



# DredgDikes

Handbuch für die südliche Ostseeregion zur

Anwendung von Nassbaggergut,  
Aschen und Geokunststoffen  
im Deichbau

Gekürzte deutsche Version

Gelbdruck

Herausgegeben von:

Fokke Saathoff & Stefan Cantré

Universität Rostock, Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau

Zbigniew Sikora

Gdansk University of Technology, Dept. Geotechnics, Geology and Maritime Engineering



Part-financed by the European Union  
(European Regional Development Fund)



Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio



GDANSK UNIVERSITY  
OF TECHNOLOGY

# redgDikes

Handbuch für die südliche Ostseeregion zur

## Anwendung von Nassbaggergut, Aschen und Geokunststoffen im Deichbau

Gekürzte deutsche Version

Gelbdruck

Herausgegeben von:

Fokke Saathoff & Stefan Cantré

*Universität Rostock, Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau*

Zbigniew Sikora

*Gdansk University of Technology, Dept. Geotechnics, Geology and Maritime Engineering*



Part-financed by the European Union  
(European Regional Development Fund)



Universität  
Rostock



Traditio et Innovatio



**GDAŃSK UNIVERSITY  
OF TECHNOLOGY**

Handbuch für die südliche Ostseeregion zur Anwendung von Nassbaggergut, Aschen und Geokunststoffen im Deichbau  
Gekürzte deutsche Version - Gelbdruck

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff und Dr.-Ing. Stefan Cantré  
Universität Rostock, Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau  
18051 Rostock;  
[www.auf.uni-rostock.de](http://www.auf.uni-rostock.de); [www.dredgdikes.eu](http://www.dredgdikes.eu)

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Sikora  
Gdansk University of Technology  
Department of Geotechnics, Geology and Maritime Engineering

CIP-Short Title:

Handbuch für die südliche Ostseeregion zur Anwendung von Nassbaggergut,  
Aschen und Geokunststoffen im Deichbau  
Rostock, 2015

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

Bezugsmöglichkeiten des englischen Originaldokuments:

Universität Rostock, Universitätsbibliothek, Schriftentausch, 18051 Rostock  
Phone: +49 381 498 8637; Fax: +49 381 498 8632

Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät  
Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau  
Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock  
Phone: +49 381 498 3701; Fax: +49 381 498 3702

Bezugsmöglichkeiten der gekürzten deutschen Version:

[www.dredgdikes.eu](http://www.dredgdikes.eu)

Digitale PDF-Versionen des Handbuchs auf Deutsch, Englisch und Polnisch sowie der englischen Annexe sind auf [www.dredgdikes.eu](http://www.dredgdikes.eu) verfügbar.

ISBN (englisches Original): 978-3-86009-423-5

Published by Universität Rostock  
[www.uni-rostock.de](http://www.uni-rostock.de)

## VORWORT DER HERAUSGEBER

Dredged materials research has been developing rapidly during the past decade. Although sediments that are taken on shore are generally considered a waste according to European legislation, the materials prove to have a good potential to be recovered in a variety of applications. Anthropogenic materials, such as by-products of coal combustion (CCPs), generally fall under the waste law, too. Therefore, comparable hurdles have to be taken when it comes to the recovery of the materials. The European Waste Framework Directive demands a recovery rate for these secondary materials of 70 % by 2020. This implicates research and development in all fields of sediment management and material recovery. With a growing environmental awareness all around the Baltic Sea, many debates discuss strategies on how to reduce the amount of dredged sediments dumped at sea. In addition, many ideas are being developed how to increase the possibilities for CCP recovery beyond the standard road construction and concrete production applications. Here, it is of vital importance to address the particular characteristics of the different types of materials in an environmental context.

Both types of materials face a number of barriers regarding legislation and administration as well as public acceptance. To overcome these obstacles, the stakeholders involved in civil and coastal engineering projects, including the affected public, need reliable information about the benefits and limitations regarding the recovery of dredged materials and coal combustion products.

Within the Baltic Sea Region, a large number of flood protection structures, including dikes, protect the people and properties from river flooding and coastal storm surges. In the South Baltic, this concerns Mecklenburg-Vorpommern, Germany (mainly sea dikes, river dikes at Elbe and Oder), northern Poland (river dikes), Zealand, Denmark (all kinds of dikes) and Lithuania (river dikes). In the context of climate change scenarios that predict rising sea levels and increasing extreme storms that lead to higher and more frequent inland flood events, considerable efforts in dike construction and reconstruction will be necessary during the next decades, associated with the need for enormous amounts of earth construction material. The project DredgDikes therefore aimed at combining both problems in providing alternative construction materials for future dike constructions and at the same time reducing the amount of waste for deposit.

The Chair of Geotechnics and Coastal Engineering at the Universität Rostock has been investigating the issue of dredged materials as replacement materials for dike construction since 2007. The topics of dikes, particularly with the focus on geosynthetics used in dikes and the determination of hydraulic design values, have been subject to research for a much longer time. The Department of Geotechnics, Geology and Maritime Engineering at the Gdansk University of Technology has a long-term experience with the use of fly ash in geotechnical applications and the Steinbeis Innovation Centre for Applied Landscape Planning in Rostock comes with many years of experience in dredged material research. This consortium was extended by two more partners and 16 associated organisations from the South Baltic.

In the four years of interesting investigations three large-scale research dikes were built, a large number of laboratory and field experiments were performed on material stability and environmental aspects, legal aspects were clarified, a considerable number of technical and research articles were published and two international conferences were organised. The substantial experience gained during the project is now presented in this guideline which contains recommendations on the planning and construction of dikes with dredged materials and CCPs. The guideline shall initiate the increased use of the investigated materials in dike construction. The editors would appreciate to be informed about such projects.



Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff  
DredgDikes Projektleiter



Prof. dr hab. inż. Zbigniew Sikora  
DredgDikes Direktor Polen



Dr.-Ing. Stefan Cantré  
DredgDikes Projektkoordinator

## DredgDikes-PARTNER

### Partner 1 and Lead Beneficiary

Universität Rostock  
Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau  
Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff & Dr.-Ing. Stefan Cantré  
Justus-von-Liebig-Weg 6  
18059 Rostock, Germany

### Partner 2:

Gdansk University of Technology  
Department of Geotechnics, Geology & Maritime Engineering  
Prof. dr hab. inż. Zbigniew Sikora & Dr inż. Remigiusz Duszyński  
ul. Narutowicza 11/12  
80-233 Gdansk, Poland

### Partner 3:

Wasser- und Bodenverband „Untere Warnow – Küste“  
Dipl.-Ing. Heike Just  
Alt Batelsdorfer Str. 18a  
18148 Rostock, Germany

### Partner 4:

Hansestadt Rostock  
Tief- und Hafenbauamt  
Dipl.-Ing. Heiko Tiburtius, Dipl.-Ing. Ingolf Sanftleben † & Günter Lange  
Holbeinplatz 14  
18057 Rostock, Germany

### Partner 5:

Steinbeis Innovation gGmbH  
Angewandte Landschaftsplanung  
Dr. Michael Henneberg & Dipl.-Ing. Ricarda Neumann  
Justus-von-Liebig-Weg 6  
18059 Rostock, Germany

### Assoziierte Organisationen:

Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt StALU-MM, Rostock  
Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg  
Maritime Office Gdynia, PL  
Pomeranian Head of Melioration and Hydrotechnic Structures, Gdansk, PL  
Ekotech sp. z o.o., Szczecin, PL  
BAUGRUND STRALSUND Ing. mbH, Stralsund  
Bonar GmbH & Co. KG, Oberburg  
HUESKER Synthetic GmbH, Vertriebsbüro Rostock  
Heinrich Hirdes GmbH, Rostock  
Danish Coastal Authority, Lemvig, DK  
Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt StALU VP, Stralsund  
Bauamt Stadt Ribnitz-Damgarten  
West Pomeranian Head of Melioration and Hydrotechnic Structures, Szczecin, PL  
Żułowski Head of Melioration and Hydrotechnic Structures. Elbląg, PL  
Latvian State Environmental Service, Riga, LV

Prof. Dr. Arnold Norkus, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, LT (externer Experte)

## DANK

### Redaktionsteam

#### Autoren

Dr hab. inż. Lech Bałachowski, prof. PG (Gdansk University of Technology)  
Dr.-Ing. Stefan Cantré (Universität Rostock)  
Dr hab. inż. Marcin Cudny (Gdansk University of Technology)  
Dr inż. Angelika Duszyńska (Gdansk University of Technology)  
Dr inż. Remigiusz Duszyński (Gdansk University of Technology)  
Dipl.-Ing. Anne-Katrin Große (Universität Rostock)  
Dr. Michael Henneberg (Steinbeis Transferzentrum Angewandte Landschaftsplanung, Rostock)  
Dipl.-Ing. Ricarda Neumann (Steinbeis Innovation gGmbH, Rostock)  
M.Sc. Elisabeth Nitschke (Universität Rostock)  
M.Sc. Jan Olschewski (Universität Rostock)  
Dr inż Rafał Ossowski (Gdansk University of Technology)  
Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff (Universität Rostock)  
Prof. Dr. hab. inż. Zbigniew Sikora (Gdansk University of Technology)  
Dr inż. Mariusz Wyroślak (Gdansk University of Technology)

#### Technische Redaktion

Dr.-Ing. Stefan Cantré (Universität Rostock)  
Dr hab. inż. Lech Bałachowski, prof. PG (Gdansk University of Technology)  
Eva-Maria Abrutat (Universität Rostock)

#### Kapitelrezension und Diskussion

Dr. Frank Flügge (Huesker Synthetic GmbH, Rostock)  
Dr. habil. Julia Gebert (HPA Hamburg, HTG Fachausschuss Baggergut)  
Dipl.-Ing. Frank Göricke (StALU MM, Rostock)  
Dipl.-Ing. Michael Hering (Huesker Synthetic GmbH, Rostock)  
MSc Signe Marie Ingvarsen (Danish Coastal Authority, Lemvig)  
Dr.-Ing. Christian Koepke (Baugrund Stralsund Ingenieurgesellschaft, Stralsund/Rostock)  
Dr.-Ing. Heino Müller (INROS Lackner AG, Rostock)  
Dr.-Ing. Thomas Nuber (BAW Hamburg)  
MSc Thorsten Piontkowitz (Danish Coastal Authority, Lemvig)  
Dr.-Ing. Martin Pohl (BAW Hamburg)  
Dipl.-Ing. Siegmund Schlie (Heinrich Hirdes GmbH, Rostock)  
Mgr Inż. Anna Stelmaszyk-Świerczyńska (Maritime Office Gdynia)  
Dipl.-Ing. Rica Weisz (Ministerium für Wirtschaft, Bau und Tourismus MV, Referat Abfallwirtschaft)  
Mgr Inż. Marcin Żywna (Zarząd Melioracji i Urządzeń Wodnych Województwa Pomorskiego w Gdańsku, Gdansk)

## Förderung

Dieses Handbuch wurde im Projekt DredgDikes in der Zeit von 2010 – 2015 entwickelt. Das Projekt wurde gefördert durch das Programm Südliche Ostsee 2007-2013, EU INTERREG IV A ([www.southbaltic.eu](http://www.southbaltic.eu)).

## Mitwirkende im Projekt DredgDikes

Das DredgDikes-Konsortium dankt allen assoziierten Organisationen für ihre Beiträge und Diskussionen, die studentischen Hilfskräften in Rostock und Danzig für ihre große Hilfe, dem externen Finanzmanagement, der Universitätsverwaltungen in Rostock und Danzig, den Wirtschaftsprüfern, dem JTS in Danzig, den Auftragnehmern und Lieferanden im Zusammenhang mit Bauwerken, Instrumentierung, externen Laboranalysen, Verbreitungswerkzeugen, Meetings und Konferenzen (um nur eine Auswahl zu nennen), allen, die bei der Entwicklung des Handbuchs mit Beiträgen und Diskussionen beigetragen haben und denen, die sich so für das Projekt interessierten, dass sie die Erkenntnisse weiterverbreiteten, insbesondere die Teilnehmer an Workshops, Konferenzen und Exkursionen. Das Projekt DredgDikes, und in Konsequenz auch dieses Handbuch, wäre ohne diese Unterstützung nicht möglich gewesen.

Besonderer Dank geht an:

Prof. Dr.-Ing. Ralf Bill und Dipl.-Ing. Matthias Naumann M.Sc. vom Lehrstuhl für Geodäsie und Geoinformatik der Universität Rostock für ihre große Unterstützung mit Fachwissen und Messtechnik für Vermessungsaufgaben sowie eine Vielzahl an durchgeführten Vermessungen mit UAS (unmanned aerial systems).

Elfriede Bockholt für die große Unterstützung bei administrativen und finanziellen Aufgaben am Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau der Universität Rostock.

Gdańsk County in Pruszcz Gdański für die administrative Unterstützung am Danziger Forschungsdeich.

Dr. Antje Hiller und Dipl.-Ing. Frank Graage (Steinbeis Team Nordost) für die Unterstützung bei der Antragstellung und in ihrer Funktion als externes Finanzmanagement des Projektes.

Dipl.-Ing. Heike Just als Geschäftsführerin des Wasser- und Bodenverbands "Untere Warnow – Küste" für die Unterstützung für den Pilotdeich.

Igor Kaniecki und Małgorzata Skołmowska vom Joint Technical Secretariat des South Baltic Programme in Danzig.

Dr. Kristina Koebe von Rotorwerk Project Services für das Korrekturlesen des Dikes-Projektantrags.

Dipl.-Ing. Martin Kresin als Vertreter des Bauamts der Stadt Ribnitz-Damgarten für die Unterstützung am Forschungsdeich.

Dipl.-Ing. Heiko Tiburtius als Leiter des Tief- und Hafenbauamts der Hansestadt Rostock für die Unterstützung am Rostocker Forschungsdeich.

Dr inż. Marzena Wójcik für das Finanzmanagement am Department of Geotechnics, Geology and Maritime Engineering, Gdansk University of Technology.

## INHALT

Vorwort	3
DredgDikes-Partner	4
Dank	5
<b>1. Einleitung</b>	
1.1 Umfang des Handbuchs	8
1.2 Hintergrund	9
1.3 Zielgruppe und Verfügbarkeit	11
<b>2. Grundlagen</b>	
2.1 Baggergut	12
2.2 Aschen (nur engl. Hauptdokument)	16
2.3 Geokunststoffe	16
2.4 Deiche	18
2.5 Fallbeispiele für Deiche aus BG	22
<b>3. Rechtliche Aspekte</b>	
3.1 Rechtliche Aspekte für BG	25
3.2 Rechtliche Aspekte für Aschen	27
<b>4. Planung und Entwurf</b>	
4.1 Planungsprozess	30
4.2 Stakeholders	30
4.3 Baugrund und Baustelle	31
4.4 Allgemeine Auswahlkriterien für Deichbaumaterialien	32
4.5 Auswahl und Charakterisierung von Baggergut	34
4.6 Auswahl und Charakterisierung von Aschen	42
4.7 Deichentwurf	43
<b>5. Bauausführung</b>	
5.1 Material- und Einbauqualität	52
5.2 Aufbereitung	54
5.3 Handhabung und Lagerung	55
5.4 Qualitätssicherung	56
5.5 Einbautechnologie	59
5.6 Begrünung	64
<b>6. Deichunterhaltung und Monitoring</b>	
6.1 Unterhaltung und Monitoring von Deichen aus Baggergut	69
6.2 Unterhaltung und Monitoring von Deichen aus Aschegemischen	72
6.3 Zuständigkeiten	72
Glossar	73
Abkürzungen	77
Nomenklatur	78
<b>Elektronische Annexe</b> (PDFs, erhältlich auf <a href="http://www.dredgdikes.eu">www.dredgdikes.eu</a> )	
Annex 1: Additional Information	
Annex 2: Scientific Background	

## 1. EINLEITUNG

### 1.1. Inhalt des Handbuchs

Dieses Handbuch enthält die für Deutschland bzw. Mecklenburg-Vorpommern relevanten Empfehlungen zur Planung und Ausführung von Deichen aus gereiftem Nassbaggergut (BG), Aschen und Geokunststoffen aus dem DredgDikes Guideline. Für die notwendigen Genehmigungen für die Verwertung von BG und Aschen als Ersatzbaustoffe für Standard-Deichbaumaterial wie z.B. Ton, Klei oder Mergel werden die rechtlichen Rahmenbedingungen diskutiert und Empfehlungen für die Anwendung der Rechtsdokumente werden dort gegeben, wo die Rechtslage bezüglich der Verwertung der betrachteten Materialien bislang unklar ist. Rechtliche Aspekte beeinflussen sowohl den Planungsprozess als auch die Bauausführung. Zukünftig sollten auf der Grundlage von Daten, die bei der Wartung und Überwachung von Deichen gewonnen werden, die rechtlichen Rahmenbedingungen angepasst und Lücken geschlossen werden. In Kapitel 4 werden die erforderlichen Schritte für Planung und Entwurf von Deichen aus BG, Aschen und Geokunststoffen beschrieben und Anforderungen an Materialqualitäten und Methoden für die Charakterisierung definiert. In Kapitel 5 werden Empfehlungen zur Bauausführung und zur Qualitätssicherung beim Einbau gegeben. Allgemeine Informationen zu Planung, Entwurf und Bauausführung von Deichen werden zu Übersichtszwecken kurz angerissen, das Hauptaugenmerk liegt jedoch auf den zusätzlichen Empfehlungen bezüglich der alternativen Materialien. Kapitel 6 enthält Empfehlungen zur Deichunterhaltung. Zwei elektronische Anhänge in englischer Sprache enthalten zusätzliche Informationen zu den Handbuch-Kapiteln (Annex I) und zum wissenschaftlichen Hintergrund inklusive der Experimente, die die Basis für die Empfehlungen im Handbuch bilden (Annex II). Abbildung 1.1 zeigt die Struktur des Handbuchs und die Verknüpfungen zwischen den Kapiteln.

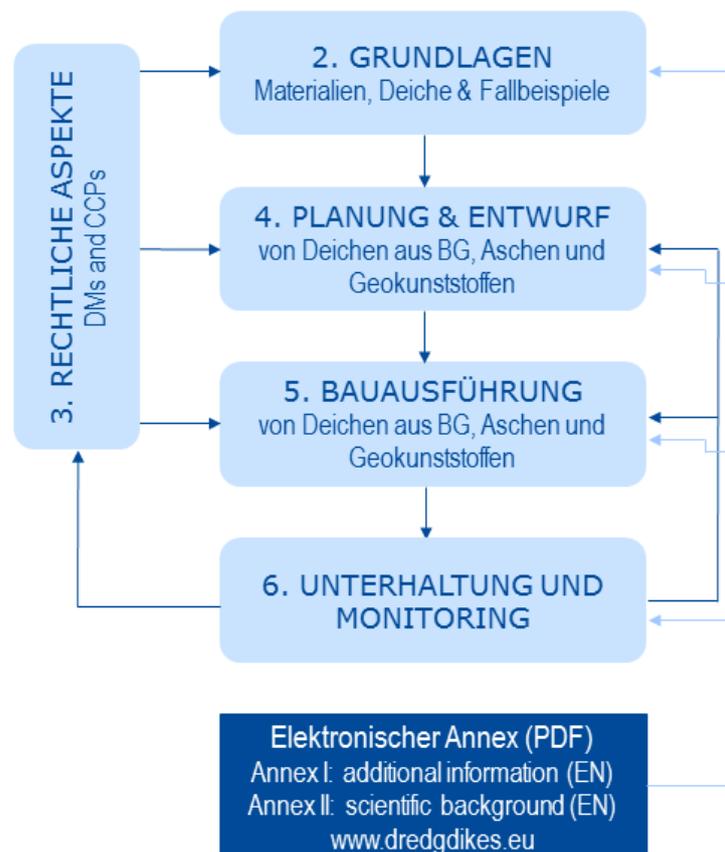


Abb. 1.1. Flussdiagramm mit Handbuch-Struktur und Verknüpfungen zwischen den Kapiteln

## 1.2. Hintergrund

### 1.2.1. Warum dieses Handbuch?

Die Motivation für dieses Handbuch begründet sich in den bislang fehlenden Informationen bezüglich der rechtlichen und ausführungsrelevanten Fragestellungen zu gereiftem Nassbaggergut (BG) und Aschen in existierenden Richtlinien zum Thema Deichbau. Dieses Informationsdefizit war auch einer der Gründe, weshalb zuständige Genehmigungsbehörden und ausführende Unternehmen wiederholt den Einsatz von BG in verschiedenen Deichbauprojekten in Mecklenburg-Vorpommern ablehnten. Obwohl es in Bremen umfangreiche Erfahrungen mit der Verwertung von BG in Deichdeckschichten gibt, ist der Ansatz für die Ostseeküste neu. Feinkörniges BG wurde bereits erfolgreich in der Landwirtschaft, im Landschaftsbau und bei der Deponie-rekultivierung eingesetzt, mit guten Erfahrungen bezüglich Bodenfruchtbarkeit, geotechnischer Standsicherheit und Erosionsstabilität. Obwohl BG eine gute Ressource für Bodenverbesserung und verschiedene Bauaufgaben ist, fällt es unter das Abfallrecht, sobald es an Land gebracht wird. Der Europäische Abfallkatalog (EWC) [1] definiert zwei Kategorien von Baggergut. Deshalb bedarf es jeweils einer Einzelfallentscheidung, wenn eine Genehmigung zum Einsatz von BG benötigt wird. Das ist jedoch nicht das eigentliche Problem, vielmehr sind die Abläufe nicht klar beschrieben, wie eine Genehmigung zu erhalten ist; dies erschwert eine Bewertung. Dieses Handbuch enthält zum ersten Mal eine umfangreiche Anleitung zu diesem Thema.

Auf der anderen Seite besteht ein erheblicher Überschuss an Aschen aus Kraftwerken in Polen, die häufig in geotechnischen Ingenieurprojekten wie z.B. im Straßenbau eingesetzt werden, häufig gemischt mit anderem Bodenmaterial. Zudem beschäftigen sich viele internationale Projekte mit der Verbesserung und Stabilisierung von BG für geotechnische Anwendungen unter Verwendung von Flugasche (und anderen Aschen) oder der Aufwertung von Aschen durch Beimischung von Bodenmaterial oder Bindemitteln.

Genauso wie BG werden Aschen durch den EWC [1] als Abfall definiert und alle Regelungen für Abfälle zur Verwertung treffen auch hier zu. Deshalb ähneln sich die Themen BG und Aschen in Bezug auf die Rechtslage und den Verwertungsgedanken. Auf EU-Ebene können Aschen

auch als Baustoffe im Sinne von Sekundärmaterialien erklärt werden, indem sie nach der europäischen Chemieverordnung REACH [2] zertifiziert werden. Dennoch ist die Verwertung von Aschen im Deichbau ein neues Konzept.

Geokunststoffe können in vielen geotechnischen Anwendungen verwendet werden, um verschiedene Aufgaben zu übernehmen, wie Filtern, Trennen, Bewehren und Dränen, wobei sie üblicherweise zur Einsparung von natürlichen und monetären Ressourcen sowie zur Reduktion des Transportaufwands für Erdstoffe beitragen. Sie können auch beim Deichbau eine Reihe an Funktionen übernehmen. Deshalb werden in diesem Handbuch auch Optionen zur Kombination von BG und Geokunststoffen angesprochen um Kosten und Umweltauswirkungen zu reduzieren.

### 1.2.2. Das Projekt DredgDikes

Baggergutforschung hat sich während der vergangenen Jahrzehnte schnell entwickelt. Große Mengen an Sedimenten werden jedes Jahr aus Gewässern entnommen, im Rahmen von Unterhaltungsmaßnahmen und bei Baggerungen aus Naturschutzgründen. In der östlichen Ostsee erfordern große Hafenbauprojekte erhebliche Nassbaggerarbeiten [3]. Der größte Anteil dieses Baggerguts wird in den Gewässern umgelagert [4], [5]. Sedimente mit hohem Feinkornanteil würden jedoch Trübungen an der Verklappungsstelle verursachen und kontaminierte Sedimente die Ablagerungsflächen verunreinigen, weshalb solche Materialien an Land verbracht werden müssen. Obwohl die an Land gebrachten Sedimente grundsätzlich Abfall im Sinne des europäischen Abfallkatalogs sind, besitzen sie ein hohes Potential zur Verwertung in einer Vielzahl von Anwendungen, insbesondere wenn sie nicht oder nur gering kontaminiert sind [6]. Die europäische Abfallrahmenrichtlinie fordert Verwertungsraten für Abfälle, z.B. für BG, das an Land verwertet wird, eine Verwertungsrate von 70 % bis 2020. Das erfordert Forschung und Entwicklung in allen Bereichen des Sedimentmanagements. Mit einem wachsenden Umweltbewusstsein im gesamten Ostseeraum werden verschiedene Strategien diskutiert, wie die Menge an verklapptem Baggergut reduziert werden kann.

Diese Recycling-Philosophie ist auch die Motivation für die Forschung zur Ascheverwertung. Langezeit wurden Aschen ausschließlich deponiert, wodurch sie wesentlich

zur Vergrößerung industrieller Abfallablagerungsflächen beitragen. Erste Ideen, die Materialien als sekundäre Aggregate zu nutzen, stammen aus der Forschung zur Bodenstabilisierung im Straßenbau mit Flugasche und gehen auf die 1970er Jahre zurück [8]. Auf EU-Ebene werden Aschen als Baustoffe akzeptiert und deren Verwendung im Bauwesen gefördert. Die EU-Vorschrift 305/2011 [9] definiert harmonisierte Bestimmungen für den Vertrieb von Baustoffen und empfiehlt insbesondere, in erster Linie sekundäre Materialien zu verwenden (§ 55 [9]).

Der Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau an der Universität Rostock erforscht den Einsatz von BG als Ersatzmaterial im Deichbau seit 2007. Themen zum Deichbau, besonders mit Fokus auf Geokunststoffe in Deichen und die Ermittlung hydraulischer Bemessungsgrößen, sind bereits seit langem Forschungsgegenstand am Lehrstuhl.

Das Department für Geotechnik, Geologie und Maritimes Ingenieurwesen an der TU Danzig besitzt langjährige Erfahrungen mit dem Einsatz von Asche in der Geotechnik.

Das Steinbeis Transferzentrum Angewandte Landschaftsplanung in Rostock, das aus einer universitären Einrichtung hervor ging, ist u.a. spezialisiert auf Baggergutforschung. Die Wissenschaftler waren maßgeblich an der Neugestaltung der Industriellen Absetz- und Aufbereitungsanlage Rostock (IAA) beteiligt und entwickelten ein Sedimentmanagementsystem, das auf die Baggergutverwertung in der Landwirtschaft, im Landschaftsbau und bei der Deponierekultivierung ausgerichtet ist.

Diese Wissensbasis kombinierter Fachgebiete im Bereich von Geotechnik und Küsteningenieurwesen, BG, Aschen, Bodenkunde, Pflanzenbauwissenschaften und Deichforschung führte schließlich zum Projekt DredgDikes, das zusammen mit zwei weiteren Partner erfolgreich eingeworben wurde: Mit der Hansestadt Rostock und dem Wasser- und Bodenverband "Untere Warnow – Küste" in Rostock, die für den Bau von zwei Forschungsinvestitionen in Deutschland verantwortlich sind. Zudem unterstützten 16 assoziierte Organisationen aus Dänemark, Litauen, Polen und Deutschland das Projekt mit einer Laufzeit von 53 Monaten, das im September 2010 offiziell startete. Das Projekt wurde vom Programm Südliche Ostsee 2007-2013 unter dem Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) gefördert.



Abb. 1.2. DredgDikes Forschungsdeich in Rostock



Abb. 1.3. DredgDikes Forschungsdeich in der Nähe von Danzig



Abb. 1.4. DredgDikes Pilotdeich am Körkwitzer Bach

Das Projekt hatte drei Hauptziele: Die Verwertung von feinkörnigem BG als Ersatzbaustoff für Deichdeckschichten und homogene Deiche, den Einsatz von Gemischen aus Aschen und Sand (BG) für den Deichkern und für Deckschichten sowie die Verwendung von Geokunststoffen zur Verbesserung der Funktion dieser Deiche und um Kosten und Umweltauswirkungen zu reduzieren.

Der Ersatz herkömmlicher Deichbaumaterialien ist von besonderem Interesse, da die Materialien zur Herstellung von Deichdeckschichten, wie z.B. Ton, Klei (Nordsee) und Mergel (Ostsee) knapp sind und unter hohem Aufwand und häufig in empfindlichen Ökosystemen gewonnen werden, in denen nicht immer eine Genehmigung erteilt werden kann.



## 2. GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel sind grundlegende Informationen zu Nassbaggergut (BG), Aschen, Geokunststoffen und Deichen zusammengefasst. Zudem werden Fallbeispiele beschrieben, in denen bereits Baggergut in Deichen verwertet wurde.

### 2.1. Baggergut

(Nass)Baggergut (BG) ist Bodenmaterial, das im Rahmen von Unterhaltungs-, Neu- und Ausbaumaßnahmen aus Gewässern entnommen wird. Im Einzelnen kann BG aus Sedimenten und subhydrischen Böden der Gewässersohle, Böden und deren Ausgangssubstraten im unmittelbaren Umfeld der Gewässersohle sowie Oberböden im Ufer- bzw. Überschwemmungsbereich des Gewässers bestehen [1]. Schwebstoffe und Sedimente sind ein integraler Bestandteil des Ökosystems. Die natürliche Sedimentation von Schwebstoffen und Geschiebe führen zu Ablagerungen und in der Folge zu Einschränkungen der notwendigen Wassertiefen, z.B. in den Wasserstraßen oder Häfen. Diese Ablagerungen müssen regelmäßig durch Nassbaggerung entfernt werden (Abb. 2.1). Das so entstehende BG setzt sich aus mineralischen und organischen Bestandteilen zusammen. Die mineralischen Anteile bestehen aus verwittertem Gestein (Sand/Schluff) und Bestandteilen, die durch Erosion aus Niederschlägen oder Überflutungen von umliegenden Flächen eingetragen werden. Die organische Substanz (OS) setzt sich aus Mikroorganismen, Rückständen von Makrophyten und anderen größeren Organismen sowie aus Detritus zusammen.

Die Eigenschaften von Sedimenten und BG werden definiert von hydrodynamischen, morphologischen und hydrologischen Prozessen im Gewässer. Darüber hinaus sind die Salzkonzentration und die Zusammensetzung der verfügbaren Sedimente wichtig. Die Sedimenttransportparameter sind ursächlich für die Akkumulation von Sedimenten mit unterschiedlichen Korngrößen.

Bei Baggerarbeiten in Wasserstraßen werden von den deutschen Bundesbehörden im Bereich der Nord- und Ostsee jährlich etwa 41 Mio. M<sup>3</sup> BG gebaggert, während im Inland lediglich etwa 5 Mio. m<sup>3</sup> anfallen. Mehr Information findet sich in [2] und [3].



Abb. 2.1. Nassbaggerarbeiten am Warnowtunnel in Rostock, Baggerung von feinkörnigem organischem Baggergut



Abb. 2.2. Umlagern, verwerten und entsorgen von Baggergut

BG besitzt Eigenschaften, die gute Möglichkeiten für die Verwertung als Ersatz zu natürlichen Ressourcen eröffnen, um die aus der Ressourcengewinnung resultierenden Beeinträchtigungen zu reduzieren. Zudem ist eine Verwertung gering belasteten BGs auch ökonomisch sinnvoll.

Aufgrund ökologischer und ökonomischer Gründe ist das übergeordnete Ziel die Minimierung von Nassbaggerarbeiten, d.h. die Sedimente werden im Gewässer belassen (Vermeidung, Vorsorge). Allerdings können Komponenten wie z.B. Schadstoffe die Entfernung der Sedimente aus dem Gewässer erforderlich machen. Aus dem Abfallrecht heraus ergibt sich die Erfordernis, dass die Verwertung von BG Priorität über die Ablagerung bzw. Entsorgung hat, wenn sie gefahrlos und zumutbar ist [4], [5].

Abb. 2.2 zeigt Optionen, wie mit BG umgegangen werden kann. Materialien ohne Schadstoffbelastung und organische Substanz können im Gewässer umgelagert werden. Kontaminiertes BG wird i.d.R. entsorgt (deponiert). Unbelastetes, organikreiches BG sollte verwertet werden, wobei die Verwertungsoptionen von der Art des BG abhängen.

Die Ratifizierung internationaler Konventionen zum Schutz der marinen Umwelt, insbesondere der Ostsee, resultierte in einer wegweisenden Vereinbarung aller Institutionen, die am Schutz der marinen Umwelt beteiligt sind: Bereits 1983 wurde die Ablagerung von kontaminiertem BG sowie von BG mit Anteilen an Feinkorn oder organischer Substanz in Mecklenburg-Vorpommern verboten [6]. Diese Materialien können Sauerstoff zehrende organische Substanzen enthalten, die eine Verschlechterung der Wasserqualität der Ostsee auslösen können. Zudem bedecken Materialien, die unter Wasser abgelagert werden, den Meeresboden inklusive der natürlichen Flora und Fauna. In diesem Zusammenhang verletzen organikhaltigen Materialien das Prinzip "Gleiches zu Gleichem" [7].

### 2.1.1. Definition und Klassifikation

Baggergut kann bezüglich der Korngrößenverteilung und bezüglich der Herkunft in verschiedene Klassen eingeordnet werden. Eine kurze Definition der wichtigsten Begriffe, die in diesem Handbuch im BG-Kontext benutzt werden, wird hier gegeben; eine umfangreichere Terminologie findet sich im Glossar.

*Baggergut* ist ein bodenähnliches Material mit verschiedenen mineralischen und organischen Komponenten, das in Gewässern akkumuliert und im Rahmen von Unterhaltungsmaßnahmen an Wasserstraßen und in anderen Wasserbauprojekten entnommen wird [4]. In diesem Handbuch wird BG unterschieden in sandiges BG, Mischboden und feinkörniges BG (Abb. 2.2). *Sandiges BG* besteht hauptsächlich aus Sand ( $> 0.063$  mm) und geringen Anteilen an Feinkorn ( $< 10$  % of  $d < 0.063$  mm). *Mischboden* in der Definition dieses Handbuchs ist BG mit einem großen Sandanteil und einem ebenfalls großen Anteil an Feinkorn, d.h. mit einer flachen Kornverteilungskurve (Tabelle 2.1). *Feinkörniges BG* bezeichnet BG mit mindestens 15 % Tonpartikeln ( $< 0.002$  mm). Das BG im Kontext dieses Handbuchs ist reich an organischer Substanz und Kalk wenn die jeweiligen Anteile an OS und Kalk 5 % gew. überschreiten.

Die Begriffe *Reifung* und *Reifungsprozess* bezeichnen die Entwässerung des BG in Verbindung mit Mineralisierungs- und Bodenbildungsprozessen. Die Reifung wird von physikalischen, chemischen und biologischen Effekten beeinflusst.

Im Fall von *marinem* und *Brackwasser-BG* ist der Salzgehalt zu berücksichtigen. Die im Projekt DredgDikes untersuchten BG-Chargen stammen aus brackigen Gewässern und sind somit *Brackwasser-BG*. Tabelle 2.1 zeigt exemplarisch allgemeine Parameter von behandeltem Brackwasser-BG aus der Rostocker Aufbereitungsanlage. *Limnisches BG* enthält üblicherweise geringe Anteile an Natrium und Chlorid.

### 2.1.2. Baggergutbehandlung und -aufbereitung

Vor der Verwertung muss Nassbaggergut üblicherweise behandelt und aufbereitet werden. Dies kann direkt auf der Baustelle oder in einer Aufbereitungsanlage realisiert werden, z.B. einem Spülfeldkomplex mit Reifeflächen. Der erste Aufbereitungsschritt ist die Entwässerung. Abb. 2.3 zeigt exemplarisch eine Aufbereitungsanlage, die natürliche Sedimentationsprozesse und Eigengewichtsentwässerung für Klassifikation und Aufbereitung nutzt [12].

Weitere Behandlungsoptionen sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst und umfangreiche Übersichten sind in [4] und [11] veröffentlicht.

Tabelle 2.1. Parameter von behandeltem Brackwasser-BG (IAA Rostock)

Dredged material	Sand	Silt	Clay	TOC	CaCO <sub>3</sub>
Mean fine-grained	40	38	24	6	8
Max. fine-grained	74	64	46	10	16
Mean mixed DM	74	16	8	3	6
Max. mixed DM	90	26	15	6	10

Tabelle 2.2. Behandlungsoptionen für Baggergut

Behandlungsoptionen für Baggergut
Korngrößen-Klassifikation und Sortierung Klassifikation bezüglich Gewicht und Größe, Sortierung bezüglich der Partikeleigenschaften, wie Dichte / Form
Trennen Basiert auf der Korngröße. Kann durch Siebe oder Hydrozyklone realisiert werden. Trennung wird hauptsächlich für die Kornfraktion 20 – 63 µm verwendet.
Entwässerung Trennung von Wasser und Feststoff. Die zur Entwässerung benötigte Zeit hängt vom Feinkornanteil und den organischen Bestandteilen ab.
Biologische Prozesse/ Biodegradation Zersetzung von organischer Substanz durch Mikroorganismen
Thermische Prozesse Desorption, Oxidation, Immobilisierung bezüglich Verunreinigungen und organischer Substanz
Chemische Bindung Immobilisierung von Schadstoffen durch Beimischung von Substanzen, die die Elution vermindern.

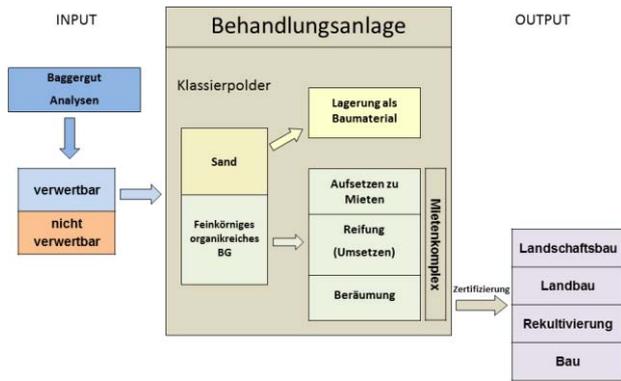


Abb. 2.3. Beispiel einer Behandlungsanlage auf der Basis der natürlichen Sedimentation [12]

### 2.1.3. Schadstoffbelastungen

Ein wesentlicher Anteil der Schadstoffbelastungen in den Gewässern absorbiert an den Oberflächen von Tonpartikeln und organischer Substanz in den Sedimenten. Die Belastungen können unterschiedlich stark sein und sich über die Zeit verändern. Sie stammen aus punktuellen und diffusen Quellen.

Allgemeine Informationen zum Grad der Schadstoffbelastung im BG und zur Entsorgung finden sich auf den Webseiten der International Maritime Organization (IMO) [13] und der Helsinki Commission (HELCOM) [14]. Informationen über kontaminierte Sedimente in europäischen Flusseinzugsgebieten finden sich bei SedNet [15]. Brackwasser-BG enthält erhebliche Anteile an Chlorid- und Sulfatsalzen, die bei der Verwertung berücksichtigt werden müssen.

Die Gehalte an Schwermetallen und organischen Schadstoffen in Küstensedimenten variieren stark, abhängig vom Einzugsgebiet des Ablagerungsortes und

Tabelle 2.3. Typische Schwermetallgehalte von feinkörnigem BG aus Küstengewässern; verschiedene Spülfelder in MV und Rostocker Absatz- und Aufbereitungsanlage (IAA) [17]

Parameter	MV	IAA Rostock
	mg/kg TM	mg/kg TM
Arsen	0,6 – 6,8	5 – 25
Blei	15,9 – 38,7	10 – 35
Kadmium	0,3 – 1,0	0 – 0,76
Chrom	16,7 – 44,0	12 – 63,5
Kupfer	15,8 – 41,5	14 – 37
Nickel	15,8 – 27,7	11 – 18
Quecksilber	0,05 – 0,35	0 – 0,9
Zink	55 – 178,7	36 – 177

dem Gehalt an Feinkorn und organischer Substanz. Die Lösbarkeit von Schwermetallen steht im Zusammenhang mit den Redox-Verhältnissen und dem Kalkgehalt im BG. Erhöhte Gehalte an Zink und Kohlenwasserstoffen können auch biogenen Ursprungs sein. In MV wurden erhöhte Konzentrationen von Organo-Zinnverbindungen (TBT) gefunden, allerdings lokal in Häfen und Werften. Für die landseitige Verwertung bestehen keine Richtwerte für TBT, da durch die Oxidationsprozesse während der Aufbereitung diese Verbindungen stark abgebaut werden. In Tabelle 2.3 sind exemplarisch die Schwermetallgehalte von feinkörnigem BG in MV zusammengestellt. In verschiedenen Hotspots in Häfen und Wasserstraßen wurden erhöhte Schadstoffgehalte, u.a. Schwermetalle, gefunden [16].

### 2.1.4. Verwertungsoptionen für Baggergut

Wenn BG an Land verbracht wird, fällt es unter das Abfallrecht; die Abfallhierarchie aus der Abfallrahmenrichtlinie (Abb. 2.4) trifft somit auch auf das BG-Management zu. BG kann auf viele Arten verwertet werden. Umfangreiche Zusammenstellungen finden sich in [4], [8], [19]. Tabelle 2.4 zeigt eine Auswahl an Verwertungsoptionen, unterschieden nach verschiedenen BG-Arten. Rechtliche Aspekte bezüglich der Verwertung in der Geotechnik sowie Informationen über die Eignung finden sich in den folgenden Kapiteln des Handbuchs.

### 2.1.5. Umweltaspekte

Bei der Verwertung von Abfällen müssen die möglichen Umweltbeeinträchtigungen analysiert werden. Dabei sind die verschiedenen Transportpfade für die verschiedenen Inhaltsstoffe sowie deren potentielle Einflüsse zu bestimmen und zu überwachen.

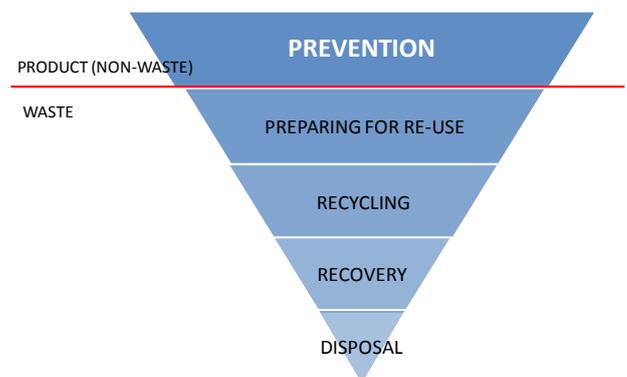


Abb. 2.4. Abfallwirtschaftliche Hierarchie - BG-Management [18]

Tabelle 2.4. Verwertungsoptionen für Baggergut für verschiedene Arten von BG (verändert nach [19])

Verwertungsoptionen for Baggergut	Baggergut				
	Fels	Kies	Sand	Ton/Schluff	Mischboden
Straßenbau	x	x	x	x	x
Austauschboden / Auffüllung	x	x	x	x	x
Deichbau, Deichrekonstruktion	x	x	x	x	x
Aufschüttungen, Lärm- und Windschutzwälle			x	x	x
Landgewinnung		x	x	x	x
Stabilisierung		x	x		x
Dichtung von Spülfeldern				x	
Abdeckung von Spülfeldern, Deponien und kontaminierten Sedimenten		x	x	x	x
Rekultivierung			x	x	x
Standortverbesserung (Landwirtschaft, Biotope)				x	x

### 2.1.5.1. Auswaschungen

Im Projekt DredgDikes wie auch in mehreren anderen Projekten (s. [20] [21]) wurde gezeigt, dass die Schwermetalle im Sickerwasser kein grundsätzliches Risiko bzgl. der Schutzgüter (Boden, Pflanze, Tiere) darstellen. Die Gehalte im Sickerwasser und im Feststoff liegen üblicherweise unter den Richtwerten der relevanten Empfehlungen und Richtlinien. Schwermetalle und organische Schadstoffe sind chemisch stabil und schwer verfügbar. Verändernde Redox-Bedingungen, die Schwermetalle verfügbar machen können (z.B. während der ersten Wochen der Entwässerung von frisch gebaggertem BG) bergen ein gewisses Risiko. Dies ist jedoch i.d.R. ein kurzfristiger Effekt und nach und nach nimmt die Lösbarkeit erheblich ab, üblicherweise deutlich unter die relevanten Richtwerte [22].

Im Projekt DredgDikes wurde kein Austrag von Schwermetallen oder der Nährstoffe N und P im Sickerwasser festgestellt. Im Unterschied zu den Schwermetallen besteht ein Überangebot an verschiedenen Nährstoffen und Salzen im Brackwasser-BG. Bezüglich landwirtschaftlicher Aspekte sind die Nährstoffe Magnesium, Kalium und Kalzium auf einem hohem Versorgungsniveau für Pflanzen [23]; daraus resultiert, dass sie ausgewaschen werden können, wenn die Vegetation sie nicht absorbiert.

Die Salzionen verhalten sich ebenso. Chlorid ist leicht löslich und wird daher kurzfristig ausgewaschen. Im untersuchten Sickerwasser wurden hohe Gehalte an Chlorid, Sulfaten und Natrium nachgewiesen. Zusätzlich konnten hohe Konzentrationen an Magnesium, Kalium und Kalzium nachgewiesen werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die üblichen anorganischen Schadstoffe, die häufig in BG vorhanden sind, unterhalb der geforderten Richtwerte liegen, und dass eher der Salzgehalt im Brackwasser-BG problematisch für die Umwelt sein kann [20], [24].

Diese wissenschaftlichen Ergebnisse führen dazu, dass die Auswaschung von Salzen überwacht werden muss, wenn Brackwasser-BG verwertet wird. Bei der Verwertung in Seedeichen spielen die Salze jedoch wegen der geogen erhöhten Salzgehalte im Umfeld eine untergeordnete Rolle.

### 2.1.5.2. Partikel-Transport und Schadstoffe

Neben der Salz- und Nährstoffverlagerung im Sickerwasser besteht ein potentes Risiko bezüglich der Verfrachtung von Bodenpartikeln durch Oberflächenerosion. Üblicherweise verhindert dies ein wirksamer Erosionsschutz (Vegetation oder Konstruktion). In der Anfangsphase direkt nach Fertigstellung der Deckschicht und bevor die Ansaat keimt, besteht zwar ein erhöhtes Erosionsrisiko, das aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen an neu gebaute Deiche jedoch gering ist.

