur Beurteilung überströmungsinduzierter Erosion auf Deichbinnenböschungen durchgeführt wurden.

### 4.1 Das Projekt DredgDikes<sup>16</sup>

Im Rahmen des durch das *South Baltic Programme* geförderten Interreg-Projektes DredgDikes (*Dredged Materials in Dike Construction*<sup>17</sup>) wurde in den Jahren 2011 bis 2015 durch fünf Projektpartner aus Deutschland und Polen die Eignung von feinkörnigem Baggergut für die Verwendung im Deichbau untersucht. Die drei Hauptziele des Projektes waren

- Untersuchungen zur möglichen Verwertung von feinkörnigem Baggergut als alternativer Baustoff für Deichdeckschichten und homogene Deiche,
- Untersuchungen zur Verwendung von Gemischen aus Aschen und Sand (Baggergut) für Deichdeckschichten und Deichkerne sowie
- Untersuchungen zum Einsatz von Geokunststoffen (Geogitter, Erosionsschutzmatten (GMA) und Dränmatten) zur Funktionsverbesserung verschiedener Deichquerschnittselemente und zur Minimierung von Kosten und Umweltauswirkungen.

Zur Bearbeitung der Fragestellungen wurden in Mecklenburg-Vorpommern und nahe Danzig insgesamt drei großmaßstäbliche Deiche, davon zwei Forschungsdeiche und ein Pilotdeich, errichtet. Das Untersuchungsprogramm an den Forschungsdeichen umfasste vor allem Untersuchungen

- der Einbaumöglichkeiten,
- der Standsicherheit und der Verformungen,

---

<sup>16</sup> Überwiegend aus Saathoff et al. 2015

<sup>17</sup> Vollständiger deutscher Titel: Baggergut im Deichbau – Einsatz in der südlichen Ostseeregion unter Nutzung von Geokunststoffen und Bodenverbesserungstechnologien – [www.dredgdikes.eu](http://www.dredgdikes.eu)

- der Vegetation,
- der Schrumpfrissbildung, der Wasserinfiltration und des Sickerwassers sowie
- der Erosionssicherheit.

Maßgebliche Erkenntnisse des Interreg-Projektes wurden in einem *Handbuch für die Ostseeregion zur Anwendung von Nassbaggertgut, Aschen und Geokunststoffen im Deichbau* zusammengestellt und veröffentlicht (Saathoff et al. 2015).

#### 4.1.1 Laborströmungsrinne

Im Vorfeld zu den großmaßstäblichen Feldversuchen wurden Untersuchungen im Labor durchgeführt. U.a. kam eine Laborströmungsrinne zum Einsatz. Hauptaugenmerk bezüglich Erosionssicherheit lag, neben der Vorauswahl der für die großmaßstäblichen Versuchsdeiche zu verwendenden Baggertgutmaterialien, einerseits auf der Untersuchung verschiedener Methoden zur Ermittlung von Bodenabtrag und andererseits auf der Ermittlung möglicher Versuchsabläufe für großmaßstäbliche Feldversuche. Der Vollständigkeit halber soll hier der Versuchsaufbau und das Versuchsprogramm beschrieben werden.

##### 4.1.1.1 Versuchsaufbau und Messtechnik

Im Rahmen einer Masterarbeit führte Lesch (2012) Überströmungsversuche an begrüntem und unbegrüntem Proben verschiedener Baggertgutchargen in einer eigens dafür konstruierten Laborströmungsrinne durch (Abbildung 4-1). Ziel seiner Untersuchungen war es, die Erosionsstabilität der Materialien vor dem Einbau in den Rostocker Forschungsdeich abzuschätzen.

Die verwendete Strömungsrinne hat eine Länge von 2,75 m und ist ca. 0,25 m breit. Die Rinnenneigung ist variabel und wurde für die Versuche auf 1 : 3 eingestellt. Der maximal einstellbare Durchfluss ist abhängig von der Pumpenleistung und erreichte bei den Versuchen von Lesch (2012) sowie bei den Versuchen im Rahmen dieser Arbeit  $Q = 105 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

Vor und nach jedem Versuch wurde der Probenoberflächenzustand festgehalten. Zur Ermittlung der Erosion wurden mehrere Verfahren angewendet:

- Beschreibung des Probenoberflächenzustandes (schriftliche und fotografische Dokumentation),
- Laserscan der Probenoberfläche vor dem ersten Versuch, zwischen zwei aufeinanderfolgenden Versuchen und nach dem letzten Versuch und
- Einteilung der Rinne der Länge nach in zehn Testabschnitte à 0,27 m × 0,25 m, in denen jeweils der Bodenabtrag als Differenz zwischen zwei Einzelversuchen mit einem Spitzentaster gemessen wird (vgl. Abschnitt 4.2.3).

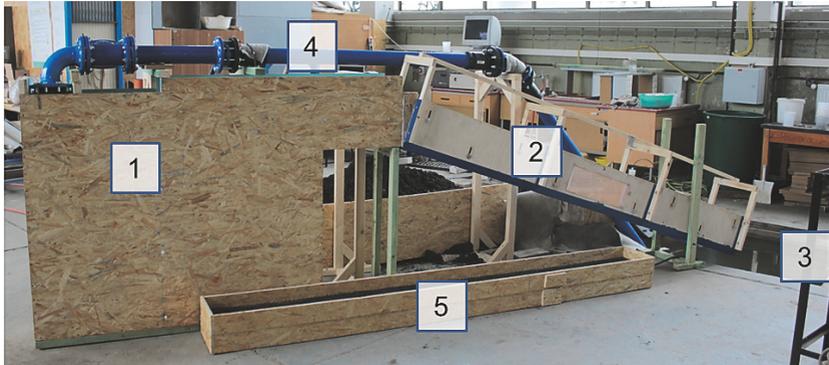


Abbildung 4-1. Laborströmungsrinne nach Lesch (2012): 1) Wasserreservoir mit Strömungsberuhigung → 2) Rinne mit Acrylglasfenster → 3) Pumpensumpf mit Pumpe → 4) Rohrleitung (DN 80) → 1) Wasserreservoir mit Strömungsberuhigung. 5) Behälter für Probenvorbereitung.

Die Strömungsparameter Fließgeschwindigkeit  $v$  und Abflusstiefe  $h$  wurden während der Versuche mit einem stationären magnetisch-induktiven Durchflussmesser und einem Ultraschallsensor (vgl. Tabelle 4-8), mit einem Strömungsmessflügel und mit einer Messskale an einem Acrylglasfenster an der Rinnenwand ermittelt.

#### 4.1.1.2 Versuchsprogramm

Von Mai 2012 bis November 2013 wurden 28 Versuchsreihen mit insgesamt 127 Einzelversuchen durchgeführt. Die Einzelversuche jeder Versuchsreihe fanden nacheinander mit jeweils steigenden Durchflüssen statt. Der Durchfluss und die Überströmungsdauer richteten sich nach dem Zustand der verwendeten Probe: Geringer Durchfluss und wenige Minuten bei unbegrünten Proben (Tabelle 4-1), vergleichsweise höherer Durchfluss und längere Dauer bei begrünten Proben.

Tabelle 4-1. Versuchsprogramm in der Laborströmungsrinne – unbegrünte Proben

Probe	Anzahl Versuche	$\bar{\theta} q$ [ $l s^{-1} m^{-1}$ ]	$\bar{\theta} v$ [ $ms^{-1}$ ]	$\bar{\theta} h$ [m]	$\bar{\theta} \tau$ [Pa]	$Fr^{-1}$ [-]	$Re^{-2}$ [-]
Minimalwerte	64	0,3	- (3)	- (3)	- (3)	- (3)	- (3)
Maximalwerte		26	1,4	0,024	80	2,89	19932

<sup>1</sup> $Fr < 1$ : Strömen; $Fr > 1$ : Schießen
<sup>2</sup> $Re \leq 2320$ : laminar; $Re > 2320$ : turbulent
<sup>3</sup> nicht messbar oder berechenbar

Tabelle 4-2. Versuchsprogramm in der Laborströmungsrinne – begrünte Proben

Probe	Anzahl Versuche	$\varnothing q$ [l·s <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> ]	$\varnothing v$ [ms <sup>-1</sup> ]	$\varnothing h$ [m]	$\varnothing \tau$ [Pa]	$Fr^1$ [-]	$Re^2$ [-]
Minimalwerte	63	0,65	0,07	0,01	32,7	0,22	392
Maximalwerte		106	2,8	0,06	200	3,65	83804

<sup>1</sup>  $Fr < 1$ : Strömen;  $Fr > 1$ : Schießen  
<sup>2</sup>  $Re \leq 2320$ : laminar;  $Re > 2320$ : turbulent

#### 4.1.2 Forschungsdeich in Rostock

Der in Rostock-Markgrafenheide auf dem Spülfeldkomplex Radelsee der Hansestadt Rostock errichtete Forschungsdeich besteht aus zwei parallel zueinander verlaufenden Einzeldeichen. Die Gesamtlänge beider Deiche beträgt jeweils 125 m, die Breite über beide Deiche 45 m und die Höhe 3,30 m. Vier Erd-dämme verbinden beide Einzeldeiche miteinander, womit drei Polder entstehen. Der Forschungsdeich setzt sich aus insgesamt zehn verschiedenen Querschnitten zusammen, von denen die meisten zweifach vorkommen – jeweils auf dem westlichen und östlichen Einzeldeich (Abbildung 4-2). Um zu verhindern, dass sich Sickerwasser zwischen den Querschnitten ausbreitet, sind diese durch mineralische Dichtungen voneinander getrennt. Als hydraulische Randbedingung ist unterhalb des Versuchsdeichs eine geosynthetische Tondichtungsbahn installiert. Dies gewährleistet den Wasserablauf ausschließlich durch den Deichkörper bzw. über die Deichoberfläche.

Im Forschungsdeich wurden insgesamt drei verschiedene Deichquerschnittstypen realisiert: Die Teiledeiche östlich und westlich von Polder 1 bestehen aus einem Sandkern und einer darüber liegenden Deckschicht aus feinkörnigem Baggergut. Die Dicke der Deckschichten betragen wasserseitig 1,50 m und landseitig 1,00 m. Die Böschungen beider Teiledeiche betragen jeweils 1:2. Die Teiledeiche um Polder 2 bestehen ebenfalls aus einem Sandkern mit einer Deckschicht aus feinkörnigem Baggergut von 1,00 m Dicke. Die Böschungsneigungen beider Teiledeiche betragen land- und wasserseitig 1:3. Beide homogenen Teiledeiche des nördlichen Polders 3 bestehen aus Baggergut mit einem höheren Sandanteil. Die Böschungsneigungen betragen beidseitig 1:2.



Abbildung 4-2. Versuchsdeich in Rostock: Polder 1 mit den Querschnitten A, B und C; Polder 2 mit den Querschnitten D, E, F und G und Polder 3 mit Querschnitt H. Gesamtlänge 125 m, Gesamtbreite über beide Deiche 45 m, Höhe 3,30 m. 3-D Fotomodell, Darstellung nach Cantré et al. 2014.

Um den Widerstand der begrünten Deichbinnenböschungen gegen Erosion zu erhöhen, wurden an drei Querschnitten Geomatten (Colbond Enkamat®) landseitig auf den Böschungsoberflächen installiert und vor der Begrünung mit 2–3 cm Baggergut bedeckt. Neben der Erosionsstabilität der Deichbinnenböschungen lag ein weiterer Fokus der Untersuchungen am Forschungsdeich auf der Rissbildung der Deichdeckschicht. Es wurde angenommen, dass sich Schrumpfrisse in der Deckschicht bis an den Sandkern heran entwickeln können. Um dieser Rissbildung entgegenzuwirken, wurden in zwei verschiedenen Querschnitten oberflächenparallele Geogitter (Huesker Fortrac 3D®) installiert. Im homogenen Querschnitt H wurden Dränmatten (Colbond Enkadrain®) im Bereich des Deichfußes eingebaut. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass mögliche Sickerlinien abgesenkt werden und das Sickerwasser im Bereich des Deichfußes aus der Böschung austritt. Abbildung 4-3 zeigt eine Zusammenstellung aller im Versuchsdeich verwendeten Geokunststoffe. Tabelle 4-3 enthält eine Zusammenstellung aller Querschnitte und verwendeter Baumaterialien.

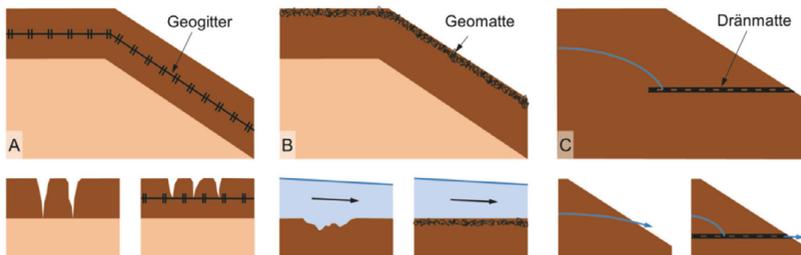


Abbildung 4-3. Im Rostocker Forschungsdeich verwendete Geokunststoffe: A) Geogitter zur Rissreduzierung; B) Geomatte zur Reduzierung von Erosion; C) Dränmatte am Deichfuß. Darstellung nach Saathoff et al. 2015.

Tabelle 4-3. Rostocker Forschungsdeich. Polder, Querschnitte und verwendete Materialien (M1, M2 und M3) sowie die Angabe des jeweiligen Teildeiches (O  $\triangle$  Ostseite, W  $\triangle$  Westseite) (Saathoff et al. 2015).

Polder	1			2				3
	A	B	C	D	E	F	G	H
Querschnitt	M1	M2	M2	M2	M2	M1	M1	M3
Erosionsschutzmatte	—	—	O, W	—	W	W	—	—
Geogitter	—	—	—	—	O	O	—	—
Drainmatte	W	W	W	W	W	W	W	O, W
Böschungsneigung	1:2	1:2	1:2	1:3	1:3	1:3	1:3	1:2

Tabelle 4-4. Zusammenstellung ausgewählter Bodenparameter der im Rostocker Forschungsdeich verwendeten Baggergutmaterialien (M1, M2 und M3), bestimmt an 2013 aus dem Deich entnommener Proben (Saathoff et al. 2015).

Material	M1	M2	M3
<i>Kornzusammensetzung</i>	(DIN 18123)	(ISO 11277)	(ISO 11277)
Sand [%]	40	58 - 74	79
Schluff (< 0,063 mm) [%]	55	16 - 26	11
Ton (< 0,002 mm) [%]	6	10 - 16	9
Porosität $n$ [-] <sup>1</sup>	0,65 - 0,66	0,62 - 0,66	0,58
Porenzahl $e$ [-] <sup>1</sup>	1,83 - 1,98	1,62 - 1,94	1,38
<i>Atterberggrenzen</i>			
Fließgrenze [%]	88,8	68,1	49
Ausrollgrenze [%]	48,8	37,4	38,9
Plastizitätsindex [%]	40	30,7	10,1
Zustand	plastisch	plastisch	plastisch
<i>Scherparameter</i> <sup>1</sup>			
Winkel der inneren Reibung [°]	28 - 30	28 - 31	30
Kohäsion [kNm <sup>-2</sup> ]	35 - 47	13 - 19	59
Organikanteil [%] <sup>1</sup>	10 - 11	9 - 10	6
Kalkgehalt [%] <sup>1</sup>	9 - 10	8	10

<sup>1</sup> Versuche an in 2011 vom Spülfeld Radelsee entnommenen Proben

#### 4.1.3 Forschungsdeich in Danzig

Der polnische Forschungsdeich wurde 20 km östlich von Danzig am Ufer der Toten Weichsel errichtet. Die Gesamtlänge des Deiches beträgt 24 m bei einer Deichkronenhöhe und -breite von jeweils 3,00 m. Die Böschungsneigungen des Deiches betragen sowohl land- als auch wasserseitig 1:2. Für Durchsickerungs- und Überströmungsversuche wurde in der Mitte des Forschungsdeiches ein 4 m breiter Bereich mit Spundwänden vom Gesamtdaichkörper abgegrenzt (Abbildung 4-4). Die hydraulische Randbedingung unterhalb des Forschungsdeiches ist durch eine 0,5 m dicke mineralische Tondichtung gegeben.

Der Forschungsdeich wurde aus verschiedenen Materialien errichtet (Tabelle 4-5). Der Deichkern besteht aus einer Mischung aus (Boden-) Asche (*bottom ash*) und Sand (Baggergut). Für die Deichdeckschicht wurde auf der wasserseitigen Böschung bis zur Mitte der Deichkrone eine 0,5 m dicke Tondichtung geplant. Auf der landseitigen Böschung wurde ein Gemisch aus Tefra® (eine spezielle Flüssig-

bzw. Flugaschenmischung) und Sand (Baggergut) in einer 0,3 m mächtigen Schicht vorgesehen, bedeckt von einer Lage Rollrasen. Geokunststoffe wurden im polnischen Versuchsdeich nicht verwendet. Abbildung 4-5 zeigt den ursprünglich geplanten Aufbau des Forschungsdeiches im Querschnitt. Während der Versuche wurde jedoch festgestellt, dass die wasserseitige Deichdeckschicht über die Deichkrone bis auf die landseitige Böschung reicht – insgesamt auf einem Drittel der Gesamtböschungslänge.



Abbildung 4-4. Versuchsdeich in Danzig.

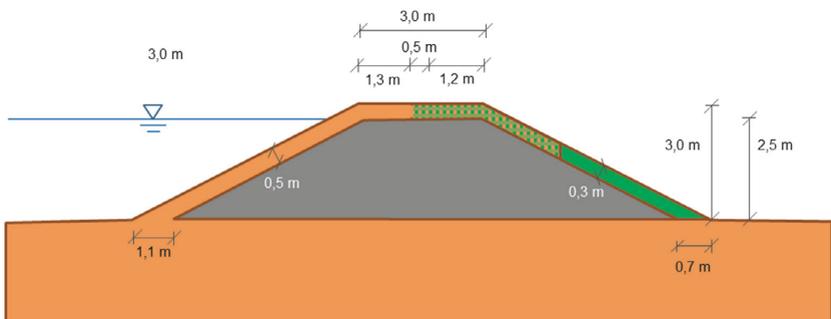


Abbildung 4-5. Ursprünglicher geplante Version des Versuchsdeiches Danzig: Wasserseitige Böschung mit Tonmaterial (hellbraun), landseitige Böschung mit Sand/ Flugaschenmischung (grün), Tondichtung, die über die Krone auf die landseitige Böschung reicht (hellbraun-grün).

Tabelle 4-5. Zusammenstellung ausgewählter Bodenparameter der im Danziger Forschungsdeich verwendeten Materialien (Ton, Asche-Schluff- und Asche-Sandgemisch) (Saathoff et al. 2015).

Material	Wasserseitige Dichtung Ton	Landseitige Dichtung Asche-Schluff-Gemisch	Deichkerngemisch	
			Bettasche	Sand
Mittlerer Korndurchmesser $d_{50}$ [mm]	—	—	0,2	0,4
Porosität $n$ [-]	0,44	0,39	0,41	
Porenzahl $e$ [-]	0,79	0,64	0,69	
Scherparameter				
Winkel der inneren Reibung [°]	25	20	37	
Kohäsion [kNm <sup>-2</sup> ]	30	50	5	

## 4.2 Großmaßstäbliche Überströmungsversuche

### 4.2.1 Versuchsaufbau

Bei der Wahl des Verfahrens zur Ermittlung der Beständigkeit gegen Erosion wurde sich an den NTPEP-Versuchsreihen (NTPEP 2015) und am US-amerikanischen Standard ASTM D-6460 (2012) orientiert. Grundlage für die Auswahl des ASTM-Verfahrens war die Bereitstellung potentiell vergleichbarer Daten zur Beschreibung der Erhöhung des Erosionswiderstandes aufgrund der Verwendung von Erosionsschutzprodukten durch NTPEP.

Jeder Versuchsreihe war gemein, dass auf jedem untersuchten Querschnitt drei (Rostock) bzw. zwei (Danzig) parallele Rinnen errichtet wurden. Dies ermöglichte – abhängig vom gewählten Zielabfluss und der Pumpenleistung – die Durchführung mehrerer gleichzeitig stattfindender Überströmungsversuche auf demselben Querschnitt.

#### 4.2.1.1 Versuchsaufbau in Rostock

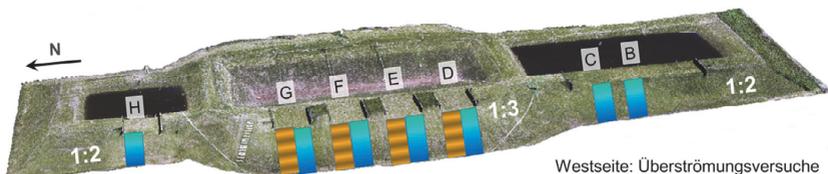


Abbildung 4-6. Überströmungsstrecken auf dem Rostocker Forschungsdeich im September 2013 (blau) und im Mai 2014 (orange-gestreift).

In Rostock wurden im September 2013 und im Mai 2014 auf dem westlichen Forschungsdeich Überströmungsversuche durchgeführt. In den Bereichen der Überströmungsstrecken wurde jeweils die Deichkrone etwa 0,6 m abgesenkt. Je Querschnitt und Versuchsreihe wurden drei parallele Rinnen auf einer Überströmungsstrecke errichtet (Abbildung 4-6). Jede Rinne besteht aus Einzelwandelementen, wobei sich die mittlere Rinne die Wandungen mit der jeweils äußeren Rinne teilt. Die Wandelemente bestehen aus einer verschraubten Holzbalkenkonstruktion. Die glatten Seiten aus Siebdruckplatten bilden jeweils die Rinneninnenseite. An der Unterseite jedes Wandelements sind L-Stahlprofile befestigt. Diese können im Voraus in mit einem Trennschleifer hergestellte Schlitze auf der Deichböschung eingelassen werden. Stabilität erhalten die einzelnen Wandelemente durch das Anbringen von Querlatten über alle drei Rinnen. Darüber hinaus wurden die Rinnenelemente mit Brunnenschaum auf der Böschungsoberfläche verklebt, um eine oberflächliche Dichtung zwischen den einzelnen Rinnen herzustellen. Abbildung 4-7 zeigt den Standardaufbau aller Überströmungsversuche in Rostock, Tabelle 4-6 fasst die Parameter der Rinnen auf den einzelnen Deichquerschnitten zusammen.



Abbildung 4-7. Standardaufbau der Rinnen für die Überströmungsversuche auf dem Rostocker Forschungsdeich: Drei parallele Rinnen, die Querlatten dienen sowohl als Fixierung als auch als Markierung für verschiedene Messungen.

Tabelle 4-6. Zusammengefasste Parameter aller Rinnen auf den jeweiligen Überströmungsstrecken der Deichquerschnitte des Rostocker Forschungsdeiches.

Querschnitt	B	C	D	E	F	G	H
Sohlmaterial	M2	M2	M2	M2	M1	M1	M3
Rinnenneigung	1:2	1:2	1:3	1:3	1:3	1:3	1:2
Rinnenlänge [m]	6,0	6,0	7,8	7,8	7,8	7,8	5,4
Rinnenbreite [m]	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Testabschnitte <sup>1</sup>	10	10	13	13	13	13	9

<sup>1</sup> Durch Querlatten begrenzte Messbereiche entlang jeder einzelnen Rinne

In Anlehnung an ASTM D6460 hat jede Rinne eine Breite von 0,6 m (2ft). Je nach Böschungsneigung und Höhe des betrachteten Teildeiches variieren die Rinnenlängen von 5,4m bis 7,8m mit entsprechender Anzahl an Testabschnitten (TA, Abbildung 4-8). Die Testabschnitte haben einen Abstand von 0,6m zueinander. Jeder einzelne Testabschnitt einer Rinne dient einerseits der Ermittlung des Bodenabtrags  $SL$  an fünf Messpunkten quer zur Strömungsrichtung. Andererseits werden an jedem Testabschnitt mittig der Rinne die hydraulischen Strömungsgrößen Fließgeschwindigkeit  $v$  und Abflusshöhe  $h$  bestimmt. Des Weiteren wurden etwa auf halber Rinnenlänge (TA6 bis TA8) der Bodenwassergehalt sowie die Bodenwassersättigung in 10–30 cm Tiefe ermittelt.

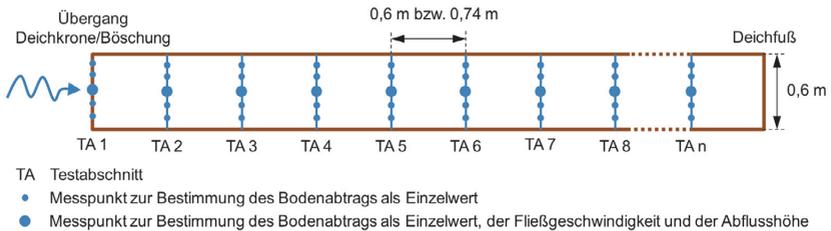


Abbildung 4-8. Grundriss einer beliebigen Rinne auf einer Deichbinnenböschung der Forschungsdeiche mit  $n$  Testabschnitten (TA) einschließlich Markierungen der Messpunkte für Bodenabtrag, Fließgeschwindigkeit, und Abflusshöhe. Länge TA: 0,6m (Rostock) bzw. 0,74 m (Danzig).

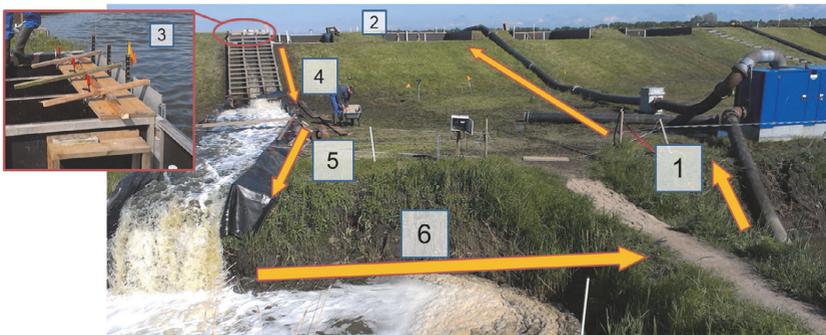


Abbildung 4-9. Wasserkreislauf während der Versuche in Rostock: 1) Pumpen → 2) Polder → 3) Hubschütze → 4) Rinnen → 5) Entwässerungsrinne → 6) Vorflut → 1) Pumpen.

Für die Versuche wurden die Polder der Forschungsdeiche über die Krone hinaus gefüllt, sodass das Wasser über die abgesenkten Deichkronen, durch die Rinnen und eine Entwässerungsrinne in eine Vorflut lief (Abbildung 4-9). Die Zielabflüsse wurden durch variable Pumpenleistung und durch auf der wasserseitigen Deichkronenkante installierte Hubschütze eingestellt.

