



BASF Polyurethanes GmbH

Werkstoff Elastocoast

Zusammenstellung der technischen Bemessungsgrundlagen für den Werkstoff Elastocoast

Bericht Nr. 90154-01

Hamburg, 30. Juni 2010



INGENIEURGESELLSCHAFT MBH

Inhalt	Seite
1 Einführung	1
1.1 Hintergrund und Veranlassung	1
1.2 Aufgabenstellung	1
1.3 Hinweise zur Anwendung der vorliegenden Unterlage	2
2 Kurze Produktvorstellung Elastocoast	3
2.1 Material und Eigenschaften	3
2.2 Vorhandene Unterlagen zum Werkstoff Elastocoast	4
2.3 Herstellungsprozess	4
2.4 Anwendungsbereiche und Referenzprojekte	6
3 Zusammenstellung der Anforderungen für die Herstellung eines Deckwerkes in Deutschland	7
3.1 Allgemeine Übersicht zu Deckwerken	7
3.2 Vorhandene Regelwerke zur Bemessung von Deckwerken in Deutschland	10
3.3 Vorgehensweise für die Herstellung der Technischen Gleichwertigkeit eines Elastocoast-Deckwerkes	11
3.4 Relevante Bemessungsgrößen	12
4 Zusammenstellung der technischen Bemessungsunterlagen für ein Elastocoast-Deckwerk	13
4.1 Allgemeines	13
4.2 Hinweise zur Auslegung des Elastocoast-Deckwerkes	13
4.3 Bemessungsparameter für die Ermittlung der Deckschichtdicke eines Elastocoast-Deckwerkes	15
4.3.1 Wellenhöhe	15
4.3.2 Wellendrucke	17
4.3.3 Wellenauflauf	19
4.3.4 Wellenablauf	21
4.3.5 Wellenüberlauf und Überströmen	22
4.3.6 Strömungsgeschwindigkeiten	22
4.3.7 Wellenreflexion	23
4.3.8 Verformungen	24
4.3.9 Porenwasserdrücke	25
4.3.10 Eislasten	28
4.3.11 Verkehrslasten	29
4.4 Auslegung der Deckwerkskonstruktion	29
4.5 Hinweise zu Konstruktionsdetails bei Anschlüssen	30
4.6 Zusätzliche Hinweise, Anforderungen und Eigenschaften	32
4.6.1 Steinmaterial und Steingrößen für Elastocoast-Deckschicht	32
4.6.2 Sanierung von Deckwerken	32
4.6.3 Widerstandsfähigkeit gegen Frost und Tau	33
4.6.4 Rückbaufähigkeit	33
4.6.5 Umweltbelange	33
4.6.6 Begrünbarkeit	33

4.6.7	Zusätzliche Verankerungen	34
4.6.8	Porosität	34
4.6.9	Beständigkeit gegenüber UV-Strahlung	34
4.6.10	Beständigkeit gegenüber Salzwasser	35
5	Hinweise zu Planung, Genehmigung, Ausschreibung und Ausführung eines Elastocast-Deckwerkes	36
5.1	Allgemeines	36
5.2	Planung	36
5.3	Genehmigung	36
5.4	Ausschreibung	36
5.5	Herstellung	37
5.6	Monitoring	39
6	Referenzprojekte	40
6.1	Referenzprojekte mit Elastocast-Deckwerken	40
6.2	Referenzprojekte an der Deutschen Nord- und Ostseeküste	40
6.3	Großmaßstäbliche Modelluntersuchungen im Großen Wellenkanal	42
7	Zusammenfassende Hinweise	44
 Tabellen		
Tabelle 3-1:	Übersicht vorhandener Regelwerke in Deutschland zur Bemessung von Deckwerken	10
Tabelle 6-1:	Referenzprojekte für Elastocast-Deckwerke [13] (Stand 06/2010)	40
Tabelle 6-2:	Übersicht der wichtigsten Referenzprojekte von Elastocast-Deckwerken an Nord- und Ostsee mit Angabe wesentlicher Deckwerkparameter	41

	Seite
Abbildungen	
Abbildung 1-1: Vorgehensweise	1
Abbildung 2-1: Grundidee zu Elastocoast [12]	3
Abbildung 2-2: Beispielhafte Darstellung eines Elastocoast-Deckwerks auf der Hallig Langeness (Foto BASF PU)	3
Abbildung 2-3: Beispielhafte Herstellung eines Elastocoast-Deckwerkes (Fotos LKN)	5
Abbildung 2-4: Elastocoast-Deckwerk auf der Hallig Langeness (Foto LKN)	6
Abbildung 3-1: Beispiele von Deckwerken an der Nord- und Ostseeküste	7
Abbildung 3-2: Deckwerksarten in offener und geschlossener Bauweise im Küstenbereich, EAK (1993)	8
Abbildung 3-3: Ausführungsbeispiele von Deckwerken im Küstenbereich	8
Abbildung 3-4: Standardbauweisen an Bundeswasserstraßen nach MAR (1993)	9
Abbildung 3-5: Belastungen und Versagensmechanismen von Deckwerken [9]	9
Abbildung 3-6: Benennung der Bemessungsgrößen eines Deckwerkes	12
Abbildung 4-1: Elastocoast-Deckwerk nach [14]	14
Abbildung 4-2: Mögliche Ausführungsvarianten für Elastocoast-Deckwerke	14
Abbildung 4-3: Ersatzmodell des Elastocoast-Deckwerkes für Wellenbelastungen [20]	15
Abbildung 4-4: Einordnung der Bodensteifigkeiten und Zuordnung zu verschiedenen Bauweisen [20]	16
Abbildung 4-5: Exemplarische Ermittlung der Deckschichtdicke für ein Elastocoast- Deckwerk (nach [20])	16
Abbildung 4-6: Klassifizierung der Wellenbelastungen in Abhängigkeit der Brecherkennzahl (Brechertyp)	17
Abbildung 4-7: Maximale Druckbelastung auf und unter dem Deckwerk infolge dynamischen Druckbelastungen (<i>impact load</i>) [28], [16]	18
Abbildung 4-8: Maximale Druckbelastung auf und unter dem Deckwerk infolge quasi- statischer Wellendruckbelastungen (<i>non-impact load</i>) [28], [16]	18
Abbildung 4-9: Relativer Wellenaufbau als Funktion der Brecherkennzahl für die Untersuchungen an den Modellen B und C im Großen Wellenkanal im Vergleich zu einer undurchlässigen Böschung [28]	19
Abbildung 4-10: Relativer Wellenablauf als Funktion der Brecherkennzahl für die Untersuchungen an den Modellen B und C im Großen Wellenkanal im Vergleich zu einer undurchlässigen Böschung [28]	21
Abbildung 4-11: Untersuchungen auf der Deichbinnenböschung [13]	22
Abbildung 4-12: Wellenreflexion des Elastocoast-Deckwerkes [28]	23
Abbildung 4-13: Maximale Verformungen der eingebauten Elastocoast-Deckwerke als Funktion der maximalen Druckbelastung [28]	24
Abbildung 4-14: Definition und Unterscheidung transienter und residueller Porenwasserdrücke [28]	25
Abbildung 4-15: Relative Porenwasserdruck für verschiedene Betrachtungsebenen im Sandkern unter dem Elastocoast-Deckwerk als Funktion der Brecherkennzahl [16], [28]	26
Abbildung 4-16: Schematische Darstellung auftretender Vertikalkräfte bei der Stabilitätsanalyse	27
Abbildung 4-17: Exemplarische Ergebnis der Stabilitätsanalyse	27

Abbildung 4-18: Bemessungsdiagramm der Deckschichtdicke im Fall auftretender Überdrücke als Funktion der signifikanten Wellenhöhe H_s [20]	28
Abbildung 4-19: Exemplarische Anschlussdetails nach [20]	31
Abbildung 4-20: Anschlussdetails beim Referenzprojekt Amrum (Fotos: IMS)	31
Abbildung 4-21: Widerstandsfähigkeit von Elastocoast gegenüber UV-Strahlung	34
Abbildung 4-22: Widerstandsfähigkeit von Elastocoast gegenüber Salzwasser (in [20])	35
Abbildung 5-1: Beispiel für einen Qualitätsmangel infolge Restfeuchte auf den Steinen beim Herstellungsprozess (Fotos: IMS)	37
Abbildung 5-2: Empfehlung für die Ausbildung von Anschlüssen und interner Übergänge beim Herstellungsprozess von Elastocoast-Deckwerken nach [20]	38
Abbildung 6-1: Herstellung des Elastocoast-Deckwerkes auf der Hallig Langeness (Fotos: LKN)	42
Abbildung 6-2: Untersuchungen von Elastocoast-Deckwerken im Großen Wellenkanal in Hannover [28]	43

Anlagen

Anlage 1	Zusammenstellung der vorhandenen Dokumente für den Werkstoff Elastocoast und dessen Anwendung im Deckwerksbau
Anlage 2	Bemessungsdiagramme Wellenhöhe, Auszug aus [20]
Anlage 3	Weitergehende Erläuterungen zur Bemessung des Elastocoast-Deckwerkes auf die Wellenhöhe, Annex 1 von [20]

Zuständige Behörden für den Küstenschutz an der Deutschen Nord- und Ostseeküste

LKN	Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz, Schleswig-Holstein
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küstenschutz und Naturschutz, Niedersachsen
StAUN	Staatliches Amt für Umwelt und Natur, Mecklenburg-Vorpommern

Abkürzungen

BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
WSV	Wasser- und Schifffahrtsverwaltung
LWI	Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig

Bearbeitung

Dr.-Ing. Karsten Peters
Dr.-Ing. Ulf Teschke

Regelwerke für Deckwerke

- [1] EAU (2004) Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen, Verlag Ernst & Sohn
- [2] EAK (2002) Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken, Die Küste, Heft 65, Herausgeber: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co.
- [3] EAK (1993) Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken, Die Küste, Heft 55, Herausgeber: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co.
- [4] Bundesanstalt für Wasserbau (2004) Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB)
- [5] Bundesanstalt für Wasserbau (1993) Merkblatt Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen (MAG)
- [6] Bundesanstalt für Wasserbau (1989) Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen (MAK)
- [7] Bundesanstalt für Wasserbau (2008) Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen (MAR)
- [8] Bundesanstalt für Wasserbau (2008) Merkblatt Anwendung von hydraulisch und bitumengebundenen Stoffen zum Verguss von Wasserbausteinen an Wasserstraßen (MAV)

Weitere Unterlagen

- [9] Herbich, J.B. (2000) Handbook of Coastal Engineering, McGraw-Hill, New York
- [10] Bijlsma, E. (2010) Persönliche Mitteilung vom 26. April 2010 (Arcadis)
- [11] StAUN (2009) Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern, Übersichtsheft, Staatliches Amt für Umwelt und Natur, 1. Auflage, Stand: März 2009

Quellen zum Werkstoff Elastocoast

Sämtliche Unterlagen und Quellen zum Werkstoff Elastocoast sind in der Anlage 1 aufgelistet und zusammengefasst.

1 Einführung

1.1 Hintergrund und Veranlassung

Die BASF Polyurethanes GmbH (BASF PU) vertreibt mit Elastocoast einen Werkstoff, der eine neuartige Herstellung von Deckwerken ermöglicht [13]. Dabei werden Deckwerkssteine mit dem Werkstoff Elastocoast vollständig umhüllt und miteinander verklebt, so dass sich eine offenporige, stabile und auch relativ dünne Deckwerkslage herstellen lässt.

Im Hinblick auf die Anwendung des Werkstoffes Elastocoast im konstruktiven Wasserbau (z. B. im Deckwerksbau) hat BASF PU in den vergangenen Jahren mehrere Untersuchungen, Arbeiten und Modellversuche in Auftrag gegeben, um die für die praktische Anwendung erforderlichen Bemessungsgrundlagen für ein derartiges Deckwerk erarbeiten zu lassen. Es existieren mittlerweile eine Reihe von Dokumenten und technischen Unterlagen (s. Anlage 1), auf die in diesem Bericht noch weiter eingegangen wird. In der Folge wurde der Werkstoff Elastocoast bereits in mehreren Projekten zur Herstellung von Deckwerken in Deutschland und international erfolgreich eingesetzt (vgl. Anlage 2).

1.2 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung, die an die IMS Ingenieurgesellschaft mbH (IMS) herangetragen wurde, besteht in der systematischen Zusammenstellung der vorliegenden technischen Bemessungsgrundlagen für den Werkstoff Elastocoast im Hinblick auf dessen Anwendung und technische Gleichwertigkeit im Deckwerksbau im Ästuar- und Küstenbereich in Deutschland.

Zielsetzung der vorliegenden Ausarbeitung ist es, alle wesentlichen bautechnischen Informationen zum Werkstoff Elastocoast für die für den Küstenschutz zuständigen Behörden, ausführenden Baufirmen und Ingenieurbüros in einem zusammenfassenden Bericht zusammenzufassen, der notwendige Informationen für die Planung, Genehmigung und Herstellung eines Deckwerkes mit Elastocoast beinhaltet (s. nachfolgende Abbildung 1-1).

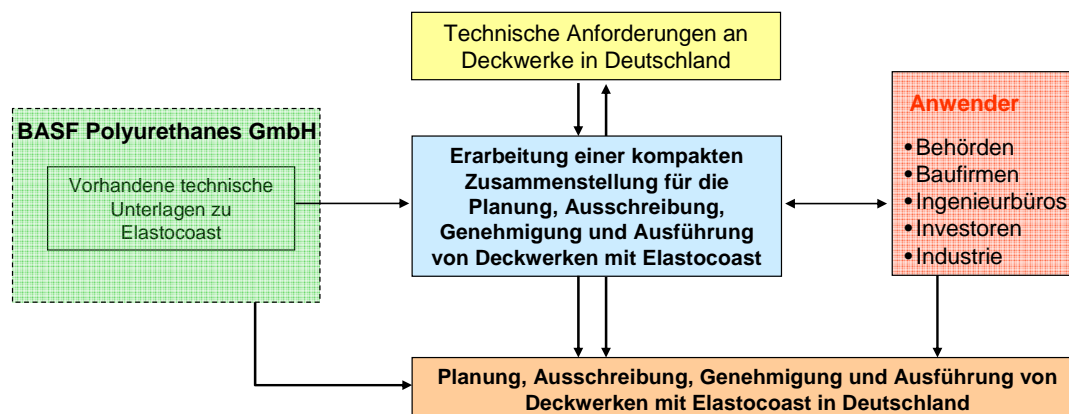


Abbildung 1-1: Vorgehensweise

Im Einzelnen werden

- Anforderungen an die Bemessung von Deckwerken auf Grundlage von geltenden deutschen Regelwerken zusammengetragen,
- erste Abstimmungen mit den für den Küstenschutz zuständigen Behörden (u.a. BAW, LKN, StAUN, NLWKN) geführt,
- vorhandene Untersuchungen und Unterlagen von Elastocoast gesichtet und bemessungsrelevante Informationen extrahiert,
- sämtliche vorhandene Informationen zu dem vorliegenden Bericht zusammengeführt.

1.3 Hinweise zur Anwendung der vorliegenden Unterlage

Der vorliegende Bericht ist als zusammenfassende Dokumentation der derzeit vorhandenen technischen Bemessungsgrundlagen für Elastocoast-Deckwerke zu verstehen. Dabei werden diese verfügbaren Grundlagen komprimiert wiedergegeben und für weitergehende Informationen zu einzelnen Themen auf die jeweilige Referenz verwiesen. Diese Dokumentation ist modular aufgebaut und kann weiter fortgeführt und durch weitere Informationen ergänzt werden.

In Abschnitt 2 werden zunächst der Werkstoff Elastocoast und die möglichen Anwendungsbereiche vorgestellt.

Abschnitt 3 stellt die Anforderungen für die Planung und Herstellung eines Deckwerkes in Deutschland zusammen. Darauf aufbauend wird die Vorgehensweise bei der Herstellung der technischen Gleichwertigkeit des Elastocoast-Deckwerkes vorgestellt.

Auf Grundlage der in Abschnitt 4 zusammengestellten technischen Bemessungsgrundlagen kann dieser Bericht ebenso für die Planung, Genehmigung und Ausführung eines Elastocoast-Deckwerkes herangezogen und in diesem Sinne angewendet werden. D.h. ein Elastocoast-Deckwerk kann in seinem Aufbau für die lokationsspezifischen Bemessungsparameter entsprechend dimensioniert werden. In diesem Sinne ist der Abschnitt 4 als Anleitung für die Dimensionierung des Elastocoast-Deckwerkes zu verstehen.

Weitere Hinweise zu Planung, Genehmigung und Ausführung eines Elastocoast-Deckwerkes werden in Abschnitt 5 gegeben.

Eine Zusammenstellung der bisherigen Referenzprojekte mit einem Elastocoast-Deckwerk erfolgt in Abschnitt 6.

2 Kurze Produktvorstellung Elastocoast

2.1 Material und Eigenschaften

Elastocoast stellt ein innovatives Verklammerungssystem dar, welches auf Grundlage eines 2-Komponenten-Kunststoffes (Polyurethan) Wasserbausteine vollständig ummantelt und an deren Kontaktflächen dauerhaft miteinander verfestigt. Der umweltverträgliche PUR-Werkstoff verklebt die Wasserbausteine zu einer monolithischen, dreidimensionalen und standfesten Struktur (vgl. Abbildung 2-1). Der geringe Bindemittelanteil sorgt dafür, dass diese Struktur vollkommen offenporig bleibt [12], was sich wiederum positiv auf die hydraulischen Eigenschaften des Systems auswirkt.



Abbildung 2-1: Grundidee zu Elastocoast [12]

Bisher wurden vornehmlich Steingrößen zwischen 20 mm und 80 mm für die Herstellung von Deckwerken mit Elastocoast verwendet (vgl. Abbildung 2-2). Nach derzeitigen Erkenntnissen von BASF PU ergibt sich für diese Steingrößen ein Optimum an Kontaktpunkten, eingesetzter Menge an Elastocoast und Gesamtstabilität. Weitere Entwicklungen und Anwendungen sind denkbar.



Abbildung 2-2: Beispielhafte Darstellung eines Elastocoast-Deckwerks auf der Hallig Langeness (Foto BASF PU)

Folgende Eigenschaften bzw. Wirkungsweise sind Elastocoast zugeordnet:

- hohe Porosität (Offenporigkeit)
- Energiedissipation auflaufender Wellen
- Reduzierung des Wellenauflaufes
- Resistenz gegenüber Kälte / Wärme
- Ökonomische Vorteile
- Ökologisch kompatibel
- einfacher Einbau
- großer Einsatzbereich.

2.2 Vorhandene Unterlagen zum Werkstoff Elastocoast

In den vergangenen Jahren wurden sowohl für den Werkstoff Elastocoast als auch für dessen Anwendung im Deckwerksbau eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt, die in die Bereiche

- Technik
- Ökologie
- Ökotoxikologie
- Wasserqualität
- Rückbau.

unterteilt werden können. Die zugehörigen Dokumente sind in Anlage 1 dokumentiert.

2.3 Herstellungsprozess

Der Herstellung von Elastocoast erfolgt schnell und vor Ort. Das saubere und sichttrockene Steinmaterial wird in einem Mischer mit dem Bindemittel (rd. 3 Vol.-%) vermischt (Dauer: Wenige Minuten) und vor Ort eingebaut.

Die mit Bindemittel ummantelten Steine werden an der geforderten Lokation eingebracht und wie gefordert mechanisch verteilt und positioniert. Das Steingemisch kann über eine halbe Stunde verarbeitet werden. Das Elastocoast-Deckwerk ist nach einem Tag Aushärtezeit begehbar und nach zwei bis drei Tagen voll belastbar.

Nachfolgend in Abbildung 2-3 wird der Herstellungsprozess anhand von Fotos des LKN dokumentiert.



Abfüllen des PUR-Werkstoffes



Einfüllen des Steinmaterials in Zwangsmischer



Hinzugabe des PUR-Werkstoffes



Mischen der Steine mit dem PUR-Werkstoff und
Transport zur Baustelle



Einbau an der Baustelle



Finale Arbeiten

Abbildung 2-3: Beispielhafte Herstellung eines Elastocast-Deckwerkes (Fotos LKN)

Weitere detaillierte Hinweise zur Herstellung eines Elastocast-Deckwerkes werden in Abschnitt 5.5 gegeben.

2.4 Anwendungsbereiche und Referenzprojekte

Elastocoast wurde bisher vornehmlich im Deckwerksbau in zahlreichen Projekten eingesetzt. Als Beispiel sei an dieser Stelle auf Abbildung 2-4 verwiesen. Weitere Anwendungsbereiche im Wasserbau sind denkbar.

Eine detaillierte Zusammenstellung der bisherigen Referenzprojekte erfolgt in Abschnitt 6.



Abbildung 2-4: Elastocoast-Deckwerk auf der Hallig Langeness (Foto LKN)

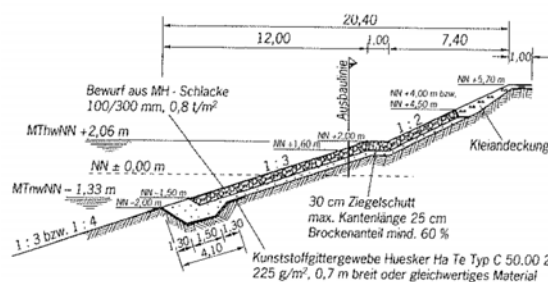
3 Zusammenstellung der Anforderungen für die Herstellung eines Deckwerkes in Deutschland

3.1 Allgemeine Übersicht zu Deckwerken

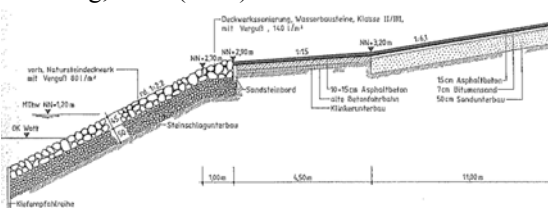
Deckwerke übernehmen allgemein im Küstenschutz und speziell im Bereich von Hochwasserschutzanlagen die Schutzfunktion von Böschungen, Geländeübergängen und Flächen vor angreifenden Kräften (Seegang, Strömung und Eis), wirken möglichen Zerstörungen entgegen und verhindern damit morphologische Veränderungen. Deckwerke widerstehen den angreifenden Kräften durch ihre Konstruktion, das Gewicht und die Verbundwirkung von Steinen.