### 2.1.5.3. Biologische Abbaubarkeit

Gereiftes BG enthält oft größere Anteile an organischer Substanz. In Rostock enthält das feinkörnige BG zwischen 4 und 10 % TOC (6 bis 17 % Humus). Die organische Substanz und der Kalk bilden mit dem hohen Feinkornanteil äußerst stabile Aggregate aus organo-mineralischen Komplexen, die besonders für die Erosionsstabilität des BG verantwortlich sind, mit günstiger Sorptionskapazität, hoher Wasserspeicherkapazität und guter Bodenfruchtbarkeit. Zweifel bezüglich der Stabilität gegen Abbau der

organischen Substanz konnten in mehreren Untersuchungen unter Nutzung des AT<sub>4</sub> Atmungstests [25] zerstreut werden. Wiederholte Untersuchungen zeigen, dass die organische Substanz im BG sehr stabil ist. Die Abbauraten im AT<sub>4</sub>-Test beim gereiften BG (< 0.5-0.6 mg O<sub>2</sub>/g Trockenmasse) sind deutlich unter dem Richtwert der relevanten Verordnung (5 mg O<sub>2</sub>/g Trockenmasse, DepV) [25].

### 2.1.6. Weiterführende Informationen

Weitere Informationen über Baggergut und zu Baggergutverwertung und –entsorgung in der südlichen Ostseeregion finden sich in [3], [4], [6], [8], [11], [19], [25], [26].

## 2.2. Aschen

Da die Verwertung von Aschen in Deichen in Mecklenburg-Vorpommern zurzeit eine untergeordnete Rolle einnimmt, wird für Hintergrundinformationen auf das Hauptdokument in englischer Sprache verwiesen.

## 2.3. Geokunststoffe

Geokunststoffe werden seit den 1970er Jahren eingesetzt und erfüllen eine Vielzahl an Funktionen in geotechnischen Projekten. Sie wirken z.B. als Filter, Bewehrung, Dichtung und Trennlagen.

Geokunststoff“ (GSY) ist der Oberbegriff für ein Produkt, bei dem mindestens ein Bestandteil aus synthetischem oder natürlichem Polymerwerkstoff hergestellt wurde, in Form eines Flächengebildes, eines Streifens oder einer dreidimensionalen Struktur, das bei geotechnischen und

anderen Anwendungen im Bauwesen im Kontakt mit Boden und/oder anderen Baustoffen verwendet wird [27]. GSY können in wasserdurchlässige und wasserdichte Flächengebilde unterteilt werden [28] (Abb. 2.5). Im Folgenden wird die Terminologie aus EN ISO 10318 [27] auf Basis von [28] kurz erläutert. Abb. 2.6 zeigt Beispiele verschiedener Geokunststoffe.

### 2.3.1. Geokunststoff-Terminologie

Geotextil (GTX) ist ein flächenhaftes, durchlässiges, polymeres (synthetisches oder natürliches) Textil, entweder Vliesstoff (GTX-N, aus gerichteten oder regellosen Fasern [...] mechanisch und/oder thermisch und/oder chemisch verfestigt), Maschenware oder Gewebe (GTX-W), das bei geotechnischen Anwendungen [...] verwendet wird [27].

Geotextilverwandtes Produkt (GTP) ist ein flächenhaftes, durchlässiges polymers [...] Material, das nicht der Definition eines Geotextils entspricht, z.B. Geogitter (GGR) und geogitterverwandtes Produkt wie Geoband (GST), Geonetz (GNT), Geomatte (GMA), Geozelle (GCE) und Geospacer (GSP).

Wasserdichte Geokunststoffe werden unterteilt in geosynthetische Tondichtungsbahnen (GBR-C), geosynthetische Kunststoffdichtungsbahnen (GBR-P) und geosynthetische Bitumendichtungsbahnen (GBR-B).

Schließlich gibt es Kombinationen verschiedener Geokunststoffe, die Verbundstoffe (GCO), um verschiedene Funktionen zu kombinieren, z.B. eine geosynthetische Dränmatte, die aus einem Dränelement besteht, das zwischen zwei Geotextilien mit Filterfunktion liegt.

### 2.3.2. Funktionen von Geokunststoffen

Geokunststoffe können verschiedene Funktionen erfüllen, die in Abb. 2.7 zusammengestellt sind, bzw. ihre Kombination, in Anlehnung an EN ISO 10318 [27]. Detaillierte Informationen über die verschiedenen Funktionen finden sich auch in [28].

### 2.3.3. Weiterführende Informationen

Weiterführende Informationen über Geokunststoffe, Auswahlempfehlungen, Einbauleitfäden, Rohstoffe, Materialverhalten, Prüfung und Qualitätssicherung findet sich in [28] und den europäischen und deutschen Geokunststoffnormen, sowie in den folgenden Dokumenten: [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36].

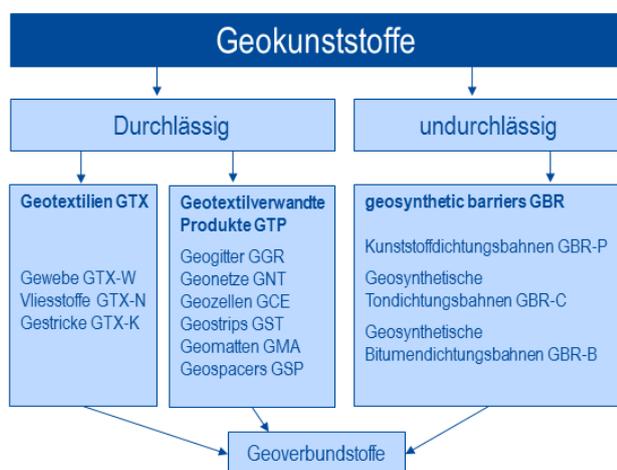


Abb. 2.5. Klassifikation von Geokunststoffen [28]

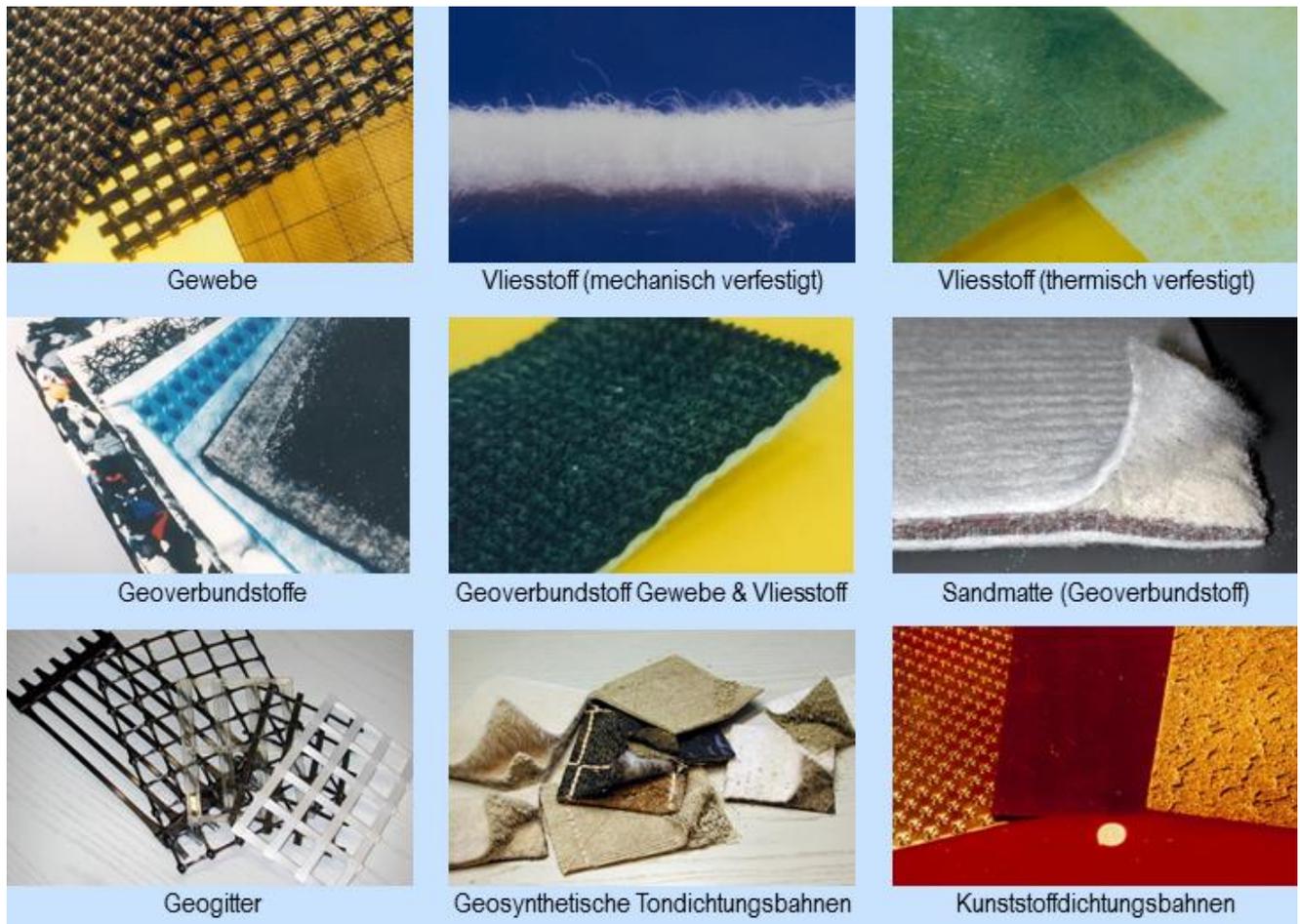


Abb. 2.6. Beispiele verschiedener Arten von Geokunststoffen [28]

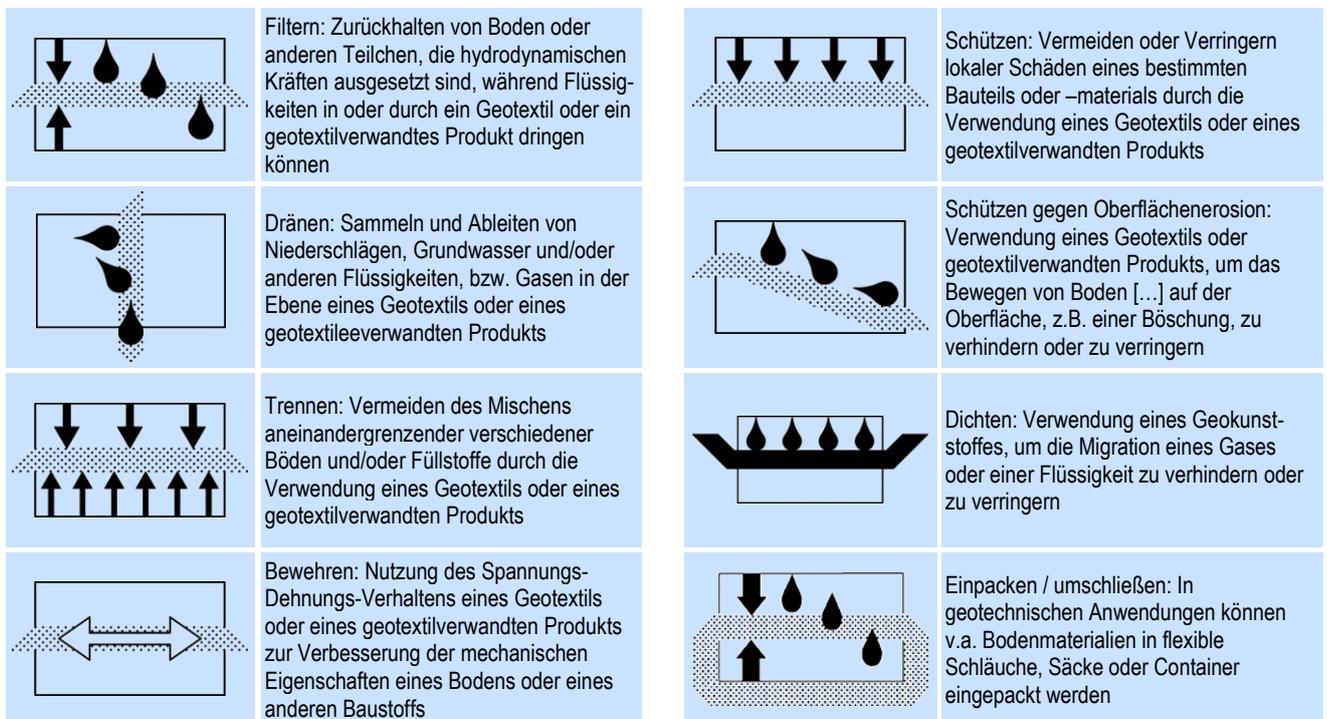


Abb. 2.7. Funktionen von Geokunststoffen [27]

## 2.4. Deiche

Ein Deich ist ein temporär durch Hochwasser belasteter Damm zum Schutz vor Überschwemmungen und Sturmfluten. Deiche werden i.d.R. aus Bodenmaterialien hergestellt, unter Verwendung weiterer Baustoffe, wie z.B. Geokunststoffen. Sie werden unterschieden in Fluss- und Seedeiche, in scharliegende und zurückgesetzte Deiche sowie in Haupt-(Winter-) und Sommerdeiche (Abb. 2.8). Flussdeiche müssen den angreifenden Lasten häufig für mehrere Wochen standhalten, während Seedeiche für kürzere Einwirkungsdauern bemessen sind, dafür jedoch die Wellenbelastungen aufnehmen müssen [36], [37].

Deiche sollen das Hinterland durch einen ausreichend bemessenen Querschnitt gegen Überflutung schützen. Die Bemessung des Deichquerschnitts (inkl. Böschungsneigungen) wird beeinflusst von den lokalen Bedingungen des Wellenangriffs und der Standzeit der Hochwasserwelle. Auch die verfügbare Grundfläche kann ein limitierender Faktor sein. Die Höhe der Deichkrone hängt von den jeweiligen Bemessungshochwasserständen ab, inklusive der Zuschläge für Wellenauflauf und Sicherheit.

Die Bemessung von Deichen muss immer die Vorlandverhältnisse mit einbeziehen, da diese entscheidende Einflüsse zur Minderung von Wellenenergie und hydrodynamischen Belastungen haben. Dünen und Küstenwälder auf der Wasserseite eines zurückgesetzten Deiches reduzieren Wasserspiegelhöhe und Wellenbelastung. Bei Schardeichen mit direkter Hochwasserbelastung werden die Böschungen i.d.R. mit einem Deckwerk verstärkt.

Deiche sind i.d.R. nicht vollständig wasserdicht; abhängig von der Situation und der Bauweise können erhebliche Mengen Sickerwasser durch den Deich fließen. Aus Gründen der Standsicherheit sollte die Sickerlinie immer am landseitigen Deichfuß oder in einem definierten Filter- oder Dränbereich austreten (z.B. Dränprisma). Alle Aspekte der Deichbemessung und des Deichbaus sind umfänglich in [38] zusammengefasst.

Aufgrund der temporären Hochwasserbelastung von Seedeichen (ein bis wenige Tage), dominieren instationäre Verhältnisse die Durchströmung des Deichkörpers. Die Durchströmung eines Deichquerschnitts kann von der Auswahl der Baustoffe und deren Anordnung beeinflusst werden. Die Deichdeckschicht muss gegen Oberflächen-erosion geschützt werden, die durch Regen, Strömung,

Wellenangriff oder Wellenüberschlag ausgelöst wird, sowie gegen innere Erosion wie Piping und Kontakterosion (Abb. 2.12). Die natürliche mineralische Deichdeckschicht ist deshalb mit hoher Qualität und Verdichtung einzubauen [36], [37] und wo nötig durch ein Deckwerk zu verstärken.

Die Eigenschaften eines Flussdeiches weichen von denen eines Seedeiches ab, da er einem Hochwasser üblicherweise über einen längeren Zeitraum ausgesetzt ist (ein bis mehrere Wochen). Im Deichkörper können dadurch stationäre Strömungsverhältnisse erreicht werden [39], insbesondere in alten Bestandsdeichen mit einer vergleichsweise schwachen Dichtung.

Im folgenden Abschnitt werden in diesem Handbuch verwendete Begriffe zu Deichen definiert, und es werden wichtige Aspekte zu See- und Flussdeichen angesprochen. Schließlich wird als Grundlage für das Kapitel 4 ein kurzer Überblick über Versagensfälle von Deichen gegeben.

### 2.4.1. Deichterminologie

Ein Deichquerschnitt ist charakterisiert durch seine Böschungsneigung, die Kronenbreite und -höhe sowie die Anordnung von Bermen (Abb. 2.9).

Bei der Bemessung der Höhe und Breite der Krone und der Anordnung eines möglichen Deckwerks sind alle relevanten Belastungen zu berücksichtigen. Die Deichkrone ist i.d.R. mindestens 3 m breit und hat eine Neigung zur Wasserseite (i.d.R.  $> 2\%$ ) [40]. Ist eine Straße auf der Krone geplant, sollte sie  $\geq 4$  m breit sein.

Die Wahl der Deichböschungen ist eine Frage der Standsicherheit, der Zugänglichkeit für Wartung und Pflege und der Einbettung in die umgebende Landschaft. Die zulässige Böschungsneigung hängt vom verwendeten Baustoff ab und ist in einer Standsicherheitsanalyse nachzuweisen. Typische Böschungsneigungen variieren, besonders zwischen See- und Flussdeichen und aufgrund historischer Entwicklungen [36], [39].

Der Deichfuß ist der untere Teil der Böschung, inklusive einer eventuellen Einbindung in den Untergrund. Wegen seiner Lage wird der wasserseitige Deichfuß häufiger durch Hochwässer, Wellen und Feuchtigkeit belastet als der Rest des Deiches. Dabei ist die Häufigkeit der Hochwasserereignisse wichtiger als der Bemessungswasserstand. Der beste Schutz des wasserseitigen Deichfußes ist ein Vorland. Bei Schardeichen sollte der Deichfuß in den Untergrund eingebunden werden [36], [39].

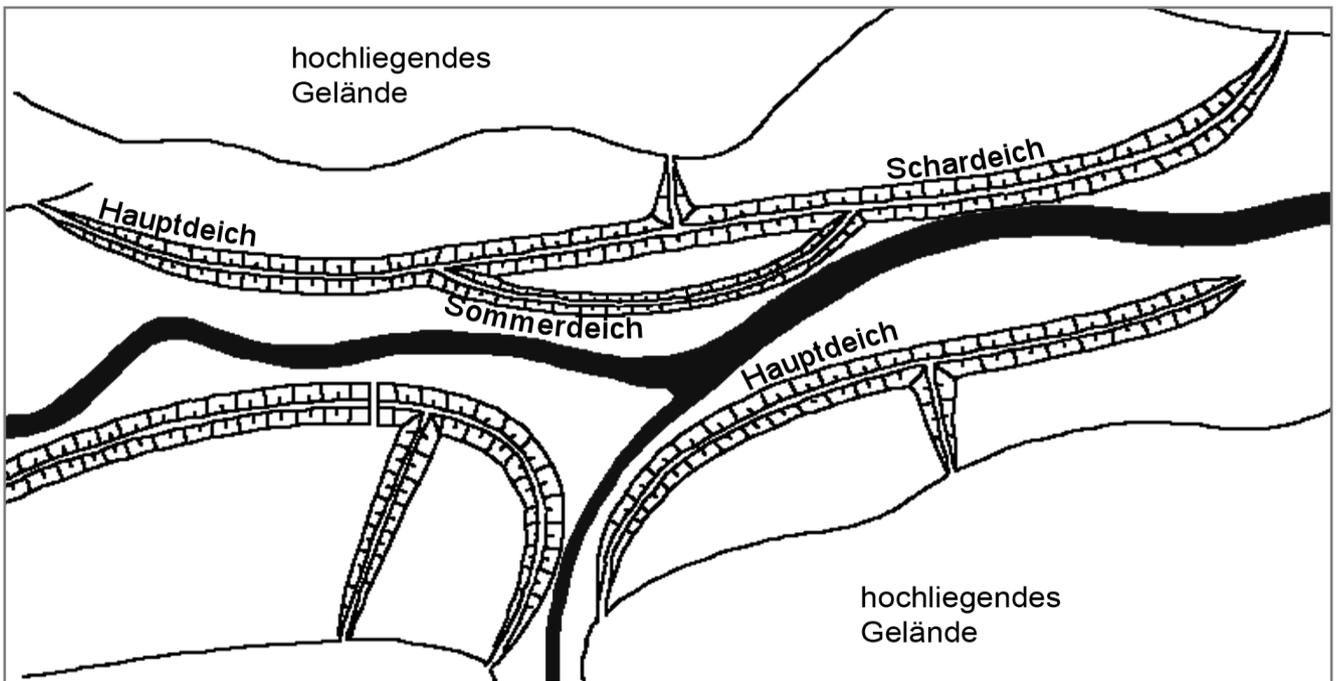


Abb. 2.8. Deiche, Begriffe (verändert nach [40])

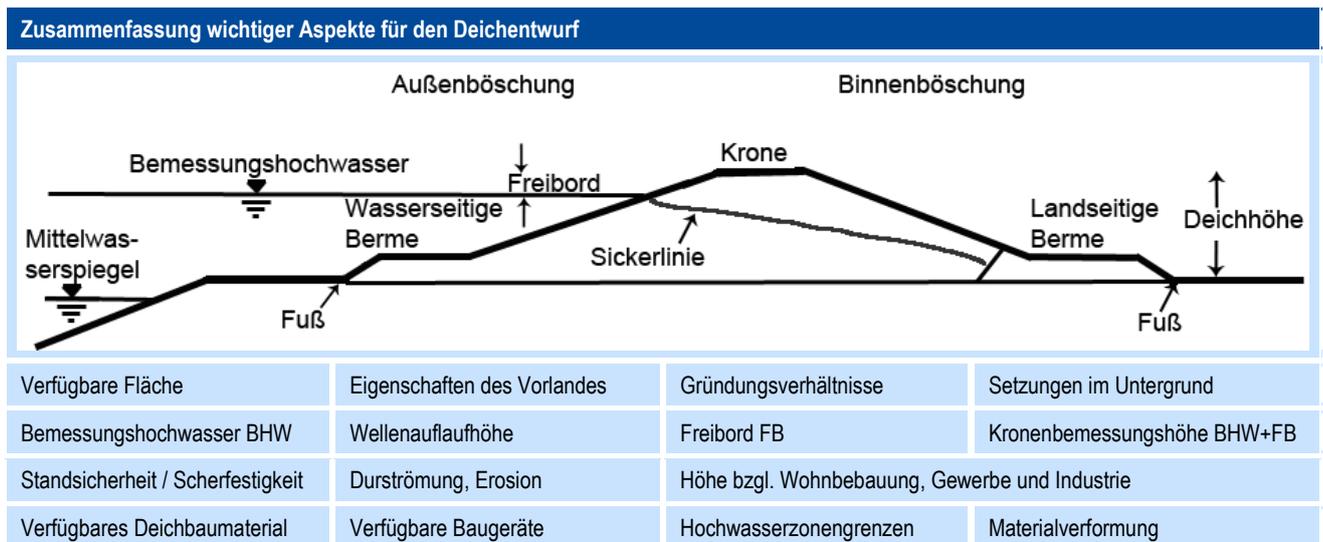


Abb. 2.9. Begriffe und Aspekte zum Deichentwurf ([39], [40], [41])

Bermen erleichtern Reparaturen und Pflegemaßnahmen auf Deichen und erhöhen die Standsicherheit der Querschnitte. Die Breite der Bermen und ihre Anordnung auf der Böschung werden in Abhängigkeit dieser Anforderungen entworfen.

Der Freibord ist der vertikale Abstand vom Bemessungswasserstand zur Deichkrone und wirkt als Sicherheitsfaktor. Er wird hauptsächlich bezüglich Wind und Wellenaufbau ermittelt, wenn nötig unter Verwendung weiterer Parameter [39].

Zufahrtsstraßen sind abhängig vom Zweck und der Art der zu transportierenden Lasten, während der Deichherstellung und der Unterhaltung. Straßen sollten parallel

zum Deich auf einer landseitigen Berme oder auf der Krone angeordnet werden und sollten einen Anschluss an öffentliche Straßen haben (min. alle 4 km) [40].

### 2.4.2. Seedeiche

Die Deiche an der deutschen Nord- und Ostseeküste und entlang der Tidedröme wurden historisch gesehen aus regionaltypischen Materialien hergestellt, die deren Hauptunterschiede darstellen. Im Hochwasserfall werden Deiche üblicherweise durch Wellen belastet und manchmal wird auch die landseitige Böschung durch Wellenüberlauf oder -überschlag belastet. Seedeiche werden unterteilt in Schardeiche und zurückgesetzte Deiche [37], [36].

Grundsätzlich können zwei Arten von Deichen an den deutschen Küsten angetroffen werden: Deiche mit einem Stützkörper aus Sand mit einer kohäsiven Deckschicht aus Ton, Klei oder Mergel (Abb. 2.10) und homogene Deiche [36]. EAK 2002 [36] enthält umfangliche Informationen zur Bemessung, zum Bau und zum Monitoring von Seedeichen an der deutschen Ostseeküste.

Der Vorlanddeich an der Ostseeküste von MV ist nur ein Teil eines komplexen Küstenschutzsystems, das aus dem Strand, der Düne und dem Küstenwald besteht und dessen letzte Verteidigungslinie der Deich ist. Es gibt aber auch scharliegende Deiche, z.B. entlang der Bodden und auf den Inseln Rügen und Hiddensee.

Tabelle 2.5. Allgemeine Eigenschaften deutscher Ostseedeiche

Relevante Richtlinien	EAK 2002 [36]	
Bemessungshochwasser	Mit Vorland	Ohne Vorland
Neigung am Deichfuß	1:15	1:3 - 1:4
Kronenbreite	2,5 m bis 3 m	
Neigung Außenböschung	1:3 bis 1:6	
Neigung Binnenböschung	1:3	
Dicke der Deckschicht	0,5 m bis 1,2 m Außenböschung 0,5 m bis 0,7 m Binnenböschung	

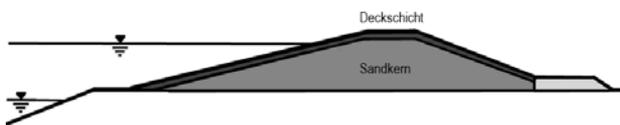


Abb. 2.10. Beispielquerschnitt: Seedeich mit Sandkern und Deckschicht

Tabelle 2.6. Allgemeine Eigenschaften deutscher Flussdeiche

Relevante Richtlinien	DIN 19712 [39] / DWA-M 507 [40] / ZTV-W 205 [42] / ZTV-W 210 [43]
Kronenbreite	3,0 m (min. 2,0 m)
Böschungsneigungen	1:3
Empfohlene hydraulische Leitfähigkeit für Dichtungselemente	2 Größenordnungen niedriger als der Stützkörper [39] Nach ZTV-W 210 [43]: $q_s < 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$

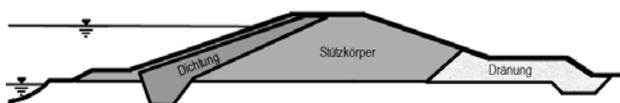


Abb. 2.11. Beispielquerschnitt: Flussdeich mit drei Zonen (Dichtung, Stützkörper, Dränung)

Die Seedeiche in MV bestehen üblicherweise aus einem Sandkern (Stützkörper), einer erosionsstabilen, geringer

durchlässigen Deckschicht aus Mergel und einer Oberbodenschicht für die Etablierung der Vegetation.

Bei scharliegenden Deichen ist die wasserseitige Böschung üblicherweise durch ein Deckwerk verstärkt. Allgemeine Eigenschaften deutscher Ostseedeiche sind in Tabelle 2.5 zusammengestellt.

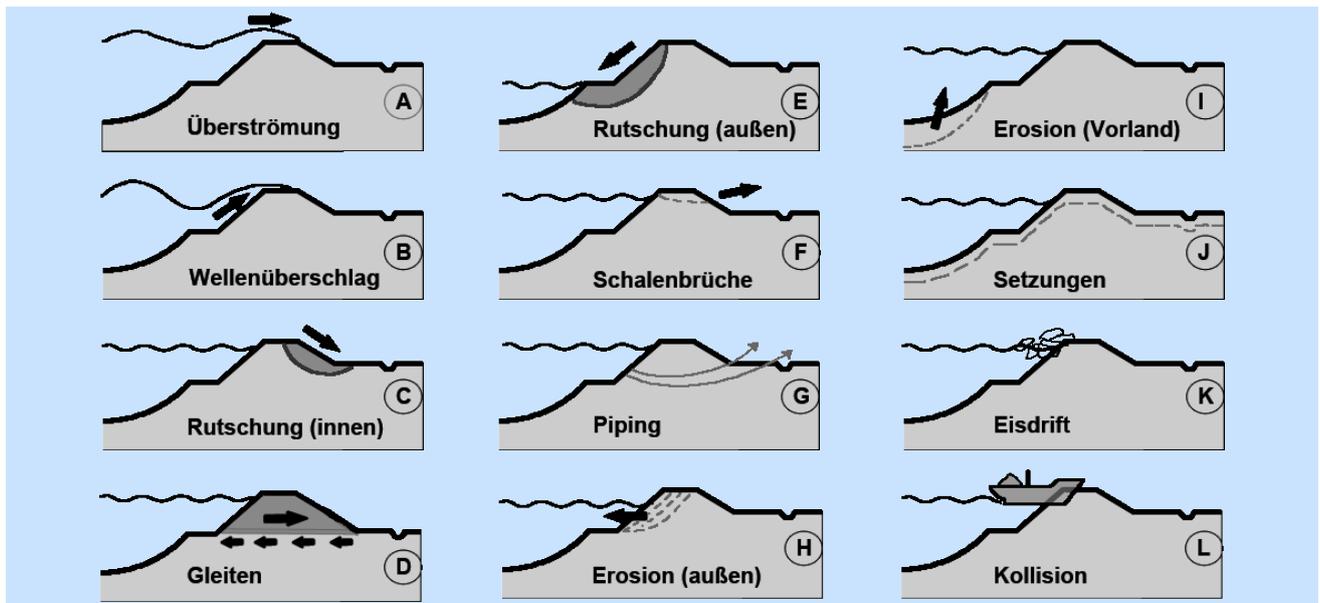
Die Verantwortlichkeiten für deutsche Deiche sind in den Landeswassergesetzen der Länder geregelt. In MV sind Deichverbände verantwortlich für Planung, Bau und Unterhaltung von Seedeichen. Wo Deichverbände fehlen, übernehmen die Staatlichen Ämter für Landwirtschaft und Umwelt (StÄLU) diese Verantwortlichkeit.

### 2.4.3. Flussdeiche

Deutsche Flussdeiche werden nach 19712 [39] und DWA-M 507 [40] bemessen, üblicherweise als Mehrzonendeich (Dreizonendeich), und nach ZTV-W-205 [42] und ZTV-W-210 [43] hergestellt. Der Bemessungsquerschnitt besteht aus einem Stützkörper, einer Dichtung gegen Sickerströmung –entweder auf der wasserseitigen Böschung (z.B. Tondichtung oder Bentonitmatte) oder im Deichkern- sowie einem Dränsystem am landseitigen Deichfuß. Bestehende Flussdeiche sind jedoch nicht immer nach diesem Standard gebaut. Es gibt eine große Anzahl an homogenen Deichen aus lokal verfügbarem Material. Viele dieser Deiche werden oder wurden in den vergangenen Jahren Instandgesetzt, z.B. durch zusätzliche Dichtungselemente. Eine Auswahl an Konstruktionsaspekten findet sich in Tabelle 2.6. Mehr Informationen finden sich in [39] und [40].

### 2.4.4. Versagensfälle von Deichen

Bei der Deichbemessung ist die Standsicherheitsanalyse von zentraler Bedeutung. Üblicherweise werden aufwändige geotechnische und geohydraulische Modelle verwendet, um diese Analysen durchzuführen. Die wichtigsten Aspekte, für welche die Standsicherheit nachzuweisen ist, sind: Innere Erosion, Böschungs- und Geländebruch, Hydraulischer Grundbruch und Oberflächen-erosion bezüglich Wellenauflauf und Wellenüberlauf. Abb. 2.12 zeigt eine Zusammenstellung der Deichversagensfälle nach [44]. Weiterführende Informationen finden sich in [38].



A	Hoher Wasserspiegel und Wellenüberlauf führen zur Überschwemmung der Flächen hinter dem Deich ohne den Deich zu zerstören
B	Wellenüberschlag führt zu Erosion der Binnenböschung
C	Hoher Wasserspiegel und Wellenüberlauf führen zu Infiltration und Überströmung auf der Binnenböschung, wos zu Rutschungen kommen kann. Auch erhöhter Wasserdruck gegen den Deich sowie erhöhte Porenwasserdrücke können Rutschungen auslösen.
D	Gleiten des Deichkörpers aufgrund erhöhter Belastung durch Hochwasser und erhöhte Porenwasserdrücke im Untergrund.
E	Schnelles Absinken des Wasserspiegels kann zu Rutschungen der Außenböschung führen.
F	Kleine Rutschungen, ggf. schon bei niedrigeren Wasserspiegeln als in C (micro instability).
G	Piping kann durch konzentrierten Sickerwasserdurchfluss im Untergrund oder durch den gesamten Deichkörper entstehen. Die Erosion beginnt i.d.R. landseitig und kann dort durch punktuelle Sickerwasseraustritte mit Sedimentanhäufung erkannt werden.
H	Wellenbewegungen können zur Erosion der Außenböschung und des Deichfußes führen.
I	Wellenbewegungen können zur Erosion des Vorlandes führen.
J	Setzungen mindern die Höhe des Bauwerks und so auch das Schutzniveau.
K	Mechanische Einwirkungen wie Eisgang können das Bauwerk beschädigen.
L	Mechanische Einwirkungen aus der Schifffahrt können das Bauwerk beschädigen.

Abb. 2.12. Versagensfälle von Deichen [44]

### 2.4.5. Innere Erosion

Phänomene der inneren Erosion sind ein Hauptauslöser für Deichversagen. Deshalb wird dieses Thema weltweit intensiv untersucht. Dieses Handbuch diskutiert auch die Standsicherheit von BG bezüglich innerer Erosion, wozu ein grundsätzliches Verständnis der Prozesse und eine Klassifizierung hilfreich sind. [45] gibt einen umfangreichen Überblick über den Stand der Forschung. Darin werden vier verschiedene Arten von innerer Erosion definiert: Concentrated leak erosion, rückschreitende Erosion (inkl. Piping), Kontakterosion und Suffosion.

Concentrated leak erosion kann in Rissen auftreten, die z.B. durch Austrocknung oder Setzungsunterschiede entstehen. Die Rückschreitende Erosion hat zwei

Ausprägungen: Piping beginnt an dem Punkt, an dem das Filtratwasser aus dem Untergrund oder der landseitigen Böschung austritt. Dabei erodiert kohäsionsloses Bodenmaterial so, dass sich eine fortschreitende Röhre unter dem Deichkörper entwickelt. In Zusammenhang mit einer kohäsiven Deichdeckschicht kann Piping auch in Kombination mit hydraulischem Grundbruch des bindigen Materials auftreten. Globale rückschreitende Erosion, dagegen führt zu einer fast vertikalen Röhre im Deichkern [45]. Kontakterosion tritt an der Grenze zwischen grobem und feinem Boden auf, wobei das Feinkorn aufgrund von schichtparallelem Fließen im groben Material erodiert. Suffosion wird ausgelöst, wenn Wasser durch kohäsionslosen Boden mit hoher Ungleichförmigkeit

(weitgestuft) oder Ausfallkörnung fließt. Dieses Thema wird auch in [38], [46], [47] diskutiert.

## 2.5. Fallbeispiele für Deiche aus BG

### 2.5.1. Norddeich CT 4 Bremerhaven

Als Teil der Erweiterung des Containerterminals im Hafen von Bremerhaven wurde ein 900 m langer Deich gebaut (Abb. 2.13). Der Deichkern wurde aus sandigem BG aus dem Bremerhavener Hafen errichtet und mit einer 1 m mächtigen Kleideckschicht versehen. Nach den Ergebnissen der chemischen Analyse wurde das entwässerte BG bezüglich der Richtwerte für Feststoffe und Eluate nach LAGA-M20 [9] als Z1.2 Material klassifiziert, wobei die Mehrzahl der Eluatwerte unter dem Richtwert für Z1.1 lag. Die wesentlichen Überschreitungen waren die Parameter el. Leitfähigkeit, Chlorid und Sulfat, üblich für das Brackwasser der Entnahmestelle. Eine umfangreiche Präsentation des Projektes findet sich in [4] und [48].

### 2.5.2. Weserdeich in Bremen

In Bremen verwertete der *Deichverband am linken Weserufer* BG im tidebeeinflussten Weserdeich (Abb. 2.14). Das BG wurde in der Aufbereitungsanlage von *bremenports* entwässert. Von 2009 bis 2014 wurden insgesamt 156.000 m<sup>3</sup> entwässertes, aufbereitetes TBT belastetes BG mit LAGA-Klassifizierung Z2 [9] (einzelne Werte überschritten die Z1-Richtwerte [51]) genutzt, um den Weserdeich zu erhöhen. Das BG wurde in die Kleideckschicht eingeschlossen, indem zunächst ein Teil der alten Deckschicht abgeschoben und abschließend auf das Baggergut aufgebracht wurde (Abb. 2.15).

In Bremen existieren spezielle Rahmenbedingungen für die BG-Verwertung im Deichbau. In einer offiziellen Bekanntmachung des *Senators für Umwelt, Bau, Verkehr und Europa* wird gefordert, bei jeder Deichbaumaßnahme die Verfügbarkeit von BG in der geforderten Qualität zu prüfen. Dann muss dieses Material verwertet werden, bevor andere Ressourcen in Betracht gezogen werden [49].

### 2.5.3. Schelde-Fluss, Niederlande und Belgien

In den Niederlanden und in Belgien wird Baggergut traditionell zum Hochwasserschutz an Kanälen und bei der Herstellung von Polderdeichen genutzt [19]. Sauberes und gering belastetes BG kann im Rahmen strikter Regeln auf

die Gewässerböschungen aufgebracht werden. Dabei ist auch die Entfernung der Ablagerungsfläche zum Gewinnungsort (Gewässer) zu berücksichtigen (20 m in den NL, 5 m in Flandern). Zudem wird die Reifung als wichtige Bedingung angesehen. Im Beispiel am Schelde-Fluss wurden Deiche für eine kontrollierte Überflutungsfläche aus Sand errichtet, die während einer Hafenbaumaßnahme gebaggert wurde. Die Deiche erhielten eine Deckschicht aus sog. Polder Clay. Dieser scheint jedoch eher ähnlich einem Nordsee-Klei als einem feinkörnigen BG.



Abb. 2.13. Norddeich CT4 Bremerhaven [48]



Abb. 2.14. Deichrekonstruktion in Bremen mit leicht belastetem Baggergut (Z2 + TBT), Baggerguteinbau im Sommer 2014.

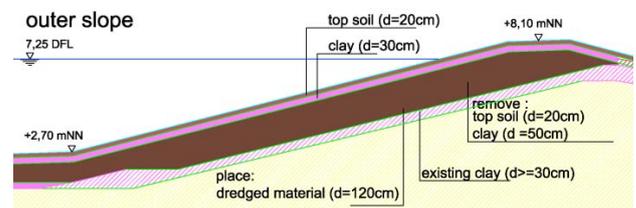


Abb. 2.15. Deichrekonstruktion in Bremen mit leicht belastetem Baggergut (Z2 + TBT), Regelquerschnitt [50]



Abb. 2.16. Einbau von Baggergut am Ufer in den Niederlanden [19]



Abb. 2.17. Deichbau in Hoek van Holland [19]

#### 2.5.4. Hoek van Holland, Niederlande

PIANC [19] berichtet, dass BG in den USA und den Niederlanden verwendet wurde, um Deiche an Binnenwasserstraßen und an den Küsten zu bauen, sowohl als Längsbauwerke parallel zu den Gewässern als auch als Ringdeiche. Als Beispiel wird der Deich in Hoek van Holland beschrieben, in dem BG in der Deckschicht zum Einsatz kam.

#### Schrifttum

- [1] DIN 19731. Bodenbeschaffenheit – Verwertung von Bodenmaterial.
- [2] Köthe, H. 2010. Dredging and the Environment – international guidance for best practice, *PIANC 125<sup>th</sup> Anniversary Celebration in ASIA*, Nagoya JAPAN, [www.pianc.org](http://www.pianc.org) [zitiert 13.01.2015].
- [3] CEDA 2015. Website der Central Dredging Association, [www.dredging.org](http://www.dredging.org) [zitiert 13.01.2015].
- [4] HTG 2006. Verwertung von feinkörnigem Baggergut im Bereich der deutschen Küste, Fachbericht der Hafentechnischen Gesellschaft FA Baggergut, 37 S. Online: [www.htg-baggergut.de/Downloads/HTG%20Verwertungsbericht%200906.pdf](http://www.htg-baggergut.de/Downloads/HTG%20Verwertungsbericht%200906.pdf) [zitiert 16.12.2014].
- [5] KrWG 2012. Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz).
- [6] HELCOM 2007. Guidelines for the Disposal of Dredged Material at Sea – adopted in June 2007, 37 S. Online: <http://helcom.fi/> [zitiert 16.12.2014].
- [7] Kibbel, E. & Henneberg, M. 2004. Baggergutmanagement in Rostock, Handreichung der Stadt Rostock, 6 S.
- [8] SMOCS 2011. Sustainable Management of Contaminated Sediments – Guideline. 32 S. Online verfügbar: [www.smocs.eu](http://www.smocs.eu).
- [9] LAGA 2003. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen – Technische Regeln. Allgemeiner Teil, Teil II (TR Boden), Teil IV (Aschen aus Kohlekraftwerken); Version vom 6. Nov. 2003 als Mitteilung M20. Erich Schmidt, Berlin 2004, 128 S. Online: <http://laga-online.de/servlet/is/23874/> [zitiert 13.01.2015].
- [10] DepV 2009. Deponieverordnung - Verordnung über Deponien und Langzeitlager. 27. April 2009 (BGBl. I p. 900) letzte Änderung in Artikel 7 der Verordnung vom 2. Mai 2013 (BGBl. I p. 973), 63 S. Online: [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de) [zitiert 16.12.2014].
- [11] DGE 2002. Dutch-German Exchange on Dredged Material Part 2 – Treatment and Confined Disposal of Dredged Material, Sept. 2002, koord. von A. Netzband, A.L. Hakstege & K. Hamer, 39 S.
- [12] Henneberg, M. 2004. Lysimeter- und Praxisversuche zur Verwertung von gereiftem Baggergut als Bodenverbesserungsmittel in Landwirtschaft und Landschaftsbau, unveröffentlichter Vortrag beim Landesamt für Umwelt, Natur und Geologie, Güstrow.
- [13] IMO 2015. Website der International Maritime Organisation, [www.imo.org](http://www.imo.org) [zitiert 13.01.2015].
- [14] HELCOM 2015. Website der Helsinki Commission, [www.helcom.fi](http://www.helcom.fi), relevante Veröffentlichungen [www.helcom.fi/Lists/Publications/BSEP120A.pdf](http://www.helcom.fi/Lists/Publications/BSEP120A.pdf) [zitiert 16.12.2014].
- [15] Salomons, W. & Brils, J. 2004. Contaminated Sediments in European River Basins; *Summarising Report of the European Sediment Research Network SedNet*. Online: [www.sednet.org/download/Sednet\\_booklet\\_final.pdf](http://www.sednet.org/download/Sednet_booklet_final.pdf).
- [16] LUNG 2002. Bodenbericht des Landes Mecklenburg-Vorpommern, Phase 1 des Bodenschutzprogrammes MV. Online: [www.lung.mv-regierung.de/wasser\\_daten/Dateien/Start.htm](http://www.lung.mv-regierung.de/wasser_daten/Dateien/Start.htm) [zitiert 13.01.2015].
- [17] LUNG 1999. Verwertungsstrategien für aquatische Sedimente in Mecklenburg-Vorpommern, Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, 175 S.
- [18] EC 2008. EU Directive 2008/98/EC on waste (Abfallrahmenrichtlinie).
- [19] PIANC 2009. Dredged Material as a Resource: Options and Constraints. PIANC report no. 104. EnviCom Working Group 104. Online: [www.pianc.org](http://www.pianc.org).
- [20] Gebert, J., Gröngroft, A. & Eschenbach, A. 2010. Eignung von Baggergut im Deichbau, 6. *Rostocker Baggergutseminar – Kompetenztreffpunkt Baggergut*, Universität Rostock: 65-78.
- [21] Gebert, J.; Gröngroft, A. & Eschenbach, A. 2014. Eignung von Baggergut im Deichbau, 8. *Rostocker Baggergutseminar*, Universität Rostock, *Schriftenreihe Umweltingenieurwesen* 47: 95-102.
- [22] Stephens, S.R., Alloway, B.J., Parker, A., Carter, J.E. & Hodson, M.E. 2001. Changes in the leachability of metals from dredged canal sediments during drying and oxidation, *Environmental Pollution* 114: 407-413.
- [23] Düngung 2004. Hinweise und Richtwerte für die landwirtschaftliche Praxis – Leitfaden zur Umsetzung der Düngverordnung, Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz MV, Schwerin, 182 S.
- [24] Henneberg, M. & Neumann, R. 2011. 10 Jahre Lysimeterversuche zum Einsatz von gereiftem Baggergut zur Bodenverbesserung in der Landwirtschaft, Bericht, 37 S. Online: [www.htg-baggergut.de](http://www.htg-baggergut.de).