#### 4.2.1.2 Versuchsaufbau in Danzig

Die Überströmungsversuche auf dem Danziger Forschungsdeich wurden im September 2014 durchgeführt. Im durch Spundwände eingefassten Bereich wurden zwei parallele, jeweils 0,6 m breite Rinnen installiert (Abbildung 4-10). Für die einzelnen Wandelemente wurden glattwandige Schalungselemente aus dem Betonbau verwendet. Querlatten dienten der Stabilisierung und der Testabschnittseinteilung. Jeder Testabschnitt hatte eine Länge von 0,74 m und diente der Ermittlung des Bodenabtrags  $SL$  an fünf Punkten quer zur Strömungsrichtung, der Fließgeschwindigkeit  $v$  und der Abflusshöhe  $h$ . Der Rinnengrundriss entspricht in etwa dem der Rinnen in Rostock (Abbildung 4-8).

Im Unterschied zu den Rinnenelementen der Versuche auf dem Rostocker Versuchsdeich wurden die etwa 0,15 m dicken Rinnenelemente in Danzig ca. 10–20 cm in die Böschungsoberfläche eingegraben, mit Erdnägeln fixiert und mit Brunnenschaum gedichtet. Dies führte zu einer stärkeren Beeinflussung der Böschungsoberfläche zwischen den Rinnenwandungen. So wurde die Böschungsoberfläche zusätzlich verdichtet und vergleichsweise stärker eingezwängt. Hinzu kommt, dass dauerhaft installierte Messtechnik sowie durch die Böschungsoberfläche verlegte Kabel stellenweise zu einer vergleichsweise geringeren Verdichtung der Oberfläche in einigen Bereichen führten.



Abbildung 4-10. Standardaufbau der Rinnen für die Überströmungsversuche auf dem Danziger Forschungsdeich. Zwei parallele Rinnen: Länge 6,70 m, Breite 0,6 m, Anzahl Testabschnitte (TA) 9; Länge TA 0,74 m.

Für die Versuche wurde das Spundwandbassin des Forschungsdeiches über die Deichkrone hinaus gefüllt, sodass das Wasser über die Deichkrone, durch die Rinnen, über eine Entwässerungsrinne wieder in die Weichsel bzw. Vorflut lief

(Abbildung 4-11). Der jeweilige Abfluss wurde durch variable Pumpenleistung und durch auf der wasserseitigen Deichkronenkante installierte Hubschütze eingestellt.



Abbildung 4-11. Wasserkreislauf während der Versuche in Danzig: 1) Pumpe → 2) Bassin → 3) Hubschütze → 4) Rinnen → 5) Entwässerungsrinne/ Vorflut → 1) Pumpe.

## 4.2.2 Messtechnik

### 4.2.2.1 Erosion

Vor und nach jedem Einzelversuch einer Versuchsreihe wurde der Bodenabtrag bzw. der Zustand der Böschungsoberfläche bestimmt. Zur quantitativen Bewertung der Oberfläche wurde ein Spizentaster (Pin-Profilier) hergestellt und verwendet (Abbildung 4-12). Mit diesem wurde in jedem Testabschnitt an fünf Punkten quer zur Strömungsrichtung – jeweils mit einem Abstand von 10 cm ab der Rinnenwand – die relative Böschungsoberflächenhöhe gemessen (Abbildung 4-16). Die Differenz zwischen zwei Ablesewerten ergibt die Bodenabtrags- oder Bodenauftragshöhe. Die Ablesegenauigkeit von  $\pm 1$  mm ( $\pm 0,5$  mm) definiert sich hierbei durch die verwendete Skala mit Millimeterteilung. Ablesefehler können vor allem durch Parallaxenabweichung entstehen. Die einzelnen Pins bzw. Stäbe besitzen einen Durchmesser von  $d = 0,8$  cm.

Die Messgenauigkeit des Spizentasters ist vom zu messenden Untergrund abhängig und wurde auf einem Kipptisch mit verschiedenen Oberflächen (OSB-Platte (glatt), Drainmatte (rau) und Boden/ Baggergut) ermittelt. Zur Ermittlung des systematischen Fehlers wurde der Spizentaster jeweils in waagerechter Position des Kipptisches geprüft. Um einen Messfehler aufgrund von Schrägstellung

einzelner Stäbe bestimmen zu können, wurde jeweils eine Neigung von 1 : 3 eingestellt. In jeder Konstellation aus Oberflächenbeschaffenheit und Neigung wurde jeweils durch zwei Prüfer zehnmals geprüft, d.h. der Spitzentaster wurde zehnmals auf dieselbe Position gestellt, die Stäbe aufgesetzt und abgelesen. Je nach Oberflächenbeschaffenheit – glatt, rau oder Baggergut – schwankt die Standardabweichung  $s$  als Messgenauigkeit eines Einzelwertes zwischen 0,04 cm und 0,18 cm (Tabelle 4-7).

Eine weitere Möglichkeit zur Bewertung des Oberflächenzustandes vor oder nach einem Einzelversuch bzw. einer Versuchsreihe ist durch Fotodokumentation gegeben. Dafür werden die einzelnen Testabschnitte der Reihe nach fotografiert.



Abbildung 4-12. Pin-Profilier/ Spitzentaster zur Ermittlung des Bodenabtrags.

Tabelle 4-7. Standardabweichung als Genauigkeit einer Einzelmessung des Spitzentasters zur Messung der Bodenerosion.

Oberflächenbeschaffenheit	glatt	rau	Baggergut (verdichtet)	Baggergut, bewachsen (unverdichtet)	Baggergut, bewachsen (verdichtet)
Anzahl der Testeinzelmessungen	200	200	200	400	200
Gemittelte Standardabweichung aller Messwerte	0,04 cm	0,07 cm	0,14 cm	0,18 cm	0,11 cm

In Anlehnung an van der Meer et al. (2013a) wurde der Zustand der Oberfläche eines Testabschnittes zusätzlich mit Noten von 1 bis 4 zu bewertet:

- 1: Ohne Schäden.
- 2: Einzelner Schaden / erste Schadstelle.
- 3: Mehrere Schadstellen unterschiedlicher Größe.
- 4: Versagen der Deichböschung, großflächige Freilegung des Deichkerns.

#### 4.2.2.2 Fließgeschwindigkeit und Abflusstiefe

Zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit  $v$  in den Testabschnitten wurde bei allen Versuchen ein mobiler magnetisch-induktiver Sensor verwendet. Dabei wurden die Werte der mittleren Fließgeschwindigkeit so genau wie möglich in ca. 40 - 50 % der Abflusstiefe aufgezeichnet (vgl. Abschnitt 3.1.1.2). Während der ersten Versuchsreihen (September 2013) wurde ein fest installierter magnetisch-induktiver Sensor zur Fließgeschwindigkeitsmessung auf der Deichkrone verwendet.

Die Abflusstiefe wurde auf der Böschung mit dem Pin-Profilier/Spizentaster und auf der Deichkrone mit Ultraschallsensoren bestimmt (September 2013) – 2014 kam ausschließlich ein Stahllineal zum Einsatz. In jedem Fall wurde senkrecht zur Böschungsoberfläche gemessen (Abbildung 4-13). Tabelle 4-8 gibt einen Überblick zur verwendeten Messtechnik zur Ermittlung der Strömungsparameter.



Abbildung 4-13. Prinzip der Messungen von Strömungsgrößen senkrecht zur Böschungsoberfläche. Hier: Messung der Fließgeschwindigkeit in einem Testabschnitt (Foto: unbekannt)

Tabelle 4-8. Übersicht der verwendeten Messgeräte zur Bestimmung der Strömungsgrößen Fließgeschwindigkeit  $v$  und Abflusstiefe  $h$ .

Messgerät	Hersteller	Messgröße	Einheit	Messbereich	Messgenauigkeit
Flo-Mate 2000 (mobil)	Marsh-McBirney (1990)	Fließgeschwindigkeit $v$	$\text{ms}^{-1}$	0 - 20 $\text{ms}^{-1}$	$\pm 2,0\%$ des Ablesewertes
ISM-2001 (stationär)	hs engineers (2002)	Fließgeschwindigkeit $v$	$\text{ms}^{-1}$	$\pm 3,0 \text{ms}^{-1}$	$\pm (0,5\%$ des Messwertes + $0,5\%$ des Erwartungswertes)
UC500-30GM-E6R2-V15	Pepperl + Fuchs (2014)	Abflusstiefe $h$	mm	30 - 500 mm <sup>1</sup>	Keine Angabe
Pin-Profilier/Spitzentaster	Eigenbau	Abflusstiefe $h$	mm	$\leq 38,2 \text{cm}$	$\pm 1 \text{mm}$ ( $\pm 0,5 \text{mm}$ ) <sup>2</sup>
Stahllineal	Cotta	Abflusstiefe $h$	mm	$\leq 50 \text{cm}$	$\pm 1 \text{mm}$ ( $\pm 0,5 \text{mm}$ ) <sup>2</sup>
<sup>1</sup> Erfassungsbereich					
<sup>2</sup> Ablesegenauigkeit, da keine Angabe zur Messgenauigkeit von Wasserspiegellagen vorhanden					

#### 4.2.2.3 Bodenfeuchte und Saugspannung

Zur Beobachtung der Bodenwasserverhältnisse direkt unter den Rinnensohlen wurden für die Versuchsreihen im September 2013 unter die jeweils äußeren Rinnen im Bereich der mittleren Testabschnitte (je nach Rinne TA 6–TA 8) Tensiometer und TDR-Sonden in Tiefen von 10 cm, 20 cm und 30 cm installiert (Tabelle 4-9, Abbildung 4-14).

Tabelle 4-9. Übersicht der verwendeten Messgeräte zur Bestimmung von Bodensaugspannung und Bodenwassergehalt.

Messgerät	Hersteller	Messgröße	Einheit	Messbereich	Messgenauigkeit
Tensiometer Tensio 150	UGT GmbH (2016)	Saugspannung	kPa	-20–85 kPa	$\pm 0,3 \text{kPa}$
TDR-System: FP/m, FP/mts + TDR/MUX/mpts	Institute of Agrophysics, Polish Academy of Science	Volumetrischer Wassergehalt	%	0–100%	$\pm 2\%$

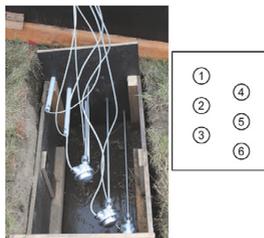


Abbildung 4-14. Anordnung der Feuchtemesstechnik unter einer Rinne im September 2013: Drei TDR-Sonden (weiße Kabelrohre, Nr. 1–3), drei Tensiometer (Edelstahl, Nr. 4–6), Außenwand der Rinne oben im Bild.

#### 4.2.3 Ermittlung und Berechnung maßgeblicher hydraulischer Parameter und des Bodenabtrags

Neben den direkt messbaren Strömungsparametern Fließgeschwindigkeit  $v$  und Abflusstiefe  $h$  sind weitere Größen aus diesen und der Geometrie des jeweiligen Deichquerschnitts bzw. der Überströmungsrinnen ableitbar. Die mittlere Fließgeschwindigkeit  $v$  und mittlere Abflusstiefe  $h$  eines Einzelversuchs ergibt sich jeweils aus dem arithmetischen Mittel aller  $v$ - bzw.  $h$ -Messungen in den einzelnen Testabschnitten einer Rinne.

Der Durchfluss  $Q$  bzw. spezifische Abfluss  $q$  wird mit der auf der Deichkrone gemessenen Fließgeschwindigkeit  $v$ , der Abflusstiefe  $h$  sowie der Rinnenbreite  $b$  nach den Formeln (3-5) und (3-6) berechnet. Um gezielt Durchflüsse vor einem Einzelversuch abschätzen und einstellen zu können, wurden im Vorfeld verschiedene Konstellationen aus Schützöffnungsweiten und Poldereinstauhöhen nach

$$Q = \mu_A \cdot b \cdot a \cdot \sqrt{2g \cdot h_0} \quad (4-1)$$

mit dem Ausflussbeiwert  $\mu_A$ , der Rinnenbreite  $b$ , der Schützöffnungsweite  $a$ , der Gravitationsbeschleunigung  $g$  und der Wassertiefe vor dem Schütz  $h_0$  (Abbildung 4-15) berechnet. Der Ausflussbeiwert  $\mu_A$  ergibt sich nach

$$\mu_A = \frac{\psi_{90}}{\sqrt{1 + \frac{\psi_{90} \cdot a}{h_0}}} \quad (4-2)$$

mit dem Einschnürungsbeiwert  $\psi_{90}$  für senkrechte Schütze

$$\psi_{90} = \frac{1}{1 + 0,64 \cdot \sqrt{1 + \frac{a}{h_0}}} \quad (4-3)$$

(Bollrich 2013).

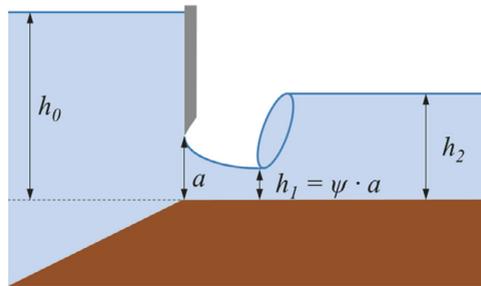


Abbildung 4-15. Parameter bei freiem Auslauf unter Schützen zur Abschätzung einzustellender Abflüsse. Mit Wasserstand vor dem Schütz  $h_0$ , der Schützöffnungsweite  $a$  und möglichen Wasserständen  $h_1$  und  $h_2$  hinter dem Schütz. Darstellung nach Bollich (2013).

Die Schleppspannung wird unter Annahme stationärer Versuchsbedingungen nach der auf der Gewichtskraft basierenden Formel (3-7) berechnet.

Für die Bestimmung des Bodenabtrags wird zunächst jeder einzelne Testabschnitt betrachtet (Abbildung 4-16). Es wird das arithmetische Mittel von jeweils fünf Messungen quer zur Strömungsrichtung gebildet. Die Differenz zwischen den Mittelwerten vor und nach einem Versuch wird als Höhe des Bodenabtrags (*soil loss SL*) eines Testabschnitts  $SL_i$  [cm] bezeichnet (Tabelle 4-10):

$$SL_i = SSF_{i,init} - SSF_{i,erod} \quad (4-4)$$

mit der mittleren Bodenoberflächenhöhe (*soil surface SSF*) vor  $SSF_{i,init}$  und nach  $SSF_{i,erod}$  einem Einzelversuch. Der mittlere Bodenabtrag  $SL$  [cm] einer Rinne nach einem Einzelversuch errechnet sich aus dem arithmetischen Mittel aller einzelnen Bodenabtragswerte  $SL_i$ :

$$SL = \frac{\sum_{i=1}^n SL_i}{n} \quad (4-5)$$

mit der Anzahl an Testabschnitten  $n$ . Um Erosion nach einer vollständigen Testreihe ermitteln zu können, wird der kumulative Bodenabtrag eines Testabschnitts  $SL_{i,cum}$  bzw. der gesamten Rinne  $SL_{cum}$  definiert. Dieser stellt die Höhe des Gesamtbodenabtrags nach einer Versuchsreihe dar. Des Weiteren wird der *Clopper Soil Loss Index CSLI* zur Ermittlung des Bodenabtrags verwendet (siehe Abschnitt 3.2).

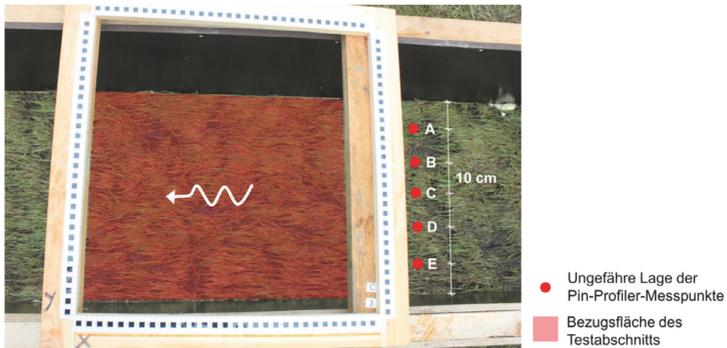


Abbildung 4-16. Darstellung zur Messung der Erosion an fünf Messpunkten (A, B, C, D und E, rot markiert) eines Testabschnitts (transparent rot) vor und nach einem Einzelversuch. Fließrichtung von rechts nach links.

Tabelle 4-10. Beispiel für die Ermittlung des mittleren Bodenabtrags an fünf Messpunkten (A, B, C, D und E) eines Testabschnitts. Protokollauszug Versuch-Nr. E-N3.6 (Mai 2014, Querschnitt E, Rinne 3, Testabschnitt 3, Endablesung), Mittlerer Bodenabtrag im Testabschnitt  $SL_i = 1,18$  cm.

Messpunkt	A	B	C	D	E
Ablesewert der originalen Bodenhöhe [cm]	11.2	11.3	18.3	11.2	12.1
Ablesewert der erodierten Bodenhöhe [cm]	12.5	12.0	19.1	12.9	13.5
Bodenabtrag [cm]	-1.3	-0.7	-0.8	-1.7	-1.4
Mittlerer Bodenabtrag im Testabschnitt (-) $SL_i$ [cm]	-1,18				

#### 4.2.4 Modellähnlichkeit<sup>18</sup>

Der Längenmaßstab  $M_L$  (geometrische Ähnlichkeit) zwischen Natur und Modell beträgt bei den Überströmungsversuchen auf den Forschungsdeichen in Rostock und Danzig  $M_L = L_{Natur} : L_{Modell} = 1 : 1$ . Das bedeutet, dass die Ausdehnungen aller Koordinatenrichtungen im Modell denen in der Natur entsprechen. Daher ist davon auszugehen, dass sowohl Trägheit und Schwerkraft als auch die Reibungskräfte vom Modell auf die Natur im Kräftemaßstab  $M_F = F_{Natur} : F_{Modell} = 1 : 1$  (dynamische Ähnlichkeit) übertragen werden können. Die im wasserbaulichen Versuchswesen häufig angewandten Modellgesetze nach Froude (Trägheit und Schwere) und Reynolds (Trägheit und Reibung) müssen somit in der Auswertung nicht berücksichtigt werden.

<sup>18</sup> Überwiegend aus Strobl und Zunic 2006

#### 4.2.5 Versuchsprogramm

In den Jahren 2013 und 2014 wurden drei große Versuchsserien in Rostock und Danzig mit insgesamt 158 Einzelversuchen durchgeführt (Tabelle 4-11).

Tabelle 4-11. Übersicht zu den zwischen 2013 und 2014 durchgeführten Überströmungsversuchen in Rostock-Markgrafeneheide und Danzig.

	September 2013	Mai 2014	September 2014
Versuchsserie	Rostock 1	Rostock 2	Danzig
Anzahl getesteter Querschnitte	7	4	1
Anzahl Versuchsreihen	21	12	4
Anzahl Kurzzeitversuche	79	49	18
Anzahl Langzeitversuche (6 h)	3	—	—
Anzahl Langzeitversuche (18–22 h)	—	9	—
Maximale Pumpenleistung	700 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	1.300 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	750 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
Ø Maximaldurchfluss $q_{mean}$	200 ls <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	553 ls <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	233 ls <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>
Ø Maximalfließgeschwindigkeit $v_{mean}$	3,28 ms <sup>-1</sup>	4,46 ms <sup>-1</sup>	3,38 ms <sup>-1</sup>
Ø Maximalschleppspannung $\tau_{mean}$	340 Pa	426 Pa	373 Pa

Jeder Versuch folgt der gleichen Vorgehensweise:

- Vorbereitung der Überströmungsstrecken einschließlich des Aufbaus der Rinnen und Installation bzw. Vorbereitung von Messtechnik.
- Erstaufnahme der Rinnenoberflächen: Ermittlung des qualitativen und quantitativen Zustandes der Böschungsoberflächen in den einzelnen Testabschnitten der Überströmungsrinnen (Spitzentastung, Fotos, Beschreibung).
- Langsames Öffnen der Hubschütze und Einstellung des Zielabflusses binnen fünf Minuten.
- Überströmung einer oder mehrerer Rinnen mit einem gleichbleibenden Durchfluss (Kurzzeitversuche 45 Minuten, Langzeitversuche 6–22 Stunden).
- Während der Versuche Messung der Fließgeschwindigkeit  $v$  und Abflusstiefe  $h$  in jedem Testabschnitt und auf der Deichkrone.
- Schließen der Hubschütze.
- Nach Abfluss des restlichen Wassers Aufnahme der Rinnenoberflächen: Ermittlung des qualitativen und quantitativen Zustandes der Böschungsoberflächen in den einzelnen Testabschnitten der Überströmungsrinnen (Spitzentastung, Fotos, Beschreibung)  $\triangleq$  Erstaufnahme der nächsten Überströmungsstufe bzw. Endaufnahme der Versuchsreihe.
- Festhalten aller Messergebnisse, Beobachtungen und Bemerkungen in einem Versuchsprotokoll.

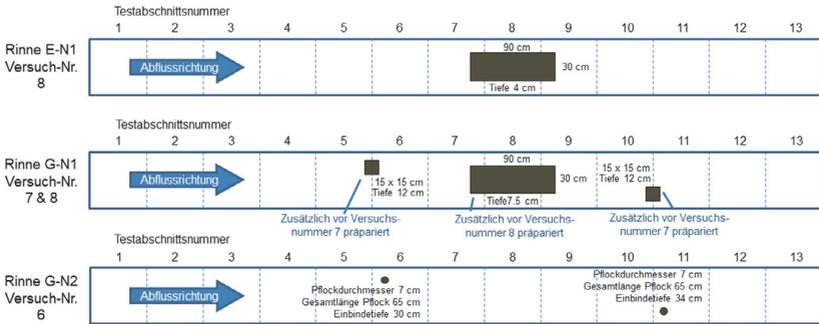


Abbildung 4-17. Darstellungen künstlich angelegter Schadstellen im Rahmen der Überströmungsversuche im Mai 2014: Entnahme der Grasnarbe einschließlich Erosionsschutzprodukt (Rinne E-N1) und Entnahme der Grasnarbe in verschiedenen Größen und Tiefen (Rinne G-N1) sowie Installation von Pflocken auf der Rinnensohle (Rinne G-N2).

Abweichend von dieser Vorgehensweise wurden zusätzliche Versuche mit Variationen und Ergänzungen zu den oben genannten Vorschlägen durchgeführt:

- Herstellen von Störstellen (punktueller oder flächiger Entfernungen der Grasnarbe, Einbau von Pflocken in einzelne Testabschnitte, Abbildung 4-17).
- Entfernen der gesamten Grasnarbe einschließlich des Oberbodens von der Rinnensohle bei den Versuchen in Danzig. Dies wurde veranlasst, nachdem während eines Versuchsdurchgangs die Deckschicht des Deichs großflächig abgerutscht ist.
- Breitkronige Deichüberströmung ( $b \approx 5,50 \text{ m}$ ).

### 4.3 Fazit zur Methodik der großmaßstäblichen Überströmungsversuche

Bereits im vorhergehenden Kapitel 3 wurde gezeigt, dass keine einheitlichen Verfahren zur Prüfung der Erosionsstabilität von Deichbinneböschungen existieren. Für die Überprüfung der Hypothese, Deichbinneböschungen könnten eine bestimmte Menge kontinuierlich überströmenden Wassers ertragen ohne zu erodieren bzw. zum Versagen der Böschung oder gar des Deiches zu führen, wurde ein bestehendes Verfahren zur Ermittlung des Widerstandes gegen überströmungsinduzierte Erosion angewandt, die Eignung überprüft sowie an geeigneten Stellen weiterentwickelt. Grundlage hierfür bildet der US-amerikanische Standard ASTM D6460 zur Prüfung von geosynthetischen Erosionsschutzprodukten und die darauf aufbauende, breit angelegte Versuchsreihe des NTPEP (2015).

Die Versuchsaufbauten in Rostock und Danzig haben in Abhängigkeit von der jeweiligen Pumpenleistung verschiedene Vorteile:

- In-situ-Versuche auf Deichen im Originalmaßstab sind möglich.
- Mehrere Versuche gleichzeitig sind möglich.
- Aufgrund der Rinnenbreite sind spezifische Abflüsse von bis zu  $q = 550 \text{ ls}^{-1} \text{ m}^{-1}$  erreichbar.
- Langzeitversuche mit einer Dauer von 22 Stunden und mehr sind möglich.
- Das standardisierte Messverfahren zur Erosionsermittlung berücksichtigt viele Bereiche der jeweils betrachteten Rinne und bietet die Möglichkeit einen mittleren Wert des Bodenabtrags je Rinne zu bestimmen.

Allerdings können die Nachteile des Versuchsaufbaus zu Fehlinterpretation der Messergebnisse führen:

- Beschränkte Rinnenbreite von  $b = 0,6 \text{ m}$ .
- Art der Installation der Wandelemente auf der Böschungsoberfläche.
- Betreten der Rinnensohlen bei der Installation der Wandelemente.
- Keine 100 %-ig flächendeckende Ermittlung von Bodenabtrag.
- Mögliche Einzwängung der Böschungsoberfläche zwischen den Rinnenwandelementen.
- Genauigkeit der Ermittlung von Erosion in den einzelnen Testabschnitten nur entlang einer Linie quer zur Fließrichtung.

Bezüglich der Ermittlung hydraulischer Strömungsgrößen muss in laminare und turbulente Verhältnisse unterschieden werden. Es fällt einfach, die Fließgeschwindigkeit und die Abflusstiefe unter laminaren Bedingungen zu ermitteln. Ist die Strömung hingegen turbulent, unterliegt einem höheren Lufteintrag und fließt aufgrund der Böschungsneigung mit einer geringen Abflusstiefe ab, fällt es schwerer die Strömungsgrößen exakt zu bestimmen. Diese gemessenen Strömungsgrößen sind jedoch Grundlage für die Berechnung der Schubspannung auf der Böschungsoberfläche sowie der kritischen Strömungsparameter (z.B.  $v_{krit}$ ,  $\tau_{krit}$  und  $q_{krit}$ ).

---

## 5. Ergebnisdarstellung der hydraulischen Untersuchungen

Die Ergebnisse der durchgeführten Überströmungsversuche werden in diesem Kapitel präsentiert. Begonnen wird mit einem Überblick der Resultate der Laborüberströmungsversuche, gefolgt von der Ergebnisdarstellung der Feldversuche.

### 5.1 Ergebnisse der Laborüberströmungsversuche

Die Proben, begrünt und unbegrünt, wurden für jeden Versuch einzeln vorbereitet und mit einem Laborkran in die Strömungsrinne gehoben. Das führte teilweise zu Rissen in den unbegrünten Proben. Auch konnte nicht jede Probe so in die Rinne eingebaut werden, dass sie bündig mit den Rinnenwänden abschloss – fehlendes Material wurde nachträglich eingebaut und verdichtet. Diese Randbedingungen führten dazu, dass Wasser vermehrt an diesen kritischen Stellen abfloss und sich hier schnell Erosionsrillen bildeten, was zu einem Totalversagen der Probe führte (Abbildung 5-1).