Bauweisen im Ästuar- und Küstenbereich

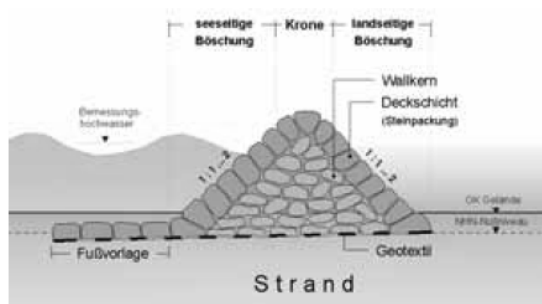
Entlang der Deutschen Nord- und Ostseeküste sind Deckwerke als küstenparallele Bauwerke zum Schutz und zur Sicherung von Dünen, Stränden, Vorländern, Deichen und sonstigen Bauwerken vorhanden. Diese Deckwerke sind für die angreifenden und lokationsspezifischen Belastungen dimensioniert und vielfältig in ihrer Ausführung (vgl. Abbildung 3-1).



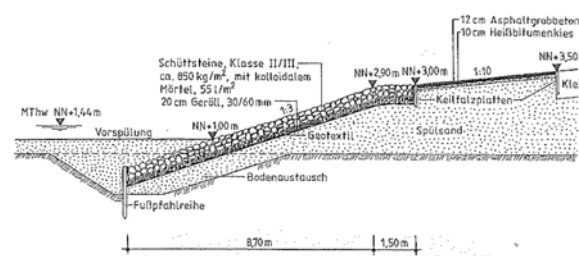
Hamburg, EAU (2004)



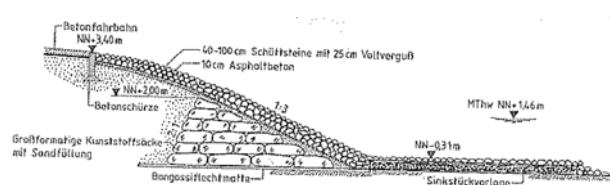
Außenems, EVU (1990)



Regelprofil eines Steinwalls, StAUN (2009)



Seedeich Hattstedter Marsch, EVU (1990)



Außenjade, EVU (1990)

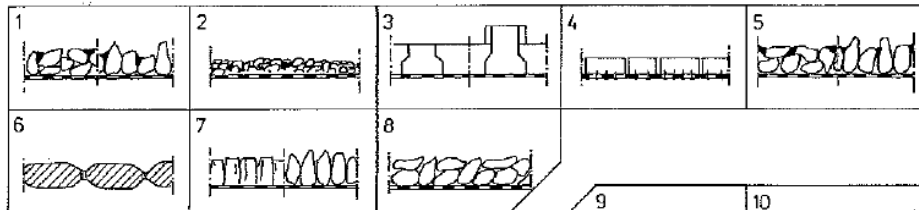


Regelaufbau eines Deckwerkes, StAUN (2009)

Abbildung 3-1: Beispiele von Deckwerken an der Nord- und Ostseeküste

Deckwerke bestehen grundsätzlich aus einer äußeren Deckschicht, die als Schutzschicht offen oder dicht je nach Erfordernis ausgeführt werden kann, und einer darunter liegenden Filterschicht, die entweder mineralisch als Kornfilter oder als Geotextil ausgeführt wird. Die verschiedenen Ausführungsvarianten einer Deckschicht werden in Abbildung 3-2 schematisch und beispielhaft in Abbildung 3-3 dargestellt.

Offene Deckwerke



Geschlossene Deckwerke

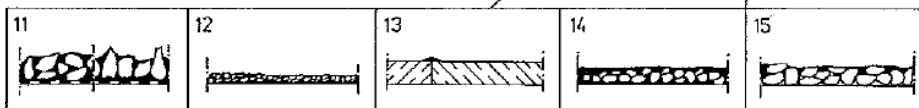


Abbildung 3-2: Deckwerksarten in offener und geschlossener Bauweise im Küstenbereich, EAK (1993)



Abbildung 3-3: Ausführungsbeispiele von Deckwerken im Küstenbereich

Bauweisen im Binnenbereich

Für den Bereich der Binnenwasserstraßen, insbesondere im Bereich der Bundeswasserstraßen im Zuständigkeitsbereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV), haben sich vor dem Hintergrund der auftretenden Belastungen standardisierte Deckwerksbauweisen aus Deck- und Filterschicht durchgesetzt. Die verschiedenen Deckschichtbauweisen werden in der nachfolgenden Abbildung 3-4 dargestellt. Die Filterschicht wird hier in Abbildung 3-4 nur angedeutet und kann entweder als Kornfilter nach MAK [6] oder als Geotextil nach MAG [5] ausgelegt werden.

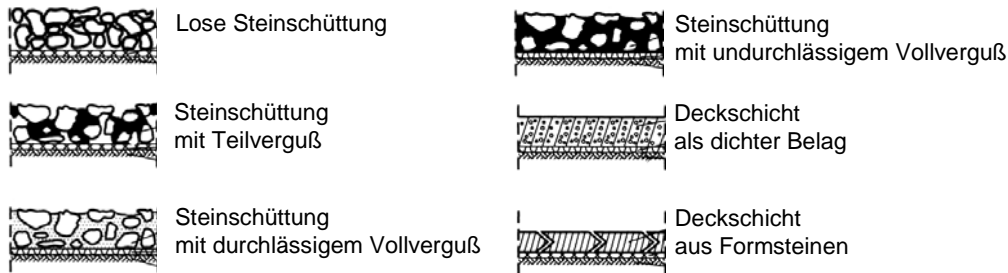


Abbildung 3-4: Standardbauweisen an Bundeswasserstraßen nach MAR (1993)

Belastungen und relevante Prozesse von Deckwerken

Die unterschiedlichen Bauweisen der Deckwerke spiegeln gleichwohl die unterschiedlichen Belastungen der Deckwerke wieder. Die möglichen Belastungsarten und die daraus ableitbaren Versagensmechanismen werden in der folgenden Abbildung 3-5 schematisch dargestellt.

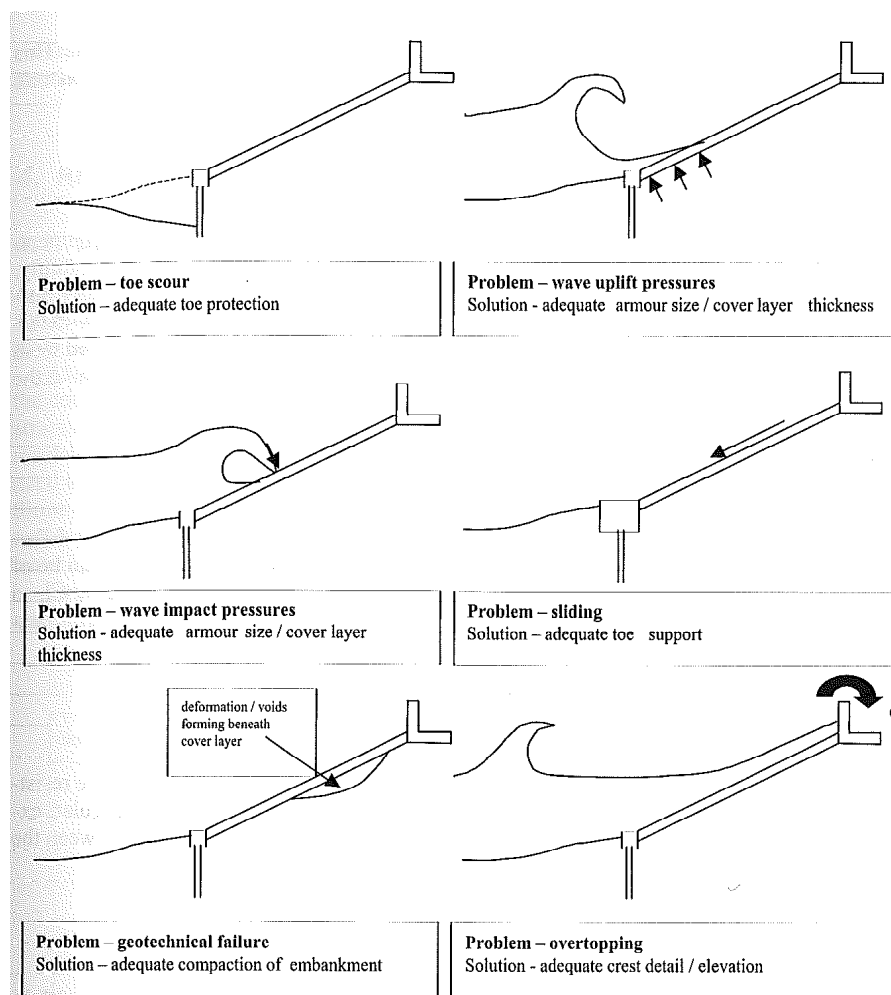


Abbildung 3-5: Belastungen und Versagensmechanismen von Deckwerken [9]

Da Deckwerke i.d.R. im Wasserwechselbereich angeordnet sind, können für das Deckwerk selbst maßgebliche Belastungen durch

- brechende Wellen
- böschungsparelle Strömungen beim Wellenauf- und -ablauf
- auftretende Porenwasserüberdrücke unter dem Deckwerk und mögliche resultierende Bodenverlagerungen

auftreten. Auf diese maßgebenden Belastungen und deren Auswirkungen auf die Dimensionierung des Elastocoast-Deckwerkes wird in Abschnitt 4 eingegangen.

3.2 Vorhandene Regelwerke zur Bemessung von Deckwerken in Deutschland

In Deutschland existieren eine Reihe von Regelwerken, die auf die Bemessung von Deckwerken eingehen. Diese Regelwerke unterscheiden zwischen dem Küsten- und Ästuarbereich und dem Binnenbereich. Die folgende Tabelle 3-1 gibt einen Überblick bestehender Regelwerke mit entsprechender Differenzierung.

Tabelle 3-1: Übersicht vorhandener Regelwerke in Deutschland zur Bemessung von Deckwerken

Küsten- und Binnenbereich	
EAU Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen (2004)	<ul style="list-style-type: none"> – Ausbildung von Böschungssicherungen (Kap. 12.1) – Böschungen in Seehäfen und in Binnenhäfen mit Tide (Kap. 12.2) – Anwendung von geotextilen Filtern bei Böschungs- und Sohlsicherungen (Kap. 12.5) – Bemessung der Deckschicht (Kap. 7.10.4)
EAK Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken (1993, 2002)	<ul style="list-style-type: none"> – Empfehlungen E, EAK 1993 – Ausführungsbeispiele zu Empfehlungen E, EAK 2002 – Böschungen mit Bruchstein- und Formkörperabdeckungen (Kap. 4.2.6)
für Binnenwasserstraßen	
Bundesanstalt für Wasserbau GBB	Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen, Mitteilungsblatt Nr. 87, 2004
Bundesanstalt für Wasserbau MAR	Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen, 2008
Bundesanstalt für Wasserbau MAK	Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen, 1989
Bundesanstalt für Wasserbau MAG	Merkblatt Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen, 1993
Bundesanstalt für Wasserbau MAV	Merkblatt Anwendung von hydraulisch und bitumengebundenen Stoffen zum Verguss von Wasserbausteinen an Wasserstraßen, 2008

Als Ergebnis der Zusammenstellung in Tabelle 3-1 ist festzuhalten, dass

- *im Küsten- und Ästuarbereich*
die Deckwerke individuell unter Anwendung von EAK und EAU bemessen werden können, d.h. es existieren keine verbindlichen Regelbauweisen. Z.T. werden die Regelwerke zu Deckwerken im Binnenbereich auch auf Bundeswasserstraßen im Ästuarbereich übertragen.
- *im Binnenbereich*
die Konstruktion und die Funktionsweise der Deckwerke durch Regelbauweisen und Regelwerke der BAW konkret vorgegeben wird, d.h. es existieren verbindlichen Regelbauweisen.

Die individuelle Bemessung von Deckwerken im Küsten- und Ästuarbereich begründet sich grundsätzlich durch die unterschiedlichen lokationsspezifischen Bemessungsparameter und Erfahrungen.

Im Binnenbereich kann dagegen von standardisierten Bemessungsparametern und Deckwerksbauweisen ausgegangen werden.

3.3 Vorgehensweise für die Herstellung der Technischen Gleichwertigkeit eines Elastocoast-Deckwerkes

Aus den Ausführungen zu Deckwerken in Deutschland und den vorhandenen Regelwerken für Deckwerke im Küsten- und Ästuarbereich folgt, dass keine mit einem Elastocoast-Deckwerk vergleichbare Bauweise existiert.

Daraus folgt, dass der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit bzw. der technischen Gleichwertigkeit eines Elastocoast-Deckwerkes für die jeweils vorhandenen äußeren hydraulischen Belastungen und geotechnischen Randbedingungen geführt werden muss. D.h. die auftretenden Belastungen und Randbedingungen gehen unmittelbar in die Bemessung des Elastocoast-Deckwerkes ein.

Für die Bemessung des Elastocoast-Deckwerks sind dann die nachfolgend in Abschnitt 3.4 genannten Bemessungsgrößen (Deckwerksdicke und -aufbau, etc.) in Abhängigkeit der auftretenden äußeren Belastungen (Bemessungsparameter) sowie des Baugrundes (vgl. Abschnitt 4) zu dimensionieren.

Diese Vorgehensweise bei der Bemessung bzw. bei der Nachweisführung der Technischen Gleichwertigkeit eines Elastocoast-Deckwerkes wird von den für den Küstenschutz zuständigen Behörden mitgetragen.

3.4 Relevante Bemessungsgrößen

Die relevanten Bemessungsgrößen des Deckwerkes, d.h. die in Abhängigkeit des Baugrundes, der geotechnischen und hydraulischen Randbedingungen sowie ggf. sonstiger Vorgaben zu bestimmenden kennzeichnenden, geometrischen und materialspezifischen Größen eines Deckwerkes sind in Anlehnung an Abbildung 3-6

- die Deckschicht und die Filterschicht jeweils mit Aufbau, Material und Dicke
- die Böschungsneigung
- die Deckwerksanschlüsse (am oberen und unteren Ende des Deckwerkes) und
- die Fußstützung.

Inwieweit eine Fußstützung erforderlich ist, muss im Rahmen von geotechnischen Betrachtungen untersucht werden.

Die Bemessungsgrößen Böschungsneigung und Deckwerksanschlüsse sind konstruktive Details, die sich entweder an bestehenden geometrischen Randbedingungen oder Bauteilen orientieren.

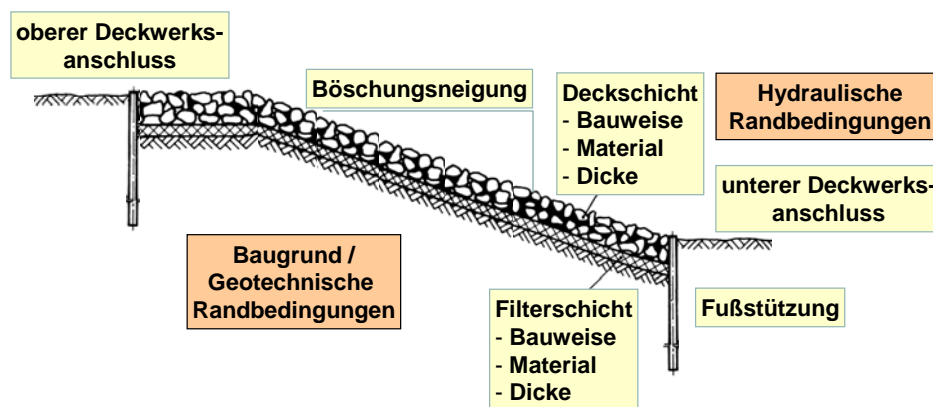


Abbildung 3-6: Benennung der Bemessungsgrößen eines Deckwerkes

Dagegen sind die Deckschicht und die Filterschicht in Bauweise, Material und Mächtigkeit entsprechend in Abhängigkeit der Bemessungsparameter zu dimensionieren. Auf diese Abhängigkeiten der Bemessungsgrößen Deckschicht und Filterschicht wird nachfolgend systematisch in Abschnitt 4 eingegangen.

4 Zusammenstellung der technischen Bemessungsunterlagen für ein Elastocast-Deckwerk

4.1 Allgemeines

Die bei BASF PU vorhandenen Unterlagen, Untersuchungen und Gutachten zu Elastocast-Deckwerken (vgl. Abschnitt 2.2 sowie Auflistung aller verfügbaren Unterlagen in Anlage 1), die sich mit der Technik und Bemessung des Elastocast-Deckwerkes beschäftigen, wurden vor dem Hintergrund der erarbeiteten Anforderungen an ein Elastocast-Deckwerk systematisch durchgesehen. Vorhandene Unterlagen zu weiteren Themen wie z. B. Umweltverträglichkeit standen nicht im Fokus der Bearbeitung und werden lediglich als vorhanden aufgelistet, ohne dabei inhaltlich Bezüge aufzubauen.

Wesentliche Grundlagen für die Erstellung der technischen Bemessungsgrundlagen für Elastocast-Deckwerke können [20] und [28] entnommen werden, dies sind

- ARCADIS (2009) Polyurethane bounded aggregate revetment, Design Manual, Stand: 14.09.2009 und
- LWI (2010) Hydraulic Performance, Wave Loading and Response of Elastocast Revetments and their Foundation – A Large Scale Model Study -, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, LWI Report No. 988, Final Report, 08.01.2010.

Nachfolgend werden die Bemessungsgrundlagen für die Dimensionierung und Auslegung eines Elastocast-Deckwerks auf Grundlage dieser o. g. Arbeiten und in Abhängigkeit der zu berücksichtigenden Belastungsgrößen vorgestellt.

4.2 Hinweise zur Auslegung des Elastocast-Deckwerkes

Ein Deckwerk besteht definitionsgemäß (vgl. Abschnitt 3.1) aus der Deckschicht und der darunter liegenden Filterschicht (vgl. Abbildung 4-1). Für das Elastocast-Deckwerk bedeutet dies, dass lediglich die Steine der Deckschicht mit dem PUR-Werkstoff ummantelt und verklebt werden.

Die unter der Deckschicht liegende Filterschicht wird lose auf einer Geotextilunterlage aufgebracht und nicht verklebt. Diese Filterschicht erfüllt eine wichtige Funktion bei den hydraulischen Prozessen und der Standsicherheit des gesamten Deckwerkes (vgl. [28]).

In einigen Referenzprojekten wurde ganz auf die Filterschicht verzichtet und die Deckschicht direkt auf einer Geotextilunterlage aufgebracht. Bei geeignetem Untergrund könnte auch auf das Geotextil verzichtet werden, z. B. wenn ein Elastocast-Deckwerk auf ein bestehendes Deckwerk aufgebracht würde.

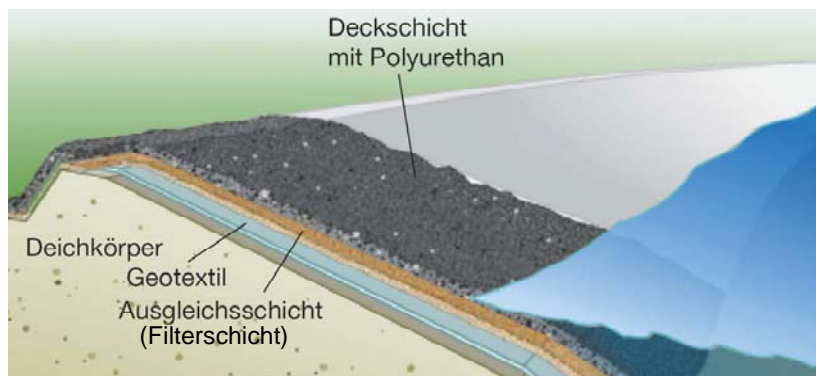


Abbildung 4-1: Elastocost-Deckwerk nach [14]

Die folgende Abbildung 4-2 stellt die beiden möglichen Ausführungsvarianten eines Elastocost-Deckwerkes dar.

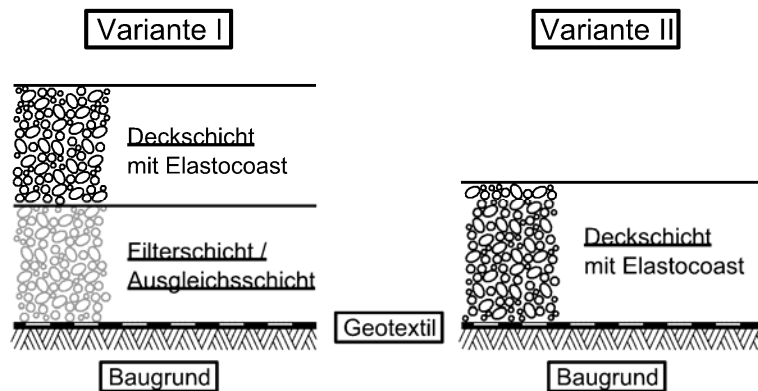


Abbildung 4-2: Mögliche Ausführungsvarianten für Elastocost-Deckwerke

Das Geotextil auf dem Untergrund übernimmt die Funktion des Filters und dient gleichzeitig als Trennlage. Variante I zeigt eine Filter- oder Ausgleichsschicht unter der Deckschicht. Das Steinmaterial von Filter- und Deckschicht ist i.d.R. identisch; Vorgaben gibt es diesbezüglich jedoch nicht.