- [25] Morscheck, G. & Henneberg, M. 2012. Einsatz von gereiftem Nassbaggergut als Rekultivierungssubstrat in Oberflächenabdichtungssystemen, Bericht für das Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, 78 S.
- [26] SedNet 2015. Website des European Sediment Research Network SedNet, [www.sednet.org](http://www.sednet.org).
- [27] ISO 10318-1:2013. Geosynthetics – Part 1: Terms and definitions.
- [28] Saathoff, F. 2003. Geosynthetics in geotechnical and hydraulic engineering, *Geotechnical Engineering Handbook*, Berlin: Ernst&Sohn, 507-597.
- [29] MLUV 2012. Uferlängswerke – Geotextilwälle. *Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern*, 3-9-4 / 2012.
- [30] FGSV 2005. Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaues (M Geok E-StB).
- [31] BAW 1993. Merkblatt Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen MAG.
- [32] BAW 1994. Richtlinie für die Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau RPG.
- [33] DVWK 1992. Merkblatt 221 Anwendung von Geotextilien im Wasserbau. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), Hamburg/Berlin: Parey, 31 S. Zurzeit im Rahmen des DWA-Arbeitskreises in Aktualisierung befindlich.
- [34] Heerten, G., Achmus, M., Boley, C., Grabe, J., Katzenbach, R., Meyer, N., Oumeraci, H., Richter, T., Saathoff, F., Savidis, S. & Scheffer, H.J. 2009. Bauwerke und Bauwerkertüchtigung im Küsten- und Verkehrswasserbau, *Unsere Gewässer – Forschungsbedarf aus Sicht der Praxis – Eine Dokumentation von HTG und DGGT*, Schiffahrts-Verlag Hansa C. Schroedter & Co Hamburg, 65-72.
- [35] DIN-EN ISO 10318-1:2013-07. Geokunststoffe – Teil 1: Begriffe. Beuth: Berlin, 24 S.
- [36] EAK 2002. Empfehlungen für Küstenschutzwerke, korrigierte Ausgabe 2007, *Die Küste* 65, KFKi (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen), 589 S.
- [37] MLUV 2009. Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern, Übersichtsheft, Ministerium für Landwirtschaft Umwelt und Verbraucherschutz.
- [38] CIRIA 2013. The International Levee Handbook, 1350 S. Online: [www.ciria.org](http://www.ciria.org).
- [39] DIN 19712-2013. Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern. Beuth: Berlin, 68 S.
- [40] DWA-M 507. DWA Regelwerk, Merkblatt DWA-M 507-1, Deiche an Fließgewässern Teil 1: Planung, Bau und Betrieb, Dez. 2011.
- [41] TAW 1998. Technical Report on Soil Structures, Delft, 248 S.
- [42] ZTV-W-205 1992. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau für Erdarbeiten.
- [43] ZTV-W-210 2006. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau für Böschungs- und Sohlensicherung, 14 S.
- [44] TAW 2000. Fundamentals on Water Defences, *Technical Advisory Committee on Water Defences (TAW)*, Road and Hydraulic Engineering Division, Delft.
- [45] Bonelli, S. (ed.) 2013. Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees. ISTE Ltd. London, 388 S.
- [46] BAW MSD 2011. Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD), Bundesanstalt für Wasserbau.
- [47] BAW 2011. Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen – Ergänzende Hinweise zur Berechnung der Dammdurchströmung im Bereich von Bauwerken (Ergänzung MSD).
- [48] Umtec 2008. Verwertung von Bremischem Baggergut im Deichbau, Machbarkeitsstudie im Auftrag der bremenports GmbH & Co. KG. 136 S.
- [49] SUBVE-B 2008. Verwendung von Baggergut im Deichbau. Mitteilung des Senators für Umwelt, Bau, Verkehr und Europa (Bremen), 20. Mai 2008, zitiert in [48].
- [50] Planungsgruppe Grün 2014. Originale CAD-Zeichnungen von der Planungsgruppe Grün, Bremen zur Verfügung gestellt.
- [51] Tamer 2014. Persönliche Information von Frau Tamer, Bremischer Deichverband am linken Weserufer, Bremen.

### 3. RECHTLICHE ASPEKTE

Die europäische Richtlinie zur Bewertung und zum Management von Hochwasserrisiken [1] wurde 2007 verabschiedet, um eine einheitliche Politik bezüglich der Hochwasserrisikoanalyse und -prävention in der EU zu ermöglichen. Die EU-Mitgliedsstaaten können auf dieser Grundlage Hochwasserrisiken abschätzen und kartieren, z.B. um Hochwasser-Risikomanagementpläne zu erstellen. Diese zeigen in vielen Hochwasserrisikogebieten den Bedarf zur Verbesserung und Rekonstruktion von See- und Flussdeichen. In diesem Kontext nimmt der Bedarf für Deichbaumaterialien ständig zu. Die benötigten Erdstoffe müssen häufig über weite Strecken zur Baustelle transportiert werden, was erhebliche Umweltauswirkungen in sich birgt, die z.T. durch die Verwertung von Ersatzbaustoffen verringert werden können. Dabei sind die Gesetze zu Hochwasser-, Boden- und Gewässerschutz zu beachten. In diesem Kapitel liegt der Schwerpunkt auf die rechtlichen Rahmenbedingungen bei der Planung von Deichen aus Baggergut und Verbrennungsaschen.

#### 3.1. Rechtliche Aspekte für BG

##### 3.1.1. Rechtlicher Hintergrund

Die Konventionen zum Schutz der marinen Umwelt, z.B. London (1972), HELCOM (1992) und OSPAR (1992) ([2], [3], [4]) regeln auch den Umgang mit Nassbaggergut. Verschiedene Empfehlungen und Richtlinien untersetzen diese Konventionen, jedoch hauptsächlich im Hinblick auf Wasserstraßen und die Umlagerung im Gewässer (Abb. 3.1). Zudem sind verschiedene europäische Rahmenrichtlinien von Nassbaggerei und Baggergutmanagement betroffen (Abb. 3.2).

In Deutschland hängt die Anwendung der vorhandenen Regelungen davon ab, ob das BG im Gewässer umgelagert oder an Land verwertet bzw. entsorgt wird. Dabei sind verschiedene Gesetze zu beachten, abhängig von der Art der Entsorgung bzw. Verwertung und den Verantwortlichkeiten [5].

Die Komplexität der rechtlichen Situation (Abb. 3.3) und die speziellen Anforderungen können erhebliche Kosten in einem Projekt verursachen. Zudem ist der Einsatz von BG im Deichbau bislang nur im Einzelfall möglich [6]. Es ist jedoch wichtig zu definieren, wie man im Rahmen der

geltenden Gesetzgebung zu einer für alle Beteiligten annehmbaren Einzelfallentscheidung kommt. Hier wird eine klare Anleitung gegeben, wie eine Genehmigung von den verschiedenen Beteiligten herbeigeführt werden kann.

Objektive Entscheidungen erfordern ein Verständnis für die Eigenschaften der Sedimente und dem System, dem sie entstammen, besonders, da die Einzelfallentscheidungen derzeit nur auf Grundlage umfangreicher Umweltanalysen getroffen werden können.

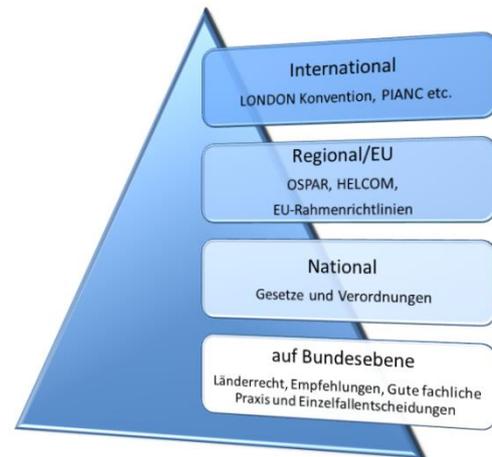


Abb. 3.1. Hierarchie der Bestimmungen und Empfehlungen zu Baggergut

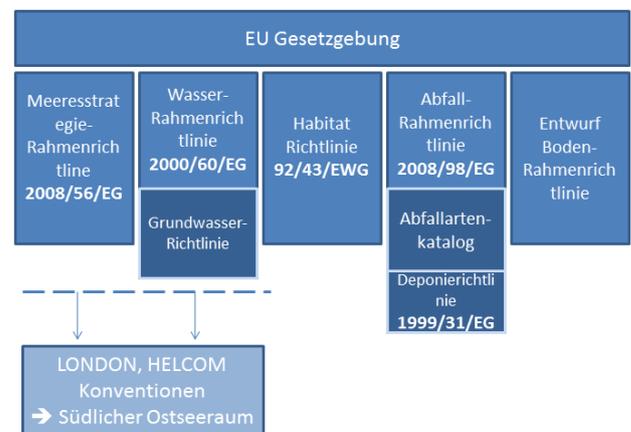


Abb. 3.2. EU-Rahmenrichtlinien zum Umgang mit Baggergut und untergeordnete Richtlinien



Abb. 3.3. Verschiedene rechtliche Aspekte zu BG (nach [5])

Im Europäischen Abfallkatalog [7] ist BG in Gruppe 17 (Bau- und Abbruchabfälle [...]) mit dem übergeordneten Code ist 17 05 (Boden [...], Steine und Baggergut) eingruppiert. BG ist in zwei Gruppen unterteilt:

- 17 05 05\* Baggergut, das gefährliche Stoffe enthält,
- 17 05 06 Baggergut, mit Ausnahme desjenigen, das unter 17 05 05 fällt.

Eine umfangreiche Zusammenstellung internationaler und insbesondere europäischer Gesetze und Richtlinien zu Nassbaggerei und BG-Verwertung bezüglich Nachhaltigkeit und Ökologie findet sich in [8].

### 3.1.2. Relevante Rechtsgrundlagen für die Verwertung von BG im Deichbau

In Deutschland werden Deiche als Wasserbauwerke im Wasserhaushaltsgesetz § 67 WHG [9] behandelt. Deshalb richtet sich die Verwertung von BG im Deichbau auch nach den Anforderungen des WHG. Eine permanente Änderung des Zustands der beeinflussten Gewässer muss vermieden werden. Die Planfeststellung ist in § 68 WHG [9] geregelt. Das WHG enthält jedoch keine Richtwerte für die

Eigenschaften der Baumaterialien. „Eine ausdrückliche, auf eine Verwendung von Baggergut im Deichbau zugeschnittene bodenschutzrechtliche oder abfallrechtliche Regelung besteht zzt. nicht. Entsprechend gibt es auch keine diesbezüglichen Richt- oder Grenzwerte für den Einbau von Baggergut [6] (Seite 441).

Die Art der erforderlichen Genehmigung für eine Verwertungsmaßnahme hängt auch von der Art der Verwertung ab (z.B. Genehmigung nach Baurecht). Zum Beispiel ist für die Verwertung von BG keine spezielle abfallrechtliche Genehmigung erforderlich.

Sandiges BG das weitgehend frei von organischer Substanz ist, kann unterhalb der durchwurzelbaren Oberbodenschicht in Ingenieurbauwerken eingebaut werden, wenn es die erforderlichen abfallrechtlichen Eigenschaften erfüllt (unbedenkliche Verwertung). Die Oberste Abfallbehörde in Mecklenburg-Vorpommern empfiehlt die Anwendung der LAGA M20 Empfehlungen [10] als Durchführungshilfe. Solange der Beweis erbracht wird, dass das Gemeingut nicht gefährdet ist, kann im Einzelfall sogar die Überschreitung der in [10] empfohlenen Richtwerte erlaubt werden.

Tabelle 3.1. Rechtlicher Rahmen für die Verwertung von BG im Deichbau in Deutschland (MV)

Aufgabe	Gesetze	Zuständige Behörde
Nassbaggerei	Wasserstraßengesetz (WaStrG § 4, 7, 14, 48) [14] Gesetz zur Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG §1, 2, 3b, 5, 6, 36) [15] Wasserhaushaltsgesetz (WHG) [9] Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) [16] MV: NatSchAG MV [17], LWaG MV [18] EU FFH Richtlinie (92/43/EEC) [19] EU Vogelschutz-Richtlinie (79/409/EEC) [20] EU Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EC) [21] EU Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie [22]	In Verantwortung des Auftraggebers Bund (WSD) für Bundeswasserstraßen Gemeinden (außerhalb der Bundeswasserstraßen)
Behandlung und Aufbereitung	Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) [23] Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) [24] Zulassung von Aufbereitungsanlagen nach 4. BImSchV [25]	Untere Abfallbehörde (StÄLU) Untere Wasserbehörde (z.B. Einleitung von Überschusswasser)
Qualität und Eignung	Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) [23] Bisher: Materialbewertung nach LAGA M20 [10] und EAK 2002 [6] (als Einzelfallentscheidung für eine technische Anwendung) Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) [26] Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) [12] (BG in der durchwurzelbaren Oberbodenschicht) Für BG nach [7] keine abfallrechtliche Genehmigung erforderlich.	Obere und untere Abfall- und Bodenschutzbehörde (StÄLU) Ggf. zusammen mit der Wasserbehörde Abteilung Küste des StÄLU-MM
Genehmigungsplanung	Wasserhaushaltsgesetz (WHG § 67, 68) [9] Landeswassergesetz MV (LWaG MV) [18]	Obere Wasserbehörde (§107, LUNG) Untere Wasserbehörde (StÄLU)
Bauausführung	Baurecht (inkl. BauGB [27], LBauO MV [28]) Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) [16] Landeswassergesetz (§83 LWaG) [18] (Landesschutzdeiche, Deiche 1. Ord.) Landeswassergesetz (§83 LWaG) [18] (Landwirtschaftliche Deiche, Deiche 2. Ordnung)	Untere Wasserbehörde (StÄLU)  Untere Wasserbehörden (Gemeinden), Wasser- und Bodenverbände (WBV)
Umweltverträglichkeit, deichspezifische Umweltaspekte	Gesetze zur Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG[15], LUVPG MV [29]) Naturschutzgesetze (BNatSchG [16], NatSchAG MV [17]) Bundesnaturschutzgesetz (BBodSchG) [26]	Untere Naturschutzbehörde

Feinkörniges BG ist grundsätzlich nicht in den LAGA-Empfehlungen enthalten, noch existiert eine andere Empfehlung für diese Materialien in Deutschland. Aufgrund der mangelnden Anleitung wird in diesem Handbuch empfohlen, auch für feinkörniges, organikreiches BG die LAGA M20 als Durchführungshilfe anzuwenden um eine fundierte Entscheidung und Genehmigung zu ermöglichen. Alternativ kann die zuständige Genehmigungsbehörde auch andere Möglichkeiten zum Nachweis der Umweltunbedenklichkeit der verwendeten BG zulassen.

Bei der Verwertung von BG zur Erfüllung einer technischen Funktion (wie in einem Deich), sollten die LAGA-Richtwerte der Klasse Z1 als Referenzwerte für eine Entscheidung dienen [11]. Für den Einsatz von feinkörnigem, organikreichem BG sollte die Einzelfallentscheidung der Genehmigungsbehörde auf diesem Verfahren beruhen und gleichzeitig die Überschreitung einzelner Richtwerte (z.B. TOC, Salze) zulassen, solange das Gemeingut nicht gefährdet ist.

In der durchwurzelbaren Oberbodenzone ist die Verwertung von BG möglich, wenn die Vorsorgewerte der BBodSchV [12] eingehalten werden. In den Empfehlungen zur Anwendung von §12 BBodSchV [13] wird diese Schicht insbesondere bei erhöhtem Organikgehalt auf eine Mächtigkeit von 15-30 cm beschränkt.

Einige Eigenschaften von BG sind völlig verschieden von denen anderer Bodenmaterialien; dies muss beim Vergleich der Richt- und Vorsorgewerte berücksichtigt werden und wird in Kapitel 4 ausführlich diskutiert.

## 3.2. Rechtliche Aspekte für Aschen

### 3.2.1. Rechtlicher Hintergrund

In Europa können Aschen entweder als Abfall oder als Nebenprodukt der Kohleverbrennung behandelt werden. Der rechtliche Status der jeweiligen Asche hängt dann von der Eingruppierung in eine der beiden Klassen ab.

Grundsätzlich werden Aschen abfallrechtlich behandelt. Deshalb greift in erster Linie die europäische Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EC [30]. Nach dem europäischen Abfallkatalog werden Verbrennungaschen in die Gruppe 10 (Abfälle aus thermischen Prozessen) eingeordnet. Der übergeordnete Code ist 10 01 (Abfälle aus Kraftwerken und anderen Verbrennungsanlagen außer 19). Dabei sind im Rahmen dieses Handbuchs die folgenden Klassen von Bedeutung:

- 10 01 01 – Rost- und Kesselasche, Schlacken und Kesselstaub [...],
- 10 01 02 – Filterstäube (Flugasche) aus Kohlefeuerung,
- 10 01 80 – Asche-Schlackegemische aus der Nassentsorgung verbrannter Abfälle (PL)

In einigen europäischen Staaten (z.B. Polen) besteht die Möglichkeit, Aschen unter bestimmten Voraussetzungen unter Anwendung der europäischen Vorschriften für Chemikalien REACH [31] (Regulation on Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) als Baustoffe zu zertifizieren. Dieser Status als Nebenprodukt kann die Anwendung wesentlich vereinfachen.

Der Stand der europäischen Normung im Hinblick auf die Verwertung / Verwendung von Aschen erlaubt ein weites Anwendungsspektrum als Straßenbaumaterial oder in Kombination mit anderen mineralischen Baustoffen z.B. in der Zement- und Betonindustrie. Einige Anwendungen im Straßenbau erlauben auch die Nutzung von Aschen als hydraulische Bindemittel zur Bodenverbesserung bzw. -stabilisierung.

### 3.2.2. Relevante Rechtsgrundlagen für die Verwertung von Aschen im Deichbau

Auf die Möglichkeit, Verbrennungaschen und Schlacken basierend auf REACH [31] als Baustoff zu zertifizieren, wurde oben bereits eingegangen. Ausführlichere Informationen hierzu im Kontext der Verwertung von Aschen im Deichbau finden sich im englischen Hauptdokument. Im Folgenden werden relevante Grundlagen für Deutschland zusammengefasst.

Die Verwertung von Aschen ist grundsätzlich im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) [23] geregelt. Die Aschen müssen unschädlich und nützlich sein. Empfehlungen zur Verwertung, inklusive der Richtwerte für den Feststoff und die Eluate, sind in LAGA M20, Teil 4 [37] enthalten.

Die Verwertung von Aschen wird nach [37] in Gebieten mit günstigen hydrologischen Bedingungen bis zur Klasse Z1.2 empfohlen. In der Regel sind die entsprechenden Eigenschaften durch ein Zertifikat nachzuweisen. Die Materialien können z.B. im Straßenbau, in begleitenden Erdarbeiten, industriellen und anderen Lagerstätten oder zur Rekultivierung verwendet werden. Dabei ist der Abfall mit einem Oberboden (Begrünungssubstrat) zu bedecken.

Table 3.2. Rechtlicher Rahmen für die Verwertung von Verbrennungsaschen und –schlacken im Deichbau

Aufgabe	Gesetze	Zuständige Behörde
Abfallproduktion	Genehmigung von Anlagen nach 4. BImSchV [25]	
Aufbereitung	Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) [23] Genehmigung von Aufbereitungsanlagen nach 4. BImSchV [25]	
Qualität und Verwertbarkeit	Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) [23] LAGA M20 Teil IV TR Asche und Schlacken [37]	Untere Abfallbehörde
Genehmigung	Wasserhaushaltsgesetz (WHG § 67, 68) [9] Landeswassergesetz MV (LWaG MV) [18]	Obere Wasserbehörde (§107) (LUNG) Untere Wasserbehörde (StÄLU) Küstenschutzbehörden
Bau	Baurecht (inkl. BauGB [27], LBauO MV [28]) Naturschutzrecht (inkl. BNatSchG [16]) Landeswassergesetz MV (§83 LWaG) (Landesschutzdeiche, Deiche 1. Ordnung) Landeswassergesetz MV (§83 LWaG) (Landwirtschaftliche Deiche, Deiche 2. Ordnung)	Untere Wasserbehörde (StÄLU)  Untere Wasserbehörde (Gemeinden) Wasser- und Bodenverbände (WBV)
Umweltverträglichkeit, deichspezifische Umweltaspekte	Gesetze zur Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG[15], LUVPG MV [29]) Naturschutzrecht (BNatSchG [16], NatSchAG MV [17]) Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) [26]	Untere Naturschutzbehörde

Material mit Schadstoffen, die die Richtwerte für LAGA Z2 einhalten, können in Gebieten bzw. Bauwerken mit günstigen hydrologischen Eigenschaften (z.B. in Lärmschutzwällen mit entsprechend großem Grundwasserflurabstand) verwertet werden, wenn der Abfall mit einer Dichtung mit einer Dicke von mindestens  $d > 0,5$  m und einer gesättigten hydr. Leitfähigkeit von  $k_s < 1 \cdot 10^{-8}$  m/s sowie mit einer Oberbodenschicht bedeckt wird. Die Verwertung im Deichbau wird nicht explizit genannt. Gebiete mit regelmäßiger Überflutungsgefahr jedoch (z.B. Hochwasserrückhaltebecken, Deichvorland) sind von der Verwertung ausgeschlossen.

Es scheint nicht endgültig geklärt, ob eine Verwertung von Aschen im Deichbau in Deutschland überhaupt möglich ist, wenn die LAGA-Empfehlungen angewandt werden. Da diese Empfehlungen jedoch nicht in jedem Fall rechtlich bindend sind (außer ein Bundesland hat dies explizit verfügt), sollte es weiterhin möglich sein, analog zur BG-Verwertung die Umweltunbedenklichkeit für ein spezielles Projekt individuell nachzuweisen.

Für den Fall, dass die Eigenschaften der Aschen unter den Richtwerten der Klasse Z0 liegen, bestehen in Deutschland keine Restriktionen bezüglich der Verwertung. Dennoch sollte eine Einzelfallentscheidung analog zur BG-Verwertung mit der zuständigen Genehmigungsbehörde getroffen werden.

## Schrifttum

- [1] EC 2007. Richtlinie 2007/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken.
- [2] LC 2000. London Convention (1972). Guidelines for the assessment of dredged material.
- [3] HELCOM 2007. HELCOM Guidelines for the Disposal of Dredged Material at Sea - Adopted in June 2007.
- [4] OSPAR, 2009. Guidelines for the Management of Dredged Material (Ref. no. 2009/4).
- [5] Köthe, H. 2002. Baggergut im Kontext nationaler und europäischer Regelungen, 2. *Rostocker Baggergutseminar*. Online: [www2.auf.uni-rostock.de/II/baggergut/rbs2/pdf/Koethe.pdf](http://www2.auf.uni-rostock.de/II/baggergut/rbs2/pdf/Koethe.pdf).
- [6] EAK 2002. Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken durch den Ausschuss für Küstenschutzwerke der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. und der Hafenbautechnischen Gesellschaft, aktualisierte Fassung 2007, *Die Küste* 65. 589 S.
- [7] EC 2000. The European Waste Catalogue (2000/532/EC).
- [8] SMOCS 2011. Legislation on dredged material. Report from the SMOCS project. Online: <http://smocs.eu>.
- [9] WHG 2009. Deutsches Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts. Online: [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de).
- [10] LAGA 2004. Technische Regeln der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall – Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen, Teil II (LAGA M20 TR Boden).
- [11] Weisz, R. 2014. Die LAGA M20 - was geht und was geht nicht in Bezug auf die Verwertung von Baggergut, 8. *Rostocker Baggergutseminar*.
- [12] BBodSchV 1999. Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung, 32 S. Online: [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de).
- [13] LABO 2002. Vollzugshilfe zu den Anforderungen an das Aufbringen und Einbringen von Materialien auf oder in den

- Boden, §12 BBodSchV, 42 S. Online: [www.labo-deutschland.de/documents/12-Vollzugshilfe\\_110902\\_9be.pdf](http://www.labo-deutschland.de/documents/12-Vollzugshilfe_110902_9be.pdf).
- [14] WaStrG 1968. Bundeswasserstraßengesetz. Online: [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de).
- [15] UVPG 2010. Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung. Online: [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de).
- [16] BNatSchG 2013. Bundesnaturschutzgesetz. Online: [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de).
- [17] NatSchAG MV 2010. Gesetz des Landes MV zur Ausführung des Bundesnaturschutzgesetzes. Online: [www.landesrecht-mv.de](http://www.landesrecht-mv.de).
- [18] LWaG MV 1992. Wassergesetz des Landes MV. Online: [www.landesrecht-mv.de](http://www.landesrecht-mv.de).
- [19] EC 1992. Flora Fauna Habitate Framework Directive (FFH) (92/43/EEC).
- [20] EC 2009. Directive on the conservation of wild birds (2009/147/EC) [codified version of the Bird Protection Directive (79/409/EEC)].
- [21] EC 2000. The Water Framework Directive (2000/60/EC).
- [22] EC 2008. The Marine Strategy Framework Directive (2008/56/EC).
- [23] KrWG 2012. Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen, Bundesministerium der Justiz, 45 S. Online: [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de).
- [24] BImSchG 2013. Bundesimmissionsschutzgesetz. Online: [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de).
- [25] BImSchV 2013. Bundesimmissionsschutzverordnung. Online: [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de).
- [26] BBodSchG 2012. Bundesbodenschutzgesetz. Online: [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de).
- [27] BauGB 2004. Baugesetzbuch, BGBl. I S. 2414. Online: [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de).
- [28] LBauO MV 2011. Landesbauordnung MV. Online: [www.landesrecht-mv.de](http://www.landesrecht-mv.de).
- [29] LUVPG MV 2011. Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung in Mecklenburg-Vorpommern, GVObI. MV S. 885. Online: [www.landesrecht-mv.de](http://www.landesrecht-mv.de).
- [30] EC 2008. The Waste Framework Directive (2008/98/EC).
- [31] EC 2006. EU Regulation 1907/2006 of 18 December 2006 concerning the registration, evaluation, authorisation and restriction of chemicals (REACH) and establishing a European Chemicals Agency.
- [32] Polish ordinance of the Minister of Environment of 27 September 2001 on waste catalogue. (Journal of Laws 2001.112.1206).
- [33] Polish ordinance of the Minister of the Environment of 19 December 2008 on the list of the types of waste that the waste holder may delegate to individuals or agencies who are not enterprises, and acceptable methods of reuse (Journal of Laws 2008.235.1614).
- [34] EC 1967. EU Directive 67/548/EEC on classification, packaging and labelling of dangerous substances (EC Diary L 196 of 16.08.1967).
- [35] EC 1999. EU Directive 1999/45/EC concerning the approximation of the laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to the classification, packaging and labelling of dangerous preparations (EC Diary L 200 of 30.07.1999).
- [36] EC 2008. EU Directive 440/2008/EC of 30 May 2008, fixing test methods according to EU Directive 1907/2006 (REACH) (EC Diary L 142 of 31.05.2008).
- [37] LAGA 1997. Technische Regeln der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall – Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen, Teil IV (Aschen aus Kohlekraftwerken) (LAGA M20).

## 4. PLANUNG UND ENTWURF

Dieses Kapitel gibt Empfehlungen für die Planung von Deichen mit Baggergut (BG), Aschen und Geokunststoffen. Die wichtigsten im Planungsprozess einzubeziehenden Stakeholder werden definiert, und es werden Informationen zu Baugrund und anderen Randbedingungen der Baustelle sowie Empfehlungen zur Charakterisierung der zur Auswahl stehenden Materialien gegeben.

Es gelten die allgemeinen Bemessungskriterien für See- und Flussdeiche [1], [2], [3], die hier nur kurz zusammengefasst werden. Zusätzlich sind für die Verwertung von BG und Aschen, basierend auf den Erfahrungen im Projekt DredgDikes, weitere Kriterien zu berücksichtigen.

### 4.1. Planungsprozess

Der Planungsprozess bei der Verwertung von Aschen und BG im Deichbau weicht nur unwesentlich von dem anderer Deichbauprojekte ab. Die Hauptplanungsschritte sind die Grundlagenermittlung, die Vorplanung (mit Kostenschätzung), die Entwurfsplanung (mit Kostenberechnung), die Genehmigungsplanung und die Ausführungsplanung. Für BG und Aschen sind zusätzliche Aspekte zu berücksichtigen (Tabelle 4.1), wie die frühzeitige Einbeziehung der

verantwortlichen Genehmigungsbehörden und anderer Stakeholder sowie u.a. Analysen und Aufbereitungsschritte, die in den einzelnen Planungsebenen vorzusehen sind. Die meisten Fragen bzgl. der Verwertung von BG und Aschen sind bereits während der Grundlagenermittlung und Vorplanung zu klären. Dies umfasst auch die Abstimmung mit den zuständigen Behörden über das Vorgehen für die Einzelfallgenehmigung zur Verwertung. Abb. 4.1 zeigt einen möglichen Verfahrensweg zur Genehmigung von BG im Deichbau.

### 4.2. Stakeholder

Verschiedene Stakeholder sollten zu Beginn jedes Deichbauprojektes informiert und in den Entscheidungsprozess einbezogen werden, umso mehr, wenn alternative Baumaterialien wie BG oder Aschen zum Einsatz kommen. In den Tabellen 4.2 und 4.3 sind die wichtigsten Stakeholder zusammengefasst. Es können lokale Lösungen für Materialgewinnung, -lagerung und -transport benötigt werden, die von den Behörden überwacht werden. Andere Projekt-Stakeholder sind verantwortlich für die Materialgewinnung, den Entwurf, den Bau und die Unterhaltung der Bauwerke. Die Öffentlichkeit ist immer eine der wichtigsten betroffenen Gruppen, besonders wenn es um Hochwasserschutz und die Verwertung von Abfällen im Bauwesen geht

Tabelle 4.1. Planungsprozess

Planungsschritte	Aufgaben bei der Verwertung von BG und Aschen
Grundlagenermittlung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Genehmigungsbehörden, Landbesitzer und andere wichtige Stakeholder einbeziehen (siehe Tabellen)</li> <li>▪ Mögliche Aufbereitungsanlagen (o.ä.) auswählen, in denen geeignetes Material liegen könnte</li> <li>▪ Informationen über die Materialien zusammenstellen</li> <li>▪ Informationen zu Schutzgebieten (Natura 200, etc.) im Bauabschnitt zusammenstellen</li> <li>▪ Informationen zum Grundbesitz zusammenstellen (falls nötig)</li> </ul>
Vorplanung / Vorentwurf	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Variantenvergleich, inklusive des Vergleichs verschiedener Materialien</li> <li>▪ Weitere Informationen über die Materialien sammeln</li> <li>▪ Anfrage bei der Genehmigungsbehörde, Definition des Prüfumfanges und der Qualitätsanforderungen</li> <li>▪ Falls nötig (z.B. bei nicht zertifiziertem BG): Materialien untersuchen</li> <li>▪ Probleme definieren, ggf. nötige Aufbereitung frühzeitig beginnen (insbes. Entwässerung)</li> <li>▪ Deichtrasse und Grundbesitzverhältnisse klären, Grundbesitzer über Verwertungspläne informieren</li> <li>▪ Materialtransport berücksichtigen (e.g. Transport von BG oder Aschen durch Schutzgebiete)</li> <li>▪ Mögliche Zwischenlager klären</li> <li>▪ Wichtige Aspekte der Ausführungsphase klären, wie Einflüsse der Bauausführung oder Materiallieferung (z.B. Verzögerung) und technologische Einflüsse (z.B. Befahrbarkeit des BG)</li> <li>▪ Kostenschätzung inkl. aller materialrelevanten Aspekte (Aufbereitung, Transport, Lagerung, Einbau)</li> <li>▪ Zusätzliche baubegleitende Planungsschritte definieren, z.B. landschaftspflegerische Begleitplanung und Umweltverträglichkeitsprüfung</li> </ul>
Entwurfsplanung	Schwerpunkt ist die Vorzugsvariante, weshalb alle materialrelevanten Aspekte vorher geklärt sein müssen.
Genehmigungsplanung	Antrag bei der zuständigen Behörde (Tabelle 4.3) einreichen, basierend auf der Entwurfsplanung.
Ausführungsplanung	Hier werden die detaillierten Anforderungen für die Bautechnologie und den die gewählte Trasse / Baugebiet präzisiert und Ausschreibung und Vergabe werden vorbereitet.

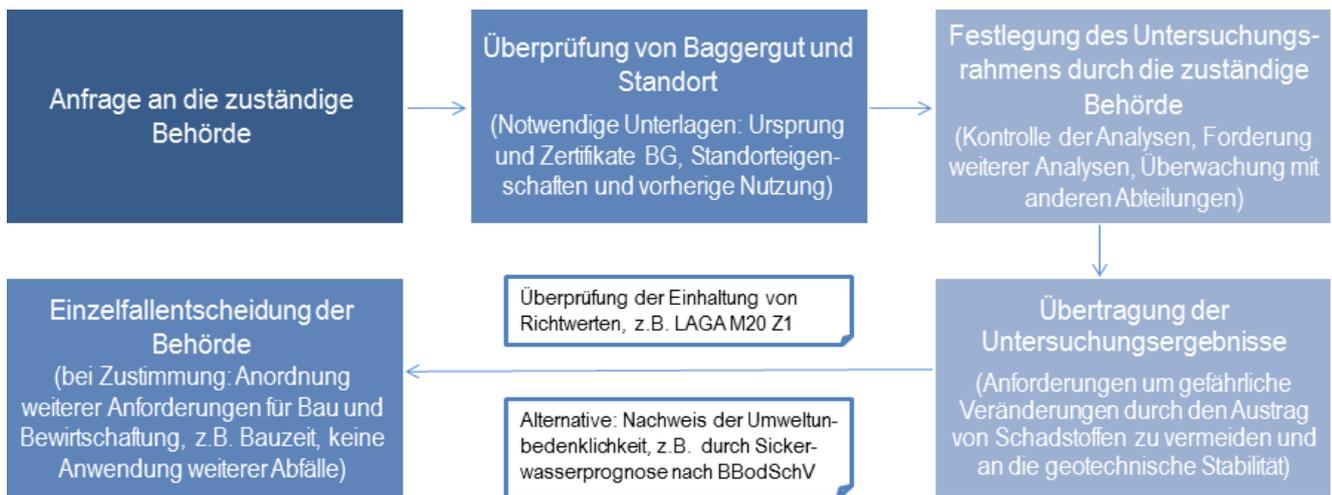


Abb. 4.1. Flussdiagramm mit Empfehlungen für die Schritte zur Genehmigung von BG im Deichbau in Mecklenburg-Vorpommern

Tabelle 4.2. Stakeholder (Schwerpunkt Mecklenburg-Vorpommern)

Thema	Institution / Stakeholder	Relevanz / Funktion im Planungsprozess
Alle Themen	Betroffene Bevölkerung / Öffentlichkeit	Betroffene Einwohner.
	Bauindustrie, Nassbaggerfirmen, örtliches Gewerbe	Nassbaggerarbeiten, Deichbau, Erfahrung, PPP, Know-How.
	Forschungseinrichtungen	Wissenschaftliche Experten.
Deichbau	BAW (Bundeanstalt für Wasserbau)	Forschung und Beratung für Wasserstraßenprojekte.
	StÄLU (Staatliche Ämter für Landwirtschaft und Umwelt)	Genehmigung der Landesschutzdeiche (1. Ordnung).
	Wasser- und Bodenverbände	Verantwortlich für Deiche 2. Ordnung (z.B. landwirtsch. Deiche).
	Untere Wasserbehörden	Genehmigung für Gewässer und Bauwerke 2. Ordnung.
Baggergut	StÄLU (Staatliche Ämter für Landwirtschaft und Umwelt)	Genehmigungs- und Expertenbehörde für Verwertung von Abfällen, Boden- und Gewässerschutz
	Untere Wasserbehörden	Genehmigung für Gewässer und Bauwerke 2. Ordnung Überwachung der Wasser- und Bodenverbände
	WSA (Wasser- und Schifffahrtsämter)	Zuständig für die Unterhaltung der Bundeswasserstraßen Betreiber eigener Anlagen zur Baggergutaufbereitung
	Hansestadt Rostock	Betreiber einer Baggergutaufbereitungsanlage (IAA Rostock)
Asche	StÄLU (Staatliche Ämter für Landwirtschaft und Umwelt)	Genehmigungs- und Expertenbehörde für Verwertung von Abfällen, Boden- und Gewässerschutz
	Untere Wasserbehörden	Genehmigung für Gewässer und Bauwerke 2. Ordnung
	Kohlekraftwerke	Ascheproduzenten

### 4.3. Baugrund und Baustelle

#### 4.3.1. Baugrund

Der Baugrund wird i.d.R. als Einheit mit dem Deichbauwerk betrachtet, weshalb ihm eine besondere Rolle (als dichtender oder durchströmter Körper, zusätzlich zur reinen Tragfähigkeit) zukommt. Deshalb sollte der Baugrund unter einer Deichtrasse umfangreich untersucht werden um folgende Informationen zu erhalten:

- Bodenschichtungen, inkl. besonders grobkörnige, weiche oder organische Schichten,
- Bodenhysikalische Parameter wie Dichte, Wassergehalt, Mineralogie, etc.,
- Mechanische Bodenparameter (Feldmessungen unterstützt durch Laborversuche) wie z.B. Scherfestigkeit, Verformbarkeit und Wasserdurchlässigkeit und
- Weitere Anforderungen bzgl. der Umweltaspekte (s.u.).

Der Umfang der Baugrunduntersuchung wird in DIN 4020 [4], DIN 1054 [5] und DIN ISO/TS 22476 [6] definiert und vom begleitenden geotechnischen Experten festgelegt.

Die Baugrunduntersuchung sollte mindestens die Fläche des geplanten Deichs umfassen. Zudem sollten umfangreiche Informationen zum Deichvorland, zur Deichgründung und zum Hinterland zusammengestellt werden. Dazu sind zusätzliche Untersuchungen nötig. Ein Beispiel für den Untersuchungsaufwand in den verschiedenen Planungsphasen findet sich in Annex I.

Da die Baugrunduntersuchung und die Anforderung an den Untergrund grundsätzlich unabhängig vom speziellen Deichbaumaterial zu sehen sind, wird an dieser Stelle nicht näher auf diesen Punkt eingegangen.

#### 4.3.2. Erforderlicher Platz auf der Baustelle

Auf der Baustelle ist zusätzlich zum Platz für die tatsächliche Bauausführung (Deichtrasse) auch die Baustelleneinrichtung einzuplanen, die erhebliche Flächen für die Lagerung, Behandlung oder Verbesserung von BG bzw. Aschen umfassen kann. Der Platzbedarf hängt u.a. von der Technologie zur Homogenisierung und Trocknung ab.

#### 4.3.3. Umweltaspekte

Die Anforderungen an die Baustelle werden besonders durch die Qualität des Baumaterials beeinflusst. BG enthält üblicherweise unkritische Gehalte an Schwermetallen und organischen Schadstoffen (Abschnitt 2.1.3). Durch wechselnde Redox-Verhältnisse, z.B. während des Einbaus (reduziert während der Gewinnung, oxidiert auf den Mieten) oder während Hochwasserereignissen, können ungewollt Schwermetalle mobilisiert werden, auch wenn die Schwermetallgehalte die Anforderungen zur Materialverwertung einhalten. Deshalb sind die tatsächlichen hydrologischen Bedingungen auf der Baustelle interessant.

In marinem und Brackwasser-BG können Salzionen (Chlorid und Sulphat) mobilisiert werden. Solches BG sollte deshalb eher in Küstennähe eingesetzt werden, wo die ausgewaschenen Salze den Untergrund und das Grundwasser nicht negativ beeinflussen.

Im Projekt DredgDikes wurden während der zweijährigen Untersuchungsreihe im Sickerwasser keine erhöhten Gehalte an Schwermetallen und der limitierenden Nährstoffe Stickstoff und Phosphor gefunden, trotz der regelmäßigen Nass-Trocken-Wechsel während der Feldversuche. Die Tonpartikel und die organische Substanz besitzen hohe Sorptions-

kapazitäten, die i.d.R. die Schwermetalle binden und stabilisieren. Dennoch ist in wechselnden Redox-Verhältnissen ein Monitoring nötig.

Gemischte Substrate auf Aschebasis sollten auf Schwermetallauswaschungen untersucht werden. Hierbei ist nicht primär der Schwermetallgehalt in der Asche selbst, sondern vielmehr der eluierbare und damit auswaschbare Anteil zu berücksichtigen (vergleichbar mit feinkörnigem BG). Besonders unter alkalischen Bedingungen besitzen Aschen i.d.R. sehr gute Bindungseigenschaften für Schwermetalle [7]. Im Einzelfall kann durch Zugabe von Kalk (1-3 %) der pH-Wert in einem alkalischen Bereich gehalten werden. Die Eluatuntersuchung ist nach DIN 38414-4 [8] vorzunehmen.

Zum Schutz von Boden und Grundwasser vor möglichen Auswaschungen (Depot und Bauwerk) sind folgende Kriterien für Baustelle und der Baugrund zu beachten:

- Vertikaler Abstand vom Lagerplatz zum Grundwasser,
- Entfernung zu Schutzgebieten / Schutzgütern,
- Wasserdurchlässigkeit des Untergrunds (je niedriger, desto besser),
- Sickerwasserprognose (z.B. nach [9]),
- Entfernung zur Küstenlinie / zum Vorfluter.

Abhängig von der Höhe der Schadstoffbelastung des Baumaterials gelten die o.g. Anforderungen für die Gründung, für temporäre Materialdepots sowie für eingebaute Materialien (z.B. für leicht belastete Substrate zwischen Schichten sauberer Substrate oder Bodenmaterialien). Die Sickerwasserprognose sollte immer sowohl für die temporären Lagerstätten als auch für das eingebaute Material durchgeführt werden.

### 4.4. Allgemeine Auswahlkriterien für Deichbaumaterialien

In einem Deichbauprojekt werden i.d.R. erhebliche Erdmassen eingesetzt. Deshalb gehören die Auswahl, die Charakterisierung und die Verfügbarkeit der Bodenmaterialien zu den wichtigsten Faktoren für den Deichbau. In diesem Handbuch liegt der Schwerpunkt auf der Verfügbarkeit von BG und Aschen und den Methoden zur Auswahl geeigneter Materialien. Allgemeine Auswahlkriterien, wie Verfügbarkeit, ökonomische Überlegungen und grundsätzliche umweltrelevante Kriterien werden in diesem Abschnitt beschrieben. Die umweltrelevante und geotechnische Charakterisierung für die abschließende Auswahl wird in den folgenden Abschnitten diskutiert.

## 4.4.1. Auswahl von Baggergut

### 4.4.1.1. Verfügbarkeit

(1) Das Sediment am Gewässergrund wird während Nassbaggerarbeiten direkt verfügbar. Dieses BG ist zwangsläufig nass. Nur Sand und Kies können direkt nach dem Baggern verwertet werden. Die Aufspülung von Stützkörpern aus Sand / Kies ist ein Standardverfahren im Seedeichbau [1]. Seit einigen Jahren wird auch daran geforscht, wie feinkörnigeres BG, ggf. reich an organischer Substanz, durch Zumischen von Additiven im Spülrohr oder in einem mobilen Mischwerk auf der Baustelle so aufbereitet werden kann, dass es direkt zur Herstellung von Dämmen und Deichen geeignet ist.

(2) Häufig wird BG über lange Zeiträume ohne weitere Aufbereitung (z.B. Trocknung oder Homogenisierung) auf Spülfeldern gelagert. Dieses BG kann als nasses Rohmaterial bezeichnet werden. Abhängig von der Bagger- und Transporttechnologie wird im Nassbaggerprozess mehr oder weniger Wasser hinzugefügt und die Wassergehalte in den Spülfeldern variieren folglich erheblich. Dennoch ist i.d.R. eine intensive Aufbereitung vor der Verwertung nötig.

(3) In Aufbereitungsanlagen wie der IAA in Rostock [10] und ähnlichen Anlagen in Bremen und Hamburg wird BG getrocknet und aufbereitet und es werden verschiedene Materialqualitäten zur Verfügung gestellt. Der Wassergehalt des feinkörnigen organikreichen BG kann zwar immer noch vergleichsweise hoch sein (und i.d.R. auf dem nassen Ast der Proctor-Kurve), liegt jedoch deutlich unter dem des Rohmaterials.

BG entsteht im Rahmen von Unterhaltungsbaggerungen, wie sie durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung durchgeführt werden, und im Rahmen anderer Wasserbauarbeiten (direkt erhältlich vom Auftraggeber, Auftragnehmer oder von der Aufbereitungsanlage, zu der die Materialien gebracht werden).

### 4.4.1.2. Wirtschaftliche Aspekte

Wenn BG verwertet wird, spielt die ökonomische Rentabilität eine wichtige Rolle. Die praktische Erfahrung in Rostock hat gezeigt, dass die Aufbereitung von BG für die Verwertung in landwirtschaftlichen oder geotechnischen Anwendungen mit vergleichsweise geringen Kosten durchgeführt werden kann, so lange die Materialien nur gering schadstoffbelastet sind. Tabelle 4.3 zeigt beispielhaft die Kosten für das BG-Management in Rostock.

Tabelle 4.3. Beispiel für Behandlungskosten pro m<sup>3</sup> gereiftem BG in einer Aufbereitungsanlage für unkontaminiertes BG (2014) [11]

Position	Beschreibung	€/m <sup>3</sup>
Gebühr für BG das in die IAA eingespült wird	Aufbereitung (Polder entleeren, Herstellung von Erdstoffmieten)	2,40
	Transport und Lieferung (bis 40 km zum Endverbraucher inkl. Einnahmen aus dem Materialverkauf)	4,30
	Management der Aufbereitungsanlage (Personal, Zertifizierung, Reparaturen, Unterhaltung, F&E, Marketing)	2,00
Netto-Summe (exkl. MwSt. etc.)		<b>8,70</b>

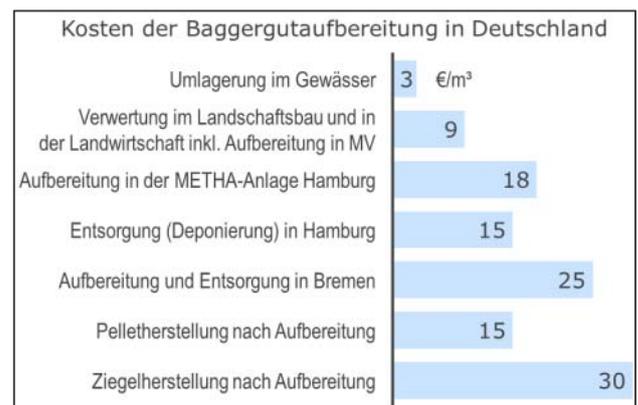


Abb. 4.2. Kosten für Baggergutaufbereitung in €/m<sup>3</sup> (2006) [12]

Die Einspülgebühr der IAA Rostock deckt die Kosten der Aufbereitung und einen Teil der Transportkosten. Die gereiften Materialien werden für derzeit (2015) 2,50 €/m<sup>3</sup> verkauft, wobei der Transport bis zu 40 km Entfernung zur IAA bereits inbegriffen ist. Dies ermöglicht die Verwertung des Aufbereiteten BG; allerdings bezieht sich diese Kalkulation nur auf vergleichsweise sauberes Material, für das die Transportkosten ein wesentlicher Faktor sind.

Die Entfernung der Baustelle zum verfügbaren BG ist ein limitierender Faktor und hat bereits zum Ausschluss von BG von der Verwertung in Deichbauprojekten geführt [12]. Die Transportentfernung ist jedoch nicht nur ein monetärer sondern auch ein umweltrelevanter Faktor. Wenn die Deichbaustelle jedoch in der Nähe der BG-Aufbereitung liegt, können die Materialkosten sehr niedrig gehalten werden. Dies impliziert zudem, dass in allen existierenden Spülfeldern möglichst immer eine Aufbereitung des Materials angestrebt werden sollte um die Verwertung in nahegelegenen Bauwerken zu ermöglichen.

Die Kosten für verschiedene Verwertungswege für das vorhandene Baggergut sollten immer mit denen zum Einsatz im Deichbau verglichen werden, damit der Einsatz der Materialien weiterhin wirtschaftlich bleibt. Eine Auswahl an Kosten für die BG-Aufbereitung ist in Abb. 4.2 zusammengestellt.

#### 4.4.1.3. Umweltaspekte

Das Baggergut aus Rostock ist weitgehend unbelastet und erfüllt i.d.R. die Vorsorgewerte nach §12 BBodSchV [9] bzw. Richtwerte für LAGA Z0 und Z1 [13] mit Ausnahme des TOC-Wertes, der el. Leitfähigkeit und der Salzionen. Aufgrund der hohen Stabilität der organischen Substanz (Abschnitt 4.5.2) ist die Eutrophierung durch Eluate praktisch ausgeschlossen. Deshalb ist die erhöhte Salzkonzentration der einzige eventuell kritische Parameter.