Lesch (2012) bestimmte die Menge erodierten Bodens unbegrünter Proben in der von ihm entwickelten Laborströmungsrinne. Mit einem Laserscanner (vgl. Abschnitt 2.2.2.1) wurde zunächst die mittlere Bodenabtragshöhe  $a_m$  einer unbegrünten Probe als Differenz zweier aufeinanderfolgender Einzelversuche ermittelt. Multipliziert mit Probenlänge und Probenbreite ergibt sich somit das erodierte Bodenvolumen  $V_E$ . In einem nächsten Schritt wurde die Erosionsrate  $E$  als Quotient aus dem erodierten Bodenvolumen  $V_E$  zur jeweiligen Wassermenge  $W$  definiert.



Abbildung 5-1: Vollständige Erosion einer begrünten Probe aufgrund eines Querrisses.

Die mit dem Laserscanner nach einzelnen Versuchen einer Versuchsreihe bestimmten mittleren Werte des Bodenabtrags einer gesamten Probe sind über die Zeit betrachtet kumulierte Bodenabtragswerte. Diese sollen hier auszugsweise neu dargestellt werden. Abbildung 5-2 stellt die Ergebnisse der Laserscannmessungen nach Einzelversuchen in Abhängigkeit von der Versuchsdauer vier verschiedener Versuchsreihen dar.

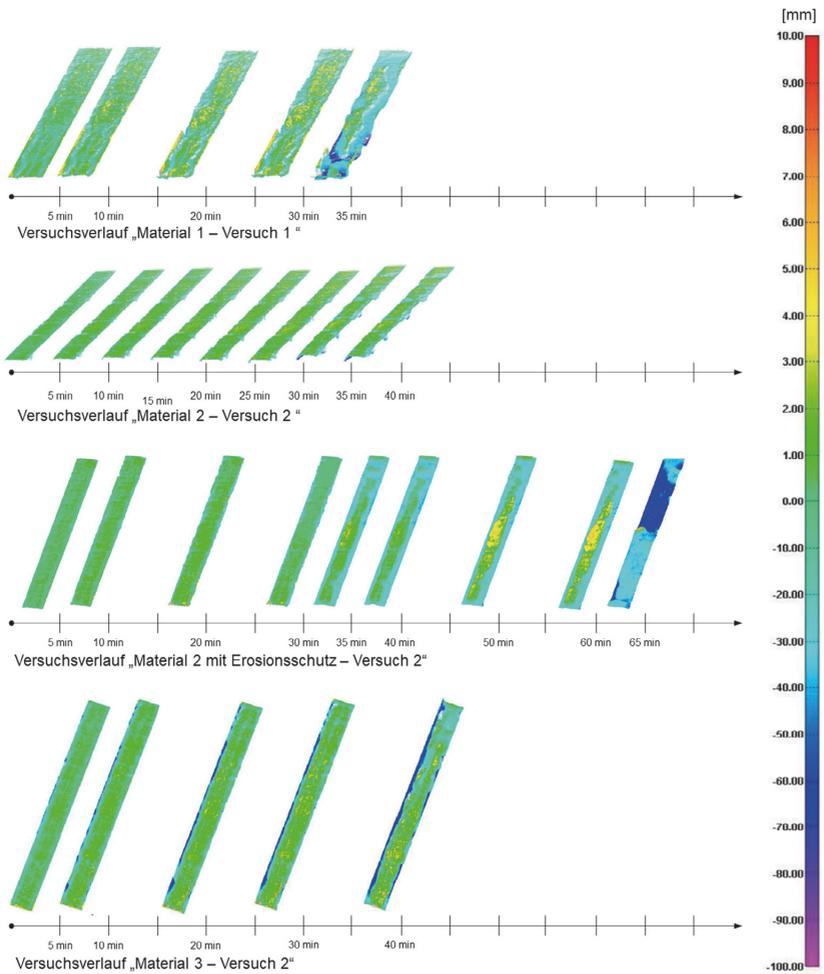


Abbildung 5-2: Darstellung der Ergebnisse der Laserscannmessungen nach Einzelversuchen vier verschiedener Versuchsreihen. Blau = 70 mm Bodenabtrag; grün = +/- 0 mm Bodenabtrag/-auftrag; rot = 10 mm Bodenauftrag; Abszisse  $\hat{=}$  Zeit (vgl. Lesch (2012))

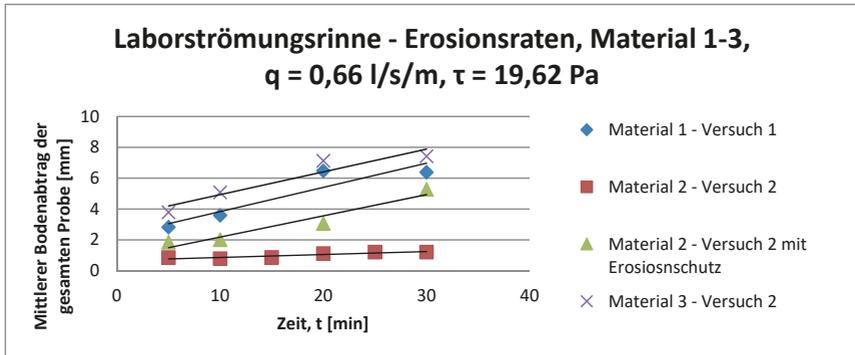


Abbildung 5-3: Erosionsraten vier verschiedener Materialien (M1–M3, mit und ohne Erosionsschutz (Geomatte)) bei einem spezifischem Durchfluss von  $q = 0,66 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$  und  $\tau = 19,62 \text{ Pa}$ . Ordinate  $\triangleq$  kumulierter Bodenabtrag [mm], Abszisse  $\triangleq$  Gesamtversuchsdauer [min].

Der Zusammenhang zwischen Bodenabtrag und der Versuchsdauer wird zusätzlich in Abbildung 5-3 dargestellt. Hier ist deutlicher abzulesen, wie die Menge erodierten Bodens bei gleichbleibendem Durchfluss nach festen Zeitintervallen ansteigt.

## 5.2 Ergebnisse der großmaßstäblichen Überströmungsversuche in Rostock

Im September 2013 und Mai 2014 wurden auf dem Rostocker Versuchsdeich 33 großmaßstäbliche Versuchsreihen mit 141 Einzelversuchen durchgeführt, darunter 128 Kurzzeit- und 13 Langzeitversuche. Tabelle 5-1 stellt die maßgeblichen Strömungsgrößen der einzelnen Überströmungsstufen bzw. Einzelversuche einer Versuchsreihe (vgl. Abschnitt 4.1.1.2) dar. Des Weiteren zeigen

Tabelle 5-2 und Tabelle 5-3 die durchschnittlichen Maximalwerte der hydraulischen Parameter sowie des Bodenabtrags der Kurz- und Langzeitversuchsreihen auf den verschiedenen Deichquerschnitten. Ein Auszug der Ergebnisse wurde im Fachmagazin *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* veröffentlicht (Cantré, Olschewski, Saathoff 2017). Die folgenden Ergebnisdarstellungen zeigen ausschließlich die Werte der Kurzzeitversuche, da, wie Tabelle 5-3 zu entnehmen ist, der Bodenabtrag größtenteils wider Erwarten nicht messbar gewesen ist und somit keine Rückschlüsse zum Bodenabtrag aufgrund von Überströmung zulassen. Auch die Versuche mit künstlichen angelegten Schadstellen (vgl. Abbildung 4-17) blieben nahezu ohne Folgen, so dass auch hier keine Ergebnisdarstellung möglich ist.

Tabelle 5-1: Mittlere Werte des spezifischen Abflusses ( $\bar{Q} q$ ), der Fließgeschwindigkeit ( $\bar{Q} v$ ), der Abflusshöhe ( $\bar{Q} h$ ) und der Schleppspannung ( $\bar{Q} \tau$ ) sowie die Froude- ( $Fr$ ) und Reynoldszahl ( $Re$ ) einzelner Überströmungsstufen der Versuche in Rostock (September 2013 und Mai 2014)

Überströmungsstufe	$\bar{Q} q$ [ls <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ]	$\bar{Q} v$ [ms <sup>-1</sup> ]	$\bar{Q} h$ [cm]	$\bar{Q} \tau$ [Pa]	$Fr$ <sup>1)</sup>	$Re$ <sup>2)</sup>
<b>September 2013</b>						
1	60	1,75	5,3	210	2,43	69.203
2	80	2,26	6,0	240	2,95	99.208
3	120	2,62	7,1	260	3,14	132.061
4/5	200	3,28	9,5	340	3,40	207.773
<b>Mai 2014</b>						
1	125	2,24	5,7	187	2,99	94.902
2	215	2,97	7,5	245	3,46	156.442
3	264	3,30	8,3	270	3,67	188.000
4	366	3,65	10,5	341	3,60	248.050
5	507	4,32	12,3	402	3,93	330.718
6	553	4,46	13,0	426	3,94	356.067
Langzeit	319	3,67	9,0	295	3,91	223.147
$\bar{Q} v$ und $\bar{Q} h$ entsprechen gemittelten Werten über die gesamte Böschungslänge						
<sup>1)</sup> $Fr < 1$ : Strömen; $Fr > 1$ : Schießen						
<sup>2)</sup> $R < 2.350$ : Laminare Strömung; $R \geq 2.350$ : Turbulente Strömung						

Tabelle 5-2: Mittlere Maximalwerte des spezifischen Abflusses ( $\bar{Q} q_{max}$ ), der Fließgeschwindigkeit ( $\bar{Q} v_{max}$ ), der Abflusshöhe ( $\bar{Q} h_{max}$ ) und der Schleppspannung ( $\bar{Q} \tau_{max}$ ) sowie des Gesamtbodenabtrags ( $\bar{Q} SL_{cum}$ ) und des Clopper Soil Loss Index ( $\bar{Q} CSLI_{cum}$ ) der einzelnen Strömungsrinnen der Kurzzeitversuche in Rostock (September 2013 und Mai 2014).

Querschnitt	Erosionsschutz	$\bar{Q} q_{max}$ [ls <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ]	$\bar{Q} v_{max}$ [ms <sup>-1</sup> ]	$\bar{Q} h_{max}$ [cm]	$\bar{Q} \tau_{max}$ [Pa]	$\bar{Q} SL_{cum}$ [cm]	$\bar{Q} CSLI_{cum}$ [cm]
<b>September 2013</b>							
D	nein	279	3,7	10,1	329	0,33	0,50
E	ja	235	3,6	11,0	358	0,79	0,94
F	Ja	253	3,6	9,4	308	0,30	0,38
G	nein	194	3,5	9,5	311	-0,20	0,05
<b>Mai 2014</b>							
D	nein	492	4,2	12,9	420	0,06	0,17
E	ja	540	4,4	12,9	420	0,54	0,58
F	Ja	512	4,4	12,2	399	-0,04	0,10
G	nein	483	4,3	11,7	389	0,31	0,39

Tabelle 5-3: Mittlere Werte des spezifischen Abflusses ( $\bar{q}$ ), der Fließgeschwindigkeit ( $\bar{v}$ ), der Abflusshöhe ( $\bar{h}$ ) und der Schleppspannung ( $\bar{\tau}$ ) sowie des Gesamtbodenabtrags ( $\bar{SL}_{cum}$ ) und des Clopper Soil Loss Index ( $\bar{CSLI}_{cum}$ ) der einzelnen Strömungsrinnen der Langzeitversuche in Rostock (September 2013 und Mai 2014) unter Angabe der Versuchsdauer ( $t$ ).

Querschnitt	Erosionsschutz	Dauer [t]	$\bar{q}$ [ $l \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ ]	$\bar{v}$ [ $ms^{-1}$ ]	$\bar{h}$ [cm]	$\bar{\tau}$ [Pa]	$\bar{SL}_{cum}$ [cm]	$\bar{CSLI}_{cum}$ [cm]
September 2013								
D	nein	6	226	2,8	8,0	264	0,46	0,58
E	ja	6	129	2,8	7,6	247	1,17	1,20
Mai 2014								
D	nein	22,5	340	3,7	9,6	318	0,00	0,00
E	ja	20	309	3,6	8,8	290	0,26	0,32
F-1 lang	ja	18	350	3,9	9,3	300	0,00	0,00
F-2 lang	ja	18	212	3,1	7,0	230	0,10	0,00
F-3 lang	ja	18	18	0,7	2,8	90	0,00	0,00
G	nein	20	320	3,8	8,7	285	0,00	0,00

Der kumulierte Bodenabtrag  $SL_{cum}$  und der kumulierte Clopper Soil Loss Index  $CSLI_{cum}$  lassen sich mit dem spezifischen Abfluss  $q$  und dem kumulierten Abflussvolumen  $V_{cum}$  über die Abflussdauer darstellen (Abbildung 5-4 bis Abbildung 5-7). Des Weiteren wurden die Messungen des Bodenabtrags klassiert, d.h. in Bereiche definierter Bodenabtragswerte (Tabelle 5-4) und als Häufigkeitsverteilung dargestellt (Abbildung 5-8 bis Abbildung 5-11).

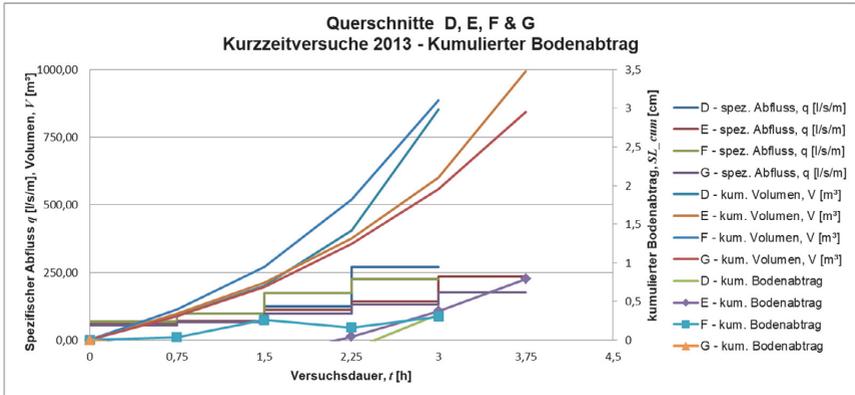


Abbildung 5-4: Ergebnisse der Überströmungsversuche im September 2013; Querschnitte D–G; linke Ordinate  $\hat{=}$  spezifischer Abfluss ( $q$  [ $l \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ ]) und kumuliertes Überströmungsvolumen ( $V$  [ $m^3$ ]); rechte Ordinate  $\hat{=}$  kumulierter Bodenabtrag ( $SL_{cum}$  [cm]); Abszisse  $\hat{=}$  Gesamtversuchsdauer ( $t$  [h]).

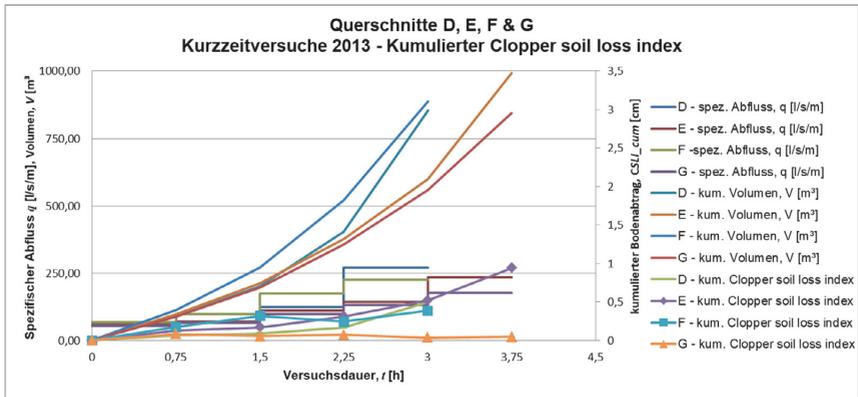


Abbildung 5-5: Ergebnisse der Überströmungsversuche im September 2013; Querschnitte D–G; linke Ordinate  $\hat{=}$  spezifischer Abfluss ( $q$  [ls<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>]) und kumuliertes Überströmungsvolumen ( $V$  [m<sup>3</sup>]); rechte Ordinate  $\hat{=}$  kumulierter Bodenabtrag als Clopper Soil Loss Index ( $CSLI_{cum}$  [cm]); Abszisse  $\hat{=}$  Gesamtversuchsdauer ( $t$  [min]).

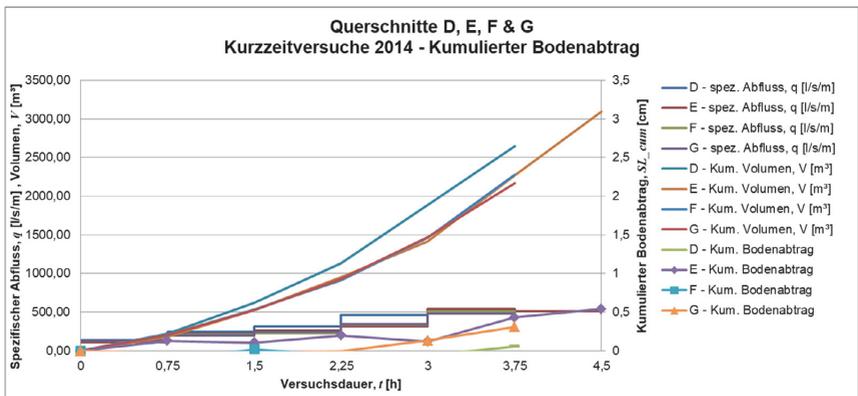


Abbildung 5-6: Ergebnisse der Überströmungsversuche im Mai 2014; Querschnitte D–G; linke Ordinate  $\hat{=}$  spezifischer Abfluss ( $q$  [ls<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>]) und kumuliertes Überströmungsvolumen ( $V$  [m<sup>3</sup>]); rechte Ordinate  $\hat{=}$  kumulierter Bodenabtrag ( $SL_{cum}$  [cm]); Abszisse  $\hat{=}$  Gesamtversuchsdauer ( $t$  [h]).

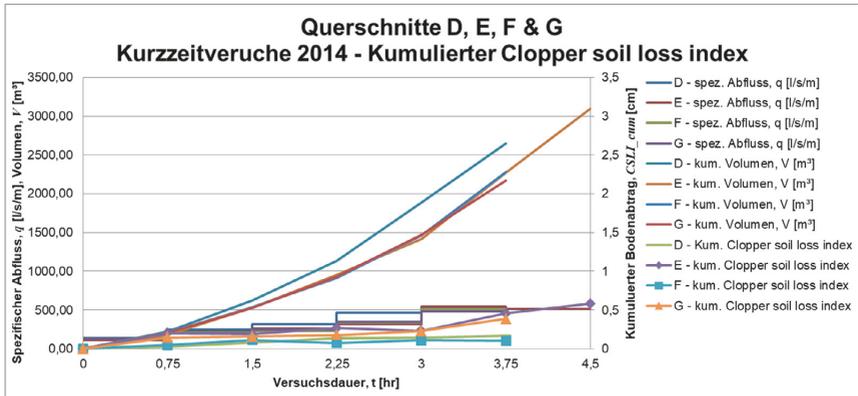


Abbildung 5-7: Ergebnisse der Überströmungsversuche im Mai 2014; Querschnitte D–G; linke Ordinate  $\hat{=}$  spezifischer Abfluss ( $q$  [ $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ]) und kumuliertes Überströmungsvolumen ( $V$  [ $\text{m}^3$ ]); rechte Ordinate  $\hat{=}$  kumulierter Bodenabtrag als Clopper Soil Loss Index ( $CSLI_{cum}$  [ $\text{cm}$ ]); Abszisse  $\hat{=}$  Gesamtversuchsdauer ( $t$  [ $\text{h}$ ]).

Tabelle 5-4: Klassierung bzw. Kategorisierung der Ergebnisse der Bodenabtragsmessungen; gültig für Bodenabtrag ( $SL$ ) und Clopper Soil Loss Index ( $CSLI$ );

Bereich des Bodenabtrags, $SL$ [ $\text{cm}$ ] bzw. $CSLI$ [ $\text{cm}$ ]	Kategorie des Bodenabtrags
$SL \leq -1,25$	-1,25
$-1,25 < SL \leq -1$	-1,00
$-1 < SL \leq -0,75$	-0,75
$-0,75 < SL \leq -0,5$	-0,50
$-0,5 < SL \leq -0,25$	-0,25
$-0,25 < SL \leq 0$	0,00
$0 < SL \leq 0,25$	0,25
$0,25 < SL \leq 0,5$	0,50
$0,5 < SL \leq 0,75$	0,75
$0,75 < SL \leq 1$	1,00
$1 < SL \leq 1,25$	1,25
$SL > 1,25$	1,50
positiv [+] $\hat{=}$ Bodenabtrag; negativ [-] $\hat{=}$ Bodenauftrag	

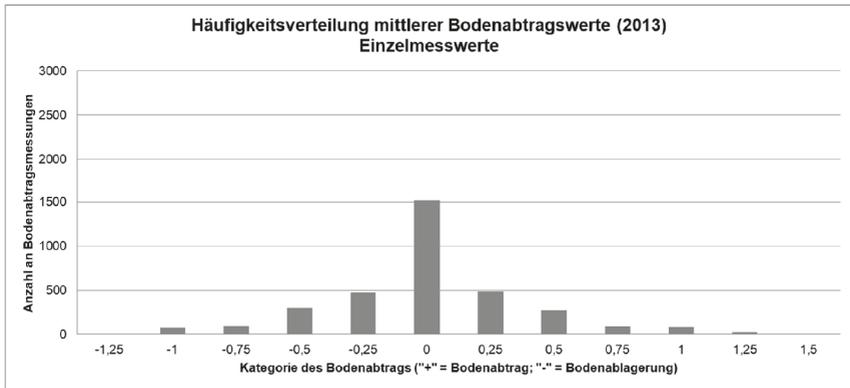


Abbildung 5-8: Ergebnisse der Überströmungsversuche im September 2013; Darstellung als Häufigkeitsverteilung aller Einzelversuche auf den Deichquerschnitten D–G; Kategorisierung der Messergebnisse gemäß Tabelle 5-4; Ordinate  $\triangleq$  Anzahl der Bodenabtragsmessungen; Abszisse  $\triangleq$  Kategorie des Bodenabtrags (SL).

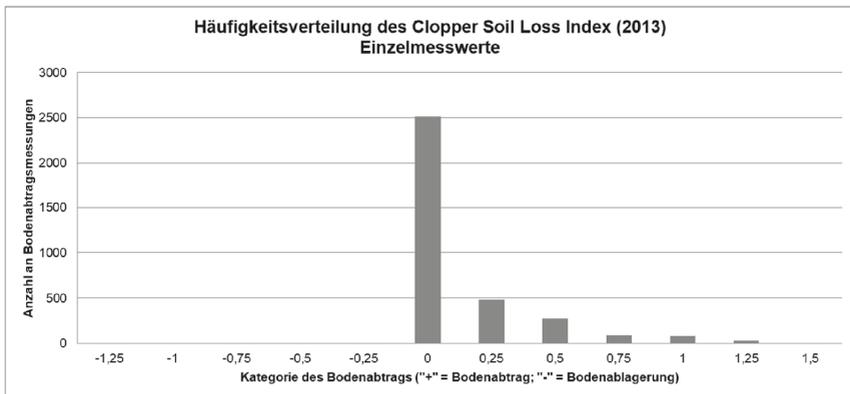


Abbildung 5-9: Ergebnisse der Überströmungsversuche im September 2013; Darstellung als Häufigkeitsverteilung aller Einzelversuche auf den Deichquerschnitten D–G; Kategorisierung der Messergebnisse gemäß Tabelle 5-4; Ordinate  $\triangleq$  Anzahl der Bodenabtragsmessungen; Abszisse  $\triangleq$  Kategorie des Bodenabtrags (CSLI).

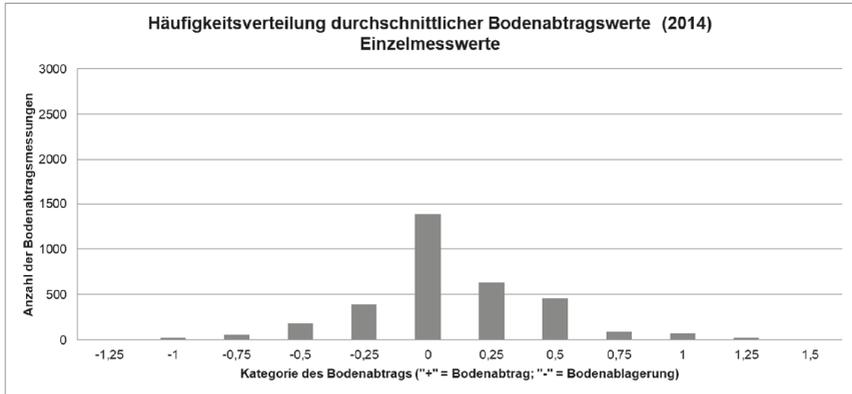


Abbildung 5-10: Ergebnisse der Überströmungsversuche im Mai 2014; Darstellung als Häufigkeitsverteilung aller Einzelversuche auf den Deichquerschnitten D–G; Kategorisierung der Messergebnisse gemäß Tabelle 5-4; Ordinate  $\hat{=}$  Anzahl der Bodenabtragsmessungen; Abszisse  $\hat{=}$  Kategorie des Bodenabtrags (SL).

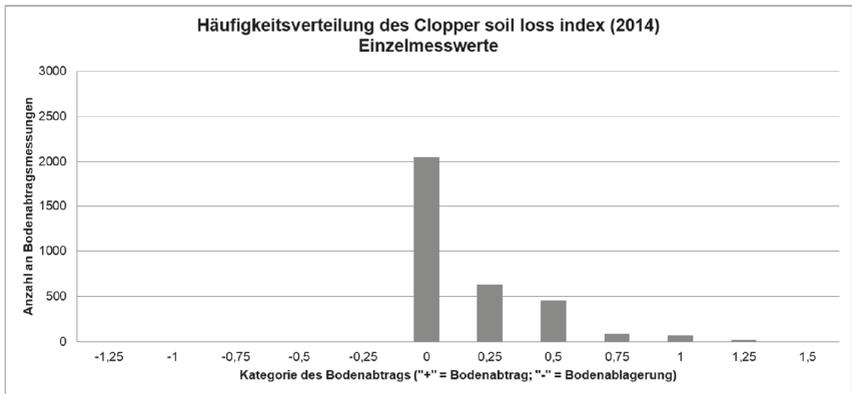


Abbildung 5-11: Ergebnisse der Überströmungsversuche im Mai 2014; Darstellung als Häufigkeitsverteilung aller Einzelversuche auf den Deichquerschnitten D–G; Kategorisierung der Messergebnisse gemäß Tabelle 5-4; Ordinate  $\hat{=}$  Anzahl der Bodenabtragsmessungen; Abszisse  $\hat{=}$  Kategorie des Bodenabtrags (CSLI).