Die Deckschicht besteht aus Steinen, die mit dem PUR-Werkstoff Elastocost verklebt werden (nachfolgend Elastocost-Deckschicht genannt).

Die Frage des Aufbaus, d.h. ob ein Elastocost-Deckwerk mit oder ohne Filterschicht erstellt wird, muss im Rahmen der individuellen Planung und dabei in Abhängigkeit der geometrischen, geotechnischen und hydraulischen Randbedingungen entschieden werden.

Bisher wurden vornehmlich Steingrößen zwischen 20 mm und 80 mm unterschiedlicher Steinmaterialien (vgl. [13] und [20]) für die Herstellung der Elastocost-Deckschicht verwendet (vgl. Abschnitte 2.3 und 6).

4.3 Bemessungsparameter für die Ermittlung der Deckschichtdicke eines Elastocast-Deckwerkes

Die erforderliche Mächtigkeit einer Elastocast-Deckschicht ist abhängig von bestimmten Bemessungsparametern, wie z. B. der Wellenhöhe etc.

Die Ermittlung und Definition der lokationsspezifischen Bemessungsparameter (Wasserstände, Wellenhöhe etc.) muss separat und im Vorwege erfolgen. Diesbezüglich wird auf die EAK (2002), Empfehlungen A verwiesen.

Nachfolgend wird auf die Bemessungsparameter zur Ermittlung der erforderlichen Deckschichtdicke eines Elastocast-Deckwerkes eingegangen. Praktisch ergibt sich somit für jeden relevanten Bemessungsparameter eine erforderliche Dicke der Elastocast-Deckschicht. Die größte ermittelte Deckschichtdicke ist letztlich für die Deckwerksauslegung maßgebend.

4.3.1 Wellenhöhe

Die Welle, die sich auf einem Elastocast-Deckwerk bricht, stellt einen wesentlichen Bemessungsparameter dar. Insbesondere auftretende Sturzbrecher können das Deckwerk stark belasten. Die Elastocast-Deckschicht wirkt dabei als steife Platte (mit einer definierten Biegesteifigkeit), die je nach Untergrund bzw. Deckwerksaufbau unterschiedlich gelagert ist.

Die folgende Abbildung 4-3 stellt das gewählte Ersatzmodell dar, welches von [20] als Berechnungsgrundlage für die Ermittlung der Deckschichtdicke des Elastocast-Deckwerkes mit einem E-Modul von $E = 4.000 \text{ MPa}$ und einer Biegefestigkeit von $1,0 \text{ MPa}$ (*flexural strength*) verwendet wird.

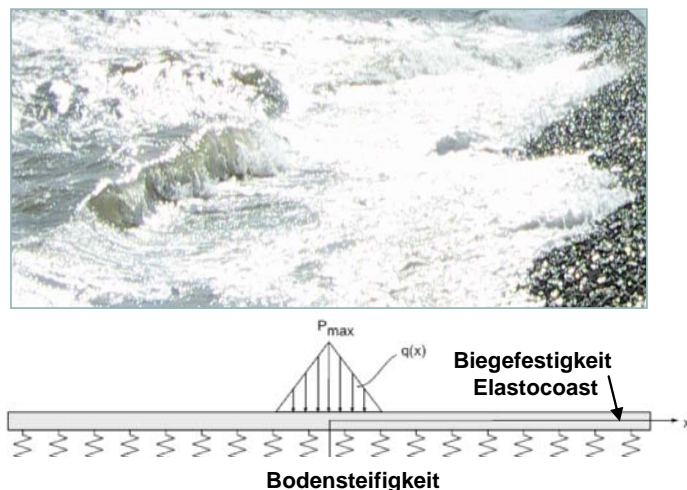


Abbildung 4-3: Ersatzmodell des Elastocast-Deckwerkes für Wellenbelastungen [20]

In Abhängigkeit der Bettung des Elastocast-Deckwerkes bzw. des jeweiligen Untergrundes (abzulesen in Abbildung 4-4) kann die erforderliche Deckwerks-

dicke aus vorliegenden Bemessungsdiagrammen, wie exemplarisch in Abbildung 4-5 gezeigt, als Funktion der Böschungsneigung und der Bemessungswellenhöhe H_d abgelesen werden.

In Anlage 2 werden die Bemessungsdiagramme [20] für unterschiedliche Bettungen mit $c = 30 \text{ MPa/m}$, $c = 60 \text{ MPa/m}$, $c = 100 \text{ MPa/m}$ und $c = 500 \text{ MPa/m}$ angegeben (vgl. Einordnung des Untergrundes in Abbildung 4-4)

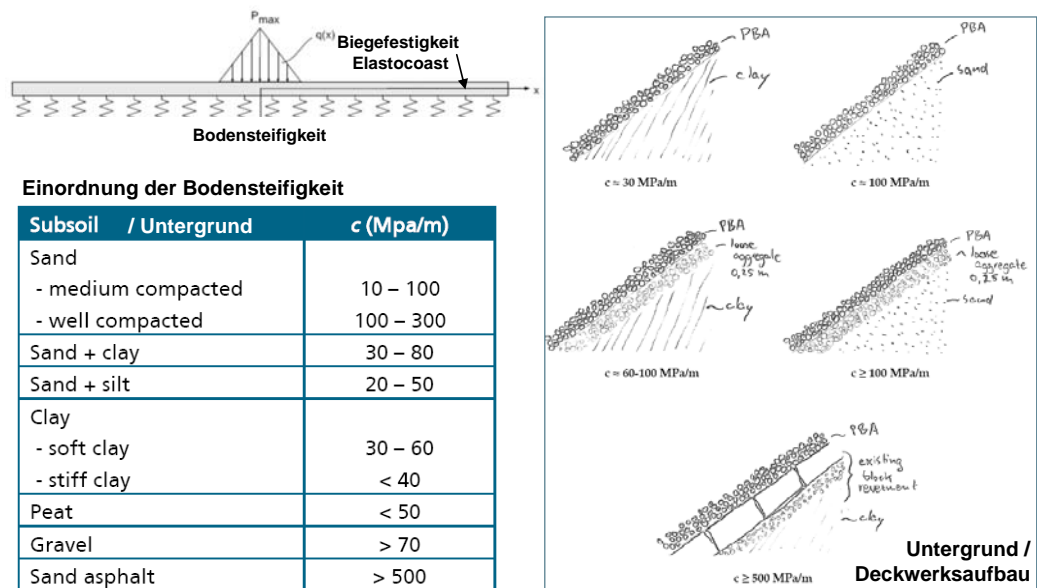


Abbildung 4-4: Einordnung der Bodensteifigkeiten und Zuordnung zu verschiedenen Bauweisen [20]

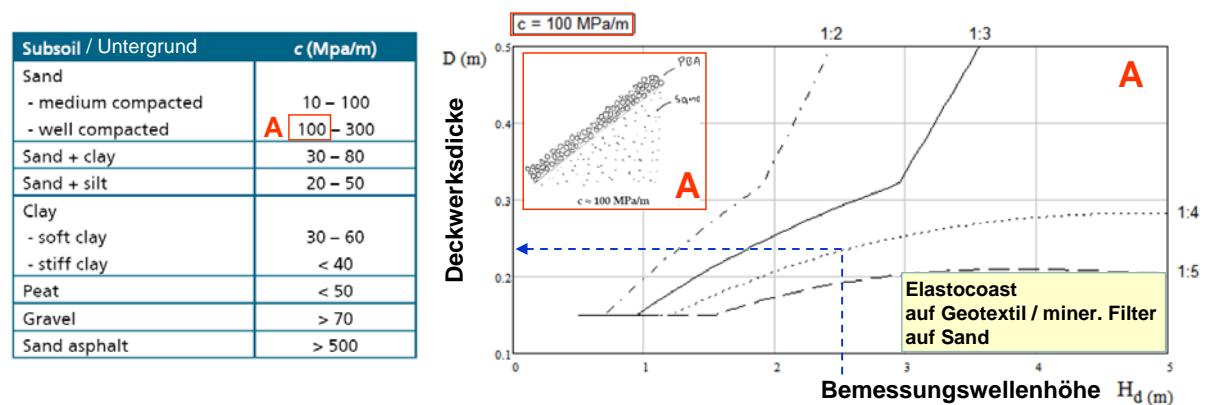


Abbildung 4-5: Exemplarische Ermittlung der Deckschichtdicke für ein Elastocoast-Deckwerk (nach [20])

Für weiterführende Erläuterungen zur Bemessung von Elastocoast-Deckwerken auf den Parameter Wellenhöhe wird auf [20] und auf Anlage 3 verwiesen, in der nach Anleitung die Deckwerksdicke deterministisch in Abhängigkeit der auftretenden Wellenbelastung ermittelt werden kann.

4.3.2 Wellendrucke

Im Rahmen der Modellversuche im Großen Wellenkanal [28] wurden umfangreiche Untersuchungen zu Wellenlasten auf und unter dem Elastocast-Deckwerk durchgeführt. Im diesem Zusammenhang soll lediglich auf die wichtigsten Ergebnisse Bezug genommen werden.

Hinsichtlich der unterschiedlichen auftretenden Wellen, Brechertypen und Belastungen auf und unter dem Elastocast-Deckwerk ist es erforderlich, eine Differenzierung der Wellenbelastungen vorzunehmen (s. Abbildung 4-6). Bei Sturzbrechern kommt es zu entsprechenden dynamischen Druckspitzen (*impact load*), bei Reflexionsbrechern hingegen zu einer eher statischen Belastung (*non-impact load*).

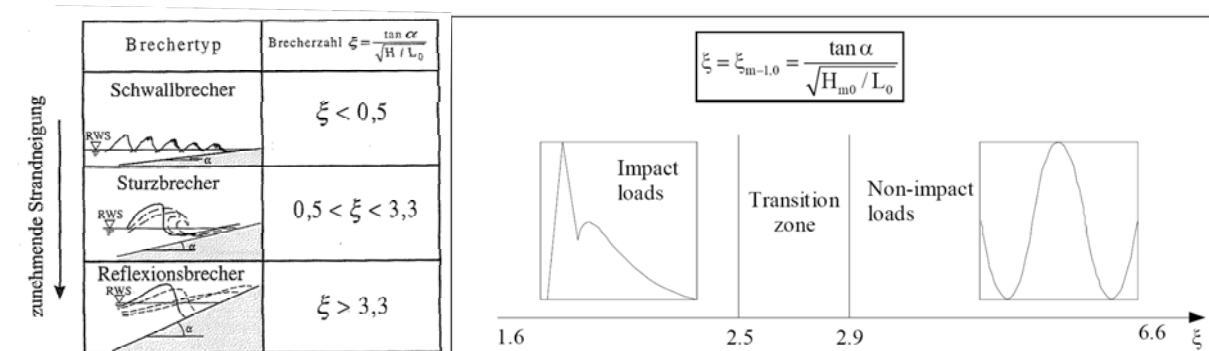


Abbildung 4-6: Klassifizierung der Wellenbelastungen in Abhängigkeit der Brecherkennzahl (Brechertyp)

Auf Grundlage von durchgeführten Parametrisierungen wurden die Messdaten analysiert. Die Ergebnisse der Druckbelastungen auf und unter dem Elastocast-Deckwerk für die beiden Belastungsarten *impact load* (Abbildung 4-7) und *non-impact load* (Abbildung 4-8) werden nachfolgend dargestellt.

Bei den dynamischen Wellendruckbelastungen (*impact load*) ist eine Differenzierung zwischen den Belastungsebenen auf und unter dem Deckwerk erkennbar (vgl. Abbildung 4-7). Die Differenz beider Kurven in Abbildung 4-7 stellt die Dämpfung des Wellendruckes durch das Deckwerk dar.

Bei den quasi-statischen Wellendruckbelastungen (*non-impact load*) treten quasi die gleichen Druckverhältnisse auf und unter dem Deckwerk auf (vgl. Abbildung 4-8).

Weitere und vertiefende Untersuchungen, Analysen und Erläuterungen sind in [28] zu finden, auf die an dieser Stelle verwiesen wird.

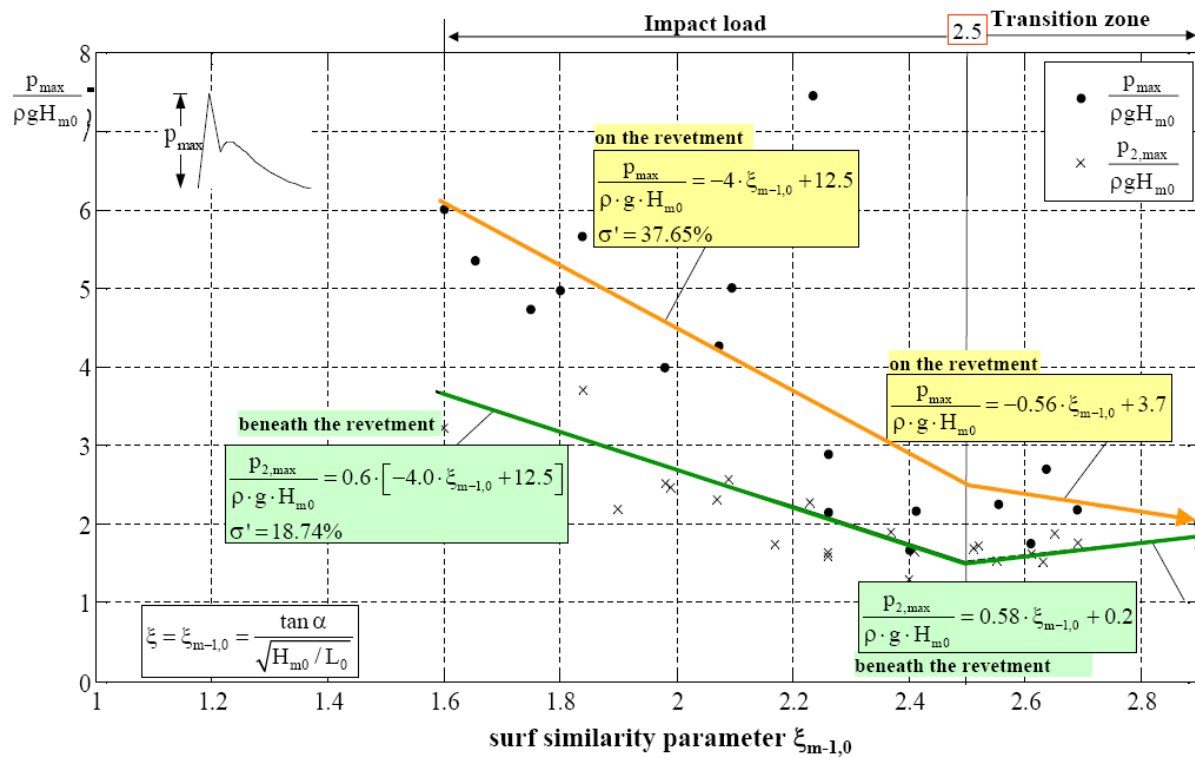


Abbildung 4-7: Maximale Druckbelastung auf und unter dem Deckwerk infolge dynamischen Druckbelastungen (impact load) [28], [16]

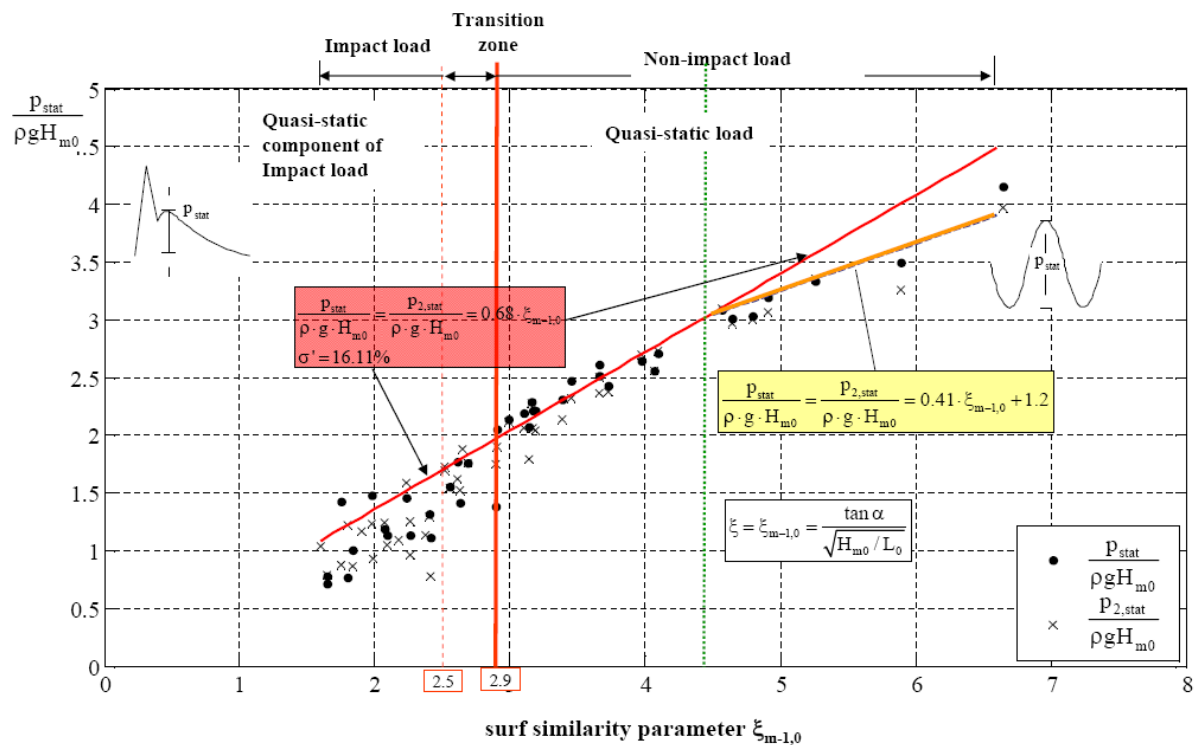


Abbildung 4-8: Maximale Druckbelastung auf und unter dem Deckwerk infolge quasi-statischer Wellendruckbelastungen (non-impact load) [28], [16]

4.3.3 Wellenauflauf

Die Porosität des Elastocast-Deckwerkes bewirkt eine veränderte hydraulische Wirkungsweise, d.h. auch der Wellenauflauf verhält sich anders als bei anderen Deckwerken. Der Wellenauflauf wurde im Rahmen der durchgeführten großmaßstäblichen Modelluntersuchungen im Großen Wellenkanal in Hannover an einer 1:3-Böschung untersucht [28].

Die folgende Abbildung 4-9 stellt den relativen Wellenauflauf als Funktion der Brecherkennzahl für die Untersuchungen an den Modellen B und C im Großen Wellenkanal [28] im Vergleich zu einer undurchlässigen Böschung dar.

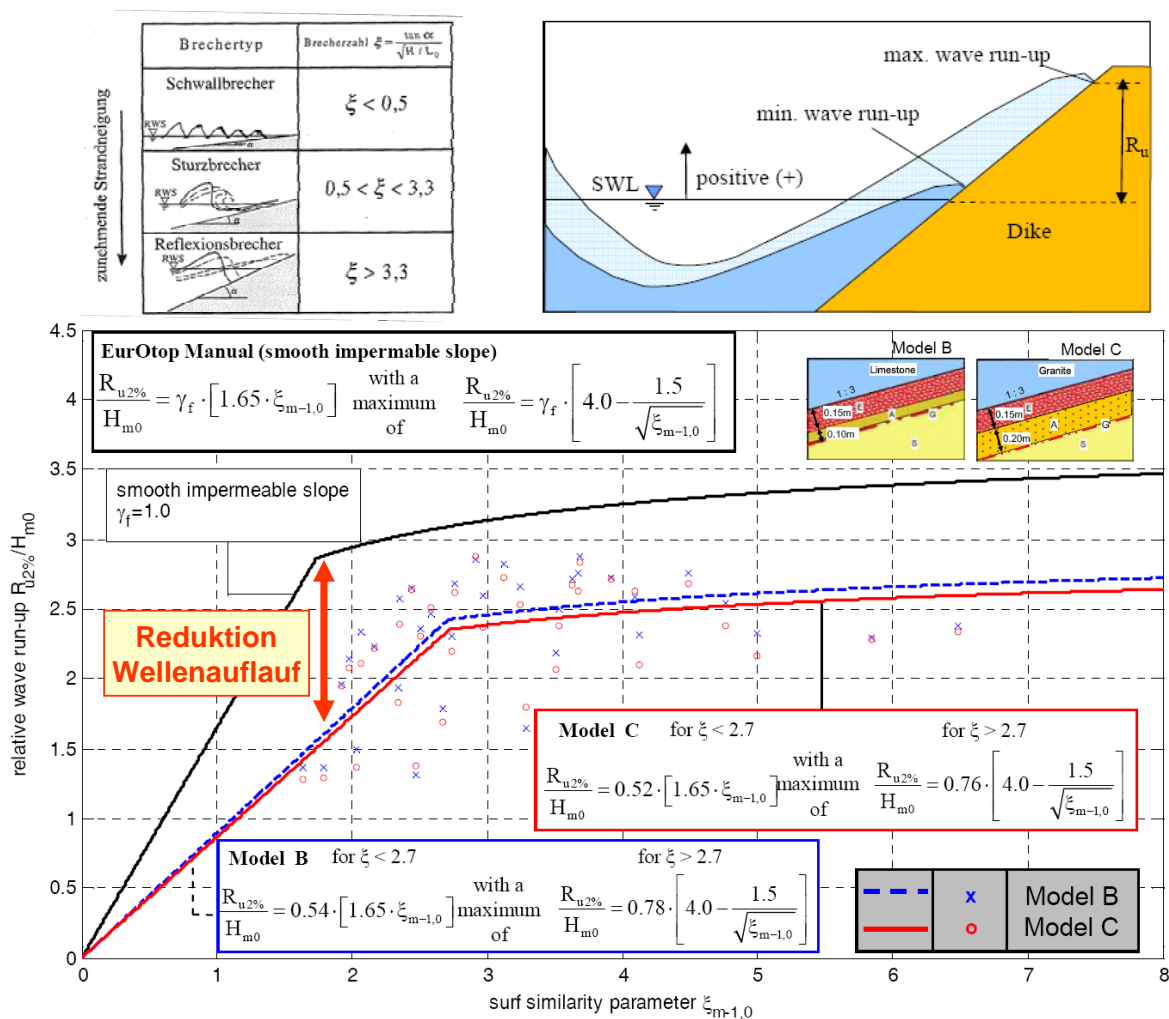


Abbildung 4-9: Relativer Wellenauflauf als Funktion der Brecherkennzahl für die Untersuchungen an den Modellen B und C im Großen Wellenkanal im Vergleich zu einer undurchlässigen Böschung [28]

Die Brecherkennzahl ξ als dimensionslose Größe gibt Aufschluss über das Brechverhalten der Wellen (vgl. Abbildung 4-9), definiert sich wie folgt

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H / L_0}}$$

und beinhaltet die Böschungsneigung $\tan \alpha$ sowie die Wellensteilheit H/L_0 , bestehend aus Wellenhöhe H und Wellenlänge L_0 im Tiefwasser. Kleine Brecherkennzahlen stehen für flache Böschungsneigungen und Schwallbrecher, größere Brecherkennzahlen für steilere Böschungen und entsprechende Brechertypen wie Sturz- oder Reflexionsbrecher (vgl. Übersicht der Brechertypen in Abbildung 4-9).

Aus Abbildung 4-9 ergibt sich, dass je nach Brecherkennzahl eine Reduktion des Wellenauflaufes von 25% bis 50% mit einem Elastocast-Deckwerk (blaue/rote Linie in Abbildung 4-9) im Vergleich zu einer undurchlässigen Böschung (schwarze Linie in Abbildung 4-9) erzielt werden kann. Diese mögliche Reduktion des Wellenauflaufes kann bei der Planung eines Elastocast-Deckwerkes berücksichtigt werden.

Für Deckwerke mit anderen Oberflächen werden Vergleichswerte des Reduktionskoeffizienten in der EAK (2002) in Tabelle A 4.2.2 genannt. Für vergleichende Betrachtungen wird auf die entsprechenden Abschnitte der EAK (2002) verwiesen.

4.3.4 Wellenablauf

Hinsichtlich des Wellenablaufes bei einem Elastocast-Deckwerk kann ebenfalls auf die Untersuchungen im Großen Wellenkanal [28] zurückgegriffen werden.

Analog zu Abschnitt 4.3.3 werden in der folgenden Abbildung 4-10 die Untersuchungsergebnisse zum Wellenablauf dargestellt.

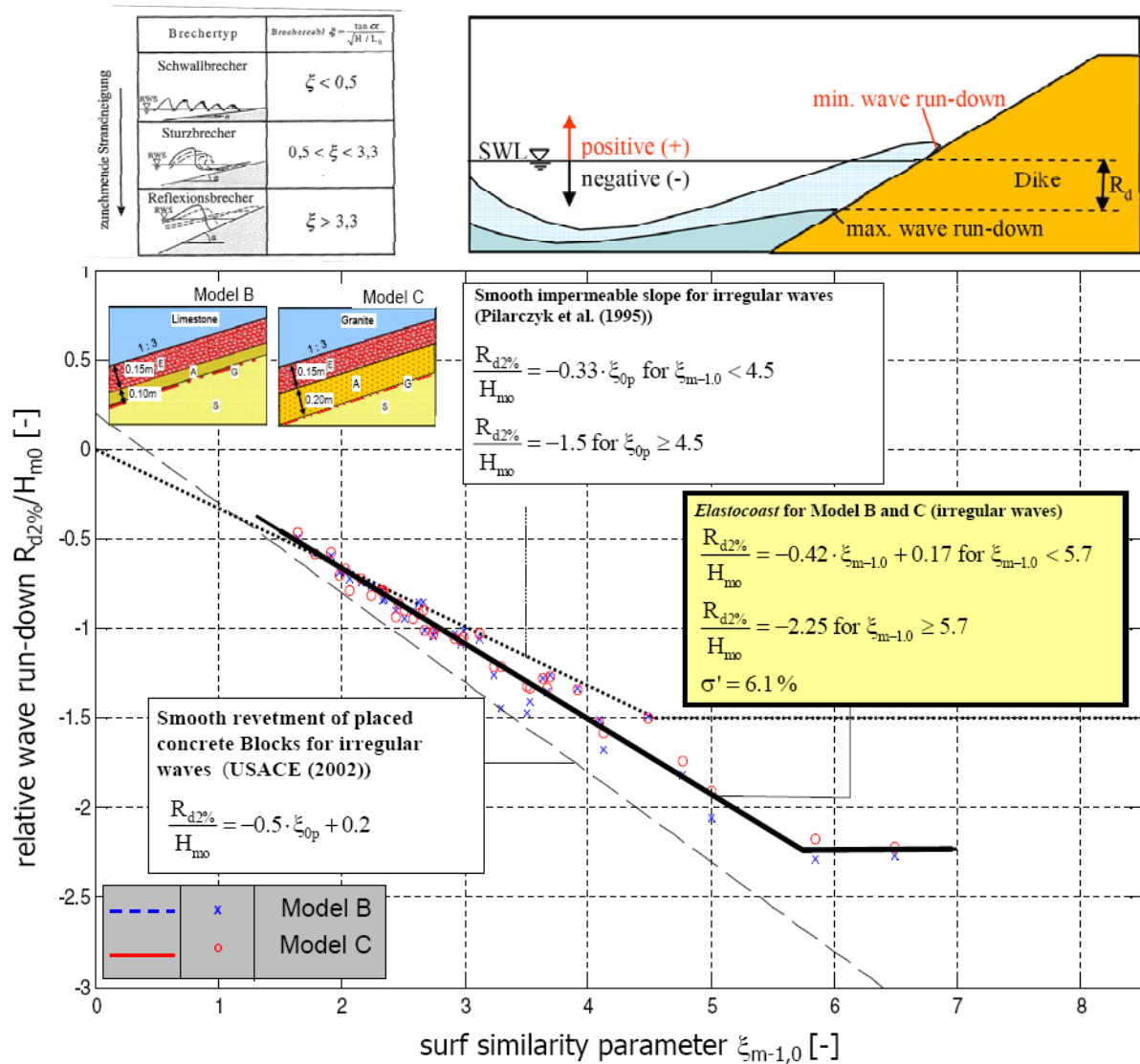


Abbildung 4-10: Relativer Wellenablauf als Funktion der Brecherkennzahl für die Untersuchungen an den Modellen B und C im Großen Wellenkanal im Vergleich zu einer undurchlässigen Böschung [28]

4.3.5 Wellenüberlauf und Überströmen

In den Niederlanden wurden Untersuchungen mit Elastocast-Deckwerken auf der Deichbinnenböschung durchgeführt. Dabei wurden große Wassermengen aus einem Wassertank auf der Deichkrone über die Binnenböschung abgelassen (vgl. Abbildung 4-11), um die Stabilität des Deckwerkes zu untersuchen.

Bei diesen Versuchen wurden Wassermengen von 125 l/s/m schadlos von dem Elastocast-Deckwerk aufgenommen. Zum Vergleich sei angemerkt, dass bei der Planung von Hochwasserschutzanlagen von Überlaufmengen in der Größenordnung von 2 bis 10 l/s/m ausgegangen wird. Daraus folgt, dass die Stand-sicherheit des Deckwerkes gegenüber sehr großen Überlaufmengen als gegeben angesehen werden kann.



Abbildung 4-11: Untersuchungen auf der Deichbinnenböschung [13]

Vorbehaltlich weiterer Untersuchungen wird in [20] die Überlaufmenge von 125 l/s/m als Bemessungsgrenze für Elastocast-Deckwerke angenommen.

4.3.6 Strömungsgeschwindigkeiten

Mit den in Abschnitt 4.3.4 dargestellten Untersuchungen verbinden sich auf Aussagen zu Strömungsgeschwindigkeiten. [20] geht davon aus, dass die Stand-sicherheit eines Elastocast-Deckwerkes gegenüber sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten¹ gegeben ist. Eine konkrete Benennung kritischer Strömungsgeschwindigkeiten für das Elastocast-Deckwerk gibt es jedoch nicht. Auftretende Geschwindigkeiten beim Wellenauf- oder -ablauf werden als unkritisch für die Stabilität des Elastocast-Deckwerkes angesehen.

¹ Unter sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten werden allgemein Geschwindigkeiten größer 5 m/s verstanden.

4.3.7 Wellenreflexion

Hinsichtlich der Wellenreflexion eines Elastocoast-Deckwerkes kann auf die Untersuchungen im Großen Wellenkanal [28] zurückgegriffen werden.

Die folgende Abbildung 4-12 zeigt das Reflexionsverhalten eines Elastocoast-Deckwerkes im Vergleich zu einer glatten und einer zweilagigen Schüttsteinböschung. [28] führt weiter aus, dass es eine Abhängigkeit des Reflexionskoeffizienten von der Wellenperiode gibt. Für weitere Erläuterungen wird auf [28] verwiesen.

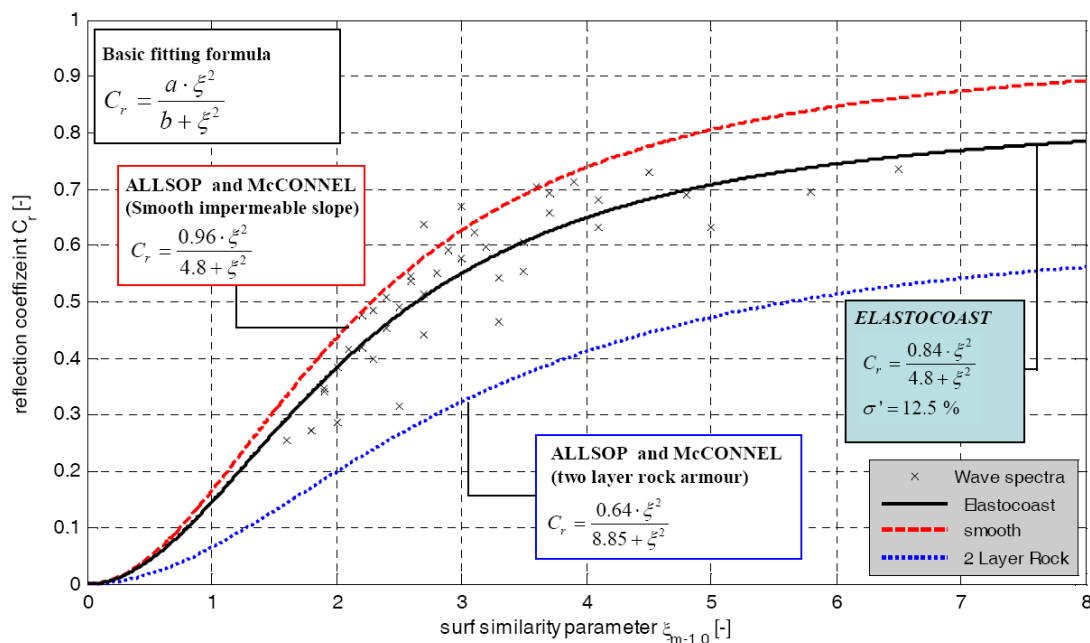


Abbildung 4-12: Wellenreflexion des Elastocoast-Deckwerkes [28]

4.3.8 Verformungen

Im Zuge der durchgeführten Modellversuche im Großen Wellenkanal wurden auch die gemessenen Verformungen des Elastocast-Deckwerkes untersucht.

Die Auswertungen von [28] zeigen, welche Verformungen ein Elastocast-Deckwerk in Abhängigkeit von der Seegangsbelastung aufweist. In der folgenden Abbildung 4-13 werden die Ergebnisse für die im Großen Wellenkanal untersuchten Elastocast-Deckwerke dargestellt.

Für weitere Details und Erläuterungen wird auf [28] verwiesen.

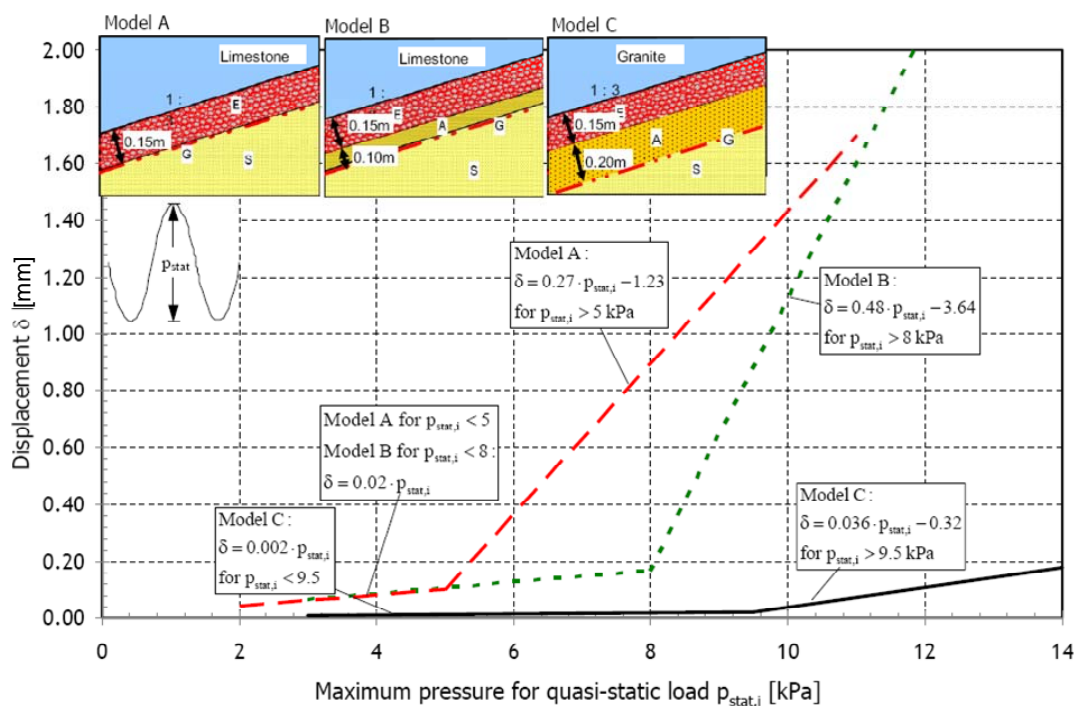
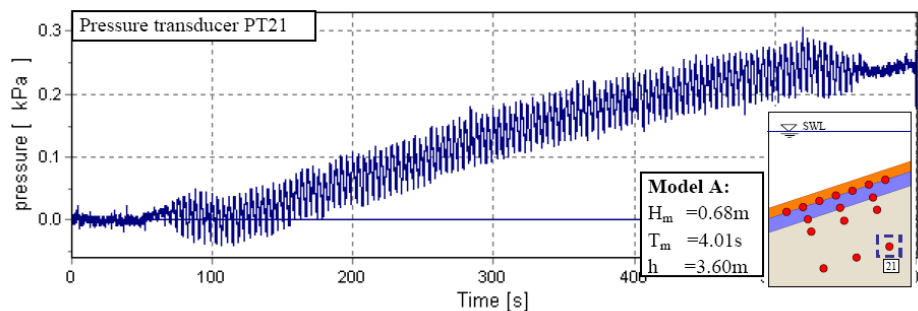


Abbildung 4-13: Maximale Verformungen der eingebauten Elastocast-Deckwerke als Funktion der maximalen Druckbelastung [28]

4.3.9 Porenwasserdrücke

Porenwasserdrücke spielen eine besondere Rolle bei der globalen Standsicherheit des Elastocoast-Deckwerkes. Porenwasserdrücke unter dem Deckwerk werden durch Tideschwankungen (nahezu statische Prozesse) und Seegangsbelastung (dynamische Prozesse) verursacht.

Bei den resultierenden Porenwasserdrücken werden transiente und residuelle Porenwasserdrücke unterschieden (Abbildung 4-14).



a) Time series of non filtered pore pressure (pressure transducer PT21)

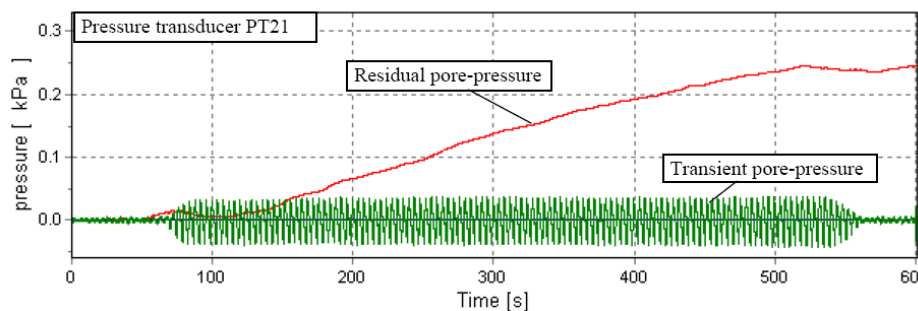


Abbildung 4-14: Definition und Unterscheidung transienter und residueller Porenwasserdrücke [28]

Dämpfung im Bodenkörper

Die auftretenden Porendrücke werden im Bodenkörper gedämpft, d.h. mit zunehmender Tiefe im Bodenkörper nehmen die Porendruckschwankungen stark ab.

Die Dämpfung der maximalen welleninduzierten Porenwasserdrücke wird in der folgenden Abbildung 4-15 dargestellt.

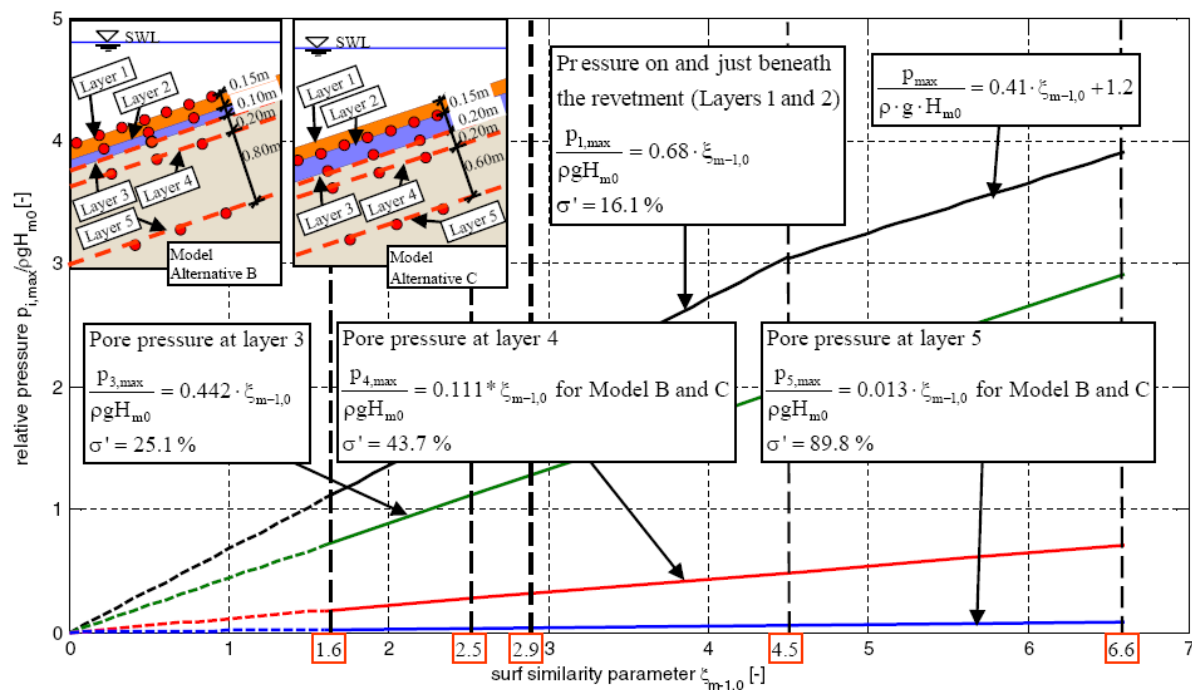


Abbildung 4-15: Relative Porenwasserdruck für verschiedene Betrachtungsebenen im Sandkern unter dem Elastocost-Deckwerk als Funktion der Brecherkennzahl [16], [28]

Nachweis der Standsicherheit bei zu erwartenden Belastungen infolge Porenwasserdrücken

Bei der Auslegung und Dimensionierung des Elastocost-Deckwerkes ist zu gewährleisten, dass die auftretenden Porenwasserdrücke (transient und residuell) nicht zu Bodenverflüssigungen (*liquefaction*), Umlagerungen und später zu Schäden (vgl. Schadensfall A bei den Modelluntersuchungen im Großen Wellenkanal [28]) führen. Dies kann durch eine ausreichende Dimensionierung der Filterschicht unter Berücksichtigung des Untergrundes gewährleistet werden.

Dieser Nachweis kann mittels Durchführung einer Stabilitätsanalyse erbracht bzw. untersucht werden. Das Grundprinzip des vertikalen Kräftegleichgewichtes wird in der folgenden Abbildung 4-16 dargestellt

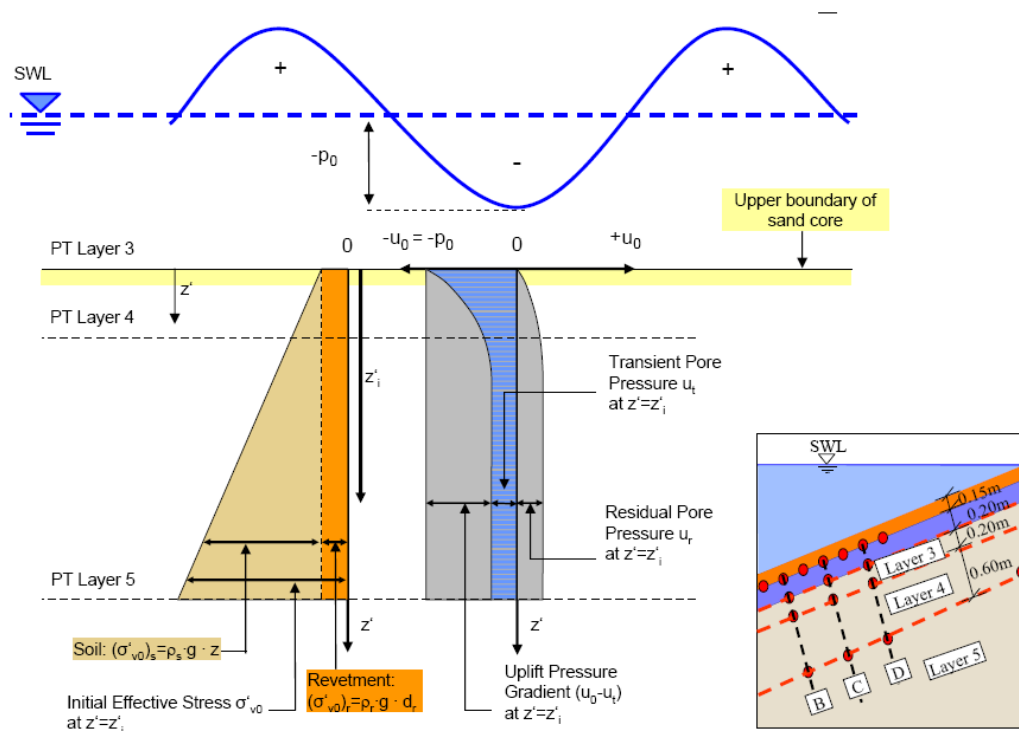


Abbildung 4-16: Schematische Darstellung auftretender Vertikalkräfte bei der Stabilitätsanalyse

Letztlich dürfen die nach oben gerichteten Liftkräfte infolge Porenwasserdruck nicht größer werden als die nach unten gerichteten Kräfte infolge Eigengewicht von Elastocast-Deckwerk und Boden. Ein beispielhaftes Ergebnis wird in der Abbildung 4-17 dargestellt. Sobald in einer Bodenschicht unter dem Deckwerk Bodenverflüssigungen auftreten können, muss mit Schäden am Deckwerk gerechnet werden.

D.h. aus Sicht der Bemessung sind die zu erwartenden Liftkräfte durch eine ausreichende Dimensionierung von Deckschicht und Filterschicht zu überdrücken. Sofern Porenwasserdrücke als Bemessungsparameter betrachtet werden müssen, ist ein entsprechender Nachweis zu führen.

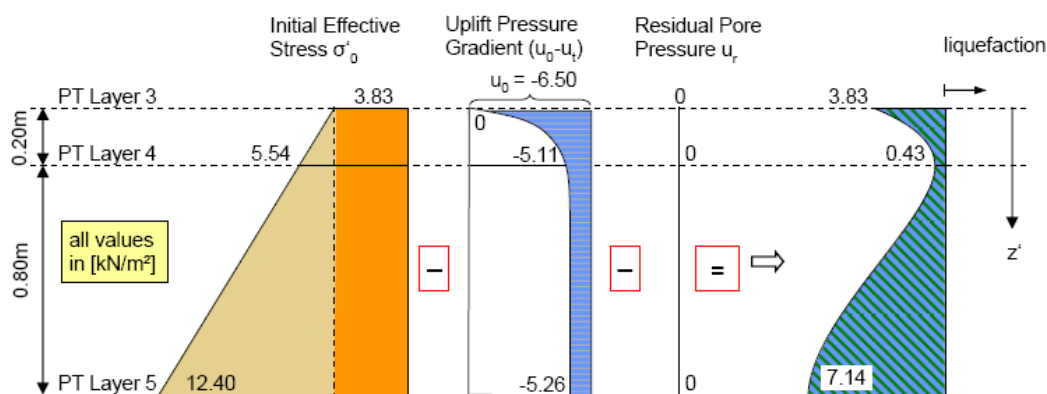


Abbildung 4-17: Exemplarische Ergebnis der Stabilitätsanalyse

Überschlägiger Nachweis der Standsicherheit

ARCADIS (2009) geht davon aus, dass sich das Elastocoast-Deckwerk aufgrund der Porosität gut für die Ableitung von Wasserspiegeldifferenzen und Porenwasser eignet. Unter der Annahme, dass das Geotextil aufgrund von Feinstoffumlagerungen im Boden vollständig undurchlässig wird, gibt [20] mit dem Bemessungsdiagramm in Abbildung 4-18 die Möglichkeit der Abschätzung der erforderlichen Deckwerksdicke. Darüber hinaus wird in [20] ein zugehöriger deterministischer Ansatz zur Ermittlung der Deckwerksdicke vorgestellt.

Figure 4.29

Design for overpressures with
flexural moment capacity of
1.0 MPa.

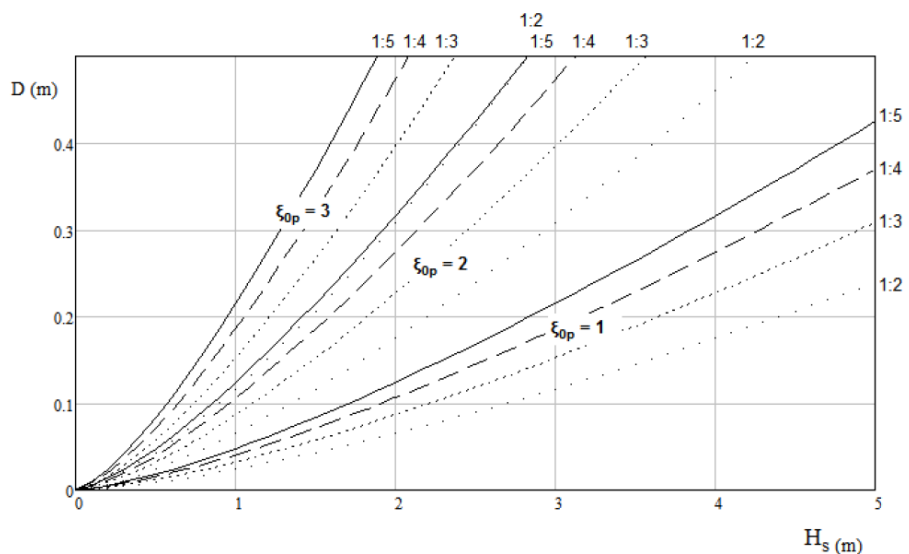


Abbildung 4-18: Bemessungsdiagramm der Deckschichtdicke im Fall auftretender Überdrücke als Funktion der signifikanten Wellenhöhe H_s [20]

4.3.10 Eislasten

Grundsätzlich wird von [20] angemerkt, dass Eis und Eislasten kein Problem für ein Elastocoast-Deckwerk darstellen. Aufgrund der relativ glatten Oberfläche eines Elastocoast-Deckwerkes können sich Eislasten demzufolge auch nicht an Einzelpunkten konzentrieren und zu Schäden führen.

Für die Deckwerksauslegung werden folgende Hinweise von [20] gegeben:

- Unebenheiten in der Deckwerksausbildung, an denen sich Eislasten konzentrieren könnten, sind zu vermeiden.
- Bei der Planung von Deckwerken in Bereichen, in denen Eislasten auftreten können, sollten Böschungsneigungen steiler als 1 : 3 vermieden werden.

Für weitere Informationen zu Eisbelastungen wird auf die EAK (2002), Empfehlung A, Abschnitt 7 verwiesen.

4.3.11 Verkehrslasten

Das Elastocast-Deckwerk ist grundsätzlich für gelegentliche Verkehrslasten ausgelegt, wie sie z. B. im Rahmen von Unterhaltungsarbeiten vorkommen. Diese Fahrzeuge können dabei sehr hohe Lasten auf das Deckwerk abgeben.

Konkrete Tests an einem Elastocast-Deckwerk wurden mit einem Kettenbagger in den Niederlanden durchgeführt. Trotz rotierender Baggerbewegungen traten keine signifikanten Schäden an der Oberfläche des Deckwerkes auf. Für weitere Informationen wird auf [13] verwiesen.

ARCADIS (2009) schlägt bei bekannter Verkehrslast folgenden Ansatz für die Ermittlung der erforderlichen Deckwerksdicke D des Elastocast-Deckwerkes vor.

$D = \sqrt[5]{\frac{P^4}{\sigma_{\max}^4}} A$ $A = \frac{27E}{16c(1-\nu^2)}$	<p>Parameter</p> <p>σ_{\max} = flexural moment capacity [MPa]</p> <p>P_{\max} = maximum axle load per tire [kN/m]</p> <p>c = coefficient of compression of subsoil [MPa/m]</p> <p>E = Young's modulus of the cover layer [MPa]</p> <p>D = thickness of the cover layer [m]</p> <p>ν = constant of Poisson (assumed to be $\nu = 0.35$) [-]</p>
--	--

Für eine Verkehrsbelastung von 1.000 Fahrten pro Jahr wird eine Mindestdeckwerksdicke von

- $D = 0,20$ m bei einem Unterbau aus Sand und
- $D = 0,25$ m bei einem Unterbau aus Klei

empfohlen.

4.4 Auslegung der Deckwerkskonstruktion

Die unter Abschnitt 4.3 vorgestellten Bemessungsparameter und die daraus ermittelten und abgeleiteten Bemessungsgrößen insbesondere zu Deckwerksaufbau und -dicke (vgl. 3.4) sind im Zuge der durchzuführenden Bemessung zu benennen. Im Ergebnis liegt damit ein Nachweis des Deckwerks zur Standsicherheit unter den einwirkenden Belastungen und den vorhandenen Randbedingungen vor.

ARCADIS (2009) gibt für die Mächtigkeit der Deckschicht einen Bereich zwischen 0,1 m und 0,5 m an.

Bezug nehmend auf die Modelluntersuchungen im Großen Wellenkanal mit dem dokumentierten Schadensfall [28] sowie die auftretenden Belastungen des Deckwerkes, insbesondere Wellen- und Porendrücke (vgl. Abschnitte 4.3.2

bzw. 4.3.9) wird empfohlen, die Notwendigkeit einer Filter- oder Ausgleichsschicht unter der Deckschicht genau zu prüfen.

Empfehlung zur Auslegung der Deckschicht

Die im Abschnitt 4.3 ermittelte Bemessungsgröße der Deckschichtdicke sollte auf 5 cm aufgerundet werden.

Bezug nehmend auf die Referenzprojekte in Abschnitt 6 wird für die Deckschicht des Elastocoast-Deckwerkes eine Mindestdicke von 0,15 m empfohlen.

Der Nachweis der erforderlichen Deckschichtdicke ist gemäß Abschnitt 4.3 auch unter Berücksichtigung des verwendeten Steinmaterials, d.h. insbesondere der Steingröße (vgl. Abschnitt 4.6.1) zu führen.

Empfehlung zur Auslegung der Filter- oder Ausgleichsschicht

Bei Elastocoast-Deckwerken mit einer Böschungsneigung von 1:3 oder steiler wird für die Filter- oder Ausgleichsschicht eine Mindestdicke von 0,15 m empfohlen.

Bei flacheren Böschungsneigungen ist die Notwendigkeit der Filter- oder Ausgleichsschicht unter Berücksichtigung der vorhandenen hydraulischen und geotechnischen Randbedingungen, der verwendeten Steingrößen, der auftretenden Belastungen und der einwirkenden Prozesse zu prüfen. Ein entsprechender Nachweis der Deckwerksstabilität (vgl. Abschnitt 4.3.9) ist durchzuführen.

4.5 Hinweise zu Konstruktionsdetails bei Anschlüssen

Die Anschlüsse und Ränder von Deckwerken stellen im Hinblick auf die Standicherheit eines Deckwerkes insgesamt sehr wichtige Bereiche dar, die auch entsprechend der vorhandenen Randbedingungen ausgebildet werden müssen. Im Extremfall können diese Anschlussdetails eines Deckwerkes über die Standicherheit des gesamten Deckwerkes entscheiden.

ARCADIS (2009) nennt einige Details zu Anschlussdetails eines Elastocoast-Deckwerkes, die nachfolgend in Abbildung 4-19 dargestellt werden.

Weitere Hinweise zu Anschlussdetails können den Referenzprojekten entnommen oder bei den dafür zuständigen Behörden erfragt werden (siehe [13]). Die Abbildung 4-20 zeigt einige Anschlussdetails, die beim Referenzprojekt Amrum ausgeführt wurden.

Grundsätzliche Hinweise für die Ausführung von Deckwerken im Anschluss an vorhandene Bauteile geben auch die Regelwerke der BAW (vgl. z. B. [7]).

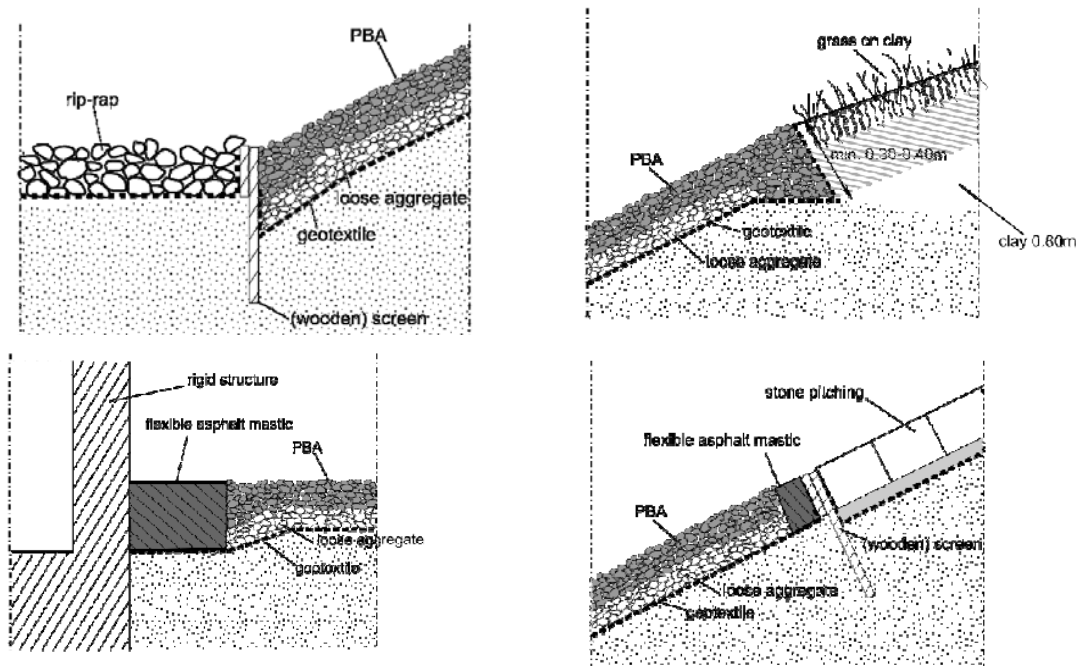


Abbildung 4-19: Exemplarische Anschlussdetails nach [20]



Abbildung 4-20: Anschlussdetails beim Referenzprojekt Amrum (Fotos: IMS)

4.6 Zusätzliche Hinweise, Anforderungen und Eigenschaften

Nachfolgend werden einige weitere Hinweise zu Elastocoast-Deckwerken gegeben. Auf die Ausführungen von ARCADIS (2009) sowie alle weiteren vorhandenen Unterlagen und Dokumente in Anlage 1 wird grundsätzlich verwiesen.

4.6.1 Steinmaterial und Steingrößen für Elastocoast-Deckschicht

Das gewählte Steinmaterial und die jeweiligen Korngrößen haben Einfluss auf die Deckschichtdicke. ARCADIS (2009) gibt an, dass unterschiedliches Steinmaterial für die Elastocoast-Deckschicht verwendet werden kann.

Für bereits verwendete Steinmaterialien wird auf die Referenzprojekte in Abschnitt 6, BASF PU sowie [13] verwiesen.

Grundsätzlich sollte die Deckschicht eine Mindestdicke von

- $2 \times D_{50}$ aus funktionalen Betrachtungen
- $2,5 \times D_{\max}$ aus praktischen Überlegungen

aufweisen. Diese Mindestdicken sind vor dem Hintergrund der Bemessung der Deckschichtdicke in Abschnitt 4.3 zu sehen.

Die Materialeigenschaften unterschiedlicher Deckwerksteine werden von ARCADIS (2009) genauer zusammengestellt.

4.6.2 Sanierung von Deckwerken

Grundsätzlich sind Sanierungen vorhandener Deckwerke mit einem Elastocoast-Deckwerk möglich. Die jeweiligen Randbedingungen bestimmen die Planung und Ausführung des Elastocoast-Deckwerkes.

ARCADIS (2009) gibt in Kapitel 4.3.7 Hinweise, wenn Elastocoast-Deckwerke für die Sanierung von bestehenden Deckwerken herangezogen werden. Elastocoast ist dabei auf die vorherrschenden Belastungen auszulegen. ARCADIS (2009) geht davon aus, dass keine festen Verbindungen zwischen dem Elastocoast-Deckwerk und dem übrigen Deckwerk angesetzt werden kann. Auf den zugehörigen deterministischen Bemessungsansatz von [20] und weiteren Ausführungen wird verwiesen.

Das LKN hat positive Erfahrungen in der Verbindung von Elastocoast-Deckwerk mit einem bestehenden Schüttsteindeckwerk im Referenzprojekt Amrum gemacht (vgl. Abbildung 4-19).

Die Sanierung von Elastocoast-Deckwerken selbst kann einfach durchgeführt werden.

4.6.3 Widerstandsfähigkeit gegen Frost und Tau

Die Widerstandsfähigkeit von Elastocast gegenüber Frost und Tau wurde vom Prüfinstitut für Baustoffe und Umwelt GmbH untersucht. Im Ergebnis weisen die Untersuchungen eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegenüber Frost-Tau-Wechseln auf (siehe [20]).

4.6.4 Rückbaufähigkeit

Bei einem Rückbau des Elastocast-Deckwerkes sind die in Anlage 1 zu dem Thema Rückbau aufgelisteten Unterlagen und Dokumente u. a. zur Entsorgung und Weiterverwendung von Elastocast [29] zu beachten.

In [12] heißt es diesbezüglich:

„Der aus dem ausreagierten PUR und Steinen zusammengesetzte Werkstoffverbund kann am Ende seiner Lebensdauer wie konventioneller Abfall behandelt werden. Entsprechend dem Europäischen Abfallkatalog EAK 070213 müssen ausreagierte PUR und Steine für sich genommen nicht als Sondermüll behandelt werden. Als Abrissabfälle mit Anteilen von weniger als 5 Vol.-% PUR gelten EAK 170117 oder 170504 (Mischung aus Zement, Ziegel, Fliesen oder Keramik). Bei mehr als 5 Vol.-% findet EAK 170904 (Mischung aus Baustellen- und Abrissabfall) Anwendung. Eine Möglichkeit der Wiederverwertung stellt die Verwendung des Werkstoffverbundes im Straßenbau dar.“

4.6.5 Umweltbelange

Auf die Umweltbelange soll an dieser Stelle nicht detailliert eingegangen werden. BASF PU hat diesbezüglich zahlreiche Untersuchungen durchführen lassen. Ein Überblick der vorhandenen Dokumente und Unterlagen zu den Themen Ökologie, Ökotoxikologie und Wasserqualität wird in Anlage 1 gegeben.

In [12] wird über wissenschaftliche Untersuchungen zur Neubesiedlung von Elastocast-Deckwerken in den Niederlanden berichtet. Im Ergebnis heißt es, dass *„die Kolonisierung durch Microalgen und Tiere unter günstigen Bedingungen schnell und dauerhaft verlaufen kann“*.

4.6.6 Begrünbarkeit

Die Begrünbarkeit eines Elastocast-Deckwerkes ist grundsätzlich gegeben. Hinsichtlich der Deckwerks-Bemessung wird jedoch empfohlen, von einer reduzierten Porosität und Durchlässigkeit des Elastocast-Deckwerkes auszugehen. Auf die Abschnitte zur Bemessung der Elastocast-Deckwerkes in Abhängigkeit der vorherrschenden geotechnischen und hydraulischen Randbedingungen wird verwiesen. Entsprechende Nachweise sind für den Fall der Begrünung zu erbringen. Ein Beispiel der natürlichen Begrünung auf der Hallig Nordstrandischmoor wird in [12] (vgl. Abb. 2.6.2.10) gegeben.

4.6.7 Zusätzliche Verankerungen

Bei Belastungen eines Elastocoast-Deckwerkes infolge Porenwasserdrücken mit möglichen Verformungen von Untergrund und Deckwerk (Abheben) besteht grundsätzlich die Möglichkeit der zusätzlichen Verankerung, z. B. über Erdanker. Entsprechende Details zur geplanten Verankerung und zugehörige Nachweise sind zu erbringen.

4.6.8 Porosität

Die Porosität des Elastocoast-Deckwerkes entspricht der Porosität des verwendeten Steinmaterials. Der Klebefilm um die einzelnen Steine reduziert die Porosität nicht.

4.6.9 Beständigkeit gegenüber UV-Strahlung

Die Beständigkeit von Elastocoast gegen UV-Strahlung wurde untersucht. ARCADIS (2009) benennt Untersuchungen von BASF PU, die zum Ergebnis kommen, dass nach 3.000 h Bestrahlung durch UV-Licht keine negativen Einflüsse auf die Druckfestigkeit (*compressive strength*) feststellbar waren. Diese UV-Lichtbelastung entspricht einer realen Sonnenlichtbelastung in Zentraleuropa über einen Zeitraum von 3 Jahren.

Aus Abbildung 4-21 wird erkennbar, welchen positiven Effekt durch das Bestreuen des „frischen“ Elastocoast-Deckwerkes mit Sand einhergehen. Diese zusätzlichen Sandkörner sorgen nicht nur für eine bessere Begehrbarkeit sondern schützen auch zusätzlich das Deckwerk vor der UV-Strahlung.

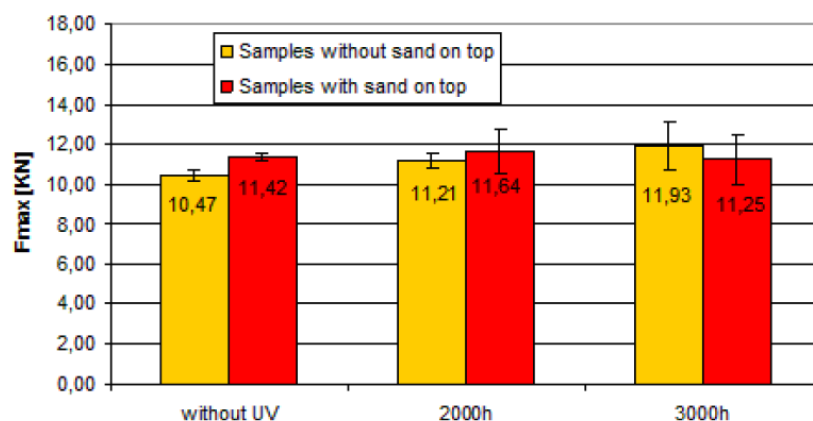


Abbildung 4-21: Widerstandsfähigkeit von Elastocoast gegenüber UV-Strahlung

Für weitere Details wird auf [13] und [20] verwiesen.

4.6.10 Beständigkeit gegenüber Salzwasser

Die Beständigkeit von Elastocoast gegenüber Salzwasser wurde mit einem beschleunigten Testverfahren (EN ISO 2578) untersucht und bestätigt. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass Elastocoast stabil und widerstandsfähig gegenüber Seewasser ist und eine Lebensdauer von 80 bis 100 Jahren hat. Für weitere Details wird auf [13] und [20] verwiesen.

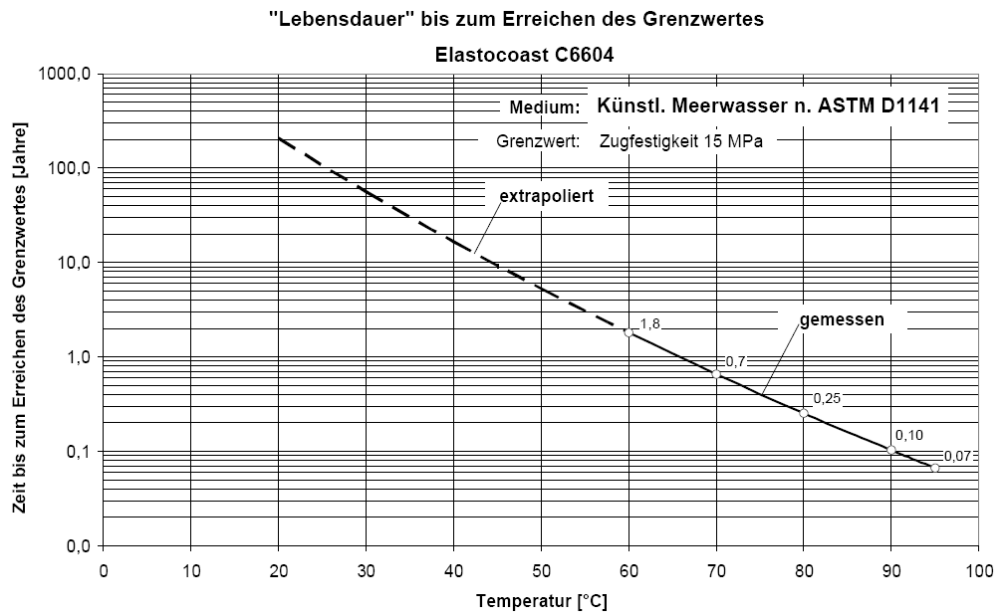


Abbildung 4-22: Widerstandsfähigkeit von Elastocoast gegenüber Salzwasser (in [20])

5 Hinweise zu Planung, Genehmigung, Ausschreibung und Ausführung eines Elastocoast-Deckwerkes

5.1 Allgemeines

Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 4 zusammengestellten Bemessungsgrundlagen kann ein Elastocoast-Deckwerk für gegebene hydraulische, geotechnische und bauliche Randbedingungen bemessen werden. Nachfolgend werden einige weitere Hinweise zu Planung, Genehmigung und Ausführung eines Elastocoast-Deckwerkes gegeben.

5.2 Planung

Das Elastocoast-Deckwerk kann und muss unter Berücksichtigung in Abschnitt 4 zusammengestellten Grundlagen bemessen werden.

Für den Fall der Herstellung der technischen Gleichwertigkeit zwischen einem konventionellen Deckwerk und einem Elastocoast-Deckwerk ist analog vorzugehen, d.h. es ist die technische Gleichwertigkeit unter Berücksichtigung der einzelnen bekannten Bemessungsparameter für die verschiedenen Bemessungsgrößen herzustellen.

5.3 Genehmigung

Die Genehmigung von Bauvorhaben und Maßnahmen im Küstenschutz obliegt den zuständigen Landesbehörden in den Küstenländern.

Hinweise zu genehmigungsrelevanten Fragestellungen können dem vorliegenden Dokument entnommen werden. Darüber hinausgehende Informationen sind nach derzeitigem Stand nicht bekannt.

5.4 Ausschreibung

Die Phase der Ausschreibung eines Elastocoast-Deckwerkes setzt die Planung und Genehmigung voraus.

Die Ausschreibung muss konkret Bezug nehmen auf das gewünschte Bauverfahren und die dafür erforderlichen Baumaterialien und Bauverfahren benennen, wie es auch bei der Ausschreibung konventioneller Deckwerke üblich ist.

Für die genaue Benennung des Werkstoffes Elastocoast sollte BASF PU kontaktiert werden, um die genaue Bezeichnung zu klären.

Ergänzend sollte in der Ausschreibung abgefragt werden, ob bereits Erfahrungen der ausführenden Baufirma mit der Herstellung von Elastocoast-Deckwerken bestehen. In jedem Fall sollte die Beratung von BASF PU während der Ausschreibung aber auch für die folgende Bauphase berücksichtigt und explizit ausgeschrieben werden.

5.5 Herstellung

Folgende Hinweise und Anforderungen müssen für die Herstellung von Elastocoast-Deckwerken gegeben werden:

- *Saubere und sichttrockene Deckwerkssteine*

Die verwendeten Deckwerkssteine müssen sauber und sichttrocken sein, wenn sie mit dem Werkstoff Elastocoast gemischt werden. Eine verbleibende Restfeuchte auf den Steinen führt ansonsten zu einer Reaktion zwischen Kleber und Wasser mit dem Ergebnis, dass sich kein dauerhaft stabiles Korngerüst ausbildet (vgl. Abbildung 5-1).



Abbildung 5-1: Beispiel für einen Qualitätsmangel infolge Restfeuchte auf den Steinen beim Herstellungsprozess (Fotos: IMS)

- *Staubreste auf den Steinen*

Staubreste auf den verwendeten Deckwerkssteinen sind zu vermeiden. Ein übermäßiger Anteil feiner Gesteinsbestandteile und –reste führt zu einer erhöhten Bindemittelmenge.

- *Einbau unter Wasser*

Sofern die sauberen und sichttrockenen Deckwerkssteine ordnungsgemäß mit dem Werkstoff Elastocoast gemischt und ummantelt wurden, ist anschließend auch der Einbau unter Wasser möglich. Derzeit liegen Erfahrungen bis zu einer begrenzten Wassertiefe vor [13].

- *Abstreuen der Oberfläche mit Sand*

Durch das Abstreuen der Oberfläche mit Sand vor dem Aushärten des Werkstoffes kann die optische Erscheinung und die Begehbarkeit des Deckwerkes verbessert werden. Gleichzeitig erhöht sich auf diese Weise der UV-Schutz des Deckwerkes (vgl. Abschnitt 4.6.9).

- *Temperatur*

Nach ARCADIS (2009) ist die Herstellung von Elastocoast-Deckwerk im Temperaturbereich zwischen 5 °C und 30 °C möglich.

– *Luftfeuchtigkeit*

Die Luftfeuchtigkeit stellt grundsätzlich kein Problem dar, solange diese keinen Einfluss auf die vorhandene Restfeuchte des verwendeten Steinmaterials hat.

– *Arbeitsrichtung*

Bei der Herstellung von Elastocast-Deckwerken wird die Ausführung in Fallrichtung empfohlen (vgl. Abbildung 5-2).

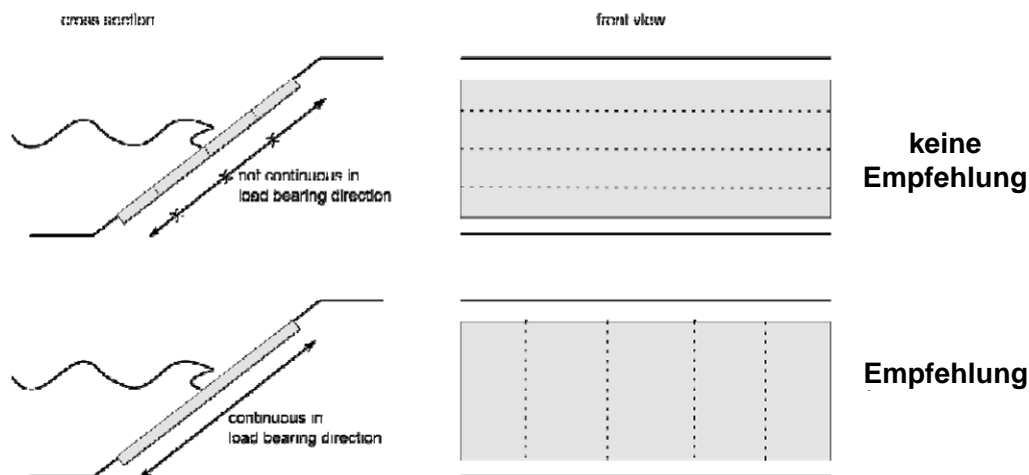


Abbildung 5-2: Empfehlung für die Ausbildung von Anschlüssen und interner Übergänge beim Herstellungsprozess von Elastocast-Deckwerken nach [20]

Verarbeitungshinweise

Folgende zehn Verarbeitungshinweise gibt der Hersteller BASF PU an:

1. Trockene Wetterverhältnisse.
- **kein Niederschlag**
- **Außentemperatur min. 10 °C**
2. Steine müssen trocken und bevorzugt gewaschen angeliefert werden.
- **kein Schmutz auf den Steinen.**
3. Mischer muss trocken sein.
4. Untergrundvorbereitung muss entsprechend Planungsvorschrift erfolgen.
5. Vorgegebene Steinmenge bestimmen und in Mischer füllen.
Bsp.: 33 kg PUR / 1m³ Steine (ca. 3 Volumen %)
6. B-Komponente in A-Komponente gießen und miteinander mischen.
- **Sicherheitsdatenblätter beachten.**
- **Schutzkleidung anlegen!**
7. Angemischten "Kleber" zu den Steinen geben und tumbeln.
8. Stein- Klebergemisch an vorhergesehene Stelle austragen und verteilen.
9. Deckwerk mit Sand abstreuen.
10. Bei Bauunterbrechung, Mischer mit neuen, trockenen Steinen mechanisch reinigen.

Empfehlung

Es wird empfohlen, dass eine Beratung und/oder technische Begleitung der Bauarbeiten durch den Hersteller BASF PU erfolgt, um die Qualitätssicherung sicher zu stellen.

Baufirmen, die bisher keine Erfahrungen in der Herstellung von Elastocoast besitzen, wird angeboten, diese Erfahrungen im Vorwege durch BASF PU zu erlangen. Dies stellt eine weitere Komponente der Qualitätssicherung dar.

5.6 Monitoring

Monitoring-Programme zu einzelnen Elastocoast-Deckwerken wurden bereits durchgeführt. Entsprechende Hinweise zur Vorgehensweise bei der Durchführung von Monitoring-Maßnahmen werden von ARCADIS (2009), Kapitel 6 gegeben.

6 Referenzprojekte

6.1 Referenzprojekte mit Elastocast-Deckwerken

Elastocast-Deckwerke sind vorwiegend in Deutschland, aber auch in den Niederlanden, Frankreich und Großbritannien sowie in Kanada erstellt worden. Tabelle 6-2 gibt eine vollständige Zusammenstellung dieser Referenzprojekte mit Angabe des Herstellungsdatums. Für weitere Erläuterungen zu den einzelnen Referenzprojekten wird auf BASF PU [13] verwiesen.

Tabelle 6-1: Referenzprojekte für Elastocast-Deckwerke [13] (Stand 06/2010)

Deutschland	Niederlande
» Obermaubach (09/2009)	» Bathpolder (07/2009)
» Kühlungsborn (08/2009)	» Harlingen (11/2008)
» Cuxhafen (07/2009)	» Petten (10/2007)
» Norddeich (06/2009)	» Zuidbout (09/2007)
» Emden (05/2009)	Frankreich
» Kranenburg (04/2009)	» La Bouille (05/2009)
» Amrum (11/2008)	» St Pierre de Manneville (04/2009)
» Langeness (08/2008)	» Bollène (03/2009)
» Nordstrandischmoor (06/2008)	» Le Havre (05/2008)
» Niebuell (12/2007)	Großbritannien
» Lemförde (09/2007)	» Holland on sea (10/2008)
» Sylt Munkmarsch (09/2007)	» Walton (04/2008)
» Hallig Gröde II (06/2007)	Kanada
» Hallig Gröde (07/2006)	» Fighting Island (09/2007)
» Sylt Ellenbogen (11/2005)	Sonstige
» Hamburger Hallig (10/2004)	» Trinkwasser Zulassung in Großbritannien

6.2 Referenzprojekte an der Deutschen Nord- und Ostseeküste

Die Referenzprojekte mit Elastocast-Deckwerken an der Deutschen Nord- und Ostseeküste werden in Tabelle 6-2 detaillierter dokumentiert. Für die einzelnen Referenzprojekte können neben dem Baujahr die geometrischen Größen wie Fläche, Länge (böschungsparell), Dicke des Deckwerkes sowie see- und binnenseitige Böschungsneigung abgelesen werden. Darüber hinaus werden in Tabelle 6-2 Angaben zu dem verwendeten Steinmaterial und zum Deckwerksunterbau gemacht.

Die flächenmäßig größten Elastocast-Deckwerke wurden auf den Halligen Gröde, Nordstrandischmoor und Langeness sowie auf der Insel Amrum gebaut.

Die größte seeseitige Böschungsneigung wurde mit 1 : 1,5 allerdings in kleinerer Flächengröße auf der Hamburger Hallig realisiert.

Als Steinmaterial wurde Granit- und Eisensilikatschotter in der Größe von 20/40 mm bis 50/60 mm verwendet.

Als Unterbau wurde i.d.R. eine Geotextilunterlage verwendet.

Tabelle 6-2: Übersicht der wichtigsten Referenzprojekte von Elastocoast-Deckwerken an Nord- und Ostsee mit Angabe wesentlicher Deckwerksparameter

Projektname	Bau-jahr	Fläche [m ²]	Länge [m]	Dicke [cm]	Neigung Seeseite [1 : m]	Neigung binnen [1 : m]	Material	Unterbau
Nordsee								
Sylt Ellenbogen	2005	270		25 - 30	1 : 10	--	Eisensilikat-schotter	Sand mit Geotextil
Hallig Gröde I	2006	500	--	25	1 : 3	1 : 3	Granitschotter 50/60	Schotter mit Geotextil
Hallig Gröde II	2007	3.000	500	25	1 : 3	1 : 3	Granitschotter 50/60	Schotter mit Geotextil
Hamburger Hallig	2008	120	--	30	1 : 1,5	1 : 1	ohne Angabe	vorhandener Schotterkern
Amrum	2008	1.875	254	15	1 : 3	--	Granitschotter 20/40	Geotextil-unterlage
Hallig Nordstrand-schmoor	2008	1.800	--	--	--	--	Granitschotter 40/60	Schotterkern/ Geotextil
Hallig Langeness	2008	1.500	--	--	--	--	Granitschotter 40/60	Schotterkern/ Geotextil
Ostsee								
Kühlungsborn	2009	100	--	--	--	--	Granitschotter 32/64	Geotextil-unterlage

Bei dem Referenzprojekt auf der Hallig Langeness wurde das vorhandene see-seitige Deckwerk mit einem Elastocoast-Deckwerk in Form einer Verwallung erhöht als sog. „Igel“-Bauwerk (vgl. Abbildung 6-1). Als Unterbau wurde das vorhandene Deckwerk sowie eine neuverlegte Geotextilunterlage verwendet.

Bezüglich der hydraulischen Wirkungsweise wird auf die Abbildung 2-4 verwiesen. Das Elastocoast-Deckwerk ist aufgrund der Porosität in der Lage, die Wassermengen beim Wellenauflauf z. T. zu „verschlucken“.

Die Porosität des Elastocoast-Deckwerkes (vgl. Abschnitt 4.6.8) ermöglicht es dabei, dass Wasser infolge des Wellenauflauf auf die Binnenseite des Deckwerkes auf das Halligvorland transportiert werden kann. Dies hat u. a. den positiven Effekt, dass Wellen, die bei weiter ansteigendem Wasserstand über dem „Igel“ brechen, dann in ein vorhandenes Wasserpolster hineinbrechen, was aus hydraulischer Sicht einen stark dämpfenden, d. h. positiven Effekt hat.



Abbildung 6-1: Herstellung des Elastocoast-Deckwerkes auf der Hallig Langeness (Fotos: LKN)

6.3 Großmaßstäbliche Modelluntersuchungen im Großen Wellenkanal

Im Großen Wellenkanal in Hannover wurden großmaßstäbliche Modelluntersuchungen mit Elastocoast-Deckwerken auf einer 1 : 3 geneigten Böschung durchgeführt (vgl. Abbildung 6-2).

Die systematischen Untersuchungen umfassen u. a. die hydraulische Wirksamkeit des Deckwerkes (Wellenaufbau, Reflexionsverhalten, Druckbelastungen unter dem Deckwerk, Dämpfung), mechanische Auswirkungen infolge der hydraulischen Belastungen (Bewegungen/ Verschiebungen des Deckwerkes) sowie die Untersuchung der geotechnischen Randbedingungen (Porenwasserüberdrücke, Bodenverflüssigung).

Bei den Untersuchungen mit dem Modell A (Elastocoast-Deckschicht von 0,15 m auf Geotextil) ist es zu einem Versagen der Deckschicht gekommen. Die spätere Analyse ergab, dass Porenwasserüberdrücke im Untergrund unter dem Deckwerk zu einer Verflüssigung (*liquefaction*) und resultierenden Verformungen des Untergrundes geführt haben, was letztlich zu einem Deckwerksversagen des Modells A führte. Für weitere Erläuterungen und Analysen zum Schadensfall wird auf [28] verwiesen.

Im Vergleich zu den beiden Modelleinbauten B und C wird darauf hingewiesen, dass ein ausreichendes Eigengewicht des Deckwerkes (gleichbedeutend mit der Deckwerksdicke) insbesondere bei steileren Böschungsneigungen erforderlich ist.

Auf die Dokumentation der Ergebnisse in [28] wird an dieser Stelle verwiesen.

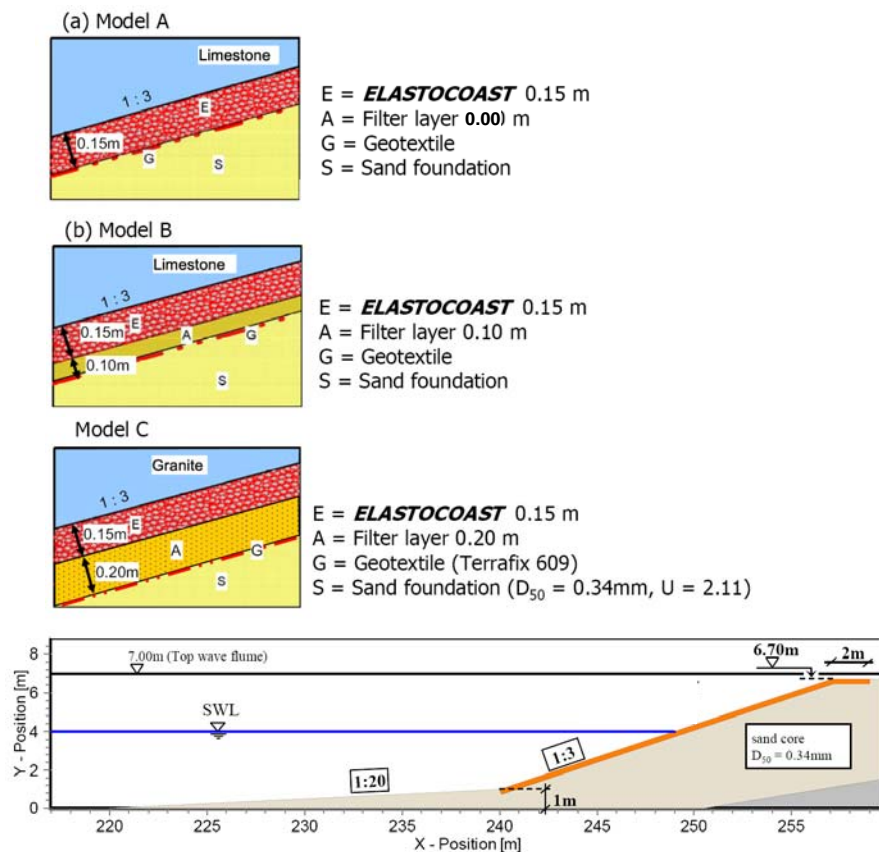


Abbildung 6-2: Untersuchungen von Elastocast-Deckwerken im Großen Wellenkanal in Hannover [28]

7 Zusammenfassende Hinweise

Mit dem vorliegenden Bericht werden die technischen Bemessungsgrundlagen für ein Elastocast-Deckwerk auf der Grundlage vorliegenden Informationen, Unterlagen und Dokumente vorgelegt. Hierbei sind vorrangig die Arbeiten von ARCADIS (2009) und LWI (2010) zu nennen. Der Fokus der dokumentierten Bemessungsgrundlagen liegt dabei auf Deckwerken im Küsten- und Ästuarbereich.

Im Rahmen der Bearbeitung wurden von IMS Gespräche mit den für den Küstenschutz zuständigen Behörden geführt. Grundsätzlich lässt sich dazu feststellen, dass die zuständigen Behörden in der Regel sehr offen für neue Verfahren im Küstenschutz sind, wie auch die bisherigen Referenzprojekte zeigen.

In diesen Behördengesprächen zeigte sich, dass für die Anwendung von Elastocast-Deckwerken im Küstenbereich zwei grundsätzliche Fragen immer wieder in den Vordergrund rücken. Dies bezieht sich zum einen auf die Möglichkeit des Unterwassereinbaus und zum anderen auf die erforderliche Gesamtmasse des Elastocast-Deckwerkes. Auch wird das Elastocast-Deckwerk im Zusammenhang mit dem vorhandenen Untergrund gesehen. Auf die über und unter einem Elastocast-Deckwerk einwirkenden hydraulischen und geotechnischen Parameter und Prozesse und daraus ableitbare Bemessungsgrößen wird grundlegend von LWI (2010) berichtet. Die Ergebnisse des LWI finden entsprechend Eingang in die vorliegenden Bemessungsgrundlagen.

Ein weiterer Punkt der Diskussion betrifft die Flexibilität des Elastocast-Deckwerkes. Durch die Verbundwirkung ist das Gesamtmaterial insgesamt nicht so flexibel wie loses Deckwerk und kann dadurch nicht so elastisch auf Geländebewegungen und Ausspülungen reagieren. Diese Eigenschaft des Elastocast-Deckwerkes ist im Rahmen der Planungen entsprechend zu berücksichtigen.

Elastocast wurde an einigen Küstenabschnitten z. B. in Schleswig-Holstein schon sehr erfolgreich eingesetzt. Dies trifft insbesondere auf den Schutz der Halligen (z. B. „Igel“-Bauwerk auf der Hallig Langeness) zu. Hier wird Elastocast vom LKN bereits als Bauweise im Küstenschutz empfohlen. Die Erfahrungen sind bisher sehr positiv.

Hamburg, 30. Juni 2010

IMS Ingenieurgesellschaft mbH

gez. Peters

gez. Teschke

Anlagen

- Anlage 1** Zusammenstellung der vorhandenen
Dokumente für den Werkstoff
Elastocoast und dessen Anwendung im
Deckwerksbau
- Anlage 2** Bemessungsdiagramme Wellenhöhe,
Auszug aus [20]
- Anlage 3** Weitergehende Erläuterungen zur
Bemessung des Elastocoast-Deckwerkes
auf die Wellenhöhe, Annex 1 von [20]

Anlage 1

Zusammenstellung der vorhandenen Dokumente für den Werkstoff Elastocoast und dessen Anwendung im Deckwerksbau

Vorhandene Unterlagen zum Werkstoff Elastocoast

Allgemeine Unterlagen

- [12] Elastocoast – Innovative Technologie im Küstenschutz ... heute und morgen, Informationen, Referenzen und Dokumente, BASF, Ausgabe 2008
- [13] BASF Polyurethanes GmbH, Internetinformationen, <http://www.polyurethanes.basf.de/pu/Coastal-Defense>
- [14] BASF Polyurethanes GmbH, Informationsbroschüre Elastocoast - Alles, was Sie über modernen Küstenschutz wissen müssen, 2010
- [15] Polyurethan-Schotter-Verbund für Küstenschutzdeckwerke, Bautechnik 87 (2010), Heft 6
- [16] BASF Polyurethanes GmbH, Veranstaltung Zukunftsichere Küsten mit innovativen Materialien, Infotage Husum/Amrum, 10./11. Mai 2010, Präsentationen der Fachvorträge

Technik

- [17] BASF PU, Technische Merkblatt, Elastocoast 6551/100, 06.06.2006
- [18] Gu (2007) Hydraulic Properties PUR-Revetments compared to those of open Stone Asphalt Revetment, TU Delft, Msc. Thesis Report, 08/2007
- [19] Bijlsma (2008) The Elastocoast System – A study of possible failure mechanisms, TU Delft, Msc. Thesis report, 09/2008
- [20] ARCADIS (2009) Polyurethane bounded aggregate revetment, Design Manual, 14.09.2009
- [21] FZK (2009) Large-scale model test on Elastocoast revetment in GWK, Präsentation zum Demonstrationsversuch am 16.06.2009
- [22] Elastomeric Revetments with ElastoCoast – Is Perspectives in River and Coastal Protection-Präsentation Pasche / Evertz
- [23] TUHH (2008) Fortführung wissenschaftliche Untersuchungen an ElastoCoast-Pilotanlagen in Schleswig-Holstein, Abschlussbericht, 31.07.2008
- [24] TUHH (2005) Elastomerische Deckwerk, Eigenschaften – Bemessung – Anwendung, Entwurf Evertz, Juli 2005
- [25] Hübsch (2004) Ableitung der maßgebenden Angriffskräfte auf die Tragkonstruktion eines Polyurethan-verklammerten Deckwerkes auf der Basis von Naturmessungen, TUHH, Diplomarbeit, März 2004

- [26] Klauder (2004) Ermittlung der Grenzwiderstandskräfte der Tragkonstruktion einer Polyurethan-verklammerten Steinschüttung auf der Basis experimenteller Untersuchungen, TUHH, Diplomarbeit, März 2004
- [27] Evertz (2009) Verfestigung von Deckwerken mit Polyurethan, Dissertation, TU Hamburg-Harburg, Institut für Wasserbau
- [28] LWI (2010) Hydraulic Performance, Wave Loading and Response of Elastocoast Revetments and their Foundation – A Large Scale Model Study -, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, LWI Report No. 988, Final Report, 08.01.2010

Rückbau - Abfalleinstufung und Entsorgung

- [29] Elastogran GmbH (2005) Die Entsorgung von Abfällen aus der Polyurethan-Herstellung und – Verarbeitung in der Bundesrepublik Deutschland, Stand 06/2005
- [30] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (2003) LAGA-Merkblatt: Anforderungen an die Stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln, 5. Auflage, Stand 06.11.2003

Ökologie

- [31] Pilots Elastocoast, results for the storm season 2007/2008, Egon Bijlsma, Marcelle Lock, ARCADIS
- [32] Early colonization of littoral communities on polyurethane substrates, A field and laboratory study, Marcelle Lock, ARCADIS
- [33] Ecological Research Elastocoast, Dutch Pilot Locations Petten and the Zuitbout, Report, Marcelle Lock

Ökotoxikologie

- [34] Elastogran GmbH (2008) Bewertung des Einflusses von ausgehärtetem Elastocoast 6551/100 auf aquatische Ökosysteme, Schreiben von Dr. T. Schupp vom 13.11.2008
- [35] Institut Fresenius (2007) Anwendungstest: Elastocoast 6551/100, Prüfbericht Nr. 331466 vom 18.05.2007
- [36] Fraunhofer Institut Molekularbiologie und Angewandte Ökologie (2009) Study Plan: Alga, Growth Inhibition Test, 23.04.2009
- [37] Fraunhofer Institut Molekularbiologie und Angewandte Ökologie (2009) Study Plan: Zebra-fish, Fish EmbryoToxicity Test, 23.04.2009
- [38] Fraunhofer Institut Molekularbiologie und Angewandte Ökologie (2009) Study Plan: Daphnia magna, Reproduction test (OECD 211), 17.04.2009

- [39] Fraunhofer Institut Molekularbiologie und Angewandte Ökologie (2009) Study Plan: Sediment – water chironomid toxicity test using spiked water (OECD 219), 17.04.2009
- [40] Fraunhofer Institut Molekularbiologie und Angewandte Ökologie (2009) Study Plan: Pseudomonas putida Growth Inhibition Test, 22.04.2009

Wasserqualität

- [41] Drinking Water Inspectorate (2009) Approval given under regulation 31(4)(a) of the water supply (water quality) regulations 2000 No. 3184 and of the water supply (water quality) regulations 2001 (Wales) No. 3911, Schreiben vom 27.04.2009
- [42] Elastogran GmbH (2009) Instruction for use (IFU), Application of Elastocoast 6551/100 for water reservoirs before treatment, Issue No. 1.3, Stand 5.5.2009
- [43] Elastogran GmbH (2008) Water regulations advisory scheme, BS6920 Test on effect of water quality, product: Elastocoast 6551/100, >Stand: 11.11.2009
- [44] Elastogran GmbH (2008) Water regulations advisory scheme, BS6920 Test on effect of water quality, product: Elastocoast 6551/102, >Stand: 09.12.2009
- [45] Elastogran GmbH (2008) Water regulations advisory scheme, BS6920 Test on effect of water quality, product: Elastocoast 6551/103 >Stand: 09.12.2009

Anlage 2

Bemessungsdiagramme Wellenhöhe, Auszug aus [20]

Figure 4.25

Design for wave impacts.
Required layer thickness for
PBA placed directly on clay. $E = 4.000 \text{ MPa}$, $\sigma_{\max} = 1,0 \text{ MPa}$.

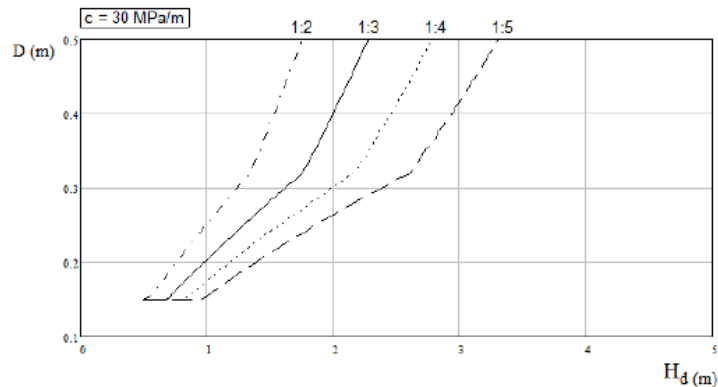


Figure 4.26

Design for wave impacts.
Required layer thickness for
PBA placed on granular filter
layer on clay. $E = 4.000 \text{ MPa}$,
 $\sigma_{\max} = 1,0 \text{ MPa}$.

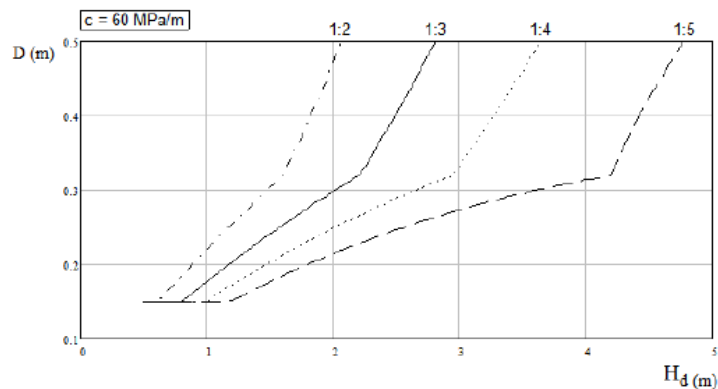


Figure 4.27

Design for wave impacts.
Required layer thickness for
PBA placed directly on
geotextile on sand or with
granular filter layer on sand. $E = 4.000 \text{ MPa}$, $\sigma_{\max} = 1,0 \text{ MPa}$.

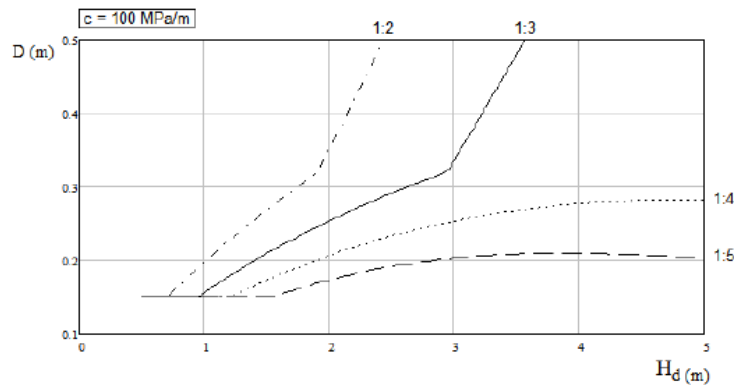
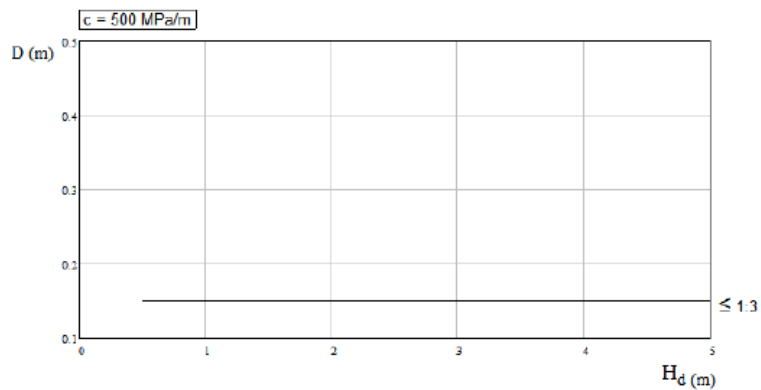


Figure 4.28

Design for wave impacts.
Required layer thickness for
PBA placed directly on a stiff
foundation. $E = 4.000 \text{ MPa}$,
 $\sigma_{\max} = 1,0 \text{ MPa}$.



Anlage 3

Weitergehende Erläuterungen zur Bemessung des Elastocoast-Deckwerkes auf die Wellenhöhe, Annex 1 von [20]

ANNEX 1

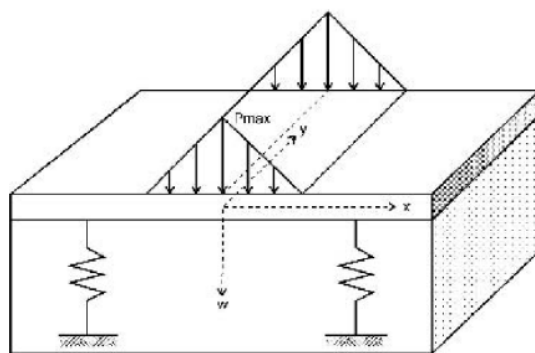
Backgrounds for the design for wave impacts

Schematization method

Analogous to asphaltic revetments the PBA structure will be schematized as a plate on linear-elastic foundation (TAW, 2002) [lit. 14]. The plate is loaded by a wave impact, schematized as a triangular distributed load $q(x)$ with a maximum of P_{\max} and a base width equal to H .

Figure A1.1

Schematization of the wave impact by a triangular load (TAW, 2002).



The determination of design plate thickness is done in three steps:

- Step 1: Determination of design wave impact load
- Step 2: Choice of representative material parameters
- Step 3: Determination of required plate thickness

Below a short description is given on choices and actions taken with each step. This section ends with some pre-calculated graphs that can be used for design.

Step 1: Determination of design wave impact load**Schematized wave impact pressure**

For wave impacts the design wave height H_d should be chosen sufficiently high such that the chance of exceedence of this wave height is acceptable. The wave impact load is schematized as a triangular load with a base width equal to H_d . The maximum impact pressure occurs in the middle of the wave load and is estimated with the following equation.

$$P_{\max} = \rho_w \cdot g \cdot q \cdot H_d$$

Where:

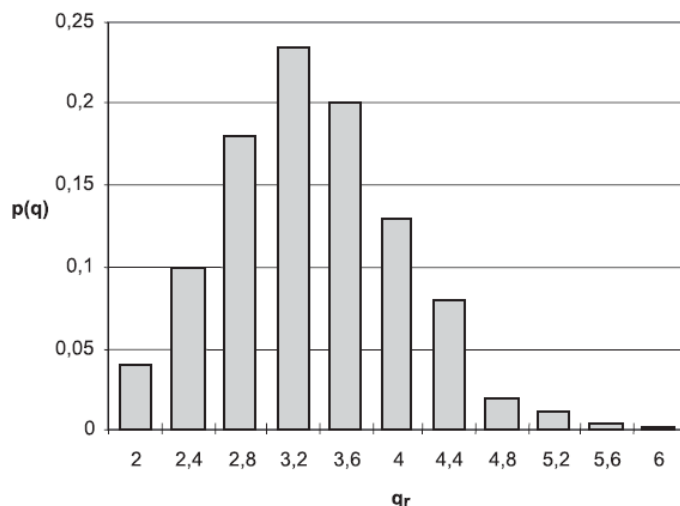
ρ_w	= mass density of water	[kg/m ³]
g	= gravitational acceleration	[m/s ²]
q	= wave impact parameter	[-]
H_d	= design wave height	[m]

Wave impact parameter q

In the wave impact parameter q both the probability of an incoming wave resulting in a wave impact and the severity of that impact are incorporated. The probability density function for the impact parameter, valid for a slope of 1:4, is given in figure A1.2.

Figure A1.2

Probability density function of the wave impact parameter q for slopes of 1:4 (TAW, 2002).

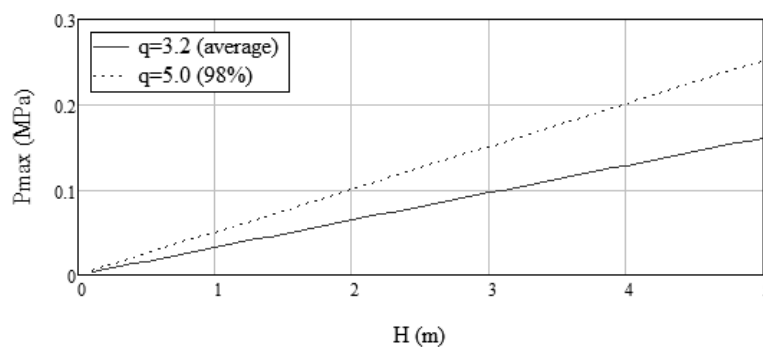


Values for the wave impact parameter have been found empirically for slopes of 1:4. For design calculations a conservative value of $q_r = 5.0$ is chosen. This value corresponds with a probability of exceeding of approximately 2%.

Figure A1.3 shows the impact pressure P_{max} as a function of design wave height H_d , dependent on the choice for q .

Figure A1.3

Relation between wave height and maximum impact pressure, for a 1:4 slope.



The value for the parameter q depends on the slope angle. Values for other slopes can be derived as follows (TAW, 2002):

$$q_\alpha = \frac{\tan \alpha}{0.25} q_r$$

In which:

q_α	= wave impact parameter for a slope angle α [-]
$\tan \alpha$	= tangent slope angle [-]
0.25	= tangent of the slope 1:4 [-]
q_r	= wave impact parameter for a slope 1:4 [-]

Step 2: Choice of representative material parameters

Foundation stiffness

The stiffness of the foundation has a large influence on the stresses in the PBA cover layer when loaded. A higher soil stiffness results in a larger part of the load being directly transferred to the subsoil, which is a favourable condition for the loading of the PBA cover layer. The stiffness of the foundation can be expressed in the soil compression parameter c [MPa/m]. This parameter is related to the dynamic stiffness E_{dyn} of the soil. Table A1.1 shows values for the soil compression parameter for several foundation types (see also section 4.2.4 of this manual).

Table A1.1

Soil compression constant
(TAW, 1984).

Subsoil	c (Mpa/m)
Sand	
- medium compacted	10 – 100
- well compacted	100 – 300
Sand + clay	30 – 80
Sand + silt	20 – 50
Clay	
- soft clay	30 – 60
- stiff clay	< 40
Peat	< 50
Gravel	> 70
Sand asphalt	> 500

The soil stiffness depends on many factors, including soil grading and compaction. Because it is difficult to make a reliable estimate of the soil stiffness it is advised to use a conservative value (= low value) for the compression parameter c in design calculations.

PBA stiffness

PBA has a relatively high stiffness when compared to open stone asphalt. The stiffness of PBA depends on the type and grading of the aggregate and on temperature (see also section 2.4.2 of this manual). For design calculations a conservative value of $E = 4,000$ MPa can be used.

PBA flexural strength

PBA has a relatively high flexural strength when compared to open stone asphalt. Flexural strength can be in the order of 2.5 MPa (see also section 2.4.4 of this manual). The strength is mainly dependent on type and grading of the used aggregate. For design calculations a conservative value of $\sigma_{\text{max}} = 1.0$ MPa is used. The choice of this conservative value accounts for some uncertainties in the mechanical properties of the material.

Step 3. Determination of required plate thickness

When the wave impact load and the material parameters have been determined, the maximum tensile stress in the bottom of the PBA revetment, directly under the wave load ($x=0$) can be determined as follows:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{4\beta^3 z} \left[1 - e^{(-\beta z)} (\cos(\beta z) + \sin(\beta z)) \right] \frac{6}{D^2}$$

with:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3c(1-\nu^2)}{ED^3}}$$

In which:

σ_{max}	= flexural moment capacity	[MPa]
P_{max}	= maximum pressure of schematized wave load	[MPa]
c	= coefficient of compression of subsoil	[MPa/m]
E	= Young's modulus of the cover layer	[MPa]
D	= thickness of the cover layer	[m]
ν	= constant of Poisson (assumed to be $\nu=0.35$)	[-]
z	= half the triangular load width, $z=0.5H$	[m]
H	= wave height	[m]

In figure A1.3 an example is given of the resulting relation between plate thickness and actual tensile stress. The curve in figure A1.4 shows a local maximum (in this case at a plate thickness of approximately 0.10 m and a tensile stress of 1.2 MPa). Only points at the right hand side from this local maximum (i.e. thicknesses larger than 0.10 m), may be used for design calculations.

Figure A1.4

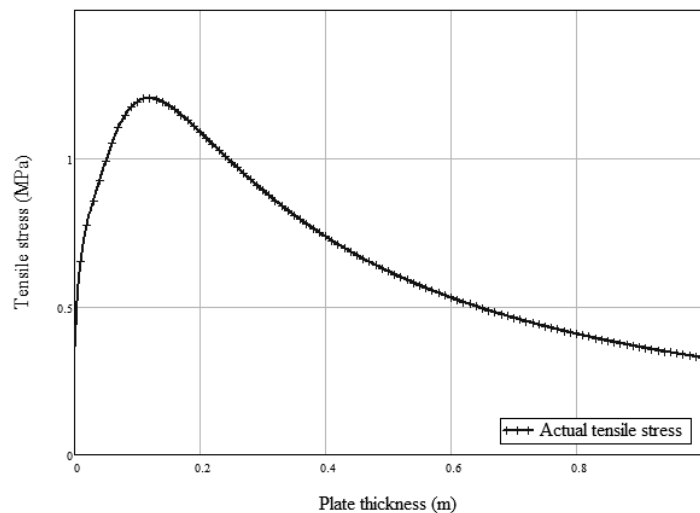
Actual tensile stress as a function of plate thickness for:

$$H_d = 2.5 \text{ m}$$

$$q = 5.0$$

$$c = 30 \text{ MPa/m}$$

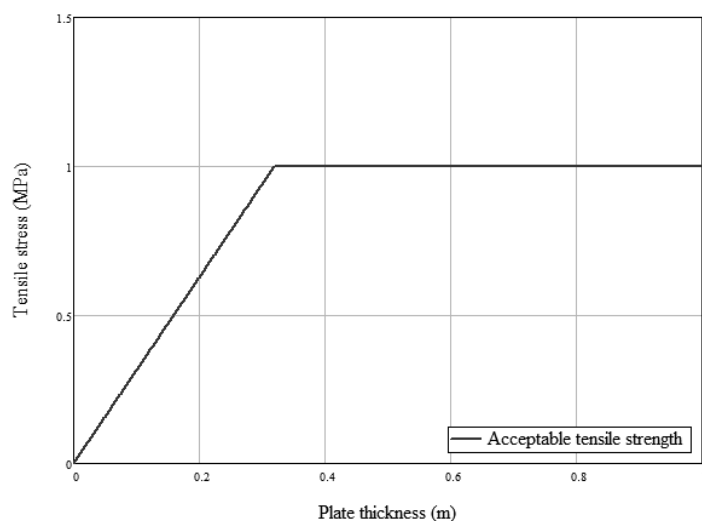
$$E = 4,000 \text{ MPa}$$



The basic assumption is made that the macroscopic properties of the plate apply if the thickness of the plate is not smaller than a predefined number of stone sizes D_{n50} . It is assumed that a thickness of at least 8 times D_{n50} is required for the plate to reach full design flexural strength. For smaller plate thicknesses the maximum tensile stress is found by linear interpolation. Figure A1.5 shows the resulting design strength in relation to plate thickness, for aggregate with a grading of 30/60 mm, $D_{n50} = 40 \text{ mm}$.

Figure A1.5

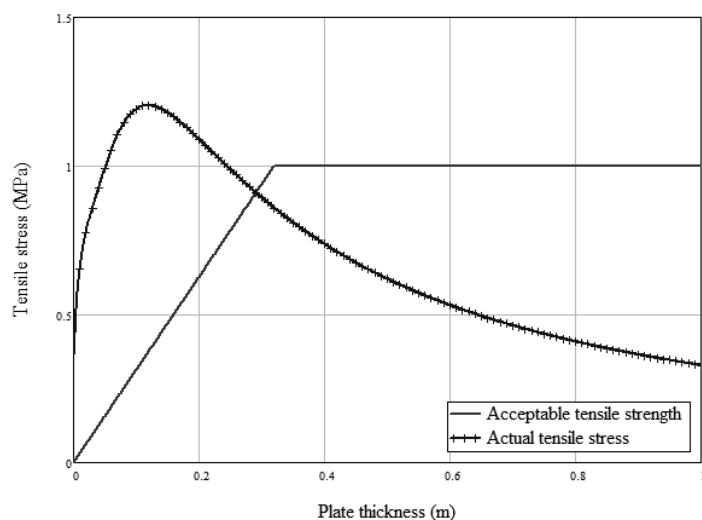
Assumed development of flexural strength as a function of plate thickness.



Finally, in order to determine the minimum required plate thickness given the input wave load and material parameters, the calculated maximum tensile stress is equalled to the design flexural strength. This can best be done visually, as shown in figure A1.5. It is important that the intersection of the two lines is at the right of the local maximum of the local maximum in the actual tensile strength curve.

Figure A1.5

Graphical determination of required layer thickness.



Pre-calculated design graphs

The calculation and graphical presentation of the actual tensile stress as a function of plate thickness cannot easily be performed by hand calculation. Below, several typical scenario's are pre-calculated for use in preliminary design of PBA structures. Together with the definition of acceptable tensile strength given above, these graphs can be used to quickly determine the minimum required plate thickness. Also, in section 4.3.3 of this manual design graphs are given relating design wave height to layer thickness.

Figure A1.6

Pre-calculated stress curves for
 $c = 30 \text{ MPa/m}$, $E = 4,000 \text{ MPa}$,

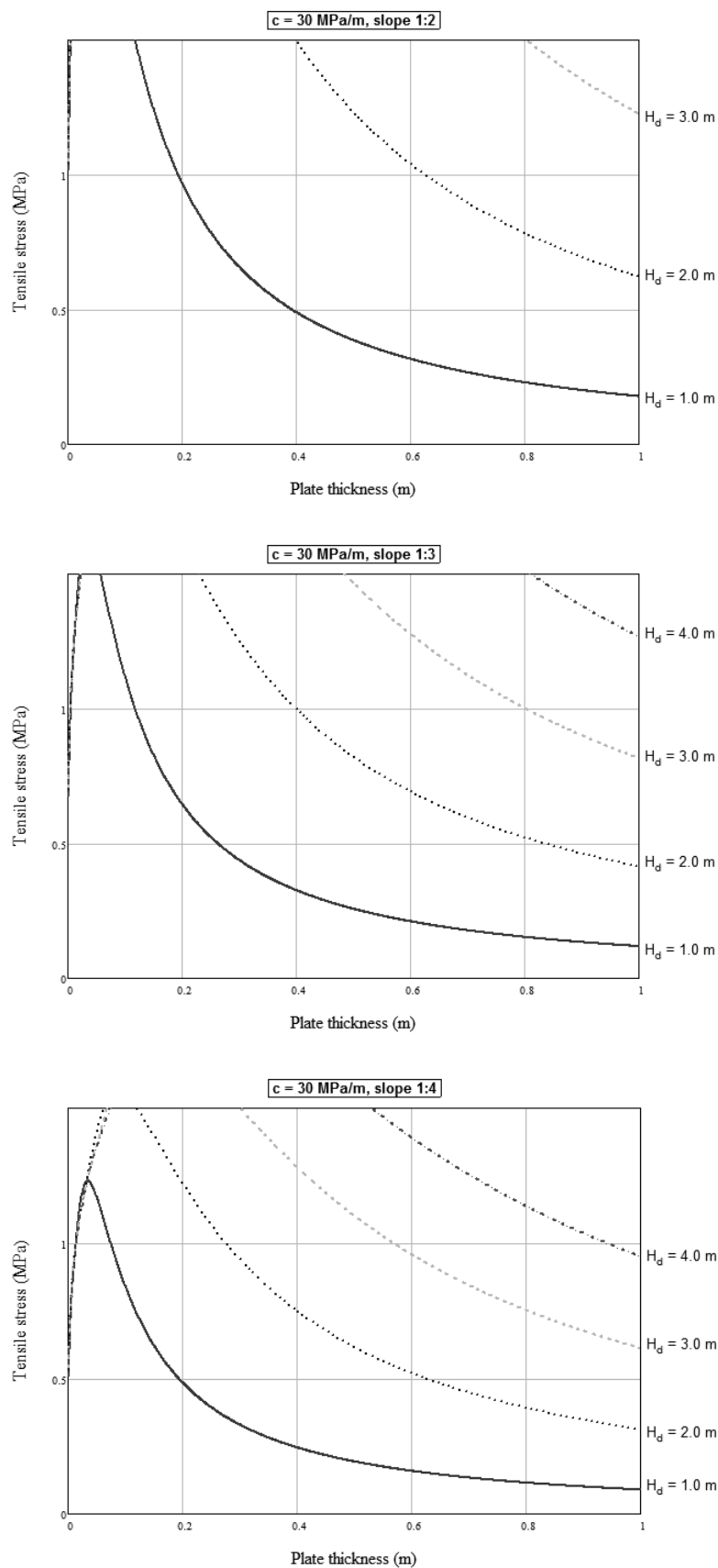


Figure A1.7

Pre-calculated stress curves for
 $c = 60 \text{ MPa/m}$. $E = 4,000 \text{ MPa}$.

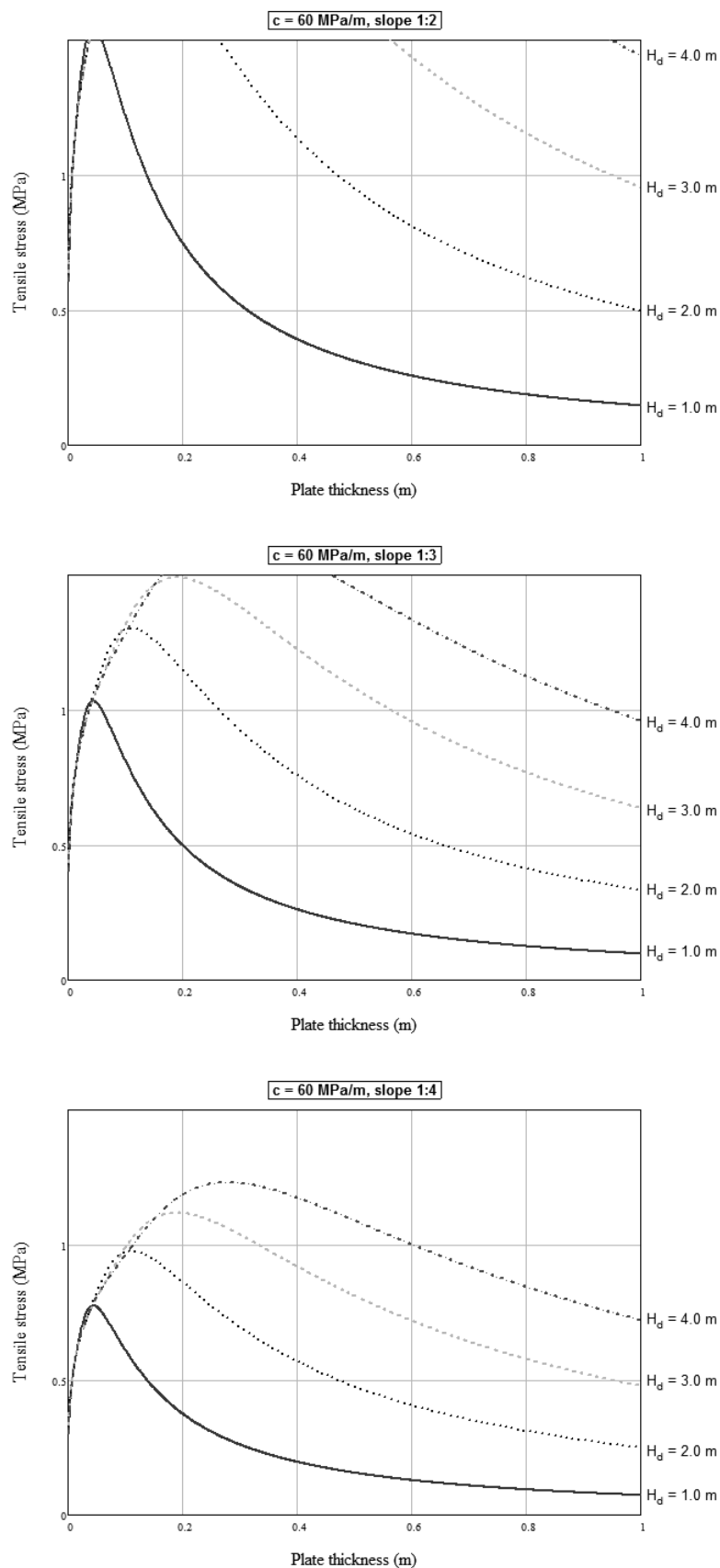


Figure A1.8

Pre-calculated stress curves for
 $c = 100 \text{ MPa/m}$. $E = 4,000$
 MPa.

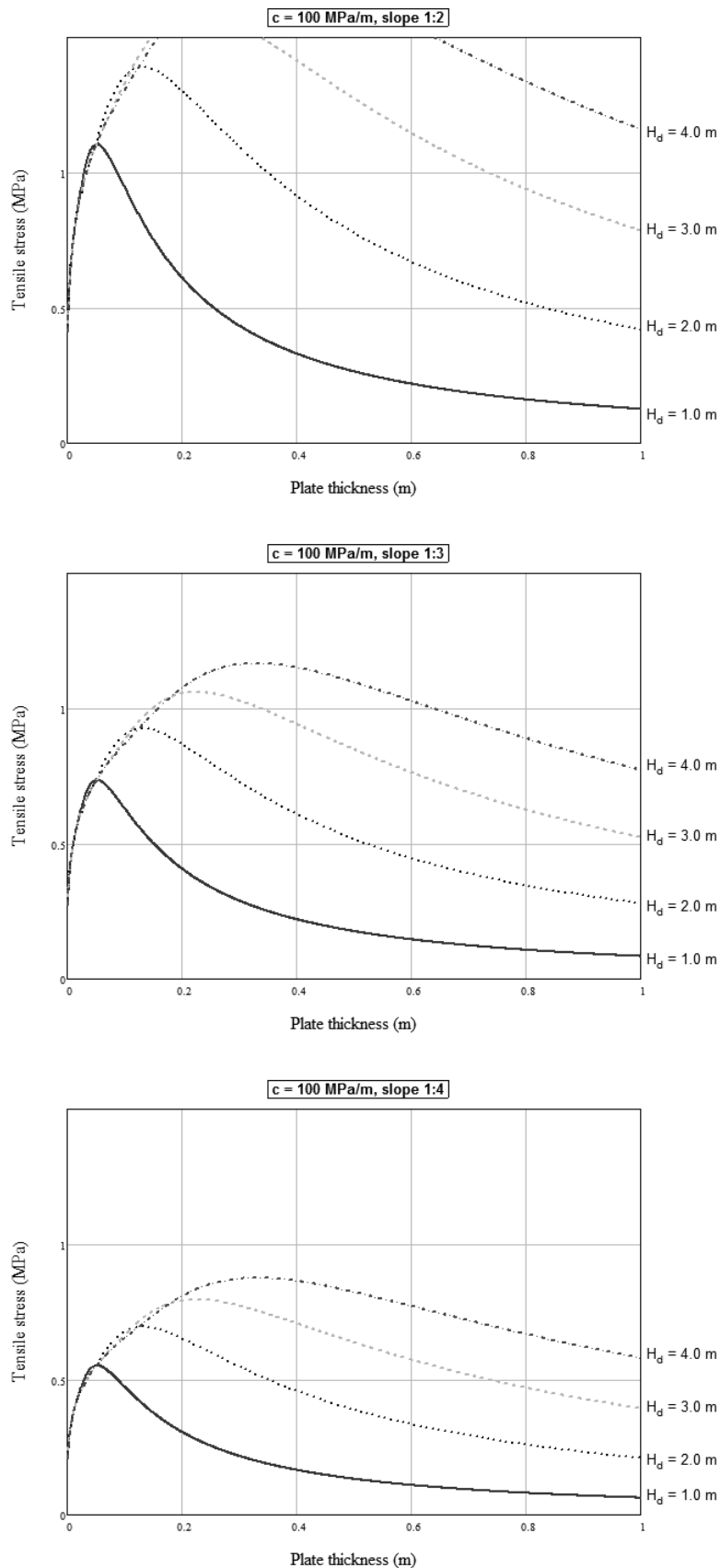
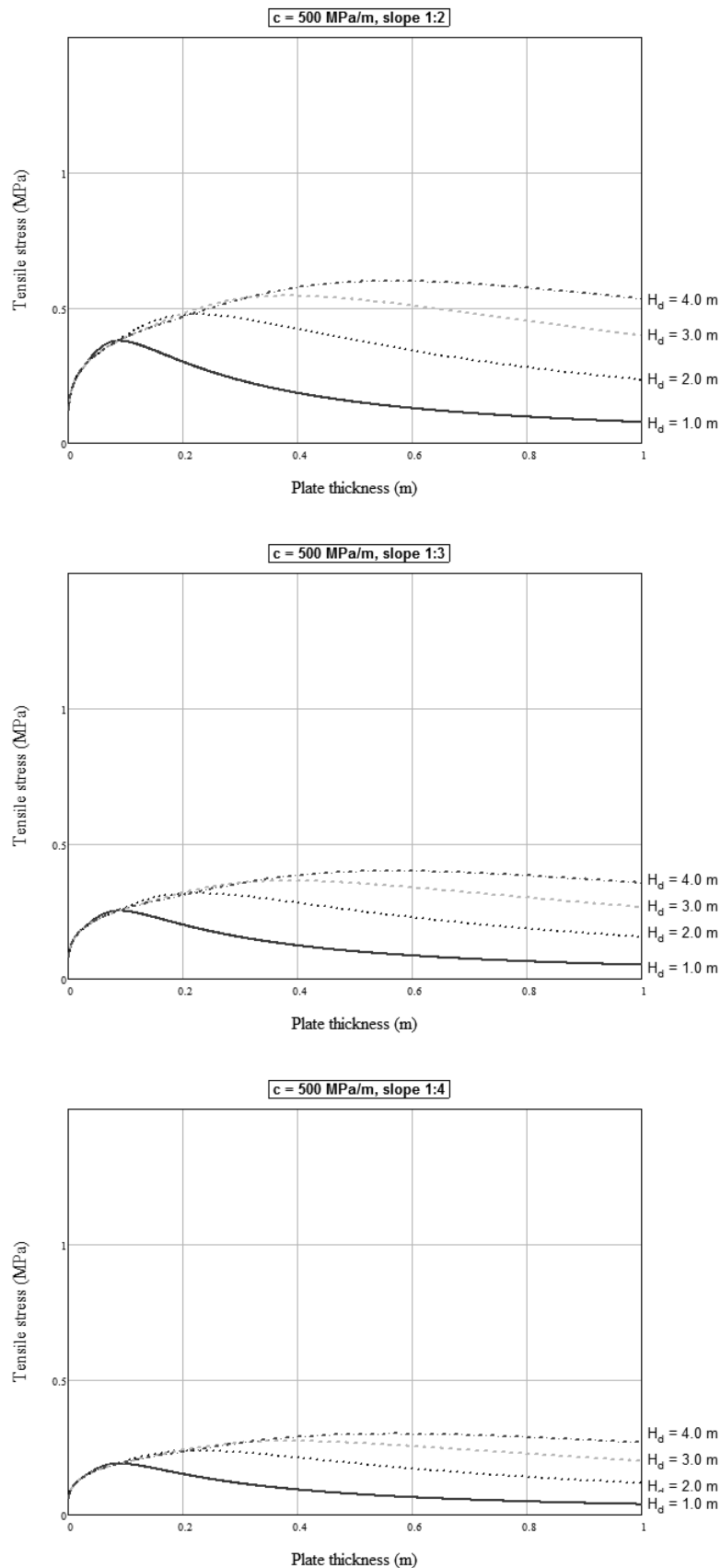


Figure A1.9

Pre-calculated stress curves for
 $c = 500 \text{ MPa/m}$. $E = 4,000$
 MPa .





IMS INGENIEURGESELLSCHAFT MBH

**Zentrale und
Niederlassung Hamburg**
Stadtdeich 7
20097 Hamburg
Tel.: 040 32818-0
Fax: 040 32818-139
E-Mail: info@ims-ing.de

**Niederlassung
Frankfurt/M**
An der Gehespitz 50
63263 Neu-Isenburg
Tel.: 06102 45-3600
Fax: 06102 45-3636
E-Mail: info@ims-ing.de

**Niederlassung
Schleswig-Holstein**
Ulmenweg 12
25492 Heist
Tel.: 04122 907054
Fax: 04122 907053
E-Mail: info@ims-ing.de