Da das Rostocker BG i.d.R. brackwasserbeeinflusst ist, sind hohe Salzgehalte die Regel. Diese Salze sind leicht löslich und die geotechnische Verwertung ist i.d.R. nur dort möglich, wo sie keine Gefährdung darstellen, z.B. an der Küste, wo das Grundwasser meerwasserbeeinflusst ist.

In vielen Nassbaggerprojekten wird feinkörniges BG mit leicht erhöhten Schadstoffgehalten gebaggert, wobei oft nur einzelne Werte die gültigen Richtwerte für die Verwertung der Materialien überschreiten (vgl. Abschnitt 4.5.1).

#### 4.4.2. Auswahl von Aschen

Die Auswahl von Aschen für ein Projekt sollte auf Basis der lokalen Verfügbarkeit und einer detaillierten geotechnischen Analyse getroffen werden. Üblicherweise werden Aschen in Wasserbauwerken aus verschiedenen Gründen nur in Substratmischungen zusammen mit (nassgebagertem) Sand verwendet. Deshalb müssen nicht nur die Aschen selbst sondern v.A. auch die Komposite analysiert werden.

##### 4.4.2.1. Verfügbarkeit

Die Hauptquelle der Aschen sind Kohlekraftwerke und Aschedepots. Dieser Punkt wurde im Projekt DredgDikes aufgrund der dort höheren Relevanz des Themas nur für Polen recherchiert (s. englisches Hauptdokument).

##### 4.4.2.2. Wirtschaftliche Aspekte

Die verschiedenen Asche-Quellen können wie folgt ökonomisch bewertet werden (Bsp. Polen):

- Aschen aus einem Aschedepot sind oft am kostengünstigsten. Allerdings erfordert deren Verwertung i.d.R. einen aufwändigen Genehmigungsprozess und eine umfangreiche und zeitaufwändige Untersuchung.
- Werden Aschen direkt von einem Kraftwerk bezogen können die direkten Kosten höher sein, dafür wird die chemische Analyse i.d.R. im Werk vorgenommen und die Zertifikate sind verfügbar. Häufig ist keine weitere

Aufbereitung nötig. Der Genehmigungsprozess ist weniger zeitaufwändig.

- Werden Aschen als fertiges Baumaterial von einem zertifizierten Anbieter bezogen, sind sie i.d.R. am teuersten, allerdings sind es dann häufig bereits zertifizierte Baustoffe. Besonders, wenn geringere Mengen (z.B. als Zuschlagstoff in einem Komposit) eingesetzt werden, kann diese Variante vorteilhaft sein.

##### 4.4.2.3. Umweltaspekte

Die Umweltaspekte von Aschen beziehen sich weitgehend auf deren chemische Zusammensetzung und die Schwermetallgehalte (vgl. Abschnitt 2.2 und 3.2).

### 4.5. Auswahl und Charakterisierung von Baggergut

Baggergut wird üblicherweise vor den Nassbaggerarbeiten untersucht, indem Proben vom Gewässergrund genommen und im Labor analysiert werden. Diese Tests sollten immer vorgenommen werden, unabhängig was anschließend mit dem BG geplant ist [14]. Diese Analysen enthalten auch einige Werte, die bodenmechanisch relevant sind, wie z.B. die Kornverteilung und die Gehalte an organischer Substanz und Kalk, allerdings genügen diese Werte nicht zur Eignungsbewertung eines BG zur Verwertung im Deichbau. Auf diese Voruntersuchung wird deshalb an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Die speziellen Anforderungen an verschiedene Laboranalysen gelten für die Voruntersuchung jedoch gleichermaßen.

Die Charakterisierung von BG zur Verwertung im Deichbau kann unterschieden werden in eine umweltrelevante geochemische Analyse bezüglich der Umweltgesetzgebung und eine geotechnische Analyse zur Bewertung der Standsicherheit und der Einbaubarkeit der Materialien. Einige Parameter müssen allerdings in beiden Bereichen berücksichtigt werden, da sie entweder eng mit anderen Parametern zusammenhängen oder die Untersuchungs- bzw. Bewertungsmethoden von Parametern aus dem jeweils anderen Bereich abhängen.

#### 4.5.1. Umweltrelevante Charakterisierung

Für die geochemische Charakterisierung von BG sind vor allem die potentiellen Schadstoffbelastungen von Interesse. Die einzuhaltenen Vorsorgewerte des Bodenschutzes für BG zur Verwertung werden im Folgenden diskutiert.

Für BG-Aufbereitungsanlagen ist es vorteilhaft, die Umweltanalyse in das Qualitätsmanagementsystem einzu- beziehen. Dies sichert eine gleichbleibende Qualität der Analysen und ermöglicht eine Zertifizierung des Materials nach einem gleichbleibenden Analyseprogramm.

In Deutschland folgt die Charakterisierung von Substraten und Bodenmaterialien zur Verwertung zwei Richtlinien, abhängig vom Einsatzzweck. Bei der Verwertung in der oberen Bodenschicht (durchwurzelbarer Horizont bis ca. 30 cm Tiefe) greift die Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (§12 BBodSchV) [9], während für den Einbau in technischen Bauwerken allgemein die Anforderungen der LAGA M20 [13] herangezogen werden können (die im Fall des durchwurzelbaren Oberbodens wiederum auf [9] verweist). Für von LAGA [13] definierten Bodenmaterialien und Substrate hat das Dokument in vielen Bundesländern bindenden Charakter. Feinkörniges, organisches Baggergut wird allerdings aufgrund der Einschränkung auf Materialien mit TOC < 5 % und weniger als 10 % Tongehalt von [13] nicht direkt berührt. Da es jedoch bislang kein anderes bindendes Dokument für diese Materialien gibt, wird die Anwendung von [13] trotzdem empfohlen. Alternativ kann die Umweltunbedenklichkeit (z.B. aufgrund der höheren schadstoffbindenden Eigenschaften des Feinkorns und der Organik im entsprechenden BG gegenüber den in [13] definierten Materialien) in einem separaten Fachgutachten nachgewiesen werden, z.B. durch eine Sickerwasserprognose nach BBodSchV.

Für die durchwurzelbare Oberbodenzone gelten immer die Vorsorgewerte des §12 BBodSchV sowie der Anlage 2 zur BBodSchV [9] (s.o.). Für den offenen Einbau in einem technischen Bauwerk gelten die Richtwerte der LAGA M20. BG der Klassen Z0 und Z1 wird direkt zum Einsatz in Deichen empfohlen. Die Richtwerte von Z0 entsprechen i.W. den Vorsorgewerten für lehmige Böden in der BBodSchV.

In MV gibt es eine grundsätzliche Abstimmung zwischen dem Ministerium für Wirtschaft, Bau und Tourismus (Abt. Abfallwirtschaft) und dem Staatlichen Amt für Landwirtschaft und Umwelt (StALU MM, Abt. Wasser & Boden und Abt. Küste) zur Anwendung der LAGA M20 [13] für feinkörniges, organikreiches BG zur Verwertung im Deichbau (Kapitel 3).

Der empfohlene Ablauf für eine Umweltanalyse von BG zur Verwertung im Deichbau ist in Abb. 4.3 angegeben. Die Probenahme sowie die Lagerung und Aufbereitung der Proben soll nach den Empfehlungen für Laborversuche aus [9] und [13] vorgenommen werden. Im Verdachtsfall (z.B. Herkunft des BG) können zusätzliche Laboruntersuchungen erforderlich werden. Hierfür ist i.d.R. eine Absprache mit der Genehmigungsbehörde erforderlich, in der auch die einzuhaltenden Grenzwerte definiert werden sollten.

In Tabelle 4.4 sind die einzuhaltenden Vorsorge- und Richtwerte angegeben (Mindestuntersuchungsprogramm). Eluate müssen i.d.R. nicht untersucht werden, wenn das BG die Werte für LAGA Z0 bzw. BBodSchV einhält.

Der TOC-Gehalt in feinkörnigem BG überschreitet häufig die zulässigen Werte der LAGA (während es keine

### Chemische Charakterisierung – Anwendung im Deichbau Untersuchungs- und Bewertungsrahmen für BG

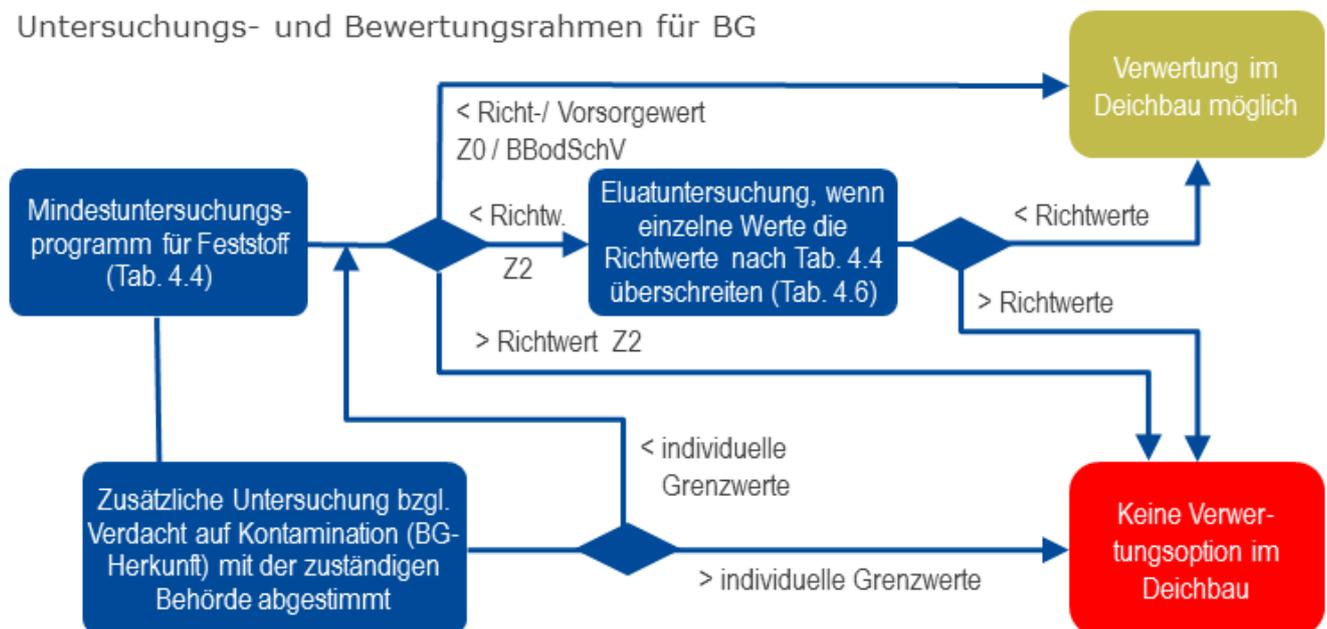


Abb. 4.3. Empfohlenes Vorgehen zur Planung von Laboruntersuchungen zur (umweltrelevanten) Charakterisierung bei der Baggergutverwertung

Einschränkungen bzgl. BBodSchV gibt), die zulässige mineralische Feinfraktion wird häufig überschritten und in marinen oder Brackwasser-BG sind die Salzgehalte i.d.R. erhöht. Deshalb ist immer eine Einzelfallentscheidung der zuständigen Genehmigungsbehörde(n) erforderlich (Kapitel 3) und die Parameter sind in Tabelle 4.4 nicht enthalten. Trotzdem sollte der TOC-Wert nach ISO 10694 [15] immer bestimmt werden, da er ein Indikator für verschiedene Prozesse im Boden sein kann. Der Anteil an organischer Substanz (Humusgehalt) kann durch eine einfache Formel aus dem TOC abgeschätzt werden:  $OS = 1.724 \cdot TOC$ . Für die geochemische Analyse nach BBodSchV ist eine grundlegende Bodenklassifizierung (mindestens Korngrößenverteilung) erforderlich, da die Vorsorgewerte von der Bodenart abhängen. Deshalb wird ein verlässlicher Wert der Tonfraktion benötigt. Für organik- und kalkreiches BG ist dazu eine Methode zu wählen, in der die Tonfraktion (< 0.002 mm) realistischer abgebildet wird als durch eine Sieb-Schlammanalyse nach DIN 18123 [16]. Geeignet ist die Methode nach DIN ISO 11277 [17]. Ausführlichere Informationen finden sich in Abschnitt 4.5.3 zur geotechnischen Untersuchung.

In Tabelle 4.5 sind die empfohlenen Richtwerte nach LAGA M20 für den möglichen offenen (Z1) und eingeschlossenen (Z2) Einbau von Bodenmaterialien in technischen Bauwerken angegeben. Die LAGA-Richtwerte aus Tabelle 4.4 und Tabelle 4.5 für die Feststofffraktion des BG werden mit Ausnahme von TOC und Salzionen in diesem Handbuch empfohlen.

Werden einzelne Werte für die Feststoffe überschritten, können die Eluatwerte eine Aussage über die tatsächliche Verfügbarkeit und Mobilität der Inhaltsstoffe ermöglichen. In Verdachtsfällen können die zuständigen Behörden zusätzliche Untersuchungen anordnen. Verdachtsfälle können sich aus der Herkunft der Materialien ergeben oder wenn in-situ-Untersuchungen Schadstoffe zeigen, die nicht in LAGA enthalten sind (z.B. TBT).

Für den Deichbau ist die Eluatqualität von entscheidender Bedeutung, da Sickerwässer im Deichkörper Schadstoffe mobilisieren können. Materialien, die die Richtwerte nach LAGA Z0 und Z1.1 einhalten, sind für die Verwertung im Deichbau unkritisch. Werden diese Werte überschritten, kann ein individueller Nachweis der Umweltunbedenklichkeit geführt werden (z.B. durch eine Sickerwasserprognose nach BBodSchV). Feinkörniges BG kann so ggf. trotzdem

offen eingebaut werden, da es i.d.R. hohe Sorptionskapazitäten besitzt. Die Eluat-Richtwerte der LAGA M20 sind in Tabelle 4.6 angegeben.

Tabelle 4.4. Mindestuntersuchungsprogramm und Vorsorgewerte für lehmiges BG in bodenähnlichen Anwendungen [9], [13]

Parameter	Einheit	BBodSchV	LAGA (Z0)
Blei	mg/kg TS	70	70
Kadmium		1	1
Chrom		60	60
Kupfer		40	40
Nickel		50	50
Quecksilber		0,5	0,5
Zink		150	150
Arsen			15
Kohlenwasserstoffe			100
PAH		3,0	3,0
PCB		0,05	0,05
EOX			1

Tabelle 4.5. Vorsorgewerte für Böden zum Einbau in technischen Anwendungen nach LAGA M20 – Feststoff [13]

Parameter	Einheit	LAGA (Z1)	LAGA (Z2)
Arsen	mg/kg TS	45	150
Blei		210	700
Kadmium		3	10
Chrom		180	600
Kupfer		120	400
Nickel		150	500
Thallium		2,1	7
Quecksilber		1,5	5
Zink		450	1.500
Cyanid		3	10
EOX		3 <sup>1)</sup>	10
Kohlenwasserstoffe		300 (600) <sup>2)</sup>	1.000 (2.000) <sup>2)</sup>
BTX		1	1
VHH		1	1
PCB <sub>6</sub>		0,15	0,5
PAK <sub>16</sub>		3 (9) <sup>3)</sup>	30
Benzo(a)pyrene		0,9	3

1) Wenn erhöht sind die Gründe zu klären

2) Richtwerte für Kohlenwasserstoffe mit Kettenlängen C<sub>10</sub> - C<sub>22</sub>. Richtwerte in Klammern: Summe (C<sub>10</sub>-C<sub>40</sub>) nach E DIN EN 14039

3) Bodenmaterial mit Richtwert > 3 mg/kg und ≤ 9 mg/kg sollte nur in hydraulisch vorteilhaften Verhältnissen angewendet werden

Tabelle 4.6. Richtwerte für Böden zum Einbau in technischen Anwendungen nach LAGA M20 – Eluate [13]

Parameter	Einheit	Z1.1	Z1.2	Z2
pH	-	6,5-9,5	6-12	5,5-12
Cyanid	µg/L	5	10	20
Arsen		14	20	60
Blei		40	80	200
Kadmium		1,5	3	6
Chrom		12,5	25	60
Kupfer		20	60	100
Nickel		15	20	70
Quecksilber		< 0,5	1	2
Zink		150	200	600
Phenolindex		20	40	100

#### 4.5.2. Empfehlungen zu Humusstabilität und Eignung für Vegetation

Bei einem hohen Anteil an organischer Substanz in den Substraten wird manchmal befürchtet, dass sich die organische Substanz mit der Zeit abbaut. Zum Nachweis der Stabilität der OS und damit der Sicherheit gegenüber einem potentiellen Eutrophierungsrisiko, wird ein Atmungstest (AT<sub>4</sub>-Test) empfohlen. Dieser Test ist auch für Abfälle zur Deponierung vorgeschrieben [18] und wurde bereits vielfach angewandt, wenn BG in Rekultivierungsschichten bei der Deponierekultivierung eingesetzt wurde. Der empfohlene Richtwert ist 5 mg/g TM, den BG i.d.R. weit unterschreitet.

Weiterhin sind die hohen Nährstoff- und Salzgehalte in einigen BG-Chargen zu berücksichtigen. Die Gehalte an Chlorid, Sulfat, Natrium, Kalium und Magnesium lassen auf potentielle Austragsmengen schließen und können die Entscheidung über eine BG-Verwertung in der Nähe von Schutzgütern beeinflussen. Der Austrag der Nährstoffe Phosphor und Stickstoff ist vernachlässigbar, wie verschiedene Untersuchungen zeigen [19]. Die BBodSchV [9] enthält Empfehlungen für zulässige Nährstoffgehalte im Sickerwasser (z.B. Na, Cl, N, P).

Trotz der bislang ausschließlich guten Erfahrungen mit der Vegetationsentwicklung auf dem untersuchten BG wird zusätzlich zu diesen chemischen Analysen ein Keimungstest empfohlen, mit dem die Keimfähigkeit auf den untersuchten bzw. ausgewählten Materialien bewertet werden kann. Da es dafür keinen genormten Versuch gibt, kann die Keimungsqualität z.B. auf den BG-Mieten bestimmt werden,

bevor das Material eingebaut wird. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass die Mieten nicht so stark verdichtet sind wie die fertige Deichböschung und die Versuchsfläche sollte zunächst leicht verdichtet werden, bevor der Versuch durchgeführt wird (dann ist je nach Verfahren ggf. die Oberfläche wieder zu bearbeiten). Alternativ kann auch ein Labor- / Gewächshausversuch an mindestens drei Proben durchgeführt werden. Empfehlungen zu Ansaat und Vegetationsentwicklung finden sich in Kapitel 5.

#### 4.5.3. Geotechnische Charakterisierung von BG

In der Planungsphase sind die Eigenschaften der Baumaterialien im Zusammenhang mit dem geplanten Deichquerschnitt zu bestimmen bzw. festzulegen. Soll lokal vorhandenes Material (wie Klei oder Mergel) oder BG eingesetzt werden, ist der Deichquerschnitt ggf. an die Materialeigenschaften anzupassen. Üblicherweise ist das BG bereits vor der eigentlichen Planungsphase nach dem in diesem Handbuch vorgeschlagenen Mindestuntersuchungsprogramm geotechnisch zu klassifizieren.

Zwei Hauptstrategien können die Untersuchungen beeinflussen, abhängig von der Materialverfügbarkeit und der Absicht, ein spezielles BG als Deichbaustoff zu verwenden:

(1) Wird BG neben anderen Materialien als Alternative vorgeschlagen, sind die für den Deichquerschnitt notwendigen geotechnischen Parameter zu bestimmen und in den entsprechenden Planungs- und Ausschreibungsunterlagen zu dokumentieren. Dann wählt der Auftragnehmer (AN) die entsprechend geeigneten Erdstoffe. Entscheidet er sich für ein BG, hat der AN die Eignung durch eine umfangreiche geotechnische Analyse nachzuweisen.

(2) Wird von vornherein die Entscheidung zum Einsatz von BG in einem Deichbauprojekt getroffen (z.B. durch die Gemeinde oder eine zuständige Behörde), muss die vollständige geotechnische Charakterisierung bereits zu Beginn des Planungsprozesses verfügbar sein, so dass die Querschnitte mit den vorhandenen Bodenkennwerten entworfen werden können. Dann hat der Auftraggeber (AG) die entsprechenden Nachweise zu bringen oder vom Anbieter / Besitzer des BG einzufordern, um geeignete Chargen für den Deichbau auszuwählen.

Alle Erdstoffe in einem Deichbauprojekt haben bestimmte Minimalanforderungen zu erfüllen. Für übliches Deichbaumaterial, inklusive nassgebagertem Sand, sind die Anforderungen in den entsprechenden Normen und

Empfehlungen für See- und Flussdeiche gegeben (Kapitel 2). Für feinkörniges, organik- und ggf. kalkreiches BG werden die Richtwerte, der Umfang der Analysen sowie Besonderheiten bei deren Durchführung im Folgenden beschrieben. Die wichtigsten Parameter werden zudem als Qualitätskontrollparameter verwendet (Kapitel 5).

BG kann entweder von einer Aufbereitungsanlage bezogen werden oder es bedarf einer Aufbereitung vor dem Einbau in ein Deichbauwerk. Die folgenden Empfehlungen gelten für aufbereitetes BG (in Rostock hauptsächlich Kornklassifizierung und Reifung). Rohmaterialien (z.B. aus Spülpoldern) müssen nach der Aufbereitung dieselben Anforderungen erfüllen. Deshalb ist zwischen dem AG und dem BG-Anbieter ein geeigneter Weg festzulegen, wie die Qualität nach Aufbereitung nachgewiesen werden kann.

Im Folgenden wird der Umfang an Laboranalysen vorgestellt und es werden Empfehlungen zur Versuchsdurchführung gegeben. Zudem werden Informationen zu solchen Versuchen gegeben, die keine verlässlichen Ergebnisse mit BG erwarten lassen.

#### 4.5.3.1. Standard-Laborprogramm für die geotechnische Charakterisierung von BG

Das Standard-Laborprogramm für die geotechnische Charakterisierung von BG sollte mindestens die in Tabelle 4.7 angegebenen Parameter umfassen.

#### 4.5.3.2. Vorversuche und Zertifizierung

Ein Vorversuch während der Grundlagenermittlungsphase sowie das Qualitätszertifikat in einer Aufbereitungsanlage sollten mindestens die Korngrößenanalyse, den TOC- und Kalkgehalt, den Wassergehalt und die Konsistenzgrenzen umfassen. Damit können vielversprechende Materialchargen für die weitere Untersuchung ausgewählt werden.

#### 4.5.3.3. Unbehandeltes Material

Bei unbehandeltem BG sind die Proben zu entwässern, bevor die geotechnischen Versuche durchgeführt werden (der Begriff Trocknung wird hier bewusst vermieden, da feinkörniges, organikreiches BG bei vollständiger Trocknung seine Eigenschaften verändern kann). Dazu sollte zunächst der erreichbare Wassergehalt im Reifeprozess (z.B. bodenhydrologisches Gleichgewicht) und die erforderliche Zeit abgeschätzt werden. Die Reifung kann auch Bodenbildungsprozesse einschließen, die hier jedoch vernachlässigt werden müssen.

Tabelle 4.7. Geotechnische Parameter für BG im Deichbau – Mindestuntersuchungsprogramm

Parameter	Norm
Korngrößenverteilung <sup>1)</sup>	ISO 11277 & DIN 18123
TOC	DIN 18128
Kalkgehalt	DIN 18129
Fließgrenze $w_L$	DIN 18122-1 o. ISO/TS 17892-12
Ausrollgrenze $w_P$	DIN 18122-1 o. ISO/TS 17892-12
Schrumpfgrenze $w_s$	DIN 18122-2
Plastizitätsindex $I_P$	DIN 18122-1
Konsistenzzahl $I_c$	DIN 18122-1
Volumetrisches Schrumpfmaß $V_s$	Abschnitt 4.5.2.4
Undrained Scherfestigkeit $c_{u,r}$ ( $w_{nat}$ ) <sup>3)</sup>	DIN 4094-4 <sup>2)</sup> & DIN 18137
Wasserdurchlässigkeit $k_s$	DIN 18130-1
Zusätzliche Parameter, wenn benötigt	
Winkel der inneren Reibung $\varphi$	DIN 18137
Kohäsion $c$	DIN 18137
Elastizitätsmodul $E$	DIN 18135

<sup>1)</sup> Sowohl mit als auch ohne Zerstörung der organischen Substanz. Alternative Methoden zur Zerstörung der OS sind möglich.

<sup>2)</sup> Voruntersuchung: Labor-Flügelversuch (angelehnt an DIN 4094-4); in-situ-Untersuchungen: Feldflügelversuch.

<sup>3)</sup>  $c_{u,r}$  bestimmt an Proben mit natürlichem Wassergehalt  $w_{nat}$ . Probenvorbereitung im Proctor-Gerät mit einfacher Proctorenergie. Auch zur Ermittlung des Wassergehalts für einen geforderten  $c_{u,r}$ -Wert.

#### 4.5.3.4. Empfohlene geotechnische Richtwerte für BG – Eignungsbewertung als Baustoff in Seedeichen

Baggergut, das als Deckschicht im Seedeichbau eingesetzt wird, sollte die Richtwerte in Tabelle 4.8 erfüllen, die auf den DredgDikes-Untersuchungen basieren. Erdstoffe mit mittlerer bis hoher Plastizität werden als geeignet eingeschätzt, wenn weitere Aspekte bzgl. Schrumpfmaß und TOC-Wert berücksichtigt werden. Die Bestimmung der Plastizitätseigenschaften (Atterberg) wird bei feinkörnigem, organikreichem BG als verlässlicher eingeschätzt als die Korngrößenanalyse und sie beschreibt die Eigenschaften eines Erdstoffes als Ganzes, inklusive seiner Stabilität gegen Erosion (plastische Substrate sind i.d.R. erosionsstabiler als nicht plastische; dies ist z.B. auf größere Anteile an Feinkorn und organischer Substanz zurückzuführen). Die verlässliche Bestimmung der Korngrößenverteilung von kalk- und organikreichem BG ist häufig schwierig (s.u.), weshalb keine Richtwerte für Ton- und Sandgehalte empfohlen werden (können zum Ausschluss geeigneten Materials führen). Die Kornverteilung ist trotzdem zu

bestimmen und der geotechnische Experte wird diese Information nutzen um die Materialqualität einzuschätzen.

Die Korngrößenabhängige Eignungsbewertung für BG (Hafenschlick) in EAK [1] kann aus verschiedenen Gründen nicht empfohlen werden:

- Ein Sandanteil von > 40 % (oberer Richtwert in [1]) verbessert die Standsicherheit und vermindert die Schrumpfrisssneigung. Ein Richtwert konnte im Projekt DredgDikes nicht bestimmt werden.
- Die Korngrößenanalyse ist problematisch: Ohne Zerstörung von Kalk und OS kann die erforderliche Tonfraktion nicht bestimmt werden, selbst wenn sie vorhanden ist (Agglomeratbildung). Die Entfernung von OS und Kalk verändert dagegen die Eigenschaften des BG erheblich und durch die chemische Probenvorbereitung können sogar die mineralischen Anteile beeinträchtigt werden.
- Im Fall hoher Anteile an OS und Kalk verändert die Analyse nach Zerstörung dieser Anteile die auf die Gesamtprobe bezogenen Massenanteile der mineralischen Kornfraktionen. Beispiel: Enthält eine Probe 20 % OS und 10 % Kalk, sind 30 % der Probe nicht mineralisch und ein Anteil von 15 % Ton in der mineralischen Fraktion bedeutet dann einen Anteil von lediglich ca. 10 % in der Gesamtprobe. So kann es also von der Bestimmungsmethode abhängen, ob die Kriterien nach EAK eingehalten werden oder nicht.

Die organische Substanz in BG ist i.d.R. sehr stabil (s.o.) und deshalb sollten sich die mechanischen Eigenschaften des BG bezüglich dieses Parameters nicht verändern. Deshalb werden Scherfestigkeit und Plastizität (inkl. Information über die Erosionsresistenz) in diesem Zusammenhang als verlässlicher angesehen.

Der TOC-Wert sollte weniger als 9 % betragen, um irreversible Schrumpfeffekte zu reduzieren. Informationen zur Bestimmung der charakteristischen Parameter finden sich in Abschnitt 4.5.3.9.

Beim Einbau sollte eine undränierete Scherfestigkeit von  $c_{fu} \geq 50$  kPa (Flügelversuch) erreicht werden. Dieser Wert dient der Qualitätsüberwachung; deshalb sollte er

Tabelle 4.8. Geotechnische Eignungskriterien für BG als Deckschichtmaterial im Seedeichbau (Ostseedeiche)

Parameter	Einheit	Richtwert
TOC	%	$\leq 9$ <sup>1)</sup>
Plastizitätsindex $I_P$	%	$\geq 15$ <sup>2)</sup>
Konsistenzzahl $I_c$	-	$\geq 0.7$ <sup>3)</sup>
Undränierete Scherfestigkeit $c_{u,r}$	kPa	$\geq 50$ <sup>4)</sup>
Volumetrisches Schrumpfmaß $V_s$	%	Klasse 1-2 Tabelle 4.9

<sup>1)</sup> Über die Zulassung höherer Werte ist im Einzelfall zu entscheiden. Dann sollte der AT<sub>4</sub>-Test (s.o.) durchgeführt werden und es gilt  $V_s < 40$  %. Der Einbauwassergehalt sollte nahe  $w_{opt}$  liegen, um eine gute Verdichtung zu gewährleisten.

<sup>2)</sup> Mindestens mittelplastisch. Information zu Bodentypen im Plastizitätsdiagramm: TM, TA, TL, OM, UM, UA, OT, UA.

<sup>3)</sup> Einbauwassergehalt leicht oberhalb  $w_P$ , halbfester Zustand (empf.).

<sup>4)</sup> Flügelversuch an einer Probe mit  $I_c \geq 0.7$  oder zur Bestimmung des Mindesteinbauwassergehalts.

Tabelle 4.9. Klassifizierung der Schrumpfneigung – volumetrisches Schrumpfmaß  $V_s$  für BG im Deichbau (Ostsee-Deiche)

Schrumpfkategorie	$V_s$ [%]	Kommentar
1 (niedrig)	$\leq 20$	Niedrige Rissgefährdung
2 (mittel)	21 - 40	Mittlere Rissgefährdung (unproblematisch für Seedeich-Deckschichten an der Ostsee)
3 (hoch)	$> 40$	Hohe Rissgefährdung (problematisch besonders bei hohem natürlichem Wassergehalt, erfordert Monitoring und / oder zusätzliche Maßnahmen)

auch in den charakterisierenden Laborversuchen an Proben mit im Feld zu erwartender Verdichtung erreicht werden.

Das Volumetrische Schrumpfmaß ist ein geeigneter Wert zur Einschätzung der Neigung eines Erdstoffs zur Bildung von Trocknungs-Schrumpfrissen. Zur besseren Einordnung der verschiedenen Materialien wird eine Klassifizierung bezüglich des Schrumpfmaßes empfohlen (Tabelle 4.9). Das volumetrische Schrumpfmaß  $V_s$  ist wie folgt definiert:

$$V_s = \frac{V_i - V_e}{V_i} \times 100 \quad (1)$$

Mit  $V_s$  = Schrumpfmaß [%],  $V_i$  = Anfangsvolumen,  $V_e$  = Endvolumen

In den Untersuchungen zur Sicherwasserströmung im Deich in den (hauptsächlich stationären) Überströmungsversuchen gab es keine Standsicherheitsprobleme, obwohl die Böschungsoberflächen im ersten Sommer stark ausgetrocknet und deshalb von großen Rissen überzogen waren. Es gab keine auf Risse zurückzuführende Erosion und die Rissflanken zeigten sich stabil, da austretendes Sickerwasser keine Sedimentfracht erkennen ließ. Auch in Abschnitten, in denen die Deckschicht aufgrund der vielen Risse sehr schnell aufsättigte, konnte keine Verminderung der Standsicherheit festgestellt werden. Die Grasnarbe entwickelte sich sehr gut und die dichten Wurzeln bewahren mindestens die oberen 20 cm intensiv. Feldflügelversuche direkt nach dem Absenken des Wassers in den Versuchspoldern ergaben hohe Festigkeitswerte von  $c_{fu} \geq 60$  kPa in einer Tiefe von 20 cm und mit der Tiefe ansteigend. Zudem zeigten die Materialien keinen wesentlichen Rückgang der Festigkeit während der Aufsättigung in situ. Deshalb wird die Rissbildung beim Einsatz von feinkörnigem, organikreichem BG beim Bau von Ostseedeichen als weniger entscheidend eingeschätzt als ursprünglich befürchtet. Diese Bewertung entbehrt jedoch Erfahrungen bezüglich instationärer Abflüsse und Druckschlageffekte aus brechenden Wellen. Deshalb wurde eine Druckschlagbemessung nach Führböter [20] durchgeführt, in der eine erforderliche undränierete Scherfestigkeit  $c_u$  ermittelt wird. Für eine signifikante Wellenhöhe von  $H_s = 1.50$  m (ein üblicher Bemessungswert in MV) und einer Böschungsneigung von 1:3 ist ein  $c_u \geq 60$  kPa erforderlich. Dieser Richtwert kann mit BG erreicht werden und wurde mit den Materialien aus dem Projekt DredgDikes i.d.R. überschritten, sogar im gesättigten Zustand. Für flachere Böschungen (typische Böschungsneigungen für Ostseedeiche liegen zwischen 1:3 und 1:6) ist der erforderliche  $c_u$ -Wert sogar niedriger

Tabelle 4.10. Geotechnische Eignungskriterien für BG als Stützkörper oder als homogener Deich (Ostsee- und Flussdeiche)

Parameter	Einheit	Richtwert
TOC	%	≤ 6
Plastizitätsindex I <sub>P</sub> (homogen)	%	≥ 10
Plastizitätsindex I <sub>P</sub> (Stützkörper)	%	≤ 30
Konsistenzindex I <sub>C</sub>	-	≥ 0,9*
Volumetrisches Schrumpfmaß V <sub>s</sub>	%	≤ 20 (40)
Undrained Scherfestigkeit c <sub>u,r</sub>	kPa	≥ 50

\* Einbauwassergehalt nur wenig über w<sub>P</sub>, halbfester Zustand

Tabelle 4.11. Geotechnische Eignungskriterien für BG als mineralisches Dichtungsmaterial für Flussdeiche

Parameter	Einheit	Richtwert
TOC	%	≤ 3
Plastizitätsindex I <sub>P</sub>	%	≥ 15*
Konsistenzzahl I <sub>C</sub>	-	≥ 1,0**
Volumetrisches Schrumpfmaß V <sub>s</sub>	%	≤ 10
Undrained Scherfestigkeit c <sub>u,r</sub>	kPa	≥ 50
Wasserdurchlässigkeit k <sub>s</sub>	m/s	***

\* Mindestens mittelpastisch. Information zu Bodentypen im Plastizitätsdiagramm: TM, TA, TL, OM, UM, UA, OT, UA.

\*\* Einbauwassergehalt w ≤ w<sub>P</sub>, halbfester Zustand

\*\*\* Wasserdurchlässigkeit einer Dichtung hängt von nationalen und regionalen Richtlinien, von lokalen Gegebenheiten und Einzelfallentscheidungen ab. Feinkörniges BG erfüllt diese Kriterien häufig.

Die hydraulische Leitfähigkeit ist immer zu bestimmen, obwohl sie eher eine Frage der Bemessung als ein Auswahlkriterium darstellt. Sie wird u.a. benötigt um die Sickerwassermenge zu prognostizieren, die am landseitigen Deichfuß abzuleiten ist.

Ein weiterer entscheidender Punkt ist die innere Erosion (Kapitel 2). In den verschiedenen Experimenten des Projektes DredgDikes konnte kein Sedimenttransport festgestellt werden, wenn Sickerwasser aus Rissen oder Wühlertgängen austrat (dies würde z.B. durch kleine Sedimentanhäufungen vor den Austrittstellen sichtbar). Im Standard-Pin-hole-Test konnte aufgrund des kleinen Lochdurchmessers in der Probe und der großen Agglomerate aus mineralischem Feinkorn, Kalk und organischer Substanz keine Erosion gemessen werden (Abschnitt 4.5.3.10). Deshalb wird empfohlen, weitere wissenschaftliche Untersuchungen bezüglich der internen Erosion vorzunehmen. Gleichzeitig führen die Beobachtungen zusammen mit den hohen I<sub>P</sub>-Werten (z.T. auf die stabile organische Substanz zurückzuführen) zu dem Schluss,

dass organikreiches BG, welches die o.g. Richtwerte einhält, nicht besonders Anfällig für innere Erosion ist.

#### 4.5.3.5. Empfehlungen für BG als Vegetationssubstrat

Wird BG nur eingesetzt, um den fruchtbaren Oberboden zu ersetzen, sollte es dennoch gut verarbeitbar sein. Ein sandig-lehmiges BG mit organischer Substanz ist vorteilhaft bezüglich der Nährstoff- und Sauerstoffversorgung der Vegetation. Die Umwelthanforderungen für einen Oberboden und weitere Anforderungen bezüglich Keimtests nach Abschnitt 4.5.2 sind zu berücksichtigen.

#### 4.5.3.6. Empfohlene geotechnische Richtwerte für die Eignung von BG für homogene Deiche oder als Stützkörper in See- oder Flussdeichen

Sandig-lehmiges BG kann als Stützkörper von See- und Flussdeichen eingesetzt werden, wenn es eine geringe Schrumpfung und eine hohe Festigkeit besitzt. Dafür wird im Vergleich zu Deckschichtmaterial ein niedrigerer TOC-Wert, ein niedrigerer Plastizitätsindex I<sub>P</sub>, ein geringeres Schrumpfmaß V<sub>s</sub> und eine hohe Scherfestigkeit c<sub>u</sub> empfohlen. Wird die erforderliche Wasserdurchlässigkeit für einen homogenen (Fluss-)Deich nicht erfüllt, können zusätzliche Dichtelemente vorgesehen werden (Kapitel 2).

#### 4.5.3.7. Empfehlungen für BG als mineralisches Dichtungsmaterial in Flussdeichen

Im Flussdeichbau ist die Schrumpfrissbildung ein wichtigerer Aspekt als auf Ostseedeichen. Die Qualität eines Dichtungsmaterials (wasserdichte Deckschicht oder Kerndichtung) unterliegt i.d.R. strengen Anforderungen nach [2], [3], [21]. Das Dichtungsmaterial sollte einen k<sub>s</sub>-Wert von mindestens zwei Größenordnungen unter dem des Stützkörpers [3] und einen maximalen spezifischen Durchfluss von q<sub>s</sub> < 2,5 · 10<sup>-8</sup> m<sup>3</sup>/s/m<sup>2</sup> [21] besitzen. Die geringe Wasserdurchlässigkeit muss zudem über einen langen Zeitraum erhalten bleiben. BG kann als Dichtungsmaterial im Flussdeichbau eingesetzt werden, wenn es eine besonders niedrige Schrumpfung besitzt und mit einem Wassergehalt nahe w<sub>opt</sub> eingebaut wird (Abschnitt 4.7.4.1).

#### 4.5.3.8. Maßnahmen für BG, wenn es den Anforderungen als Seedeichdeckschicht nicht entspricht

Tiefe Risse in einer Deichdeckschicht können präferentielle Fließpfade darstellen und die hydraulische Leitfähigkeit stark erhöhen. Wenn es zu offenen Fließwegen bis zum

Sandkern (Stützkörper) kommt, kann dies zu innerer Erosion und Materialverlagerung führen, was schließlich zum Versagen führt. Neigt das BG stark zu Schrumpfrissen, (Klasse 3, Tabelle 4.9) und ist der Wassergehalt gleichzeitig hoch, können die folgenden Maßnahmen ergriffen werden, um ggf. die Verwendung des Materials zu ermöglichen.

Die Dicke der Deckschicht kann vergrößert werden, so dass die Risse nicht mehr bis zum Stützkörper reichen. In einigen Fällen kann jedoch die kapillare Saugspannung von besonders feinkörnigem BG dazu führen, dass durch kapillaren Aufstieg Risse auch in größerer Tiefe entstehen, die durch die Austrocknung der Flanken noch vergrößert werden können.

Ein Vliesstoff (Geotextil) zwischen Deichkern und Deckschicht kann in diesem Fall die Standsicherheit des Systems zu gewährleisten. Dann sind einzelne tiefe (ggf. tief liegende) Risse unkritisch bzgl. des Materialtransports aus dem Sandkern. Zudem können sich größere Risse mit der Zeit wieder mit Sediment füllen und sich dadurch schließen (wenn auch nicht völlig heilen).

Die Aufbereitungstechnologie kann angepasst werden, um das Material weiter zu homogenisieren und gleichzeitig den Wassergehalt zu senken (z.B. durch Mietenaufsetzer).

#### 4.5.3.9. Empfehlungen für Laborversuche

**Proctorversuch:** Der Proctorversuch sollte nach DIN 18127 [22] durchgeführt werden. Normkonform wird die Bodenprobe bis zu einem Wassergehalt zwischen der Schrumpf- und der Ausrollgrenze getrocknet und anschließend zur Durchführung der eigentlichen Proctorversuche schrittweise wiederbefeuchtet. Enthält das BG organische Substanz, darf die Trocknungstemperatur nicht über 60°C liegen (je niedriger die Temperatur, desto besser). Die verlässlichsten Ergebnisse sind mit Lufttrocknung zu erreichen (Verhältnisse wie im Feld), was jedoch i.d.R. zu zeitaufwändig ist. Deshalb wird hier eine Ofentrocknung zwischen 40°C und 50°C empfohlen.

BG-Proben sollten nicht vollständig getrocknet werden, da das die Sorptionseigenschaften der mineralischen Feinkornfraktion und der organischen Substanz verändert. Bei feinkörnigem, organikreichem BG wird eine untere Grenze von  $w = 25\%$  empfohlen.

Die Methode des Proctorversuchs ist im geotechnischen Bericht genau zu dokumentieren (inkl. Trocknungstemperatur, Art der Trocknung, min. Wassergehalt, etc.). Da diese Aspekte die Ergebnisse von Proctordichte und optimalem

Wassergehalt  $w_{opt}$  beeinflussen können, ist der Versuch während der Charakterisierung und ggf. während der Qualitätskontrolle bzw. im Einbauteufeld auf die gleiche Weise durchzuführen.

In manchen Fällen ist die Standard-Methode der DIN nicht möglich, z.B. wenn das BG einen  $w_{opt}$  nahe bzw. unterhalb der Schrumpfgrenze  $w_s$  nach DIN 18122 [23] besitzt. Dann ist die Ergebnisauswertung aufgrund des fehlenden oberen Extremwertes der Proctorkurve nicht möglich. In diesem Fall sollte das BG vor der Wiederbefeuchtung bis  $w = 25\%$  luftgetrocknet werden, um einen Farbumschlag im Substrat zu vermeiden (es sei denn, der Farbumschlag wird bereits bei  $w > 25\%$  und  $w_{opt} \gg 25\%$  beobachtet).

**Korngrößenanalyse:** Für die Korngrößenanalyse an feinkörnigem, organik- und/oder kalkreichem BG ist vor der Sieb- und Schlämmanalyse mindestens die organische Substanz zu entfernen. Kalk und organische Substanz bilden mit den feinen mineralischen Partikeln stabile Aggregate, weshalb die Tonfraktion ( $d < 0,002\text{ mm}$ ) bei Anwendung der DIN 18123 [16] i.d.R. deutlich unterschätzt wird.

Im Projekt DredgDikes wurde die Korngrößenanalyse nach der bodenkundlichen DIN ISO 11277 [17] durchgeführt, um ein realistischeres Bild der mineralischen Kornfraktionen zu erhalten. Dabei wird eine Sieb-Schlämmanalyse nach Zerstörung von OS und Kalk mit  $\text{H}_2\text{O}_2$  und  $\text{HCl}$  durchgeführt. Die Probenvorbereitung kann dabei mehrere Wochen in Anspruch nehmen (abhängig von Menge und Art der organischen Substanzen und des Kalks), was bei der Planung des Laborversuchsprogramms zu berücksichtigen ist. Dennoch wird diese Methode für BG mit einem OS und / oder Kalkgehalt von jeweils  $> 3\%$  dringend empfohlen.

Im Projekt DredgDikes wurde auch eine mögliche Überschätzung der Tonfraktion durch die Methode nach DIN ISO 11277 diskutiert. Die sehr zeitaufwändige Probenvorbehandlung mit verschiedenen Chemikalien könnte die mineralischen Körner angreifen und ggf. in ihren Eigenschaften verändern. Dies wurde jedoch nicht weiter untersucht und nicht nachgewiesen. In marinem und Brackwasser-BG besteht der Kalkanteil häufig z.T. aus Muschelschalen und ihren Fragmenten. Sie haben keinen Einfluss auf die Aggregatbildung, sind allerdings als Kornfraktion geotechnisch interessant. Deshalb kann es sinnvoll sein, vor der Sieb-Schlämmanalyse nur die org. Substanz zu entfernen (z.B. im Muffelofen verglühen) und die getrockneten Proben vorsichtig zu mörsern, um die beim Trocknen entstandenen Agglomerate aufzubrechen.

**Hydraulische Leitfähigkeit:** Bei Seedeichprojekten wird die hydraulische Leitfähigkeit (Wasserdurchlässigkeit) häufig durch den geotechnischen Experten anhand der Art des Erdstoffs geschätzt oder aus der Kornverteilungskurve berechnet. Diese groben Schätzungen können für eine

Standstabilitätsanalyse mit hohen Sicherheitsfaktoren und (häufig) unter Nutzung der stationären Sickerströmung ausreichend sein. Aufgrund der geringen Erfahrung mit den (ggf. abgeleiteten) hydraulischen Leitfähigkeiten von BG sollte der Parameter immer im Labor bestimmt werden.

Für BG mit  $k_s < 10^{-7}$  m/s, werden häufig triaxiale Durchlässigkeitszellen verwendet, da der nötige Sättigungsdruck sehr hoch sein kann. Dann sind die Sättigungsschritte klein zu halten und es sollte möglichst eine Druckkontrolle analog zu einer Triaxialscherzelle verwendet werden (B-Test), um ein Zusammendrücken der Probe zu vermeiden.

*Organische Substanz (OS):* Der Anteil der OS sollte grundsätzlich mit dem TOC-Wert beschrieben werden (Elementaranalyse). Der Anteil an OS (Humusgehalt) kann mit dem Faktor 1.724 geschätzt werden.

Der Glühverlust (GV) wird häufig zur Bestimmung des Anteils an organischer Substanz verwendet. Bei kalkreichem BG kann der GV den Anteil an organischer Substanz deutlich überschreiten, da Kalk teilweise mit verglüht. Deshalb sollte immer der TOC bestimmt werden.