Unter Berücksichtigung der auf die Böschungsoberfläche wirkenden Schleppspannung  $\tau$  werden die Einzelwerte des mittleren Bodenabtrags bzw. des mittleren Clopper Soil Loss Index dargestellt (Abbildung 5-12 und Abbildung 5-13).

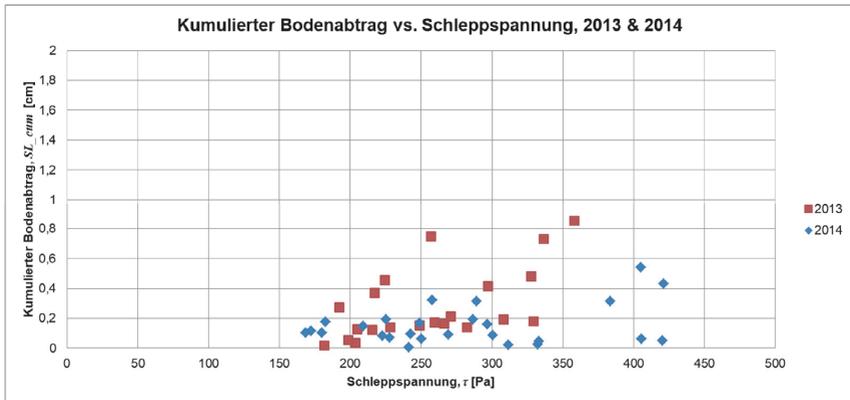


Abbildung 5-12: Darstellung des mittleren kumulierten Bodenabtrags ( $SL_{cum}$ ) in Abhängigkeit von der auf der Böschungsoberfläche wirkenden Schleppspannung ( $\tau$ ) aller Versuchsreihen auf den Querschnitten D–G. Rote Quadrate  $\triangleq$  Versuche September 2013; Blaue Rauten  $\triangleq$  Versuche Mai 2014.

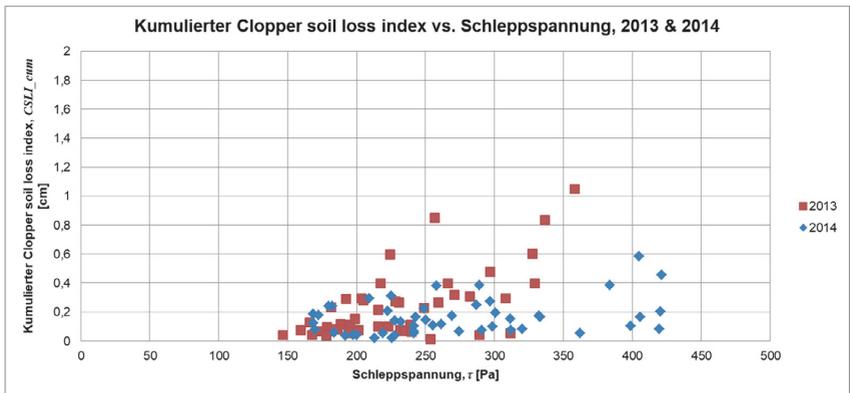


Abbildung 5-13: Darstellung des mittleren kumulierten Clopper Soil Loss Index ( $CSLI_{cum}$ ) in Abhängigkeit von der auf der Böschungsoberfläche wirkenden Schleppspannung ( $\tau$ ) aller Versuchsreihen auf den Querschnitten D–G. Rote Quadrate  $\triangleq$  Versuche September 2013; Blaue Rauten  $\triangleq$  Versuche Mai 2014.

Die vorbereiteten Schadstellen (eingeschlagene Pflöcke und hergestellte Löcher bzw. teilweise ausgehobene Bereiche der Böschungsoberfläche, vgl. Abbildung 4-17) auf den Querschnitten F und G des Versuchsdeichs hatten keinen wesentlichen Einfluss auf den Zustand der Böschungsoberfläche nach der Überströmung. Die Versuche wurden mit maximalem Durchfluss für jeweils 45 Minuten durchgeführt. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass die Pflöcke starke Turbulenzen auslösten und Wasser über die Rinnenwandung spritzte (Abbildung 5-14). Es trat jedoch keine Erosion um

die Pflöcke oder in irgendeinem anderen Bereich der Rinne auf. Auch wurden die Pflöcke in keiner Weise gelockert oder ausgerissen und weggespült. Die 15 cm × 15 cm großen Löcher füllten sich sofort nach Versuchsbeginn mit Wasser, über das der Abfluss des Hauptstroms hinüberfloss, ohne den wassergefüllten Hohlraum zu beeinträchtigen. Innerhalb des größten Hohlräume mit 30 cm × 90 cm Größe wurde nach 45 Minuten Überströmung eine maximale Erosionstiefe von 3 cm gemessen. Entgegen der zuvor getroffenen Annahme eines schnellen sich Aufwärtsbewegens, also böschungsaufwärtsgerichteter Vergrößerung des Hohlräume, blieb die ursprüngliche Geometrie des Aushubs bestehen.



Abbildung 5-14: Versuchsdurchführung mit hergestellten Schadstellen auf und in der Böschungsoberfläche (Foto: Ricarda Neumann).

### 5.3 Ergebnisse der großmaßstäblichen Überströmungsversuche in Danzig

Im September 2014 wurden auf dem Danziger Versuchsdeich 4 großmaßstäbliche Versuchsreihen mit 18 Einzelversuchen durchgeführt, darunter 10 Kurzzeitversuche auf der begrünnten Böschung und 8 Kurzzeitversuche auf der unbegrünnten Böschung. Ein Auszug der Ergebnisse wurde u.a. in der Fachzeitschrift *Engineering Structures and Technologies* veröffentlicht (Olschewski et al. 2014). Tabelle 5-5 fasst die maßgeblichen Strömungsgrößen der einzelnen Überströmungsstufen bzw. Einzelversuche einer Versuchsreihe (vgl. Abschnitt 4.1.1.2) zusammen. Tabelle 5-6 enthält

die mittleren Maximalwerte sowie Angaben zum mittleren Gesamtbodenabtrag  $SL_{cum}$  sowie zum mittleren Clopper Soil Loss Index  $CSLI_{cum}$ . Tabelle 6-1 enthält die durchschnittlichen Maximalwerte der hydraulischen Parameter sowie des Bodenabtrags der Kurz- und Langzeitversuche auf den verschiedenen Deichquerschnitten im September 2014.

Tabelle 5-5: Mittlere Werte des spezifischen Abflusses ( $\bar{\varnothing} q$ ), der Fließgeschwindigkeit ( $\bar{\varnothing} v$ ), der Abflusshöhe ( $\bar{\varnothing} h$ ) und der Schleppspannung ( $\bar{\varnothing} \tau$ ) sowie die Froude- ( $Fr$ ) und Reynoldszahl ( $Re$ ) einzelner Überströmungsstufen der Versuche in Danzig (September 2014)

Überströmungsstufe	$\bar{\varnothing} q$ [l·s <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> ]	$\bar{\varnothing} v$ [ms <sup>-1</sup> ]	$\bar{\varnothing} h$ [cm]	$\bar{\varnothing} \tau$ [Pa]	$Fr$ <sup>1)</sup>	$Re$ <sup>2)</sup>
<b>Begrünt</b>						
1	52	1,3	4,1	199	2,05	40.653
2/3	97	1,86	5,3	260	2,57	73.255
4	200	2,9	7,1	350	3,46	146.736
5	233	3,38	7,6	373	3,91	180.234
<b>Unbegrünt</b>						
1	41	n.m. <sup>3)</sup>	2,0	98	n.b. <sup>3)</sup>	n.b. <sup>3)</sup>
2	116	n.m. <sup>3)</sup>	5,0	245	n.b. <sup>3)</sup>	n.b. <sup>3)</sup>
3	153	n.m. <sup>3)</sup>	5,3	261	n.b. <sup>3)</sup>	n.b. <sup>3)</sup>
4	172	2,89	5,1	250	4,08	110.868
5	204	n.m. <sup>3)</sup>	6,6	321	n.b. <sup>3)</sup>	n.b. <sup>3)</sup>
6	500	6,67	7,7	378	7,66	359.417

$\bar{\varnothing} v$  und  $\bar{\varnothing} h$  entsprechen gemittelten Werten über die gesamte Böschungslänge  
<sup>1)</sup>  $Fr < 1$ : Strömen;  $Fr > 1$ : Schießen  
<sup>2)</sup>  $R \leq 2.350$ : Laminare Strömung;  $R \geq 2.350$ : Turbulente Strömung  
<sup>3)</sup> nicht messbar/ nicht zu berechnen

Tabelle 5-6: Mittlere Maximalwerte des spezifischen Abflusses ( $\bar{\varnothing} q_{max}$ ), der Fließgeschwindigkeit ( $\bar{\varnothing} v_{max}$ ), der Abflusshöhe ( $\bar{\varnothing} h_{max}$ ) und der Schleppspannung ( $\bar{\varnothing} \tau_{max}$ ) sowie des Gesamtbodenabtrags ( $\bar{\varnothing} SL_{cum}$ ) und des Clopper Soil Loss Index ( $\bar{\varnothing} CSLI_{cum}$ ) der einzelnen Strömungsrinnen der Kurzzeitversuche in Danzig (September 2014).

Rinne	Erosionsschutz	$\bar{\varnothing} q_{max}$ [l·s <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> ]	$\bar{\varnothing} v_{max}$ [ms <sup>-1</sup> ]	$\bar{\varnothing} h_{max}$ [cm]	$\bar{\varnothing} \tau_{max}$ [Pa]	$\bar{\varnothing} SL_{cum}$ [cm]	$\bar{\varnothing} CSLI_{cum}$ [cm]
<b>Begrünt</b>							
1	nein	249	3,27	7,9	386	7,9	8,0
2	nein	217	3,49	7,3	359	1,6	2,0
<b>Unbegrünt</b>							
1	nein	115	n.m. <sup>1)</sup>	5,0	245	3,3	3,3
2	nein	500	6,67	7,7	378	3,0	3,0

<sup>1)</sup> nicht messbar

Aufgrund des relativ hohen Bodenabtrags im Vergleich zu den Überströmungsversuchen auf dem Rostocker Versuchsdeich, sind die Durchschnittswerte des mittleren Bodenabtrags  $SL_{cum}$  und des Clopper Soil Loss Index  $CSLI_{cum}$  nahezu identisch. Der kumulierte Bodenabtrag  $SL_{cum}$  und der kumulierte Clopper Soil Loss Index  $CSLI_{cum}$  werden mit dem spezifischen Abfluss  $q$  und dem kumulierten Abflussvolumen  $V_{cum}$  über die Abflussdauer dargestellt (Abbildung 5-15 und Abbildung 5-16 (begrünt) sowie Abbildung 5-17 und Abbildung 5-18 (unbegrünt)).

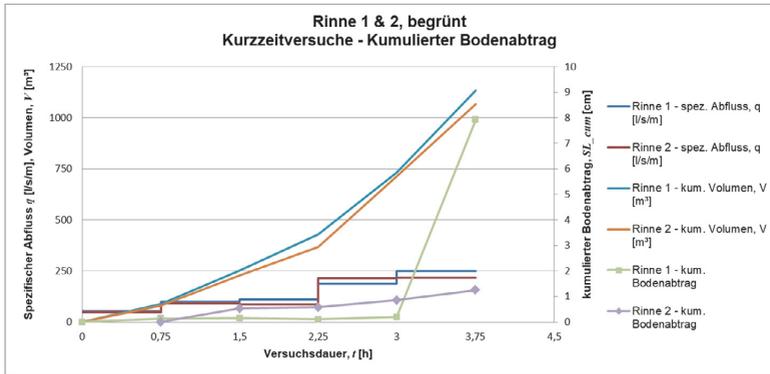


Abbildung 5-15: Ergebnisse der Überströmungsversuche im September 2014; Rinnen 1 & 2, begrünt; linke Ordinate  $\hat{=}$  spezifischer Abfluss ( $q$  [l/s·m<sup>-1</sup>]) und kumuliertes Überströmungsvolumen ( $V$  [m<sup>3</sup>]); rechte Ordinate  $\hat{=}$  kumulierter Bodenabtrag ( $SL_{cum}$  [cm]); Abszisse  $\hat{=}$  Gesamtversuchsdauer ( $t$  [h]).

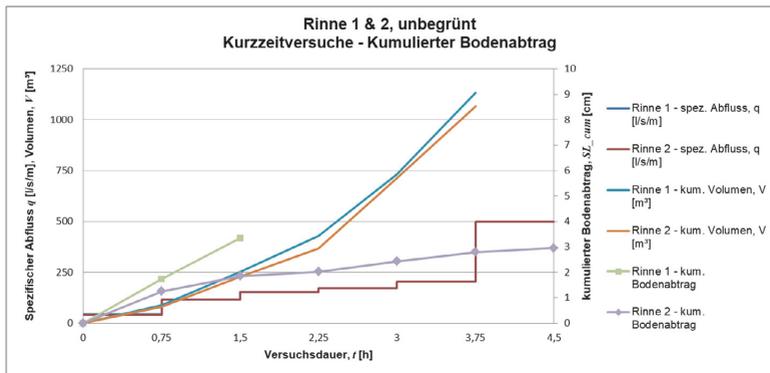


Abbildung 5-16: Ergebnisse der Überströmungsversuche im September 2014; Rinnen 1 & 2, unbegrünt; linke Ordinate  $\hat{=}$  spezifischer Abfluss ( $q$  [l/s·m<sup>-1</sup>]) und kumuliertes Überströmungsvolumen ( $V$  [m<sup>3</sup>]); rechte Ordinate  $\hat{=}$  kumulierter Bodenabtrag als Clopper Soil Loss Index ( $CSLI_{cum}$  [cm]); Abszisse = Gesamtversuchsdauer  $t$  [h].

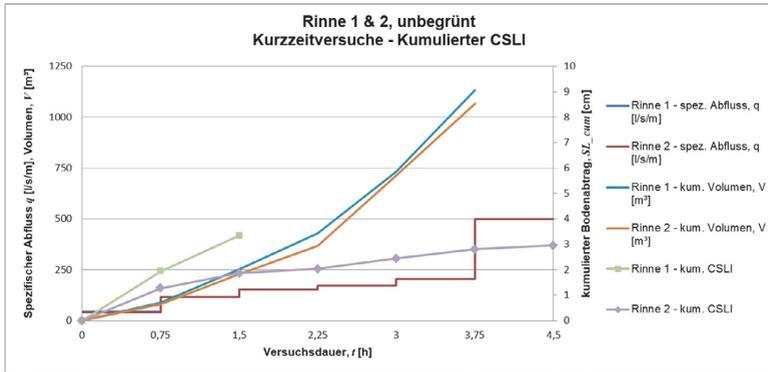


Abbildung 5-17: Ergebnisse der Überströmungsversuche im September 2014; Rinnen 1 & 2, unbegrünt; linke Ordinate  $\hat{=}$  spezifischer Abfluss ( $q$  [ $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ]) und kumuliertes Überströmungsvolumen ( $V$  [ $\text{m}^3$ ]); rechte Ordinate  $\hat{=}$  kumulierter Bodenabtrag ( $SL_{cum}$  [ $\text{cm}$ ]); Abszisse  $\hat{=}$  Gesamtversuchsdauer ( $t$  [ $\text{h}$ ]).

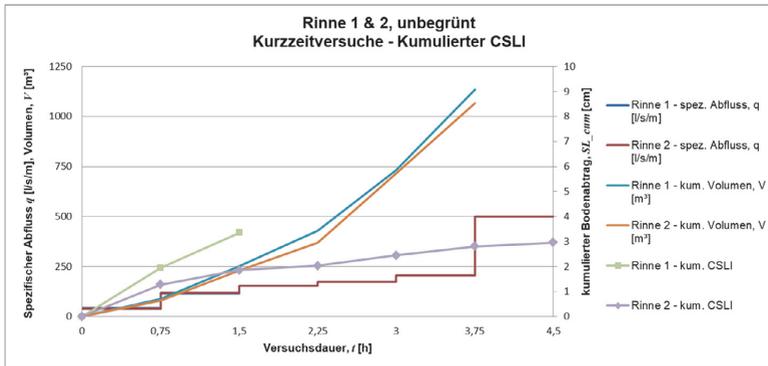


Abbildung 5-18: Ergebnisse der Überströmungsversuche im September 2014; Rinnen 1 & 2, unbegrünt; linke Ordinate  $\hat{=}$  spezifischer Abfluss ( $q$  [ $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ]) und kumuliertes Überströmungsvolumen ( $V$  [ $\text{m}^3$ ]); rechte Ordinate  $\hat{=}$  kumulierter Bodenabtrag als Clopper Soil Loss Index ( $CSLI_{cum}$  [ $\text{cm}$ ]); Abszisse = Gesamtversuchsdauer  $t$  [ $\text{h}$ ].

Unter Berücksichtigung der auf die Böschungsoberfläche wirkenden Schlepptension  $\tau$  wurden die Einzelwerte des mittleren Bodenabtrags  $SL_{cum}$  bzw. des mittleren Clopper Soil Loss Index  $CSLI_{cum}$  dargestellt (Abbildung 5-19).

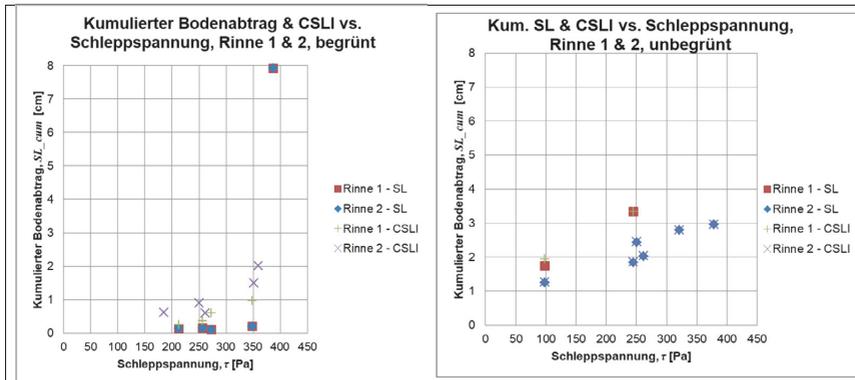


Abbildung 5-19: Darstellung des Bodenabtrags ( $SL_{cum}$ , links) sowie des Clopper Soil Loss Index (rechts,  $CSLI_{cum}$ ) in Abhängigkeit von der auf der Böschungsoberfläche wirkenden Schleppspannung ( $\tau$ ) aller Versuchsreihen auf den Rinnen 1 & 2.

Ein Nachteil der Erosionsmessung mit dem Spitzentaster ist, dass der Bodenabtrag bei den hier durchgeführten Versuchen lediglich an fünf Punkten im vorgelagerten Bereich des jeweiligen Testabschnitts gemessen wird (vgl. Abschnitt 4.2.2.1). Diese Messungen dienen der Berechnung eines Durchschnittswerts für den gesamten Testabschnitt. Um diesen Nachteil zu umgehen, wurde der Zustand der Böschungsoberfläche eines jeden Testabschnitts vor und nach jedem Einzelversuch zusätzlich mit einer Erosionskategorie bzw. einer Erosionsnummer von 1 bis 4 bewertet (vgl. Abschnitt 2.2.2.1). Obwohl sich mit dieser Methode der Bodenabtrag nicht quantifizieren lässt, ermöglicht sie die Beschreibung der Böschungsoberfläche eines gesamten Testabschnitts:

- 1 = Ohne Schaden.
- 2 = Einzelner Schaden/ erste Schadstelle.
- 3 = Mehrere Schadstellen unterschiedlicher Größe.
- 4 = Versagen der Deichböschung, großflächige Freilegung des Deichkerns.

Wie auch  $SL_{cum}$  oder  $CSLI_{cum}$  werden in Tabelle 5-7 und Abbildung 5-20 die Erosionsnummern mit der Schleppspannung  $\tau$  bei Versuchen in begrünten und unbegrünten Rinnen verglichen.

Tabelle 5-7: Zusammenstellung der gemittelten Erosionsnummern aller Versuchsreihen auf den Rinnen 1 & 2 im begrüntem und unbegrüntem Zustand der Böschungsoberflächen.

Versuchsnummer	Rinne 1 begrünt	Rinne 2 begrünt	Rinne 1 unbegrünt	Rinne 2 unbegrünt
1	1,2	1,6	2,4	2,1
2	1,6	2,1	2,7	2,2
3	1,9	2,4	-	3,0
4	2,2	2,6	-	3,0
5	3,1	2,8	-	3,0
6	-	-	-	3,0

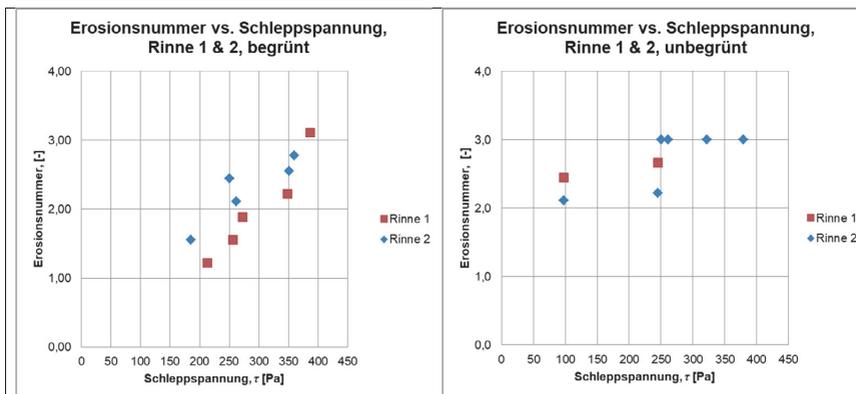


Abbildung 5-20: Darstellungen gemittelten Erosionsnummern in Abhängigkeit von der Schleppspannung ( $\tau$ ) aller Versuchsreihen auf den Rinnen 1 & 2 im begrüntem (links) und unbegrüntem (rechts) Zustand der Böschungsoberflächen.

Zur nachträglichen Zuordnung bzw. zur Kontrolle der vergebenen Erosionsnummern werden Fotos jedes Testabschnitts und der einzelnen Versuchsreihen zusammengefasst. Hier lassen sich grundsätzlich je nach Auflösung, Beleuchtung Kamerawinkel und -brennweite Aussagen zum Zustand der Böschungsoberfläche ableiten (Abbildung 5-21a und 5-21b).

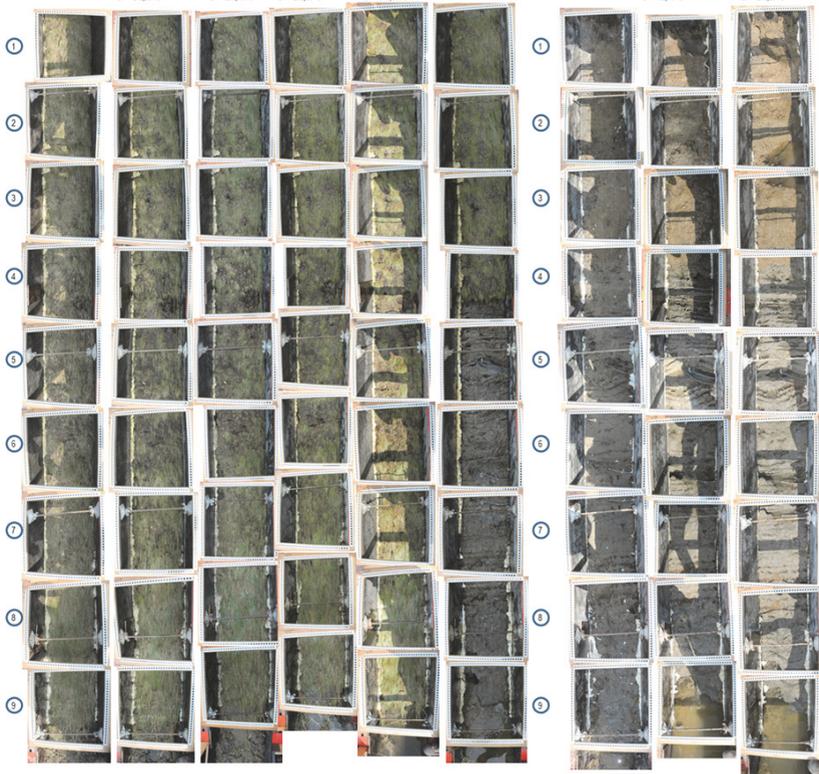


Abbildung 5-21a: Fotografische Darstellungen jeder Versuchsreihe unter Berücksichtigung der einzelnen Testabschnitte in Rinne 1. Jeweilige Nummerierung: (1) = Testabschnitt 1 an der Deichkrone, [...], (9) = Testabschnitt 9 am Deichfuß. Jeweilige Reihenfolge von links nach rechts: Rinnenausgangszustand, Versuche 1, 2, 3, 4, 5, 6.

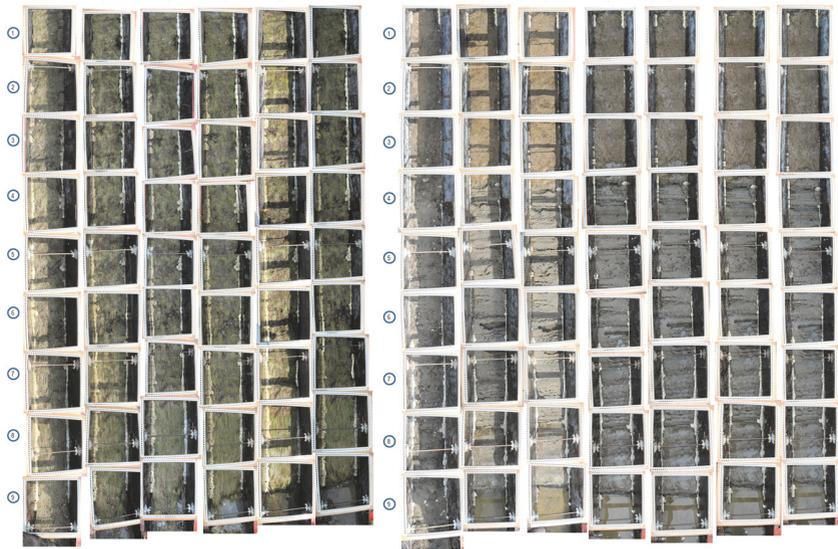


Abbildung 5-22b: Fotografische Darstellungen jeder Versuchsreihe unter Berücksichtigung der einzelnen Testabschnitte in Rinne 2. Jeweilige Nummerierung: (1) = Testabschnitt 1 an der Deichkrone, [...], (9) = Testabschnitt 9 am Deichfuß. Jeweilige Reihenfolge von links nach rechts: Rinnenausgangszustand, Versuche 1, 2, 3, 4, 5, 6.