*Stabilität der organischen Substanz (OS):* Die Stabilität der OS ist nicht nur umweltrelevant (z.B. bzgl. Eutrophierung), sondern beeinflusst auch das geotechnische Verhalten der Materialien, insbesondere die Plastizität. Eine hohe Plastizität weist auf eine für ein Deichbaumaterial wichtige hohe Erosionsstabilität hin, eine Eigenschaft, die nicht über die Zeit verloren gehen sollte, z.B. durch Abbau der OS. Das Brackwasser-BG aus MV besitzt eine hohe OS-Stabilität, was sowohl in Langzeitversuchen [19] als auch im AT<sub>4</sub> Atmungstest [18] nachgewiesen wurde. Wird die Stabilität der OS in Frage gestellt, sollte der AT<sub>4</sub>-Test durchgeführt werden (Abschnitt 4.5.2).

#### 4.5.3.10. Versuche zur Erosionsstabilität

*Zerfallsversuche:* In [24] und [25] werden zur Bestimmung der Erodierbarkeit von Deichdeckschichtmaterialien Zerfallstests empfohlen. Mit diesen Versuchen wurde eine umfangreiche Studie durchgeführt; allerdings konnten keine verlässlichen Ergebnisse generiert werden, insbesondere, weil die Auswertungsmethode bei keiner der BG-Chargen anwendbar war. Dies ist in Annex II ausführlicher diskutiert. Zerfallsversuche nach [24] und [25] können derzeit nicht für die Bewertung von Baggergut empfohlen werden.

*Pin-hole-Tests:* Die Anfälligkeit für innere Erosion kann im Pin-Hole-Test, z.B. nach [26], geprüft werden. Für organikreiches BG ist dieser genormte Test jedoch i.d.R.

nicht geeignet, da das Loch in der Probe, durch welches Wasser strömen soll, so klein ist, dass die vergleichsweise großen Aggregate im BG (Agglomerate aus OS, Kalk und mineralischem Feinkorn) es sofort verstopfen.

## 4.6. Auswahl und Charakterisierung von Aschen

Für die Auswahl einer geeigneten Asche ist zu entscheiden, ob die Asche direkt oder in einem Mischsubstrat verwendet werden soll. Zudem sind Aschen in unterschiedlicher Form verfügbar, z.B. auf Aschedepots oder als zertifizierte Baustoffe (Abschnitt 4.4.2). Ascheprodukte werden heute üblicherweise direkt im Werk (z.B. Kraftwerk) zertifiziert. Der Käufer erhält die für verschiedene Anwendungen nötigen chemischen Analysen direkt im Werk.

Aschen können zudem (z.B. in Polen) nach dem EU REACH-Verfahren zertifiziert und anschließend als Baustoff zugelassen werden. Dafür sind ausschließlich chemische Parameter nachzuweisen.

Während die geochemische Charakterisierung grundsätzlich dem Ascheproduzenten obliegt, ist die geotechnische Eignung Fallspezifisch zu prüfen, insbesondere wenn ein Material aus einem Aschedepot verwendet werden soll.

### 4.6.1. Umweltrelevante Charakterisierung

Die chemische Zusammensetzung von Aschen hängt i.W. von den Brennstoffen ab, die im Kohlekraftwerk verbrannt werden, sowie vom technologischen Prozessschritt, in dem die Aschen entstehen (Kapitel 2). Als zertifizierter Baustoff kann die Asche von einem Händler gekauft werden und die chemischen Analysen werden mitgeliefert. Dann ist keine weitere (Vor-) Untersuchung nötig und die Werte sind nur noch im Rahmen der Qualitätssicherung auf der Baustelle zu prüfen. Wenn Aschen aus einem Aschedepot verwertet werden soll, ist ein ähnlicher Weg zur Zulassung zu gehen wie im Fall von BG. In Deutschland regelt LAGA M20 [13] (Teil IV: TR Aschen) die Verwertung von Aschen.

### 4.6.2. Geotechnische Charakterisierung von Aschen und deren Gemischen

Die geotechnische Charakterisierung von Aschen folgt grundsätzlich den Anforderungen aus [27]. Das Mindestuntersuchungsprogramm sollte die wichtigsten geotechnischen Parameter umfassen (Wassergehalte, Dichten,

Kornverteilung, Wasserdurchlässigkeit, Kompressibilität, Scherfestigkeit und Verdichtungsfähigkeit. Die Tests sollten für die Asche allein, die Bodenmaterialien bzw. Substrate sowie die Gemische durchgeführt werden.

Aschen können im Deichbau als Stützkörper und als Dichtungselement (auf der Böschung / als vertikale Barriere im Deichkörper bzw. am Deichfuß) eingesetzt werden.

Ein Stützkörper unter Verwendung von Asche (z.B. Rostasche) sollte aufgrund der niedrigen Dichte der Asche immer aus einem Mischsubstrat hergestellt werden, um eine Wichte von  $\gamma > 12 \text{ kN/m}^3$  zu gewährleisten. Das Mischverhältnis ist in Laborversuchen unter Nutzung der o.g. Parameter zu bestimmen.

Eine Flächendichtung auf der Böschung kann aus einem Gemisch aus Bodenmaterial und aschebasierten hydraulischen Bindemitteln hergestellt werden. Diese Gemische haben die grundsätzlichen Anforderungen an Dichtungsmaterialien zu erfüllen. Dazu sollten zusätzlich zu den Laborversuchen auch Feldversuche durchgeführt werden.

Für ein vertikales Barriersystem (Abschnitt 4.7.4.3) wird das Gemisch üblicherweise in einem Mischwerk hergestellt. Als hydraulisches Bindemittel können verschiedene Aschen eingesetzt werden. Auch hier sind die Anforderungen an Dichtungen in Deichen und Dammbauwerken (z.B. [28]) einzuhalten und zusätzlich sind die Anforderungen an Schlitzwände zu berücksichtigen [29].

Wichtige Aspekte für Dichtungen sind die Verdichtung, die Scherfestigkeit und die Wasserdurchlässigkeit. Diese Parameter sollten zu Beginn der Planung im Labor, während der Bauphase im Feld und nach Abschluss der Bauphase sowohl im Labor und im Feld untersucht werden.

Bei der Probenvorbereitung für Laborversuche ist das Grobkorn ( $d > 6 \text{ mm}$ ) zu entfernen und es sind homogene Proben der verschiedenen Gemische herzustellen. Ist der Ungleichförmigkeitsgrad sowohl der Asche als auch des gemischten Sands klein ( $U < 3$ ), wird empfohlen, Flugasche beizumischen, um die Verdichtbarkeit zu erhöhen.

Die Festigkeitsparameter des Gemischs sollten in einer Reihe von Triaxial- oder direkten Scherversuchen ermittelt werden. Für die Standsicherheitsberechnung sollte die dränierte Scherfestigkeit als Restfestigkeit verwendet werden. Eine mit der Zeit auftretende Zementierung kann die Scherfestigkeit deutlich erhöhen und die Wasserdurchlässigkeit vermindern. Deshalb wird auch die Untersuchung der Alterungseffekte empfohlen [30].

## 4.7. Deichentwurf

Dieser Abschnitt gibt Empfehlungen zum Entwurf von Deichen unter Verwendung von BG, Aschen und Geokunststoffen. Es werden sowohl Seedeiche als auch Flussdeiche berücksichtigt. Eine umfangreiche Zusammenstellung der verschiedensten Aspekte beim Deichbau findet sich im *International Levee Handbook* [31].

Die wichtigsten Schritte beim Deichentwurf sind die Definition des Bemessungswasserstands, die Wahl des Querschnitts(typs) inklusive der Materialien, die Wahl der Dränung, zusätzliche Elemente (z.B. Zufahrtsstraßen, Deichverteidigung) sowie die Standsicherheitsanalyse unter Berücksichtigung des Untergrunds.

Allgemeine Informationen über Deiche (z.B. Begriffe, Informationen zum Baugrund, typische Deichquerschnitte und Versagensmechanismen) finden sich in Kapitel 2. Für weiterführende Informationen zu Fragen des Entwurfs wird auf die Literatur verwiesen. Die Empfehlungen dieses Handbuchs beschränken sich i.W. auf die speziellen Fragen der Verwertung von BG und Aschen sowie auf den Einsatz ausgewählter Geokunststoffe.

### 4.7.1. Allgemeine Bemessungsaspekte

#### 4.7.1.1. Bemessungshochwasser

Der erste Schritt beim Deichentwurf ist die Bestimmung des Hochwasserszenarios, vor dem der Deich das Hinterland schützen soll. Dies beinhaltet die Wahl des Bemessungshochwassers für die Dimensionierung des Deiches. Die Entscheidung schließt ökonomische, technische, umweltrelevante und ggf. stadtplanerische Aspekte ein. Tabelle 4.12 zeigt die anzuwendenden Regelwerke.

#### 4.7.1.2. Deichquerschnitte

Der entworfene Deichquerschnitt hat in erster Linie die Belastungen aufzunehmen, denen er ausgesetzt ist, unter Berücksichtigung von Standort, Funktion, Höhe, Materialien und Untergrund. Ein Querschnitt ist gekennzeichnet durch seine Böschungen, die Höhe und Breite der Deichkrone

Tabelle 4.12. Bestimmung des Bemessungshochwassers

Seedeiche	Flussdeiche
<b>Deutschland (MV)</b>	
EAK 2002 (2007) [1] (Regelwerk Küstenschutz MV 2-5 / 20012 [32])	DWA M507 [2] DIN 19712 [3]

und ggf. Bermen und Deichverteidigungsanlagen. Zudem ist die Materialkombination (homogener, Mehrzonendeich, Deich mit Deckschicht) entscheidend.

Um den Strömungsdruck im Deichkörper zu reduzieren und die globale und lokale Standsicherheit des Deiches zu erhöhen, werden i.d.R. Dichtungselemente eingesetzt. Die Dichtfunktion ist bei Flussdeichen und Kanaldämmen üblicherweise wichtiger als bei Seedeichen. Im Entwurf eines Deichquerschnitts ist die höchste zulässige hydraulische Leitfähigkeit anzugeben.

Die Dichtung und die Deckschichtmaterialien müssen einen hohen Widerstand gegen Erosion, Suffosion, Alterung und Verwitterung besitzen. Weitere relevante Anforderungen können sich bezüglich der Widerstände gegen mechanische, chemische und biologische Einflüsse und bezüglich Plastizität und Scherfestigkeit ergeben.

Besonders bei Flussdeich-Neubauten aber ebenso im Seedeichbau werden Dränelemente eingesetzt, um das Sickerwasser schadlos aus dem Deichkörper über den landseitigen Deichfuß abzuleiten. Standardelemente sind Sickerprismen (Auflastfilter) und Dränrohre im Sandkern. Weiterführende Informationen finden sich in [1], [2], [3].

#### 4.7.2. Standsicherheitsanalyse

Im Hochwasserfall wird der Deich mit dem Untergrund als Einheit angesehen. Deshalb ist der Untergrund in der Standsicherheitsanalyse immer mit einzubeziehen. Abb. 4.4 zeigt exemplarisch den Aufbau einer Standsicherheitsanalyse von Deichen [2], die grundsätzlich nach EC7 [27] bzw. DIN 1054 [5] durchgeführt wird.

Da die Standsicherheitsanalyse von Deichen mit den Materialien aus diesem Handbuch sich nicht wesentlich von der von Deichen mit „Standard“-Materialien unterscheidet, gibt dieser Abschnitt nur einen kurzen Überblick. Weitere Informationen sind in den entsprechenden Regelwerken zu finden (z.B. [1], [3], [31], [33]), Informationen zur Deichüberströmung finden sich in [34] und das Thema innere Erosion ist umfangreich in [33] und [35] zusammengestellt. Abb. 4.4 zeigt die wichtigsten Aspekte der Standsicherheitsanalyse, allerdings fehlen spezielle Anforderungen für Seedeiche, wie z.B. die Druckschlagbemessung. Da dies ein viel diskutiertes Thema ist, insbesondere im Zusammenhang mit Rissbildung, wird im Folgenden ausführlicher darauf eingegangen.

### Standsicherheitsanalyse für den Deichbau

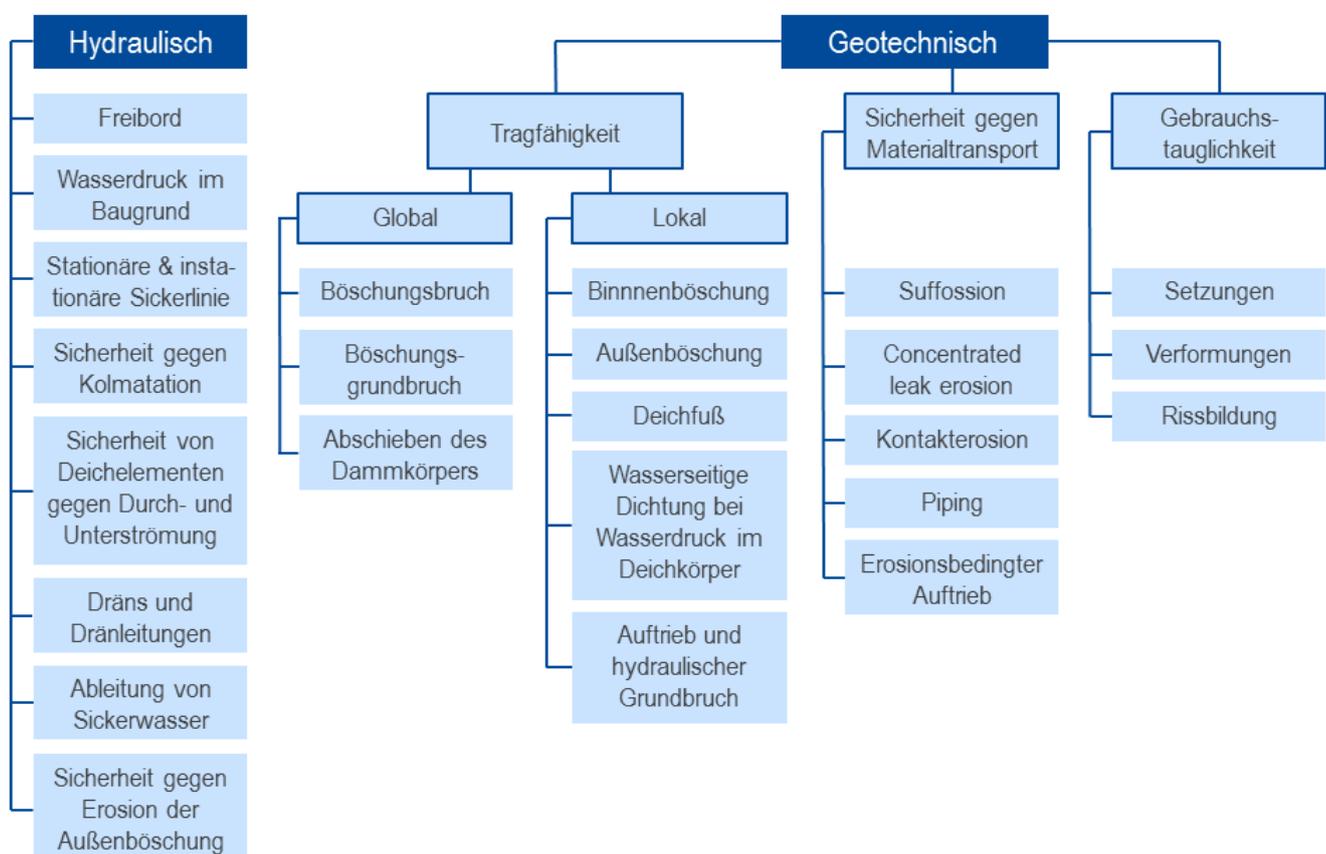


Abb. 4.4. Hydraulische und geotechnische Standsicherheitsnachweise für die (Fluss-)Deichbemessung, verändert nach [2]

#### 4.7.2.1. Risse und Druckschlag

Trockenrisse in Deichdeckschichten aus BG werden häufig als problematisch angesehen, da sie die Sicherheit der Deckschicht bezüglich welleninduziertem Druckschlag beeinflussen können. Auch wenn die Projekt-Ergebnisse lediglich auf zwei Untersuchungsjahren basieren, lassen die außergewöhnlich hohe Stabilität während der turbulenten Überströmungstests, die hohe undrännierte Scherfestigkeit des gesättigten Materials und die Beobachtungen während der Experimente die Annahme zu, dass Risse in einer Deckschicht aus feinkörnigem, organikreichem BG für Ostseedeiche weniger problematisch sind als bisher angenommen. Dies gilt insbesondere i.V.m. der auf BG gut ausgebildeten Grasnarbe. Zudem liegen viele Deiche entlang der Ostseeküste in MV nicht schar, sondern sind in ein System aus Vorland, Dünen und Küstenschutzwald eingebunden, während scharliegende Deiche eher an den Bodden zu finden sind, wo die Wellenbelastung geringer ist. Die Erhaltung einer gut ausgebildeten Grasnarbe über das ganze Jahr ist möglich (Kapitel 5 und 6). Diese Argumente werden zusätzlich durch eine Druckschlagbemessung nach Führböter [20] unterstützt, nach der die untersuchten BG-Chargen die Druckschlagbelastung aufnehmen können.

Theoretisch kann ein Druckschlag dazu führen, dass Wasser in einen Riss eindringt und die schnelle Druckausbreitung im Riss konzentriert wird und so horizontale Spannungen auftreten, die einzelne Rasensoden aus der Oberfläche reißen können [36]. Die gerissene Oberfläche des Rostocker Forschungsdeiches führte zu einer deutlich erhöhten durchschnittlichen Wasserdurchlässigkeit im Vergleich zu den Laborergebnissen. Die durchschnittliche Wasserdurchlässigkeit war jedoch immer noch ausreichend niedrig für einen Seedeich. Vorhandene Risse zeigten keine negativen Auswirkungen bezüglich der Erosionssicherheit gegen überströmendes Wasser. Zudem füllten sich die meisten Risse mit Sediment und wurden durch Gräserwurzeln überspannt und bewehrt. Viele der Risse schlossen sich durch Quellvorgänge und die Vegetation vermindert eine erneute Schrumpfung im Vergleich zu den ersten Monaten in unbegrüntem Zustand.

#### 4.7.2.2. Schätzen der Scherfestigkeit

Die Schätzung der Scherfestigkeit mit der Konsistenzzahl  $I_c$  nach Pohl & Vavrina [37] kann für das untersuchte feinkörnige BG nicht empfohlen werden.

Pohl & Vavrina [37] schlagen die Schätzung der Scherfestigkeit einer Mergeldeckschicht abhängig von ihrer Konsistenzzahl  $I_c$  vor, basierend auf der Annahme eines engen logarithmischen Zusammenhang zwischen undrännierter Scherfestigkeit  $c_u$  und  $I_c$  von Kiekbusch [38]. Dieser konnte für die untersuchten BG-Chargen nicht gefunden werden, da der dichte-abhängige berechnete Sättigungswassergehalt  $w_{sat}$  teilweise unterhalb der Plastizitätsgrenze  $w_P$  liegt und es so zu

außergewöhnlich hohen Schätzwerten kommt. Die im Feld gemessenen gesättigten Scherfestigkeiten waren zwar hoch, jedoch weit entfernt von der so ermittelten Schätzung.

#### 4.7.3. Empfehlungen für den Entwurf von Seedeichen

Die empfohlenen Deichquerschnitte für verschiedene Materialkombinationen werden in einer vereinfachten, generalisierenden Art dargestellt und sie enthalten nur die wichtigsten Elemente, auf die in diesem Handbuch Bezug genommen wird. Sie sind nicht als vollständige ausführbare Deichquerschnitte zu verstehen, da jedes Projekt eines individuellen Entwurfs bedarf, der alle Rahmenbedingungen der Trasse mit einschließt. Die folgenden Empfehlungen enthalten insbesondere keine Deckwerke, Bermen und Deichverteidigungswege, keinen in den Untergrund einbindenden Stützkörper sowie keine Angaben zu Böschungs- und Kronenneigung und Vorland. Sie basieren auf den Erfahrungen des Projektes DredgDikes sowie aus Projekten in Hamburg [39] und Bremen [12].

Feinkörniges und sandig-lehmiges BG kann als Deichdeckschicht oder in homogenen Deichen eingesetzt werden. Eine Deichdeckschicht (Seeseite) aus BG sollte mindestens 1,0 m mächtig sein, ggf. mit einer zusätzlichen Sicherheitsschicht von bis zu 0,5 m für Rissbildung und volumetrisches Schrumpfen, in Anlehnung an die Empfehlungen zum Einbau von Klei in [40], [41]. Landseitig kann die Deckschicht ggf. weniger mächtig ausgebildet werden. BG kann selbst im gesättigten Zustand erhebliche Scherfestigkeiten besitzen, was die Notwendigkeit eines Sicherheitszuschlags reduziert.

In MV kann im Einvernehmen mit den zuständigen Ministerien und Genehmigungsbehörden eine Baugenehmigung erlangt werden, wenn die Richtwerte nach LAGA Z0 / Z1.1 eingehalten werden, unter Berücksichtigung einer Einzelfallentscheidung über zulässige Gehalte an Salz und TOC (s.o.). Es wird empfohlen, das Material (inkl. durchwurzelbarer Schicht auf dem technischen Bauwerk) nach LAGA zu bewerten (Abb. 4.5). Da LAGA M20 bei BG für den Einsatz als Oberboden auf BBodSchV verweist, sind die Angaben aus Tabelle 4.13 mit der entsprechenden Genehmigungsbehörde zu klären. Wird ein zusätzlicher (Ober)Boden aufgebracht (nur empfohlen für LAGA > Z1.1), kann je nach Qualität und Einbautechnologie dieser Schicht die BG-Mächtigkeit reduziert werden.

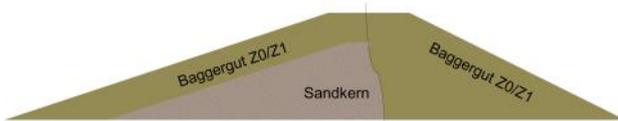


Abb. 4.5. Empfohlener Seedeich-Querschnitt mit BG nach LAGA Z0/Z1

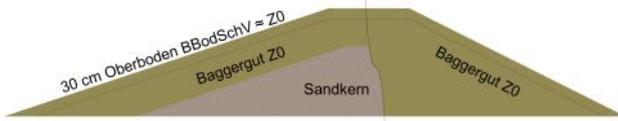


Abb. 4.6. Doppelklassifizierung desselben Materials, nach LAGA und BBodSchV wird nicht empfohlen.

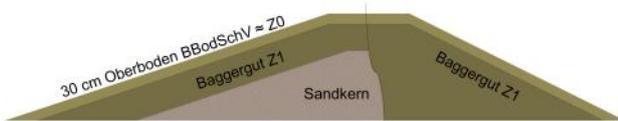


Abb. 4.7. Standard-Deichquerschnitt mit BG, klassifiziert als LAGA Z1 mit strenger Auslegung bezüglich der BBodSchV.

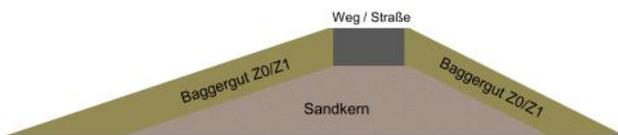


Abb. 4.8. Empfohlener Deichquerschnitt mit BG und Weg/Straße auf der Deichkrone

Tabelle 4.13. Planung der Querschnitte bezüglich Materialklassifizierung

Klassifikation	Empfehlungen
LAGA Z0	<b>Z0-Material in einer Schicht einbauen</b> (Abb. 4.5). Richtwerte für LAGA Z0 sind vergleichbar mit den Vorsorgewerten der BBodSchV für lehmige Böden. Streng gesehen müsste dieses Material zweimal klassifiziert werden (durchwurzelbare Schicht nach BBodSchV, darunter nach LAGA). In Abstimmung mit der Genehmigungsbehörde sollte <b>KEINE Doppelklassifizierung</b> gefordert werden (Abb. 4.6)
LAGA Z1 (Z1.1)	In Abstimmung mit der Genehmigungsbehörde: <b>Z1-Material in einer Schicht einbauen</b> (Abb. 4.5). Dies gilt insbesondere für BG der Klasse Z1.1 mit hohen Sorptionskapazitäten. Alternative: Z1-BG mit 15-30 cm unbelastetem Boden nach BBodSchV bedecken (Abb. 4.7).
LAGA Z2	Fallbeispiel Weserdeich (Abschnitt 2.5). Alternative 1: BG nach LAGA in unbelastetes Material einschließen. Alternative 2: Nachweis der Umweltunbedenklichkeit (z.B. durch Sickerwasserprognose nach BBodSchV) und Materialeinbau wie für Z1-Material mit Bedeckung.
> LAGA Z2	Diese Materialien sind grundsätzlich ungeeignet für die Verwertung (Abb. 4.3.). Wenn allerdings nur einzelne Werte (leicht) erhöht sind, kann ggf. eine Ausnahme mit der Genehmigungsbehörde verhandelt werden, wenn die Umweltunbedenklichkeit insbesondere im Hinblick auf die Sickerwasserqualität nachgewiesen wird.



Abb. 4.9. Beispieldeichquerschnitt einer Deicherhöhung mit BG

Ist ein touristischer Weg auf der Deichkrone geplant, kann es erforderlich sein, das feinkörnige BG auf der Krone gegen ein Material mit höherer Tragfähigkeit zu tauschen und direkt auf dem Stützkörper zu gründen (Abb. 4.8).

Wird feinkörniges BG mit einem (ggf. kleinen) Gehalt an OS als Deckschicht eingesetzt, wird keine zusätzliche Vegetationsschicht benötigt. Weiterführende Informationen finden sich in Kapitel 5. Die Empfehlungen dieses Abschnitts gelten gleichermaßen für Deichrekonstruktionen (z.B. Abb. 4.9).

#### 4.7.4. Empfehlungen für den Entwurf von Flussdeichen

Der Entwurf und die Bemessung von Flussdeichen folgen einem anderen Konzept als dem von Seedeichen (Kapitel 2). Das hängt mit dem häufig limitierten verfügbaren Platz entlang der Flussufer und längeren Hochwasserstandzeiten zusammen. Deshalb sind Dichtungs- und Dränelemente für Flussdeiche i.d.R. noch wichtiger als für Seedeiche. In den empfohlenen Querschnitten wird auf die Darstellung dieser Elemente verzichtet.

##### 4.7.4.1. Flussdeiche aus Baggergut

Baggergut, das die Anforderungen an mineralische Dichtungen (Oberflächen- oder Kerndichtung) erfüllt, sollte genau so bewertet werden wie andere Dichtungsmaterialien (z.B. Lehm oder Ton). Grundsätzlich sollte die Dichtung einen  $k_f$ -Wert von mindestens zwei Größenordnungen unter dem des Stützkörpers aufweisen [2]. In den ZTV-W-210 [21] wird eine spezifische Permittivität von  $q_s = 2.5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$  gefordert.

Das feinkörnige, organikreiche BG aus dem Projekt DredgDikes erfüllt die Anforderungen an ein Dichtungsmaterial für (große) Flussdeiche nicht ohne eine mögliche weitere Aufbereitung und Verbesserung, besonders wegen der vergleichsweise hohen Schrumpfeigung und einer (z.T. schrumpfrissbedingten) zu hohen Wasserdurchlässigkeit. Dennoch sollte BG nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden; vielmehr sollte jedes Material individuell bewertet werden.

Feinkörniges oder sandig-lehmiges BG mit oder ohne organische Substanz kann als Stützkörper von Flussdeichen oder sogar in homogenen Querschnitten verwendet

werden (obwohl große Deiche heute üblicherweise als Mehrzonendeiche ausgebildet werden). Die hohe Stabilität der organischen Substanz im BG unterstützt diese Empfehlung.

DIN 19712 [3] bewertet Böden mit einem Anteil an organischer Substanz von mehr als 4 %grav. als grundsätzlich ungeeignet für diesen Einsatzzweck. Allerdings wird dafür keine direkte Begründung angegeben und da die organische Substanz in gereiftem BG üblicherweise sehr stabil ist (Abschnitt 4.5.2), sollte eine Zulassung für den Einzelfall angestrebt werden, wenn der Einsatz des BG aus den anderen Gründen effizient ist.

Für einen landwirtschaftlichen Deich kann z.B. ein homogener Deich aus einem feinkörnigen oder sandig-lehmigen BG (weitgestuft) gewählt werden. In tief liegenden Gebieten von MV gibt es eine große Anzahl kleinerer (Sommer-)Deiche, die landwirtschaftliche Flächen vor Hochwasser (sowohl aus Fließgewässer selbst oder aus Rückstauwasser im Mündungsbereich) schützen. BG kann hierfür eine Vorzugsvariante darstellen, wenn es kostengünstig beschafft werden kann.

Schließlich kann organikreiches BG aufgrund seiner vorteilhaften Bodenfruchtbarkeit und hohen Wasserhaltekapazität als Vegetationssubstrat auf einer Dichtung (wasserseitig, Krone) oder als Erosionsschutzschicht (landseitig) eingesetzt werden. Die Feldkapazität (bzw. Wasserkapazität) ist häufig  $F_k > 50\%$  mit i.d.R.  $nF_k = 35\text{--}50\%$ , d.h. einer Wasserspeicherkapazität von 20-30 %vol. [19]. Dabei ist besondere Vorsicht am landseitigen Deichfuß geboten, damit die Dränung nicht durch gering durchlässiges Material beeinträchtigt wird.

#### 4.7.4.2. Flussdeiche – Neubau mit Aschen

Für einen Flussdeichneubau (bzw. Rekonstruktion auf der alten Trasse nach Abtrag des Altdeiches), werden die folgenden Empfehlungen bezüglich des Einsatzes von Aschen gegeben:

Der Stützkörper kann aus einem Gemisch aus Rostasche und Sand (BG) hergestellt werden, das i.d.R. eine hohe Scherfestigkeit besitzt. Die Verdichtungsfähigkeit kann kritisch sein, besonders wenn eines der Materialien aus dem Gemisch einen niedrigen Ungleichförmigkeitsgrad aufweist ( $U < 5$ ).

Eine Deckschicht mit geringer hydraulischer Leitfähigkeit kann aus einem Gemisch von mineralischem Bodenmaterial und hydraulischen Bindemitteln aus Asche (z.B. Flugasche) hergestellt werden.

Um potentielle Gefährdungen der Umwelt auszuschließen und potentielle Auswaschungen von Schwermetallen langfristig auszuschließen, wird empfohlen, unter dem Deichbauwerk eine Basisdichtung anzuordnen, die selbst aus einem Aschegemisch bestehen kann. Falls sie aus einem bodenähnlichen Baustoff(gemisch) besteht, ist eine Mindestdicke von 0,50 m anzustreben.

Basierend auf den Ergebnissen aus Danzig kann der Querschnitt in Abb. 4.10. für einen neu gebauten Deich unter Verwendung von Aschen empfohlen werden. Das Beispiel zeigt ein gering durchlässiges Rostasche-Sand-Gemisch mit einer Deckschicht unter Verwendung eines hydraulischen Bindemittels aus Asche. Für die Begrünung wird eine zusätzliche Oberbodenschicht benötigt. Die Böschungsneigung sollte 1:2 nicht überschreiten.

#### 4.7.4.3. Flussdeichsanierung mit Aschen

Zur Deichsanierung kann eine Schlitzwanddichtung mit Flugasche als Bindemittel in einen bestehenden Deich integriert werden. Die vertikale Dichtung, die in den undurchlässigen Baugrund einbindet, kann als Kern- oder Fußdichtung hergestellt werden (Abb. 4.11, Abb. 4.12). Die



Abb. 4.10. Empfohlener Regelquerschnitt für einen neuen Deich unter Verwendung von Aschen

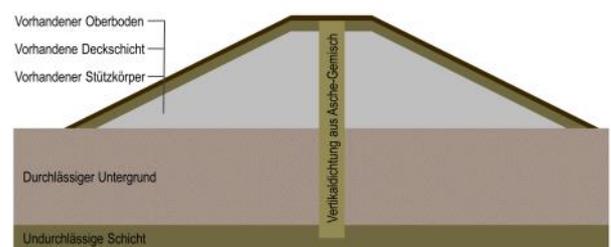


Abb. 4.11. Empfohlener Regelquerschnitt für einen Flussdeich, der mit einer vertikalen (Asche-)Kerndichtung ertüchtigt wird

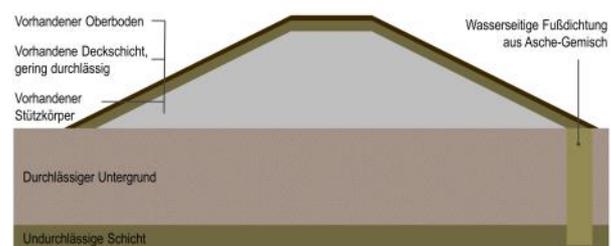


Abb. 4.12. Empfohlener Regelquerschnitt für einen Flussdeich, der mit einer vertikalen (Asche-)Fußdichtung ertüchtigt wird



Abb. 4.13. Empfohlener Regelquerschnitt für eine Deicherhöhung unter Verwendung von Aschen

Dichtung wird dazu i.d.R. an eine Oberflächendichtung angeschlossen. Asche-Gemische können auch zur Deicherhöhung eingesetzt werden, sowohl als Füllmaterial für die Erhöhung als auch als Oberflächendichtung (Abb. 4.13).

#### 4.7.5. Allgemeine Aspekte Geokunststoffen im Deichbau

Verschiedene Überschwemmungen an deutschen Flüssen haben in den vergangenen Jahren zu einem signifikanten Anstieg der Verwendung von Geokunststoffen im Deichbau geführt [42]. Der Stand der Technik zum Bau sicherer Deiche beinhaltet den Einsatz von Geokunststoffen. Die Geokunststoff-Technologien sorgen für Standsicherheit im Hochwasserfall und die Erhöhung der Reaktionszeit für die Gefahrenabwehr. Nach den Elbehochwassern 2002-2007 wurden in Deutschland etwa 160 Hochwasserschutzprojekte durchgeführt, in den ca. 2,4 Mio. m<sup>2</sup> geotextile Filter, 330.000 m<sup>2</sup> Geogitter und 770.000 m<sup>2</sup> geosynthetische Tondichtungsbahnen als Deichdichtung eingesetzt wurden [43]. Geokunststoffe werden auch im Dammbau an Wasserstraßen und in Seedeichen eingesetzt.

Im Projekt wurden mehrere neue Ideen zur Erhöhung der Deichsicherheit bei Verwendung von BG [42] und zur Erhöhung der lokalen und globalen Standsicherheit bei Verwendung üblicher Deichbaustoffe [43], [44] diskutiert und ausgewählte Methoden wurden untersucht.

Einige Geokunststofflösungen wurden bereits zu Standardelementen im Deichbau. Geosynthetische Tondichtungsbahnen werden häufig als Deichdichtung eingesetzt und deren Bemessung ist umfänglich in [28] beschrieben. Kunststoffdichtungsbahnen sollten dagegen aufgrund des ungenügenden Verbundes zwischen Dichtung und Bodenmaterial nicht als Deichdichtung eingesetzt werden (Problem der Umläufigkeit für Sickerwasser). Eine Standardlösung zur Reduzierung von Setzungen und Verformungen ist die Geogitter-Bewehrung der Deichbasis. Die Bemessungsgrundlage ist EBGEO [45]. Vliesstoffe werden im Deichbau als Filter und zum Trennen verwendet. Geotextile Filter werden in Deutschland üblicherweise nach [46] bemessen. Ähnliche Produkte mit einer niedrigeren

Robustheitsklasse können für einfache Trennaufgaben verwendet werden. Die sog. Umschlagmethode (unter Verwendung von Geotextilien oder Geogitter) und geotextile Container können angewandt werden, um den Deichkern permanent zu stabilisieren und geotextile Schläuche können eingesetzt werden, wenn nasses BG im Stützkörper eingebaut werden soll.

#### 4.7.6. Deichentwurf mit Geokunststoffen auf Grundlage der DredgDikes-Erfahrungen

Am Rostocker Forschungsdeich wurden eine Deckschichtbewehrung zur Reduzierung der Rissbildung, ein Erosionsschutzprodukt zum Schutz der Deichoberfläche gegen Regen und Überströmung sowie eine geosynthetische Dränmatte zur definierten Beeinflussung der Sickerlinie im Deichkörper eingebaut. Zudem wurde eine geosynthetische Tondichtungsbahn installiert, die das Deichbauwerk hydraulisch vom Untergrund entkoppelt (untere hydraulische Randbedingung) und am Pilotdeich (Körkwitzer Bach) wurde die Baustraße auf der Deichtrasse auf dem sehr weichen Torfuntergrund mit einem Geotextil bewehrt. Die beiden letzteren Systeme gehören zu den Standardlösungen und wurden im Projekt nicht untersucht.

Das BG, aus dem die Rostocker Forschungsdeiche bestehen, zeigte so gute Eigenschaften, dass grundsätzlich keine mechanische Verstärkung durch Geokunststoffe (Bewehrung bzw. Erosionsschutz) notwendig ist. Die untersuchten Geokunststoffe sind daher eher i.V.m. weniger geeigneten Erdstoffen einzusetzen.

Die Dränung mit geosynthetischen Dränmatten funktioniert sehr gut. Einige wichtige Punkte, die beim Einsatz der Produkte zu berücksichtigen sind, werden im Folgenden ausführlicher diskutiert.

Schließlich können die Umschlagmethode oder eine geosynthetische Dichtungsbahn dazu verwendet werden, leicht kontaminiertes BG (z.B. LAGA Z2 [13]) einzukapseln.

##### 4.7.6.1. Oberflächenerosionsschutz

Es gibt eine Vielzahl geosynthetischer Produkte und Systeme, mit denen eine Böschung gegen wasserinduzierte Oberflächenerosion geschützt werden kann. Die folgenden Erfahrungen und Empfehlungen stehen in engem Zusammenhang mit dem feinkörnigen BG aus dem Projekt.

Zunächst ist eine Entscheidung zu treffen, ob überhaupt ein Erosionsschutzprodukt notwendig ist. Im Fall des

kohäsiven, mittel- bis hochplastischen, organikreichen BG aus Rostock, kann ein Erosionsschutz unnötig sein, da das BG i.d.R. erosionssicher gegen normalen Regen ist und nach Begrünung ausgesprochen erosionsstabil wird.

Ein temporärer (anfänglicher) Erosionsschutz kann gewählt werden, wenn zeitnah nach Fertigstellung des Bauwerks hohe Wasserstände zu erwarten sind, ein Oberboden mit geringerer Erosionsresistenz verwendet wird (z.B. schluffiger Sand) und wenn die Böschungen ungewöhnlich steil ausgebildet werden. In diesen Fällen kann ein temporär wirkendes Erosionsschutzprodukt aus einem nachwachsenden Rohstoff (z.B. Kokosfaser) gewählt werden, abhängig von der nötigen Wirkungsdauer des Erosionsschutzes (unterschiedliche Dauerhaftigkeit der natürlichen Fasern) und der benötigten Festigkeit.

Ein permanent wirkendes Erosionsschutzprodukt aus UV-stabilisiertem synthetischem Material kann gewählt werden, wenn die Erosionsstabilität der begrünten Böschungsoberfläche dauerhaft als gering eingeschätzt wird oder besonders große Einwirkungen erwartet werden. Dies kann insbesondere für sandigen Oberboden gelten, der auf einen Stützkörper oder ein Dichtungselement aufgebracht wird, welches nicht zur Wasser- und Nährstoffversorgung der Vegetation beiträgt (z.B. auf einem Ton mit sehr geringer Wasserdurchlässigkeit, auf festen Aschegemischen oder auf Mergel). Bei dieser Kombination der Bodenmaterialien trocknet die Vegetation im Sommer häufig aus und die Wurzeln können sich ggf. nicht so gut im Oberboden entwickeln. Zudem kann die Verankerung der Wurzeln in den unteren Bodenschichten schwach sein (z.T. sogar unerwünscht). In diesem Fall kann die Reibung zwischen Oberboden und Deckschicht / Dichtung / Stützkörper dauerhaft mit Geomatten erhöht werden.

Exemplarische Zeichnungen der verschiedenen Einbaumethoden und Schutzmechanismen finden sich in Kapitel 5.

#### 4.7.6.2. Dränung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur Herstellung einer Deichdränung. Allgemeine Informationen Dränelementen finden sich in [1], [2], [3], [31]. Informationen zur Bemessung geosynthetischer Dräns finden sich in [33].

Die folgenden Empfehlungen basieren auf der Projekterfahrung, wo die Sickerlinie gezielt mit verschiedenen Dränlösungen beeinflusst wurde. Allerdings sind die Empfehlungen unabhängig vom Erdstoff zu sehen, d.h. nicht auf BG und Aschen beschränkt. Die Bemessung sollte

den Empfehlungen für Dränprodukte im Deponiebau folgen [47], da die Funktionsdauer eines Deiches ähnlich lang ist wie die einer Abfall-Deponie.

Eine Dränmatte kann im Deichkern verlegt werden und an ein Dränrohr angeschlossen werden, die in definierten Abständen (Bemessung aufgrund der Sickerwasserberechnungen) am landseitigen Fuß herausgeführt werden. Der Einsatz einer Dränmatte auf der Ebene der Dränrohre erhöht die Sicherheit des Dränsystems (Abb. 4.14). Die Sickerlinie kann dadurch weiter innen im Kern abgesenkt werden, während die Dränrohre weiterhin am landseitigen Rand des Deichkerns liegen, wo sie für ggf. notwendige Unterhaltungsarbeiten besser zugänglich sind.

Dränmatten können auch so eingebaut werden, dass sie das Sickerwasser frei am Deichfuß ableiten (Abb. 4.15). Dann ist ein böschungparalleler Graben zur Ableitung des Sickerwassers wichtig. Die Dränung sollte mindestens 20-30 cm oberhalb des Deichfußes aus der Böschung geführt werden um einen freien Abfluss zu gewährleisten. Wird das Produkt direkt an den Fuß gelegt, kann es leicht während der Bauausführung oder nach Fertigstellung durch abgelagertes feinkörniges Bodenmaterial bedeckt oder verstopft werden.

Als dritte Empfehlung kann eine Kiesrigole in einem homogenen Deichquerschnitt vorgesehen werden, um eine bessere Verteilung des Sickerwassers im Deichkörper zu gewährleisten, bevor es durch die Dränmatte abfließt (Abb. 4.16). Die Empfehlungen zu Abb. 4.15 gelten entsprechend. Der Vorteil dieses Systems ist, dass sogar im unwahrscheinlichen Fall des abschnittsweisen Versagens des Dränprodukts (z.B. durch Bodeneinlagerung oder Filterkuchenbildung) das Sickerwasser in der Rigole schnell in Deichachsenrichtung verteilt wird und an funktionstüchtigen Abschnitten des Dränprodukts abfließen kann. Das bezieht sich nur auf homogene Deiche aus einem vergleichsweise undurchlässigen Material. In einem Sandkern verteilt sich das Sickerwasser ohnehin gut entlang der Deichachse.

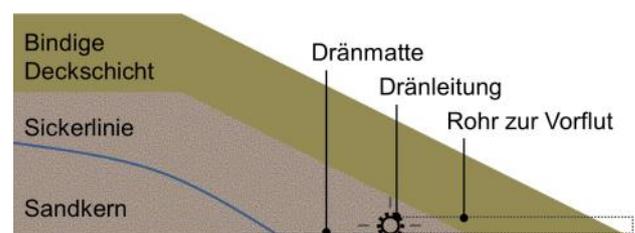


Abb. 4.14. Beispiel für die Verwendung von geosynthetischen Dränmatten mit angeschlossenem Dränrohr zur Beeinflussung der Sickerlinie.

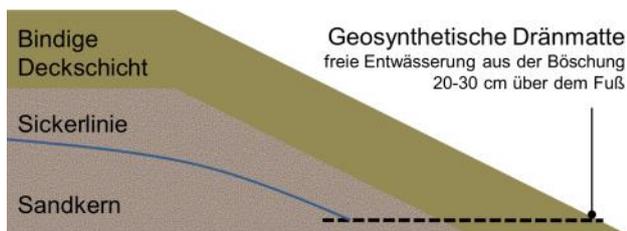


Abb. 4.15. Beispiel für die Verwendung von geosynthetischen Dränmatten, die frei am landseitigen Deichfuß dränen.

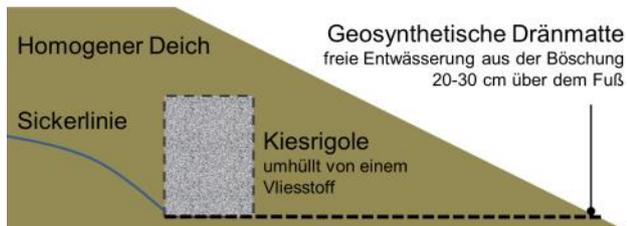


Abb. 4.16. Beispiel für die Verwendung von frei dränenden geosynthetischen Dränmatten mit einer Kiesrigole für zusätzliche Sicherheit.

Alle drei Varianten wurden im Projekt DredgDikes getestet und funktionieren gut. Die ersten beiden Beispiele können ebenso in homogenen Deichen verwendet werden.

#### 4.7.6.3. Trennen und Filtern

Geotextilien können zum Filtern und Trennen verwendet werden. I.d.R. werden dazu Vliesstoffe eingesetzt. Der Stützkörper (z.B. Sandkern) und die Deckschicht oder Dichtung müssen sicher gegen innere Erosion sein, insbesondere an der Grenze zwischen den Materialien. Die Filterstabilität sollte nach [46] ermittelt werden. Gleichzeitig werden die beiden fraglichen Bodenmaterialien dauerhaft getrennt. Dies erhöht die Sicherheit gegen innere Erosion im Zusammenhang mit Rissen in der Deckschicht, da das Sickerwasser dann kein Material aus dem Sandkern ausspülen kann (Abschnitt 4.5.3.8), und die Gesamtstandsicherheit wird erhöht.

## Schrifttum

- [1] EAK 2002. Empfehlung für Küstenschutzwerke, korrigierte Ausgabe 2007, *Die Küste* 65, KFKi (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen), 589 S.
- [2] DWA M507. DWA Regelwerk Merkblatt DWA-M 507-1, Deiche an Fließgewässern Teil 1: Planung, Bau und Betrieb, Dez. 2011.
- [3] DIN 19712. Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern, 2013.
- [4] DIN 4020. Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke, 2010 - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2.
- [5] DIN 1054. Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau.
- [6] DIN ISO/TS 22476. German national annex to ISO 22467. Geotechnische Erkundung und Untersuchung, Parts 1 – 12.