## 5.4 Fazit zur Ergebnisdarstellung der Überströmungsversuche

Die Ergebnisse der großmaßstäblichen Versuche auf den Versuchsdeichen in Rostock und Danzig zeigen, dass das Verfahren in Anlehnung an ASTM D6460 grundsätzlich und wiederholend auf verschiedenen stark geböschten Erdbauwerken, mit unterschiedlichen Oberflächen (begrünt, unbegrünt, mit oder ohne Erosionsschutzprodukt etc.) durchführbar ist. Auch sind Versuchsdauer und einwirkende hydraulische Kräfte den Versuchsumständen entsprechend einfach variierbar oder messbar. Entgegen der im Vorfeld aufgestellten Hypothesen konnten bei den durchgeführten großmaßstäblichen Versuchen nahezu keine kritischen hydraulischen Parameter bestimmt werden, da vor allem in Rostock nahezu bei keinem der Versuche signifikante Mengen an Bodenabtrag ermittelt werden konnte. Auch die Versuche mit vorheriger Beschädigung der Böschungsoberfläche ergaben keine erhöhten Bodenabtragswerte und führten nicht zu einem Böschungsversagen. Die Versuche in Danzig zeigen zunächst wenig Bodenabtrag, bis zum Moment des Böschungsversagens, also dem Abrutschen der nahezu gesamten Deckschicht in einer der beiden Rinnen, was zu einem sehr hohen mittleren Bodenabtragswert im Gesamtergebnis führt. Da bei den Versuchen kaum Sedimentation suggestierende

Werte gemessen wurden, liegen die Ergebnisse des mittleren Bodenabtrags  $SL_{cum}$  und des mittleren Clopper Soil Loss Index  $CSLI_{cum}$  sehr nah beieinander und können als beinahe identisch betrachtet werden.

Trendlinien zur Bestimmung etwaiger kritischer hydraulischer Parameter analog zu den NTPEP-Versuchen wurden im Rahmen der Ergebnisdarstellung nicht erzeugt. Sie würden im Zweifel zu hohe oder zu niedrige Böschungsstabilitäten suggerieren.

Folgende Vorteile der angewendeten Methodik bei der Durchführung der großmaßstäblichen Überströmungsversuche können festgehalten werden:

- Der einfacher Versuchsaufbau mit mobilen Rinnenelementen erlaubt es prinzipiell, auch auf ähnlichen Erdbauwerken installiert zu werden.
- Eine einfache, schnell anwendbare und für die Art der Versuchsdurchführung hinreichend genaue Messtechnik ( $v$ ,  $h$ ,  $SL$ ), die auch von fachfremden Mitarbeitern bedient werden kann.
- Aufnahme von Messwerten ( $v$ ,  $h$ ,  $SL$ ) an immer derselben Stelle an den Testabschnittsgrenzen.
- Die Oberflächenhöhe als Maß für Bodenabtrag oder -akkumulation wird bei den durchgeführten Versuchen an maximal 65 Punkten (Rostock, Rinnen auf Querschnitten D, E, F und G) bzw. 45 Punkten (Danzig) je Rinne ermittelt.
- Durch die Begrenzung der Rinnenbreite auf 0,6 m können auf den jeweiligen Böschungsoberflächen große hydraulische Kräfte generiert werden.
- Grundsätzlich ist die Bestimmung eines kritischen Parameters ( $v_{crit}$ ,  $\tau_{crit}$ ) als hydraulische Belastungsgrenze für die jeweils betrachtete Böschungsoberfläche möglich, falls die aufeinander folgenden Versuchsreihen steigenden Bodenabtrag ergeben, mit mindestens einem finalen Wert, der den zuvor definierten kritischen Bodenabtragswert übertrifft.

Als Nachteile der angewendeten Methodik bei der Durchführung der großmaßstäblichen Überströmungsversuche können festgehalten werden:

- Die jeweilige Größe und das Gewicht der einzelnen Rinnenelemente mit der gewählten Kombination aus einer Rahmenholzkonstruktion mit Siebdruckplatten und L-Stahlprofilen bringen Schwierigkeiten beim Aufbau der Rinnen mit sich. So muss vor jeder Versuchsdurchführung mehrfach durch mehrere Mitarbeiter die Böschungsoberfläche im Versuchsbereich betreten werden.
- Die Einteilung der Überströmungsrinnen in Testabschnitte bringt einerseits o.g. Vorteile, führt andererseits dazu, dass ausschließlich an einem fixen Punkt je Testabschnitt bestimmte Messwerte quantitativ aufgenommen werden können.
- Ob Erosion oder Ablagerung auf den Oberflächenbereichen zwischen den einzelnen Testabschnittsgrenzen stattfand, kann ausschließlich subjektiv durch die Beschreibung der Böschungsoberflächenbeschaffenheit nach der Überströmung erfasst werden.

- Die Oberflächenhöhe als Maß für Bodenabtrag oder -akkumulation wird bei den durchgeführten Versuchen an maximal nur 65 Punkten bei einer Rinnengesamtfläche von ca. 4,68 m<sup>2</sup> (Rostock, Rinnen auf Querschnitten D, E, F und G) bzw. 45 Punkten bei einer Rinnengesamtfläche von ca. 4,02 m<sup>2</sup> (Danzig) ermittelt.

---

## 6. Diskussion der Methoden und Ergebnisse

Die angewandten Methoden zur Ermittlung von Böschungsstabilitäten wurden auf verschiedenen Versuchsdeichen aus unterschiedlichen Materialien – mit oder ohne Erosionsschutzprodukt, grasbewachsen oder unbegrünt – beschrieben und durchgeführt. Die Vor- und Nachteile wurden aufgezeigt. Im Folgenden sollen der Versuchsaufbau und die Messtechnik sowie die Ergebnisse bzw. deren Auswertung oder Darstellung diskutiert und interpretiert werden.

### 6.1 Zu den Laborüberströmungsversuchen – Überprüfung der Messmethoden

Grundsätzlich funktionieren die drei in Abschnitt 4.1.1.1 beschriebenen Methoden (Beschreibung des Probenoberflächenzustandes, Laserscan der Probenoberfläche, Spitzentaster) zur Ermittlung von Erosion, wenn auch unter teilweise erheblichem Zeitaufwand. Aufgrund der vergleichsweise geringen Durchflüsse in der Laborströmungsrinne wurde bei begrünten Proben mit dem Spitzentaster kein signifikanter Bodenabtrag festgestellt. Die Laserscanmethode funktioniert hier aufgrund von Schattenwurf der Pflanzen nicht.

Bei unbegrüntem Bodenproben funktioniert die Laserscanmethode sehr gut. Es lassen sich eindeutige Werte des Bodenabtrags darstellen und der mittlere Bodenabtrag einer Probe berechnen sowie mögliche Probenfehler bzw. die daraus resultierende Erosion feststellen. Mit dem berechneten Volumen des Bodenabtrags können anschließend die Erosionsraten bestimmt werden. Die Darstellungen der Laserscanergebnisse erlauben es darüber hinaus, die Entwicklung der Erosion bis hin zum möglichen Totalversagen einer unbegrünten Probe nachzuvollziehen.

Bei fehlerfreien Proben in der Laborströmungsrinne ist es möglich, verschiedene Materialien und ihre Erosionsstabilität miteinander zu vergleichen. Aufgrund der Konstruktion der Laborströmungsrinne sowie der Einbaumethoden der Proben in die Strömungsrinne ist es nicht ausnahmslos möglich, gleiche und immer unter den gleichen Bedingungen wiederholbare Versuche durchzuführen. Häufigste Fehler sind Risse in den Proben, die während des Einbaus entstehen und somit die Versuche verfälschen und starke Erosion suggerieren. Mit Bezug auf die Entwicklung eines standardisierten Verfahrens zur Prüfung von begrüntem und unbegrünten Bodenproben ist die am Lehrstuhl entwickelte Laborströmungsrinne noch nicht geeignet.

### 6.2 Zum Versuchsaufbau

Für die Versuche in Rostock und Danzig wurden zwei im Grundsatz ähnliche, aber im Aufbau unterschiedliche Systeme für die Rinnenkonstruktion angewandt:

- Holzrahmenkonstruktionen mit Siebdruckplatten Beplankung auf einem L-Stahlprofil (Rostock); ca. 25 kg bis 40 kg je Element.
- Massive Rahmenschalungselemente (PERI®) als Kombination aus einer Stahlrahmenkonstruktion mit Siebdruckplattenbeplankung; >> 50 kg je Element (Danzig).

Der vom Autor für diese Art der Versuchsdurchführung favorisierte Rostocker Versuchsaufbau ermöglicht die Errichtung von drei parallelen Rinnen innerhalb eines Tages nahezu ohne technische Hilfsmittel. Hinzu kommt die Zeit, die für die Feineinstellungen des Rinnenaufbaus benötigt wird und ggf. für die Pumpeninstallation bzw. für das Verlegen der Rohre und den Einbau der Hubschütze. Insgesamt wird von etwa eineinhalb bis zwei Arbeitstagen pro Versuch ausgegangen, falls alle Rinnenelemente und das notwendige Zubehör vor Ort sind.

Der Versuchsaufbau in Danzig ist wesentlich arbeitsintensiver. So müssen die schweren Rahmenschalungselemente mit technischen Hilfsmitteln oder hohem Personaleinsatz auf die Böschung gebracht werden. Zuvor werden große Bereiche der Böschungsoberfläche entfernt, um die Elemente gleichmäßig positionieren und ausrichten zu können. Darüber hinaus müssen die Rinnenelemente mit massiven Schraubverbindungen stabilisiert werden.

Im Gegensatz zum Rostocker ergaben sich beim Danziger Versuchsdeich außerdem konstruktionsbedingte Probleme, die zu erheblichem Bodenabtrag bzw. zu einem Totalschaden der Deichdeckschicht führten:

- Die für andere Versuche fest in der Deichdeckschicht im Bereich der Rinne 1 installierte Messtechnik (Feuchtigkeitssensoren) einschließlich Verkabelung im Zusammenspiel mit einer geringeren Verdichtung darüber führten zu starkem Bodenabtrag oder zu einem Totalschaden in diesen Bereichen.
- Die Vegetationsschicht hat sich nicht ausreichend mit der darunter liegenden Asche-Schlick-Schicht verbunden, wodurch sich eine Gleitfuge ausgebildet.
- Die schwache Verbindung der einzelnen Schichten untereinander am Deichfuß führen zu einem Totalschaden.

Beiden Aufbaumethoden geht einher, dass es schwierig ist, die Böschungsoberfläche aufgrund des relativ häufigen Betretens nicht ungestört zu lassen. Dieser Einfluss auf das eigentliche Versuchsobjekt kann unter Umständen das finale Ergebnis beeinträchtigen.

Insgesamt hat die Art des Rinnenauf- und -einbaus Einfluss auf die Versuchsergebnisse:

- Die Befestigung der Rinnenwände in Schlitzten (Rostock) oder in der Böschungsoberfläche (Danzig) führt unter Umständen zur Einspannung der Grasnarbe zwischen den Wandelementen. Erosion von Grasnarbestücken  $b > 0,6$  m ist nicht möglich.
- Wandübergänge müssen sauber hergestellt sein, damit keine Turbulenzen davon ausgehen.
- Bereiche stärkerer Verdichtung können höhere Stabilität gegen Erosion suggerieren.

Unter Berücksichtigung des möglichen Einsatzzwecks, nämlich zur Prüfung von begrüntem Deichbinnenböschungen hinsichtlich der Stabilität gegen Erosion, kann der zuvor beschriebene Versuchsaufbau des Rostocker Versuchsdeichs empfohlen werden. Trotz etwaiger oben beschriebener Nachteile ist es damit möglich, mit einem für den Versuchsmaßstab vergleichsweise geringen Arbeitsaufwand großmaßstäbliche Überströmungsversuche auf Deichbinnenböschungen durchzuführen.

## 6.3 Zur Versuchsdurchführung

### 6.3.1 Versuchsdauer

Die Versuchsdurchführung hat sich grundsätzlich an der ASTM D6460 orientiert. Bis auf die Versuchsdauer und die durch die Deichgeometrie vorgegebenen Böschungslänge und -neigung gibt es hier wenig Unterschiede. Im Gegensatz zur von der ASTM vorgeschlagenen Verfahrensweise, welche auch von NTPEP angewendet wird, wurden für die für diese Arbeit durchgeführten Kurzzeitversuche der begrünten bzw. unbegrüntem Deichbinnenböschungen einheitlich 45 Minuten statt 60 bzw. 30 Minuten angesetzt. Dies ist darin begründet, dass für die jeweilige Versuchsperiode in den Jahren 2013 und 2014 nur ein begrenztes Budget für die Pumpen zu Verfügung stand. Darüber hinaus ist anzumerken, dass 45 Minuten einen guten Kompromiss darstellt aus einerseits der Möglichkeit zur Durchführung von bis zu drei gleichzeitig stattfindenden Versuchen (Rostock 2013 und 2014) einschließlich der Messung der Fließgeschwindigkeit und der Abflusstiefe in jedem Testabschnitt aller Rinnen ist. Andererseits können mindestens fünf aufeinanderfolgenden Versuchsreihen mit jeweils steigender hydraulischer Belastung ( $q$ ,  $v$ ,  $h$ ,  $\tau$ ) innerhalb eines verlängerten Arbeitstages ohne die Notwendigkeit künstlichen Lichts (ca. 08:00 Uhr bis 20:00 Uhr) durchgeführt werden.

Da seitens ASTM keine Vorgaben für Langzeitversuche existieren, wurden für die Versuche auf den Rostocker Forschungsdeichen Versuchsdauern von mindestens sechs Stunden (2013) bzw. 18 bis 22 Stunden (2014) gewählt.

### 6.3.2 Erosionsmessung

Wie in Abbildung 4-16 gezeigt (vgl. Abschnitt 4.2.3), ist das Messen der verschiedenen hydraulischen Abflussparameter sowie des Zustands der Böschungsoberfläche nur eine Momentaufnahme des jeweiligen Testabschnitts vorgelagerten Bereich. So sind beispielsweise die an fünf Punkten mit einer Gesamtmessfläche von 0,001 m<sup>2</sup> ermittelten Messwerte des Bodenabtrags ( $SL$ ) gemittelt als Zustandsaussage für einen Bereich von 0,36 m<sup>2</sup> (Rostock) bzw. 0,444 m<sup>2</sup> (Danzig) definiert. Dies wiederum kann nur eine Annäherung an den tatsächlichen Zustand bezogen auf die Messgröße sein, da bereits unmittelbar vor, hinter oder neben dem Messpunkt ein anderes Resultat ermittelt werden könnte. Des Weiteren können beispielsweise zufällig am Messpunkt entfernte Steinchen eine lokal erhöhte Erosion suggerieren oder umgelegte Grashalme eine scheinbare Sedimentation am Messpunkt – ohne dass tatsächlich Bodenmaterial auf der Böschungsoberfläche umgelagert wurde.

Nichtsdestotrotz gibt das gewählte Messverfahren einen hinreichend genauen Überblick zum eigentlichen Zustand der Böschungsoberfläche vor und nach einem einzelnen Überströmungsversuch – auch unter Berücksichtigung der ermittelten Genauigkeit des Spitzentasters von theoretisch weniger als 2 mm (vgl. Tabelle 4-7). Umso wichtiger ist die in Danzig angewandte zusätzliche Bewertung des Testabschnittzustands mit Erosionsnummern 1 bis 4 (vgl. Abschnitt 5.3). Dies ermöglicht eine Bewertung der Messwerte einschließlich Aussagen zu deren Plausibilität.

## 6.4 Zur Versuchsauswertung

### 6.4.1 Rostock

Die Ergebnisse der großmaßstäblichen Überströmungsversuche auf den Rostocker Versuchsdeichen waren hinsichtlich des nicht erreichten kritischen Bodenabtrags von  $SL_{crit} = 1,27$  cm (0,5 in) gemäß der Vorgaben der ASTM D6460 insgesamt gut bis sehr gut. Die Werte des gemessenen Bodenabtrags sind teilweise im Millimeterbereich oder sogar gleich null oder darunter (siehe

Tabelle 5-2 und Tabelle 5-3 sowie Abbildung 5-4 bis Abbildung 5-11). Ebenso verhält es sich bei den Ergebnissen der Versuche mit künstlich hergestellten Schädstellen. Auch die Darstellung der Häufigkeitsverteilung der gemessenen Werte, eingeteilt in Bodenabtragskategorien (vgl. Tabelle 5-4), zeigt, dass über 66 % der Messungen Nullmessungen sind bzw. minimale Sedimentation suggerieren.

### 6.4.2 Danzig

Im Vergleich zu den Versuchen in Rostock wurden bei denen in Danzig nach jedem Einzelversuch und in nahezu allen Testabschnitten höhere Werte des Bodenabtrags gemessen.

Wie bereits in Abschnitt 4.1.3 beschrieben und in Abbildung 4-5 dargestellt, wurde während der Überströmungsversuche in Danzig festgestellt, dass die Tondichtung über die Deichkrone hinweg auf etwa 2,50 m Länge in die landseitige Böschung in Richtung Deichfuß verbaut ist. Das führte während der fünften Überströmungsstufe dazu, dass die gesamte bewachsene obere Schicht der Böschung vom vierten bis neunten Testabschnitt abrutschte. Deshalb wurden beträchtliche Unterschiede des Bodenabtrags  $SL_{cum}$  und des Clopper Soil Loss Index  $CSLI_{cum}$  (vgl. Tabelle 5-6) zwischen dem oberen und dem unteren Rinnenabschnitten gemessen. Um die Erosionsereignisse entlang der Böschungen differenzierter betrachten zu können, sind die Ergebnisse der beiden unterschiedlichen Rinnenabschnitte für die drei oberen Testabschnitte TA 1–3 und die sechs unteren Testabschnitte TA 4–9 in Tabelle 6-1 zusammengefasst.

Tabelle 6-1: Mittlere Maximalwerte des spezifischen Abflusses ( $\bar{Q} q$ ), der Fließgeschwindigkeit ( $\bar{Q} v$ ), der Abflusshöhe ( $\bar{Q} h$ ) und der Schleppspannung ( $\bar{Q} \tau$ ) sowie des Gesamtbodenabtrags ( $\bar{Q} SL_{cum}$ ) und des Clopper Soil Loss Index ( $\bar{Q} CSLI_{cum}$ ) der beiden Strömungsrinnen 1 und 2 in Danzig (September 2014). Hier Unterscheidung in die drei oberen Testabschnitte TA 1–3 und die sechs unteren Testabschnitte TA 4–9.

Rinne: Test- abschnitte	Erosions- schutz	$\bar{Q} q_{max}$ [l s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ]	$\bar{Q} v_{max}$ [ms <sup>-1</sup> ]	$\bar{Q} h_{max}$ [cm]	$\bar{Q} \tau_{max}$ [Pa]	$\bar{Q} SL_{cum}$ [cm]	$\bar{Q} CSLI_{cum}$ [cm]
<b>Begrünt</b>							
1:1–3	nein	249	2,74	9,7	474	0,5	0,7
1:4–9	nein	249	3,49	0,070	343	11,8	11,9
2:1–3	nein	217	2,61	0,093	457	1,8	1,9
2:4–9	nein	217	3,64	0,064	313	1,5	2,1
<b>Unbegrünt</b>							
1:1–3	nein	115	n.m. <sup>1)</sup>	0,050	245	6,8	6,8
1:4–9	nein	115	n.m. <sup>1)</sup>	0,050	245	1,6	1,6
2:1–3	nein	500	6,92	0,098	482	3,5	3,5
2:4–9	nein	500	7,00	0,068	333	2,7	2,7

<sup>1)</sup> nicht messbar

Auch grafisch sind die Ergebnisse für die Unterscheidung der oberen Testabschnitte TA 1–3 und der untern TA 4–9 in Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2 aufgearbeitet. Aufgrund der relativ großen Ähnlichkeit zwischen  $SL_{cum}$  und  $CSLI_{cum}$  werden hier nur die Werte des  $SL_{cum}$  betrachtet und diskutiert.

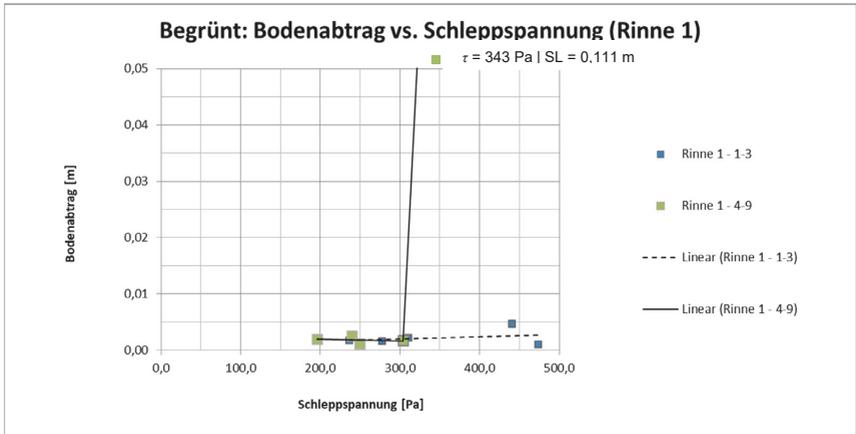


Abbildung 6-1: Ergebnisdarstellung des Bodenabtrags  $SL$  [m] in Rinne 1 mit Unterscheidung der oberen drei (TA 1–3) und der unteren sechs (TA 4–9) Testabschnitte.

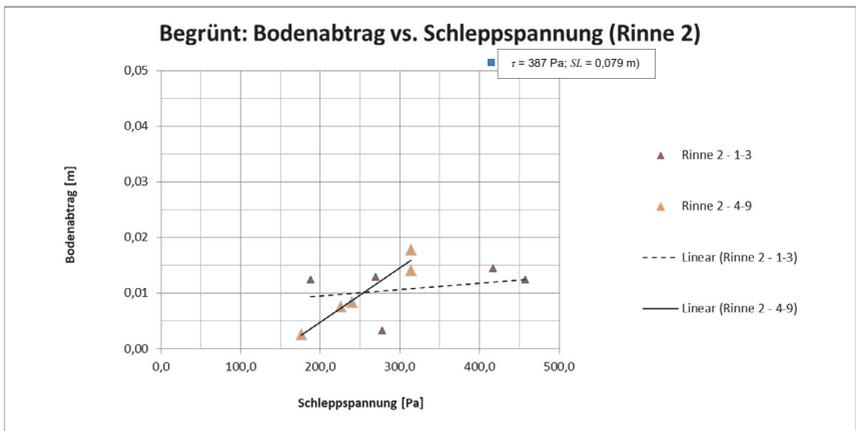


Abbildung 6-2: Ergebnisdarstellung des Bodenabtrags  $SL$  [m] in Rinne 2 mit Unterscheidung der oberen drei (TA 1–3) und der unteren sechs (TA 4–9) Testabschnitte.

Abbildung 6-1 zeigt für Rinne 1, dass innerhalb der ersten drei Testabschnitte TA 1–3 auch nach der fünften Überströmungsstufe nahezu kein Bodenabtrag ermittelt wurde ( $SL_{cum} < 0,5 \text{ cm}$ ). Nach den ersten vier Einzelversuchen mit jeweils steigendem Abfluss kam es zum Versagen der unteren sechs Testabschnitte TA 4–9. Der kritische Wert der Schleppspannung  $\tau$ , also der Wert, bei dem die Deckschicht abbricht, kann hier in Abbildung 6-1 mit etwa 300 Pa abgelesen werden. Ergänzend hierzu muss Abbildung 6-3 betrachtet werden: Zu erkennen ist, dass die

gesamte Deckschicht einschließlich der Vegetation während der fünften Überströmungsstufe ab Mitte des Testabschnitts TA 4 auf der Asche- bzw. Schlickabdeckung im unteren Teil der Böschung abrutschte. Hier kann angenommen werden, dass die Verbindung zwischen der Vegetationsschicht und der Deichdecke unzureichend war oder sogar fehlte. Die Böschungsoberfläche in Rinne 2 hielt dagegen den hohen hydraulischen Kräften stand (vgl.

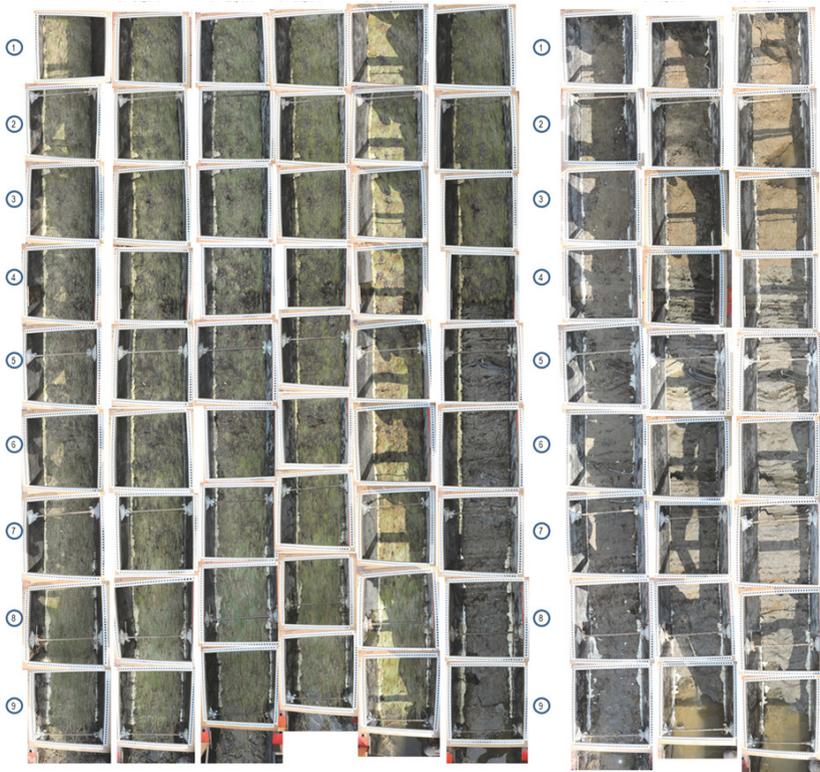


Abbildung 5-21).