- [7] Sybilski D. & Kraszewski (Ed.) 2004. Ocena i badania wybranych odpadów przemysłowych do wykorzystania w konstrukcjach drogowych, IBDiM Warsaw, 278 S. Online: [www.gddkia.gov.pl](http://www.gddkia.gov.pl).
- [8] DIN 38414-4. Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S); Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4).
- [9] BBodSchV 1999. Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12.07.1999 (BGBl. I S. 1554). Letzte Änderung Art. 5 § 31 vom 24.02.2012 (BGBl. I S. 212), 34 S. Online: [www.gesetze-im-internet.de/](http://www.gesetze-im-internet.de/) [zitiert 16.12.2014].
- [10] Kibbel, E. & Henneberg, M. 2004. Baggergutmanagement der Hansestadt Rostock, Handreichung der Stadt Rostock, 6 S.
- [11] IAA 2014. Kostenaufstellung der Industriellen Absetz- und Aufbereitungsanlage für Nassbaggergut der Hansestadt Rostock. Unveröffentlichter interner Bericht.
- [12] HTG 2006. Verwertung von feinkörnigem Baggergut im Bereich der deutschen Küste, Fachbericht der Hafentechnischen Gesellschaft Fachausschuss Baggergut, 37 S. Online: [www.htg-baggergut.de/](http://www.htg-baggergut.de/) [zitiert 16.12.2014].
- [13] LAGA 2003. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen – Technische Regeln. Version vom 6.11.2003 als Mitteilung M 20. Erich Schmidt, Berlin 2004, 128 S. Online verfügbar: [www.laga-online.de/](http://www.laga-online.de/) [zitiert 16.12.2014].
- [14] GÜBAK 2009. Gemeinsame Übergangsbestimmungen zum Umgang mit Baggergut in den Küstengewässern (GÜBAK-WSV), 40 S. Online: [http://www.htg-baggergut.de/Downloads/uebergangsbestimmungen\\_Baggergut\\_Kuestengewasser.pdf](http://www.htg-baggergut.de/Downloads/uebergangsbestimmungen_Baggergut_Kuestengewasser.pdf).
- [15] ISO 10694. Soil quality - Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis), 1995.
- [16] DIN 18123. Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung, 2011.
- [17] DIN ISO 11277. Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden - Verfahren mittels Siebung und Sedimentation, 2002.
- [18] DepV 2009. Deponieverordnung - Verordnung über Deponien und Langzeitlager. Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900) mit letzten Änderungen durch Art. 7 vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973) 63 S. Online: [www.gesetze-im-internet.de/](http://www.gesetze-im-internet.de/) [zitiert 16.12.2014].
- [19] Henneberg, M. & Neumann, R. 2011. 10 Jahre Lysimeterversuche zum Einsatz von gereiftem Baggergut zur Bodenverbesserung in der Landwirtschaft, report, 37 S. Online: [www.htg-baggergut.de](http://www.htg-baggergut.de).
- [20] Führböter, A. 1966: Der Druckschlag durch Brecher auf Deichböschungen, *Mitteilungen des Franzius-Instituts der Technischen Universität Hannover*, 27.
- [21] ZTV-W 210. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau, für Böschungs- und Sohlensicherungen (Lb 210).
- [22] DIN 18127. Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch, 2012.
- [23] DIN 18122. Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) – Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze, 1997.
- [24] BAW RPW 2006. Richtlinien für die Prüfung von mineralischen Weichdichtungen im Verkehrswasserbau, 21 S.
- [25] Weißmann, R. 2003. Die Widerstandsfähigkeit von Seedeichbinnenböschungen gegenüber ablaufendem Wasser. *Institute of soil*

- mechanics and foundation engineering*, University Duisburg-Essen, issue **30**.
- [26] ASTM D4647-13. Standard Test Methods for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test, 11 S.
- [27] DIN EN 1997. Eurocode 7 – EC7.
- [28] BAW EAO 2002. Empfehlungen zur Anwendung von Oberflächendichtungen an der Sohle und Böschung von Wasserstraßen, *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau* **85**, 30 S.
- [29] DIN EN 1538: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Schlitzwände. 2010-12.
- [30] Balachowski L. & Sikora Z. 2013. Mechanical properties of bottom ash – dredged material mixtures in laboratory tests, *Studia Mechanica et Geotechnica*, **35**(3): 3-11.
- [31] CIRIA C731. The International Levee Handbook. London, 2013. 1350 p. Online: [www.ciria.org](http://www.ciria.org).
- [32] MLUV, 2012. Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern, Bemessungshochwasserstand und Referenzhochwasser (2–5 / 2012), 20 S.
- [33] BAW MSD 2011, BAW Merkblatt- Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD), Bundesanstalt für Wasserbau.
- [34] EurOtop 2007. Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual, *Die Küste* **73**. 193 S.
- [35] Bonelli, S. (Ed.) 2013. Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees. John Wiley, Hoboken. 388 p.
- [36] Pohl, C. 2009. Witterungsbedingte Gefügebildung bei See- und Ästuardeichen und ihr Einfluss auf die Deichsicherheit, Doctoral Dissertation Universität Duisburg/ Essen, 178 S.
- [37] Pohl, C. & Vavrina, L. 2008. New Approaches for Geotechnical Design of Baltic Sea Dikes, *Proceedings of the 11<sup>th</sup> Baltic Sea Geotechnical Conference*, Gdansk, Poland, 1005-1012.
- [38] Kiebusch, M. (1999). Beziehung zwischen Konsistenzzahl und undrännierter Scherfestigkeit, *Die Bautechnik* **76**(9): 775-784.
- [39] Gröngröft, A., Gebert, J. & Eschenback, A. 2014. Water Balance of Dikes Constructed with Dredged Material – Results From a Long-Term Field Test, *Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction*, Rostock: 61-66. Online: [www.dredgdikes.eu](http://www.dredgdikes.eu).
- [40] Weißmann, R. & Richwien, W. 2004. Funktionale und statische Bemessung der Abdeckung von Deichbinnenböschungen. *HANSA*, **141** (6): 69-75.
- [41] Temmler, H. 2009. Sickervorgänge in Deichen und ihre Auswirkungen auf die Sturmflutsicherheit. *Fachausschuss Küstenschutzwerke*, 20 S.
- [42] Saathoff, F. & Cantré, S. 2014. Geosynthetics and Dredged Materials in Dike Construction, *10<sup>th</sup> International Geosynthetics Conference, Berlin*, paper 143, 7 S.
- [43] Heerten G., Achmus, M., Boley, C., Grabe, J., Katzenbach, R., Meyer, N., Oumeraci, H., Richter, T., Saathoff, F., Savidis, S. & Scheffer, H.J. 2009. Bauwerke und Bauwerksertüchtigung im Küsten- und Verkehrswasserbau, *HTG (Ed.) Unsere Gewässer – Forschungsbedarf aus Sicht der Praxis – Eine Dokumentation von HTG und DGGT*, Schifffahrts-Verlag „Hansa“, 65-72.
- [44] Saathoff, F. 2006. Beispiele zur Sanierung und Ertüchtigung von Deichen mit Geokunststoffen, *2. Symposium Sicherung von Dämmen, Deichen und Stauanlagen*, Universität Siegen, 9./10.2.2006.
- [45] DGGT (Ed.) 2010. Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO), 2. vollst. überarb. u. erw. Aufl. 2010, Ernst & Sohn, 327 S.
- [46] DVWK 221/1992. Merkblatt Anwendung von Geotextilien im Wasserbau, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau.
- [47] BAM 2014. Richtlinie für die Zulassung von Kunststoff-Dränelementen für Deponieoberflächenabdichtungen, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, 31 S. Online: [ww.bam.de](http://ww.bam.de).

## 5. BAUAUSFÜHRUNG

Dieses Kapitel enthält Empfehlungen für den Einbau von Baggergut (BG), Aschen und Geokunststoffen, insbes. zur Handhabung und Lagerung der Materialien, zur Qualitätssicherung, zur Einbautechnologie und zur Etablierung einer hochwertigen Vegetationsdecke. Die Empfehlungen zur Materialauswahl und zur umweltrelevanten und geotechnischen Eignung finden sich in Kapitel 4.

### 5.1. Material- und Einbauqualität

#### 5.1.1. Qualitätsanforderungen für den BG-Einbau

Baggergut, das im Deichbau verwertet wird, hat bestimmte Qualitätsanforderungen zu erfüllen, die durch eine Reihe von umweltrelevanten und geotechnischen Parametern bestimmt werden. Werden diese Anforderungen im Rahmen der Voruntersuchung nicht erfüllt, so können Behandlungs- und Verbesserungsmaßnahmen ergriffen werden. Die folgenden Empfehlungen beziehen sich auf gereiftes, feinkörniges und sandig-lehmiges BG, das organik- oder kalkreich sein kann. Nassgebaggerter Sand oder Kies wird u.a. in EAK 2002 [1] umfänglich besprochen.

Die umweltrelevanten Qualitätsanforderungen, die in Kapitel 4 für die Materialauswahl definiert sind, gelten analog für die Qualitätssicherung auf der Baustelle. Zusätzlich zur Ermittlung der geotechnischen Eignung sind beim Einbau zusätzliche Anforderungen zu stellen, für die im Folgenden Empfehlungen gegeben werden.

##### 5.1.1.1. Geotechnische Qualitätsanforderungen für BG als Deckschichtmaterial im Seedeichbau

Die folgenden Anforderungen werden auf Grundlage der DredgDikes-Forschung für feinkörniges und / oder organikreiches Baggergut empfohlen, das als Deichdeckschichtmaterial eingesetzt wird.

Als Parameter zur Prüfung der Einbauqualität wird die undrained Scherfestigkeit empfohlen, bestimmt mit der Feldflügelsonde  $c_u > 50$  kPa (mittlere Festigkeit nach [2]). Dieser Wert kann in einer großen Zahl an Wiederholungen im Feld bestimmt werden, i.d.R. mit geringerem Aufwand als die Verdichtungsprüfung (außer bei Verwendung einer automatischen flächenhaften Verdichtungskontrolle).

Der Wassergehalt steht in engem Zusammenhang zu Scherfestigkeit und Verdichtbarkeit. Die allgemeinen

Tabelle 5.1. Anforderungen für die Einbauqualität von Baggergut als Deckschichtmaterial auf Seedeichen

Parameter	Einheit	Wert
Undrained Scherfestigkeit (Feldflügel-Scherversuch)	kPa	$\geq 50$
Wassergehalt	%	1)

1) Der Wassergehalt sollte nahe  $w_{opt}$  auf dem nassen Ast der Proctorkurve liegen. Er sollte maximal so hoch sein, dass eine Scherfestigkeit von  $c_u = 50$  kPa erreicht werden kann bzw. ein Verdichtungsgrad von mindestens 83 %. Zudem sollte der Wassergehalt die Plastizitäts- bzw. Ausrollgrenze nicht wesentlich überschreiten ( $I_c \geq 0,7$ ).

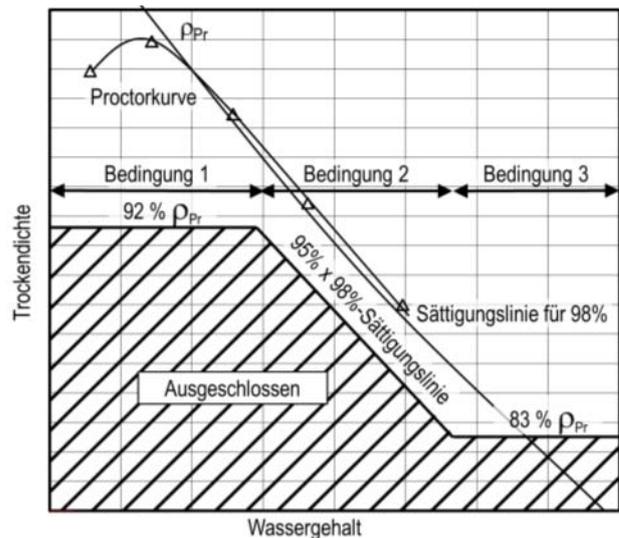


Abb. 5.1. Verdichtungsempfehlungen angelehnt an [3]

Anforderungen aus Kapitel 4 sind entsprechend auch für den Einbau anzuwenden. Für Deckschichten auf Seedeichen sollte der Einbauwassergehalt die Plastizitäts- bzw. Ausrollgrenze nicht wesentlich überschreiten; es wird  $I_c \geq 0,7$  empfohlen. Für feinkörniges BG mit organischen Anteilen kann ein Einbauwassergehalt unterhalb der Plastizitätsgrenze nicht grundsätzlich empfohlen werden, obwohl dies die Gefahr der Schrumpfrissbildung wesentlich einschränken würde, da die Trocknung einer erheblichen Energiezufuhr bedarf (Kostenfaktor), und die Materialien bei niedrigen Wassergehalten zu starker Staubeentwicklung beim Einbau neigen können.

Im Erdbau wird der Verdichtungsgrad  $D_{pr}$  als Verhältnis der vorhandenen Trockendichte zur Proctordichte häufig als maßgeblicher Parameter zur Prüfung der Einbauqualität verwendet. Je näher der Einbauwassergehalt am optimalen Wassergehalt liegt, desto besser ist die mögliche Verdichtung, und die Gefahr von Schrumpfrissen wird reduziert. Dennoch wird dieser Parameter nur zu Vergleichszwecken und zur Unterstützung der Bewertung des  $c_u$ -Werts speziell im Einbaustandort (Abschnitt 5.4.1.1) empfohlen. In diesem

Fall werden angelehnt an [1] und [3] sowie auf Grundlage der Erfahrungen aus dem Projekt drei Bedingungen für eine ausreichende Verdichtung empfohlen (Abb. 5.1):

- Bedingung 1 (Wassergehalt nahe  $w_{opt}$ ):  $D_{pr} > 92\%$  ( $\rho_{pr}$ ),
- Bedingung 2 (höherer Wassergehalt): Die Trockendichte der 98 %-Sättigungslinie wird alternativ zur Proctordichte verwendet. Der so ermittelte  $D_{pr,98}$  muss mindestens 95 % betragen,
- Bedingung 3 (immer):  $D_{pr} > 83\%$ .

Wenn der Auftraggeber eine Verdichtungskontrolle vorschreibt, sollte bei homogenem / homogenisiertem BG dieselbe Methode genutzt werden. Es kann schwierig sein, im Labor mit einem realisierbaren Probenumfang eine repräsentative Proctordichte zu bestimmen, da ggf. sehr viele Einzelversuche nötig sind, um einen verlässlichen Wertebereich mit entsprechenden statistischen Parametern (Mittelwert, Median, Quartile) zu ermitteln. Zudem haben bei feinkörnigem, organikreichem BG ( $\rho_{pr}$  ca.  $1 \text{ g/cm}^3$ ) bereits kleine Abweichungen der bestimmten Trockendichte einen erheblichen Einfluss auf den berechneten Verdichtungsgrad (Annex II).

Bei größeren Inhomogenitäten streut die Proctordichte i.d.R. stark, was die Wahl eines Referenzwertes zusätzlich erschwert. Diese große Variation spiegelt sich dann auch im Verdichtungsgrad wieder, weshalb auch hier der  $c_u$ -Wert i.V.m. einem von den Konsistenzgrenzen abhängigen Wassergehalt empfohlen (s.o.).

#### 5.1.1.2. Geotechnische Qualitätsanforderungen für Stützkörper und homogene Deiche aus BG

Für reinen (nassgebagerten) Sand im Kern eines Seedeiches gelten die Anforderungen in EAK [1]. Kapitel 4 enthält darüber hinaus Empfehlungen für die grundsätzlichen Anforderungen für die Eignungsbewertung von sandigem und sandig-lehmigem BG für Stützkörper oder homogene Deiche. Für diese Anwendungen gelten höhere Anforderungen an die Einbau- und Verdichtungsqualität als die Deckschicht von Seedeichen.

Stützkörper von Seedeichen werden üblicherweise aus sandigem Material errichtet. Wenn die in der Bemessung festgelegten Anforderungen an die Wasserdurchlässigkeit es erlauben, können geringe Feinkornanteile für die Verdichtung, Festigkeit und Standsicherheit von Vorteil sein. Für Seedeiche sollte der Verdichtungsgrad grundsätzlich über 93 % der einfachen Proctordichte

betragen [1] und für Flussdeiche ggf. über 97-100 % [4], wie für Stützkörper aus Sand üblich. Dies erfordert einen Wassergehalt nahe dem Optimum. Im Fall inhomogener Materialien, die vor dem Einbau nicht homogenisiert werden (nicht empfohlen), sollte vor dem Einbau im Deich im Rahmen eines Feldversuchs (Einbautest) eine erforderliche Scherfestigkeit für die spätere Qualitätsprüfung ermittelt werden, die eine gute Verdichtung widerspiegelt.

Baggergut, das in einen homogenen Deich eingebaut wird (im Seedeichbau ist das zwar nicht üblich, könnte jedoch bei entsprechend großem Überschuss an geeignetem BG sinnvoll sein) sollte die Methode aus Abb. 5.1 verwendet werden, mit den folgenden Modifikationen:

- Modifikation für Bedingung 1 :  $D_{pr} \geq 93\%$ ,
- Modifikation für Bedingung 2:  $D_{pr,98} \geq 97\%$ ,
- Modifikation für Bedingung 3:  $D_{pr} \geq 86\%$ .

#### 5.1.1.3. Geotechnische Qualitätsanforderungen für BG als Ersatz von üblichen Deichdichtungsmaterialien

Die Qualitätsanforderungen für mineralische Dichtungen in Flussdeichen finden sich in DIN 19712 [5], DWA M 507 [6], EAO [7], ZTV-W 205 [4] und ZTV-W 210 [8]. Für BG, das als mineralische Dichtung (Oberflächen- oder Kerndichtung) eingesetzt werden soll, gelten die Anforderungen an Standard-Dichtungsmaterial analog, zusammen mit den Anforderungen aus Abschnitt 4.5.3.7. Wird ein BG mit dem geforderten geringen Schrumpfmaß nahe dem optimalen Wassergehalt und mit hoher Verdichtung eingebaut, kann aufgrund der hohen Stabilität der organischen Substanz (Abschnitt 4.7.4.1) im Einzelfall auch ein OS-Gehalt oberhalb des in den o.g. Dokumenten empfohlenen Wertes zugelassen werden.

#### 5.1.2. Qualitätsanforderungen für Aschen

Rostasche wird für die Herstellung von Stützkörpern nur gemischt mit mineralischen Bodenmaterialien oder BG empfohlen. Ein geringer Anteil an Feinkorn, z.B. Flugasche oder Schluff, kann für die Verdichtung, Festigkeit und Standsicherheit vorteilhaft sein.

Die Mindestanforderung an den Verdichtungsgrad ist  $D_{pr} > 93\%$ , wenn keine schweren Verkehrslasten zu erwarten sind. Die Verdichtbarkeit der üblicherweise kohäsionslosen Gemische ist im Proctorversuch mit der beim Einbau zu erwartenden Verdichtungsenergie zu ermitteln. Die Wichte des Gemisches sollte mindestens

$\gamma = 12 \text{ kN/m}^3$  betragen, um Auftrieb und Verflüssigung vorzubeugen.

Der Anteil an Asche im Gemisch sollte 70 % nicht überschreiten. Aufgrund der Ergebnisse im Projekt DredgDikes kann ein Rostasche-Anteil von 30-70 % empfohlen werden.

Dichtungen mit geringer hydraulischer Leitfähigkeit können mit hydraulischen Bindemitteln unter Verwendung von Flugasche (FA) oder Wirbelbettsasche hergestellt werden. Im Mischer sollte ein homogenes pumpfähiges Gemisch hergestellt werden. Dazu sind die Dichte und Viskosität des Gemisches während der ersten 24 h regelmäßig zu überprüfen. Die Qualitätssicherung für Dichtwände ist in DIN EN 1538 geregelt [9].

Die wichtigsten Parameter des FA-Gemischs sind die Druckfestigkeit und die Wasserdurchlässigkeit. Die Druckfestigkeit des ausgehärteten Materials nach 28 Tagen sollte mindestens 0,5 MPa im Labor (0,3 MPa in situ) und die Wasserdurchlässigkeit höchstens  $k_s < 10^{-8} \text{ m/s}$  im Labor ( $k_s < 10^{-7} \text{ m/s}$  in situ) betragen.

Für Gemische hydraulischer Bindemitteln aus Asche und organikreichem BG oder anderen Aschen sollten vorab Eignungstests in einem geotechnischen Labor durchgeführt werden.

## 5.2. Aufbereitung

Wenn das BG oder die Asche (inkl. Gemische) die chemischen und geotechnischen Anforderungen für die Verwertung im Deichbau nicht erfüllen (vgl. Kapitel 4) kann die Eignung ggf. durch Aufbereitung herbeigeführt werden, z.B. durch Senken des Wassergehalts, Homogenisierung, Änderung der Verdichtungseigenschaften, Beeinflussung der Kornverteilungskurve, Erhöhung der Festigkeit durch Zuschlagstoffe oder die Festlegung von Schadstoffen im Sediment. Organikreiches feinkörniges BG könnte auch mit Aschen gemischt werden um einige dieser Ziele zu erreichen, dies war jedoch nicht Inhalt des Projektes DredgDikes und bedarf zukünftiger wissenschaftlicher Untersuchung.

### 5.2.1. Baggergutaufbereitung

Die Behandlung und Aufbereitung von Baggergut umfasst die Verbesserung der geotechnischen Eigenschaften und die Entfernung oder Festlegung von Schadstoffen.

Der wichtigste Aspekt der geotechnischen Eignung ist der Wassergehalt der Materialien. Ist er zu hoch, können die



Abb. 5.2. Mietenaufsetzer in Aktion [10]



Abb. 5.3. Homogenisierung von Baggergut mit Separatorschaufel

geforderten Scherfestigkeiten und Verdichtungsgrade nicht erreicht werden. Deshalb sollte die Entwässerung der erste Schritt der Aufbereitung sein. Häufig besitzt sogar gereiftes (und daher grundsätzlich entwässertes) BG einen hohen Wassergehalt deutlich oberhalb der Plastizitätsgrenze. Bei geringer Überschreitung der empfohlenen Werte können Einbautests (Abschnitt 5.4.1.1) unter Berücksichtigung der knetenden Wirkung des Verdichtungsgeräts zeigen, ob das BG die Einbaukriterien erfüllt. Nur wenn die Kriterien auch dann nicht eingehalten werden, wird eine weitere Entwässerung empfohlen. Um die Erstentwässerung zu beschleunigen, besonders in Projekten, in denen geotextile Schläuche eingesetzt werden [11], können Flockungshilfsmittel genutzt werden. Hier sollte jedoch die ökonomische Effizienz genau geprüft werden.

Die Homogenität des BG nach der Trocknung hängt von der Qualität des BG selbst und von der Aufbereitungstechnologie ab. Üblicherweise wird so wenig Aufwand wie möglich für die Homogenisierung betrieben, da die Homogenität für viele Verwertungswege (z.B. Landschaftsbau oder Deponierekultivierung) eine geringere Rolle spielt. Im Deichbau ist die Zuverlässigkeit bzgl. der Qualität des (Deckschicht-)Materials besonders wichtig und daher ist Homogenität hier entscheidend.

Homogenisierung kann auf Trocknungsfeldern auf einer Aufbereitungsanlage z.B. mit Mietenaufsetzern (Abb. 5.2) realisiert werden, indem die Mieten mehrfach umgesetzt werden. Dies beschleunigt auch die Entwässerung. Eine Alternative sind Schaufelseparatoren als Anbaugeräte an Hydraulikbaggern (Abb. 5.3) oder große Mischanlagen.

Eine vielversprechende Möglichkeit zur Verbesserung der geotechnischen Eigenschaften und zur Fixierung von Schadstoffen im BG ist die Konditionierung mit Zuschlagstoffen, inkl. hydraulischen Bindemitteln [12], [13]. Auch die Beimischung von Fasern kann die Festigkeit und Tragfähigkeit der Materialien erhöhen. Natürliche Fasern, wie Kokosfasern, können für temporäre Effekte genutzt werden, während dauerhafte Lösungen ggf. synthetische Fasern erfordern; der Einsatz synthetischer Fasern wird jedoch aufgrund der Umweltbeeinträchtigung bezüglich des Bodenschutzes (Fasern verbleiben dauerhaft im Boden) nicht empfohlen. Eine weitere Möglichkeit ist das Zumischen bestimmter mineralischer Kornfraktionen, um die Kornzusammensetzung zu verbessern.

Wenn das BG auf Mieten gelagert wird, begrünen diese i.d.R. aufgrund der enthaltenen bodeneigenen Samen schnell. Die z.T. erhebliche Blattmasse und -noch entscheidender- die oft langen und dicken Wurzeln (z.B. Schilf) sind wegen ihres negativen Einflusses auf die Verdichtbarkeit vor dem Einbau in einen Deich zu entfernen. Zudem baut sich die Blattmasse schnell ab und würde dadurch zu einer Abnahme der Verdichtung über die Zeit beitragen. Wurzeln zersetzen sich zwar nicht so schnell, können jedoch als präferenzielle Fließwege wirken und so die Wasserdurchlässigkeit wesentlich erhöhen.

### 5.2.2. Ascheaufbereitung

Grundsätzlich sollten Aschen im Deichbau nur in Gemischen verwendet werden, z.B. zusammen mit Sand, Boden oder BG oder als hydraulisches Bindemittel für verschiedene Anwendungen. Deshalb schließt die Aufbereitung der Aschen das Mischen und die Homogenisierung mit ein, im Werk (in Plant) oder in situ (in Place).

Wenn Aschen nicht von sich aus die erforderlichen Eigenschaften für eine Zertifizierung als Baustoff haben (nach Abfallrecht oder REACH, s. Kapitel 4) können sie aufbereitet werden, um die Schadstoffgehalte zu reduzieren oder die Schadstoffe im Material permanent zu binden.

## 5.3. Handhabung und Lagerung

### 5.3.1. Handhabung und Lagerung von BG

Die Handhabung und Lagerung von feinkörnigem organikreichem BG ist grundsätzlich vergleichbar mit denen anderer Baumaterialien. Um die Verwertung des BG zu ermöglichen, wird es üblicherweise auf Mieten gelagert, um die Lagerfläche zu minimieren und das BG vor Witterungseinflüssen (Erosion, Nässe) und Beeinträchtigungen durch die Bautätigkeit zu schützen. Empfehlungen für die Anlage eines BG-Depots sind in Tabelle 5.2 zusammengestellt.

### 5.3.2. Handhabung und Lagerung von Aschen

Die Empfehlungen aus Abschnitt 5.3.1 gelten analog. Zusätzlich ist das Staubproblem zu berücksichtigen. Hydraulische Bindemittel aus Asche sind besonders gegen Witterungseinflüsse zu schützen. Die Verwendung wird nur bei Temperaturen über 5°C empfohlen [14].

### 5.3.3. Handhabung und Lagerung Geokunststoffe

Beschädigungen der Materialien können die Funktion einschränken und müssen deshalb vermieden werden. Dies betrifft Beschädigungen durch Maschinen beim Transport, beim Be- und Entladen oder beim Einbau sowie durch UV-Strahlung. Für die Handhabung und die Lagerung von Geokunststoffen auf Erdbaustellen sind die M Geok E-StB inklusive der Checklisten [17], [18], [19] anzuwenden. Empfehlungen für geosynthetische Tondichtungsbahnen finden sich in den EAG-GTD [20] und für Dränmatten gilt die entsprechende BAM-Richtlinie [21].

Tabelle 5.2. Empfehlungen für Baggergutdepots

Empfehlungen für die Anlage eines Baggergutdepots
Unterschiedliches BG muss separat gelagert werden [15], [16].
BG darf nicht mit dem Untergrund vermischt werden.
Keine Vermischung mit anderen Materialien auf dem BG-Depot.
Schutz des Depots vor schädlichen Flüssigkeiten (Öle, Schmiermittel, Treibstoffe).
Schutz des temporär gelagerten BG vor Verdichtung und Nässe.
Anlage des Depots auf trockenem Untergrund (nicht in Senken), keine Beeinträchtigung der lokalen Oberflächenentwässerung.
4 % Oberflächenneigung zur Ableitung von Niederschlagswasser.
Größe und Höhe der Mieten hängen von mehreren Faktoren ab, z.B. Größe der verfügbaren Fläche, Zusammensetzung des BG, vorherrschende Wetterbedingungen zum Zeitpunkt des Aushubs.
Keine Verkehrslast auf den Depots / Mieten (z.B. Radlader).

## 5.4. Qualitätssicherung

Eine Qualitätssicherung auf der Baustelle ist für alle betrachteten Materialien erforderlich. Die Empfehlungen für BG beschränken sich auf feinkörniges und sandig-lehmiges BG für Deichdeckschichten oder homogene Deiche. Für BG in Stützkörpern gelten die Empfehlungen in [1]. Die Qualitätssicherung von Aschen kann analog zu [22] realisiert werden. Für Geokunststoffe wird i.W. auf die existierende Literatur verwiesen. Tabelle 5.6 (S. 58) gibt einen Überblick über die empfohlenen Qualitätssicherungsmaßnahmen.

Grundsätzlich basiert das Qualitätssicherungssystem für alle Materialien auf mehreren Prüfebene(n) (Eignungstest im Rahmen der Produktentwicklung bzw. vor dem Einbau; Baustelleneingangskontrolle; interne und externe Qualitätskontrolle (im Werk und/oder auf der Baustelle) und Kontrollinspektionen des Auftraggebers auf der Baustelle).

### 5.4.1. Qualitätssicherung für den Einbau von BG

Dieser Abschnitt basiert auf den Empfehlungen der LAGA M20 TR Boden [23] und der Empfehlung "Qualitätssicherung für den Kleinbau [...]" [3], angepasst an die Verwertung von BG. Für ein funktionierendes Qualitätssicherungssystem sind die geotechnischen Eigenschaften in der internen Qualitätskontrolle des BG-Herstellers/-Lieferanten, der internen Qualitätskontrolle des AN und der externen Qualitätskontrolle des AG zu prüfen. Eine zusätzliche Ebene bei der Verwertung von BG im Deichbau ist das dem Projekt vorgeschaltete Einbautesfeld, vergleichbar mit einem Eignungstest.

#### 5.4.1.1. Einbautesfeld – Eignungstest

Vor dem Einbau des BG im Deich wird empfohlen, ein Einbautesfeld mit der vorgeschlagenen Einbau- und Verdichtungstechnologie herzustellen und so deren Eignung nachzuweisen. Der Einbautest kann auch Teil der tatsächlichen Baumaßnahme (z.B. Deckschicht) sein. Die Randbedingungen haben denen des geplanten Bauwerks zu entsprechen. Es sollte mindestens das BG mit dem höchsten Wassergehalt getestet werden. Bei erheblichen Unterschieden (z.B. unterschiedliche Entwässerungszeiten) wird empfohlen, BG mit drei verschiedenen Wassergehalten (höchster, niedrigster, mittlerer) einzubauen, um die Ergebnisse mit den erforderlichen Festigkeits- und Verdichtungswerten zu vergleichen.

Tabelle 5.3. Empfehlungen für Untersuchungen und Probenahme auf dem Einbautesfeld und zugehörige Feld- und Laborversuche

Empfehlungen für Untersuchungen und Probenahme auf dem Einbautesfeld und zugehörige Feld- und Laborversuche
Ungestörte Proben (Stechzylinderproben) zur Bestimmung von Dichte und Wassergehalt (DIN 18125-2 und DIN 18121)
Feldflügelscherversuch (ISO 22476-9)
Laborflügelscherversuch an ungestörten Proben
Korngrößenverteilung (mit und ohne Zerstörung von OS und Kalk z.B. nach DIN 18123 und ISO 11277) (vgl. Kapitel 4)
TOC und Kalkgehalt
Konsistenzgrenzen (DIN 18122-1 & 18122-2 o. ISO-TS 17892-12)
Proctor-Versuch (DIN 18127)
Trockendichte des eingebauten Materials (Verdichtungsgrad)
Einaxiale Druckfestigkeit (DIN 18136)

Der empfohlene Probenahme- und Prüfungsumfang auf dem Testfeld ist in Tabelle 5.3 zusammengestellt. Die Anzahl und Lage der Prüfpunkte ist an die verwendete Einbautechnologie anzupassen. Die Ergebnisse sind in einem zusammenfassenden Bericht zu dokumentieren. Insbesondere die Feldflügel-Scherfestigkeit (später zur Qualitätskontrolle verwendet) und der Verdichtungsgrad müssen bestimmt, analysiert und verglichen werden. Wenn die Anforderungen dieses Handbuchs mit dem gewählten BG und der gewählten Technologie nicht erreicht werden, besteht die Möglichkeit, das BG entweder weiter aufzubereiten oder die Technologie zu ändern, bevor eine endgültige Entscheidung gefällt wird. Für jede gewählte Kombination ist ein eigenes Testfeld anzulegen.

#### 5.4.1.2. Baustelleneingangskontrolle, interne/ externe Qualitätssicherung, Kontrollinspektionen

Für die Qualitätssicherung von Erdstoffen, die dem Abfallrecht unterliegen, werden die Anforderungen der ZTVE-StB 09 [24], ergänzt um die chemischen Anforderungen nach LAGA M20 [23] empfohlen. Die Voraussetzung für eine funktionierende Qualitätssicherung ist die Klassifizierung des BG nach den entsprechenden Vorschriften (Kapitel 4). Der Transportweg der Materialien von der Nassbaggerung bis zum Einbau sollte vollständig dokumentiert und im Materialzertifikat enthalten sein.

Bei der Anlieferung ist für jede Charge BG mit vergleichbaren Eigenschaften ein Lieferschein beizubringen. Eine Charge umfasst max. 2.000 m<sup>3</sup>, d.h. es ist mindestens alle 2.000 m<sup>3</sup> ein Lieferschein vom Lieferanten vorzulegen. Der

Lieferschein sollte alle Informationen enthalten, die eine gleichbleibende Qualität gewährleisten, mindestens jedoch:

- Art des Baggerguts und Abfallcode
- Gelieferte Menge
- Klassifikation
- Geotechnische Eigenschaften
- Offizielle Materialzertifikate (wenn zutreffend)
- Herkunft des Materials
- Datum der Lieferung

Die erste Prüfung der Materialqualität auf der Baustelle wird bei der Anlieferung fällig (Baustelleneingangsprüfung). Grundsätzlich sollte das BG auf Großmieten auf einer separaten Lagerfläche gelagert werden, bevor es in den Deich eingebaut wird. Diese Mieten sind i.d.R. im Auftrag der Bauüberwachung zu prüfen (geotechnisch und geochemisch), um die Qualität des angelieferten Materials sicherzustellen. Der empfohlene Mindestumfang ist in Tabelle 5.4 zusammengestellt.

Nur wenn das angelieferte BG von einem zertifizierten Lieferanten stammt, das Material selbst zertifiziert ist und die Zertifikate bei Anlieferung vorgelegt werden, kann die Bauüberwachung auf eine zusätzliche Analyse im Rahmen der Baustelleneingangsprüfung verzichten.

Auch bei der internen und externen Qualitätssicherung auf der Baustelle ist bezüglich dieser beiden Rahmenbedingungen zu unterscheiden. Im Fall eines zertifizierten gereiften BG aus einer Aufbereitungsanlage, wie z.B. der IAA Rostock (Zertifizierung nach den Kriterien der BBodSchV [25], Anhang 2), kann die regelmäßige Qualitätsprüfung auf der Baustelle auf die in Tabelle 5.4 angegebenen Parameter beschränkt werden.

Falls das BG nicht zertifiziert ist (z.B. direkt für die Bauaufgabe gebaggert oder auf einem Spülfeld unbehandelt gelagert), basiert die Charakterisierung häufig auf einer geringen Anzahl von Proben, ggf. sogar unter Wasser gewonnen. Hierfür ist nach Tabelle 5.5 eine umfangreichere Prüfung erforderlich.

Der Umfang der Beprobung richtet sich nach den Randbedingungen auf der Baustelle und ist im Qualitätssicherungsplan festzulegen. Wird vom Lieferanten ein besonders hoher Qualitätsstandard sichergestellt, können der Aufwand zur Analyse des eingebauten Materials reduziert und Schnelltests erlaubt werden.

Mischproben sind aus zehn gleichmäßig oder zufällig auf der Prüffläche verteilten Proben herzustellen. Die Prüffläche

Tabelle 5.4. Empfehlungen für das Qualitätsmanagement und das Untersuchungsprogramm während des Einbaus von zertifiziertem BG

Empfehlungen für das Qualitätsmanagement und Untersuchungsprogramm während des Einbaus von zertifiziertem BG
Regelmäßige Sichtkontrolle des angelieferten Materials (inkl. Fingerprobe) und Lieferscheinkontrolle
Feldflügelscherversuch alle 500 m <sup>3</sup> eingebauten BG
Probenahme (Zylinderprobe) für Wassergehalt und Trockendichte (Verdichtungsgrad) alle 2.000 m <sup>3</sup> eingebauten BG (Auftraggeber / Vertreter des AG)
Alle 5.000 m <sup>3</sup> eingebauten BG sind die folgenden Laboranalysen durchzuführen: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Korngrößenverteilung (nach Entfernung von OS und Kalk z.B. nach ISO 11277)</li> <li>- Proctor-Versuch und Konsistenzgrenzen</li> <li>- TOC, Kalkgehalt</li> <li>- Laborflügelscherversuch</li> </ul>
1 Mischprobe alle 4.000 m <sup>2</sup> Oberfläche je 1 m Schichtstärke (mindestens 1 Mischprobe je 200 m Deichlänge und 1 m Schichtstärke) für chemische Analysen (Probenahme: AG / Vertreter; Analyse: Externes Labor gewählt vom AG)

Tabelle 5.5. Empfehlungen für das Qualitätsmanagement und das Untersuchungsprogramm während des Einbaus nicht zertifizierten BG

Empfehlungen für das Qualitätsmanagement und das Untersuchungsprogramm während des Einbaus nicht zertifizierten BG
Regelmäßige Sichtkontrolle des angelieferten Materials (inkl. Fingerprobe) und Lieferscheinkontrolle
Feldflügelscherversuch alle 500 m <sup>3</sup> eingebauten BG
Probenahme (Zylinderprobe) für Wassergehalt und Trockendichte (Verdichtungsgrad) alle 2.000 m <sup>3</sup> eingebauten BG (Auftraggeber / Vertreter des AG)
Alle 5.000 m <sup>3</sup> eingebauten BG sind die folgenden Laboranalysen durchzuführen: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Korngrößenverteilung (nach Entfernung von OS und Kalk z.B. nach ISO 11277)</li> <li>- Proctor-Versuch und Konsistenzgrenzen</li> <li>- TOC, Kalkgehalt</li> <li>- Laborflügelscherversuch</li> </ul>
1 Mischprobe alle 2.000 m <sup>2</sup> Oberfläche je 1 m Schichtstärke (mindestens 1 Mischprobe je 100 m Deichlänge und 1 m Schichtstärke) für chemische Analysen (Probenahme: Auftraggeber / Vertreter, Analyse: Zertifizierte Prüfstelle)
1 Mischprobe / Tag (Probenahme, Analyse: Zertifizierte Prüfstelle)

ist zu dokumentieren. Bei Hinweisen auf eine Schadstoffbelastung ist die entsprechende Fläche separat zu beproben.

#### 5.4.2. Qualitätssicherung für Asche-Gemische

Die Qualitätssicherung bei der Ascheproduktion im Kraftwerk bezieht sich i.W. auf die chemische Zusammensetzung und die Körnung. Die geotechnische Qualitätsprüfung ist auf der Baustelle durchzuführen.

#### 5.4.2.1. Qualitätssicherung bei der Ascheproduktion

Das in Deutschland verwendete Qualitätssicherungssystem für die Überwachung von Rost- und Flugasche aus der Steinkohlefeuerung besteht aus einer internen und einer externen Prüfung [26]. Als Voraussetzung des Qualitätsmonitorings wird ein Qualitätsnachweis verlangt, der eine Produkt-Erstprüfung sowie eine Werksprüfung einschließt.

Für die interne Qualitätssicherung werden Aussehen, Farbe und Geruch der Ausgangssubstanz sowie Farbe, Trübung, Geruch, pH und el. Leitfähigkeit im Eluat (einmal pro Woche) geprüft. Die Richtwerte für pH und Leitfähigkeit sind in LAGA M20 angegeben (Tab. II.4-1 und II.4-2 [23]).

Die externe Qualitätssicherung für Rost- und Flugasche aus Steinkohlekraftwerken wird i.d.R. alle drei Monate durchgeführt. Der Umfang der Analysen und die Richtwerte sind ebenfalls in [23] angegeben.

#### 5.4.2.2. Qualitätssicherung auf der Baustelle

Auf der Baustelle werden die Aschen und Erdstoffe zur Herstellung der Gemische entweder separat geliefert und gelagert oder die Gemische werden im Werk vorgefertigt. In beiden Fällen werden regelmäßige visuelle Kontrollen der Homogenität (Aschen, Erdstoffe und Gemische) empfohlen.

Während des Einbaus ist die Verdichtung regelmäßig und in jeder eingebauten Schicht zu prüfen. Dies kann im Fall von i.d.R. nichtbindigen Rostasche-Gemischen z.B. mit dem Plattendruckgerät oder der leichten dynamischen Fallplatte vorgenommen werden. Weiter wird empfohlen, die Verdichtung im gesamten Deichprofil durch Ramm- oder Drucksondierungen zu erfassen. Eine flächenhafte automatische, in das Verdichtungsgerät integrierte Verdichtungskontrolle ist ebenfalls möglich. Die Verdichtung sollte die Anforderungen in [1], [4] erfüllen. Das gewählte Asche-

Sand-Gemisch für den Deichkern sollte nahe am optimalen Wassergehalt eingebaut werden.

Bei der Verwendung von Aschen in Dichtungssystemen ist die optimale Mischung zu prüfen, die für die geforderte Festigkeit und Wasserdurchlässigkeit erforderlich ist. Dazu sind Proben aus der Mischanlage und aus der hergestellten Dichtung zu entnehmen. Für vertikale Dichtungen gelten die Empfehlungen für Schlitzwände [9] analog.

Das Qualitätssicherungssystem auf der Baustelle ist ansonsten analog zu dem von BG. Es umfasst eine Baustelleneingangskontrolle, eine interne und externe Qualitätsprüfung und Kontrollinspektionen. Tabelle 5.4 und Tabelle 5.5 können entsprechend angewandt werden, unter Berücksichtigung der relevanten Parameter der Aschen.

#### 5.4.3. Qualitätssicherung für Geokunststoffe

Die Qualitätssicherung bei der Anwendung von Geokunststoffen in Deichen ist in verschiedene Richtlinien und Regelungen beschrieben. Allgemeine Informationen bzgl. der Anwendung von Geokunststoffen im Erd- und Wasserbau finden sich in [27]. Das Qualitätssicherungssystem umfasst die Akkreditierung des Herstellers, der dazu ein Qualitätssicherungssystem nach ISO EN 9001 [28] nachweisen muss, den Eignungstest, in dem die Eignung eines Produkts für die gewünschte Anwendung nachgewiesen wird, ein internes und externes Qualitätsmonitoring sowie Kontrollinspektionen auf der Baustelle. Die grundsätzlichen Qualitätsanforderungen an Geokunststoffe auf der Baustelle sind in CEN/TR 15019 [29] definiert. Weitere Dokumente beziehen sich auf verschiedene Ebenen der Qualitätssicherung und Produktzertifizierung der verschiedenen Geokunststoffe (z.B. [30]).

Tabelle 5.6. Qualitätssicherungsmaßnahmen auf der Baustelle und während der Materialproduktion

Qualitätssicherung	Baggergut	Ache-Gemische	Geokunststoffe
Eignungstests	Testfeld mit BG und gewählter Einbau- / Verdichtungstechnologie, min. mit BG mit höchstem Wassergehalt (Empfehlung: 3 verschiedene Wassergehalte)	Testfeld mit Asche-Gemischen und gewählter Einbau- / Verdichtungstechnologie, min. höchstmöglicher Einbauwassergehalt (Empfehlung: 3 versch. Wassergehalte, zwei Gemische)	Eignungstest während der Produktentwicklung oder im Fall neuer Anwendungen vor dem Einbau
Baustelleneingangskontrolle	Feld- und Laboranalysen durch den Auftragnehmer nach diesem Handbuch. Mögliche Erleichterung für zertifiziertes BG.	Feld- und Laboranalysen durch den Auftragnehmer nach diesem Handbuch. Mögliche Erleichterung für zertifizierte Aschen.	Prüfung z.B. nach CEN TR 15019 [29] und in Anlehnung an ZTVE-StB 09 [24]
Interne Qualitätssicherung	Feld- und Laboruntersuchungen durch AN bzw. AG nach diesem Handbuch.	Feld- und Laboruntersuchungen durch AN bzw. AG nach diesem Handbuch.	Nach Geokunststoffnormung, ISO EN 9001 [28], CEN TR 15019 [29], o.g. Dokumente
Externe Qualitätssicherung			
Kontrollinspektionen/ Baustelle			

### 5.4.3.1. Geotextilien

Die Qualitätsprüfung für Geotextilien in der Geotechnik und im Wasserbau ist in [17] bis [19], [31] und [32] beschrieben.

### 5.4.3.2. Geosynthetische Dränmatten

Die Qualitätsprüfung für geosynthetische Dränmatten richtet sich nach den Regelungen für Geotextilien. Umfangreiche Informationen enthalten zudem [21], [33] und [34].

### 5.4.3.3. Geosynthetische Erosionsschutzprodukte

Für die Vielzahl an geosynthetischen Erosionsschutzprodukten existiert bislang in Europa kein offizielles Dokument mit Empfehlungen zu Anwendung und Qualitätssicherung. Derzeit sind deshalb die Regelungen zur Qualitätsprüfung von Geotextilien anzuwenden.

### 5.4.3.4. Geosynthetische Tondichtungsbahnen

Der Einbau und die Qualitätsprüfung geosynthetischer Tondichtungsbahnen ist in EAG-GDT [20] beschrieben.

## 5.5. Einbautechnologie

Dieser Abschnitt enthält Empfehlungen zu Einbautechnologien für feinkörniges, organikreiches BG und Asche-Gemische im Deichbau. Weist das verwendete BG einen hohen Wassergehalt auf dem nassen Ast der Proctor-Kurve auf, kann der Einbau sich von anderen Erdstoffen unterscheiden. Asche-Gemische erfordern ebenfalls besondere Technologien. Schließlich konnten im Projekt DredgDikes Erfahrungen mit dem Einbau verschiedener Geokunststoffe gewonnen werden, die hier zusammengefasst werden.

### 5.5.1. Einbautechnologie für Baggergut

Die Technologie für den Einbau von reinem nassgebaggertem Sand ist umfänglich in [1] beschrieben. Auf Grundlage der Untersuchungen im Projekt DredgDikes und von Erkenntnissen aus Bremen und Hamburg können Empfehlungen für den Einbau von BG mit hohem Feinkornanteil und einem TOC-Gehalt von bis zu 9 % gegeben werden (Tabelle 5.7). Die Empfehlungen gelten für Deckschichten auf Seedeichen und homogene Deiche, nicht dagegen für Dichtungen im Flussdeichbau. Eine umfangreiche Beschreibung der Einbauversuche im Projekt DredgDikes ist in Anlage II enthalten.

Das Deckschichtmaterial wird i.d.R. nach Anlieferung mit einer Raupe verteilt und eingeebnet. Eine Dicke von 30 cm

(eingebaute Höhe) der einzelnen Einbausichten sollte nicht überschritten werden. Abhängig von der Materialqualität kann die Verdichtung durch die Raupe bereits den Anforderungen an eine Deichdeckschicht genügen. Dies ist im Eignungstest nachzuweisen. Dann wird eine größere Anzahl an Überfahrten und eine maximale Schichtmächtigkeit von 10-20 cm empfohlen, um eine möglichst homogene Einbauqualität zu gewährleisten, sowohl in der Fläche als auch über die Tiefe.

In der Regel ist das eingebaute Material jedoch mit einer Schafffußwalze zu verdichten (Abb. 5.4, Tabelle 5.8). Die

Tabelle 5.7. Empfehlungen für Einbautechnologien für BG in Deichen

	Empfehlungen
Homogenisierung von Baggergut (Abschnitt 5.2.1)	Homogenität ist wichtig für ein Deckschichtmaterial Technologie: z.B. Mietenaufsetzer (üblicherweise in der Aufbereitungsanlage) oder Separatorschaufel an Hydraulikbagger (auch auf der Baustelle möglich).
Verdichtungstechnologie für Deckschichten im Seedeichbau	<b>Einbau:</b> Raupe (max. 30 cm Schichtdicke verdichtet) <b>Verdichtung:</b> Walze mit Stampffußbandage, min. 4 Überfahrten <b>Vorzugsvariante:</b> Einbau und Verdichtung in Schichten über den gesamten Deichkern <b>Steile Böschungen:</b> Empfehlungen im Textteil. Vor dem Einsatz auf dem Deich ist die Verdichtungstechnologie auf dem Testfeld zu prüfen (5.4.1.1); Prüfwerte für die Verdichtung s. Abschnitt 5.1.1.1.
Verdichtungstechnologie für homogene Deiche	<b>Einbau:</b> Raupe (max. 30 cm Schichtdicke verdichtet) <b>Verdichtung:</b> Walze mit Stampffußbandage, min. 4 Überfahrten (Kneteffekt besonders wichtig um horizontale Fließwege zu reduzieren) <b>Vorzugsvariante:</b> Einbau und Verdichtung in hor. Schichten Vor dem Einsatz auf dem Deich ist die Verdichtungstechnologie auf dem Testfeld zu prüfen (5.4.1.1); Prüfwerte für die Verdichtung s. Abschnitt 5.1.1.2.

Tabelle 5.8. Vorteile einer Schafffußwalze für die BG-Verdichtung

Vorteile einer Schafffußwalze für die BG-Verdichtung
Kneteffekt führt zu einem besseren Verbund mit höherer Festigkeit und homogenerer Verdichtung.
Stampffußbandage zerstört größere Agglomerate: kann zu einer besseren Homogenisierung und erhöhten Verdichtung führen.
Unebenheit der verdichteten Oberfläche erlaubt die Verzahnung der verschiedenen Schichten und erhöht so die Stabilität.
Reduktion des schichtparallelen präferentiellen Abflusses aufgrund der besseren Schichtverzahnung.



Abb. 5.4. BG-Verdichtung mit einer Schafffußwalze

Stampffußbandage ist vorteilhaft, da sie den Erdstoff knetet und so eine bessere Verzahnung der Bodenagglomerate und eine homogenere Verdichtung ermöglicht wird. Zudem greifen die max. 30 cm mächtigen Schichten durch die unebene Oberfläche besser ineinander, was die Ausbildung präferentieller Fließpfade vermindert.

Die empfohlene Einbauqualität für feinkörniges BG, bestimmt durch die undrained Scherfestigkeit oder den Verdichtungsgrad, ist in Abschnitt 5.4.1 angegeben. Für die flächenhafte Verdichtungskontrolle ist eine automatisierte Prüfung (z.B. integriert in eine Walze) vorteilhaft.

Es wird empfohlen, feinkörniges BG bei einem Wassergehalt nahe dem Optimum einzubauen. Üblicherweise liegt der Einbauwassergehalt auf dem nassen Ast der Proctorkurve. Die Schrumpffähigkeit ist beim Einbau auf dem trockenen Ast zwar geringer (Abschnitt 5.1.1.1), dennoch kann dies nicht uneingeschränkt empfohlen werden, da die Materialien dann häufig schwer zu handhaben sind (z.B. starke Staubentwicklung).

Der Materialeinbau ausschließlich mit der Baggerschaufel kann nicht empfohlen werden, da die Verdichtung dadurch deutlich geringer ist als mit einem Verdichtungsgerät. Im Projekt DredgDikes wurden die empfohlenen Qualitätseigenschaften bei allen untersuchten Materialien deutlich unterschritten. Die Technologie wird manchmal an steileren Böschungsabschnitten oder zum Ausgleich von Unebenheiten während der Böschungsprofilierung eingesetzt. Hier wird empfohlen, alternative Technologien einzusetzen oder die Böschungsneigung anzupassen.

#### 5.5.1.1. Deiche mit Sandkern und Deckschicht

Raupen und Walzen können üblicherweise bis zu einer Neigung von etwa 1:3 eingesetzt werden. Das entspricht der steilsten Regelböschung bei Seedeichen. Dann sind

Einbau und Verdichtung schichtenweise Böschungsparell über den gesamten Deichkern durchzuführen (Abb. 5.5).

Bei Böschungsneigungen steiler als 1:2,5 ist diese Einbaumethode schwierig bis unmöglich. Zwei übliche alternative Einbaumöglichkeiten sind:

- Einbau des Deckschichtmaterials mit einer Neigung von max. 1:3, Entfernen des Überschussmaterials während der Böschungsprofilierung (abhängig von der Deichhöhe mit erheblicher Massenbewegung). Besonderes Augenmerk ist auf die maximale Schichtstärke von 30 cm zu legen (am Deichfuß kleine Flächen). Werden die ersten Schichten am Deichfuß zu dick gewählt, kann es hier lokal zu einer schlechten Verdichtung kommen, was die Standsicherheit gefährden kann (Abb. 5.6).
- Einbau der Deckschicht in horizontalen Schichten bis zur Deichkrone (Abb. 5.7). Große Verdichtungsgeräte wie Walzen und Raupen benötigen aus Sicherheitsgründen üblicherweise eine Fahrbreite von min. 3 m. Dies würde einer Deckschichtmächtigkeit von 1,5 m auf einer 1:2 Böschung entsprechen, einer nicht unüblichen Mächtigkeit beim Einbau von BG (vgl. Kapitel 4). Wenn eine geringer mächtige Deckschicht geplant ist, ist das Überschussmaterial während der Böschungsprofilierung wieder zu entfernen. Für die Verdichtung ist eine Walze einzusetzen, da Raupenkette nicht die gesamte Breite der Deckschicht erfassen können. Zudem wird eine Stampffußbandage empfohlen, um den Einfluss horizontaler, schichtparalleler Fließwege zu reduzieren.

Eine der beiden Methoden ist effizienter bezüglich der Massenbewegung, abhängig von der erforderlichen Deckschichtmächtigkeit, der Mindestarbeitsbreite bei

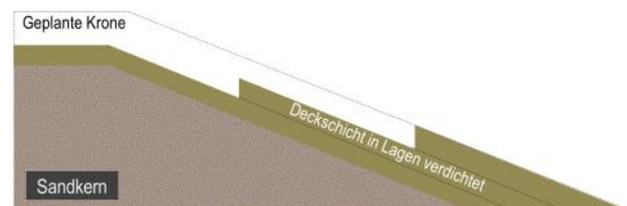


Abb. 5.5. Standardeinbau für eine Deckschicht auf Sandkern



Abb. 5.6. Mögliches Problem bei der Installation von Material in einer geringeren Neigung für spätere Profilierung der Böschung

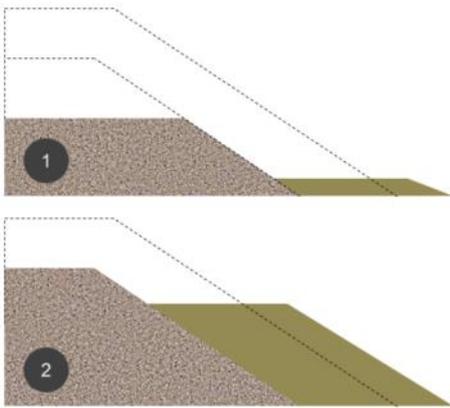


Abb. 5.7. Horizontaler Einbau und Verdichtung der Deckschicht bei steilen Böschungen auf einem Sandkern.

horizontalem Einbau (i.d.R. > 3 m), der Deichhöhe und der Böschungsneigung (Berechnungsbeispiel s. Annex I).

#### 5.5.1.2. Homogene Deiche

Bei der Herstellung eines homogenen Deiches aus BG wird der gesamte Querschnitt in Lagen von 30 cm (verdichtet) aufgebaut und mit einer Schafffußwalze verdichtet, um horizontale Fließwege zu reduzieren. Wenn der Einbau ausschließlich mit der Raupe (ohne zusätzliche Verdichtung) vorgenommen wird, sind dünnere Schichten und eine erhöhte Anzahl an Überfahrten vorzusehen, um eine gute Verzahnung der Schichten zu gewährleisten.

Um Massenbewegungen einzusparen, können vor allem kleinere Deiche hergestellt werden, indem das Überschussmaterial aus dem unteren Böschungsbereich beim Profilieren nach oben gezogen und dort eingebaut wird. Es ist besondere Vorsicht geboten, um auch oben eine qualitativ hochwertige Verdichtung zu gewährleisten.

#### 5.5.2. Technologien für Asche-Gemische

Beim Deichbau und der Deichertüchtigung (z.B. Erhöhung) können Gemische aus Asche und Sand wie übliche Deichbaumaterialien behandelt werden. Die Gemische werden i.d.R. in Mischanlagen vor Ort hergestellt, nach einer im Labor entwickelten Rezeptur. Die Empfehlungen für Asche-Gemische als Deichkern- oder Deckschichtmaterial folgen denen für BG in Abschnitt 5.5.1. In Tabelle 5.9 sind die Empfehlungen zusammengefasst.

Zusätzlich können Asche-Gemische als vertikale Dichtung im Deichkern oder am Deichfuß wie eine Schlitzwand eingebaut werden. Die Gemische inkl. Zement, Bentonit oder Flugasche können in Anlagen vor Ort hergestellt werden (Abschnitt 5.2.2).

Tabelle 5.9. Empfehlungen für Einbautechnologien für Asche-Gemische

	Empfehlungen
Homogenisierung	Homogenisierung ist wichtig. Kann vor Ort in einer Mischanlage realisiert werden.
Verdichtungs- technologie für den Stützkörper	Einbau mit einer Raupe (max. 30 cm Einbauhöhe pro Schicht) Verdichtung mit Schafffußwalze mit min. 4 Überfahrten (knetende Wirkung wichtig zur Reduktion horizontaler Fließwege) Einbau und Verdichtung in horizontalen Schichten (empfohlen) Alle Verdichtungstechnologien müssen vor dem Bau in einem Testfeld analog zum Einbau von BG geprüft werden (5.4.1.1). Verdichtungsprüfwerte s. Abschnitt 5.1.2.
Verdichtungs- technologie für Deichdeckschichten	Einbau mit einer Raupe (max. 30 cm Einbauhöhe pro Schicht) Verdichtung mit Schafffußwalze mit min. 4 Überfahrten Einbau über die gesamte Deichoberfläche (empfohlen). Für steile Böschungen s. Empf. für BG. Alle Verdichtungstechnologien müssen vor dem Bau in einem Testfeld analog zum Einbau von BG geprüft werden (5.4.1.1). Verdichtungsprüfwerte s. Abschnitt 5.1.2.



Abb. 5.8. Einbau einer Vertikaldichtung (Foto: Moebius Polska)

#### 5.5.3. Einbautechniken für Geokunststoffe

Grundsätzlich ist der Einbau von Geokunststoffen entweder standardisiert oder die entsprechenden Informationen werden von Hersteller in einer Einbauanleitung zur Verfügung gestellt. Die folgenden auf den Erfahrungen aus dem Projekt DredgDikes basierenden Empfehlungen können ergänzend genutzt werden.

##### 5.5.3.1. Erosionsschutzprodukte gegen

##### Oberflächenerosion und zur Wurzelbewehrung

Es gibt eine große Anzahl an geosynthetischen Erosionsschutzprodukten mit verschiedenen Wirkmechanismen (Abb. 5.9). Wichtige Unterschiede sind der Bedeckungsgrad, das Material (natürlich oder synthetisch) und die Möglichkeit, die Produkte mit krümeligem Boden zu füllen. Im Projekt DredgDikes kamen zwei Produkte zum Einsatz: Eine Geomatte (GMA) und ein Produkt, das die

Eigenschaften eines Geogitters und einer GMA kombiniert. Solange die Böschung nicht begrünt ist (vor der Ansaat oder während der Keimphase) kann Erosion durch (Niederschlags-)Wasser und Wind ausgelöst werden. Wenn nur der Boden oberhalb und in der Produktstruktur betroffen ist, ist dies für die Standsicherheit vergleichsweise unproblematisch (Abb. 5.10 A,C), es sind jedoch ggf. bodenschutzrechtliche Belange zu berücksichtigen. Wenn der darunter liegende Boden ebenfalls erodiert, beginnt das System zu versagen (Abb. 5.10 B,D).

Ein geosynthetisches Erosionsschutzprodukt kann einen begrüntem Boden in unterschiedlicher Weise verstärken. Wird das Produkt direkt auf die Bodenoberfläche aufgelegt (Abb. 5.11 B), werden die Pflanzenhalme stabilisiert. Die Ansaat kann vor oder nach der Verlegung vorgenommen werden; maschinelles Drillen ist auf dem Produkt jedoch nicht möglich. Wird auf dem Produkt angesät, ist deshalb entweder eine Hand- oder eine Nassansaat erforderlich. Einschränkungen bezüglich dieser Technologie auf einer BG-Böschung werden in Abschnitt 5.6.1.3 beschrieben. Liegt das Saatgut unter dem Produkt, ist die wirksame Öffnungsweite von Bedeutung. GMAs können z.B. von mehrkeimblättrigen Pflanzen angehoben werden, sodass die Verbindung des Produkts zum Untergrund verloren geht, und es kann zu Erosion unterhalb des Produkts kommen. Ist ein engmaschiges Produkt fest auf der Oberfläche fixiert, kann dies zu einer Selektion der Vegetation führen.

Wird ein entsprechendes Produkt mit Boden gefüllt aber nicht bedeckt (Abb. 5.11 C), werden die Wurzeln vom Produkt an Ort und Stelle gehalten und das Wurzelnetzwerk bildet sich von Anfang an im und unter dem Produkt aus.

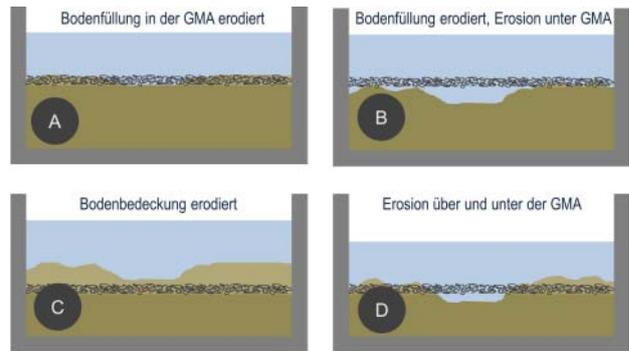


Abb. 5.10. Erosionsphänomen bei der Anwendung von GMAs. A. Die Bodenfüllung in der GMA erodiert aber der darunter liegende Boden bleibt geschützt; B. Die Bodenfüllung ist bereits erodiert oder die GMA war nicht gefüllt (Abb. 5.9 C) und der Boden darunter erodiert (Versagen); C. Die Bodenüberdeckung erodiert aber die GMA schützt den darunter liegenden Boden; D. Sowohl die Bodenbedeckung als auch der Untergrund erodieren (Versagen).

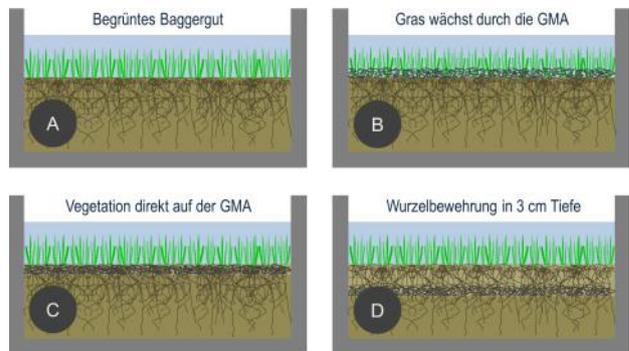


Abb. 5.11. Kombination von Vegetation und GMA. A. begrüntes BG ohne GMA; B. das Gras wächst durch eine GMA direkt auf der Oberfläche (Abb. 5.9 C); C. Vegetation direkt auf einer mit Boden gefüllten GMA; D. Wurzelbewehrung in einer Tiefe von ca. 3 cm (Abb. 5.9 D)

Tabelle 5.10. Einbauempfehlungen für Erosionsschutzprodukte

**Empfehlungen für den Einbau von Erosionsschutzprodukten und die damit im Zusammenhang stehende Ansaatmethode**

Produkt an einer Seite fixieren und vorspannen, bevor es auf der Oberfläche befestigt wird. Dadurch Verminderung von Beschädigungen beim Begehen; Kontakt zum Untergrund wird garantiert.

Produkt nach der Einbauanleitung des Herstellers auf der Böschung fixieren. Wenn Stahlhaften (punktuell) verwendet werden, ist eine gute Verbindung von Produkt und Untergrund zu garantieren; andernfalls kann es zu Erosion unterhalb des Produkts kommen. Empfehlung: Mindestrastrer von 1-2 Befestigungspunkten je m<sup>2</sup>, je nach Materialflexibilität.

Falls erforderlich: Produkt vor Ansaat mit max. 1 cm Oberboden (oder krümeligem BG) bedecken (eher füllen). Sehr flache Produkte sollten nicht bedeckt werden, um den Verlust des Oberbodens zusammen mit der Ansaat zu bzw. ein Abgleiten von Oberboden auf dem Produkt zu vermeiden (Annex II).

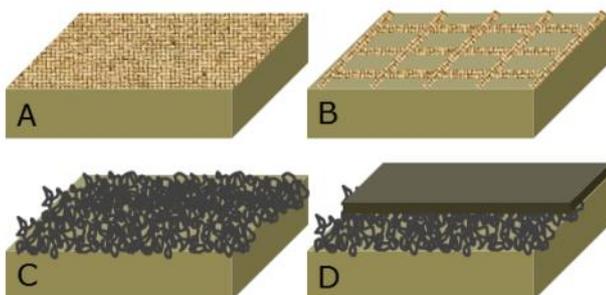


Abb. 5.9. Typen von Erosionsschutzprodukten. A. Erosionsschutzmatte GEC-M, bis zu 100 % Bedeckung; B. Gitter-/netzartiges Erosionsschutzprodukt mit großen Öffnungen; C. Geomatte (GMA) für Erosionsschutz auf der Bodenoberfläche; D. GMA mit Boden gefüllt oder überdeckt (Wurzelbewehrung) oder zur Erhöhung der Reibung zwischen der Rohbodenböschung und einem weniger verdichteten Oberboden.

Dies ist die empfohlene Methode. In diesem Fall kann sogar vor der Verlegung des Produkts angesät werden, da nur ca. 1 cm krümeliger Oberboden zur Verfüllung verwendet wird. Mit dieser Methode kann die Saatbettvorbereitung

(Abschnitt 5.6.1.1) vernachlässigt werden. Zudem kann auch eine Mischung von Saatgut und Oberboden im Nassansaatverfahren aufgebracht werden.

Wenn ein Produkt mit zu viel Oberboden bedeckt wird, kann es vorkommen, dass das dichte Wurzelgeflecht nicht bis in das Produkt ein- bzw. durch das Produkt hindurch wächst (Abb. 5.11 D). Deshalb sollten die Produkte maximal mit 3 cm Oberboden bedeckt werden, besser weniger. In diesem Fall muss die Ansaat nach der Verlegung und Befüllung vorgenommen werden, wenn nicht eine Boden-Saatgut-Mischung verwendet wird (s.o.).

Bislang existiert kein offizielles Dokument für Produkte für den Oberflächenerosionsschutz. Deshalb sind grundsätzlich nur die Einbauanleitungen der Hersteller gültig. Die zusätzlichen Einbauempfehlungen dieses Handbuchs sind in Tabelle 5.10 zusammengefasst.

#### 5.5.3.2. Geosynthetische Dränmatten

Geosynthetische Dränmatten können alternativ zu anderen Dränelementen eingesetzt werden. Sie sind einfach zu verlegen, indem sie in Deichlängsrichtung ausgerollt werden. Einbauanleitungen der Hersteller sind i.d.R. verfügbar. Zusätzliche Informationen finden sich in [21], [33].

In einem Deich wird die Dränung üblicherweise am landseitigen Deichfuß angeordnet, um den Abfluss des Sickerwassers zu regeln und die landseitige Böschung vor Durchfeuchtung und Auftrieb zu schützen. Eine übliche Methode ist der Einbau eines Sickerprismas, indem ein Teil der Deckschicht und des Kerns durch einen Auflastfilter aus Kies ersetzt wird. Alternativ werden z.B. Dränrohre im Innern des Deiches auf der Landseite des Sandkerns eingebaut, die in definierten Abständen durch die landseitige Böschung geführt werden, abhängig von der Bemessungs-Sickerwassermenge [1].

Geosynthetische Dränmatten können diese Bauweisen ergänzen bzw. sie ersetzen. Ein wichtiger Vorteil ist dabei die hohe Filterstabilität der Produkte, die auch über große Zeiträume garantiert werden kann, wie in [21] gezeigt.

Um die Dränkapazität der Kerndränrohre zu erhöhen, können Dränmatten parallel zu den Dränrohren verlegt und an diese angeschlossen werden. Der geotextile Filter des Verbundstoffs wird dazu um das Rohr gewickelt, um einen dauerhaften Anschluss zu gewährleisten. Auf diese Weise wird die Sickerlinie weiter im Innern des Deichkerns gesenkt und die Dränrohre können dennoch so weit wie möglich landseitig angeordnet werden.

Um die Zugänglichkeit des Dränsystems zur Wartung zu verbessern, können die Dränrohre sogar in der landseitigen Deckschicht verlegt werden, während die angeschlossene Dränmatte in den Deichkern reicht.

Dränmatten können auch so verlegt werden, dass sie das Sickerwasser im Deichkern durch die landseitige Deckschicht bzw. aus einem homogenen Deich frei ableiten. Dann dränt das Sickerwasser jedoch über die gesamte Länge des Deichfußes (wie bei einem Dränprisma) und besondere Aufmerksamkeit ist der Ableitung des Wassers vom Deichfuß zu widmen, da die Fläche vor dem Deich sonst dauerhaft vernässt und (nicht nur aufgrund der Beeinträchtigung der Vegetation im Hinblick auf den Erosionsschutz) instabil bezüglich Überströmung und sogar zu einer Gefahr für die Gesamtstandsicherheit werden kann. Die Dränmatte sollte mindestens 20-30 cm über der Geländeoberfläche des Hinterlands in der Böschung platziert werden, um eine ungewollte Bedeckung (z.B. Bodenmaterial, während oder nach der Bauausführung) und damit eine Blockade der Sickerwasserableitung zu verhindern. Die endgültige Position des Dränprodukts ist im Rahmen der Bemessung zu entscheiden, insbesondere unter Berücksichtigung von Untergrundsetzungen. In homogenen Deichen kann dieses System durch eine Kiesrigole ergänzt werden. Diese wird eingebaut, sobald der Baufortschritt die Höhe erreicht, auf der die Rigole oben abschließt. Dann wird ein Graben ausgehoben, mit einem geotextilen Filter ausgekleidet und mit Dränkies gefüllt, bevor der Deich auf seine Endhöhe fertiggestellt wird.

Weitere Informationen und Skizzen für die Anordnung der Dränmatten im Deichquerschnitt finden sich in Kapitel 4.

#### 5.5.3.3. Geosynthetische Bewehrung

Es gibt zwei Standardanwendungen für geosynthetische Bewehrungsprodukte im Deichbau: Die Bewehrung des Deichkörpers selbst, häufig mit der sogenannten Umschlagmethode [35], und die Basisbewehrung, indem ein Bewehrungsprodukt unter dem gesamten Deich auf dem Planum die Setzungen vergleichmäßig und ggf. die Befahrbarkeit während der Bauphase ermöglicht. Aufgrund fehlender Richtlinien für die Deichbewehrung können die Bemessung und Ausführung angelehnt an EBGE [36] durchgeführt werden.

Im DredgDikes-Projekt wurde eine Geokunststoffbewehrung zudem in einer Deichdeckschicht eingebaut, um die Größe (besonders die Tiefe) entstehender Risse zu

beeinflussen. Diese Überlegungen basieren auf den Erfahrungen bei der Erforschung der Geogitterbewehrung mineralischer Deponieoberflächendichtungen [37].

Das Planum sollte beim Einsatz von Geokunststoffen zur Bewehrung der Deichbasis besonders eben ausgeführt und das verlegte Bewehrungsprodukt (z.B. mit einer Traverse an einem Bagger oder Radlader) vorgespannt werden, um einen guten Kontakt zwischen Planum und Produkt sowie eine gute Kraftübertragung zu gewährleisten.

#### 5.5.3.4. Geosynthetische Tondichtungsbahn

Der Einbau einer geosynthetischen Tondichtungsbahn ist in EAG-GDT [20] und in den Einbauanleitungen der Hersteller umfänglich beschrieben.

## 5.6. Begrünung

Die Begrünung ist der übliche Erosionsschutz auf Deichen. Auch dann, wenn Teile des Deiches z.B. mit einem Stein- oder Asphaltdeckwerk verstärkt sind, ist eine gut entwickelte Grasnarbe von grundlegender Bedeutung für die Standsicherheit der meisten Deiche. Die Vegetation bietet Schutz vor Erosion und reduziert die Infiltration von Niederschlagswasser. Sie muss sich nach der Fertigstellung der Deichböschungen schnell etablieren und ist über die gesamte Lebensdauer des Deiches in einem guten Zustand zu erhalten, was ggf. eine intensive Pflege erfordert. Im Projekt wurde eine Reihe von Untersuchungen bezüglich der Vegetationsentwicklung auf BG und Asche-Gemischen durchgeführt (Annex II). Die darauf basierenden Empfehlungen sind im Folgenden zusammengestellt.

### 5.6.1. Begrünung auf Baggergut

Die Empfehlungen für BG in diesem Handbuch basieren auf DredgDikes sowie auf den langjährigen Erfahrungen mit begrünten Deponierekultivierungsschichten aus BG [38]. Tabelle 5.11 enthält eine Zusammenfassung der wichtigsten Empfehlungen. Diese Empfehlungen weichen z.T. von den im Folgenden dargestellten Hinweisen der EAK 2002 [1] ab (kursiv):

- Boden harken bis 5 cm tief,
- Saatgut verteilen (Sämaschine) und *anpressen (Walze)*,
- *Anfängliche Düngergabe* laut EAK vorteilhaft,
- Ansaat bei günstigen Wetterbedingungen (nicht zu nass/ zu trocken, windstill, Bodentemperatur > 8°C).

Tabelle 5.11. Empfehlungen zur Etablierung der Grasnarbe auf BG

	Empfehlungen
Vorbereitung des Saatbetts	Entfernen von Steinen, Unkraut und anderen Fremdkörpern. Zweifaches Fräsen auf 5 cm Tiefe. <i>Alternativ:</i> Aufrauen der Oberfläche ca. 2 cm tief. Hydrosaat direkt auf der verdichteten Oberfläche nur bei optimalen Wetterbedingungen.
Saatgutmischung	Auswahl regionaltypischen Saatguts. Schnell keimendes Saatgut, das eine dicke, dichte Grasschicht entwickelt. Für Seedeiche sind salzresistente Arten zu wählen (Salzwasser und möglicher Salzgehalt im BG). Ausbringungsmenge üblicherweise ca. 30 g/m <sup>2</sup> .
Ansaat-Techniken	Saatgut in das vorbereitete Saatbett einarbeiten (einharken oder drillen). Hydrosaat nur bei optimalen Wetterbedingungen empfohlen (siehe Text). Keine Düngergabe nötig für feinkörniges, organikreiches BG. Die Oberfläche sollte i.d.R. rau gehalten werden (nicht walzen).
Saatperiode	Empfohlene Ansaatzeiten: September-Oktober (Standard). März-Anfang April (Ausnahme).
Unterhaltung und Pflege	Früher Schnitt um die bodeneigenen Unkräuter zu reduzieren / zu entfernen. Zusätzlicher Schnitt, sobald die Ansaat gekeimt und 10-15 cm hoch ist. Starker Aufwuchs (aufgrund der Bodenfruchtbarkeit des BG) kann zu erhöhtem Pflegeaufwand im Vergleich zu anderen Oberböden führen, erhöht jedoch gleichzeitig die Erosionsstabilität der Oberfläche. Pflege und Unterhaltung sind im Vertrag genau festzulegen.

Wird eine Deichdeckschicht aus feinkörnigem, organikreichem BG hergestellt, ist keine zusätzliche Oberbodenschicht erforderlich. Das BG besitzt üblicherweise eine gute Bodenfruchtbarkeit und eine hohe Wasserhaltekapazität, was eine schnelle und dauerhafte Begrünung ermöglicht (Informationen zur Feldkapazität von feinkörnigem BG finden sich in Abschnitt 4.7.4.1).

#### 5.6.1.1. Vorbereitung des Saatbetts

Vor der Ansaat ist die Böschungsoberfläche i.d.R. vorzubereiten, z.B. durch eine 5 cm tiefe Bodenbearbeitung (zwei Wiederholungen). Unkraut, Steine und andere Fremdstoffe sind zu entfernen. Die Oberfläche ist zudem bis zur Fertigstellung der Ansaat von Unkraut frei zu halten [1].

Eine Ansaat direkt auf der gut verdichteten Deckschicht sollte grundsätzlich vermieden werden. Die obersten Millimeter des feinkörnigen BG trocknen schnell aus,

speziell auf einem dem Wind besonders ausgesetzten Deich, wodurch in einer Trockenperiode die Keimung vollständig gehemmt werden kann. Zudem kann das Saatgut leicht windverfrachtet werden.

Unter der dünnen trockenen Kruste hält feinkörniges BG i.d.R. ausreichend Wasser, um eine Keimung zu ermöglichen. Deshalb ist mindestens ein Aufräuen der Oberfläche (2 cm tief) erforderlich, um das Saatgut auf der Böschung zu halten und bei guten Wetterbedingungen ausreichend Feuchtigkeit zu garantieren.

Eine Nassansaat auf der verdichteten Oberfläche ohne Saatbettbereitung funktioniert nur bei optimalen Wetterbedingungen (dauerhaft feucht und nicht zu kalt für 2 -3 Wochen). Bei trockener Witterung ist diese Methode nicht zielführend, wie im Projekt DredgDikes gezeigt. Die Verwendung einer Nassansaat mit von Mulch ist ebenfalls denkbar, wie auch andere Technologien, die die Oberfläche bedecken und feucht halten; hierbei ist jedoch die Wirtschaftlichkeit abzuwägen, da auf BG aufgrund des guten Nährstoffangebots mit der entsprechenden einfachen Vorbereitung ein guter Keimerfolg erzielt werden kann.

Eine aufgeharkte bzw. gefräste Oberfläche kann den folgenden Vorteil bringen: Da die krümelige Oberfläche nicht (so schnell) reißt wie eine glatte, stark verdichtete Oberfläche, ist die darunter liegende Schicht vor der direkten Sonneneinstrahlung geschützt und so auch teilweise vor Evaporation. Das kann in Folge die Rissbildung weiter verzögern (während die Rissbildung aufgrund der langfristigen Schrumpfvorgänge nicht verhindert werden kann).

Auf der anderen Seite kann die Ansaat direkt auf der verdichteten (bzw. auf der nur 2 cm tief aufgerauten) Oberfläche den Vorteil einer erhöhten Erosionsstabilität haben, sowohl im unbegrünten als auch im begrünten Zustand.

Tabelle 5.12. Beispiel für eine übliche Deichsaatmischung (Seedeich)

Sorte	Anteile [%]	Massen [g/m <sup>2</sup> ]
<i>Festuca rubens</i>	60	18
<i>Lolium perenne</i>	30	9
<i>Poa pratensis</i>	10	3
Total amount	100	30



Abb. 5.12. Ansaat und Einharken von Hand, DredgDikes Pilotdeich

### 5.6.1.2. Saatgut

Eine regionaltypische Deichsaatmischung wird empfohlen. Informationen über Saatmischungen und spezielle salztolerante Deichsaatmischungen finden sich in [39]. Die übliche Ausbringungsmenge ist ca. 30 g/m<sup>2</sup>, wenn vom Lieferanten nicht anders vorgegeben. Eine Standardsaatmischung für Deichbegrünung unterstützt die Erosionsstabilität der Deichdeckschicht, da die Vegetation sich schnell und dauerhaft etabliert.

Ein Beispiel für eine solche Mischung zeigt Tabelle 5.12. Der Rotschwengel (*Festuca rubra trichophylla* LIPROSA/LIBANO und *Festuca rubra rubra* NFG/TAGERA) wird als salzresistent angesehen und bildet eine dichte Grasnarbe.

### 5.6.1.3. Ansaat-Methoden

Das Saatgut wird in das vorbereitete Saatbett aus krümeligem BG von Hand eingeharkt (Abb. 5.12) oder maschinell gedreht, um den Kontakt zwischen Samen und Boden zu erhöhen und eine gute Wasserversorgung zu ermöglichen [40].



Abb. 5.13. Vegetationsdecke 1 Jahr nach Ansaat, Rostocker Testdeich



Abb. 5.14. Starkes Wurzelsystem (Rostocker Testdeich)

In Deutschland wird eine Ansaat im Frühherbst (Sept. – Okt.) empfohlen. Die Ansaat im Frühjahr (März – Anfang April) ist ebenso möglich, allerdings sind trockene und / oder kalte Perioden dann wahrscheinlicher als im Herbst. Die Zeit von Ende April bis Mitte August kann für die Ansaat nicht empfohlen werden.

Eine Düngergabe auf feinkörnigem, organikreichem BG ist nicht erforderlich. Es wird dennoch empfohlen, vor jeder Deichbaumaßnahme ein Begrünungstestfeld von 1 m<sup>2</sup> je Ansaatvariante auf dem gewählten BG anzulegen, um die Keimkapazität des Saatguts abzuschätzen.

Im Projekt DredgDikes konnte gezeigt werden, dass das Anpressen des Saatguts auf der Oberfläche keinen Vorteil bietet, wenn es in ein vorbereitetes Saatbett eingebracht wird. Die durch das Walzen geglättete Oberfläche trocknet schneller aus und zeigt früher Schrumpfrisse. Eine raue Oberfläche hat eine höhere Infiltrationskapazität (zudem ein höheres Potential, Niederschlagswasser und Tau auf der Fläche zu halten) sowie eine geringere Neigung zu Schrumpfrissen bei gleichzeitig ausreichender Erosionsstabilität bei durchschnittlichen Regenereignissen.

Die Keimung auf Deichen aus sehr feinkörnigem BG kann sich verzögern (besonders wenn die Oberfläche stark verdichtet oder das Saatbett mit einer Walze geglättet wird), da dieses in exponierten Lagen ggf. schneller austrocknet als andere Oberböden. Für die Keimung und die weitere Entwicklung der Pflanzen ist ein Zeitraum von 7 bis 10 Tagen entscheidend. In dieser Zeit wird eine dauerhafte Feuchtigkeit für die Keimung im obersten 1 cm benötigt. Diese Wetterbedingungen sind am wahrscheinlichsten von September bis Oktober, z.T. auch im März, weniger von April bis August und in der Kälteperiode.

Im Projekt DredgDikes konnte die Ansaat nicht nach diesen Empfehlungen umgesetzt werden. Auf dem Rostocker Forschungsdeich führten sowohl die Geometrie als auch der Zeitpunkt der Fertigstellung zu einer alternativen Ansaatmethode zu einem ungünstigen Zeitpunkt. Die Nassansaat auf den stark verdichteten, exponierten Böschungen mit einer Neigung bis 1:2 wurde im Juni ausgeführt, direkt gefolgt von einer dreimonatigen Trockenperiode ohne Niederschläge. Anfänglich wurde der fast vollständige Ausfall der Keimung beobachtet. Die Keimung setzte jedoch sofort nach den ersten Niederschlägen im September ein und war sogar dort am besten, wo im Sommer keine zusätzlichen Maßnahmen, wie z.B. Bewässerung, vorgenommen worden waren. Innerhalb eines Jahres entwickelte sich eine gute Grasnarbe (ca. 80 % Bedeckungsgrad in gutem Zustand). Da eine schnelle Begrünung gewünscht war, sind sowohl Zeitpunkt als auch Methode dennoch als nicht optimal zu bewerten.

Empfehlungen zur Ansaat in Kombination mit Erosionsschutzprodukten finden sich in Abschnitt 5.5.3.1.

#### 5.6.1.4. Entwicklung der Grasnarbe

Sobald das Saatgut auf dem BG keimt und es dem Trockenstress widerstanden hat, setzt ein intensives Wachstum ein (Abb. 5.13). Das Wachstum von Gras auf feinkörnigem oder sandig-lehmigem BG ist häufig intensiver als auf den sandigen Oberböden auf den Deichen, die in MV diesbezüglich besichtigt wurden. Dadurch erträgt die

Vegetation auf BG auch trockenere Witterungsverhältnisse besser. Sowohl die Ausbildung der Grasnarbe als auch die Wurzelentwicklung sind sehr gut. In den Materialien, die im Projekt DredgDikes untersucht wurden, entwickelte sich schon im ersten Jahr ein ausgeprägter Wurzelfilz.

Die Wurzeldichte, die Informationen über den Widerstand der Grasnarbe gegen Wellenangriff und Überströmung liefert, sollte in einer Seedeich-Deckschicht mindestens 10<sup>-5</sup> g/cm<sup>3</sup> betragen [41]. Im BG aus Rostock wurde eine durchschnittliche Wurzeldichte in der obersten Bodenschicht (15 cm) von 7·10<sup>-3</sup> g/cm<sup>3</sup> erreicht (Abb. 5.14).

Die Untersuchungen der Vegetationsentwicklung auf dem Forschungsdeich begannen im September 2012. Sie zeigten nur marginale anfängliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Ansaatvarianten (Annex II). In den Folgejahren waren keine Unterschiede zwischen den Varianten mehr zu erkennen. Zusätzliche Informationen zu den Tests finden sich in den Projektberichten [42], [43].

#### 5.6.1.5. Unterhaltung – Nachsaat und Mahd

Umfangreiche Informationen zur Pflege und Unterhaltung der Vegetation auf Seedeichen finden sich in [1]. Ein erster Schnitt sollte durchgeführt werden, sobald das Gras 10-15 cm hoch ist. Ein zweiter Schnitt sollte vor der Abnahme der Ansaat durch den Auftraggeber durchgeführt werden. Mähgut und Unkraut sollten entfernt werden und kahle Stellen nachgesät. Im Fall von niederschlagsbedingter Erosion sind eventuelle Rillen zu verfüllen und wieder anzusäen.

Der abnahmefähige Zustand ist erreicht, wenn Aufwuchs und Verteilung der Vegetation gleichmäßig sind und der projektive Bedeckungsgrad (frisch geschnitten) mindestens 75 % aufweist; dabei werden nur die angesäten Arten berücksichtigt. Dies sollte auf BG i.d.R. innerhalb von 6 Monaten erreicht werden.



Abb. 5.15. Vegetation vor der Mahd (Rostocker Testdeich)



Abb. 5.16. Ein früher Schnitt auf dem DredgDikes Pilotdeich eliminiert ungewollte Vegetation und ermöglicht die Entwicklung der Ansaat

Baggergut enthält häufig größere Mengen an bodeneigenen Samen und austriebfähigen Pflanzenteilen, wie Schilf (*Phragmites australis*), Melde (*Atriplex*), Salzaster (*Aster tripolium*) und Quecke (*Agropyron repens*). Diese Unkräuter keimen nicht nur schneller sondern treiben auch aus den Pflanzenresten schnell aus und unterdrücken die angesäten Arten. Ein früher Schnitt hilft, die Unkräuter zu verdrängen (z.B. *Atriplex*) und der Ansaat genügend Licht zu geben (Abb. 5.16). Für die angesäten Arten ist dieser frühe Schnitt ebenfalls vorteilhaft, da das Grass dadurch zur Bestockung angeregt wird, was zu einer dichteren Vegetationsdecke führt.

Im ersten Jahr kann der Mäh Aufwand auf BG aufgrund der Bodeneigenschaften (TOC-Gehalt, Nährstoffe, Wasserhaltefähigkeit) höher sein als sonst üblich (im Vergleich zu Deichen in MV: Standard 1-2 Mal pro Jahr). Diese Aspekte sollten im Pflegevertrag mit aufgenommen werden. Hilfreiche Unterhaltungsstrategien finden sich in [1], [5].

### 5.6.2. Vegetation auf Deichdeckschichten aus Asche-Gemischen

Die Etablierung einer gesunden, dichten Grasnarbe auf Deichen mit einer Deckschicht aus Asche-Gemischen erfordert eine zusätzliche Oberbodenschicht, für die o.g. Empfehlungen analog gelten. Für die Oberbodenschicht wird eine Schichtdicke von 20-40 cm empfohlen. Die Böschung darunter sollte abgetrept werden, um ein Abgleiten des Oberbodens auf der sonst vergleichsweise glatten Deckschicht aus Asche zu verhindern. Alternativ kann ein Erosionsschutzprodukt (GMA) eingesetzt werden.

Der Oberboden sollte mit einem Verdichtungsgrad von über 90 % angedrückt werden. Dies gelingt am besten bei optimalem Wassergehalt.

Die Empfehlungen zur Ansaat aus Abschnitt 5.6.1 gelten entsprechend. Auf Grundlage der Versuche mit verlegten vorgefertigten Grassoden auf dem polnischen Forschungsdeich wird diese Begrünungsvariante nicht empfohlen. Bei Anwendung einer Nassansaat sollte dem Gemisch u.a. mineralischer Langzeitdünger und ein Neutralisationsmittel (bzgl. pH der Deckschicht) beigemischt werden.

Der wichtigste Unterschied zu Deichen aus BG sind die fehlenden Nährstoffe und ein ggf. hoher pH-Wert. Deshalb ist eine ausreichende Nährstoffversorgung während der Vegetationsperiode besonders zu beachten.

### Schrifttum

- [1] EAK 2002. Empfehlungen für Küstenschutzwerke, korrigierte Ausgabe 2007, *Die Küste* 65, KFKi (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen), 589 S.
- [2] DIN EN ISO 14688-2 Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen 2004 (Tabelle 5).
- [3] NLWKN 2011. Qualitätssicherung für den Kleieinbau. NLWKN Empfehlung.
- [4] ZTV-W-205 1992. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau für Erdarbeiten.
- [5] DIN 19712. Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern, Jan. 2013.
- [6] DWA-M 507. DWA Regelwerk, Merkblatt DWA-M 507-1, Deiche an Fließgewässern Teil 1: Planung, Bau und Betrieb, Dez. 2011.
- [7] BAW EAO 2002. Empfehlungen zur Anwendung von Oberflächendichtungen an [...] Wasserstraßen, *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau* 85, 30 S.
- [8] ZTV-W-210 2006. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau für Böschungs- und Sohlensicherung, 14 S.
- [9] DIN EN 1538: 2010: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Schlitzwände.
- [10] Midwest 2014. Webseite von Midwest Bio-Systems Inc. [www.midwestbiosystems.com/system.html](http://www.midwestbiosystems.com/system.html) [zitiert 15.01.2015].
- [11] Cantré, S. & Schulz, H. 2011. Innovative Baggergutentwässerung mit geotextilen Schläuchen – ein mobiles System im Feldversuch, *Wasser und Abfall* 13 (3): 24 - 29.
- [12] SMOCS 2011. Sustainable Management of Contaminated Sediments – Guideline. 32 S. Online verfügbar: [www.smocs.eu](http://www.smocs.eu).
- [13] Herrier, G., Leconte, P., Nerinx, N., Bonelli, S., Mercier, F., Fry, J.-J., Tachker, P. & Puiatti, D. 2014. Lime treated soil as an erosion-resistant material for hydraulic earthen structures: state of the art and presentation of the French DIGUE.ELITE project, *Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction*, Rostock: 75-84. Online: [www.dredgdikes.eu](http://www.dredgdikes.eu).
- [14] Ecotech 2008. Ogólna Specyfikacja Techniczna: Ulepszenie Gruntów Spoivem Tefra 15.
- [15] DIN 19731. Bodenbeschaffenheit, Verwertung von Bodenmaterial,
- [16] DIN 18915. Vegetationstechnik im Landschaftsbau, Bodenarbeiten

- [17] FGSV 2005b. Technische Lieferbedingungen für Geokunststoffe im Erdbau des Straßenbaues (TL Geok E-StB 05) – 549.
- [18] FGSV 2005a. Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaues (M Geok E-StB) – 535.
- [19] FGSV 2005c. Checklisten für die Anwendung von Geotextilien und Geogittern im Erdbau des Straßenbaues (C Geok E-StB) – 535/1.
- [20] EAG-GTD: Empfehlungen für die Anwendung von geosynthetischen Tondichtungsbahnen. Empfehlungen des Arbeitskreises 5.1 „Kunststoffe in der Geotechnik und für den Wasserbau“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik DGGT. Ernst & Sohn, 2002.
- [21] BAM 2014. Richtlinie für die Zulassung von Kunststoff-Dränelementen für Deponieoberflächenabdichtungen, BAM FB 4.3, 5. Auflage, 31 S. Online: [www.bam.de](http://www.bam.de).
- [22] EN 1997-1. Eurocode 7- Geotechnical design - Part 1: General rules, 1997.
- [23] LAGA 2003. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen – Technische Regeln. Seit 6.11.2003 als M20. Erich Schmidt, Berlin 2004; 128 S. Online verfügbar: [www.laga-online.de](http://www.laga-online.de) [zitiert 16.12.2014].
- [24] ZTVE-StB 09. Floss, R. (Ed.) 2009. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Kommentar und Leitlinien mit Kompendium Erd- und Felsbau, 4. Auflage, 660 S.
- [25] BBodSchV 1999. Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung as version vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554). Letzte Änderung durch Art. 5 §31 der Verordnung vom 24.02.2012 (BGBl. I S. 212), 34 S. Online: [www.gesetze-im-internet.de](http://www.gesetze-im-internet.de) [zitiert 16.12.2014].
- [26] RGMInStB93Bek 1996. Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau.
- [27] Saathoff, F. 2001. Geokunststoffe in der Geotechnik und im Wasserbau, *Grundbautaschenbuch Teil 2*: 673 - 746. Berlin, Ernst & Sohn.
- [28] DIN EN ISO 9001. Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen.
- [29] CEN/TR 15019. Geotextiles and geotextile-related products. On-site quality control, 2006.
- [30] DIN 18200. Übereinstimmungsnachweis für Bauprodukte - Werkseigene Produktionskontrolle, Fremdüberwachung und Zertifizierung von Produkten.
- [31] Saathoff, F. 2005. E 5-5: Qualitätsüberwachung für Geotextilien (Entwurf), *Die Bautechnik*, **82**(9): 590-592.
- [32] Wilmers, W. 2009. Qualitätssicherung bei der Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau, *BauPortal* 9/2009: 530-537.
- [33] DIN EN 13252. Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Geforderte Eigenschaften für die Anwendung in Dränanlagen.
- [34] BAM 2013. Richtlinie für die Anforderungen an die Qualifikation und die Aufgaben einer fremdprüfenden Stelle für Kunststoffkomponenten im Deponiebau, BAM FB 4.3, 7. Auflage, 16 S. Zudem: Anlagen 3, 4.3, 5. Online: [www.bam.de](http://www.bam.de).
- [35] Saathoff, F. 2006. Beispiele zur Sanierung und Ertüchtigung von Deichen mit Geokunststoffen, 2. Symposium Sicherung von Dämmen, Deichen und Stauanlagen, Universität Siegen, 9./10.2.2006.
- [36] EBGeo – Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2010.
- [37] Thomas, H. & Cantré, S. 2009. Applications of low-budget photogrammetry in the geotechnical laboratory, *The Photogrammetric Record* **128**(24): 332 - 350.
- [38] Morscheck, G. & Henneberg, M. 2012. Einsatz von gereiftem Nassbaggergut als Rekultivierungssubstrat in Oberflächenabdichtungssystemen, report for the Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, 78 S.
- [39] FLL 2014. Webseite der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e.V., [www.fll.de](http://www.fll.de) [zitiert: 16.12.2014].
- [40] DIN 19657. Sicherung von Gewässern, Deichen und Küstendünen; Richtlinie. Ausgabe 1973-09.
- [41] Vavrina, L. 2012. Bewertung der Schutzfunktion bewachsener Deichbinnenböschungen gegen Erosion. Doktorarbeit, Essen: VGE-Verlag.
- [42] Henneberg, M. 2014a. Begrünungsversuche im Rahmen des EU Projektes DredgDikes. Prüfung des Auflauf- und Anwuchsverhaltens [...] in einem Gefäßversuch. Abschlussbericht, 41 S. Online: [www.dredgdikes.eu](http://www.dredgdikes.eu).
- [43] Henneberg, M. 2014b. Begrünungsversuche im Rahmen des EU Projektes DredgDikes. Parzellenversuch auf dem Pilotdeich Körkwitzer Bach [...]. Bericht, 27 S. Online: [www.dredgdikes.eu](http://www.dredgdikes.eu).