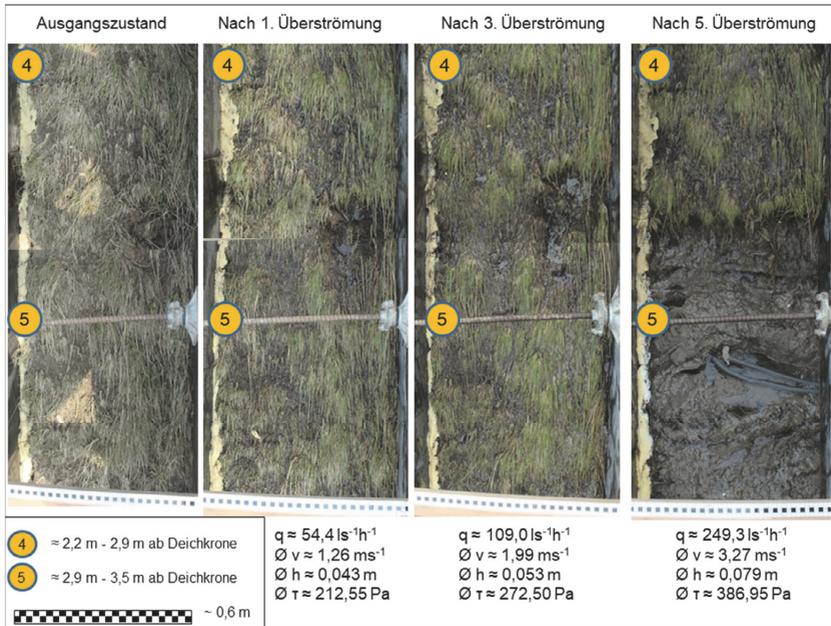


Abbildung 6-3: Entwicklung des Oberflächenzustandes der Rinne 1 im Bereich der Testabschnitte TA 4 und TA 5. Von links nach rechts: Ausgangszustand der Böschungsoberfläche vor dem ersten Einzelversuch, nach der ersten, nach der dritten und nach der fünften Überströmung.

Abbildung 6-2 lässt ebenfalls einen höheren Bodenabtrag in den unteren Testabschnitten TA 4–9 erkennen – auch sichtbar durch die lineare Trendlinie TA 4–9 mit größerem Anstieg. Dies beruht auf einem größeren Schaden am Deichfuß, da hier Kabel für Messinstrumente verlegt und mit weniger Verdichtung überbaut wurden. Beim Forschungsdeich in Danzig war die Verbindung zwischen der verdichteten Tonschicht im Untergrund, die als Dichtung diente, und der Asche-Schlack-Schicht schwach, womit sich eine Gleitlinie entwickelte und der Deichfuß versagte – bei beiden Rinnen (Abbildung 6-4).

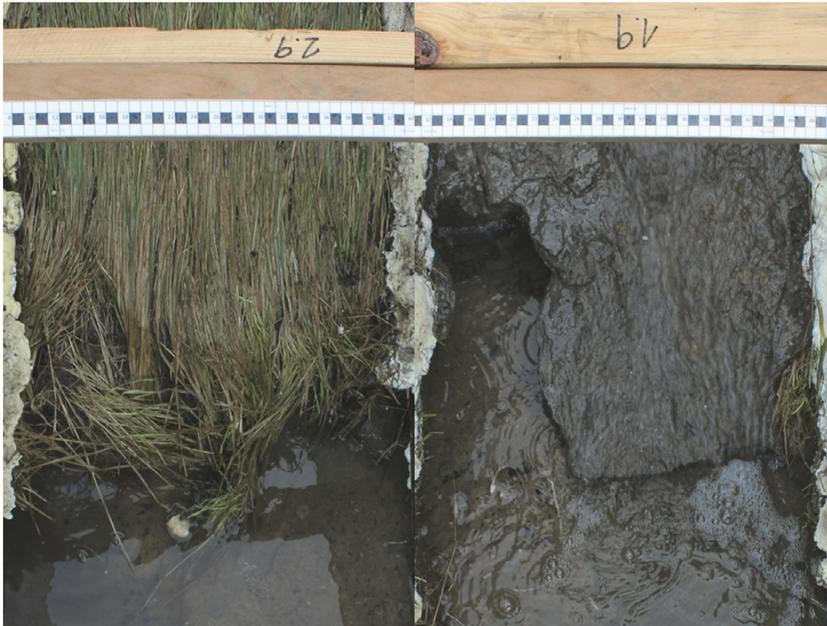


Abbildung 6-4: Zustand des Deichfußes im Testabschnitt TA 9 (rechts: Rinne 1; links: Rinne 2) nach der fünften Überströmung. Zu erkennen ist die Tondichtung im Untergrund und die Gleitfuge zwischen der Tondichtung und der Asche-Schlick-Schicht.

## 6.5 Hinweise zu den großmaßstäblichen Überströmungsversuchen

Zumindest bei den Versuchen in Danzig konnte ein kritischer Betrag hydraulischer Größen in beiden Gerinnen und unter beiden Bedingungen (begrünt und unbegrünt) bestimmt werden. Dies ist jedoch nur ein selektives Ergebnis von Fünf-punktmessungen eines Testabschnitts. Parallel dazu sollte die Bestimmung von Erosionszahlen in Anlehnung an van der Meer et al. (2010) zur Bewertung der einzelnen Testabschnitte vor und nach einem Überströmungsvorgangs angewendet werden.

Aufgrund der punktuellen Ergebnisse war die Verwendung von Trendlinien mit der besten Anpassung an die Datenpunkte nicht sinnvoll. Stattdessen wurden für die Diagramme der Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2 jeweils lineare Trendlinien gewählt, um die gerinnespezifischen Bodenverlustfunktionen zu definieren. Auf eine Verwendung von Trendlinien zur Darstellung einer möglichen oder theoretischen Entwicklung des Bodenabtrags in nacheinander stattfindenden Überströmungs-

vorgängen, wie von NTPEP gemäß ASTM angewandt (vgl. Abschnitt 3.3.1.2), wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch weitestgehend verzichtet – exponentielle oder degressive, aber auch lineare Trendlinien könnten ggf. eine falsche Erosionsstabilität bzw. Erosionsanfälligkeit einer Böschung suggerieren.

Für die Berechnung der Schleppspannung aller Versuche wurde ausschließlich der gravitationsbasierte Ansatz (vgl. Abschnitt 3.1.1.3) verwendet. Der impulsbasierte Ansatz gemäß ASTM (vgl. Abschnitt 3.2) lieferte bei zunehmenden Überströmungsraten und damit zunehmender Turbulenzen stark schwankende Schleppspannungswerte, wie auch Abbildung 6-5 noch einmal zusammenfassend zeigt.

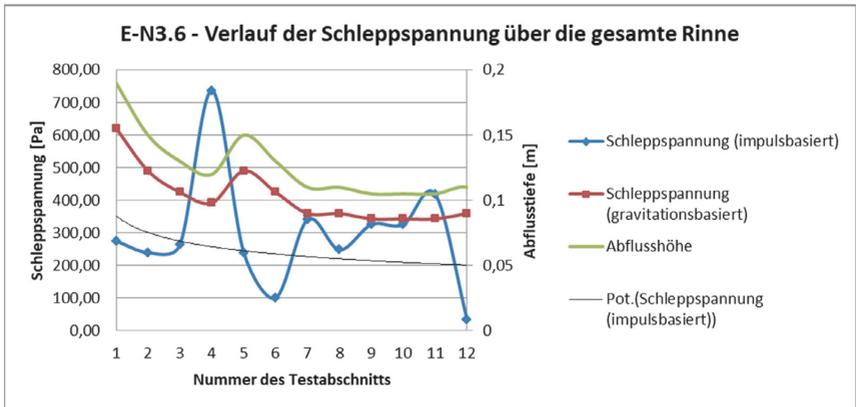


Abbildung 6-5: Beispiel zum Vergleich der berechneten Schleppspannung mit dem gravitationsbasierten Ansatz (rote Linie, eckig-waagerechte Marker) und dem impulsbasierten Ansatz (blaue Linie, eckig-gedrehte Marker) nach ASTM D6460. Die grüne dicke Linie entspricht der Abflusshöhe entlang des Rinneverlaufs, die schwarze dünne Linie stellt die gemittelte impulsbasierte Schleppspannung dar. Hier: Versuch Nummer E-N3.6, Rostock, Mai 2014.

---

## 7. Zusammenfassung

Deiche dienen dem Schutz vor Überschwemmungen. Um dies zu gewährleisten, sind Dichtung und Stützkörper sowie landseitige Dränkörper für die Stabilität und Funktionalität unerlässlich. Darüber hinaus schützen technische oder vegetative Maßnahmen die landseitigen Böschungen wirksam vor Erosion durch Überströmung oder Wellenüberlauf, meist nur bei sehr begrenzten zulässigen Überströmungsgeschwindigkeiten. So trägt die Stabilität gegen Erosion von Binnenböschungen von Fluss- und Seedeichen wesentlich zur Gesamtstabilität des Bauwerks und unmittelbar zum Schutz des Hinterlandes bei. Insbesondere Deiche, die über einen längeren Zeitraum wasserseitig aufgestaut und stark durchnässt werden, laufen Gefahr, durch Überströmungsprozesse zu versagen. Neben den Eigenschaften der Deichbaustoffe bestimmen auch Größe und Einwirkzeit der durch Überströmung verursachten hydraulischen Kräfte die Stabilität.

Im Gegensatz zu im sehr geringen Maß tolerierbaren Wellenüberläufen von Seedeichen gilt ein Stabilitätsverlust aufgrund unkontrollierter und dauerhafter Überströmung von Flussdeichen nach verschiedenen Empfehlungen, Regelwerken oder Merkblättern in der Regel als häufigster Versagensfall. Noch immer gibt es keine Angaben oder lediglich Schätzwerte zu tolerierbaren spezifischen Abflüssen. Das sich aus diesem Mangel ergebende Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung einer Möglichkeit zur Ermittlung der Erosionsstabilität von Deichbinnenböschungen. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen denen auf die Böschungsoberfläche einwirkenden hydraulischen Strömungsgrößen Fließgeschwindigkeit und Schleppspannung. Methoden zur Ermittlung, Beschreibung und Bewertung von Oberflächenerosionserscheinungen und -prozessen auf Deichbinnenböschungen sowie das US-amerikanische Verfahren ASTM D6460 zur großmaßstäblichen Bewertung der Funktionsfähigkeit von geosynthetischen Erosionsschutzprodukten auf Kanalsohlen werden für die Anwendbarkeit zur Prüfung der Erosionsstabilität von Deich- und Dammbauwerken untersucht und erprobt.

In dieser Arbeit wird gezeigt, dass auch die Überprüfung von Deichbinnenböschungen auf Grundlage des US-amerikanischen Standards ASTM D6460 grundsätzlich möglich ist. Die geometrischen Randbedingungen (Böschungslänge, Anzahl der Testabschnitte, Böschungsneigung) sind abhängig vom zu überprüfenden Erdbauwerk bzw. dessen Böschungsoberfläche – hier muss von den ASTM-Vorgaben abgewichen werden. Auch kann nicht ohne Weiteres ein kritischer hydraulischer Parameter, wie der spezifische Abfluss, die Schleppspannung oder die Fließgeschwindigkeit, verwendet werden, um die mögliche Stabilität gegen Erosion einer Böschung zu ermitteln. Es ist stets eine manuelle Bewertung der relevanten Böschungsabschnitte auf Grundlage einer Inaugenscheinnahme oder Vorher-Nachher-Fotografie vorzunehmen. Auch ist der definierte kritische Bodenabtrag von  $SL_{crit} = 1,27 \text{ cm}$  (0,5 in) nicht zwingend auf Deichbinnenböschungen

anzuwenden. Eine Definition seitens Betreiber bzw. zuständiger Behörde ist hier notwendig.

Insgesamt beweisen die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten 158 In-situ-Einzelversuche die ausgezeichnete Durchführbarkeit auf originalmaßstäblichen Deichen. Zudem sind grundsätzlich mehrere Versuche gleichzeitig oder Einzelversuche mit einem spezifischen Abfluss von bis  $q = 550 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$  möglich, wobei dieser Wert durch eine Erhöhung der Pumpenleistung noch erhöht werden kann.

Das standardisierte Messverfahren zur Erosionsermittlung mit einem auf das hier vorgestellte Verfahren angepassten Spitzentaster ermöglicht es, entlang der Rinne gleichmäßig verteilt die jeweils relative Oberflächenhöhe vor und nach einem Einzelversuch zu bestimmen und bietet darüber hinaus die Möglichkeit, einen mittleren Wert des Bodenabtrags je Rinne auf Grundlage mehrerer aufeinanderfolgender Einzelversuche zu bestimmen.

Zusammenfassend können folgende Vorteile des beschriebenen und untersuchten Verfahrens benannt werden:

- Versuchsdurchführung im Originalmaßstab auf Forschungs- oder Bestandsdeichen möglich.
- Einfacher Versuchsaufbau mit mobilen Rinnenelementen, welcher grundsätzlich beliebig erweiterbar und auch mit einem vergleichbar geringem Personaleinsatz und wenig technischer Unterstützung auf Böschungen installierbar ist.
- Relativ einfache, schnell anwendbare und für die Art der Versuchsdurchführung hinreichend genaue Messtechnik zur Ermittlung der Fließgeschwindigkeit, der Abflusstiefe sowie des Bodenabtrags.
- Durch die Begrenzung der Rinnenbreite auf 0,6 m können auf den jeweiligen Böschungsoberflächen je nach Pumpenleistung große hydraulische Kräfte generiert werden und gegebenenfalls mehrere Versuche gleichzeitig durchgeführt werden.
- In Abhängigkeit eines zu definierenden kritischen Bodenabtragswerts ist grundsätzlich die Bestimmung eines kritischen Parameters ( $v_{crit}$ ,  $\tau_{crit}$ ) als hydraulische Belastungsgrenze für die jeweils betrachtete Böschungsoberfläche möglich.
- Wird ein etwaiger Einsatz auf Bestandsdeichen oder -dämmen berücksichtigt, ist es mit dem beschriebenen Verfahren möglich, die Qualität hinsichtlich Erosionsstabilität einer Deichbinnenböschungsoberfläche zu ermitteln. Darüber hinaus lassen sich an Versuchsbauwerken innovative Materialien, neue Materialkombinationen, einzelne Bauwerkelemente – wie Dichtung, Deichfuß oder Deichkrone – oder Einbauten in originalmaß-

stäbliche Deichbauwerke hinsichtlich der Fähigkeit überströmungs-induzierter Erosion zu widerstehen, erproben.

Auch die Nachteile des angewandten Verfahrens sollen genannt sein:

- Die jeweilige Größe und das Gewicht der einzelnen Rinnenelemente mit der gewählten Kombination aus einer Rahmenholzkonstruktion mit Siebdruckplatten und L-Stahlprofilen bringen Schwierigkeiten beim Aufbau der Rinnen mit sich. So muss vor jeder Versuchsdurchführung mehrfach durch mehrere Mitarbeitende die Böschungsoberfläche im Versuchsbereich betreten werden. Ein Maschineneinsatz ist grundsätzlich denkbar, war aber nicht möglich.
- Die Einteilung der Überströmungsrinnen in Testabschnitte bringt die o.g. Vorteile, führt jedoch dazu, dass ausschließlich an einem fixen Punkt je Testabschnitt bestimmte Messwerte quantitativ aufgenommen werden können.
- Ob Erosion oder Ablagerung auf den Oberflächenbereichen zwischen den einzelnen Testabschnittsgrenzen stattfindet, kann ausschließlich subjektiv durch die Beschreibung der Böschungsoberflächenbeschaffenheit nach der Überströmung erfasst werden.
- Die Oberflächenhöhe als Maß für Bodenabtrag oder -akkumulation wird (bei den in Rostock und Danzig durchgeführten Versuchen) an maximal nur 65 Punkten bzw. 45 Punkten ermittelt.

Die Ergebnisse der großmaßstäblichen Versuche auf den Versuchsdeichen in Rostock und Danzig zeigen, dass das angewandte Verfahren prinzipiell und wiederholend auf verschiedenen stark geböschten Erdbauwerken, mit unterschiedlichen Oberflächen (mit oder ohne Bewuchs, mit oder ohne Erosionsschutzprodukt etc.) durchführbar ist. Auch sind Versuchsdauer und einwirkende hydraulische Kräfte den Versuchsumständen entsprechend einfach variierbar oder messbar gewesen. Entgegen der im Vorfeld aufgestellten Hypothesen konnten bei den durchgeführten großmaßstäblichen Versuchen nahezu keine kritischen hydraulischen Parameter (beispielsweise Fließgeschwindigkeit oder Schleppspannung) bestimmt werden, da vor allem in Rostock nahezu bei keinem der Versuche signifikante Mengen an Bodenabtrag ermittelt wurden. Auch die Versuche mit vorheriger Beschädigung der Böschungsoberfläche ergaben keine erhöhten Bodenabtragswerte und führten nicht zu einem Böschungsversagen.

Die Versuche in Danzig zeigen zunächst wenig Bodenabtrag, bis zum Moment des Böschungsversagens, also dem Abrutschen der nahezu gesamten Deckschicht in einer der beiden Rinnen, was zu einem sehr hohen mittleren Bodenabtragswert im Gesamtergebnis führt.

Da bei den Versuchen kaum Sedimentation suggerierende Werte gemessen wurden, liegen die Ergebnisse des mittleren Bodenabtrags ( $SL_{cum}$ ) und des mittleren Clopper Soil Loss Index ( $CSLI_{cum}$ ) sehr nah beieinander und können als beinahe identisch betrachtet werden.

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit sowie die daraus resultierenden Erkenntnisse zeigen, dass die Anwendung eines bestehenden und angepassten Prüfverfahrens, welches ursprünglich für Bewertung von Erosionsschutzprodukten entwickelt, sehr gut möglich ist. Die nun neue Fokussierung auf Erdbauwerke schafft die Möglichkeit, diese hinsichtlich der Erosionsstabilität einzelner Konstruktionselemente (wie Deckschicht oder landseitiger Dränkörper) wiederholgenau zu testen oder zu überprüfen und somit erheblich zur Prognose der Bauwerksstabilität beizutragen.

---

## Literaturverzeichnis

Bauer, T. (2011): Quantifizierung von Bodenerosion. Geländekartierung und Laserscananalysen in Niederösterreich / Petzenkirchen. Diplomarbeit. Universität Wien. Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie. Online verfügbar unter [http://othes.univie.ac.at/16440/1/2011-10-10\\_0602748.pdf](http://othes.univie.ac.at/16440/1/2011-10-10_0602748.pdf), zuletzt geprüft am 19.10.2023.

DIN 1054, 2021: Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau: Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1.

Bieberstein, A. (2004): Überströmbare Dämme - landschaftsverträgliche Ausführungsvarianten für den dezentralen Hochwasserschutz in Baden-Württemberg. Universität Karlsruhe, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Abteilung Erdambau und Deponiebau. Karlsruhe.

Bieberstein, A.; Wörsching, H. (2004): Mastix-Schotter-Deckwerk für Überströmbare Dämme und Deiche. In: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hg.): BAW-Workshop: Boden- und Sohl-Stabilität – Betrachtungen an der Schnittstelle zwischen Geotechnik und Wasserbau. Karlsruhe: BAW.

Blume, Hans-Peter; Brümmer, Gerhard W.; Horn, Rainer; Kandeler, Ellen; Kögel-Knabner, Ingrid; Kretzschmar, Ruben et al. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag; Spektrum, Akad. Verl.

DVWK-M 239/1996 (im Entwurf: DVWK-M 921/2020): Bodenerosion durch Wasser - Kartieranleitung zur Erfassung aktueller Erosionsformen.

Bollrich, G. (2013): Technische Hydromechanik 1. 7., durchges. und korr. Aufl. Berlin: Beuth (Band 1, Ed. 7).

Bonelli, S. (Hg.) (2012): Erosion in geomechanics. Applications to dams and levees. London, Hoboken, N.J.: ISTE; Wiley.

Bonelli, S. (Hg.) (2013): Erosion in geomechanics applied to dams and levees. London, Hoboken, NJ: ISTE Ltd.; John Wiley and Sons, Inc (Civil engineering and geomechanics series).

Bouziane, A.; Benemar, A.; Tahakourt, A. (2019): Finite element analysis of internal erosion effect on the stability of dikes. In: Lecture Notes in Civil Engineering 17, S. 113 - 123. DOI: 10.1007/978-3-319-99423-9\_11.

Briaud, J. L. (2008): Case Histories in Soil and Rock Erosion: Woodrow Wilson Bridge, Brazos River Meander, Normandy Cliffs, and New Orleans Levees. In: *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 134 (10), S. 1425–1447.

Briaud, J. L.; Ting, F. C. K.; Chen, H. C.; Cao, Y.; Han, S. W.; Kwak, K. W. (2001): Erosion Function Apparatus for Scour Rate Predictions. In: *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 127 (2), S. 105–113.

Bryan, R. B. (2000): Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. In: *Geomorphology* 32 (3-4), S. 385–415. DOI: 10.1016/S0169-555X(99)00105-1.

Buß, T.; Drücker, N.; Gerkensmeier, B.; Gönnert, G.; Hüwing, C. Krohn; J.-U. et al. (2012): Sturmflutschutz in Hamburg. Gestern - heute - morgen. Hg. v. Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer. Hamburg (Berichte des Landesbetriebes Straßen, Brücken und Gewässer, 10).

Cantré, S.; Olschewski, J.; Saathoff, F. (2012): Zur Forschung an Erosionsschutzsystemen. In: *Neue Landschaft* (11), S. 28–31.

Cantré, S.; Olschewski, J.; Saathoff, F. (2017): Flume-Scale Flume Experiments to Analyze the Surface Erosion Resistance of Dike Embankments Made of Dredge Materials. In: *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* Vol. 143, Issue 3. DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000375

Cantré, S.; Saathoff, F.; Große, A.-K.; Just, H. (2014): Two Research Dikes Made of Fine-Grained Organic Dredged Materials. In: South Baltic Conference on New Technologies and Recent Developments in Flood Protection. Gdansk.

CIRIA (Hg.) (2013): The international levee handbook. London: CIRIA (CIRIA, C731).

Clopper, P. (2016): ASTM D6460, Clopper Sool Loss Index. Rostock, 19.01.2016. E-Mail an J. Olschewski.

Crowley, R. W.; Bloomquist, D. B.; Shah, F. D.; Holst, C. M. (2012): The Sediment Erosion Rate Flume (SERF): A New testing Device for Measuring Soil Erosion Rate and Shear Stress. In: *Geotechnic Testing Journal* 35 (4), S. 649–659.

VTV 2004: De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland. Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor de tweede toetsronde 2001-2006. Ministrie van Verkeer en waterstaat, Delft.

DWA-M 507-1, 2011, fachlich auf Aktualität geprüft 2016: Deiche an Fließgewässern, Teil 1: Planung, Bau und Betrieb, zuletzt geprüft am 05.11.2023.

---

DeichO HH (2003): Hamburgische Verordnung über öffentliche Hochwasserschutzanlagen (Deichordnung), zuletzt geprüft am 25.09.2015.

Dornack, S. (2001): Überströmbare Dämme. Beitrag zur Bemessung von Deckwerken aus Bruchsteinen. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen. Heft 20. Dresden: Inst. für Wasserbau und Techn. Hydromechanik (Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, H. 20).

Duden. Die deutsche Rechtschreibung. Das umfassende Standardwerk auf der Grundlage der aktuellen amtlichen Regeln (2014). 26. Aufl. Berlin: Bibliographisches Institut (Duden - Deutsche Sprache in 12 Bänden, 1).

DVWK M-244/1997: Uferstreifen an Fließgewässern. Funktion, Gestaltung und Pflege. Bonn: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser (DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 244/1997).

EAK (2020): Die Küste - EAK 2002, Empfehlungen für Küstenschutzwerke, 3. korrigierte Ausgabe 2020. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW, Heft 88).

Einstein, H. A.; El-Samni, E.-S. A. (1949): Hydrodynamic Forces on a Rough Wall. In: *Reviews of Modern Physics* 21 (3), S. 520–524.

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

EurOtop (2007): Die Küste - Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual. Heide i. Holstein: Boyens Medien GmbH & Co. KG (Heft 73).

Förster, U. (2012): Praktische Untersuchungen zur rückschreitenden Erosion am Versuchsdeich „IJKdijk“. In: H. F. R. Schüttrumpf (Hg.): 42. Internationales Wasserbau-Symposium Aachen. Hochwasser - eine Daueraufgabe! Aachen.

Geisenheiner, P.; Oumeraci, H. (2008): Report Sea Dike breach initiation and development - Large Scale Experiments in GWK. FLOODsite Project Report. Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig.

DIN EN ISO 10318-1: Geokunststoffe - Teil 1: Begriffe (ISO 10318-1:2015 + AMD 1:2018); Dreisprachige Fassung EN ISO 10318-1:2015 + A1:2018, zuletzt geprüft am 05.11.2023.

prEN 189224, unveröffentlicht: Geosynthetics required for use in surface erosion control on slopes and banks, zuletzt geprüft am 05.11.2023.

Gerstgraser, C. (2000): Ingenieurbiologische Bauweisen an Fließgewässern. Grundlagen zu Bau, Belastbarkeiten, und Wirkungsweisen. Wien: Österreichischer Kunst- und Kulturverlag (Dissertationen der Universität für Bodenkultur, 52).

Gill, M. A. (1981): Bed erosion in rectangular long contraction. In: *Journal of the Hydraulics Division* 107 (Issue HY3), S. 273–284.

Große, A.-K (2016): Baggergut im Deichbau - Ein Beitrag zur geotechnischen Charakterisierung und Erosionsbeschreibung feinkörniger, organischer Sedimente aus dem Ostseeraum zur Einschätzung der Anwendbarkeit. Dissertation. Universität Rostock, Rostock.

GBB, 2010: Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB).

Grunewald, K.; Schmidt, W.; Kramer, M.; Michael, A. (1997): Beregnungsversuche zur abschätzung von bodenabtrag, oberflächenabfluss, nährstoff- und pestizidaustragen. In: *Archives of Agronomy and Soil Science* 42 (2), S. 107–117. DOI: 10.1080/03650349709385717.

Hai, T. L.; Van der Meer, J. W.; Verhagen, H. J. (2014): Wave Overtopping Simulator Tests on Vietnamese Sea Dikes. In: *Coastal Engineering Journal* 56 (3).

Hanson, G. J. (1990a): Surface Erodibility of Earthen Channels at High Stresses. Part I - Open Channel Testing. In: *Transactions of the ASAE* 33 (1), S. 127–131.

Hanson, G. J. (1990b): Surface Erodibility of Earthen Channels at High Stresses. Part II - Developing an In-Situ testing Device. In: *Transactions of the ASAE* 33 (1), S. 132–137.

Hanson, G. J.; Cook, K. R. (2004): Apparatus, test Procedures, And Analytical methodes to Measure Soil Erodibility In Situ. In: *Applied Engineering in Agriculture* 20 (4), S. 455–462.

Hanson, G. J.; Cook, K. R.; Britton, S. L. (2003): Evaluating Erosion Widening and Headcut Migration Rates for Embankment Overtopping Tests. In: ASAE (Hg.): Annual International Meeting 2003, July 27-30. Las Vegas (NV, USA).

Haselsteiner, R.; Werth, K.; Heerten, G.; Strobl, T. (2007): Überströmungssicherung von Deichstrecken mit Geokunststoffen – Ein wirtschaftlicher Sicherheitsgewinn. In: TU Dresden (Hg.): Wasserbaukolloquium 2007: „Fünf Jahre nach der Flut“, Hochwasserschutzkonzepte, Planung, Berechnung, Realisierung, Bd. 35 (Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, 35).