## 6. DEICHUNTERHALTUNG UND MONITORING

Der Betrieb und die Unterhaltung von Deichen ist im Allgemeinen gut dokumentiert [1], [2], [3]. Die Deichunterhaltung betrifft die Pflege der Vegetation, Wühltiere, Erosion und Böschungsabtrag, Setzungen, Sickerströmungen, globale und lokale Standsicherheit, Rissbildung und Übergänge zu Bauwerken. Viele dieser Aspekte sind unabhängig von den Erdstoffen aus denen der Deich besteht und somit in gleicher Weise gültig für Deiche aus Baggergut und Sand-Asche-Gemischen, wie die Sicherstellung der langfristigen Standsicherheit und Funktionalität und die langfristige Überwachung von Verformungen. Andererseits gibt es spezielle Aspekte der Deichunterhaltung und -beobachtung, die beim Einsatz von BG und Aschen berücksichtigt werden müssen, z.B. bezüglich der Vegetationsdecke und die Erhaltung der durchschnittlichen hydraulischen Leitfähigkeit (Rissbildung, Bodenbildungsprozesse). Deichinspektionen werden in der Standardliteratur ausführlich besprochen, inklusive der Untersuchungen, Instrumentierung und Monitoring, z.B. zur Überwachung des Sickerwassers.

In Mecklenburg-Vorpommern wird nur an Flussdeichen eine jährliche Deichschau durchgeführt, wie im Landeswassergesetz gefordert [5]. Die Deichschau soll von den Deichverbänden bzw. den Wasser- und Bodenverbänden organisiert werden. Da es in MV keine Deichverbände gibt, wird deren Aufgabe i.d.R. von den StÄLU übernommen. An den Seedeichen werden nur ausgewählte und kritische Punkte im Rahmen der jährlichen Küstenbereisung der StÄLU begutachtet. Deiche aus Baggergut und Aschen sollten immer in die Liste der während der Küstenbereisung zu inspizierenden Objekte einbezogen werden, wenn nicht sogar eine separate jährliche Inspektion vorgesehen ist.

Im ersten Jahr sind häufigere Inspektionen nötig, um ausreichend Daten zu allen Einflüssen zu sammeln. Dies kann bereits im Rahmen des Monitoring-Programms vergeben werden, das in der Baugenehmigung festgelegt wird.

Im Folgenden werden Empfehlungen zur Unterhaltung und zum Monitoring von Deichen aus BG oder Aschen gegeben.

### 6.1. Unterhaltung und Monitoring von Deichen aus Baggergut

Wenn Deiche aus feinkörnigem BG hergestellt werden, und besonders dann, wenn diese organikreich sind, sind verschiedene Punkte besonderes zu beachten, z.B. die Anfälligkeit für Rissbildung und deren Gegenmaßnahmen, die Vegetationsentwicklung und -unterhaltung, Tieraktivität und das Monitoring der Sickerwasserqualität.

#### 6.1.1. Unterhaltung der Deckschicht und Ausbesserung von Rissen

Das Problem von Trocknungsrisen wird ausführlich in den Kapiteln 4 und 5 diskutiert. Treten Risse in einer kohäsiven Deckschicht aus BG während der Bauausführung auf, können verschiedene Maßnahmen ergriffen werden, z.B.:

- Füllen großer Risse mit dem gleichen BG, Verdichtung z.B. mit einem Vibrationsstampfer.
- Im Fall einer großen Anzahl an Rissen kann die Oberfläche ca. 50 cm tief aufgebrochen (z.B. mit einer Fräse) und dann wieder verdichtet werden. Die Erstschrumpfung sollte dann weitgehend abgeklungen sein, wodurch eine weitere Rissbildung minimiert wird.

Dennoch kann nicht sichergestellt werden, dass keine Risse in größerer Tiefe unterhalb der Oberfläche auftreten (in einer Deckschicht oder einem homogenen Deichkörper), was durch das hohe Saugspannungspotential im Baggergut ausgelöst werden kann; der kapillare Wassertransport zur Oberfläche führt dann mit der Zeit zur Entwässerung tieferer Schichten. Wenn die oberen 50 cm intakt (wiederhergestellt) sind und keine breiten Risse (mehrere cm klaffend) vorhanden sind, die bis auf den Stützkörper reichen, werden diese Risse in diesem Handbuch als weniger problematisch eingeschätzt. Die Erhaltung einer guten Oberfläche (Einfluss 50 cm) hat deshalb einen wesentlichen Effekt.

Sobald sich die Vegetation entwickelt hat, würde ein Fräsen der Oberfläche die Grasnarbe zerstören und sie müsste wieder etabliert werden. Es ist daher vorab einzuschätzen, ob das Auffüllen und Verdichten einzelner besonders großer Risse bei gut ausgebildeter Grasnarbe genügt. Bei einer großen Anzahl an Rissen ist das i.d.R. nicht effizient.

Informationen zur Frequenz der Deichinspektionen, in denen unter anderem auch Risse detektiert werden, sind in den entsprechenden Richtlinien und Empfehlungen zu Fluss- und Seedeichen zu finden.

### 6.1.2. Erhalt einer guten Vegetationsdecke

Die Vegetation entwickelt sich üblicherweise gut auf feinkörnigem, organikreichem BG. Aufgrund der guten Wasserhaltekapazität ist die Wasserverfügbarkeit für die Vegetation in Trockenphasen besser als bei sandigen Oberböden, die häufig zur Herstellung der Vegetationsschicht auf bindigen Deckschichten (z.B. Ton, Klei, Mergel) verwendet werden.

In der Regel wird sich innerhalb eines Jahres eine gleichmäßige Grasnarbe entwickeln. Anfangs können im BG enthaltene Samen zu erheblichem Aufwuchs von Pioniervegetation führen (z.B. Melde und Schilf), die das Wachstum der Ansaat verzögern können. Vor allem Melde und Schilf können durch einen frühen ersten Schnitt erfolgreich eingedämmt werden und nur in seltenen Fällen ist eine zweite Mahd dafür notwendig. Sobald das Gras aufwächst, beginnt es eine dichte Grasnarbe zu bilden und unterdrückt die Pioniervegetation dauerhaft.

Aufgrund der vorteilhaften Bodenfruchtbarkeit von organikreichem BG und in Zusammenhang mit der hohen Wasserspeicherfähigkeit kann es zu einem schnelleren und dichteren Aufwuchs der Ansaat kommen, als auf anderen Oberböden. Deshalb kann ein zusätzlicher Pflegeschnitt nötig sein, besonders während der ersten beiden Jahre.

Die zuständigen Institutionen müssen während ihrer Inspektionen entscheiden, wann das Gras gemäht werden muss und welche Technik verwendet werden soll. Sobald die ungewünschten Kräuter eine Flächenbedeckung von 20 % zeigen, sollte sofort gemäht werden. In den Pflegeplänen kann auch ein später Sommerschnitt gewählt werden (zumindest auf einem Teil der Flächen), um den Lebensraum für Insekten so lang wie möglich zu erhalten und die Samenproduktion zu fördern, die wiederum zu einer dichteren Grasnarbe beiträgt und damit zur Dauerhaftigkeit des Erosionsschutzes.

Der Zeitpunkt zur Qualitätskontrolle der Grasnarbe sollte im Frühling liegen, bevor die Vegetationsperiode beginnt, oder alternativ direkt nach dem Mähen (üblicherweise im Sommer). Im Rahmen dieser Qualitätskontrolle sollte der Bedeckungsgrad bestimmt werden und Flächen mit

geringer Vegetationsdichte (z.B. aufgrund von Tieraktivität) sollten sofort wieder angesät werden (dafür ist der Termin im Frühling vorzuziehen). Der Bedeckungsgrad und die Schäden an den Deichoberflächen können mit luftgestützten Aufnahmetechniken bestimmt werden (z.B. unbemannte luftgestützte Systeme UAS [4]).

Eine Beweidung mit Schafen wie auf den Nordseedeichen könnte eine Alternative zur intensiven Pflege sein. Die Tritte der Schafe reduzieren zudem die Rissbildung und die Aktivität von Wühltieren.

### 6.1.3. Unterhaltung bezüglich Schäden durch Tiere

Organikreiches BG zur Herstellung eines homogenen Deiches oder von Deckschichten auf Seedeichen aus lediglich einer Materialschicht ist wühltergefährdet. Die vergleichsweise weichen und leichten Eigenschaften des feinkörnigen BG (trotz guter Verdichtung), zusammen mit den Rissen (die von Wühltieren ausgebaut werden), der hohen Stabilität gegen innere Erosion (standsichere Wühltergänge) und ein erhöhtes Nahrungsangebot (Wurzeln, Samen und andere organische Bestandteile) fördern die Aktivität von Wühltieren und anderen Tieren, wie Kaninchen, Füchsen, Marderhunden, Wiesel und Wildschweinen.

Diesem Problem sollte mit Standardmethoden begegnet werden, wie der Beseitigung von Wühlstellen oder der Beweidung durch Schafe (s.o.). Im Projekt DredgDikes konnte auf dem Rostocker Forschungsdeich eine ausgeprägte Wühlteraktivität festgestellt werden, jedoch ohne Einfluss auf die Standsicherheit. Anfängliche Sickerwasseraustritte auf der landseitigen Böschung wurden nur im ersten Jahr der Untersuchungen festgestellt. Ohne zusätzliche Maßnahmen wurden im Folgejahr keine weiteren Wasseraustritte aus Wühltergängen beobachtet. Aus diesem Grund ist die Inspektion und die Bewertung des Ausmaßes der Wühlteraktivität entscheidend.

### 6.1.4. Sickerwassermonitoring

Salze und Nährstoffe können durch Sickerwasser (aus Regenwasser oder Durchströmung) ausgewaschen werden. Diese Erfahrung wurde auch im Projekt DredgDikes und in anderen Anwendungen mit Brackwasser-BG in MV gemacht. Zudem können wechselnde Redox-Bedingungen das Ausfällen von Eisenoxiden bewirken, die häufig in BG enthalten sind. Deshalb sollte

bei allen Deichbauprojekten mit BG ein Sickerwassermonitoring vorgesehen werden, auch wenn das Material nicht kontaminiert ist. Zur Sickerwasserbeprobung sollten Standrohre an verschiedenen Stellen entlang des Deiches eingebaut werden. Die Randbedingungen, z.B. die Anzahl an Standrohren und die Probenahme- und Analysefrequenz, sollten zusammen mit der Genehmigungsbehörde (z.B. Naturschutzbehörde) festgelegt werden. Die Standrohre sollten zudem zur automatischen elektronischen Messung der Sickerlinie im Deichkörper und der Grundwasserstände im Vor- und Hinterland genutzt werden. Es sollten mehrere Referenzquerschnitte definiert werden, mit mindestens drei Standrohren je Querschnitt. Ihre exakte Position und die Entscheidung über die tatsächliche Anzahl an Referenzabschnitten und deren Instrumentierung unterliegen einer auf Funktion basierenden Expertenentscheidung im Rahmen der Genehmigungsplanung (z.B. in einer Umweltverträglichkeitsstudie oder einem Landschaftspflegerischen Begleitplan).

Wenn verschiedene BG-Chargen in einem größeren Deich eingebaut werden, sollten bei der Entscheidung über die Referenzabschnitte die Materialeigenschaften mit berücksichtigt werden (z.B. verschiedene Klassifizierungen nach LAGA). Exponierte Standorte und Bereiche in denen ein Hochwasser zuerst angreift sollten ebenso berücksichtigt werden wie besondere Merkmale im Umfeld, auf dem Vorland und im Untergrund.

Der wichtigste Aspekt bezüglich der Auswaschung löslicher Stoffe aus BG ist der Grundwasserpfad. Deshalb sollten bei der Anordnung der Standrohre auch Grundwasserfließrichtungen und die Bodeneigenschaften des Untergrundes mit einbezogen werden.

Die Probenahme sollte mindestens einmal pro Jahr, besser während verschiedener Hochwasserereignisse vorgenommen werden. Die Analyseergebnisse des ersten Jahres sollten zur Entscheidung über das weitere Langzeit-Untersuchungsprogramm genutzt werden.

Table 6.1. Übersicht über die empfohlenen Unterhaltungs- und Monitoringmaßnahmen für Deiche aus Baggergut

Thema	Unterhaltungsmaßnahmen	Relevante Dokumente	Verantwortlichkeiten
Allgemein	Eine allgemeine Deichinspektion für Unterhaltung, Pflege und Monitoring ist eine von grundlegender Bedeutung für den Betrieb von Deichen und anderen Hochwasserschutzbauwerken.	DIN 19712 (Kapitel 15) [2] DIN 18310 (ATV Sicherungsarbeiten an Gewässern, Deichen ...) [6] Din 19657 [7] The International Levee Handbook [3]	Deichverbände, in MV untere Naturschutzbehörden (StÄLU) für Deiche 1. Ordnung. Deich- bzw. Wasser- und Bodenverbände für alle anderen Deiche.
Rissbildung	<i>Nur im Fall von Seedeichen:</i> Füllen von Rissen während der Bauausführung oder nach Fertigstellung. Aufräsen und Wiederverdichten der gerissenen Deichoberflächen während der Bauausführung oder nach Fertigstellung.	EAK 2002 [1] The International Levee Handbook [3]	
Vegetation	Früher Schnitt zur Unterdrückung von Unkräutern (Bodeneigene Samen) Regelmäßige Mahd, ggf. ein zusätzlicher Schnitt pro Jahr aufgrund der guten Bodenfruchtbarkeit des BG (wird von den zuständigen Behörden festgelegt)	EAK 2002 [1] Interne Unterhaltungsrichtlinien der zuständigen Behörden	
Tiere	Verfüllung von Wühltiergängen (wenn groß oder viele), Reparatur größerer Beschädigungen durch Tiere (z.B. Biber- oder Fuchshöhlen), Beweidung durch Schafe um die Oberflächenverdichtung aufrecht zu halten was gegen Wühltiere hilft.	EAK 2002 [1] The International Levee Handbook [3]	
Sickerwasser	Sickerwassermonitoring mit Schwerpunkt Salze und Nährstoffe (bei nicht kontaminiertem BG), Standrohre für Probenahme und Messungen.	Bericht zu Langzeit-Lysimeterexperimenten in Rostock [8]	

## 6.2. Unterhaltung und Monitoring von Deichen aus Asche-Gemischen

Bislang existieren keine Empfehlungen für die Unterhaltung von Deichen aus Aschen in Deutschland. Es wird deshalb empfohlen, grundsätzlich den Monitoring-Methoden für Flussdeiche zu folgen.

Für das Sickerwassermonitoring gelten die Empfehlungen für BG entsprechend. Die automatische Messung des Wasserspiegels in Piezometern wird empfohlen, um die Probenahmezeitpunkte genauer zu definieren.

Die Ergebnisse vom Danziger Forschungsdeich zeigen, dass aufgrund der niedrigen Schrumpfraten der verwendeten Gemische keine Schrumpfrisse entstehen. Zudem ist keine Wühltieraktivität zu verzeichnen, vor allem wegen der hohen pH-Werte und der guten Verdichtung in Verbindung mit langfristigen Zementierungseffekten, welche die Materialien zusätzlich verstärken.

Andererseits ist die Begrünung ein wichtiger Punkt für Pflege-, Unterhaltungs- und Monitoringmaßnahmen, besonders dann, wenn nur eine geringmächtige Oberbodenschicht auf einer Dichtung aus Asche-Gemischen vorhanden ist. Eine regelmäßige visuelle Bewertung der Vegetationsdecke während der ersten beiden Jahre nach der Ansaat wird empfohlen, gefolgt von den standardmäßigen periodischen Besichtigungen durch die zuständigen Institutionen. Zu diesem Punkt sind zudem weitere wissenschaftliche Untersuchungen erforderlich.

## 6.3. Zuständigkeiten

In Mecklenburg-Vorpommern regelt das Landeswassergesetz MV [5] den Küsten- und Hochwasserschutz, inklusive der Zuständigkeiten. Die Staatlichen Ämter für Landwirtschaft und Umwelt (StÄLU) sind verantwortlich für

die technische Überwachung in den Bereichen des Umwelt-, Landschafts-, Gewässer-, Boden- und Küstenschutzes und insbesondere für die Landesschutzdeiche. Die Behörden sind zudem mit der Eignungsprüfung von Deichbaumaterial sowie der Planung und Genehmigung von Küsten- und Hochwasserschutzanlagen betraut und tragen die Verantwortung für die Überwachung der Landesschutzdeiche (in Vertretung der nicht existierenden Deichverbände). Die Wasser- und Bodenverbände sind für die untergeordneten Deiche zuständig. Bei Deichneubauprojekten oder Deichrekonstruktionen sind Naturschutzaspekte von großer Bedeutung. Dafür sind die verschiedenen Naturschutzbehörden zuständig.

## Schrifttum

- [1] EAK 2002. Empfehlungen für Küstenschutzwerke, korrigierte Ausgabe 2007, *Die Küste* 65, KFKi (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen), 589 S.
- [2] DIN 19712-2013. Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern. Beuth: Berlin, 68 S.
- [3] CIRIA 2013. The International Levee Handbook, 1350 S. Online verfügbar: [www.ciria.org](http://www.ciria.org).
- [4] Naumann, M., Bill, R., Niemeyer, F. & Nitschke, E. 2014. Deformation analysis of dikes using unmanned aerial systems, *Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction*, Rostock, 119-126.
- [5] LWaG MV 1992. Water Act of the federal state of Mecklenburg-Vorpommern (Wassergesetz des Landes MV). Online verfügbar: [www.landesrecht-mv.de](http://www.landesrecht-mv.de).
- [6] DIN 18310. Sicherungsarbeiten an Gewässern, Deichen und Küstendünen. Beuth Verlag, 2000.
- [7] DIN 19657. Sicherungen von Gewässern, Deichen und Küstendünen; Richtlinien. Beuth, 1973.
- [8] Henneberg, M. & Neumann, R. 2011. 10 Jahre Lysimeterversuche zum Einsatz von gereiftem Baggergut zur Bodenverbesserung in der Landwirtschaft, report, 37 S. Online verfügbar: [www.htg-baggergut.de](http://www.htg-baggergut.de).

## GLOSSAR

Dieses Glossar enthält eine Auswahl für dieses Handbuch wichtiger Begriffe, geordnet nach den Themen Deiche, Baggergut, Asche und Abfallverwertung. Umfangreiche Glossare zu Baggergut, Abfallverwertung, Wasserbau und Geokunststoffen finden sich z.B. in [1], Annex I in [2], [7].

### Deiche

#### **Außenböschung**

Wasserseitige Böschung eines Seedeiches.

#### **Binnenböschung**

Landseitige Böschung eines Seedeiches.

#### **Deich**

Ein Deich ist ein Dammbauwerk zum Schutz des Hinterlandes vor Überflutungen, das i.d.R. aus Erdstoffen besteht und nur temporär belastet wird (z.B. bei extremen Hochwasserereignissen). Eine wichtige Unterscheidung besteht zwischen Fluss- und Seedeichen aufgrund der unterschiedlichen Funktionen [3].

#### **Flussdeich**

Ein Deich, der vor Hochwasser in einem Fluss schützt.

#### **Innenböschung**

s. Binnenböschung, landseitige Böschung.

#### **Landseitige Böschung**

Die landseitige Böschung eines Hochwasserschutzbauwerks ist die dem Wasser abgewandte Böschung. Sie wird nur im Fall von überströmendem Wasser belastet.

#### **Luftseitige Böschung**

s. landseitige Böschung.

#### **Polder**

Ein Polder ist ein tief liegendes Areal in der Nähe von Gewässern, das von umschlossen ist. In Aufbereitungsanlagen für BG werden die Becken zum Aufspülen ebenfalls als Polder bezeichnet (Spülpolder).

#### **Seedeich**

Ein Deich, der tief liegende Küstenabschnitte vor Sturmfluten und Sturmhochwassern schützt.

#### **Überströmen**

Überströmen im Sinne dieses Handbuchs ist der Begriff für Wasser, das aufgrund eines erhöhten statischen

Wasserspiegels über die Krone eines Hochwasserschutzbauwerks fließt.

#### **Wasserseitige Böschung**

Die wasserseitige Böschung eines Hochwasserschutzbauwerks ist die dem Wasser zugewandte Böschung. Sie wird während eines Hochwassers direkt belastet.

#### **Wellenüberschlag / Wellenüberlauf**

Wellenüberschlag ist der Begriff für Wasser, das durch auflaufende Wellen über die Krone tritt.

### Baggergut

#### **Aufbereitung von Baggergut / Behandlung**

Aufbereitung oder Behandlung bezeichnet gezielte und zeitlich begrenzte Verfahren zur Verbesserung der Eigenschaften des Baggerguts und / oder der Verminderung seiner Schädlichkeit zum Zweck der weiteren Verwertung oder der Beseitigung [4].

#### **Baggergut (BG)**

Baggergut ist Boden, Bodenmaterial oder Aushubmaterial mit unterschiedlichem Anteil an mineralischen und organischen Bestandteilen, das im Zuge der Gewässerunterhaltung und bei Gewässerausbaumaßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs und des Wasserabflusses im oder am Gewässer anfällt [4].

#### **Biologischer Abbau**

Abbau von Pflanzenfasern/ organischer Substanz durch Mikroorganismen. Diese Prozesse können technologisch verstärkt werden und sie fördern den Abbau von Schadstoffen, z.B. von Mineralölen.

#### **Brackwasser-BG**

BG aus Brackwasser besteht aus Sand und Schluff sowie natürlichen Ablagerungen wie Mergel und Schlick. Der Masseanteil der organischen Substanz überschreitet häufig 10 %. Auf Spülfeldern in M-V (besonders in der Nähe der Wasserlose) wurden Tonanteile von über 40 % und Kalkgehalte von bis zu 10 % gefunden.

#### **Chemische Einbindung**

Die chemische Einbindung beruht auf der Immobilisierung von anorganischen Schadstoffen durch Zugabe von Stoffen, die eine Elution der Schadstoffe aus dem behandelten Sedimentmaterial verringern [4].

**Entwässerung**

Entwässerung ist die Abtrennung des Wassers von den Feststoffen. Sande und Kiese können mit geringem technischem Aufwand in Entwässerungsfeldern bzw. Klassiergerinnen oder mit Entwässerungssieben, Schlicke dagegen natürlich in Entwässerungsfeldern oder technisch mit Siebband- oder Kammerfilterpressen entwässert werden. Die Entwässerung ist das am weitesten verbreitete Verfahren zur Beeinflussung der bodenmechanischen Eigenschaften von BG. Sie ist häufig Voraussetzung für die weitere Behandlung [4].

**Feinkörniges Baggergut**

Im Kontext dieses Handbuchs BG mit > 15 % Feinstkorn (< 0.002 mm). Besteht i.d.R. aus 15 – 35 % Ton, 25 – 55 % Schluff und 20 – 55 % Sand.

**Klassierung**

Klassierung im Kontext des Sedimentmanagements und der Sedimentaufbereitung ist die Trennung verschiedener Kornfraktionen durch Siebe, Hydrozyklone oder in Sedimentationsbecken (Poldern). Das bezieht sich ggf. auch auf die Trennung von weniger schadstoffbelasteten gröberen von höher kontaminierten feineren Kornfraktionen (Korngrößenklassierung).

**Klassifizierung**

Im Kontext der Materialklassifizierung muss das BG nach verschiedenen Richtlinien und Verordnungen bezüglich der Schadstoffbelastung klassifiziert werden.

**Limnisches BG**

Limnisches BG enthält oft weniger Schluff als Brackwasser-BG. Dafür können OS- und Kalkgehalte über 30 % der Gesamtmasse ausmachen. In MV wurden Tongehalte von 2 bis 30 %, TOC-Werte von unter 5 % bis 30 % und Kalkgehalte von 0 bis 70 % gefunden.

**Miete**

Eine Möglichkeit, Baggergut zu lagern. Mieten zur Entwässerung sind i.d.R. bis zu 2,50 m hoch und haben einen dreieckigen Querschnitt mit steilen Böschungen. Großmieten zur Lagerung auf der Baustelle oder auf dem Baustofflager können mehrere Meter hoch sein.

**Mietenumsetzer**

Mietenumsetzer werden zum Auf- und Umsetzen der Entwässerungsmieten verwendet. Das Umsetzen unterstützt die Entwässerung und verbessert die

Homogenität des Materials. Großmieten werden i.d.R. mit Baggern aufgesetzt.

**Mischboden**

s. sandig-lehmiges BG

**Nassgebaggerter Sand**

Sand (> 0,063 mm) mit einem maximalen Feinkornanteil von < 10 % und einem TOC < 5 %, der bei Nassbaggerarbeiten aus einem Gewässer entnommen wurde.

**Organik- und kalkreiches Baggergut**

Im Kontext dieses Handbuchs TOC > 3 % (ca. 5 % OS) und Kalkgehalt > 5 %.

**Reifung / gereiftes BG**

Der Reifeprozess bezieht sich in erster Linie auf die Entwässerung des BG, begleitet von Mineralisierungs- und Bodenbildungsprozessen. Gereiftes BG ist deshalb Material mit deutlich reduziertem Wassergehalt und mindestens begonnener aerober Bodenbildung.

**Sandig-lehmiges BG**

Sandig-lehmiges BG im Kontext dieses Handbuchs ist BG mit einem hohen Ungleichförmigkeitsgrad und einem erheblichen Anteil an Fein(st)korn. Dieses Material besteht i.d.R. aus 5-15 % Ton, 5-25 % Schluff und 65-90 % (Fein- bis Mittel-) Sand.

**Verwendung von Baggergut**

Verwendung ist die unmittelbare Nutzung des Baggerguts ohne vorgeschaltete Behandlung [4].

**Verwertung von Baggergut**

Einsatz von Baggergut nach vorheriger Behandlung als Substitut zur Schonung natürlicher Ressourcen [4].

**Wiederverwendung von Baggergut**

Wiederverwendung bedeutet jede Maßnahme, mit der Materialien oder Produkte, die kein Abfall sind, für den Zweck, für den sie gedacht sind bzw. hergestellt wurden, erneut eingesetzt werden [5]. Für Baggergut ist diese Art der Wiederverwendung nicht möglich.

**Aschen****Rostasche**

Rostasche fällt im Verbrennungsteil (im Rost) der Feuerungsanlage an. In der Grob- oder Rostasche finden sich neben den festen Verbrennungsrückständen wie Kohle auch mineralische Verunreinigungen des

Brennstoffes wie z.B. Sand, Erde oder Steine. Die Korngrößen bewegen sich im Bereich von 0,1 - 50 mm.

### Aschen

Asche ist der anorganische Rückstand, der laut DIN 51719 durch Verbrennung von Kohle im Ofen bei 815 °C verbleibt. Asche ist ein Gemisch von Alkali-, Erdalkali-, Eisen- und Aluminiumsalzen wie Oxiden, Sulfaten, Silikaten und Phosphaten. Nach dem Europäischen Abfallkatalog [6] sind Aschen als Abfälle zu betrachten (100101 und 100102), die ggf. verwertet oder (länderspezifisch z.B. nach REACH) auch als Baustoff zertifiziert werden können. Die wichtigsten Aschen für dieses Handbuch sind Flug- und Rostaschen.

### Flugasche

Der feste, disperse (teilchenförmige, partikelförmige, staubförmige) Rückstand von Verbrennungen, der auf Grund seiner hohen Dispersität (Feinheit) mit den Rauchgasen ausgetragen wird. Sie enthält Partikel mit Durchmessern von 1-100 µm (Ø 20-25 µm).

## Geokunststoffe

### Geoverbundstoff

Industriell vorgefertigtes zusammengesetztes Material; mindestens ein Bestandteil ist ein Geokunststoff [7].

### Geogitter

Eine flächenhafte, polymere Struktur aus einem regelmäßigen offenen Netzwerk, dessen Zuelemente durch Extrudieren, Verbinden oder Verflechten miteinander verbunden sind und dessen Öffnungen größer als die Bestandteile sind [7].

### Geokunststoff

Oberbegriff, der ein Produkt beschreibt, bei dem mindestens ein Bestandteil aus synthetischem oder natürlichem Polymerwerkstoff hergestellt wurde, in Form eines Flächengebildes, eines Streifens oder einer dreidimensionalen Struktur, das bei geotechnischen [...] Anwendungen [...] im Kontakt mit Boden und/oder anderen Baustoffen verwendet wird [7].

### Geosynthetische Dichtungsbahn

Ein geosynthetisches Material niedriger Durchlässigkeit, das bei geotechnischen Anwendungen [...] dazu verwendet wird, das Durchströmen einer Flüssigkeit durch das Bauwerk zu verringern oder zu vermeiden [7].

### Geosynthetische Tondichtungsbahn

Ein fabrikgefertigtes Flächengebilde aus geosynthetischen Materialien in Form eines Flächengebildes, das als Dichtung wirkt. Die Dichtfunktion wird i.W. durch Ton erfüllt, der zwischen Lagen aus geosynthetischen Materialien eingeschlossen ist [7].

### Geotextil

Ein flächenhaftes, durchlässiges, polymeres (synthetisches oder natürliches) Textil, entweder Vliesstoff, Maschenware oder Gewebe, das bei geotechnischen Anwendungen [...] für den Kontakt im Boden und/oder einem anderen Material verwendet wird [7].

## Allgemeine Begriffe Abfallverwertung

### Vermeidung

Vermeidung bezieht sich auf alle Maßnahmen, die ergriffen werden, bevor eine Substanz, ein Material oder ein Produkt zu Abfall wird, zur Reduktion der Abfallmenge (durch Wiederverwendung oder Verlängerung der Produktlebensdauer), der Einflüsse des Abfalls auf Umwelt und Gesundheit und des Anteils an schädlichen Substanzen in Materialien und Produkten [5].

### Verwendung

Unmittelbare Nutzung ohne vorherige Behandlung [8].

### Wiederverwendung

Wiederverwendung bedeutet jede Maßnahme, mit der Materialien oder Produkte, die kein Abfall sind, für den Zweck, für den sie gedacht sind bzw. hergestellt wurden, erneut eingesetzt werden [5].

### Verwertung

Einsatz von Abfall nach Behandlung, z.B. als Substitut natürlicher Ressourcen [8].

### Beseitigung / Entsorgung

Die Beseitigung umfasst alle Maßnahmen, die nicht zur Wiederverwertung von Abfällen führen, auch dann, wenn später Substanzen aus dem Abfall wiedergewonnen werden oder Energie gewonnen wird [5].

### Europäischer Abfallkatalog

Der europäische Abfallkatalog [6] bezeichnet Abfälle und dient der Einstufung bzgl. ihrer Überwachungsbedürftigkeit. Er wurde in einer Entscheidung der EU festgelegt. In Deutschland wurde diese Entscheidung in der Abfallverzeichnisverordnung umgesetzt.

## Schrifttum

- [1] CEDA 2015. Online dictionary on hydraulic construction, dredging and management of DM <http://www.waterdictionary.info/> [cited 15.01.2015].
- [2] Köthe, H. 2002. Baggergut im Kontext nationaler und europäischer Regelungen, Präsentation auf dem 2. Rostocker Baggergutseminar. Online: [www.sednet.org/download/DGE-Part-I-Legislation.pdf](http://www.sednet.org/download/DGE-Part-I-Legislation.pdf).
- [3] DIN 19712-2013. Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern.
- [4] HTG 2006. Verwertung von feinkörnigem Baggergut im Bereich der deutschen Küste, Fachbericht der HTG Fachausschuss Baggergut, 37 S. Online: [www.htg-baggergut.de](http://www.htg-baggergut.de) [zitiert 16.12.2014].
- [5] EC 2008. Directive 2008/98/EC Abfallrahmenrichtlinie.
- [6] EC 2000. The European Waste Catalogue (2000/532/EC).
- [7] EN ISO 10318: Geosynthetics – Terms and definitions.
- [8] HTG 2002. Positionspapier Umgang mit Baggergut, Definitionen, Erläuterungen, Empfehlungen, 23 S. Online: [www.htg-baggergut.de/](http://www.htg-baggergut.de/) [zitiert 15.01.2015].

## ABKÜRZUNGEN

AT <sub>4</sub>	Atmungstest zur Prüfung der Abbauraten von OS in Abfällen zur Entsorgung	HELCOM	Helsinki Kommission
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung	HW	Hochwasser
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau	IAA	Industrielle Absetz- und Aufbereitungsanlage Rostock
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung	IMO	International Maritime Organisation
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung	KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz	LAGA M20	Empfehlungen zur Verwertung mineralischer Abfälle der LAGA
BG	Baggergut	LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
DredgDikes	Dredged Materials in Dike Construction – Implementation in the South Baltic Region using Geosynthetics and Soil Improvement	LBauO	Landesbauordnung
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall	LUNG	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern
EAK	Empfehlungen für Küstenschutzwerke	LWaG	Landeswassergesetz
EBGEO	Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen	METHA	Mechanische Trennung von Hafensediment, BG-Aufbereitungsanlage in Hamburg
EC7	Eurocode 7 Geotechnik	MV	Mecklenburg-Vorpommern
EEC	European Economic Community	NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
EPA	US Environmental Protection Agency	OSPAR	Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic
EPRI	Electric Power Research Institute	PIANC	The World Association for Waterborne Transport Infrastructure
ERDF	European Regional Development Fund	REACH	Regulation on Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
FA	Flugasche	StALU	Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt
FFH	Flora fauna habitat directive 92/43/EEC	UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz
GBR	Geosynthetische Dichtungsbahn	WBV	Wasser- und Bodenverband
GBR-C	Geosynthetische Tondichtungsbahn	WHG	Wasserhaushaltsgesetz
GCO	Geoverbundstoff	WSA	Wasser- und Schifffahrtsamt
GMA	Geomatte	Z0, Z1, Z2	Classification limits for soils for recovery according to LAGA M20
GSY	Geokunststoff	ZTV-W	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen, Wasserbau
GTO	Geotextilverwandtes Produkt		
GTX	Geotextil		

## NOMENKLATUR

C	Kohäsion	$\rho_{Pr}$	Proctordichte / optimale Trockendichte
$c_u$	UndrÄnierte Scherfestigkeit	OS	Organische Substanz
$c_{u,r}$	UndrÄnierte Scherfestigkeit, bestimmt an gestörten Proben	$I_p$	Plastizitätszahl
d	Korndurchmesser	$w_p$	Plastizitätsgrenze / Ausrollgrenze
$D_{Pr}$	Verdichtungsgrad	$q_s$	Spezifischer Abfluss / Permittivität
F	Fläche	TOC	Total organic carbon
fK	Feldkapazität	U	Ungleichförmigkeitsgrad (Kornverteilung)
Hs	Signifikante Wellenhöhe	$V_e$	Probenvolumen am Ende
Ic	Konsistenzindex	$V_i$	Anfangsprobenvolumen
$k_s$	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit / Wasserdurchlässigkeit	$V_s$	Volumetrisches Schrumpfmaß
$w_L$	Fließgrenze	$w, w_{nat}, w_{opt}$	Wassergehalt (natürlich, optimal)
GV	Glühverlust	$\gamma$	Wichte
		$\varphi$	Winkel der inneren Reibung

## DredgDikes PROJEKT-DOKUMENTE

Die folgenden Dokumente wurden im Rahmen des Projektes DredgDikes angefertigt. Sie enthalten zusätzliche Informationen über den Inhalt dieses Handbuchs hinaus. Sie können auf der Projektwebseite [www.dredgdikes.eu](http://www.dredgdikes.eu) heruntergeladen werden.

DredgDikes 2011-2015. DredgDikes Newsletter Nummer 1 (2011) – Nummer 9 (2015).

Henneberg, M. 2014a. Begrünungsversuche im Rahmen des EU Projektes DredgDikes. Prüfung des Auflauf- und Anwuchsverhaltens der Deichsaatmischung für Küstenschutzdeiche in einem Gefäßversuch. Abschlussbericht, 41 S.

Henneberg, M. 2014b. Begrünungsversuche im Rahmen des EU Projektes DredgDikes. Parzellenversuch auf dem Pilotdeich Körkwitzer Bach zur Prüfung des Auflauf- und Anwuchsverhaltens der Deichbegrünung unter verschiedenen Düngergaben und Saatbettbedingungen. Abschlussbericht, 27 S.

Nejrup, L.B. 2014. Legislation and the potential for utilisation of dredged material in Denmark. Report, Orbicon A/S, Roskilde, Denmark, 57 S.

Saathoff, F. & Cantré, S. (ed.) 2014. Proceedings of the Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction (ISBN 978-3-86009-409-9), 202 pp. Also available as print version in limited quantity.

Sikora, Z. & Duszynski, R. (ed.) 2014. Proceedings of the South Baltic Conference on New Technologies and Recent Developments in Flood Protection.

## LISTE DER VERÖFFENTLICHUNGEN IM PROJEKT DredgDikes

- Balachowski, L. & Sikora, Z. 2013. Mechanical Properties of Bottom Ash – Dredged Material Mixtures in Laboratory Tests, *Studia Geotechnica et Mechanica*, XXXV(3): 3-11.
- Balachowski, L. 2012: Mechanic Parameters of fly ash-sand mixtures from laboratory test, 7. *Rostocker Baggergutseminar*, Rostock: 59.
- Balachowski, L. 2014. Stability of the Inner Slope of the Polish DredgDikes Research Dike at Stationary Flow, *Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction*, Rostock: 105 - 110.
- Cantré, S. & Saathoff, F. 2013. Installation of fine-grained organic dredged materials in combination with geosynthetics in the German DredgDikes research dike facility, *Engineering Structures and Technologies* 5(3): 93 - 102.
- Cantré, S. & Saathoff, F. 2013. Investigation of dredged materials in combination with geosynthetics used in dike construction, *Procedia Engineering, Proceedings of the 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques* 57: 213 - 221.
- Cantré, S. & Saathoff, F. 2014. Untersuchungen zum Einsatz von Baggergut im Deichbau am Rostocker DredgDikes-Versuchsdeich, *Wasser und Abfall* 16(3): 14 - 20.
- Cantré, S., Große, A.-K., Neumann, R., Nitschke, E., Henneberg, M. & Saathoff, F. 2013. Fine-grained organic dredged materials for dike cover layers – material characterisation and experimental results, *WODCON XX: The Art of Dredging*, Brussels, Belgium – conference proceedings, 14 pp.
- Cantré, S., Nitschke, E. & Saathoff, F. 2012. Dredged Materials in Dike Construction - DredgDikes Project Overview, *WASCON 2012 Conference Proceedings*, Gothenburg: 4 pp.
- Cantré, S., Nitschke, E. & Saathoff, F. 2012. Verwendung von Baggergut aus dem Ostseeraum im Deichbau – erste Erkenntnisse aus dem Projekt DredgDikes, 7. *Rostocker Baggergutseminar*, Rostock: 45 - 57.
- Cantré, S., Nitschke, E. & Saathoff, F. 2013. Investigation of Fine-Grained Organic Dredged Materials from the Baltic Sea for Application in Dike Construction, *Proceedings of the GeSed International Conference*, Caen: 25 - 36.
- Cantré, S., Saathoff, F. & Duszynski, R. 2012. DredgDikes – Ein Kooperationsprojekt zum Einsatz von Baggergut im Deichbau, *Wasser & Abfall* 14(10): 10 - 14.
- Cantré, S., Saathoff, F., Große, A.-K. & Just, H. 2014. Two Research Dikes Made of Fine-Grained Organic Dredged Materials, *Proceedings of the South Baltic Conference on New Technologies and Recent Technologies in Flood Protection*: 8 pp.
- Cantré, S., Saathoff, F., Große, A.-K. & Nitschke, E. 2012. Dredged Materials in Dike Construction : First Results of the DredgDikes Large-Scale Field Tests in Rostock, *Proceedings of the 12th Baltic Sea Geotechnical Conference*: 281 - 285.
- Cantré, S., Saathoff, F., Nitschke, E., Große, A.-K. & Olschewski, J. 2014. Verwendung von Baggergut im Deichbau – Erkenntnisse aus dem Projekt DredgDikes, *Tagungsband zum 8. Rostocker Baggergutseminar*, Rostock: 51 - 66.
- Große, A.-K. & Saathoff, F. 2014. Geotechnical Characterization of Different Fine-Grained, Organic Dredged Material Batches from the Baltic Sea Area - Peculiarities and Adaptions, *Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction*, Rostock: 19 - 30.
- Große, A.-K., Cantré, S. & Saathoff, F. 2014. The Geotechnical Characterisation of Fine-Grained Organic Dredged Material From the Baltic Sea Area for Application in Dike Construction, *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Environmental Geotechnics*, Melbourne: 8 pp.
- Henneberg, M., Morscheck, G. & Neumann, R. 2014. Projekt DredgDikes: Umweltmonitoring beim Einsatz von aufbereitetem Baggergut im Deichbau, *Tagungsband zum 8. Rostocker Baggergutseminar*, Rostock.
- Naumann, M., Bill, R., Niemeyer, F. & Nitschke, E. 2014: Deformation Analysis of Dikes Using Unmanned Aerial Systems (UAS), *Proceedings of the South Baltic Conference on dredged materials in dike construction*, Rostock: 119 - 126.
- Neumann, R. & Henneberg, M. 2014. Legal Aspects for the Reuse of Dredged Material and the Application in Dike Constructions, *Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction*, Rostock: 189 - 194.

- Neumann, R. & Henneberg, M. 2014. The Project DredgDikes: Characterization of Chemical Properties of the Dredged Material and First Results on Vegetation Monitoring, *Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction*, Rostock: 31 - 44.
- Neumann, R. 2014. Environmental issues of dredged materials used in the DredgDikes Project in context with national legal aspects, *Proceedings of the South Baltic Conference on New Technologies and Recent Developments in Flood Protection*, Gdansk: 12 pp.
- Nitschke, E. 2014. Comparison of two Methods to Evaluate the Data from Seepage Tests at the German DredgDikes Research Dike, *Proceedings of the South Baltic Conference on New Technologies and Recent Developments in Flood Protection*, Gdansk: 8 pp.
- Nitschke, E., Cantré, S. & Saathoff, F. 2014. Full-Scale Seepage Experiments at the German DredgDikes Research Dike, *Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction*, Rostock: 53 - 59.
- Olschewski, J., Cantré, S. & Saathoff, F. 2014. Flume Experiments to Determine the Erosion Stability of the German DredgDikes Research Dike, *Proceedings of the South Baltic Conference on New Technologies and Recent Developments in Flood Protection*, Gdansk: 11 pp.
- Olschewski, J., Cantré, S. & Saathoff, F. 2014. Overflowing Tests on the Rostock DredgDikes Research Dike, *Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction*, Rostock: 67 - 74.
- Ossowski, R. & Sikora, Z. 2012. Perspektywy Zastosowania Materialow Antropogenicznych W Kontekście Zielonej Geotechniki, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej* **59**: 65-71.
- Ossowski, R. & Wyroślak, M. 2012. Hybrydowa Technologia Wzmacniania Gruntu W Renowacji Walow Przeciwpowodziowych, [Hybrid Technology of Ground Improvement in Dike Renovation], *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 2012(4): 483-486.
- Ossowski, R. 2014. Selected Results and Conclusions from Large-Scale Dike Experiment at Polish Test Site, *Proceedings of the South Baltic Conference on New Technologies and Recent Developments in Flood Protection*, Gdansk: 6 pp.
- Ossowski, R., Sikora, Z., Duszyński, R. & Sawicki, J. 2014. Investigation on Water Infiltration and Water Content Changes in a Large-scale Experimental Test Dike, *Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction*, Rostock: 47 - 42.
- Saathoff, F. & Cantré, S. 2014. Geosynthetics and Dredged Materials in Dike Construction, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics*, Berlin: 10 pp.
- Saathoff, F. & Cantré, S. 2014. The Project DredgDikes, *Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction*, Rostock: 7 - 10.
- Saathoff, F., Cantré, S., Große, A.-K. & Nitschke, E. 2014. Deichdeckschichten aus feinkörnigem Baggergut aus dem Ostseeraum, *Proceedings HTG-Kongress 2014 zum 100jährigen Jubiläum der HTG*.
- Sikora, Z., Duszyński, R. & Cantré, S. 2013. Projekt DredgDikes – wykorzystanie urobku z robót czerpalnych do budowy walów przeciwpowodziowych, *Inżynieria Morska i Geotechnika* **34**(1): 64 - 68.
- Sikora, Z., Szczygielski, T. & Ossowski, R. 2012. Green geotechnics in practice and theory, *Proceedings of the 40<sup>th</sup> Annual Conference on Foundations*, Brno: 184-191
- Sikora, Z. & Ossowski, R. 2013. Geotechnical Aspects of Dike Construction Using Soil-Ash Composites, *Procedia Engineering, Proceedings of the 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques* **57**: 1029 - 1035.