---

Henning, B. (Hg.) (2013): Bericht über das Hochwasser im Juni 2013 in Sachsen-Anhalt. Entstehung, Ablauf, Management und statistische Einordnung. Hg. v. Landesbetrieb für Hochwasser und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt. Online verfügbar unter [http://www.lhw.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik\\_und\\_Verwaltung/Landesbetriebe/LHW/neu\\_PDF/4.0/SB\\_Hochwasserschutz/Hochwasserbericht\\_2013.pdf](http://www.lhw.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/Landesbetriebe/LHW/neu_PDF/4.0/SB_Hochwasserschutz/Hochwasserbericht_2013.pdf), zuletzt geprüft am 21.09.2015.

Hewlett, H. W. M.; Boorman, Laurence A.; Bramley, L. A. (1987): Design of reinforced grass waterways. London (CIRIA report 116).

Hjulström, F. (1935): Studies of the Morphological Activity of Rivers as Illustrated by the River Fyris. Dissertation. Bulletin of the Geological Institute of the University of Uppsala.

DIN 19712, 2023: Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern, zuletzt geprüft am 05.11.2023.

hs engineers (2002): Serie 2001: Induktive Strömungsmesser ISM-2001. Online verfügbar unter <http://www.dr-schlueter-vdi.de/deutsch/ISM21-Pd.pdf>, zuletzt geprüft am 08.08.2016.

Hsieh, C.; Chen, C. (2014): Rolled Erosion Control Mat (RECP) and Vegetated Soil Beds Erosion Properties in Channel Flow Tests. In: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hg.): 10th International Conference on Geosynthetics.

Hughes, Steven A.; Shaw, Justin M.; Howard, Isaac L. (2012): Earthen Levee Shear Stress Estimates for Combined Wave Overtopping and Surge Overflow. In: *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.* 138 (3), S. 267–273. DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000135.

ILIT (2006): Investigation of the Performance of the New Orleans Flood Protection Systems in Hurricane Katrina on August 29, 2005. Chapter 9 - Overtopping Induced Erosion Studies. Hg. v. Independent Levee Investigation Team (ILIT). University of California. Berkeley. Online verfügbar unter <http://www.ce.berkeley.edu/projects/neworleans>, zuletzt geprüft am 28.05.2015.

Irrgang, M. (2008): Entwicklung von Prüfverfahren für Erosionsschutz- und Begrünungshilfen. Diplomarbeit. Universität Rostock. Lehrstuhl für landeskulturelle Ingenieurbauwerke, Geotechnik und Küstenwasserbau.

Jurisch, T. (2023): Untersuchungen hydraulischer Eigenschaften von Baggergut im Deichbau am Beispiel des Rostocker Forschungsdeiches. Dissertation. Universität Rostock, Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau.

Knubbe, A. (2011): Optimierung eines Regensimulators für die Prüfung von Erosionsschutz- und Begrünungshilfen. Bachelorarbeit. Universität Rostock. Lehrstuhl für landeskulturelle Ingenieurbauwerke, Geotechnik und Küstenwasserbau.

Koelewijn, A. R.; Rickert, S. J. H.; Peeters, P.; Depreiter D.; van Damme, M; Zomer, W. (2022): Overflow Tests on Grass Covered Embankments at the Living Lab Hetwige-Proseppolder: An Overview. In: Water 14 (18), Article Number 2859. DOI: 10.3390/w14182859.

Koll, C.; Wiemann, O. (2002): Bericht des Landesumweltamtes Brandenburg zum Elbehochwasser 2002. Hg. v. Landesumweltamt Brandenburg (LUA), Abteilung Gewässerschutz und Wasserwirtschaft. Potsdam (Fachbeiträge des Landesumweltamtes Brandenburg, Heft 73). Online verfügbar unter [http://www.mlul.brandenburg.de/media\\_fast/4055/elbehw02.pdf](http://www.mlul.brandenburg.de/media_fast/4055/elbehw02.pdf), zuletzt geprüft am 21.09.2015.

Korthenhaus, A. (2003): Probabilistische Methode für Nordseedeiche. Dissertation. Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Fachbereich Bauingenieurwesen.

Krauter, E. (2001): Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hänge) und ihrer Massenbewegungen. In: U. Smolczyk (Hg.): Grundbau-Taschenbuch. Sechste Aufl. 3 Bände. Berlin: Ernst & Sohn.

DIN 4047-2, 1988: Landwirtschaftlicher Wasserbau - Begriffe Hochwasserschutz, Küstenschutz, Schöpfwerke, zuletzt geprüft am 05.11.2023.

Lesch, S. (2012): Projekt DredgDikes - Ermittlung der Erosionsstabilität gegen Überströmen von begrünem Baggergut in einer kleinmaßstäblichen Strömungsrinne. Masterarbeit. Universität Rostock. Lehrstuhl für landeskulturelle Ingenieurbauwerke, Geotechnik und Küstenwasserbau.

Li, Y.-T.; Zeng, C.-J.; Yi-han, Z.; Hu, P.; Sun, T.-T.; Hou, Y.-J.; Mo, D.-X.; Wang, D.-T. (2022); Experimental Study of Overtopping on Sea Dikes and Coastal Flooding Under the Coupled Processes of Tides and Waves. In: China Ocean Engineering 36 (3), S. 413 - 426. DOI: 10.1007/s13344-022-0037-4.

LfU BW (2004): Überströmbare Dämme und Dammscharten. Hg. v. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

LU MV (Hg.) (2009): Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern. Übersichtsheft - Grundlagen, Grundsätze, Standortbestimmung und Ausblick. 1. Aufl., zuletzt geprüft am 19.10.2023.

---

LU MV (Hg.) (2022): Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern. Themenheft 2-5 - Referenzhochwasserstand und Bemessungshochwasserstand, zuletzt geprüft am 05.11.2023

LWaG MV (1992): Wassergesetz des Landes Mecklenburg-Vorpommern, vom 10.07.2008, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

LWG SH (2019): Wassergesetz des Landes Schleswig-Holstein, vom 06.01.2004, zuletzt geprüft am 19.10.2023.

M AEBEL (2022): Merkblatt über die Anwendung von Erosionsschutzprodukten und Begrünungshilfen aus natürlichen und synthetischen Materialien im Erd- und Landschaftsbau des Straßenbaues. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, AG Erd- und Grundbau, AK Erosionsschutz und Begrünungshilfen. Gelbdruck Stand 09.06.2022. Online verfügbar unter [https://www.auf.uni-rostock.de/storages/uni-rostock/Alle\\_AUF/AUF/IW/PDF/5-4-1-M\\_AEBEL-09Juni2022-Gelbdruck.pdf](https://www.auf.uni-rostock.de/storages/uni-rostock/Alle_AUF/AUF/IW/PDF/5-4-1-M_AEBEL-09Juni2022-Gelbdruck.pdf), zuletzt geprüft am 26.11.2023.

Markiwitz, F. (2022): Berechnungstest zur Prüfung von Erosionsschutzprodukten. Überprüfung der aktuellen Norm DIN CEN/TS 17445:2021-07 im Praxistest. Bachelorarbeit. Universität Rostock. Professur Geotechnik und Küstenwasserbau.

Marsh-McBirney, Inc. (1990): Flo-Mate Model 2000 Portable Flowmeter Instruction Manual. Online verfügbar unter [www.hachflow.com/pdf/Model\\_2000\\_Manual.pdf](http://www.hachflow.com/pdf/Model_2000_Manual.pdf), zuletzt geprüft am 08.08.2016.

MBLU M-V (1994): Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz M-V. Fundstelle: Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern.

MAR 2008, 2008: Merkblatt zur Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen. Online verfügbar unter [https://izw.baw.de/publikationen/merkblaetter/0/BAWMerkblatt\\_Regelbauweisen\\_Boeschungs\\_Sohlensicherungen\\_MAR\\_2008.pdf](https://izw.baw.de/publikationen/merkblaetter/0/BAWMerkblatt_Regelbauweisen_Boeschungs_Sohlensicherungen_MAR_2008.pdf), zuletzt geprüft am 05.11.2023

MSD 2011, 2011: Merkblatt zur Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen. Online verfügbar unter [http://vzb.baw.de/publikationen/merkblaetter/0/BAWMerkblatt\\_Standsicherheit\\_Daemme\\_MSD\\_2011.pdf](http://vzb.baw.de/publikationen/merkblaetter/0/BAWMerkblatt_Standsicherheit_Daemme_MSD_2011.pdf), zuletzt geprüft am 05.11.2023.

Naudascher, E. (1992): Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke. Zweite, verbesserte Auflage. Wien: Springer Vienna.

Németh, E.; Eppel, J.; Boeker, J. (2011): Erarbeitung und Verifizierung von Auswahlkriterien für geosynthetische Erosionsschutzsysteme. Schlussbericht. Hg.

v. SKZ-KFE gGmbH und Bayrische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau. Würzburg, Veitshöchheim.

Niesche, H.; Krüger, F. (1998): Das Oder-Hochwasser 1997 - Verlauf, Deichschäden und Deichverteidigung. Hg. v. Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, Heft 1/1998). Online verfügbar unter [http://www.geobasis-bb.de/GeoPortal1/produkte/fachkarten/lbgr/pdf/1\\_98\\_Niesche\\_15-22.pdf](http://www.geobasis-bb.de/GeoPortal1/produkte/fachkarten/lbgr/pdf/1_98_Niesche_15-22.pdf), zuletzt geprüft am 21.09.2015.

NTPEP (2015): Large-Scale Channel Erosion Testing (ASTM D 6460, modified). Large-Scale Reports. Hg. v. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). National Transportation Product Evaluation Program (NTPEP). Online verfügbar unter <http://www.ntpep.org/Pages/ECPReports.aspx#section2> zuletzt geprüft am 16.11.2015 bzw. unter <https://transportation.org/product-evaluation-and-audit-solutions> zuletzt geprüft am 26.11.2023.

Olschewski, J. (2010): Entwicklung einer Strömungsrinne zur Ermittlung hydraulischer Bemessungsgrößen für ingenieurbioologische Erosionsschutzprodukte. Masterarbeit. Universität Rostock. Lehrstuhl für Landeskulturelle Ingenieurbauwerke, Geotechnik und Küstenwasserbau.

Olschewski, J.; Cantré, S.; Saathoff, F. (2012): Proposals for Characteristic Index Parameters for erosion control Products. In: *Sciete Hydrotechnique de France* (Hg.): 6th ICSE. Book of Abstracts. 6th International Conference on Scour and Erosion. Paris, Aug. 27-31.

Olschewski, J.; Cantré, S.; Saathoff, F. (2013): Vorschläge für zukünftige Indexparameter für Erosionsschutzprodukte und -systeme. In: M. Ziegler (Hg.): 13. Informations- und Vortragsveranstaltung über "Kunststoffe in der Geotechnik", S. 17–22.

Olschewski, J., Cantré, S., Saathoff, F., Duszyński, R., and Ossowski, R. (2014). Overflowing tests at the Polish DredgDikes research dike – stability of the dike surface against erosion. In: *Engineering Structures and Technologies*, 6(4), S. 159–168. DOI: 10.3846/2029882X.2015.1074528.

Oumeraci, H.; Möller, J.; Schüttrumpf, H. F. R.; Richwien, W.; Weissmann, R. (2001): Belastungen der Binnenböschungen von Seedeichen durch Wellenüberlauf - Abschlussbericht. Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig; Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau, Universität Essen. Braunschweig/Essen.

---

Pan, Y.; Li, L.; Amini, F.; Kuang, C. (2013): Full-Scale HPTRM-Strengthened Levee Testing under Combined Wave and Surge Overtopping Conditions. Overtopping Hydraulics, Shear Stress, and Erosion Analysis. In: *Journal of Coastal Research* 286, S. 182–200. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-12-00010.1.

Pan, Y.; Li, L.; Amini, F.; Kuang, C. (2015): Overtopping erosion and failure mechanism of earthen levee strengthened by vegetated HPTRM system. In: *Ocean Engineering* 96, S. 139–148. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.12.012.

Patt, H.; Jürging, P.; Kraus, W. (2009): Naturnaher Wasserbau. Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern. 3., aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Pepperl + Fuchs (2014): Ultraschallsensor UC500-30GM-E6R2-V15. Online verfügbar unter [http://files.pepperl-fuchs.com/selector\\_files/navi/productInfo/45/450053d.pdf](http://files.pepperl-fuchs.com/selector_files/navi/productInfo/45/450053d.pdf), zuletzt geprüft am 08.08.2016.

Piontkowitz, T.; Verhagen, H. J.; Verheij, H.; Mai Cao, T.; Dassanayake, D.; Roelvink, D. et al. (2009): EroGRASS - Failure of Grass Cover Layers at Seaward and Shoreward Dike Slopes. Design, Construction and Experimental Procedure. Hg. v. EroGRASS User Group. Lemvig (Denmark), zuletzt geprüft am 28.05.2015.

Queißer, J. (2006): Entwicklung landschaftsverträglicher Bauweisen für überströmbare Dämme. Dissertation. Universität Karlsruhe, Karlsruhe. Institut für Wasser und Gewässerentwicklung - Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, zuletzt geprüft am 22.05.2015.

Rechtern, J. (2003): Standsicherheitsnachweise für Deichbauten. In: EFUC (Hg.): 1. EFUC-Konferenz 2003, 2-4 June, Suderburg. Online verfügbar unter <http://www.efuc.org/old/suderburg03/papers/3-Rechtern.pdf>, zuletzt geprüft am 06.10.2015.

Richter, G. (Hg.) (1998): Bodenerosion. Analyse und Bilanz eines Umweltproblems. Darmstadt: Wiss. Buchges.

Saathoff, F.; Bräu, G. (2009): Geokunststoffe in der Geotechnik und im Wasserbau. In: K. J. Witt (Hg.): Grundbau-Taschenbuch. Berlin, Germany: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, S. 737–834.

Saathoff, F.; Cantré, S.; Sikora, Z. (Hg.) (2015): Application of Dredged Materials, Coal Combustion Products and Geosynthetics in Dike Construction. Universität Rostock, Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau. Online verfügbar unter <http://www.dredgdikes.eu/de/guideline>, zuletzt geprüft am 21.05.2015.

Saathoff, F.; Werth, K. (2003): Geokunststoffe in Dämmen und Deichen. In: R. Hermann und J. Jensen (Hg.): Sicherung von Dämmen und Deichen. Siegen: Universitätsverlag Siegen, S. 221–237.

Schmidt, H.-H. (1996): Grundlagen der Geotechnik. Bodenmechanik - Grundbau - Erdbau. Stuttgart: Teubner.

Schmocker, L.; Hager, W. (2009): Modelling dike breaching due to overtopping. In: *Journal of Hydraulic Research* 47 (5), S. 585–597. DOI: 10.3826/jhr.2009.3586.

Schubert, T. (2014): Projekt DredgDikes - Überströmungsexperimente an den Binnenböschungen des Rostocker Versuchsdeichs. Masterarbeit. Universität Rostock. Lehrstuhl für landeskulturelle Ingenieurbauwerke, Geotechnik und Küstenwasserbau.

Schüttrumpf, H. F. R. (2001): Wellenüberlaufströmung bei Seedeichen - Experimentelle und theoretische Untersuchungen. Dissertation. Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Fachbereich für Bauingenieurwesen.

Shaikh, A.; Ruff, J. F.; Charlie, W. A.; Abt, S. R. (1988): Erosion rate of dispersive and nondispersive clays. In: *Journal of geotechnical engineering* 114 (5), S. 589–600.

Shields, A. (1936): Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitteilungen. Preußische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin.

DIN 19657, 2022 (Entwurf als vorgesehener Ersatz für DIN 19657:1973-09): Sicherung von Gewässern, Deichen und Küstendünen, zuletzt geprüft am 05.11.2023.

Simmer, K. (1994): Bodenmechanik und erdstatische Berechnungen. 19., neubearb. und erw. Aufl. Stuttgart: Teubner (Grundbau, 1).

Soos, P. von (2001): Eigenschaften von Boden und Fels - ihre Ermittlung im Labor. In: U. Smolczyk (Hg.): Grundbau-Taschenbuch, Bd. 1. Sechste Aufl. 3 Bände. Berlin: Ernst & Sohn, S. 117–201.

ECTC Test Method 3, 24.11.2004a: Standard index test method for the determination of unvegetated rolled erosion control product (RECP) ability to protect sand from Hydraulically-induced shear stresses under bench-scale conditions, zuletzt geprüft am 22.05.2015.

---

ECTC Test Method 2, 10.01.2003: Standard Index Test Method for the Determination of Unvegetated Rolled Erosion Control Product (RECP) Ability to Protect Soil From Rain Splash and Associated Runoff Under Bench-Scale Conditions, zuletzt geprüft am 22.05.2015.

ASTM D6460, 2012/2019: Standard Test Method for Determination of Rolled Erosion Control Product (RECP) Performance in Protecting Earthen Channels from Stormwater-Induced Erosion, zuletzt geprüft am 05.11.2023.

ASTM D7207, 2005: Standard index test method for the determination of unvegetated rolled erosion control product (RECP) ability to protect sand from Hydraulically-induced shear stresses under bench-scale conditions, zuletzt geprüft am 05.11.2023.

Steuernagel, J. (2008): Möglichkeiten zur Optimierung von Sanierungsmaßnahmen an Flußdeichen. Dissertation. Technischen Universität Darmstadt. Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie, zuletzt geprüft am 22.05.2015.

Strobl, Theodor; Zunic, Franz (2006): Wasserbau. Aktuelle Grundlagen -- Neue Entwicklungen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Stroosnijder, L. (2005): Measurement of erosion. Is it possible? In: *CATENA* 64 (2-3), S. 162–173. DOI: 10.1016/j.catena.2005.08.004.

Thornton, C. I.; Hughes, S. A.; Scholl, B. (2012): Full-Scale Testing of Levee Resiliency During Wave Overtopping. In: *Sciete Hydrotechnique de France* (Hg.): 6th ICSE. Book of Abstracts. 6th International Conference on Scour and Erosion. Paris, Aug. 27-31.

Thornton, C. I.; Cox, A. L.; Turner, M. D. (2009): Hydraulic Testing and Data Report 2009 for Profile Products, LLC - Greenarmor(R) 7020 with Kentucky Bluegrass. Draft Report. Colorado State University. Fort Collins, Colorado, U.S.A.

Turner, M. D.; Cox, A. L.; Thornton, C. I. (2011): Drivable Grass(R) - Report for Hydraulic Performance Testing. Colorado State University. Fort Collins, Colorado, U.S.A.

UGT GmbH (2016): Tensio 150, Preasure transducer tensiometer. Online verfügbar unter <http://www.ugt-online.de/en/produkte/bodenkunde/tensiometer/tensio-150.html>, zuletzt geprüft am 08.08.2016.

Van der Meer, J. W; Bernardini, P.; Steendam, G. J.; Akkerman, G. J.; Hoffmans, G. (2007): The Wave Overtopping Simulator in Action. In: Leopoldo Franco, Giuseppe R. Tomasicchio und Alberto Lamberti (Hg.): Proceedings of the 5th Coastal Structures International Conference, Venice, Italy 2-4 July 2007 // Coastal

structures 2007. Proceedings of the 5th International Conference, Venice, Italy, 2-4 July 2007. Singapore: World Scientific.

Van der Meer, J. W.; Bernardini, P.; Snijders, W.; Regeling, E. (2006): The Wave Overtopping Simulator. In: Proceedings of 30th Conference on Coastal Engineering, San Diego, California, S. 13.

Van der Meer, J. W.; Hardeman, B.; Steendam, G. J.; Schüttrumpf, H. F. R.; Verheij, H. (2013a): Flow depths and velocities at crest and inner slope of a dike, in theory and with theWave Overtopping Simulator. In: J. McKee Smith (Hg.): 32nd Conference on Coastal Engineering 2010. Shanghai, China, 30 June - 5 July 2010 ; [proceedings]. Red Hook, NY: Curran.

Van der Meer, J. W.; Schrijver, R.; Hardeman, B.; van Hoven, A.; Verheij, H.; Steendam, G. J. (2010): Guidance on erosion resistance of inner slopes of dikes from three years of testing with the Wave Overtopping Simulator. In: N. W. H. Allsop (Hg.): Coasts, marine structures and breakwaters. Adapting to change : proceedings of the 9th international conference organised by the Institution of Civil Engineers and held in Edinburgh on 16 to 18 September 2009. London: Thomas Telford.

Van der Meer, J. W.; Thornten, C. I.; Hughes, S. A. (2013b): Design and operation of the US Wave Overtopping Simulator. In: Shigeo Takahashi (Hg.): Coastal Structures 2011. Proceedings of the 6th International Conference, Yokohama, Japan, 5-9 September 2011. Singapore, Hackensack, N.J.: World Scientific Pub. Co, zuletzt geprüft am 18.09.2015.

Vavrina, L. (2010): Ansatz zur Bewertung der Schutzfunktion bewachsener Deichbinnenböschungen. Dissertation. Universität Duisburg-Essen. Institut für Grundbau und Bodenmechanik.

Wahl, T. L. (2010): A comparison of the hole erosion test and jet erosion test. In: D. Glysson, P. Makar, J. Bernard und D. Frevert (Hg.): Joint Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling. Las Vegas, Nevada, U.S.A., 27. Juni - 1. Juli 2010, zuletzt geprüft am 21.10.2015.

Westrich, B.; Siebel, R.; Vermeer, P. A.; B. Zweschper (2003): Neue naturnahe Bauweisen für überströmbare Dämme. Hg. v. Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau.

White, C. M. (1940): The equilibrium of grains on the bed of a stream. In: *Proceedings of the Royal Society of London* 174 (958), S. 322–338.

Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. (1978): Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning. Hg. v. United States Department of Agriculture. Science

---

and Education Administration (Agriculture Handbook, No. 537). Online verfügbar unter <http://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>, zuletzt geprüft am 22.10.2015.

Zanke, U. C. E. (1982): Grundlagen der Sedimentbewegung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Hochschultext).

Zanke, U. C. E. (2002): Hydromechanik der Gerinne und Küstengewässer. Für Bauingenieure, Umwelt- und Geowissenschaftler. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

Zanke, U. C. E.; Kubetzek, T.; Saenger, N. (2009): Untersuchungen an einem Forschungsdeich im Maßstab 1:1 zur Verbesserung des Widerstandsverhaltens bzw. der Standsicherheit von Flussdeichen bei langeinstauenden Hochwassern und Deichüberströmung. RIMAX - "Sicherer Deich". Schlussbericht. Technischen Universität Darmstadt. Darmstadt.

## **In dieser Reihe bisher erschienen**

### **Band I**

10. DIALOG Abfallwirtschaft MV

– Von der Abfallwirtschaft zur Energiewirtschaft.

*Tagungsband, erschienen im Juni 2007, ISBN 987-3-86009-004-6*

### **Band II**

Ellen-Rose Trübger

Entwicklung eines Ansatzes zur Berücksichtigung der ungesättigten Zone bei der Grundwassersimulation von Feuchtgebieten.

*Dissertation, erschienen im August 2007, ISBN 978-3-86009-006-0*

### **Band III**

René Dechow

Untersuchungen verschiedener Ansätze der Wasserhaushalts- und Stofftransportmodellierung hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in Stickstoffhaushaltsmodellen.

*Dissertation, erschienen im September 2007, ISBN 978-3-86009-016-9*

### **Band IV**

Carolin Wloczyk

Entwicklung und Validierung einer Methodik zur Ermittlung der realen Evapotranspiration anhand von Fernerkundungsdaten in Mecklenburg-Vorpommern.

*Dissertation, erschienen im September 2007, ISBN 978-3-86009-009-1*

### **Band 5**

1. Rostocker Bioenergieforum.

Bioenergieland Mecklenburg-Vorpommern.

*Tagungsband, erschienen im Oktober 2007, ISBN 978-3-86009-013-8*

### **Band 6**

Kulturtechniktagung 2007.

Ostseeverseuchung und Flächenentwässerung.

*Tagungsband, erschienen im Januar 2008, ISBN 978-3-86009-018-3*

### **Band 7**

Enrico Frahm

Bestimmung der realen Evapotranspiration für Weide (*Salix* spp.) und Schilf (*Phragmites australis*) in einem nordostdeutschen Flusstalmoor.

*Dissertation, erschienen im Mai 2008, ISBN 978-3-86009-023-7*

**Band 8**

Jenny Haide

Methode zur Quantifizierung der Einflüsse auf Vorgangsdauern lohnintensiver Arbeiten am Beispiel von Pflasterarbeiten.

*Dissertation, erschienen im Juni 2008, ISBN 978-3-86009-024-4*

**Band 9**

11. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Chancen und Risiken für die deutsche Abfallwirtschaft im Ausland.

*Tagungsband, erschienen im Juni 2008, ISBN 978-3-86009-029-9*

**Band 10**

Stefan Cantré

Ein Beitrag zur Bemessung geotextiler Schläuche für die Entwässerung von Baggergut.

*Dissertation, erschienen im Juni 2008, ISBN 978-3-86009-032-9*

**Band 11**

Birgit Wüstenberg

Praxis der Standortwahl von Sportboothäfen im Küstenbereich Mecklenburg-Vorpommerns und Entwicklung einer Bewertungsmethode als Planungshilfe.

*Dissertation, erschienen im Juli 2008, ISBN 978-3-86009-033-6*

**Band 12**

André Clauß

Erhöhung der Trinkwasserversorgungssicherheit in Havarie- und Krisensituationen durch neue Handlungsalgorithmen sowie Einbeziehung bisher ungenutzter Ressourcen am Beispiel von Bergbaugrubenwasser.

*Dissertation, erschienen im September 2008, ISBN 978-3-86009-037-4*

**Band 13**

Peter Degener

Sickerwasserkreislauf zur Behandlung von Sickerwässern der aerobiologischen Restabfallbehandlung (Restabfallrotte).

*Dissertation, erschienen im Oktober 2008, ISBN 978-3-86009-043-5*

**Band 14**

2. Rostocker Bioenergieforum

Innovationen für Klimaschutz und wirtschaftliche Entwicklung.

*Tagungsband, erschienen im Oktober 2008, ISBN 978-3-86009-044-2*

**Band 15**

7. Rostocker Abwassertagung

Fortschritte auf dem Gebiet der Abwasserentsorgung.

*Tagungsband, erschienen im November 2008, ISBN 978-3-86009-045-9*

**Band 16**

Christian Noß

Strömungsstrukturen kleiner naturnaher Fließgewässer unter Berücksichtigung von Turbulenztheorie und Dispersionsmodellen.

*Dissertation, erschienen im Januar 2009, ISBN 978-3-86009-054-1*

**Band 17**

Ralf Schröder

Entwicklung von Möglichkeiten zur Messung der N<sub>2</sub>-Übersättigung sowie Methoden zur Reduzierung der Schwimmschlamm Bildung.

*Dissertation, erschienen im Februar 2009, ISBN 978-3-86009-055-8*

**Band 18**

Elmar Wisotzki

Bodenverfestigungen mit Kalk-Hüttensand-Gemischen.

*Dissertation, erschienen im April 2009, ISBN 978-3-86009-059-6*

**Band 19**

Ramez Mashkook

Untersuchungen zur Adsorption und biologischen Aktivität an Aktivkohlefilter unter den Bedingungen der Wasseraufbereitung im Wasserwerk Rostock.

*Dissertation, erschienen im April 2009, ISBN 978-3-86009-060-2*

**Band 20**

Torsten Birkholz

Handlungserfordernisse und Optimierungsansätze für kommunale Ver- und Entsorgungsunternehmen im Zusammenhang mit demografischen Veränderungen im ländlichen Raum aufgezeigt an einem Beispiel in Mecklenburg-Vorpommern.

*Dissertation, erschienen im Mai 2009, ISBN 978-3-86009-061-9*

**Band 21**

12. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Aktuelle Entwicklungen in der Abfallwirtschaft.

*Tagungsband, erschienen im Juni 2009, ISBN 978-3-86009-062-6*

**Band 22**

Thomas Fritz

Entwicklung, Implementierung und Validierung eines praxisnahen Verfahrens zur Bestimmung von Biogas- bzw. Methanerträgen.

*Dissertation, erschienen im Oktober 2009, ISBN 978-3-86009-065-7*

**Band 23**

3. Rostocker Bioenergieforum

Bioenergie – Chance und Herausforderung für die regionale und globale Wirtschaft.

*Tagungsband, erschienen im Oktober 2009, ISBN 978-3-86009-065-8*

**Band 24**

Muhammad Mariam

Analyse von Gefahrenpotenzialen für die Trinkwasserversorgung der Stadt Rostock unter besonderer Berücksichtigung von Schadstoffausbreitungsvorgängen in der Warnow.

*Dissertation, erschienen im Februar 2010, ISBN 978-3-86009-078-7*

**Band 25**

Manja Steinke

Untersuchungen zur Behandlung von Abwässern der Fischverarbeitungsindustrie.

*Dissertation, erschienen im Juni 2010, ISBN 978-3-86009-085-5*

**Band 26**

13. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Die Kreislauf- und Abfallwirtschaft im Wandel. Wohin gehen die rechtlichen und technischen Entwicklungen?

*Tagungsband, erschienen im Juni 2010, ISBN 978-3-86009-087-9*

**Band 27**

4. Rostocker Bioenergieforum

Zukunftstechnologien für Bioenergie

*Tagungsband, erschienen im Oktober 2010, ISBN 978-3-940364-12-8*

**Band 28**

Dirk Banemann

Einfluss der Silierung und des Verfahrensablaufs der Biomassebereitstellung auf den Methanertrag unter Berücksichtigung eines Milchsäurebakteriensilierungsmittel

*Dissertation, erschienen im Januar 2011, ISBN 978-3-86009-087-9*

**Band 29**

14. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Abfall als Wertstoff- und Energiereserve

*Tagungsband, erschienen im Juni 2011, ISBN 978-3-940364-18-0*

**Band 30**

5. Rostocker Bioenergieforum

*Tagungsband, erschienen im November 2011, ISBN 978-3-940364-20-3*

**Band 31**

8. Rostocker Abwassertagung  
Erhöhung der Effektivität von Abwasserentsorgungsanlagen  
*Tagungsband, erschienen im November 2011, ISBN 978-3-86009-120-3*

**Band 32**

6. Rostocker Bioenergieforum  
*Tagungsband, erschienen im Juni 2012, ISBN 978-3-940364-27-2*

**Band 33**

Ishan Machlouf  
Untersuchungen zur Nitratelimination bei der Trinkwasseraufbereitung unter Berücksichtigung syrischer Verhältnisse  
*Dissertation, erschienen im März 2013, ISBN 978-3-86009-204-0*

**Band 34**

Ralph Sutter  
Analyse und Bewertung der Einflussgrößen auf die Optimierung der Rohbiogasproduktion hinsichtlich der Konstanz von Biogasqualität und -menge  
*Dissertation, erschienen im März 2013, ISBN 978-3-86009-202-6*

**Band 35**

Wolfgang Pfaff-Simoneit  
Entwicklung eines sektoralen Ansatzes zum Aufbau von nachhaltigen Abfallwirtschaftssystemen in Entwicklungsländern vor dem Hintergrund von Klimawandel und Ressourcenverknappung  
*Dissertation, erschienen im Mai 2013, ISBN 978-3-86009-203-3*

**Band 36**

7. Rostocker Bioenergieforum  
*Tagungsband, erschienen im Juni 2013, ISBN 978-3-86009-207-1*

**Band 37**

Markus Helftewes  
Modellierung und Simulation der Gewerbeabfallaufbereitung vor dem Hintergrund der Outputqualität, der Kosteneffizienz und der Klimabilanz  
*Dissertation, erschienen im Oktober 2013, ISBN 978-3-86009-402-0*

**Band 38**

Jan Stefan Riha  
Detektion und Quantifizierung von Cyanobakterien in der Ostsee mittels Satellitenfernerkundung  
*Dissertation, erschienen im Oktober 2013, ISBN 978-3-86009-403-7*

**Band 39**

Peter Helmke

Optimierung der Verarbeitungs-, Gebrauchs- und Entsorgungseigenschaften eines naturfaserverstärkten Kunststoffes unter Berücksichtigung automobiler Anforderungen

*Dissertation, erschienen im November 2013, ISBN 978-3-86009-404-4*

**Band 40**

Andrea Siebert-Raths

Modifizierung von Polylactid (PLA) für technische Anwendungen

Verfahrenstechnische Optimierung der Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften

*Dissertation, erschienen im Januar 2014 ISBN 978-3-86009-405-1*

**Band 41**

Fisiha Getachew Argaw

Agricultural Machinery Traffic Influence on Clay Soil Compaction as Measured by the Dry Bulk Density

*Dissertation, erschienen im Januar 2014 ISBN 978-3-86009-406-8*

**Band 42**

Tamene Adugna Demissie

Climate change impact on stream flow and simulated sediment yield to Gilgel Gibe 1 hydropower reservoir and the effectiveness of Best Management Practices

*Dissertation, erschienen im Februar 2014 ISBN 978-3-86009-407-5*

**Band 43**

Paul Engelke

Untersuchungen zur Modellierung des Feststofftransports in Abwasserkanälen: Validierung in SIMBA®

*Dissertation, erschienen im Februar 2014 ISBN 978-3-86009-408-2*

**Band 44**

16. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Aktuelle Entwicklungen in der Abfall- und Ressourcenwirtschaft

*Tagungsband, erschienen im April 2014, ISBN 978-3-86009-410-5*

**Band 45**

8. Rostocker Bioenergieforum, 19.-20. Juni 2014 an der Universität Rostock

*Tagungsband, erschienen im Juni 2014, ISBN 978-3-86009-412-9*

**Band 46**

Abschlussbericht Projekt CEMUWA – Climate protection, natural resources management and soil improvement by combined Energetic and Material Utilization of lignocellulosic agricultural Wastes and residues

*Projektbericht, erschienen im September 2014, ISBN 978-3-86009-413-6*

**Band 47**

8. Rostocker Baggergutseminar, 24.-25. September 2014 in Rostock  
*Tagungsband, erschienen im September 2014, ISBN 978-3-86009-414-3*

**Band 48**

Michael Kuhn

Mengen und Trockenrückstand von Rechengut kommunaler Kläranlagen  
*Dissertation, erschienen im Oktober 2014 ISBN 978-3-86009-415-0*

**Band 49**

9. Rostocker Abwassertagung, Infrastruktur- und Energiemanagement –  
ein Geschwisterpaar der Wasserwirtschaft 12. November 2014 in Rostock  
*Tagungsband, erschienen im November 2014, ISBN 978-3-86009-416-7*

**Band 50**

Mulugeta Azeze Belete

Modeling and Analysis of Lake Tana Sub Basin Water Resources Systems,  
Ethiopia  
*Dissertation, erschienen im Dezember 2014 ISBN 978-3-86009-422-8*

**Band 51**

Daniela Dressler

Einfluss regionaler und standortspezifischer Faktoren auf die Allgemeingültig-  
keit ökologischer und primärenergetischer Bewertungen von Biogas  
*Dissertation, erschienen im Oktober 2014 ISBN 978-3-86009-424-2*

**Band 52**

9. Rostocker Bioenergieforum, 18.-19. Juni 2015 in Rostock

*Tagungsband, erschienen im November 2014, ISBN 978-3-86009-425-9*

**Band 53**

Nils Engler

Spurenelementkonzentrationen und biologische Aktivität in NaWaRo-Biogas-  
fermentern  
*Dissertation, erschienen im September 2015 ISBN 978-3-86009-427-3*

**Band 54**

Thomas Schmidt

Möglichkeiten der Effizienzsteigerung bei der anaeroben Vergärung  
von Weizenschlempe  
*Dissertation, erschienen im Oktober 2015 ISBN 978-3-86009-428-0*

**Band 55**

Thomas Dorn

Principles, Opportunities and Risks associated with the transfer of environmental technology between Germany and China using the example of thermal waste disposal

*Dissertation, erschienen im Dezember 2015 ISBN 978-3-86009-429-7*

**Band 56**

Uwe Holzhammer

Biogas in einer zukünftigen Energieversorgungsstruktur mit hohen Anteilen fluktuierender Erneuerbarer Energien

*Dissertation, erschienen im Dezember 2015 ISBN 978-3-86009-430-3*

**Band 57**

17. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Aktuelle Entwicklungen in der Abfall- und Ressourcenwirtschaft,

15. Juni 2016 in Rostock,

*Tagungsband, erschienen im Juni 2016, ISBN 978-3-86009-432-7*

**Band 58**

10. Rostocker Bioenergieforum, 16.-17. Juni 2016 in Rostock

*Tagungsband, erschienen im Juni 2016, ISBN 978-3-86009-433-4*

**Band 59**

Michael Friedrich

Adaptation of growth kinetics and degradation potential of organic material in activated sludge

*Dissertation, erschienen im Juli 2016 ISBN 978-3-86009-434-1*

**Band 60**

Nico Schulte

Entwicklung von Qualitätsprüfungen für die haushaltsnahe Abfallsammlung im Holsystem

*Dissertation, erschienen im Juli 2016 ISBN 978-3-86009-435-8*

**Band 61**

Ullrich Dettmann

Improving the determination of soil hydraulic properties of peat soils at different scales

*Dissertation, erschienen im September 2016 ISBN 978-3-86009-436-5*

**Band 62**

Anja Schreiber

Membranbasiertes Verfahren zur weitergehenden Vergärung

von feststoffreichen Substraten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen

*Dissertation, erschienen im Oktober 2016 ISBN 978-3-86009-446-4*

**Band 63**

André Körstel

Entwicklung eines selbstgängigen statischen Verfahrens zur biologischen Stabilisierung und Verwertung organikreicher Abfälle unter extrem ariden Bedingungen für Entwicklungs- und Schwellenländer, am Beispiel der Stadt Teheran  
*Dissertation, erschienen im Oktober 2016 ISBN 978-3-86009-447-1*

**Band 64**

Ayman Elnaas

Actual situation and approach for municipal solid waste treatment in the Arab region  
*Dissertation, erschienen im Oktober 2016 ISBN 978-3-86009-448-8*

**Band 65**

10. Rostocker Abwassertagung, Wege und Werkzeuge für eine zukunftsfähige Wasserwirtschaft im norddeutschen Tiefland, 8. November 2016 in Rostock  
*Tagungsband, erschienen im November 2016, ISBN 978-3-86009-449-5*

**Band 66**

Gunter Weißbach

Mikrowellen-assistierte Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Reststoffe  
*Dissertation, erschienen im November 2016 ISBN 978-3-86009-450-1*

**Band 67**

Leandro Janke

Optimization of anaerobic digestion of sugarcane waste for biogas production in Brazil  
*Dissertation, erschienen im Mai 2017 ISBN 978-3-86009-454-9*

**Band 68**

11. Rostocker Bioenergieforum, 22.-23. Juni 2017 in Rostock  
*Tagungsband, erschienen im Juni 2017, ISBN 978-3-86009-455-6*

**Band 69**

Claudia Demmig

Einfluss des Erntezeitpunktes auf die anaerobe Abbaukinetik der Gerüstsubstanzen im Biogasprozess  
*Dissertation, erschienen im Juli 2017, ISBN 9978-3-86009-456-3*

**Band 70**

Christian Koepke

Die Ermittlung charakteristischer Bodenkennwerte der Torfe und Mudden Mecklenburg-Vorpommerns als Eingangsparameter für erdstatische Berechnungen nach Eurocode 7 / DIN 1054  
*Dissertation, erschienen im Juni 2017, ISBN 978-3-86009-457-0*

**Band 71**

Sven-Henning Schlömp

Geotechnische Untersuchung und Bewertung bautechnischer Eignung von Müllverbrennungsschlacken und deren Gemischen mit Böden

*Dissertation, erschienen im Juni 2017, ISBN 978-3-86009-458-7*

**Band 72**

Anne-Katrin Große

Baggergut im Deichbau – Ein Beitrag zur geotechnischen Charakterisierung und Erosionsbeschreibung feinkörniger, organischer Sedimente aus dem Ostseeraum zur Einschätzung der Anwendbarkeit

*Dissertation, erschienen im Juni 2017, ISBN 978-3-86009-459-4*

**Band 73**

Thomas Knauer

Steigerung der Gesamteffizienz von Biogasanlagen durch thermische Optimierung

*Dissertation, erschienen im Juli 2017, ISBN 978-3-86009-460-0*

**Band 74**

Mathhar Bdour

Electrical power generation from residual biomass by combustion in externally fired gas turbines (EFGT)

*Dissertation, erschienen im August 2017, ISBN 978-3-86009-468-6*

**Band 75**

Johannes Dahlin

Vermarktungsstrategien und Konsumentenpräferenzen für Dünger und Erden aus organischen Reststoffen der Biogasproduktion

*Dissertation, erschienen im September 2017, ISBN 978-3-86009-469-3*

**Band 76**

Sören Weinrich

Praxisnahe Modellierung von Biogasanlagen

Systematische Vereinfachung des Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)

*Dissertation, erschienen im März 2018, ISBN 978-3-86009-471-6*

**Band 77**

18. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Aktuelle Entwicklungen in der Abfall- und Ressourcenwirtschaft

*Tagungsband, erschienen im Juni 2018, ISBN 978-3-86009-472-3*

**Band 78**

12. Rostocker Bioenergieforum

*Tagungsband, erschienen im Juni 2018, ISBN 978-3-86009-473-0*

**Band 79**

Tatyana Koegst

Screening approaches for decision support in drinking water supply

*Dissertation, erschienen im Juni 2018, ISBN 978-3-86009-474-7*

**Band 80**

Liane Müller

Optimierung des anaeroben Abbaus stickstoffhaltiger Verbindungen durch den Einsatz von Proteasen

*Dissertation, erschienen im September 2018, ISBN 978-3-86009-475-4*

**Band 81**

Projektbericht Wasserwirtschaft

KOGGE – **K**ommunale **G**ewässer **G**emeinschaftlich **E**ntwickeln

Ein Handlungskonzept für kleine urbane Gewässer am Beispiel der Hanse- und Universitätsstadt Rostock

*Projektbericht, erschienen im September 2018, ISBN 978-3-86009-476-1*

**Band 82**

Adam Feher

Untersuchungen zur Bioverfügbarkeit von Mikronährstoffen für den Biogasprozess

*Dissertation, erschienen im Oktober 2018, ISBN 978-3-86009-477-8*

**Band 83**

Constanze Uthoff

Pyrolyse von naturfaserverstärkten Kunststoffen zur Herstellung eines kohlenstoffhaltigen Füllstoffs für Thermoplasten

*Dissertation, erschienen im November 2018, ISBN 978-3-86009-478-5*

**Band 84**

Ingo Kaundinya

Prüfverfahren zur Abschätzung der Langzeitbeständigkeit von Kunststoffdichtungsbahnen aus PVC-P für den Einsatz in Dichtungssystemen von Straßentunneln

*Dissertation, erschienen im Dezember 2018, ISBN 978-3-86009-484-6*

**Band 85**

Eric Mauky

A model-based control concept for a demand-driven biogas production

*Dissertation, erschienen im Januar 2019, ISBN 978-3-86009-485-3*

**Band 86**

Michael Kröger

Thermochemical Utilization of Algae with Focus on hydrothermal Processes

*Dissertation, erschienen im Februar 2019, ISBN 978-3-86009-486-0*

**Band 87**

13. Rostocker Bioenergieforum

*Tagungsband, erschienen im Juni 2019, ISBN 978-3-86009-487-7*

**Band 88**

12. Rostocker Abwassertagung

*Tagungsband, erschienen im September 2019, ISBN 978-3-86009-488-4*

**Band 89**

Philipp Stahn

Wasser- und Nährstoffhaushalt von Böden unter Mischkulturen und Trockenstress

*Dissertation, erschienen im Juli 2019, ISBN 978-3-86009-489-1*

**Band 90**

BioBind: Luftgestützte Beseitigung von Verunreinigungen durch Öl mit biogenen Bindern

*Projektbericht, erschienen im September 2019, ISBN 978-3-86009-490-7*

**Band 91**

Jürgen Müller

Die forsthydrologische Forschung im Nordostdeutschen Tiefland: Veranlassung, Methoden, Ergebnisse und Perspektiven

*Habilitation, erschienen im Oktober 2019, ISBN 978-3-86009-491-4*

**Band 92**

Marcus Siewert

Bewertung der Ölhavarievorsorge im deutschen Seegebiet auf Grundlage limitierender Randbedingungen – Ein Beitrag zur Verbesserung des Vorsorgestatus

*Dissertation, erschienen im November 2019, ISBN 978-3-86009-492-1*

**Band 93**

Camilo Andrés Wilches Tamayo

Technical optimization of biogas plants to deliver demand oriented power

*Dissertation, erschienen im Februar 2020, ISBN 978-3-86009-493-8*

**Band 94**

Robert Kopf

Technisches Benchmarking mit Standortqualifikationsstudie biochemischer Energieanlagenprojekte (Beispiel Biogas)

*Dissertation, erschienen im Februar 2020, ISBN 978-3-86009-494-5*

**Band 95**

14. Rostocker Bioenergieforum und 19. DIALOG Abfallwirtschaft MV  
*Tagungsband, erschienen im Juni 2020, ISBN 978-3-86009-507-2*  
DOI [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00002650](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002650)

**Band 96**

Safwat Hemidat  
Feasibility Assessment of Waste Management and Treatment in Jordan  
*Dissertation, erschienen im Juli 2020, ISBN 978-3-86009-509-6*

**Band 97**

Andreas Heiko Metzging  
Verdichtung von ungebundenen Pflasterdecken und Plattenbelägen -  
Untersuchungen zur Lagerungsdichte des Fugenmaterials  
*Dissertation, erschienen im Juli 2020, ISBN 978-3-86009-510-2*  
DOI: [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00002742](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002742)

**Band 98**

Ying Zhou  
Research on Utilization of Hydrochars Obtained by the Organic Components of  
Municipal Solid Waste  
*Dissertation, erschienen im November 2020, ISBN 978-3-86009-515-7*

**Band 99**

Mathias Gießler  
Ein prozessbasiertes Modell zur wirtschaftlich-technischen Abbildung von  
Abwasserunternehmen – Beispielhafte Anwendung für eine ländliche Region  
mit Bevölkerungsrückgang  
*Dissertation, erschienen im November 2020, ISBN 978-3-86009-516-4*  
DOI: [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00002790](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002790)

**Band 100**

Dodiek Ika Candra  
Development of a Virtual Power Plant based on a flexible Biogas Plant and a  
Photovoltaic-System  
*Dissertation, erschienen im Dezember 2020, ISBN 978-3-86009-518-8*  
DOI: [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00002814](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002814)

**Band 101**

Thomas Zeng  
Prediction and reduction of bottom ash slagging during small-scale combustion  
of biogenic residues  
*Dissertation, erschienen im Dezember 2020, ISBN 978-3-86009-519-5*

**Band 102**

Edward Antwi

Pathways to sustainable bioenergy production from cocoa and cashew residues from Ghana

*Dissertation, erschienen im Dezember 2020, ISBN 978-3-86009-520-1*

DOI: [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00002818](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002818)

**Band 103**

Muhammad Waseem

Integrated Hydrological and Mass Balance Assessment in a German Lowland Catchment with a Coupled Hydrologic and Hydraulic Modelling

*Dissertation, erschienen im Januar 2021, ISBN 978-3-86009-521-8*

DOI: [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00002884](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002884)

**Band 104**

Martin Rinas

Sediment Transport in Pressure Pipes

*Dissertation, erschienen im März 2021, ISBN 978-3-86009-538-6*

DOI [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00003915](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003915)

**Band 105**

15. Rostocker Bioenergieforum

*Tagungsband, erschienen im Juni 2021, ISBN 978-3-86009-524-9*

DOI [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00003024](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003024)

**Band 106**

Jan Sprafke

Potenziale der biologischen Behandlung von organischen Abfällen zur Sektorenkopplung

*Dissertation, erschienen im Oktober 2021, ISBN 978-3-86009-527-0*

DOI [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00003118](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003118)

**Band 107**

Mingyu Qian

The Demonstration and Adaption of the Garage - Type Dry Fermentation Technology for Municipal Solid Waste to Biogas in China

*Dissertation, erschienen im Oktober 2021, ISBN 978-3-86009-528-7*

**Band 108**

Haniyeh Jalalipour

Sustainable municipal organic waste management in Shiraz, Iran

*Dissertation, erschienen im November 2021, ISBN 978-3-86009-526-3*

[https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00003116](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003116)

**Band 109**

Michael Cramer

Umgang mit stark verschmutztem Niederschlagswasser aus Siloanlagen  
*Dissertation, erschienen im Dezember 2021, ISBN 978-3-86009-530-0*  
[https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00003358](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003358)

**Band 110**

16. Rostocker Bioenergieforum und 20. DIALOG Abfallwirtschaft MV  
*Tagungsband, erschienen im Juni 2022, ISBN 978-3-86009-535-5*  
*DOI: [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00003615](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003615)*

**Band 111**

Fachtagung Wasserwirtschaft – Gute Stadt-Land-Beziehungen für eine nachhaltige Entwicklung in MV

*Tagungsband, erschienen im Juni 2022, ISBN 978-3-86009-538-6*  
*DOI: [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00003915](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003915)*

**Band 112**

Zelalem Abera Angello

Selection of Optimal Pollution Management Strategy for the Little Akaki River, Ethiopia, Based on Determination of Spatio-temporal Pollutant Dynamics and Water Quality Modeling

*Dissertation, erschienen im Oktober 2022, ISBN 978-3-86009-542-3*  
[https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00003948](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003948)

**Band 113**

Qahtan Thabit

Hybrid waste Incineration – Solar Parabolic System with Thermal Energy Recovery in Sea water Disalination in MENA Region

*Dissertation, im Druck, ISBN 978-3-86009-545-4*  
[https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00004181](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004181)

**Band 114**

17. Rostocker Bioenergieforum

*Tagungsband, erschienen im Juni 2023, ISBN 978-3-86009-547-8*  
[https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00004269](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004269)

**Band 115**

Megersa Kebede Leta

Modeling Optimal Operation of Nashe

Hydropower Reservoir under LandUse Land Cover Changes in blue Nile River Basin, Ethiopia

*Dissertation, ISBN 978-3-86009-548-5*  
[https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00004427](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004427)

**Band 116**

13. Rostocker Abwassertagung. Bewirtschaftung und Behandlung von Niederschlagswasser.

*Tagungsband, erschienen im November 2023, ISBN 978-3-86009-549-2*

[https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00004432](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004432)

**Band 117**

Semaria Moga Lencha

Estimating pollutant fluxes and their impact on Lake Hawassa in Ethiopia's Rift Valley basin based on combined monitoring and modelling

*Dissertation, ISBN 978-3-86009-550-8*

[https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00004446](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004446)

**Band 118**

Fabian Gievers

Vergleichende Untersuchungen und Bilanzierungen von Prozessketten zur Herstellung und Nutzung von Biokohlen aus Klärschlämmen

*Dissertation, ISBN 978-3-86009-551-5*

[https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00004455](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004455)

**Band 119**

Tim Jurisch

Untersuchungen hydraulischer Eigenschaften von Baggergut im Deichbau am Beispiel des Rostocker Forschungsdeiches

*Dissertation, ISBN 978-3-86009-552-2*

[https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00004489](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004489)

**Band 120**

Projekt PROSPER-RO

Prospektive Synergistische Planung von Entwicklungsoptionen in Regiopolen am Beispiel des Stadt-Umland-Raums Rostock.

*Abschlussbericht, erschienen im Februar 2024, ISBN 978-3-86009-553-9*

[https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00004532](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004532)

**Band 121**

Roberto Eloy Hernández Regalado

Optimization of the efficiency and flexibility of agricultural biogas plants by integrating an expanded granular sludge bed reactor

*Dissertation, ISBN 978-3-86009-554-6*

[https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00004560](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004560)

**Band 122**

Clement Owusu Prempeh

Generation of biogenic silica from biomass residues for sustainable industrial material applications

*Dissertation, ISBN 978-3-86009-555-3*

[https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00004559](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004559)

**Band 123**

Frauke Kachholz

Model-based Generation of High-Resolution Flood Flow Characteristics for Small Ungauged Streams in the Northeast German Lowlands

*Dissertation, ISBN 978-3-86009-556-0*

[https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00004530](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004530)

**Band 124**

18. Rostocker Biomasseforum

*Tagungsband, erschienen im Juni 2024, ISBN 978-3-86009-559-1*

[https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00004587](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004587)

**Band 125**

Vicky Shettigondahalli Ekanthalu

Hydrothermal Carbonization of Sewage Sludge and the Influence of pH Phosphorus Transformation and Hydrochar Properties

*Dissertation, ISBN 978-3-86009-562-1*

[https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00004601](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004601)

**Band 126**

Nguyen Van Than

Development of an anaerobic pre-treatment of high strength organic waste-water from the cleaning of tanks of food and fodder road transports

*Dissertation, ISBN 978-3-86009-560-7*

[https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00004600](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004600)

**Band 127**

Christian Ochsmann

Untersuchung der Adsorption von CO<sub>2</sub> an Ionenaustauschern anhand eines Modellbiogases

*Dissertation, ISBN 978-3-86009-561-4*

**Schriftenreihe Umweltingenieurwesen**  
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät

Band 128

Dissertation

*Jan Olschewski*

Umweltingenieurwesen ■ Geotechnik und Küstenwasserbau

Bd.  
128

**Ein Beitrag zur Bestimmung  
der Erosionsstabilität von  
Deichbinnenböschungen**

Schriftenreihe

**PROFESSUR**

**Geotechnik und  
Küstenwasserbau**

Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio

ISBN 978-3-86009-563-8

DOI [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00004629](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004629)

Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio