



**Technische Universität Braunschweig**

**Leichtweiß-Institut für Wasserbau**

**Abteilung Hydromechanik und Küsteningenieurwesen**

Prof. Dr.-Ing. Hocine Oumeraci

Diplomarbeit

**Bemessung und Kostenuntersuchung für das  
elastomere Deckwerk ELASTOCOAST und  
konventionelle Deckwerke für den Küstenschutz**

von

cand. Wirtsch.-Ing. Christian Grimm

Braunschweig, November 2009

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. H. Oumeraci

Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. habil. A. Dittrich

Betreuer: Dipl.-Ing. T. Staal, M.Sc. S. Liebisch

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Tabellenverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	1
1.3 Methodik.....	2
2 Grundlagen der Investitionsrechnung.....	3
2.1 Investitionen und Methoden der Investitionsrechnung.....	3
2.2 Dynamische Kostenvergleichsrechnung.....	5
2.3 Vorfeld der Kostenvergleichsrechnung.....	7
2.4 Kostenvergleichsrechnung im engeren Sinn.....	7
2.4.1 Kostenermittlung.....	7
2.4.2 Finanzmathematische Aufbereitung der Kosten.....	8
2.4.3 Kostengegenüberstellung und Gesamtbeurteilung.....	9
3 Deckwerkskonstruktionen für Küstenschutzbauwerken.....	10
3.1 Bauweisen von Deckwerkskonstruktionen.....	10
3.2 Deckwerk aus geschütteten Wasserbausteinen.....	12
3.3 Deckwerke aus gesetzten Betonformsteine.....	13
3.4 Deckwerke aus Mastix-Schotter.....	14
3.5 Deckwerke aus Elastocoast.....	15
3.6 Filterschichten für Deckwerkskonstruktionen.....	16
3.7 Gegenüberstellung der ausgewählten Deckwerke.....	16
4 Einwirkungen, Belastungsgrößen und Schadensmechanismen von Deckwerken.....	17
4.1 Einwirkungen auf Deckwerkskonstruktionen.....	17
4.2 Belastungsgrößen und Schadensmechanismen infolge von Wellen.....	18
4.2.1 Druckschlagbelastung.....	19
4.2.2 Wellenauf- und -ablauf.....	20
4.2.3 Wellenüberlauf.....	20
5 Bauwerksgeometrie, Seegangparameter und Bemessungswasserstand.....	21
5.1 Bauwerksgeometrie.....	21
5.2 Seegangparameter.....	22
5.2.1 Wellenhöhe.....	22
5.2.2 Wellenperiode.....	22
5.3 Bemessungswasserstand.....	23
5.4 Ausgewählte Seegangparameter und Bemessungswasserstand.....	23
6 Bemessungsgrundlagen für ausgewählte Deckwerke.....	26
6.1 Wellenbrecherkennzahl und Druckschlag.....	26

6.2	Bemessungsgrundlagen für die Standsicherheit .....	28
6.3	Bemessungsgrundlagen für den Wellenauflauf .....	31
6.4	Bemessungsgrundlagen für die Deckwerksdicke .....	33
6.4.1	Bemessungsgrundlagen für geschüttete Wasserbausteine .....	33
6.4.2	Bemessungsgrundlagen für gesetzte Betonformsteine .....	36
6.4.3	Bemessungsgrundlagen für Elastocoast und Mastix-Schotter .....	38
7	Bemessung für ausgewählte Deckwerke .....	41
7.1	Bemessung der Wellenaufbauhöhe und der Bauwerksgeometrie .....	41
7.2	Bemessung der Deckwerksdicke für geschütteten Wasserbausteinen .....	47
7.3	Bemessung der Deckwerksdicke für Betonformsteine .....	48
7.4	Bemessung der Deckwerksdicke für Mastix-Schotter .....	50
7.5	Bemessung der Deckwerksdicke für Elastocoast .....	53
8	Dynamische Kostenvergleichsrechnung für ausgewählte Deckwerksalternativen .....	55
8.1	Vorfeld der Kostenvergleichsrechnung für Deckwerkskonstruktionen .....	55
8.2	Kosten für Deckwerkskonstruktionen aus Wasserbausteinen .....	56
8.2.1	Herstellungskosten .....	56
8.2.2	Unterhaltungs- und Instandsetzungskosten .....	58
8.3	Kosten für Deckwerkskonstruktionen aus Betonformsteinen .....	59
8.3.1	Herstellungskosten .....	59
8.3.2	Unterhaltungs- und Instandsetzungskosten .....	60
8.4	Kosten für Deckwerkskonstruktionen aus Mastix-Schotter .....	60
8.4.1	Herstellungskosten .....	60
8.4.2	Unterhaltungs- und Instandsetzungskosten .....	63
8.5	Kosten für Deckwerkskonstruktionen aus Elastocoast .....	64
8.5.1	Herstellungskosten .....	64
8.5.2	Unterhaltungs- und Instandsetzungskosten .....	65
8.6	Kostengegenüberstellung und Gesamtbeurteilung .....	67
9	Zusammenfassung und Ausblick .....	75
	Schrifttum .....	76
	Anlage A: Bemessung Wellenaufbauhöhe .....	79
	Anlage B: Bemessung Deckwerksdicke Wasserbausteine .....	83
	Anlage C: Bemessung Deckwerksdicke Mastix-Schotter .....	85
	Anlage D: Bemessung Deckwerksdicke Elastocoast .....	86
	Anlage E: Kostenermittlung Wasserbausteine .....	87
	Anlage F: Kostenermittlung Betonformsteine .....	90
	Anlage F: Kostenermittlung Mastix-Schotter .....	90
	Anlage G: Kostenermittlung Elastocoast .....	92

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Seegangparameter und Bemessungswasserstand der Insel Borkum (Oumeraci et al., 2009b) .....	24
Tabelle 2: Seegangparameter und Bemessungswasserstand der Insel Baltrum (Oumeraci & Kortenhaus, 2007) .....	25
Tabelle 3: Seegangparameter und Bemessungswasserstand der Insel Norderney (Oumeraci et al., 2008) .....	25
Tabelle 4: Empirische Koeffizienten für die Wellenaufbauhöhe (EurOtop, 2007) .....	32
Tabelle 5: $k_D$ -Werte für zwei Lagen von WBS in der Deckschicht (Oumeraci, 2001) .....	34
Tabelle 6: $L_{\text{Deckwerk}}$ und $h_{\text{Bauwerk}}$ eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:3) .....	43
Tabelle 7: $L_{\text{Deckwerk}}$ und $h_{\text{Bauwerk}}$ eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:4) .....	43
Tabelle 8: $L_{\text{Deckwerk}}$ und $h_{\text{Bauwerk}}$ eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:6) .....	43
Tabelle 9: $L_{\text{Deckwerk}}$ und $h_{\text{Bauwerk}}$ eines Deckwerks aus gesetzten BFS (Böschungsneigung 1:3) .....	44
Tabelle 10: $L_{\text{Deckwerk}}$ und $h_{\text{Bauwerk}}$ eines Deckwerks aus gesetzten BFS (Böschungsneigung 1:4) .....	44
Tabelle 11: $L_{\text{Deckwerk}}$ und $h_{\text{Bauwerk}}$ eines Deckwerks aus gesetzten BFS (Böschungsneigung 1:6) .....	44
Tabelle 12: $L_{\text{Deckwerk}}$ und $h_{\text{Bauwerk}}$ eines Deckwerkes aus MS (Böschungsneigung 1:3) .....	45
Tabelle 13: $L_{\text{Deckwerk}}$ und $h_{\text{Bauwerk}}$ eines Deckwerkes aus MS (Böschungsneigung 1:4) .....	45
Tabelle 14: $L_{\text{Deckwerk}}$ und $h_{\text{Bauwerk}}$ eines Deckwerkes aus MS (Böschungsneigung 1:6) .....	45
Tabelle 15: $L_{\text{Deckwerk}}$ und $h_{\text{Bauwerk}}$ eines Deckwerkes aus EC (Böschungsneigung 1:3) .....	46
Tabelle 16: $L_{\text{Deckwerk}}$ und $h_{\text{Bauwerk}}$ eines Deckwerkes aus EC (Böschungsneigung 1:4) .....	46
Tabelle 17: $L_{\text{Deckwerk}}$ und $h_{\text{Bauwerk}}$ eines Deckwerkes aus EC (Böschungsneigung 1:6) .....	46
Tabelle 18: Deckwerksdicke eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:3) .....	47
Tabelle 19: Deckwerksdicke eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:4) .....	47
Tabelle 20: Deckwerksdicke eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:6) .....	48
Tabelle 21: Wellenbrecherkennzahl $\xi_{0p}$ für die Bemessung von BFS (Böschungsneigung 1:6) .....	48
Tabelle 22: Deckwerksdicke eines Deckwerks aus gesetzten BFS (Böschungsneigung 1:6) ..	49
Tabelle 23: Deckschichtdicke für ein Deckwerk aus MS auf Bitumensand (Böschungsneigung 1:3) .....	50

Tabelle 24: Deckschichtdicke für ein Deckwerk aus MS auf Bitumensandfilter (Böschungsneigung 1:4).....	51
Tabelle 25: Deckschichtdicke für ein Deckwerk aus MS auf Bitumensandfilter (Böschungsneigung 1:6).....	51
Tabelle 26: Deckschichtdicke für ein Deckwerk aus MS auf geotextilen Filter (Böschungsneigung 1:3).....	51
Tabelle 27: Deckschichtdicke für ein Deckwerk aus MS auf geotextilen Filter (Böschungsneigung 1:4).....	52
Tabelle 28: Deckschichtdicke für ein Deckwerk aus MS auf geotextilen Filter (Böschungsneigung 1:6).....	52
Tabelle 29: Deckwerksdicke eines Deckwerks aus EC (Böschungsneigung 1:3).....	53
Tabelle 30: Deckwerksdicke eines Deckwerks aus EC (Böschungsneigung 1:4).....	54
Tabelle 31: Deckwerksdicke eines Deckwerks aus EC (Böschungsneigung 1:6).....	54
Tabelle 32: Herstellungskosten für geschüttete WBS (Böschungsneigung 1:3).....	57
Tabelle 33: Herstellungskosten für geschüttete WBS (Böschungsneigung 1:4).....	57
Tabelle 34: Herstellungskosten für geschüttete WBS (Böschungsneigung 1:6).....	58
Tabelle 35: Unterhaltungskosten für geschüttete WBS (Böschungsneigung 1:3).....	58
Tabelle 36: Unterhaltungskosten für geschüttete WBS (Böschungsneigung 1:4).....	59
Tabelle 37: Unterhaltungskosten für geschüttete WBS (Böschungsneigung 1:6).....	59
Tabelle 38: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus gesetzten BFS (Böschungsneigung 1:6).....	60
Tabelle 39: Unterhaltungskosten für ein Deckwerk aus gesetzten BFS (Böschungsneigung 1:6).....	60
Tabelle 40: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus MS auf BS (Böschungsneigung 1:3)..	61
Tabelle 41: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus MS auf BS (Böschungsneigung 1:4)..	61
Tabelle 42: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus MS auf BS (Böschungsneigung 1:6)..	62
Tabelle 43: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus MS auf Geotextil (Böschungsneigung 1:3).....	62
Tabelle 44: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus MS auf Geotextil (Böschungsneigung 1:4).....	62
Tabelle 45: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus MS auf Geotextil (Böschungsneigung 1:6).....	63
Tabelle 46: Unterhaltungskosten für ein Deckwerk aus MS (Böschungsneigung 1:3).....	63
Tabelle 47: Unterhaltungskosten für ein Deckwerk aus MS (Böschungsneigung 1:4).....	64
Tabelle 48: Unterhaltungskosten für ein Deckwerk aus MS (Böschungsneigung 1:6).....	64
Tabelle 49: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus Elastocoast (Böschungsneigung 1:3) .	65
Tabelle 50: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus Elastocoast (Böschungsneigung 1:4) .	65
Tabelle 51: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus Elastocoast (Böschungsneigung 1:6) ...	65
Tabelle 52: Unterhaltungskosten für ein Deckwerk aus EC (Böschungsneigung 1:3).....	66
Tabelle 53: Unterhaltungskosten für ein Deckwerk aus EC (Böschungsneigung 1:4).....	66
Tabelle 54: Unterhaltungskosten für ein Deckwerk aus EC (Böschungsneigung 1:6).....	66

Tabelle 55: Gewicht eines Steines mittleren Durchmessers für die Deckschicht (Böschungsneigung 1:4).....	83
---	----

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ablaufdiagramm der vorliegenden Diplomarbeit .....	2
Abbildung 2: Methoden der Investitionsrechnung .....	4
Abbildung 3: Ablaufschema einer dynamischen Kostenvergleichsrechnung .....	6
Abbildung 4: Aufbau eines Deckwerkes (nach McConnell, 1998) .....	10
Abbildung 5: Unverklammerte Deckwerke: Lose Wasserbausteine (a) und Basalt Deckwerk (b) (Staal, 2008) .....	12
Abbildung 6: Verklammerte Deckwerke: Mastix-Schotter (c), Asphaltverguss (d), Betonverguss (e) (Staal, 2008) .....	12
Abbildung 7: Beispiele für Betonformsteine (CUR/TAW, 1995) .....	14
Abbildung 8: Mastix-Schotter beim Einbau in situ und als Mastix-Schotter-Platte (Hesselberg Hydro).....	15
Abbildung 9: Arbeitsschritte beim Einbau von Elastocoast (Elastogran).....	15
Abbildung 10: Übersicht der Einwirkungen, Belastungsgrößen und Schadensmechanismen für Deckwerkskonstruktion im Küstenschutz.....	17
Abbildung 11: Schadensmechanismen von Deckwerkskonstruktionen (nach Allsop & McConnell, 1999).....	19
Abbildung 12: Schematische Darstellung der Bauwerksgeometrie.....	21
Abbildung 13: Insel Borkum als Satellitenaufnahme (Google Earth, 2009) .....	24
Abbildung 14: Insel Baltrum als Satellitenaufnahme (Google Earth, 2009) .....	24
Abbildung 15: Insel Norderney als Satellitenaufnahme (Google Earth, 2009) .....	25
Abbildung 16: Einwirkende und rückhaltende Kräfte auf einer Böschung (nach EAK, 1993).....	29
Abbildung 17: Schematische Darstellung der Wellenaufbauhöhe $R_u$ .....	31
Abbildung 18: Bemessungsdiagramm für Verzahnte Blöcke mit einer geotextilen Filterschicht auf Sand .....	38
Abbildung 19: Idealierte Darstellung eines Druckschlages auf eine Deckwerksplatte.....	38
Abbildung 20: Küstenschutzbauwerk und Bemaßung .....	41
Abbildung 21: Bestimmung von $H_s/\Delta \cdot t_{\text{Deckschicht}}$ .....	49
Abbildung 22: Schematische Darstellung des Bereiches für die Kostenermittlung .....	55
Abbildung 23: Herstellungskosten für die Seegangparameter von Borkum .....	67
Abbildung 24: Unterhaltungskosten für die Seegangparameter von Borkum.....	68
Abbildung 25: Gesamtkosten für die Seegangparameter von Borkum .....	68
Abbildung 26: Herstellungskosten für die Seegangparameter von Baltrum ( $H_s = 1,37\text{m}$ ) ....	69
Abbildung 27: Unterhaltungskosten für die Seegangparameter von Baltrum ( $H_s = 1,37\text{m}$ )..	69
Abbildung 28: Gesamtkosten für die Seegangparameter von Baltrum ( $H_s = 1,37\text{m}$ ) .....	70
Abbildung 29: Herstellungskosten für die Seegangparameter von Baltrum ( $H_s = 2,36\text{m}$ ) ....	70
Abbildung 30: Unterhaltungskosten für die Seegangparameter von Baltrum ( $H_s = 2,36\text{m}$ )..	71
Abbildung 31: Gesamtkosten für die Seegangparameter von Baltrum ( $H_s = 2,36\text{m}$ ) .....	71
Abbildung 32: Herstellungskosten für die Seegangparameter von Norderney ( $H_s = 3,14\text{m}$ ) 72	

Abbildung 33: Unterhaltungskosten für die Seegangparameter von Norderney ( $H_s = 3,14\text{m}$ ).....	72
Abbildung 34: Gesamtkosten für die Seegangparameter von Norderney ( $H_s = 3,14\text{m}$ ) .....	73
Abbildung 35: Herstellungskosten für die Seegangparameter von Norderney ( $H_s = 3,14\text{m}$ )	73
Abbildung 36: Unterhaltungskosten für die Seegangparameter von Norderney ( $H_s = 1,86\text{m}$ ).....	74
Abbildung 37: Gesamtkosten für die Seegangparameter von Norderney ( $H_s = 1,86\text{m}$ ) .....	74

## Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

### 1. Lateinische Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$A_F$	= Akkumulationsfaktor für einmalig anfallende Kosten	[-]
$A_{FJ}$	= Akkumulationsfaktor für jährlich anfallende Kosten	[-]
$D$	= Dämpfungskoeffizient des Untergrundes	[Ns/m <sup>3</sup> ]
$D_F$	= Diskontierungsfaktor für einmalig anfallende Kosten	[-]
$D_{FJ}$	= Diskontierungsfaktor für jährlich anfallende Kosten	[-]
$g$	= Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$G$	= Eigengewicht eines Deckwerkelements	[N/m]
$H$	= Wellenhöhe	[m]
$H_{Bem}$	= Bemessungswellenhöhe mit $H_{Bem} = H_s = H_{1/3} = H_{m0}$	[m]
$H_{m0}$	= Signifikante Wellenhöhe aus dem Frequenzbereich	[m]
$H_s$	= Signifikante Wellenhöhe	[m]
$i$	= Zinssatz	[%]
$K$	= Biegesteifigkeit der Platte	[Nm]
$k_s$	= Bettungsmodul	[N/m <sup>3</sup> ]
$L_0$	= Wellenlänge im Tiefwasser	[m]
$M$	= Masse der Deckwerksplatte inklusive der Masse des Untergrundes	[kg/m <sup>2</sup> ]
$n$	= Anzahl der Jahre zwischen Kostenanfall und Bezugszeitpunkt	[-]
$n_s$	= Anzahl der Lastspielzyklen	[-]
$q$	= Zinsfaktor	[-]
$R_{u2\%}$	= Wellenauflaufhöhe die von 2% aller Wellenaufläufe überschritten wird	[m]
$s_0$	= Wellensteilheit = $H / L_0$	[-]
$S_F$	= Strömungskraft	[N/m]
$T$	= Schubspannung des Bodens	[N/m]
$t$	= Zeit	[s]
$t_{Deckschicht}$	= Dicke der Deckschicht	[m]
$t_{Deckwerk}$	= Dick des Deckwerks	[m]
$t_{Filterschicht}$	= Dicke der Filterschicht	[m]
$t_s$	= Sturmdauer	[s]
$w$	= Durchbiegung der Deckwerksplatte	[m]

## 2. Griechische Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$\alpha$	= Böschungswinkel	[°]
$\gamma_b$	= Empirischer Beiwert für den Einfluss einer Berme oder Böschungsknick	[-]
$\gamma_f$	= Empirischer Beiwert für den Einfluss der Böschungsrauheit	[-]
$\gamma_w$	= Wichte des Wassers	[N/m <sup>3</sup> ]
$\gamma_\beta$	= Empirischer Beiwert für den Einfluss der Wellenangriffsrichtung	[-]
$\Delta$	= Relative Dichte	[-]
$\eta$	= Standsicherheit eines offenen Deckwerks	[-]
$\nu$	= Querdehnzahl	[-]
$\xi$	= Brecherkennzahl	[-]
$\xi_0$	= Brecherkennzahl im Tiefwasser	[-]
$\rho_{\text{BFS}}$	= Dichte des Betonformsteins	[t/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	= Dichte des Wassers	[t/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{WBS}}$	= Dichte des Wasserbausteines	[t/m <sup>3</sup> ]
$\sigma'$	= Effektive Normalspannung	[N/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_b$	= Maximale Biegespannung beim Bruch	[N/m <sup>2</sup> ]
$\varphi$	= Reibungswinkel des Bodens	[°]

## Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
BFS	= Betonformsteine
BWS	= Bemessungswasserstand
EC	= Elastocoast
GmbH	= Gesellschaft mit beschränkter Haftung
LWI	= Leichtweiß-Institut
MS	= Mastix-Schotter
RWS	= Ruhewasserspiegel
WBS	= Wasserbausteine

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Schon seit vielen Jahrhunderten versucht der Mensch die Küstenlinien durch Bauwerke gegen Sturmfluten verursachte Veränderungen zu schützen. Die ältesten dokumentierten Küstenschutzbauwerke sind dabei über 1000 Jahre alt (Oumeraci, 2001). Zu diesen Bauwerken für den Küstenschutz gehören die Deckwerke, die nach EAK, 1993, als „*Bedeckungen von Böschungen mit Baukörpern, die durch Verbund und/oder Gewicht den angreifenden Kräften Widerstand leisten*“ definiert werden. Deckwerke im Küstenbereich dienen der Küsten- und Ufersicherung mit den primären Zielen der Erhaltung der vorhandenen Küstenlinie und des Sturmflutschutzes. Dabei soll besonders eine Sicherung gegen brechende Wellen, Strömungen und Eis sowie gegen Küstenabbruch erreicht werden. Ein häufiger Einsatz von Deckwerken im Küstenschutz erfolgt bei der Böschungsbefestigung auf der Seeseite von Deichen. Allerdings werden Deckwerke nicht nur im aktiven Küstenschutz, sondern im gesamten Wasserbau eingesetzt. Im Kanal- und Flussbau finden Deckwerke als Ufersicherung und Hochwasserschutz Anwendungen. Für Deckwerke gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten bezüglich der gestalterischen und konstruktiven Ausführung, wobei die Bemessung der jeweiligen Deckwerksausführung bislang häufig nur nach Erfahrungswerten geschah.

Der Bau von Deckwerken ist im Regelfall mit einem hohen Kostenaufwand verbunden. So kostete der Um- und Neubau des 2 km langen Deckwerkes auf der Insel Norderney ca. 30 Millionen Euro (Thorenz, 2009). Für die Investitionen in den Küstenschutz sind in Deutschland die Bundesländer verantwortlich, wobei teilweise die Bundesrepublik Deutschland und die Europäische Union sich an den Kosten beteiligen. In wirtschaftlich schwierigen Zeiten, wie momentan im Jahr 2009 in Folge der Finanzkrise, sind die Investitionskosten nach Möglichkeit gering zu halten. Durch neue Baustoffe und -verfahren für Deckwerke könnten Investitionskosten eingespart und der öffentliche Haushalt entlastet werden. Für diese Einsparungspotentiale müssen aussagekräftige Untersuchungen bezüglich der Kosten für verschiedene Deckwerkskonstruktionen durchgeführt werden.

## 1.2 Zielsetzung

Das Hauptziel der vorliegenden Diplomarbeit ist die Ermittlung und Bewertung der Materialkosten über die gesamte Nutzungsdauer für ausgewählte Deckwerkskonstruktionen auf der Grundlage von Bemessungen sowie Dimensionierung der jeweiligen Deckwerke. Hierfür sind Kenntnisse über die Grundlagen der Investitionsrechnung und insbesondere die Methode der dynamischen Kostenvergleichsrechnung zur Ermittlung der Kosten sowie die Bemessungsgrundlagen der ausgewählten Deckwerkskonstruktionen zur Dimensionierung und Mengenbestimmung unerlässlich. Aus den Untersuchungsergebnissen können Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen bezüglich der Kostenstruktur von Deckwerkskonstruktionen entnommen werden.

### 1.3 Methodik

Für die Ermittlung der Material- und Instandhaltungskosten von Deckwerken im Küstenschutz werden zunächst die Grundlagen der Investitionsrechnung und die Methode der dynamischen Kostenvergleichsrechnung sowie die ausgewählten Deckwerkskonstruktionen vorgestellt. In dieser Diplomarbeit werden Kosten für konventionelle Deckwerkskonstruktionen aus geschütteten Wasserbausteinen, gesetzten Betonformsteinen und Mastix-Schotter sowie für das innovative Deckwerksystem Elastocoast untersucht.

Anschließend werden die Einwirkungen, Belastungsgrößen, Schadensmechanismen und Bemessungsgrundlagen für die untersuchten Deckwerkskonstruktionen aufgezeigt. Der Schwerpunkt hierbei liegt bei den Bemessungsgrundlagen, da diese für jedes Deckwerk unterschiedlich und die Basis für die Ermittlung der Kosten sind.

Im Hauptteil der Diplomarbeit werden die ausgewählten Deckwerke als erstes unter den gleichen hydraulischen und morphologischen Randbedingungen mit der Tabellenkalkulationssoftware Excel 2007 bemessen und dimensioniert. Im Anschluss an die Bemessung erfolgen die Durchführung der dynamischen Kostenvergleichsrechnung und die Bewertung der Ergebnisse (siehe Abbildung 1).

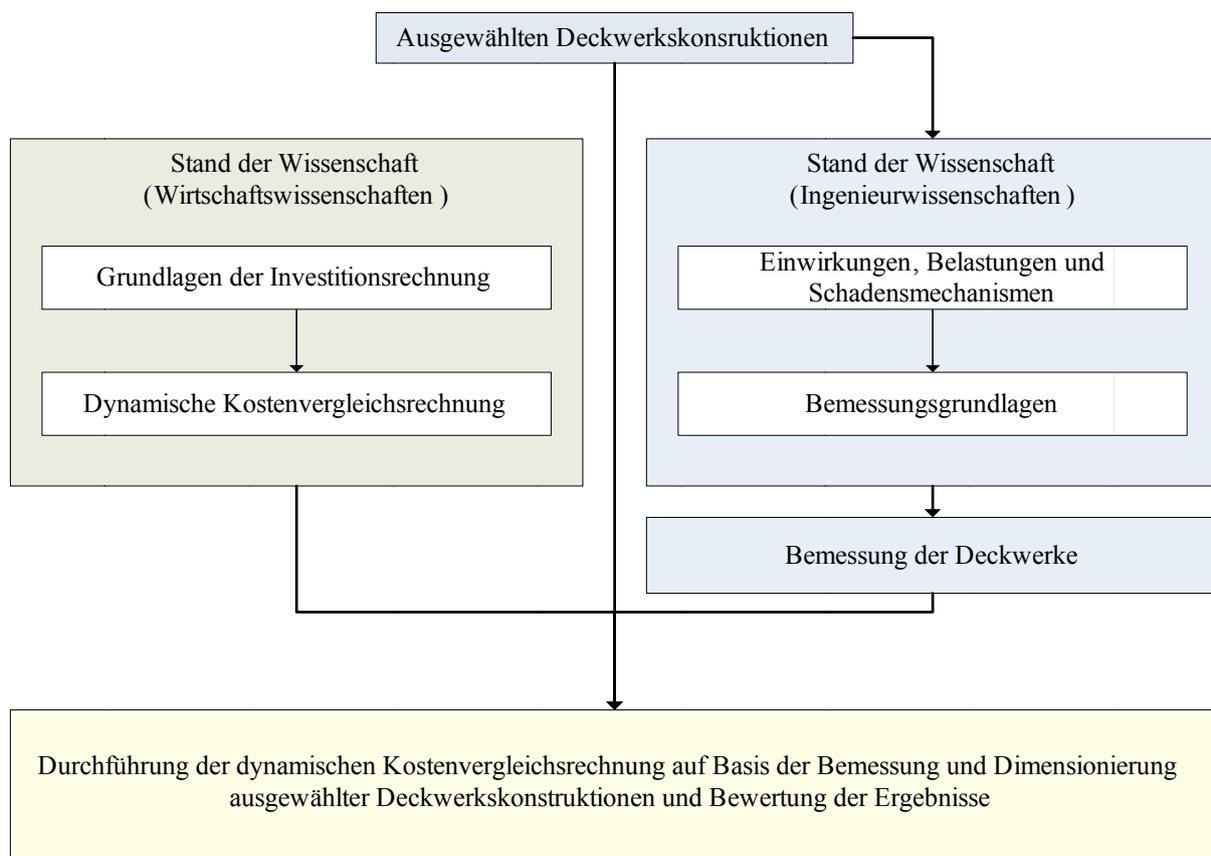


Abbildung 1: Ablaufdiagramm der vorliegenden Diplomarbeit

## 2 Grundlagen der Investitionsrechnung

Dieses Kapitel 1 behandelt die Investitionsrechnung aus betriebswirtschaftlicher Perspektive. Der Schwerpunkt dieses Kapitels stellt die Vorstellung und der Ablauf der dynamischen Kostenvergleichsrechnung dar.

Der Abschnitt 2.1 beschreibt den Begriff der Investition und stellt die wesentlichen Unterschiede der Methoden der Investitionsrechnung dar. Im Abschnitt 2.2 werden die Grundlagen und das Ablaufschema der Kostenvergleichsrechnung behandelt. Welche Verfahrensschritte im Vorfeld der eigentlichen Kostenvergleichsrechnung geschehen werden im Abschnitt 2.3 erläutert. Die Durchführung und die einzelnen Verfahrensschritte der Kostenvergleichsrechnung im engeren Sinne sind Gegenstand des Abschnittes 2.4.

### 2.1 Investitionen und Methoden der Investitionsrechnung

Das Ziel der Investitionsrechnung ist, mit einer definierten Methode ein quantitatives Ergebnis auf Basis gegebener konkreter wirtschaftlicher Daten von einem oder mehreren Investitionsobjekten, eine Investitionsentscheidung zu finden. Dabei hat die Investitionsrechnung sowohl aus strategischer Sicht als auch aus operativer Sicht für Volkswirtschaften, Betriebe und private Haushalte einen hohen Stellenwert. Sie ist aus strategischer Sicht die Grundlage für langfristige Kapitaldispositionen in einem sehr hohen Umfang. Aus der operativen Sicht ist die Investitionsrechnung wichtig, weil konkret und quantitativ einzelne Investitionsobjekte oder Investitionsprogramme evaluiert werden können.

In der betriebswirtschaftlichen Literatur wird der Begriff Investition unterschiedlich definiert. Investitionen sind nach Situation und Autor mit verschiedenen Aussagen verbunden. Der Begriff Investition kann folgende Aussagen haben (Poggensee, 2009):

- Die Geldausgabe für ein Investitionsobjekt (ein finanzieller Vorgang),
- die Beschaffung eines Anlagegutes (Anlagevermögen bildender Vorgang),
- die Berechnung der Vorteilhaftigkeit eines Objektes.

Die Investitionsrechnungsmethoden können zu Methodengruppen zusammengefasst und unter verschiedenen Aspekten kategorisiert werden. Unterschieden werden die Investitionsrechnungsmethoden nach:

- Quantitative und qualitative Methoden
- Methoden mit und ohne Einbeziehung von Risikoaspekten
- Methoden mit ein- und mehrdimensionalen Zielfunktionen
- Methoden zur Evaluierung von Einzelinvestitionen oder Investitionsprogrammen

Aus dieser Kategorisierung der Methoden der Investitionsrechnung können folgende Methodengruppen gebildet werden (Carstensen, 2008):

- Statische Investitionsrechnungsmethoden
- Dynamische Investitionsrechnungsmethoden

Der wesentliche Unterschied zwischen statischen und dynamischen Investitionsrechnungsmethoden ist der Faktor Zeit. Die statischen Methoden betrachten nur eine Wirtschaftsperiode, wobei die Wirtschaftsperiode ein Kalender- oder Geschäftsjahr sein kann. Heutzutage sollten für entscheidende Investitionsobjekte die statischen Investitionsrechnungsmethoden nicht mehr verwendet werden, weil sie viel zu trivial sind (Poggensee, 2009) und werden im weiteren Verlauf dieser Diplomarbeit nicht berücksichtigt. Die dynamischen Methoden der Investitionsrechnung berücksichtigen bei der Bewertung von Investitionsobjekten den unterschiedlichen zeitlichen Anfall von Kosten. Die zeitlich verschieden anfallenden Kosten werden mit einem festgelegten Zinssatz bewertet. Damit bewerten die dynamischen Methoden die Kosten in der Gegenwart höher als in der Zukunft und versuchen den Zeitwert von Kosten realistischer abzubilden.

Ein Überblick der einzelnen Methoden der Investitionsrechnung, wie sie am häufigsten in betriebswirtschaftlichen Unternehmungen vorkommen, ist in der Abbildung 2 dargestellt.

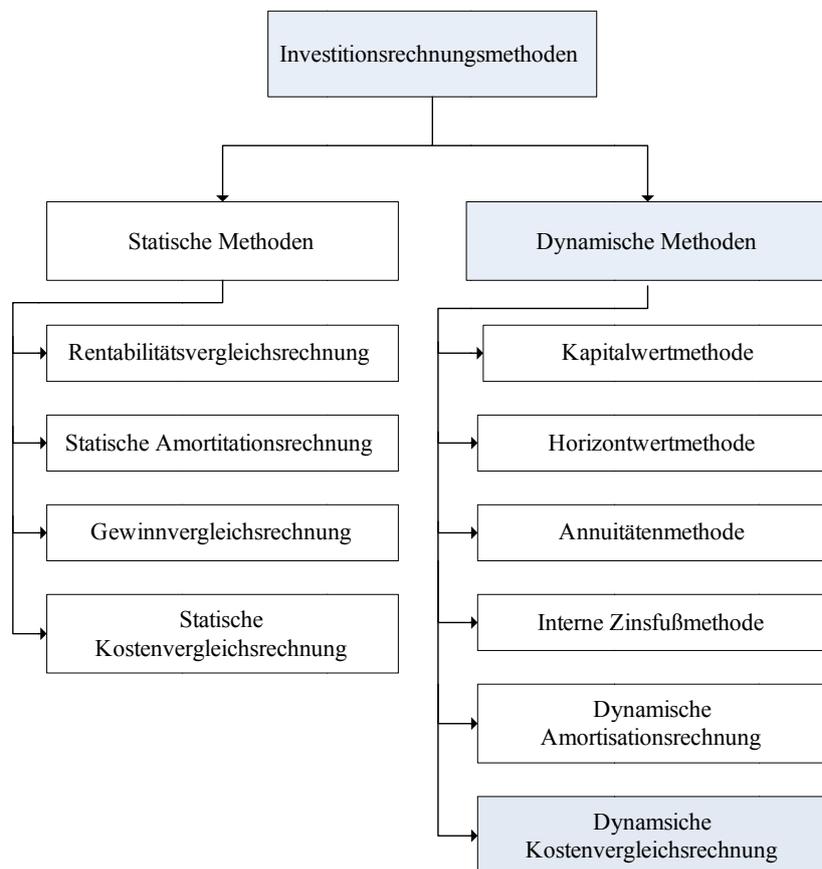


Abbildung 2: Methoden der Investitionsrechnung

Die dynamischen Methoden der Investitionsrechnung bilden die komplexen Realitäten der Volkswirtschaften und wirtschaftlicher Unternehmungen in Modellen ab. Diese Modelle sind vereinfachte Abbildungen der Wirklichkeit. Für die Funktionstätigkeit der Modelle müssen mindestens vier Annahmen getroffen werden. Diese sind:

- alle Rechenelemente sind mit Sicherheit bekannt.
- Es gibt nur einen Zinssatz.

- Die Annahme von Gewinnmaximierung und Polypol.
- Vorhanden sein eines vollkommenen Kapitalmarktes.

Der vollkommene Kapitalmarkt ist ein wirklichkeitsferner Idealmarkt, welcher für fast alle finanzmathematischen Modelle vorausgesetzt wird und aus folgenden Annahmen besteht:

- Kapital steht einem Investor unabhängig von seiner Bonität zur Verfügung
- Es erfolgt keine Differenzierung zwischen Fremd- und Eigenkapital
- Der Kapitalmarkt ist transparent.

Generell besitzt die dynamische Investitionsrechnung zwei Schwachpunkte. Zum einen ist dies das Problem der Datenbeschaffung. Bei den in der Planung verwendeten Daten handelt es sich um Prognosen zukünftiger Werte. Daher ergibt sich eine auftretende Diskrepanz zwischen den heutigen Plandaten und den zukünftig eintretenden tatsächlichen Werten. Zum anderen ist es die Tatsache, dass die Investitionsrechnungsmethoden auf akademische mathematische Annahmen beruhen. Diese sind nur vereinfachte Abbilder der Realität und können die komplexe praktische Entscheidungssituation nicht immer sachgerecht abbilden. Die Methoden der Investitionsrechnung berücksichtigen ebenfalls nicht die ökologischen und sozialen Fragestellungen die mit den meisten Investitionsobjekten einhergehen.

Das sind die Gemeinsamkeiten und Grundannahmen aller dynamischen Investitionsrechnungsmethoden. Die einzelnen Methoden unterscheiden sich jedoch innerhalb ihrer benötigten Eingangsdaten. Für die Bewertung eines Investitionsobjektes werden bei fast allen Methoden Ein- und Auszahlungen benötigt. Die Ausnahme ist die Methode der dynamischen Kostenvergleichsrechnung, welche nur finanzmathematische aufbereitete Kosten zur Beurteilung von Investitionsobjekten begutachtet.

In den nächsten Abschnitten dieser Diplomarbeit wird die dynamische Kostenvergleichsrechnung eingehender beschrieben. Für die Anwendung und Ausführung von anderen dynamischen Methoden sei an dieser Stelle auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen (Götz, 2008; Breuer, 2007; Kruschwitz, 2008; Poggensee, 2009).

## **2.2 Dynamische Kostenvergleichsrechnung**

Die Kostenvergleichsrechnung gehört in der Fachliteratur meistens immer zur Methoden-Gruppe der statischen Investitionsrechnung. Der Grund warum die Kostenvergleichsrechnung sehr oft nicht als dynamische Investitionsrechnungsmethode angewendet wird liegt darin, dass die Kostenvergleichsrechnung die positive Erfolgskomponente der Betriebswirtschaft, die Erlöse und Gewinne, nicht berücksichtigt. Die Kostenvergleichsrechnung darf nur angewendet werden, wenn die Erlöse in Bezug auf jede Alternative des Investitionsobjektes gleich groß sind (Kruschwitz, 2008).

Es werden zwei unterschiedliche Verfahren für die Anwendung der dynamischen Kostenvergleichsrechnung unterschieden. Das erste Verfahren ist die Kostenvergleichsrechnung auf Teilkostenbasis. Bei diesem Verfahren werden nur die entscheidungsrelevanten Kostenarten einbezogen. Bei dem zweiten Verfahren handelt es sich um die Kostenvergleichsrechnung auf Vollkostenbasis. Für die Durchführung der Kostenvergleichsrechnung auf Vollkostenbasis

werden alle Kostenarten berücksichtigt. Die Problematik bei der Kostenvergleichsrechnung auf Vollkostenbasis ist die Ermittlung der tatsächlich anfallenden Kosten. In der Praxis werden Kostenvergleichsrechnungen zum größten Teil auf Teilkostenbasis angewendet. (BMI, 2007).

Der Ablauf der Kostenvergleichsrechnung wird in zwei Phasen unterteilt (siehe Abbildung 3). Die erste Phase besteht aus einem dreistufigen Vorfeld der Kostenvergleichsrechnung. In der zweiten Phase wird die Kostenvergleichsrechnung im engeren Sinn in vier Stufen durchgeführt. Die erste Phase besteht aus den folgenden drei Stufen:

- Problemanalyse und Aufstellung eines Zielsystems.
- Alternativenfindung und der Darstellung der Alternativen.
- Überprüfung der Eignung einer Kostenvergleichsrechnung.

Die zweite Phase, dynamische Kostenvergleichsrechnung im engeren Sinn, setzt sich aus der

- Kostenermittlung,
- finanzmathematischen Aufbereitung der Kosten für Vergleich der Kostenbarwerte beziehungsweise Jahreskosten,
- Kostengegenüberstellung der Kostenbarwert beziehungsweise Jahreskosten,
- Gesamtbeurteilung und Projektvorschlag beziehungsweise Aussage über die Wirtschaftlichkeit des zu überprüfenden Projekts

zusammen.

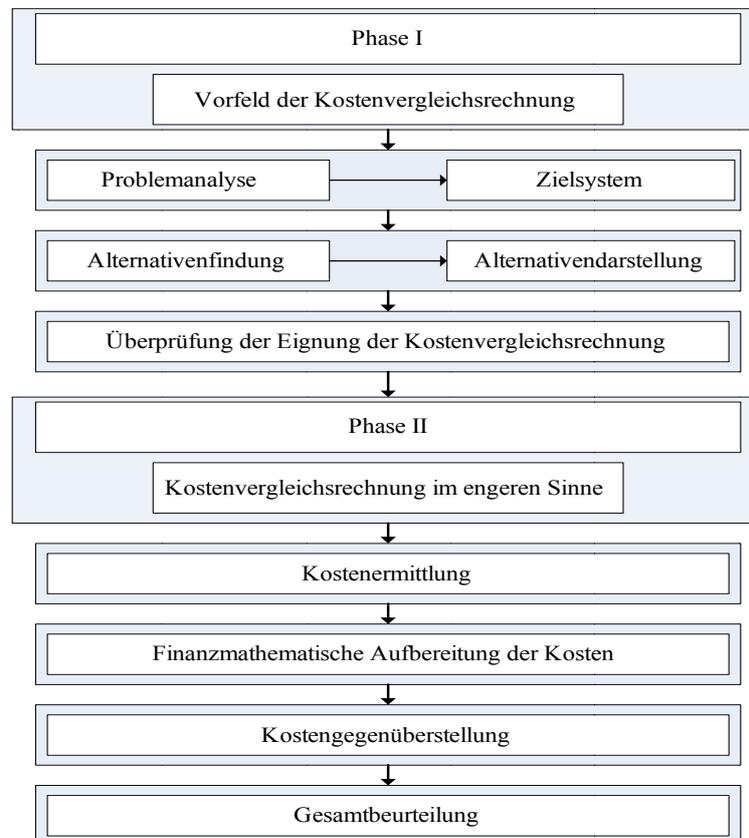


Abbildung 3: Ablaufschema einer dynamischen Kostenvergleichsrechnung

## 2.3 Vorfeld der Kostenvergleichsrechnung

Im Vorfeld der Kostenvergleichsrechnung wird deren Inhalt festgelegt. Dieser Inhalt der Kostenvergleichsrechnung ist von der Zweckbestimmung abhängig. Die Kostenvergleichsrechnung wird bezüglich des Inhaltes zwischen der Vorscheurechnung und der Nachschaurechnung unterschieden. Im Normalfall ist die Kostenvergleichsrechnung ein Bestandteil der Vorscheurechnung und wird während der Planung eines Objektes durchgeführt. Da während der Planung des Investitionsobjektes das Zielsystem und die Alternativen feststehen, wird auf eine doppelte Darstellung verzichtet und ein Verweis auf den Erläuterungsbericht gegeben. Ist die Kostenvergleichsrechnung allerdings ein Bestandteil der Nachschaurechnung und damit Erfolgskontrolle eines durchgeführten Investitionsobjektes, dann werden das Zielsystem sowie die Alternativen in den einzelnen Arbeitsschritten nachgewiesen.

Zu Beginn der Untersuchung wird in jedem Fall geprüft, ob die Kostenvergleichsrechnung eine geeignete Investitionsrechnungsmethode ist um eine aussagekräftige Entscheidung zu treffen. Die Kostenvergleichsrechnung ist eine geeignete Methode, wenn sie die folgenden Bedingungen erfüllt:

- Ein relativer Wirtschaftlichkeitsnachweis ist ausreichend.
- Die vergleichende Alternative ist hinsichtlich ihres Nutzens und ihrer Sozialkosten äquivalent.

Alternative Methoden mit höherem Datenbedarf im Vergleich zur dynamischen Kostenvergleichsrechnung sind nach LAWA, 2005:

- die erweiterte Kostenvergleichsrechnung,
- die Kosten-Nutzen-Analyse,
- die Nutzwertanalyse,
- die Kostenwirksamkeitsanalyse,
- eine Kombinationen aus den Methoden und offene Bewertungsmethoden.

## 2.4 Kostenvergleichsrechnung im engeren Sinn

In der zweiten Phase der dynamischen Kostenvergleichsrechnung wird der eigentliche Kostenvergleich der Investitionsobjekte durchgeführt. In den nächsten Unterabschnitten werden die einzelnen Stufen der Kostenvergleichsrechnung im engeren Sinn dargestellt.

### 2.4.1 Kostenermittlung

Bei der Kostenermittlung sind alle anfallenden entscheidungsrelevanten Kosten nach Kostenarten gegliedert. Die Kosten, welche über die gesamte Nutzungsdauer des Investitionsobjektes auftreten, werden nach Herstellungskosten sowie Unterhaltungs- und Instandsetzungskosten getrennt. Herstellungskosten sind einmalig aufzuwendenden Kosten für die Erstellung, zum Erwerb oder zur Erneuerung von Investitionsobjekten. Unterhaltungs- und Instandsetzungskosten kommen bei Unterhaltung, Überwachung und Instandsetzung des Investitionsobjektes vor. Sie können in regel- oder unregelmäßigen Intervallen auftreten. Die Abgrenzung zwi-

schen Unterhaltungs- und Instandsetzungskosten ist nach LAWA, 2005 schwierig und werden in dieser Diplomarbeit als eine Kostenart angenommen.

Grundsätzlich werden bei der dynamischen Kostenvergleichsrechnung nur Kosten betrachtet, bei denen ein realer Güterverzehr und/oder ein realer Leistungseinsatz entstehen. Damit ist eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung möglich.

### 2.4.2 Finanzmathematische Aufbereitung der Kosten

Kosten für ein Investitionsobjekt erstrecken sich von der ersten Voruntersuchung über die Baudurchführung bis zum Ende der Nutzungsdauer. Die anfallenden Kosten haben in Abhängigkeit des Zeitpunktes unterschiedliche Wertschätzungen und dürfen bei der dynamischen Kostenvergleichsrechnung nicht aufsummiert werden. Bei der dynamischen Kostenvergleichsrechnung wird ein Bezugszeitpunkt festgelegt auf den sich anfallenden Kosten beziehen. Der Barwert ist die nominale Kostengröße im Bezugszeitpunkt. Alle anfallende Kosten vor dem Bezugszeitpunkt müssen aufgezinnt (akkumuliert) und Kosten nach dem Bezugszeitpunkt abgezinst (diskontiert) werden.

Bei der Akkumulation werden Kosten die einmalig anfallen, zum Beispiel die Herstellungskosten, mit dem Akkumulationsfaktor  $A_F$  und bei der Diskontierung mit dem Diskontierungsfaktor  $D_F$  multipliziert. Der Akkumulations- beziehungsweise Diskontierungsfaktor wird mit der folgenden Gleichung bestimmt:

$$A_F(i; n) = (1+i)^n = q^n \quad (2.1)$$

$$D_F(i; n) = \frac{1}{(1+i)^n} = \frac{1}{q^n}$$

mit:

$A_F$	= Akkumulationsfaktor für einmalig anfallende Kosten	[-]
$D_F$	= Diskontierungsfaktor für einmalig anfallende Kosten	[-]
$i$	= Zinssatz	[%]
$n$	= Anzahl der Jahre zwischen Kostenanfall und Bezugszeitpunkt	[-]
$q$	= Zinsfaktor	[-]

Für jährlich wiederkehrende gleiche Kosten, wie zum Beispiel bei Unterhaltungskosten, wird der Akkumulationsfaktor  $A_{FJ}$  beziehungsweise Diskontierungsfaktor  $D_F$  mit der Gleichung (2.2) bestimmt. Die jährliche Kostenreihe wird mit dem Akkumulations- beziehungsweise Diskontierungsfaktor multipliziert und damit der Barwert der Kostenreihe bestimmt.

$$A_{FJ}(i; n) = \frac{(1+i)^n - 1}{i} = \frac{q^n - 1}{q - 1} \quad (2.2)$$

$$D_{FJ}(i; n) = \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} = \frac{q^n - 1}{(q - 1) \cdot q^n}$$

mit:

$A_{FJ}$	=	Akkumulationsfaktor für jährlich anfallende Kosten	[-]
$D_{FJ}$	=	Diskontierungsfaktor für jährlich anfallende Kosten	[-]
$i$	=	Zinssatz	[%]
$n$	=	Anzahl der Jahre zwischen Kostenanfall und Bezugszeitpunkt	[-]
$q$	=	Zinsfaktor	[-]

### 2.4.3 Kostengegenüberstellung und Gesamtbeurteilung

Bei der Lösung des Auswahlproblems nach dem Kriterium der Kostenvorteilhaftigkeit werden die Objektkostenbarwerte gegenübergestellt. Eine wesentliche Voraussetzung für den kostenmäßigen Vergleich von alternativen Investitionsobjekten ist die Bedingung, dass die geplante Leistung von allen Alternativen über die gleiche Zeitspanne erbracht wird. Die Voraussetzung ist erfüllt, wenn die Investitionsobjekte die gleiche Nutzungsdauer und Herstellungsbeginn haben. Die Gegenüberstellung der Objektkostenbarwerte erfolgt in Form einer Differenzbildung. Die Barwertdifferenz verkörpert die kapitalisierte Kostenersparnis, die während der Nutzungsdauer des Objektes anfällt.

Der abschließende Arbeitsschritt der dynamischen Kostenvergleichsrechnung stellt die zusammenfassende Beurteilung der Untersuchungsergebnisse unter Berücksichtigung aller übrigen nicht kostenmäßigen bewertbaren Gesichtspunkte dar. Die Kostenstruktur der zu vergleichenden Alternativen wird anhand einer Gegenüberstellung der Herstellungskosten sowie der Unterhaltungs- und Instandsetzungskosten erörtert und die Objektkostenbarwerte dargestellt. Neben der Beurteilung der Kosten werden auch andere Randbedingungen und Fakten in der Entscheidungsfindung berücksichtigt.

### 3 Deckwerkskonstruktionen für Küstenschutzbauwerken

Kapitel 3 stellt ausgewählte Deckwerkskonstruktionen für den Küstenschutz aus verschiedenen Baumaterialien und Ausführungen vor. Der Abschnitt 3.1 dieses Kapitels enthält die allgemeinen Bauweisen von Deckwerken und zeigt die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale in der Bauausführung auf. In den Abschnitten 3.2 bis 3.5 werden landestypische Deckwerke wie sie in Deutschland vorzufinden sind dargestellt und beschrieben. Abschnitt 3.6 behandelt die Ausführungsmöglichkeiten von Filterschichten für Deckwerkskonstruktionen im Küstenschutz. Im Abschnitt 3.7 werden die ausgesuchten Deckwerke gegenübergestellt und die Vorbeziehungsweise Nachteile der jeweiligen Deckwerkskonstruktion diskutiert.

#### 3.1 Bauweisen von Deckwerkskonstruktionen

Im Küsteningenieurwesen und im Wasserbau wird die äußere Schutzschicht einer Böschung von Ufer- und Küstenschutzbauwerken als Deckwerk bezeichnet. Im Laufe der Zeit wurden eine Vielzahl unterschiedliche Deckwerksysteme und Deckwerksausführungen entwickelt. Die Entwicklungen passten sich an die unterschiedlichen Herausforderungen der jeweiligen Zeitperiode an. Die wichtigsten Aspekte der neuesten Generation von Deckwerken sind die Wirtschaftlichkeit, die dauerhafte Stabilität gegen Umwelteinflüsse, die Umweltverträglichkeit und die Einbindung in das natürliche Umfeld.

Das Deckwerk besteht aus einer Deckschicht, einer Filterschicht und eventuell aus anderen Unterschichten (vgl. Abbildung 4). Auf dem Deckwerk kann ein Kronenbauwerk installiert werden, dieses bietet einen erhöhten Schutz gegen den Wellenüberlauf. Die Fußsicherung verleiht dem Deckwerk zusätzliche Stabilität.

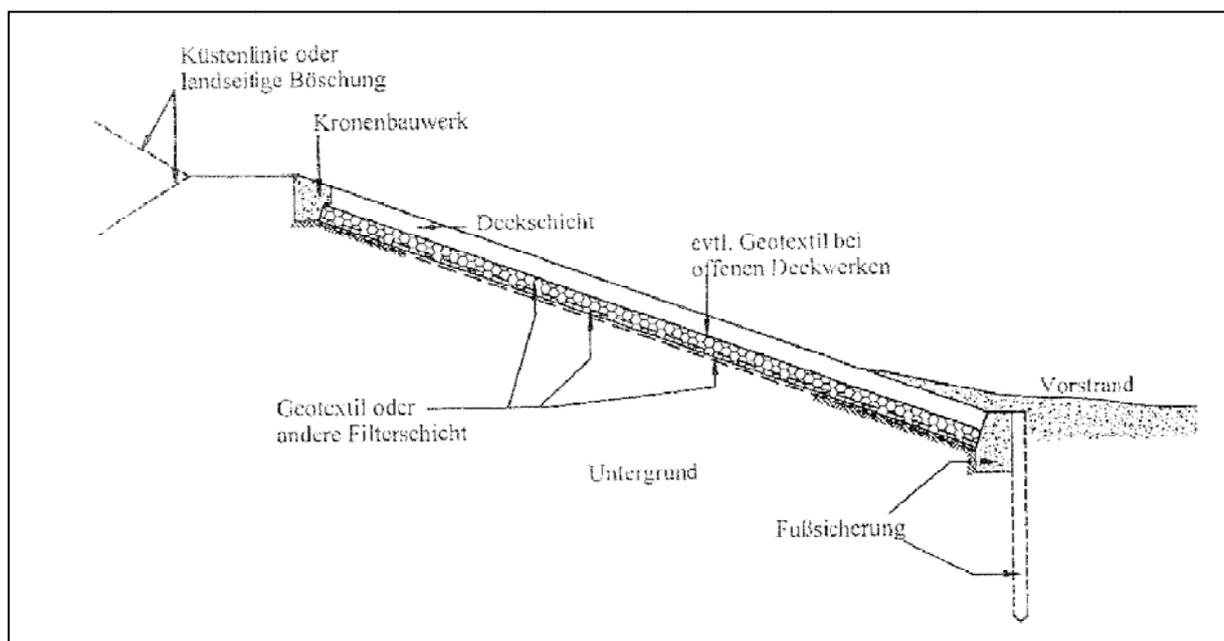


Abbildung 4: Aufbau eines Deckwerkes (nach McConnell, 1998)

Die Aufgabe des Deckwerkes ist das Bauwerk von der Wasserseite gegen Belastung durch hohe Wasserstände, Strömungen und brechende Wellen zu schützen. Für geböschte Küstenschutzbauwerke, deren Kern meistens aus Sand oder Klei besteht, ist es von hoher Bedeutung Deckwerke auszubilden um den Bauwerkskörper vor den Folgen der Erosion und Suffosion zu sichern.

Im Weiteren hat das Deckwerk die Funktion die Wellenauflaufhöhe und den Wellenüberlauf zu reduzieren. Das Deckwerk und dabei im Besonderen die Deckschicht werden jeweils nach hydraulischen und morphologischen Anforderungen sowie ökonomischen und ökologischen Randbedingungen in verschiedenen Bauweisen ausgeführt. Eine Deckwerkskonstruktion kann nach folgenden Merkmalen unterschieden werden:

- Starre versus elastische Bauweise
- Offene versus geschlossene Bauweise
- Verklammerte versus unverklammerte Bauweise

Den größten gestalterischen und konstruktiven Unterschied bei Deckwerksausführungen bildet die Unterteilungen in offener und geschlossener sowie verklammerter und unverklammerter Bauweisen.

Bei einem offenen Deckwerk wird der Durchfluss von Wasser durch die Deckschicht erlaubt. Im Gegensatz zu den offenen Deckschichten kann das Wasser bei geschlossenen Deckwerken nicht die Deckschicht durchströmen. Ob ein Deckwerk in offener oder geschlossener Art zur Ausführung kommt hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Die wichtigsten Aspekte bei der Festlegung, ob das Deckwerk in offener und geschlossener Bauweise ausgeführt wird, sind die Wirtschaftlichkeit und der anstehende Untergrund. Bei einem durchlässigen Boden wird ein offenes Deckwerk errichtet, während ein geschlossenes Deckwerk nur bei einem undurchlässigen Untergrund errichtet werden sollte (EAK, 1993).

In dieser Diplomarbeit werden ausschließlich offene Deckwerke betrachtet. Für die Eigenschaften und Bemessung von geschlossenen Deckwerken sei an dieser Stelle auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen (unter anderem TAW, 1985; EAAW, 2007; Schönian, 1999).

Bei unverklammerten Deckwerken werden Wasserbausteine (WBS) lose geschüttet oder Betonformsteine (BFS) und Basaltsäulen kontaktschlüssig gesetzt (siehe Abbildung 5). Die Stabilität von unverklammerten Deckwerken wird vor allem durch das Eigengewicht der Deckwerkselemente gewährleistet.

Eine genaue Beschreibung der Baustoffe und deren Verarbeitung von ausgewählten offenen und unverklammerten Deckwerken erfolgt in den Unterabschnitten 3.2 und 3.3.

Für die Erhöhung der Stabilität von Deckwerken können Wasserbausteine mit einem dichten Vergussstoff untereinander verklammert werden. Die Verklammerung der Deckwerkselemente kann mit einem hydraulisch gebundenen Vergussstoff (Zementmörtel), Bitumen gebundenen Vergussstoff (Asphaltmastix) oder chemisch gebundenen Vergussstoff (Polyurethan) erfolgen. Dabei wird die Oberflächenstruktur der Deckschicht ganz oder teilweise versiegelt (siehe Abbildung 6).

In den Unterabschnitten 3.4 und 3.5 werden Deckwerkskonstruktionen aus Mastix-Schotter (MS) und Elastocoast (EC) detaillierter dargestellt.

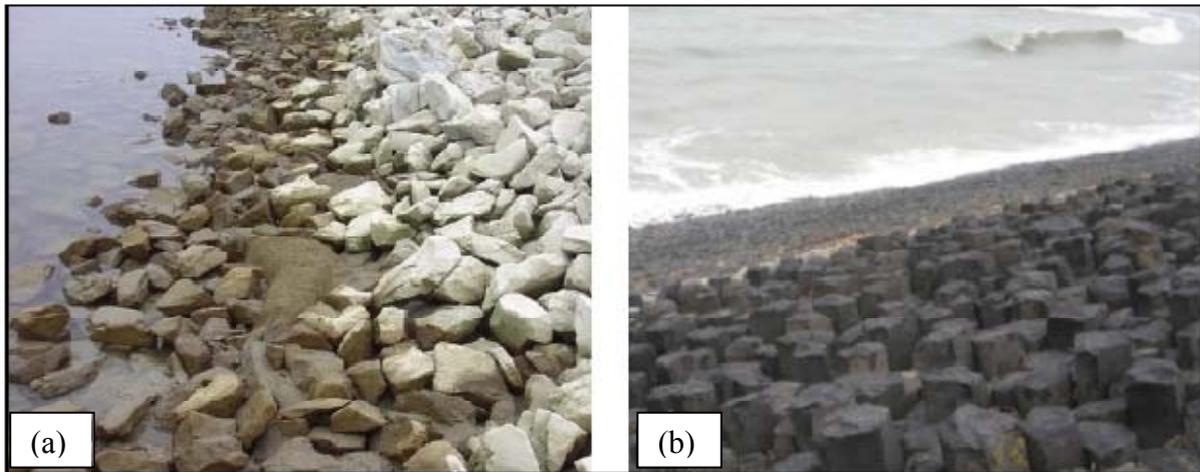


Abbildung 5: Unverklammerte Deckwerke: Lose Wasserbausteine (a) und Basalt-Deckwerk (b) (Staal, 2008)



Abbildung 6: Verklammerte Deckwerke: Mastix-Schotter (c), Asphaltverguss (d), Betonverguss (e) (Staal, 2008)

Eine Filterschicht muss nur unter offenen Deckwerken vorgesehen werden. Bei offenen Deckwerken dient die Filterschicht zur Sicherung der Entwässerung des Systems. Die Filterschicht wird als ungebundener Kornfilter (Sand, Kies) oder auch als gebundener Kornfilter (Bitumensand) ausgeführt. Alternativ zu den Kornfiltern werden auch Geotextile als Filterschicht im Deckwerksbau eingesetzt.

### 3.2 Deckwerk aus geschütteten Wasserbausteinen

Wasserbausteine sind grobe Gesteinskörnungen für die Verwendung in Wasserbauwerken. Sie werden unterschieden in natürliche, rezyklierte und industriell hergestellte Wasserbausteine. Natürliche Wasserbausteine sind aus mineralischen Vorkommen und sind ausschließlich mechanisch aufbereitet. Rezyklierte Wasserbausteine werden aus anorganischen Materialien, welche zuvor als Baustoffe dienten, aufbereitet. Die industriell hergestellten Wasserbausteine sind mineralischen Ursprungs. Sie sind unter thermischen Einfluss oder sonstiger Prozesse entstanden (DIN EN 13383-1, 2009).

In der DIN EN 13383-1, 2009 sind verschiedene Wasserbausteinklassen mit unterschiedlicher Widerstandsfähigkeit gegen hydraulische Einwirkungen festgesetzt. Es gibt zwei unterschiedliche Definitionen für die Eigenschaften von Wasserbausteinen. Erstens kann die Angabe über

die Eigenschaften des Wasserbausteines über den Durchmesser erfolgen. Die Angabe lautet dann  $CP_{x/y}$  (Coarse Particle mit x untere Klassengrenze in mm und y obere Klassengrenze in mm). Die zweite Möglichkeit die Eigenschaft des Steines zu beschreiben ist die Angabe des Gewichtes. Bei der Angabe des Gewichtes wird zwischen  $LM_{x/y}$  (Light Mass mit x untere Klassengrenze in kg und y ober Klassengrenze in kg) und  $HM_{x/y}$  (Heavy Mass) unterschieden.

Bei einer Deckschicht aus geschütteten Wasserbausteinen ohne Verklammerung muss jedes Deckschichtelement eine ausreichende Sicherheit gegen Abgleiten zum Deckwerksfuß durch das Eigengewicht aufweisen. Die Lagestabilität des einzelnen Wasserbausteines ist von der Neigung der Böschung, dem Steingewicht, der Lage im Deckwerk und den Reibungswerten zwischen Untergrund und Wasserbausteinen sowie der einzelnen Wasserbausteine untereinander abhängig. Die Deckwerkskonstruktion aus geschüttetem Wasserbausteinen kann keine Normalkräfte und Biegemomente aufnehmen (EAK, 1993).

Der Einbau der Wasserbausteine ist sowohl unter Wasser wie auch im Trockenen möglich. Die Wasserbausteine können vom Schiff aus wie auch von Hand oder maschinell eingebaut werden.

### 3.3 Deckwerke aus gesetzten Betonformsteine

Bei der Konstruktion von Deckwerken wird heutzutage Beton hauptsächlich in Form von Betonpflastersteinen und Betonfertigteilen beziehungsweise zur Vermörtelung von Steingerüsten benutzt (EAK, 1993).

Die notwendigen Eigenschaften, Zusammensetzungen und Konformitätsverfahren für Beton und Stahlbeton der mit Meerwasser in Kontakt kommt sind in der DIN EN 206-1, 2001 und DIN 1045-2, 2001 festgelegt. Die Anforderung an den Beton und die Bewehrung in Abhängigkeit von den möglichen Einwirkungen wird durch Expositionsklassen beschrieben (DIN 1045). Es gibt insgesamt sieben Expositionsklassen, die jeweils in bis zu vier weitere Klassen untergliedert werden. Folgende Expositionsklassen beschreiben die Einwirkungen auf den Beton:

- Expositionsklasse XF (F=Freezing), Beanspruchung durch Frost mit/ohne Taumittel-einwirkung
- Expositionsklasse XA (A=Chemical Attack), Beanspruchung durch chemische Angriffe
- Expositionsklasse XM (M=Mechanical Abrasion), Beanspruchung durch Verschleiß

Der Einsatz von Beton in der Wasserwechselzone und der zusätzliche Kontakt mit Meerwasser haben zur Folge, dass die Anforderungen an den Beton relativ hoch sind. Der Beton muss nach der DIN 1045 folgende Eigenschaften besitzen:

- XF4, hoher Frostwiderstand
- XA2, chemisch mäßig angreifende Umgebung oder Meerwasserbauwerke
- C30/37 LP, luftporenbildender Beton mit der charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit von 30 N/mm<sup>2</sup>.

Deckschichten aus gesetzten Betonformsteinen werden unterschieden in Säulen, Blöcken, mit Stahlseilen verbundenen Blöcken und verzahnte Blöcke (siehe Abbildung 7).

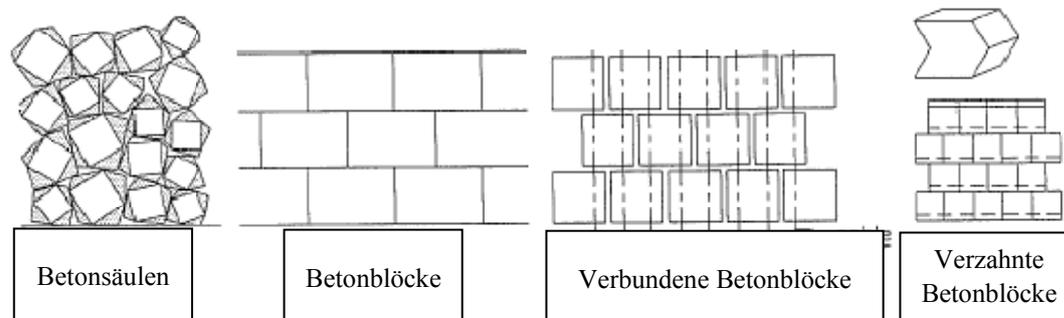


Abbildung 7: Beispiele für Betonformsteine (CUR/TAW, 1995)

Verzahnte Betonformsteine werden mit Horizontal-, Vertikal- oder Doppelverbund hergestellt. Die Verzahnung der Betonformsteine erhöht die Sicherheit gegen das Herauslösen einzelner Steine.

Die Lagestabilität der Betonformsteine wird durch das Eigengewicht, die Reibungswirkung infolge enger Fugen oder durch die Verzahnung der einzelnen Deckschichtsteine erreicht.

Der Einsatz von Betonpflastersteinen und Betonfertigteilen kann sowohl über dem Ruhewasserspiegel als auch unterhalb des Ruhewasserspiegels erfolgen.

### 3.4 Deckwerke aus Mastix-Schotter

Mastix-Schotter ist ein mittels bituminösen Mörtels gebundener Einkornsplitt. Der Begriff „offener Steinasphalt“ wird in Deutschland ebenfalls verwendet. Bei dem Einsatz von Mastix-Schotter als Deckschicht werden grobe Gesteinskörnungen 16/22 mm, 32/45 mm oder größer mit einer Asphaltmastix verklebt. Der Mastix-Schotter setzt sich zusammen aus 4/5 Einkornsplitt und 1/5 Asphaltmastix. Der Asphaltmastix besteht aus 17% Bindemittelgehalt, 16,5% Füller und 66,5% Sand. Als Bindemittel eignet sich ein Bitumen 70/100 oder auch 50/70 (EAAW, 2007).

Die Ausführung von Mastix-Schotter als Deckschichtmaterial kann auf zwei Weisen erfolgen. Die erste Ausführung ist das Aufbringen des Mastix-Schotters in situ. Dabei ist zu beachten, dass Mastix-Schotter nicht unterhalb des Ruhewasserspiegels eingebaut werden kann. Die zweite Möglichkeit ist das Benutzen von vorgefertigten Mastix-Schotter-Platten (siehe Abbildung 8).

Die Einbautemperatur von Mastix-Schotter beträgt in situ zwischen 110 und 160°C. Für den Einbau auf einem geotextilen Filter ist zu beachten, dass die maximale erlaubte Einbautemperatur für Geotextile aus Polypropylen 140°C ist.



Abbildung 8: Mastix-Schotter beim Einbau in situ und als Mastix-Schotter-Platte (Hesselberg Hydro)

### 3.5 Deckwerke aus Elastocoast

Das elastomere Deckwerksystem Elastocoast (EC) ist ein von der Elastogran GmbH entwickeltes elastisch verklammertes Deckwerk. Die Hauptkomponenten des Deckwerksystems sind Wasserbausteine kleiner Körnung (Schotter) und ein lösungsmittelfreier 2-Komponenten-Beschichtungskunststoff auf Polyurethanbasis (PUR). Der verwendete Polyurethan-Kunststoff setzt sich aus den zwei Komponenten Isocyanat und Polyol zusammen. Für den Schotter kann sowohl Kalkstein wie auch Basalt oder Granit verwendet werden. Die Körnungsgröße kann dabei von 8/11 mm bis zu 40/60 mm reichen. Das Mischverhältnis von PUR und Schotter beträgt 33 kg PUR auf 1 m<sup>3</sup> Schotter.

Die einzelnen Komponenten (PUR und Schotter) werden in situ zusammengemischt. Dabei wird der Schotter nur an seinen Kontaktpunkten verklebt. Das Gemisch aus PUR und Schotter kann dann mit einem Bagger auf die Filterschicht aufgebracht werden. Die Abbildung 9 zeigt das Ablaufschema für die Herstellung einer Deckschicht aus Elastocoast



Abbildung 9: Arbeitsschritte beim Einbau von Elastocoast (Elastogran)

Zu beachten ist, dass der Schotter verhältnismäßig sauber und trocken ist, damit die Verbindung von PUR und Schotter optimal erfolgen kann. Elastocoast kann nicht bei Regen, Temperaturen unter 10°C und unterhalb des Ruhewasserspiegels eingebaut werden.

### 3.6 Filterschichten für Deckwerkskonstruktionen

Die Filterschicht von Deckwerkskonstruktionen erfüllt im Wesentlichen die folgenden drei Funktionen:

- Verhinderung des Herauslösen von feinsten Bodenteilchen aus dem Untergrund
- Erhöhung der Stabilität des Untergrundes durch das zusätzliche Gewicht der Filterschicht
- Abschwächung der zyklischen Wasserdruckbelastung auf den Untergrund

Die Filterschicht wird aus Kies, Sand, Bitumensand (96% Sand und 4% Bitumen) oder Geotextil hergestellt. Zwischen der Deckschicht und einem Geotextil wird häufig eine Zwischenschicht eingebaut. Diese Zwischenschicht hat erstens eine Schutzfunktion für das Geotextil und zweitens erhöht die Zwischenschicht das Gewicht auf den Untergrund.

Für die Bemessung der Filterschicht müssen die Sieblinie des Untergrund- und Filterschichtmaterials sowie die wirksame Öffnungsweite des Geotextils bekannt sein (EAK, 1993).

### 3.7 Gegenüberstellung der ausgewählten Deckwerke

In den vorigen Abschnitten wurden verschiedene offene Deckwerkskonstruktionen für den Einsatz im Küstenschutz dargestellt. Jede Konstruktion ist in der Bauausführung und den Materialeigenschaften einzigartig und mit Stärken und Schwächen verbunden. In diesem Abschnitt werden die spezifischen Eigenschaften auf Vor- und Nachteile untersucht.

Deckschichten aus geschütteten Wasserbausteinen und Elastocoast besitzen eine hohe Wasserdurchlässigkeit. Die Porosität von Elastocoast und Wasserbausteinen ist fast doppelt so groß wie die von Mastix-Schotter (Bijlsma & Voortman, 2009). Der Vorteil der hohen Durchlässigkeit der Deckschicht ist eine geringere Wellenaufbauhöhe (CUR/TAW, 1995). Zu beachten ist allerdings das eine Filterschicht eingebaut werden muss, damit die Stabilität des Untergrundes bewahrt bleibt (Oumeraci et al., 2009a).

Die Herstellung und Verarbeitung von Elastocoast erfolgt direkt auf der Baustelle. Mastix-Schotter, Wasserbausteine und Betonformsteine müssen dagegen meistens angeliefert werden. Bei größeren Bauprojekten kann eine mobile Mischanlage für Mastix-Schotter angemietet werden. Die Mietanlage wird aber im Regelfall erst ab einem Bedarf von 70000 Tonnen Mastix-Schotter wirtschaftlich interessant. Damit ist Elastocoast den anderen Deckwerkskonstruktionen in entlegenen Gebieten und Inseln überlegen.

Looser Mastix-Schotter und Elastocoast können nicht im Wasser eingebaut werden. Mastix-Schotter kann allerdings als vorgefertigte Matte unterhalb der Ruhewasserlinie eingebaut werden. Das ist ein Nachteil der Elastocoast-Deckschicht gegenüber den Deckwerkskonstruktionen aus Wasserbausteinen, Mastix-Schotter und Betonformsteinen.

Der Erfolg einer Deckwerkskonstruktion hängt neben der Erfüllung der gestalterischen und funktionalen Ziele auch von der Erreichung der Kostenziele ab. Im Kapitel 8 wird eine Antwort auf die Fragestellung der kostengünstigsten Deckwerkskonstruktion gegeben.

## 4 Einwirkungen, Belastungsgrößen und Schadensmechanismen von Deckwerken

Innerhalb dieses Kapitels 4 werden die Einwirkungen, Belastungsgrößen und den daraus folgenden Schadensmechanismen von Deckwerken vorgestellt. Der erste Abschnitt 4.1 behandelt die Einwirkungen auf Deckwerkskonstruktion. Im Abschnitt 4.2 werden die aus den Einwirkungen entstehenden Belastungsgrößen eingehender beschrieben und die wellenverursachenden Schadensmechanismen von Deckwerken aufgezeigt.

### 4.1 Einwirkungen auf Deckwerkskonstruktionen

Deckwerkskonstruktionen für den Küstenschutz unterliegen bei der Herstellung und im Betrieb mechanischen, klimatischen, biologischen sowie chemischen Einwirkungen. Aus diesen Einwirkungen ergeben sich Belastungen und Beanspruchungen für die Deckwerkskonstruktion. Die Belastungen haben zur Folge, dass die Deckwerkskonstruktion entweder geschwächt wird oder sogar im Laufe der Zeit ihre Schutzfunktion vollkommen verliert. Abbildung 10 zeigt die wesentlichen Einwirkungen, Belastungsgrößen und Schadensmechanismen für Deckwerkskonstruktionen im Küstenschutz.

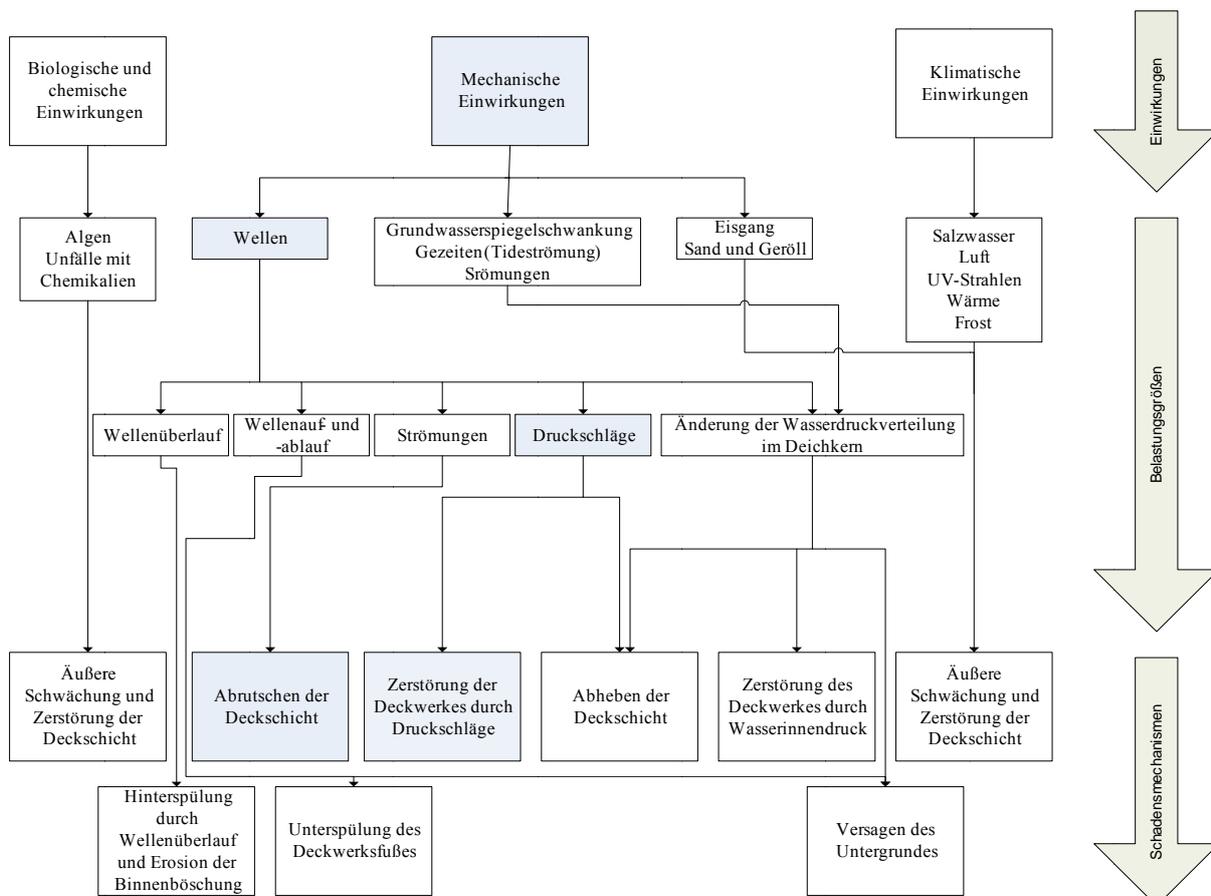


Abbildung 10: Übersicht der Einwirkungen, Belastungsgrößen und Schadensmechanismen für Deckwerkskonstruktion im Küstenschutz

Algen bilden die biologische Hauptbeanspruchung von Deckschichten. Sie finden in der Wasserwechselzone und besonders im Tidebereich ihre Lebensbedingung. Durch den Algenbewuchs ist die Begehbarkeit des Deckwerkes bei feuchter und steiler Böschung gefährlich. Chemische Einwirkungen haben eine untergeordnete Bedeutung bei Deckwerken. Sie treten höchstens bei Unfällen mit Chemikalien in Küstennähe auf (EAAW, 2007).

Klimatische Beanspruchungen sind besonders bei Mastix-Schotter und Elastocoast Deckwerken zu berücksichtigen. Die Deckwerke werden durch Salzwasser, Luft, UV-Strahlen, Wärme und Frost beansprucht. Diese Klimafaktoren haben eine entscheidende Bedeutung bei der Langlebigkeit des Deckwerks. Die UV-Strahlung auf elastomere und bituminöse Deckwerke in und oberhalb der Wasserwechselzone ist die Ursache für die Alterung des Bitumens im Mastix-Schotter beziehungsweise der PUR-Verbindung beim Elastocoast. Besonders die Überlagerung der einzelnen Klimafaktoren bildet eine nicht zu unterschätzende Belastung für das Deckwerk.

Die mechanischen Einwirkungen auf die Deckwerkskonstruktion und den Untergrund werden in statische und dynamische Belastungen unterschieden. Statische Belastungen resultieren aus dem Eigengewicht, der Auflast, dem Wasserdruck und dem Auftrieb. Die dynamischen Belastungen existieren einerseits bei der Herstellung des Deckwerks durch Transportvorgänge und Arbeitsgeräte, andererseits sind die dynamischen Belastungen durch Wellen besonders bei Deckwerken für den Küstenschutz hervorzuheben. Weitere mechanische Angriffe auf das Deckwerk sind Stöße durch Treibgut, Eisschollen und Schiffe sowie die abschleifende Wirkung des vom Wasser mitgeführten Sandes und Gerölls und der damit verbundenen Abrasion.

## **4.2 Belastungsgrößen und Schadensmechanismen infolge von Wellen**

Belastungsgrößen aus mechanischen Einwirkungen auf Deckwerkskonstruktionen können nach folgenden Gesichtspunkten gegliedert werden:

- Gezeiten mit Druck- und Strömungsänderungen
- Grundwasserspiegelschwankungen mit Druckänderungen
- Direkte Stöße und Abrasion
- Wellenbelastung
- Sonstige Störungen

In dieser Diplomarbeit werden ausschließlich Wellenbelastungsgrößen begutachtet und beschrieben, da sie die entscheidenden Größen für die Dimensionierung von Deckwerken im Küstenschutz sind. In den folgenden Unterabschnitten 4.2.1 bis 4.2.3 werden die Wellenbelastungsgrößen und den daraus folgenden Schadensmechanismen detaillierter beschrieben

Die Belastungsgrößen durch Wellen sind nach Lage zur Hauptwindrichtung und in Abhängigkeit von der Wassertiefe sehr unterschiedlich. Die maßgebenden dynamischen Belastungen durch Wellen sind die Wellenhöhe im Küstenvorfeld, die Höhe der Sturzbrecher auf der Böschung des Küstenschutzbauwerkes sowie Wellenauflauf, Wellenablauf und Wellenüberlauf.

McConnell, 1998 gibt insgesamt sechs mögliche Schadensmechanismen für eine Deckwerkskonstruktion infolge von Wellenbelastung an. Diese Schadensmechanismen werden in der Abbildung 11 dargestellt und sind:

- Abheben der Deckschicht
- Abrutschen der Deckschicht
- Zerstörung und Schwächung der äußeren Deckschicht
- Unterspülung des Deckwerkfußes
- Erosion der rückwärtigen Teil des Bauwerks
- Versagen des Untergrundes

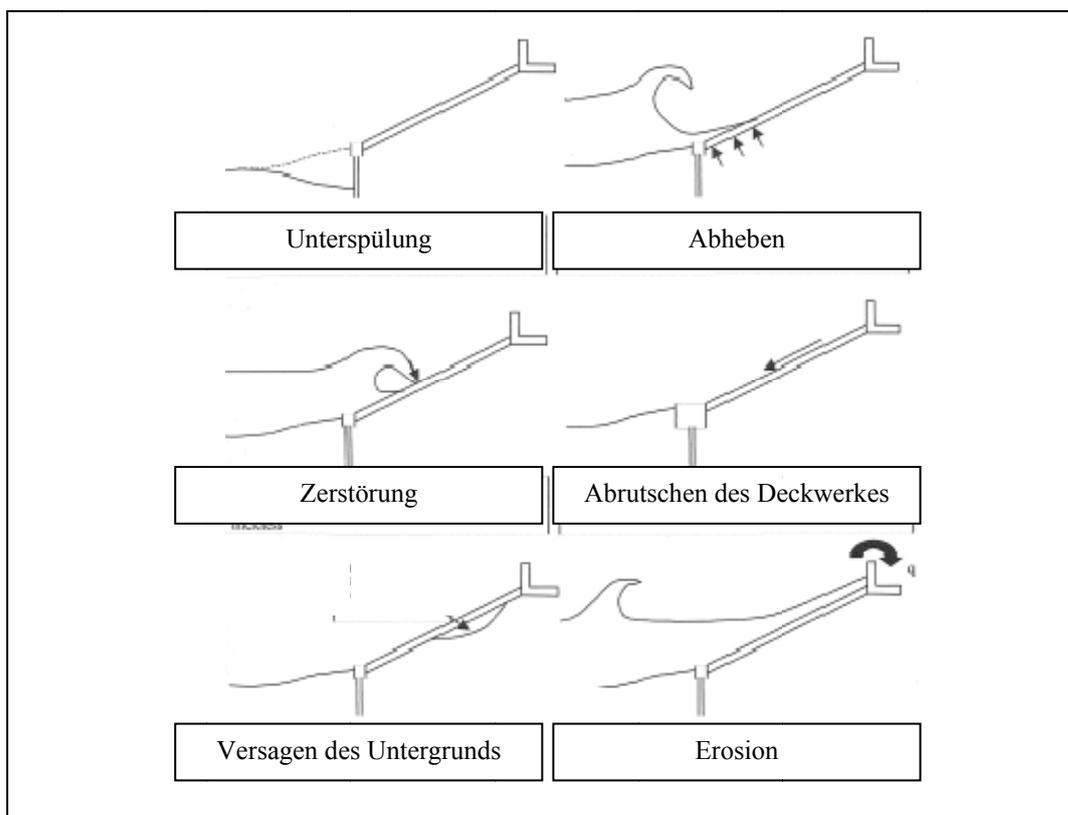


Abbildung 11: Schadensmechanismen von Deckwerkskonstruktionen (nach Allsop & McConnell, 1999)

#### 4.2.1 Druckschlagbelastung

Druckschläge sind sehr kurze und hohe Druckspannungen, welche entstehen, wenn ein Sturzbrecher direkt auf das Deckwerk trifft. Sie haben eine geringe örtliche Ausdehnung. Die Position des Druckschlags liegt bei Böschungen mit einer Neigung von 1:3 und flacher unterhalb des Ruhewasserspiegels (Oumeraci, 1989).

Die Beschädigung beziehungsweise die Zerstörung des Deckwerkes auf Grund von Druckschlägen kann auf zwei verschiedenen Weisen erfolgen. Erstens durch die direkte Druckschlagbelastung auf das geböschte Küstenschutzbauwerk und die damit erzeugte Druckspannung auf das Deckwerk. Die Druckspannung hat zur Folge, dass die äußere Deckschicht zer-

stört oder geschwächt wird. Bedeutender ist aber der zweite Belastungsfall, die sogenannte Sprengwirkung. Bei der Sprengwirkung kommt es zu einem großflächigen Auftrieb durch das Auftreffen des Druckschlages auf Risse, Spalte oder Fugen in der Deckschicht. Stephan, 1981 hat in seiner Dissertation eine Zusammenfassung von Schäden durch Druckschläge für verschiedene Deckwerkskonstruktionen beschrieben. Ein Versagen des Untergrundes kann ebenfalls durch wiederholte Druckschläge auf das Deckwerk eintreten (Klein Breteler & Bezuijen, 1998).

Die Bemessungsgrundlagen für die Druckschlagberechnung sind im Abschnitt 6.1 wiedergegeben.

#### **4.2.2 Wellenauf- und -ablauf**

Der Mechanismus von Wellenauflauf und Wellenablauf steht in einem engen Zusammenhang mit der Änderung der Wasserdruckverteilung durch die Bewegung der Wellen. Bei einem offenen Deckwerk führt der Wellenauflauf zu einer Infiltration des auflaufenden Wassers durch die Deckschicht. Die Wassermenge, welche in den offenen Porenraum infiltriert ist von der Durchlässigkeit des Deckwerks und der Filterschicht abhängig. Beim Wellenablauf kommt es zu einem Herausfließen des Wassers aus dem Deckwerk. Die Zeit, die das Wasser beim Wellenablauf benötigt ist geringer als beim Wellenauflauf. Die Folge ist eine Auftriebswirkung durch das verbleibende Wasser in den Poren. Dadurch kann es zu einem Herauslösen von Elementen aus dem Deckwerk kommen (McConnell, 1998). Eine weitere Schadensfolge des Wellenauf- und -ablaufs ist die mögliche Unterspülung des Deckwerkfußes und die damit verbundene Instabilität des Küstenschutzbauwerkes (Allsop & McConnell, 1999).

Im Abschnitt 6.3 werden die Bemessungsgrundlagen für den Wellenauflauf beschrieben, da dieser auch für die Dimensionierung der Sollhöhe des Küstenschutzbauwerkes benötigt wird.

#### **4.2.3 Wellenüberlauf**

Wenn die Sollhöhe des Bauwerkes nicht hoch genug ist kommt es zum Wellenüberlauf. Durch den Wellenüberlauf kann es zur einer Hinterspülung der Deckwerkskonstruktion kommen. Diese Hinterspülung kann zu einer Erosion des Deckwerkes von der Oberkante aus führen. Weitere Schäden auf Grund des Wellenüberlaufes können am rückwärtigen Teil des Küstenschutzbauwerkes auftreten.

Bemessungsgrundlagen und Berechnungsansätze für den Wellenüberlauf sind nicht Bestandteil dieser Diplomarbeit und können im EurOtop, 2007 nachgeschlagen werden.

## 5 Bauwerksgeometrie, Seegangparameter und Bemessungswasserstand

In diesem Kapitel werden die Bauwerksgeometrie (5.1), die Seegangparameter (5.2) und der Bemessungswasserstand (5.3), auf welche die Bemessungen der ausgewählten Deckwerke im Kapitel 6 basieren, dargestellt. Für eine möglichst realistische Kostenvergleichsrechnung der verschiedenen Deckwerkskonstruktionen werden im Abschnitt 5.4 ausgewählte Seegangparameter und Bemessungswasserstände aus bereits realisierten Bauvorhaben aufgezeigt.

### 5.1 Bauwerksgeometrie

Der Wellenauflauf, die Wellenreflexion und die Beanspruchung des Deckwerkes durch brechende Wellen sind unter anderem von der Neigung der Böschung abhängig. Die Böschungeneigung hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die bodenmechanischen Eigenschaften des Untergrundes und auf die Auswahl des benutzten Deckwerksmaterials (EAK, 1993).

Für die Böschung des Küstenschutzbauwerkes wurde die Neigung in einem Verhältnis von 1:3, 1:4 und 1:6 beziehungsweise mit einem Böschungswinkel  $\alpha=18,43^\circ$ ,  $\alpha=14,04^\circ$  und  $\alpha=9,46^\circ$  festgelegt. Diese Böschungeneigungen entsprechen der Standardausführung für geböschte Küstenschutzbauwerke in Deutschland und Europa. Außerdem werden diese Böschungeneigungen oftmals in hydraulischen Modellversuchen und der Fachliteratur (z. B. Schütterpf, 2001; TAW, 1985) verwendet.

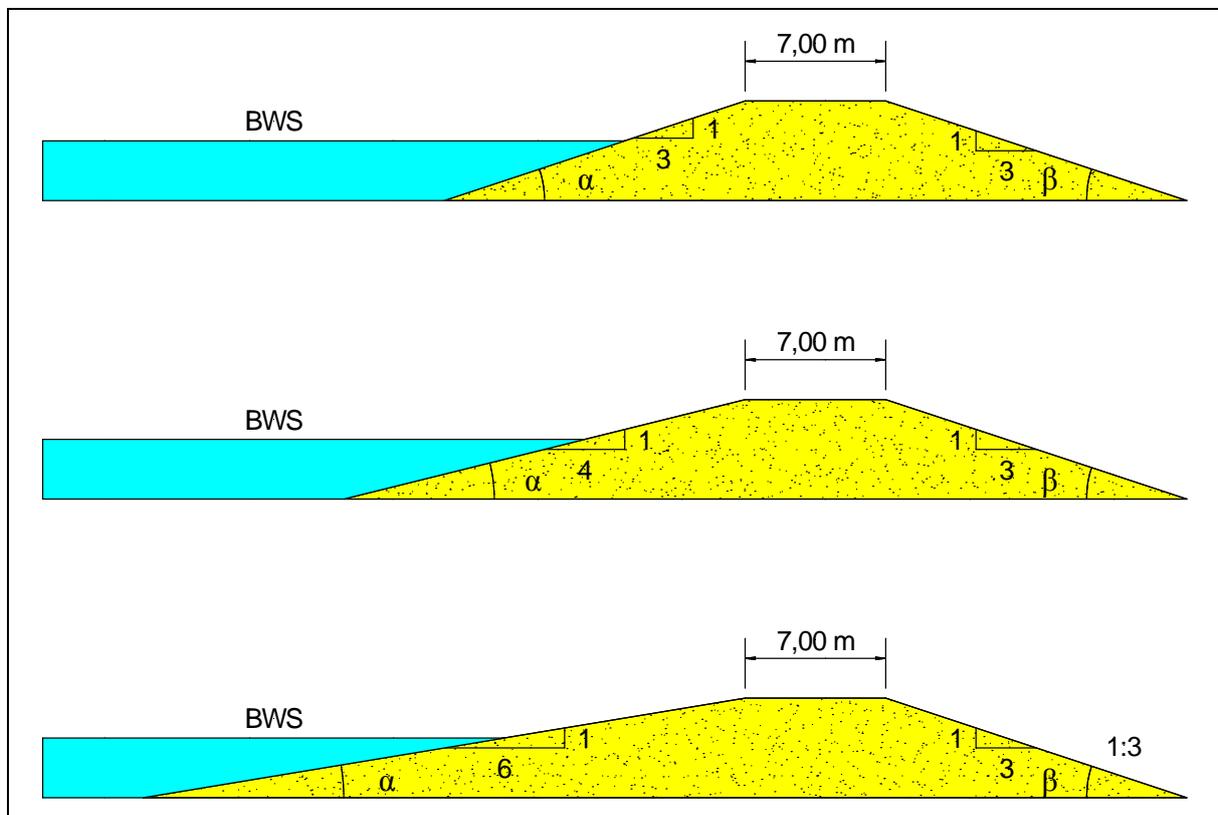


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Bauwerksgeometrie.

## 5.2 Seegangparameter

Seegangparameter sind Kennwerte, die bestimmte Eigenschaften der natürlichen Unregelmäßigkeit des Seegangs quantifizieren. Die Wellenhöhe und die Wellenperiode sind die zwei beschreibenden Größen für eine Welle beziehungsweise Wellenspektrums. Für die Bemessung von geböschten Küstenschutzbauwerken sind sie, neben dem Bemessungswasserstand vor dem Bauwerk, die wichtigsten Eingangparameter.

### 5.2.1 Wellenhöhe

In der Forschung und der praktischen Anwendung besitzen zwei Wellenparameter einen besonderen Einfluss. Der erste Wellenparameter ist die signifikante Wellenhöhe  $H_{m0}$  am Fuß des Küstenschutzbauwerkes.  $H_{m0}$  ist die spektrale Wellenhöhe und wird mittels des Wellenspektrums berechnet. Der andere angewendete Wellenparameter ist die signifikante Wellenhöhe  $H_{1/3}$  beziehungsweise  $H_s$ . Sowohl  $H_s$  als auch  $H_{1/3}$  werden aus der Zeitreihe ermittelt. Im EurOtop-Manual beruhen die Formeln auf Frequenzparametern. Im Gegensatz dazu werden in der EAK Zeitreihenparameter verwendet.

Im Tiefwasser wird die Annahme getroffen, dass die beiden Wellenhöhen  $H_s$  und  $H_{m0}$  ungefähr gleich groß sind (EAK, 2002). Mit abnehmender Wassertiefe kommt es auf Grund von Shoaling zu einer Zunahme des Verhältnisses  $H_s/H_{m0}$ . Das Verhältnis von  $H_s/H_{m0}$  besitzt Werte zwischen 0,90 und 1,05. Einen Einfluss auf das Verhältnis von  $H_s/H_{m0}$  haben die Wellensteilheit und das Verhältnis von Wassertiefe zur Tiefwasserwellenlänge.

Für die Bemessung von Küstenschutzbauwerken wird in der Ingenieurpraxis für die signifikante Wellenhöhe nicht zwischen den Werten aus einer Frequenzanalyse oder Zeitreihe unterschieden (EAK, 2002). Die signifikante Wellenhöhe aus der Frequenzanalyse  $H_{m0}$  sowie die Werte aus einer Zeitreihe  $H_{1/3}$  und  $H_s$  haben das Gleiche Verhältnis. Für die Bemessung der ausgewählten Deckwerke in Kapitel 6 wird die die Gleichung (3.1) benutzt.

$$H_{m0} = H_{1/3} = H_s \quad (3.1)$$

### 5.2.2 Wellenperiode

Aus einer Frequenzanalyse oder einer Zeitreihe eines Wellenspektrums können mehrere verschieden definierte Wellenperioden bestimmt werden. Am häufigsten werden die signifikante Wellenperiode  $T_{1/3}$  beziehungsweise  $T_s$ , die mittlere Wellenperiode  $T_m$  und die Peakperiode  $T_p$  verwendet (EAK, 2002). Folgende Verhältnissfaktoren bestehen zwischen diesen drei Wellenperioden:

$$\frac{T_p}{T_m} = 1,10 - 1,25 \quad (3.2)$$

$$\frac{T_p}{T_{1/3}} = 1,00 \quad (3.3)$$

Die spektrale Wellenperiode  $T_{m-1,0}$  wird im EurOtop-Manual verwendet und gewichtet die langperiodischen Anteile stärker. Diese Wellenperiode eignet sich besonders gut für die Wellenauflaufbemessung komplexer Küstenschutzbauwerke sowie für theoretische Wellenspektren (EurOtop, 2007).

Für ein gleichförmiges Ein-Peak-Spektrum besteht ein festgelegtes Verhältnis zwischen Peakperiode und spektraler Periode. Im EurOtop-Manual ist das Verhältnis mit 1,10 festgelegt, wodurch sich die folgende Gleichung ergibt:

$$\frac{T_p}{T_{m-1,0}} = 1,10 \quad (3.4)$$

### 5.3 Bemessungswasserstand

Für die Ermittlung der Sollhöhe von geböschten Küstenschutzbauwerken ist neben der Wellenauflaufhöhe auch der Bemessungswasserstand (BWS) von Bedeutung. In Deutschland erfolgt die Festlegung des Bemessungswasserstandes auf Bundeslandebene. Jedes an Nord- und Ostsee angrenzende Bundesland verwendet andere Methoden und Verfahren zur Festsetzung der Bemessungswasserstände. In Schleswig-Holstein wird an der Westküste das Wemelsfelder-Verfahren und in Niedersachsen das a-b-c-d-Verfahren sowie das Vergleichswertverfahren angewendet (Oumeraci, 2001).

Die Bemessungswasserstände müssen in zehnjährigen Abständen überprüft und nach Bedarf von den verantwortlichen Behörden neu festgesetzt werden.

### 5.4 Ausgewählte Seegangparameter und Bemessungswasserstand

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Seegangparameter und Bemessungswasserstände entstammen alle aus veröffentlichten Berichten des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig. In der Abbildung 13, der Abbildung 14 und der Abbildung 15 sind die ostfriesischen Inseln Borkum, Baltrum und Norderney dargestellt. Die Markierungen (gelbe Pfeile) zeigen an welchen Stellen der jeweiligen Insel die Seegangparameter sowie die Bemessungswasserstände Gültigkeit besitzen. Tabelle 1, Tabelle 2 und Tabelle 3 fassen die Seegangparameter und Bemessungswasserstände an den jeweiligen Küstenabschnitten zusammen.



Abbildung 13: Insel Borkum als Satellitenaufnahme (Google Earth, 2009)

Tabelle 1: Seegangparameter und Bemessungswasserstand der Insel Borkum (Oumeraci et al., 2009b)

Küstenabschnitt	Wellenhöhe $H_{m0}$ [m]	Wellenperiode $T_{m-1,0}$ [s]	BWS [m]
Westseite	2,91	7,0	5,18



Abbildung 14: Insel Baltrum als Satellitenaufnahme (Google Earth, 2009)

Tabelle 2: Seegangparameter und Bemessungswasserstand der Insel Baltrum (Oumeraci &amp; Kortenhaus, 2007)

Küstenabschnitt	Wellenhöhe $H_{m0}$ [m]	Wellenperiode $T_{m-1,0}$ [s]	BWS [m]
Süd-Westseite	1,37	7,22	5,10
Nord-Westseite	2,36	9,05	5,10



Abbildung 15: Insel Norderney als Satellitenaufnahme (Google Earth, 2009)

Tabelle 3: Seegangparameter und Bemessungswasserstand der Insel Norderney (Oumeraci et al., 2008)

Küstenabschnitt	Wellenhöhe $H_{m0}$ [m]	Wellenperiode $T_{m-1,0}$ [s]	BWS [m]
Süd-Westseite	1,86	5,50	5,00
Nord-Westseite	3,14	8,70	5,00

## 6 Bemessungsgrundlagen für ausgewählte Deckwerke

Deckwerke für den Küstenschutz werden zum größten Teil nach Erfahrungswerten unter Berücksichtigung bautechnischer Grundsätzen entworfen (EAK, 1993). Dass es keine Normungen für die Bemessung von Deckwerkskonstruktionen gibt, liegt daran, dass es sich häufig um Erneuerungen oder Instandsetzung von bereits bestehenden Bauwerken handelt. Weiterhin existieren eine Vielzahl von Konstruktionsmöglichkeiten sowie wirtschaftliche und natürliche Randbedingungen, die eine Normung unmöglich machen.

Neben den Erfahrungswerten sind einige Bemessungsansätze für Deckwerke im Küstenschutz vorhanden. Diese Bemessungsansätze unterscheiden sich zwischen empirisch ermittelten und theoretischen hergeleiteten Bemessungsgrundlagen.

Der Abschnitt 6.1 gibt einen kurzen Überblick über zwei wichtige Eingangsparameter, die für fast alle Bemessungsgrundlagen benötigt werden. Im Abschnitt 6.2 wird der Bemessungsansatz für die Standsicherheit eines offenen Deckwerkes vorgestellt. Mit dem Nachweis der Standsicherheit wird das nicht abrutschen des Deckwerkes auf der Böschung erbracht. Der dritte Abschnitt in diesem Kapitel enthält die Bemessungsgrundlagen für den Wellenauflauf an einem geböschten Küstenschutzbauwerk. Der Wellenauflauf ist neben dem Bemessungswasserstand das wichtigste Kriterium für die Bestimmung der Höhe des Bauwerkes. Der Abschnitt 6.4 behandelt die Bemessungsgrundlagen für die Deckwerksdicke infolge von Wellenbelastung.

### 6.1 Wellenbrecherkennzahl und Druckschlag

Einer der wichtigsten Parameter für die Bemessungsgrundlagen von geböschten Küstenschutzbauwerken ist die Brecherkennzahl  $\xi$ . Sie wird unter anderen bei der Bemessung des Wellenauflaufes, Wellenüberlaufes, der Druckschlagbelastung sowie Deckwerksdicke benötigt. Die Brecherkennzahl ist von der Wellensteilheit und der Neigung vor dem Bauwerk beziehungsweise der Böschungsneigung des Bauwerkes abhängig und beschreibt die Brecherform (Battjes, 1974). Die Gleichung (4.1) gibt die Formel zur Berechnung der Brecherkennzahl im Tiefwasser an.

$$\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_0}} \quad (4.1)$$

mit:

$\xi_0$	= Brecherkennzahl im Tiefwasser	[-]
$\alpha$	= Böschungsneigung	[°]
$s_0$	= Wellensteilheit = $H/L_0$	[-]
$H$	= Wellenhöhe	[m]
$L_0$	= Wellenlänge im Tiefwasser	[m]

Neben der Brecherkennzahl im Tiefwasser  $\xi_0$  gibt es noch die Brecherkennzahl am Bauwerksfuß  $\xi_d$  und am Brechpunkt  $\xi_b$ .

Im Rahmen der Diplomarbeit werden die Bemessungsansätze nach EurOtop, 2007 durchgeführt. Im weiteren Verlauf wird daher die Brecherkennzahl  $\xi_{m-1,0}$  verwendet. Die Wellenbrecherkennzahl  $\xi_{m-1,0}$  wird am Fuß des Bauwerkes bestimmt. Die folgende Gleichung stellt die Wellenbrecherkennzahl  $\xi_{m-1,0}$  dar:

$$\xi_{m-1,0} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_{m0}}{L_{m-1,0}}}} \quad (4.2)$$

mit:

$\xi_{m-1,0}$	= Brecherkennzahl am Bauwerksfuß	[-]
$\alpha$	= Böschungsneigung	[°]
$H_{m0}$	= Spektrale Wellenhöhe	[m]
$L_{m-1,0}$	= Wellenlänge im Tiefwasser	[m]

Die Wellenlänge im Tiefwasser wird mit der Gleichung (4.3) bestimmt.

$$L_{m-1,0} = \frac{g \cdot T_{m-1,0}^2}{2 \cdot \pi} \quad (4.3)$$

mit:

$L_{m-1,0}$	= Wellenlänge im Tiefwasser	[m]
$g$	= Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$T_{m-1,0}$	= Spektrale Wellenperiode am Bauwerksfuß	[m]

Es werden insgesamt drei verschiedene Brecherformen unterschieden (Führböter, 1991). Es gibt Schwallbrecher, Sturzbrecher und Reflexionsbrecher. Schwallbrecher treten häufig an flach geneigten Böschungen auf und die Wellenbrecherkennzahl  $\xi_0$  ist kleiner 0,5. Bei Wellenbrecherkennzahlen  $\xi_0$  von 0,5 bis 3,3 liegen meistens Sturzbrecher vor. Ist die Wellenbrecherkennzahl größer als 3,3 treffen Reflexionsbrecher auf das geböschte Bauwerk (EAK, 2002).

Die Druckschlagbelastung bei geböschten Küstenschutzbauwerken tritt nur bei Sturzbrechern auf. Der Druckschlag erzeugt eine dynamische Kraft, welche innerhalb einer kurzen Zeit große Druckspannungen auf das Bauwerk ausüben kann. Der maximale Druckschlag  $p_{\max}$  der auf das geböschte Bauwerk trifft wird aufgrund der stochastischen Eigenschaften des Druckschlages mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit angegeben. Der maximale Druckschlag kann mit der folgenden Formel beschrieben werden (EAK, 2002):

$$p_{\max}(\mathbf{i}) = C(\mathbf{i}) \cdot \rho_w \cdot g \cdot H \quad (4.4)$$

mit:

$p_{\max}$	= Druckspannung	[kN/m <sup>2</sup> ]
$i$	= Überschreitungswahrscheinlichkeit	[%]
$C(i)$	= Dimensionsloser Koeffizient	[-]
$\rho_w$	= Dichte des Wassers	[t/m <sup>3</sup> ]
$g$	= Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$H$	= Wellenhöhe	[m]

## 6.2 Bemessungsgrundlagen für die Standsicherheit

Für die Standsicherheit  $\eta$  eines offenen Deckwerkes gegen Abrutschen auf einer Böschung ist das Verhältnis der rückhaltenden Kraft zu den treibenden Kräften entscheidend. Die rutschfördernden Kräfte setzen sich zusammen aus dem böschungsp parallelen Anteil des Eigengewicht  $G$  des Deckwerkes und der Strömungskraft  $S$ . Die zurückhaltende Kraft ist die Schubspannung im Boden. Die Gleichung (4.5) stellt den Nachweis für die Standsicherheit eines Deckwerkes auf einer Böschung dar.

$$\eta = \frac{T}{G \cdot \sin \alpha + S_F} \quad (4.5)$$

mit:

$\eta$	= Standsicherheit eines offenen Deckwerkes	[-]
$T$	= Schubspannung des Bodens	[N/m]
$G$	= Eigengewicht eines Deckwerkelements	[N/m]
$S_F$	= Strömungskraft	[N/m]
$\alpha$	= Böschungsneigung	[°]

Das Eigengewicht des Deckwerkes setzt sich zusammen aus der Dicke des Deckwerkes, der Länge des Deckwerkelements und der Wichte unter Auftrieb. Die Formel (4.6) stellt die Gleichung für die Bemessung des Eigenwichts dar.

$$G = t_{\text{Deckwerk}} \cdot e \cdot \gamma'_D \quad (4.6)$$

mit:

$G$	= Eigengewicht eines Deckwerkelements	[N/ m]
$t_{\text{Deckwerk}}$	= Dicke des Deckwerkes	[m]
$e$	= Länge eines Deckwerkelements	[m]
$\gamma'_D$	= Wichte unter Auftrieb	[N/m <sup>3</sup> ]

Durch die Wellenbewegung kommt es zu einer Schwankung zwischen Wasserstand 1 und 2 (siehe Abbildung 16). Es wird die Annahme getroffen, dass der Boden unterhalb des Ruhewasserspiegels mit Wasser gesättigt ist. Deswegen wird das Gewicht des Bodens unter Auftrieb angenommen, was für die Standsicherheitsberechnung ungünstiger wirkt und somit auf der sicheren Seite liegt. Für die Strömungskraft  $S_F$ , die aus dem böschungsp parallelen Abfließen des Porenwassers resultiert und dabei Reibungen erzeugt, gelten dieselben Annahmen wie für das Eigengewicht des Deckwerkelements. Mit der folgenden Gleichung (4.7) wird die Strömungskraft bestimmt:

$$S_F = t_{\text{Deckwerk}} \cdot e \cdot \gamma_w \cdot \sin \alpha \quad (4.7)$$

mit:

$S_F$	= Strömungskraft	[N/m]
$t_{\text{Deckwerk}}$	= Dicke des Deckwerks	[m]
$e$	= Länge eines Deckwerkelements	[m]
$\gamma_w$	= Wichte des Wassers	[N/m <sup>3</sup> ]
$\alpha$	= Neigung der Böschung	[°]

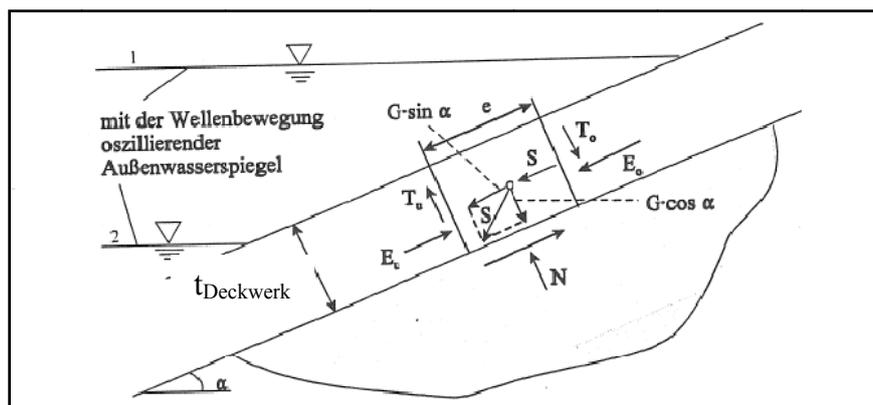


Abbildung 16: Einwirkende und rückhaltende Kräfte auf einer Böschung (nach EAK, 1993)

Die aus der Schubspannung entstehende rückhaltende Kraft des Bodens  $T$  bestimmt sich nach dem MOHRschen Spannungskreis für ein Deckwerkelement der Länge  $e$  zu:

$$T = \sigma' \cdot e \cdot \tan \varphi + c \cdot e \quad (4.8)$$

mit:

$T$	= Schubspannung des Bodens	[N/m]
$\sigma'$	= Effektive Normalspannung	[N/m <sup>2</sup> ]
$e$	= Länge eines Deckwerkelements	[m]
$\varphi$	= Reibungswinkel des Bodens	[°]
$c$	= Kohäsion des Bodens	[N/m <sup>2</sup> ]

Die effektive Normalspannung des Bodens wird mit der folgenden Gleichung bestimmt:

$$\sigma' = \gamma'_D \cdot t_{\text{Deckwerk}} \cdot \cos \alpha \quad (4.9)$$

mit:

$\sigma'$	= Effektive Normalspannung	[N/m <sup>2</sup> ]
$\gamma'_D$	= Wichte unter Auftrieb	[N/m <sup>3</sup> ]
$t_{\text{Deckwerk}}$	= Dicke des Deckwerks	[m]
$\alpha$	= Neigung der Böschung	[°]

Für die Berechnung der effektiven Normalspannung wie auch bei der Bestimmung des Eigengewichts des Deckwerkelementes wird die Wichte unter Auftrieb benötigt. Die Wichte unter Auftrieb wird folgendermaßen ermittelt:

$$\gamma'_D = (\rho_d - \rho_w) \cdot g \quad (4.10)$$

mit:

$\gamma'_D$	= Wichte unter Auftrieb	[N/m <sup>3</sup> ]
$\rho_d$	= Dichte des Deckwerkelements	[t/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	= Dichte des Wassers	[t/m <sup>3</sup> ]
$g$	= Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]

Unter der Annahme, dass die seitlichen Normal- und Schubkräfte  $E_0$ ,  $E_U$ ,  $T_0$  und  $T_U$  vernachlässigt werden und der Boden keine Kohäsion besitzt, gilt für die Standsicherheit  $\eta$  folgende Gleichung:

$$\eta = \frac{\gamma'_D \cdot \cos \alpha \cdot \tan \varphi}{(\gamma'_D + \gamma_w) \cdot \sin \alpha} = \frac{\gamma'_D}{(\gamma'_D + \gamma_w)} \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha} \quad (4.11)$$

mit:

$\eta$	= Standsicherheit eines offenen Deckwerkes	[-]
$\gamma'_D$	= Wichte unter Auftrieb	[N/m <sup>3</sup> ]
$\gamma_w$	= Wichte des Wassers	[N/m <sup>3</sup> ]
$\varphi$	= Reibungswinkel des Bodens	[°]
$\alpha$	= Neigung der Böschung	[°]

### 6.3 Bemessungsgrundlagen für den Wellenauflauf

Die Beschreibung des Wellenauflaufes an geböschten Küstenschutzbauwerken erfolgt über die Bestimmung der Wellenauflaufhöhe  $R_u$ . Die Wellenauflaufhöhe ist der senkrechte Abstand zwischen dem höchsten Punkt der Wellenauflaufzunge und dem Ruhewasserspiegel (EAK, 2002). Die Abbildung 17 zeigt eine schematische Darstellung und Definition des Wellenauflaufes.

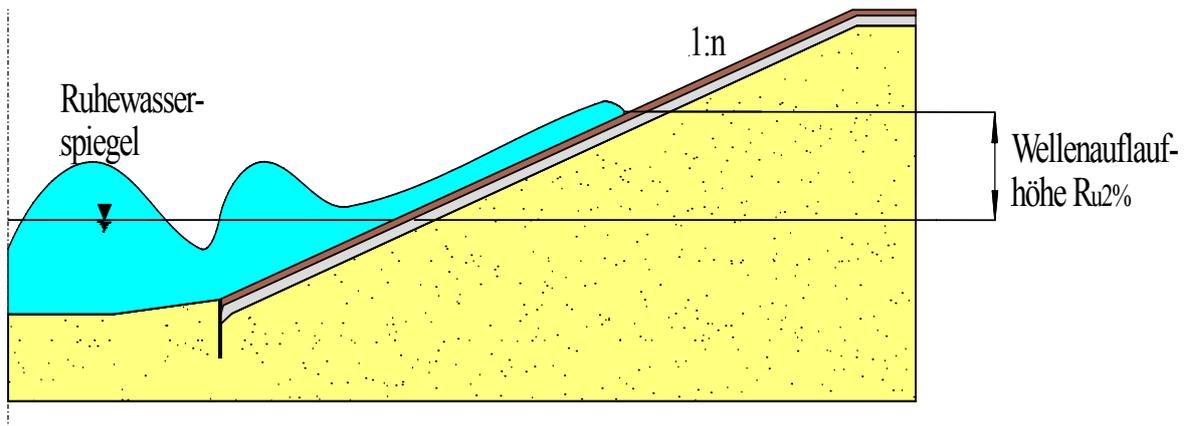


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Wellenauflaufhöhe  $R_u$

Eine exakte mathematische Beschreibung für den Wellenauflauf an geböschten Küstenschutzbauwerken ist nicht möglich. Die Ursache liegt in der stochastischen Natur des Wellenbrechens und Wellenauflaufes. Die vorhandenen Bemessungsansätze zur Bestimmung der Wellenauflaufhöhe beruhen auf empirischen Formeln. Der Wellenauflauf wird durch folgende Faktoren beeinflusst (EAK, 2002):

- Bauwerksparameter
  - Bauwerkneigung
  - Vorstrandgeometrie
  - Oberflächenrauheit inklusive Porosität
  - Berme
- Seegangparameter und Wasserstand
  - Wellenhöhe
  - Wellenperiode
  - Richtungsstruktur des Seegangs
  - Spektrale Eigenschaften des Seegangs
  - Wassertiefe vor dem Bauwerk
- Windparameter
  - Windgeschwindigkeit
  - Windrichtung
  - Winddauer

Bei der Bemessung von geböschten Küstenschutzbauwerken wird die Wellenaufauhöhe  $R_{u2\%}$  benutzt. Die 2%-Wellenaufauhöhe  $R_{u2\%}$  beschreibt die Wellenaufauhöhe, die von 2% der auflaufenden Wellen überschritten wird.

Für die Bemessung wird der Bemessungsansatz des EurOtop-Manuals EurOtop, 2007 verwendet. Die Gleichungen (4.12) und (4.13) beschreiben die allgemeinen empirischen Formeln zur Bestimmung der Wellenaufauhöhe.

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = c_1 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_{m-1,0} \quad \text{für } \xi_{m-1,0} \leq 1,8 \quad (4.12)$$

mit einem Maximum von

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = \gamma_f \cdot \gamma_\beta \left( c_2 - \frac{c_3}{\sqrt{\xi_{m-1,0}}} \right) \quad \text{für } \xi_{m-1,0} \leq 1,8 \quad (4.13)$$

mit:

$R_{u2\%}$	= Wellenaufauhöhe, die von 2 % aller Wellenaufäufe überschritten wird	[m]
$H_{m0}$	= Signifikante Wellenhöhe aus Frequenzbereich am Bauwerkfuß	[m]
$c_1, c_2, c_3$	= Empirische Koeffizienten	[-]
$\gamma_b$	= Empirischer Beiwert für den Einfluss einer Berme oder Böschungsknick	[-]
$\gamma_f$	= Empirischer Beiwert für den Einfluss der Böschungsrauheit	[-]
$\gamma_\beta$	= Empirischer Beiwert für den Einfluss der Wellenangriffsrichtung	[-]
$\xi_{m-1,0}$	= Brecherkennzahl	[-]

Das EurOtop-Manual unterscheidet für die Festlegung der empirischen Koeffizienten  $c_1$ ,  $c_2$  und  $c_3$  zwischen den Zielen der Bemessung. Werte für die empirischen Koeffizienten sind für deterministische und probabilistische Bemessungsansätze vorhanden. In Tabelle 4 sind die Werte für die empirischen Koeffizienten angegeben.

Tabelle 4: Empirische Koeffizienten für die Wellenaufauhöhe (EurOtop, 2007)

Empirischen Koeffizienten	Deterministische Bemessung	Probabilistische Bemessung
$C_1$	1,75	1,65
$C_2$	4,3	4,0
$C_3$	1,6	1,5

Bei der Bemessung von Küstenschutzbauwerken werden auf Grund von Sicherheitsaspekten die deterministischen Werte verwendet EurOtop, 2007.

Aus den Gleichungen (4.14) und (4.15) sowie den Werten aus Tabelle 4 ergeben sich zur Bestimmung der Wellenauflaufhöhe  $R_{u2\%}$  für geböschte Küstenschutzbauwerke folgende Gleichungen:

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1,75 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_{m-1,0} \quad \text{für } \xi_{m-1,0} \leq 1,8 \quad (4.14)$$

mit einem Maximum von

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1,00 \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \left( 4,3 - \frac{1,6}{\sqrt{\xi_{m-1,0}}} \right) \quad \text{für } \xi_{m-1,0} \leq 1,8 \quad (4.15)$$

Für Brecherkennzahlen größer 10 besitzt der empirische Beiwert für den Einfluss der Böschungsrauheit  $\gamma_f$  den Wert 1. Liegt der Wert der Brecherkennzahl zwischen 1,8 und 10 wird der Beiwert für die Böschungsrauheit linear interpoliert und mit der Gleichung (4.16) bestimmt.

$$\gamma_f' = \gamma_f + \frac{(\xi_{m-1,0} - 1,8) \cdot (1 - \gamma_f)}{8,2} \quad \text{für } 1,8 \leq \xi_{m-1,0} \leq 10 \quad (4.16)$$

## 6.4 Bemessungsgrundlagen für die Deckwerksdicke

Für die Bemessung der Deckwerksdicken von geböschten Küstenschutzbauwerken existieren sowohl empirische wie auch theoretisch hergeleitete Bemessungsansätze. Die Bemessungsgrundlagen für geschüttete Wasserbausteine und Betonformsteine entstammen aus hydraulischen Modellversuchen. Im Gegensatz dazu beruhen die Bemessungsgrundlagen für Deckwerke aus Mastix-Schotter oder Elastocoast auf physikalisch-mathematischen Annahmen.

### 6.4.1 Bemessungsgrundlagen für geschüttete Wasserbausteine

Der Bemessungsansatz für geschüttete Wasserbausteine beruht auf der Grundlage von umfangreichen Untersuchungen. Diese Untersuchungen wurden mit regelmäßigen Wellen in kleinmaßstäblichen hydraulischen Modellen durchgeführt. Der unter dem Namen HUDSON-Formel bekannte Bemessungsansatz lautet nach Oumeraci, 2001:

$$W = \frac{\rho_{WBS} \cdot g \cdot H_{Bem}^3}{k_D \cdot \left( \frac{\rho_{WBS}}{\rho_w} - 1 \right)^3 \cdot \cot \alpha} \quad (4.17)$$

mit:

$W$	= Blockgewicht	[kN]
$H_{Bem}$	= Bemessungswellenhöhe mit $H_{Bem} = H_s = H_{1/3} = H_{m0}$	[m]
$\rho_{WBS}$	= Dichte des Wasserbausteines	[t/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	= Dichte des Wassers	[t/m <sup>3</sup> ]
$g$	= Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$\alpha$	= Neigung der Böschung	[°]
$k_D$	= Form- und Standsicherheitsbeiwert	[-]

Die HUDSON-Formel berücksichtigt die Böschungsneigung, die Bemessungswellenhöhe, die Dichte der geschütteten Wasserbausteine und die umgebende Flüssigkeit. Der Form- und Standsicherheitsbeiwert  $k_D$  bewertet die Form der Deckschichtsteine (glatt oder scharfkantig), den Grad der Verzahnung der Wasserbausteine untereinander sowie die Form der angreifenden Welle (brechend oder nichtbrechend).

Für die Bemessung von Deckwerken im Küstenschutz wird der  $k_D$ -Wert zwischen brechenden und nicht brechenden Wellen sowie zwischen der Form der Wasserbausteine unterschieden. In der Tabelle 5 werden die jeweiligen  $k_D$ -Werte für zwei Lagen von Wasserbausteinen angegeben.

Tabelle 5:  $k_D$ -Werte für zwei Lagen von WBS in der Deckschicht (Oumeraci, 2001)

Form der Wasserbausteine	Brechende Wellen $k_D$ [-]	Nichtbrechende Wellen $k_D$ [-]
Glatte, gerundete Wasserbausteine	1,2	2,4
Raue, scharfkantige Wasserbaustein	2,0	4,0

Bei der Anwendung von geschütteten Wasserbausteinen als Deckschichtmaterial wird eine geringe Verlagerung der Wasserbausteine zugelassen, ohne dass dieses als Schaden bezeichnet wird. Bis zu 5 % der Wasserbausteine dürfen sich verlagern bevor die Verlagerung als Schaden bezeichnet wird. Die 5 prozentige Verlagerung ist bereits in den  $k_D$ -Werten aus Tabelle 5 berücksichtigt.

In der Ausgangsformel (4.17) ist der Parameter  $W$ =Blockgewicht [kN] angegeben. Bei geschüttete und gebrochenen Wasserbausteinen gilt:

$$W = W_{50} \quad (4.18)$$

mit:

$W$	= Blockgewicht	[kN]
$W_{50}$	= Gewicht eines Steines mittleren Durchmessers	[kN]

Der mittlere Durchmesser  $D_{50}$  des Wasserbausteines wird mit der folgenden Gleichung ermittelt:

$$D_{50} = \left( \frac{W_{50}}{\rho_{\text{WBS}} \cdot g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.19)$$

mit:

$D_{50}$	= Mittlere Durchmesser eines Wasserbausteines	[m]
$W_{50}$	= Gewicht eines Wasserbausteines mittleren Durchmessers	[kN]
$\rho_{\text{WBS}}$	= Dichte des Wasserbausteines	[t/m <sup>3</sup> ]
$g$	= Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]

Für die Bemessung der Dicke der Deckschicht  $t_{\text{Deckschicht}}$  wird neben dem mittleren Durchmesser des Wasserbausteines auch die Anzahl der Lagen sowie ein Lagenkoeffizient benötigt. Die Gleichung (4.20) stellt die Bemessungsformel für die Bestimmung der Deckschichtdicke dar.

$$t_{\text{Deckschicht}} = n \cdot k_{\Delta} \cdot D_{50} \quad (4.20)$$

mit:

$t_{\text{Deckschicht}}$	= Dicke der Deckschicht	[m]
$n$	= Anzahl der Lagen der Wasserbausteine	[-]
$k_{\Delta}$	= Lagenkoeffizient	[-]
$D_{50}$	= Mittler Durchmesser eines Wasserbausteines	[m]

Die Anzahl der benötigten Wasserbausteine pro Quadratmeter auf einer Böschungsfläche wird über die folgende Formel bestimmt:

$$N = A \cdot n \cdot k_{\Delta} \cdot (1 - P) \cdot \left( \frac{W_{50}}{\rho_{\text{WBS}} \cdot g} \right)^{-2/3} \quad (4.21)$$

mit:

$N$	= Anzahl der Wasserbausteine	[-]
$A$	= Böschungsfläche	[m <sup>2</sup> ]
$k_{\Delta}$	= Lagenkoeffizient	[-]
$P$	= Porosität der Deckschicht	[%]
$W_{50}$	= Gewicht eines Wasserbausteines mittleren Durchmessers	[kN]
$\rho_{\text{WBS}}$	= Dichte des Wasserbausteines	[t/m <sup>3</sup> ]
$g$	= Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]

Die benötigte Filterschicht für die Deckwerkskonstruktion wird in Abhängigkeit der Deckschicht bestimmt. Bei der Bemessung der Filterschicht gilt:

$$W_{50, \text{Filterschicht}} \approx W_{50, \text{Deckschicht}} \cdot (0,05 - 0,2) \quad (4.22)$$

Die Schichtdicke der Filterschicht  $t_{\text{Filterschicht}}$  wird mit Hilfe des mittleren Durchmessers eines Wasserbausteins  $D_{50, \text{Filterschicht}}$  berechnet und lautet:

$$t_{\text{Filterschicht}} \approx 3 \cdot \left( \frac{W_{50, \text{Filterschicht}}}{\rho_{\text{WBS}} \cdot g} \right)^{1/3} \quad (4.23)$$

Bei der Bemessung nach der HUDSON-Formel ist zu beachten, dass die Ausgangsgleichung (4.17) den empirischen Form- und Standsicherheitsbeiwert  $k_D$  enthält und dieser die Größe des Wasserbausteines maßgeblich beeinflusst. Die optimale Bemessung des Deckwerkes kann nicht nach der strikten Anwendung und Ausführungen der in diesem Abschnitt angegebenen Formeln und Gleichung gemacht werden. Daher haben Erfahrungswerte des planenden Ingenieurs einen sehr großen Anteil an der optimalen Dimensionierung der Wasserbausteingröße und endgültigen Deckwerksdicke (EAK, 2002).

#### 6.4.2 Bemessungsgrundlagen für gesetzte Betonformsteine

In der EAK, 1993 sind nur grobe Richtwerte für die Bemessung von Betonformsteinen angegeben. In der Abhängigkeit der äußeren Belastung durch Wellen und Strömungen werden die Beanspruchungen in leichte, mittlere und schwere Beanspruchung unterschieden. Leichte Beanspruchungen haben eine Flächenlast von 3 bis 4 kN/m<sup>2</sup>, mittlere Beanspruchungen 4 bis 6 kN/m<sup>2</sup> und schwere Beanspruchungen 6 bis mehr als 10 kN/m<sup>2</sup>. Die Deckschichtdicken infolge der Beanspruchungen betragen nach EAK, 1993 12 bis 40 cm.

Die Deckwerkskonstruktionen an der offenen See sollten auf Grund der starken Wellenbelastung möglichst flach geböscht sein, damit keine Druckschläge das Deckwerk belasten (EAK, 1993).

Genauere Bemessungsgrundlagen für die Bestimmung der Deckschichtdicke von Betonformsteinen sind in CUR/TAW, 1995 angegeben. In dieser Diplomarbeit wird das Verfahren für die Vorbemessung der Deckschichtdicke verwendet. Das analytische Bemessungsverfahren nach CUR/TAW, 1995 ist auf Grund fehlender Parameter und Randbedingungen nicht möglich. Die Vorbemessung für die Deckschichtdicke nach CUR/TAW, 1995 beruhen auf:

- Modelluntersuchungen
- Überprüfung mit dem analytische Bemessungsverfahren
- Bemessung mit der Software STEENZET/1+

Die Methode für die Vorbemessung gibt das Verhältnis der Wellenbrecherkennzahl  $\xi_{0p}$  zu  $H_s/(\Delta \cdot t_{\text{Deckschicht}})$  an.  $H_s$  ist die signifikante Wellenhöhe und  $\Delta \cdot t_{\text{Deckschicht}}$  ist die effektive Dicke der Deckschicht. Die Wellenbrecherkennzahl  $\xi_{0p}$  wird mit der Tiefwasserwellenlänge der Peakperiode  $T_p$  ermittelt. Für die relative Dichte  $\Delta$  gilt:

$$\Delta = \left( \frac{\rho_{\text{BFS}}}{\rho_w} - 1 \right) \quad (4.24)$$

mit:

$\Delta$	= Relative Dichte	[-]
$\rho_{\text{BFS}}$	= Dichte des Betonformsteins	[t/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	= Dichte des Wassers	[t/m <sup>3</sup> ]

Für die Vorbemessung gibt es insgesamt 6 verschiedene Bemessungsdiagramme. Die Bemessungsdiagramme unterscheiden sich durch den Deckwerksaufbau. Folgende Deckwerkskonstruktionen können Vorbemessen werden:

- Unverbundene Blöcke mit einer geotextilen Filterschicht auf Sand
- Unverbundene Blöcke mit oder ohne einer geotextilen Filterschicht auf Klei
- Unverbundene Blöcke mit einer ungebunden Kornfilterschicht
- Verzahnte Blöcke mit einer geotextilen Filterschicht auf Sand
- Verzahnte Blöcke mit oder ohne einer geotextilen Filterschicht auf Klei
- Verzahnte Blöcke mit einer ungebunden Kornfilterschicht

Das in der Abbildung 18 gezeigte Bemessungsdiagramm gilt für verzahnte Betonformsteine auf einer Filterschicht aus Geotextil auf einen sandigen Bauwerkskern. Die gestrichelte Linie gibt Werte für bereits bestehende Deckwerkskonstruktionen an und dient hauptsächlich zur Überprüfung der Lagesicherheit bereits realisierter Deckwerke. Die durchgezogene Linie dient als Bemessungsgrundlage für neu zu verwirklichende Deckschichten aus Betonformsteinen.

Das Bemessungsdiagramm teilt sich insgesamt in drei Bereiche. Unterhalb der durchgezogenen Linie gilt die Deckschicht als stabil. Damit droht kein Herauslösen einzelner Betonformsteine aus dem Verbund. Im Bereich zwischen der durchgezogenen und gestrichelten Linie gilt die Lagestabilität der Deckschicht als zweifelhaft. Über der gestrichelten Linie ist die Lagestabilität der Deckwerkskonstruktion nicht mehr gegeben.

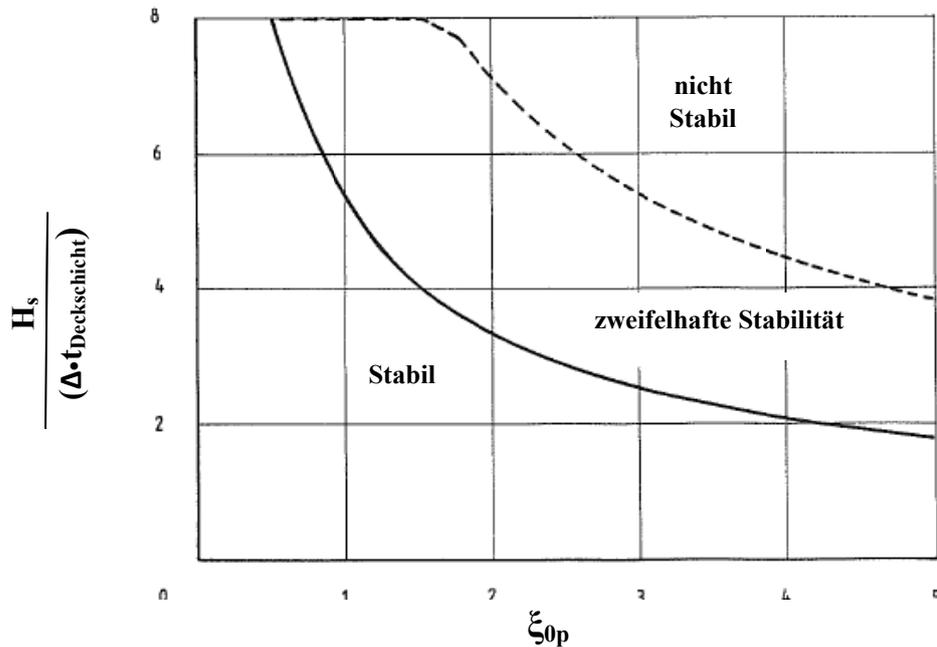


Abbildung 18: Bemessungsdiagramm für Verzahnte Blöcke mit einer geotextilen Filterschicht auf Sand

### 6.4.3 Bemessungsgrundlagen für Elastocast und Mastix-Schotter

Bei Deckschichten aus Mastix-Schotter und Elastocast wird die Annahme getroffen, dass die Deckschichten die Eigenschaften einer statischen Platte haben (TAW, 1985).

Abbildung 19 stellt eine schematische Darstellung einer Deckwerksplatte dar, die durch einen Druckschlag belastet wird. Der Druckschlag ist in der Länge sehr viel größer als in der Breite. Daher wird die Belastung als Linienlast angenommen. In der idealisierten Darstellung wird die viskoelastische Untergrundreaktion durch eine Feder und eine Dämpfung beschrieben. Auf die Masse des Untergrundes wird die Masse der Deckwerksplatte addiert.

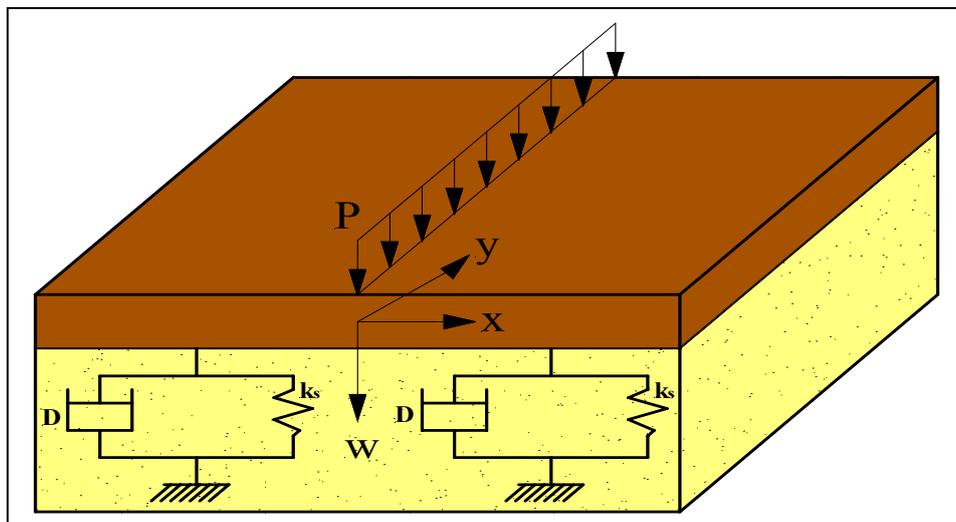


Abbildung 19: Idealisierte Darstellung eines Druckschlages auf eine Deckwerksplatte

Die Durchbiegung der Deckwerksplatte in Folge der Linienlast  $P$  [N/lfd. m] wird mit der Gleichung (4.25) beschrieben.

$$K \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + M \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + D \frac{\partial w}{\partial t} + k_s w = 0 \quad (4.25)$$

mit:

$K$	= Biegesteifigkeit der Platte	[Nm]
$M$	= Masse der Deckwerksplatte inklusive der Masse des Untergrundes	[kg/m <sup>2</sup> ]
$D$	= Dämpfungskoeffizient des Untergrundes	[Ns/m <sup>3</sup> ]
$w$	= Durchbiegung der Deckwerksplatte	[m]
$t$	= Zeit	[s]
$x$	= Horizontale Achse	[m]
$k_s$	= Bettungsmodul	[N/m <sup>3</sup> ]

Für die Biegesteifigkeit der Deckwerksplatte gilt:

$$K = \frac{E \cdot t_{\text{Deckschicht}}^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (4.26)$$

mit:

$K$	= Biegesteifigkeit der Platte	[Nm]
$E$	= Elastizitätsmodul	[N/m <sup>2</sup> ]
$t_{\text{Deckschicht}}$	= Dicke der Deckschicht	[m]
$\nu$	= Querdehnzahl	[-]

Mit Hilfe der Laplace-Transformation folgt nach TAW, 1985, dass die Dicke der Deckwerksplatte mit der Gleichung (4.27) ermittelt werden kann.

$$t_{\text{Deckschicht}} = 0,75 \cdot \sqrt[5]{\frac{27}{16} \cdot \frac{1}{(1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{P}{\sigma_b}\right)^4 \cdot \left(\frac{S_m}{k_s}\right)} \quad (4.27)$$

mit:

$t_{\text{Deckschicht}}$	= Dicke der Deckschicht	[m]
$\nu$	= Querdehnzahl	[-]
$P$	= Linienlast (Druckschlag)	[N/lfd. m]
$\sigma_b$	= Maximale Biegespannung beim Bruch	[N/m <sup>2</sup> ]
$S_m$	= Steifigkeitsmodul	[N/m <sup>2</sup> ]
$k_s$	= Bettungsmodul	[N/m <sup>3</sup> ]

Die Bestimmung der Deckschichtdicke  $t_{\text{Deckschicht}}$  mit der Gleichung (4.27) ist für Deckwerkskonstruktionen aus Mastix-Schotter und Elastocoast gleich. Allerdings unterscheidet sich die Ermittlung der maximalen Biegespannung  $\sigma_b$  für die beiden Deckwerksausführungen.

Bei Mastix-Schotter tritt das Versagen der Deckschicht in Folge von der Ermüdung des Asphalts auf. Für Deckschichten aus Elastocoast ist der momentane Stand der Forschung, dass die Deckschicht nicht durch Ermüdung des Materials betroffen ist (Bijlsma & Voortman, 2009).

Die Ermittlung der maximalen Biegespannung bei Mastix-Schotter-Deckwerken erfolgt in Abhängigkeit der Lastspielzyklen  $n_s$  die auf die Deckschicht treffen. Die Gleichung (4.28) wurde in den Niederlanden entwickelt, sie kann aber ebenfalls in Deutschland benutzt werden.

$$n_s = 0,375 \cdot \frac{t_s}{3,94 \cdot H_s^{0,376}} \quad (4.28)$$

mit:

$n_s$	= Anzahl der Lastspielzyklen	[-]
$t_s$	= Sturmdauer	[s]
$H_s$	= Signifikante Wellenhöhe	[m]

Für die Elastocoast-Deckschichten wird die maximale Biegespannung in Folge großer Druckeinwirkungen durch Druckschläge erreicht. Gu, 2007 hat bei Untersuchungen Werte für die maximale Biegespannung von Elastocoast bestimmt.

Nach Schönian, 1999 kann die Deckschichtdicke von Mastix-Schotter nach folgender Daumenregel überschlagen werden:

$$t_{\text{Deckschicht}} = a \cdot H_s \quad (4.29)$$

mit:

$t_{\text{Deckschicht}}$	= Dicke der Deckschicht	[m]
$a$	= Koeffizient	[-]
$H_s$	= Signifikante Wellenhöhe	[m]

Die Erfahrungen, welche durch bereits realisierte Mastix-Schotter-Deckwerke gemacht worden sind, ergeben für den Koeffizient  $a$  zwei verschiedene Werte. Wird die Mastix-Schotter-Deckschicht auf einen geotextilen oder ungebunden Filter aufgebracht, so beträgt  $a=1/6$ . Falls der Mastix-Schotter auf Bitumensand eingebaut wird beträgt  $a=1/10$ .

## 7 Bemessung für ausgewählte Deckwerke

In Kapitel 7 werden auf Basis der in Kapitel 6 vorgestellten Bemessungsgrundlagen die ausgewählten Deckwerkskonstruktionen unter den gleichen hydraulischen und morphologischen Randbedingung bemessen und das Bauwerk dimensioniert.

### 7.1 Bemessung der Wellenaufbauhöhe und der Bauwerksgeometrie

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der durchgeführten Bemessung der Wellenaufbauhöhe nach dem EurOtop-Manual und der daraus folgenden Abmessungen für das geböschte Küstenschutzbauwerk dargestellt. Der Kernpunkt der Bemessung ist die Ermittlung der Höhe des Bauwerks  $h_{\text{Bauwerk}}$  sowie die Länge des Deckwerkes  $L_{\text{Deckwerk}}$  (siehe Abbildung 20)

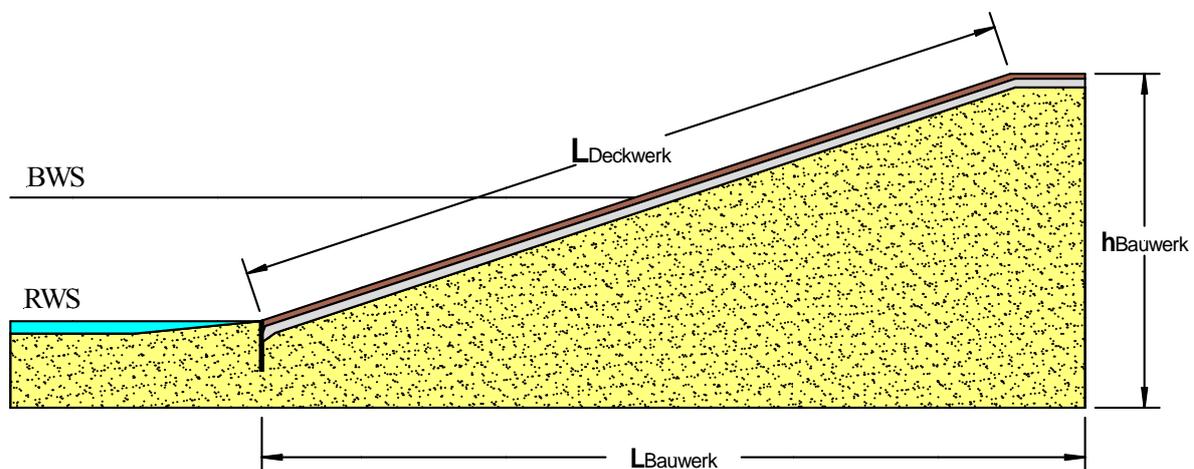


Abbildung 20: Küstenschutzbauwerk und Bemaßung

Die Sollhöhe des Bauwerks ergibt sich durch die Addition des Bemessungswasserstandes und der Wellenaufbauhöhe. Die Höhe des Bemessungswasserstandes ist dem Abschnitt 5.4 entnommen. Die Berechnung der Wellenaufbauhöhe erfolgt nach dem in Abschnitt 6.3 vorgestellten Bemessungsgrundlagen.

Folgende Annahmen wurden für die Bemessung der Wellenaufbauhöhe getroffen:

- Die empirischen Beiwerte für den Einfluss der Wellenangriffsrichtung  $\gamma_\beta$  sowie einer Berme  $\gamma_b$  haben den Wert 1 und beeinflussen die Wellenaufbauhöhe nicht,
- Für die empirischen Koeffizienten  $c_1, c_2$  und  $c_3$  gelten die Werte für eine deterministische Bemessung (siehe Tabelle 4),
- Der empirische Beiwert für den Einfluss der Böschungsrauheit  $\gamma_f$  für eine Deckschicht aus Wasserbausteinen hat den Wert 0,4 (Bruce et al., 2008),
- Der empirische Beiwert für den Einfluss der Böschungsrauheit  $\gamma_f$  für eine Deckschicht aus Betonformsteine hat den Wert 1,0 (TAW, 2002),
- Der empirische Beiwert für den Einfluss der Böschungsrauheit  $\gamma_f$  für eine Deckschicht aus Mastix-Schotter hat den Wert 0,9 (TAW, 2002),

- Der empirische Beiwert für den Einfluss der Böschungsrauheit  $\gamma_f$  für eine Deckschicht aus Elastocoast hat den Wert 0,55 (Oumeraci et al., 2009c).

Für die Berechnung der Wellenaufbauhöhe wurde für die Küstenabschnitte Borkum, Baltrum und Norderney und den dazugehörigen Seegangparameter die Wellenbrecherkennzahl  $\xi_{m-1,0}$  mit den Gleichungen (4.2) und (4.3) bestimmt.

Die verschiedenen empirischen Beiwerte für den Einfluss der Böschungsrauheit  $\gamma_f$  besitzen nur Gültigkeit bis zu Wellenbrechkennzahlen kleiner 1,8. Ist die Wellenbrecherkennzahl größer als 1,8 müssen die Beiwerte mit der Gleichung (4.16) neu errechnet werden. Die neu bestimmten Beiwert  $\gamma'_f$  für Wellenbrecherkennzahlen größer 1,8 sind in den Anlagen A angegeben.

Ab einer Böschungsneigung von 1:6 muss der Beiwert  $\gamma'_f$  nicht bestimmt werden, da die Wellenbrecherkennzahlen für die gegebenen Seegangparameter kleiner als 1,8 sind. Ebenfalls muss für Betonformsteine kein neuer Beiwert bestimmt werden, weil der Beiwert  $\gamma_f$  von Betonformsteinen den Wert 1 hat.

Die Wellenaufbauhöhe  $R_{u2\%}$  wird mit der Gleichung (4.12) und die maximale Aufbauhöhe  $R_{u2\%,\max}$  mit der Gleichung (4.13) bestimmt. Die benutzte Wellenaufbauhöhe  $R'_{u2\%}$  ergibt sich aus  $\max\{R_{u2\%}; R_{u2\%,\max}\}$ . Die berechneten Werte für  $R_{u2\%}$ ,  $R_{u2\%,\max}$  sowie  $R'_{u2\%}$  sind in den Anlagen A in Tabellenform hinterlegt.

Mit den ermittelten Werten für die Wellenaufbauhöhe  $R'_{u2\%}$  und den Bemessungswasserstand wird die Sollhöhe des Bauwerkes  $h_{\text{Bauwerk}}$  errechnet. Aus Sollhöhe und Böschungsneigung des Küstenschutzbauwerkes werden die Länge des Bauwerkes  $L_{\text{Bauwerk}}$  und die Länge des Deckwerkes  $L_{\text{Deckwerk}}$  bestimmt.

Die Tabelle 6 bis Tabelle 17 enthalten ermittelte Werte für die Wellenaufbauhöhe  $R'_{u2\%}$ , die Sollhöhe des Bauwerkes  $h_{\text{Bauwerk}}$ , die Länge des Bauwerkes  $L_{\text{Bauwerk}}$  sowie die Länge des Deckwerkes  $L_{\text{Deckwerk}}$ .

Die Werte für eine Deckschicht aus geschütteten Wasserbausteinen sind in der Tabelle 6, Tabelle 7 sowie Tabelle 8 enthalten. Tabelle 9, Tabelle 10 und Tabelle 11 zeigen die Bemessungsergebnisse für gesetzte Betonformsteine. Die Bauwerksgeometrie für ein Deckwerk mit Mastix-Schotter-Deckschicht ist in Tabelle 12, Tabelle 13 und Tabelle 14 angegeben. Für das Deckwerksystem Elastocoast sind die Ergebnisse der Dimensionierung für das Bauwerk in Tabelle 15, Tabelle 16 und Tabelle 17 tabelliert.

Tabelle 6:  $L_{\text{Deckwerk}}$  und  $h_{\text{Bauwerk}}$  eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	BWS [m]	$R'_{u2\%}$ [m]	$h_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Deckwerk}}$ [m]
Borkum	2,91	5,18	3,48	8,66	25,98	27,39
Baltrum	1,37	5,10	2,06	7,16	21,49	22,65
Baltrum	2,36	5,10	3,47	8,57	25,70	27,09
Norderney	3,14	5,00	4,17	9,17	27,52	29,01
Norderney	1,86	5,00	2,19	7,19	21,56	22,73

 Tabelle 7:  $L_{\text{Deckwerk}}$  und  $h_{\text{Bauwerk}}$  eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	BWS [m]	$R'_{u2\%}$ [m]	$h_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Deckwerk}}$ [m]
Borkum	2,91	5,18	2,61	7,79	31,16	32,12
Baltrum	1,37	5,10	1,76	6,86	27,46	28,30
Baltrum	2,36	5,10	2,97	8,07	32,27	33,26
Norderney	3,14	5,00	3,37	8,37	33,48	34,51
Norderney	1,86	5,00	1,64	6,64	26,56	27,38

 Tabelle 8:  $L_{\text{Deckwerk}}$  und  $h_{\text{Bauwerk}}$  eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	BWS [m]	$R'_{u2\%}$ [m]	$h_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Deckwerk}}$ [m]
Borkum	2,91	5,18	1,74	6,92	41,52	42,10
Baltrum	1,37	5,10	1,23	6,33	37,99	38,52
Baltrum	2,36	5,10	2,03	7,13	42,76	43,35
Norderney	3,14	5,00	2,25	7,25	43,48	44,08
Norderney	1,86	5,00	1,09	6,09	36,56	37,07

Tabelle 9:  $L_{\text{Deckwerk}}$  und  $h_{\text{Bauwerk}}$  eines Deckwerks aus gesetzten BFS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	BWS [m]	$R'_{u2\%}$ [m]	$h_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Deckwerk}}$ [m]
Borkum	2,91	5,18	8,70	13,88	41,65	43,90
Baltrum	1,37	5,10	4,52	9,62	28,87	30,43
Baltrum	2,36	5,10	7,74	12,84	38,51	40,60
Norderney	3,14	5,00	9,99	14,99	44,97	47,40
Norderney	1,86	5,00	5,47	10,47	31,40	33,10

 Tabelle 10:  $L_{\text{Deckwerk}}$  und  $h_{\text{Bauwerk}}$  eines Deckwerks aus gesetzten BFS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	BWS [m]	$R'_{u2\%}$ [m]	$h_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Deckwerk}}$ [m]
Borkum	2,91	5,18	6,53	11,71	46,83	48,27
Baltrum	1,37	5,10	4,31	9,41	37,65	38,81
Baltrum	2,36	5,10	7,36	12,46	49,86	51,39
Norderney	3,14	5,00	8,43	13,43	53,71	55,36
Norderney	1,86	5,00	4,10	9,10	36,40	37,52

 Tabelle 11:  $L_{\text{Deckwerk}}$  und  $h_{\text{Bauwerk}}$  eines Deckwerks aus gesetzten BFS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	BWS [m]	$R'_{u2\%}$ [m]	$h_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Deckwerk}}$ [m]
Borkum	2,91	5,18	4,35	9,53	57,19	57,98
Baltrum	1,37	5,10	3,08	8,18	49,08	49,76
Baltrum	2,36	5,10	5,07	10,17	61,00	61,84
Norderney	3,14	5,00	5,62	10,62	63,71	64,59
Norderney	1,86	5,00	2,73	7,73	46,40	47,04

Tabelle 12:  $L_{\text{Deckwerk}}$  und  $h_{\text{Bauwerk}}$  eines Deckwerkes aus MS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	BWS [m]	$R'_{u2\%}$ [m]	$h_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Deckwerk}}$ [m]
Borkum	2,91	5,18	7,83	13,01	39,04	41,15
Baltrum	1,37	5,10	4,11	9,21	27,64	29,14
Baltrum	2,36	5,10	7,03	12,13	36,38	38,34
Norderney	3,14	5,00	9,02	14,02	42,06	44,33
Norderney	1,86	5,00	4,92	9,92	29,76	31,37

 Tabelle 13:  $L_{\text{Deckwerk}}$  und  $h_{\text{Bauwerk}}$  eines Deckwerkes aus MS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	BWS [m]	$R'_{u2\%}$ [m]	$h_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Deckwerk}}$ [m]
Borkum	2,91	5,18	5,88	11,06	44,22	45,58
Baltrum	1,37	5,10	3,89	8,99	35,95	37,06
Baltrum	2,36	5,10	6,63	11,73	46,93	48,37
Norderney	3,14	5,00	7,58	12,58	50,34	51,89
Norderney	1,86	5,00	3,69	8,69	34,76	35,83

 Tabelle 14:  $L_{\text{Deckwerk}}$  und  $h_{\text{Bauwerk}}$  eines Deckwerkes aus MS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	BWS [m]	$R'_{u2\%}$ [m]	$h_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Deckwerk}}$ [m]
Borkum	2,91	5,18	3,92	9,10	54,58	55,33
Baltrum	1,37	5,10	2,77	7,87	47,23	47,88
Baltrum	2,36	5,10	4,56	9,66	57,96	58,76
Norderney	3,14	5,00	5,06	10,06	60,34	61,17
Norderney	1,86	5,00	2,46	7,46	44,76	45,38

Tabelle 15:  $L_{\text{Deckwerk}}$  und  $h_{\text{Bauwerk}}$  eines Deckwerkes aus EC (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	BWS [m]	$R'_{u2\%}$ [m]	$h_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Deckwerk}}$ [m]
Borkum	2,91	5,18	4,79	9,97	29,90	31,52
Baltrum	1,37	5,10	2,68	7,78	23,34	24,60
Baltrum	2,36	5,10	4,53	9,63	28,90	30,46
Norderney	3,14	5,00	5,63	10,63	31,88	33,61
Norderney	1,86	5,00	3,01	8,01	24,02	25,32

 Tabelle 16:  $L_{\text{Deckwerk}}$  und  $h_{\text{Bauwerk}}$  eines Deckwerkes aus EC (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	BWS [m]	$R'_{u2\%}$ [m]	$h_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Deckwerk}}$ [m]
Borkum	2,91	5,18	3,59	8,77	35,08	36,16
Baltrum	1,37	5,10	2,40	7,50	30,01	30,93
Baltrum	2,36	5,10	4,07	9,17	36,67	37,80
Norderney	3,14	5,00	4,64	9,64	38,54	39,73
Norderney	1,86	5,00	2,26	7,26	29,02	29,91

 Tabelle 17:  $L_{\text{Deckwerk}}$  und  $h_{\text{Bauwerk}}$  eines Deckwerkes aus EC (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	BWS [m]	$R'_{u2\%}$ [m]	$h_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Bauwerk}}$ [m]	$L_{\text{Deckwerk}}$ [m]
Borkum	2,91	5,18	2,39	7,57	45,44	46,07
Baltrum	1,37	5,10	1,69	6,79	40,76	41,33
Baltrum	2,36	5,10	2,79	7,89	47,32	47,97
Norderney	3,14	5,00	3,09	8,09	48,54	49,21
Norderney	1,86	5,00	1,50	6,50	39,02	39,56

## 7.2 Bemessung der Deckwerksdicke für geschütteten Wasserbausteinen

Die Bemessung der Deckwerksdicke für eine Deckwerkskonstruktion aus geschütteten Wasserbausteinen beruht auf den Bemessungsansätzen aus Abschnitt 6.4.1.

Für die Dimensionierung der Deckwerksdicken mit den Gleichungen (4.17) bis (4.23) gelten folgende Annahmen:

- Die Bemessungswellenhöhe  $H_{Bem} = H_s = H_{m0}$  (EAK, 2002),
- Die Wasserbausteine haben eine Rohdichte  $\rho_{WBS}$  von  $2650 \text{ kg/m}^3$ ,
- Das Meerwasser hat eine Rohdichte  $\rho_w$  von  $1025 \text{ kg/m}^3$ ,
- Der Form- und Sicherheitsbeiwert  $k_D$  hat den Wert 2,0 (Oumeraci, 2001),
- Der Lagenkoeffizient  $k_\Delta$  hat den Wert 1,15 (Oumeraci, 2001),
- $W_{50, Filterschicht} = 0,2 * W_{50, Deckschicht}$ .

Die Lagestabilität für Deckwerkskonstruktion aus geschütteten Wasserbausteinen erfolgt über das Eigengewicht des einzelnen Wasserbausteins (vgl. Abschnitt 3.2). Im Anhang B sind die berechneten Werte für die erforderlichen Eigengewichte der Deck- beziehungsweise Filterschichten für eine stabile Lage der Deckwerkskonstruktion angegeben.

Mit den Bemessungsergebnissen für den mittleren Durchmesser eines Wasserbausteines wird die Dicke der Deck- und Filterschicht ermittelt (siehe Tabelle 18, Tabelle 19 sowie Tabelle 20).

Tabelle 18: Deckwerksdicke eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$t_{Deckschicht}$ [m]	$t_{Filterschicht}$ [m]	$t_{Deckwerk}$ [m]
Borkum	2,91	2,32	1,12	3,44
Baltrum	1,37	1,09	0,53	1,62
Baltrum	2,36	1,88	0,91	2,79
Norderney	3,14	2,51	1,20	3,71
Norderney	1,86	1,49	0,71	2,20

Tabelle 19: Deckwerksdicke eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$t_{Deckschicht}$ [m]	$t_{Filterschicht}$ [m]	$t_{Deckwerk}$ [m]
Borkum	2,91	2,11	1,01	3,13
Baltrum	1,37	0,99	0,48	1,47
Baltrum	2,36	1,71	0,82	2,53
Norderney	3,14	2,28	1,09	3,37
Norderney	1,86	1,35	0,65	2,00

Tabelle 20: Deckwerksdicke eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$t_{\text{Deckschicht}}$ [m]	$t_{\text{Filterschicht}}$ [m]	$t_{\text{Deckwerk}}$ [m]
Borkum	2,91	1,84	0,89	2,73
Baltrum	1,37	0,87	0,42	1,29
Baltrum	2,36	1,50	0,72	2,21
Norderney	3,14	1,99	0,96	2,95
Norderney	1,86	1,18	0,57	1,75

### 7.3 Bemessung der Deckwerksdicke für Betonformsteine

Die Bemessung der Deckwerksdicke für gesetzte Betonformsteine erfolgt mit dem in Abschnitt 6.4.2 beschriebenen Bemessungsgrundlagen. Eine Bemessung für gesetzte Betonformsteine erfolgt nur für eine Böschungsneigung von 1:6 (EAK, 1993).

Folgende Annahmen werden für die Bemessung getroffen:

- Die Rohdichte  $\rho_{\text{BFS}}$  des Betons beträgt  $2300 \text{ kg/m}^3$  (Neumann et al., 2006)
- Die Rohdichte  $\rho_w$  des Meerwassers beträgt  $1025 \text{ kg/m}^3$

Für die Bestimmung der Deckwerksdicke mit dem in Abbildung 21 dargestellten Bemessungsdiagramm wird als erstes die Wellenbrecherkennzahl  $\xi_{0p}$  bestimmt. Dafür wird die Peakperiode  $T_p$  benötigt. Die Peakperiode  $T_p$  kann mit der Gleichung (3.4) aus der spektralen Wellenperiode  $T_{m-1,0}$  hergeleitet werden. In der Tabelle 21 sind die berechneten Werte der Wellenbrecherkennzahl  $\xi_{0p}$  angegeben.

 Tabelle 21: Wellenbrecherkennzahl  $\xi_{0p}$  für die Bemessung von BFS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_s$ [m]	$T_{m-1,0}$ [s]	$T_p$ [s]	$\pi$ [-]	$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	$L_{0p}$ [m]	$\xi_{0p}$ [-]
Borkum	2,91	7	7,70	3,14	9,81	92,57	0,94
Baltrum	1,37	7,22	7,94	3,14	9,81	98,48	1,41
Baltrum	2,36	9,05	9,96	3,14	9,81	154,73	1,35
Norderney	3,14	8,7	9,57	3,14	9,81	142,99	1,12
Norderney	1,86	5,5	6,05	3,14	9,81	57,15	0,92

Die Wellenbrecherkennzahl  $\xi_{0p}$  für Norderney ( $H_s=1,86\text{m}$ ) und Borkum sowie Baltrum ( $H_s=1,37$ ) und Baltrum ( $H_s=2,36$ ) haben fast identische Werte. Daher wird in dem Bemessungsdiagramm (siehe Abbildung 21) der Wert  $H_s/(\Delta \cdot t_{\text{Deckschicht}})$  nur drei Mal bestimmt. Die blau gestrichelte Linie gibt den Wert  $H_s/(\Delta \cdot t_{\text{Deckschicht}})$  für den Küstenabschnitt Borkum und Norderney ( $H_s=1,86\text{m}$ ) wieder. Mit der roten Linie wird das Verhältnis von  $H_s/(\Delta \cdot t_{\text{Deckschicht}})$



## 7.4 Bemessung der Deckwerksdicke für Mastix-Schotter

Bei der Bemessung der Deckwerksdicke für ein Mastix-Schotter-Deckwerk werden zwei wesentliche Deckwerkskonstruktionen unterschieden. Der Unterschied besteht in der Ausführung der Filterschicht. Für die erste Deckwerkskonstruktion wird die Mastix-Schotter-Deckschicht auf einem geotextilen Filter aufgebracht. Die zweite Ausführung besteht aus der Mastix-Schotter-Deckschicht und einer gebundenen Filterschicht. Die gebundene Kornfilterschicht besteht aus Bitumensand.

Für die Bemessung der Deckwerksdicke einer Deckschicht aus Mastix-Schotter mit der Gleichung (4.27) werden folgende Annahmen getroffen:

- Das Steifigkeitsmodul von Mastix-Schotter beträgt:  $S_m = 7 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$  (TAW, 1985).
- Die Querdehnzahl von Mastix-Schotter beträgt:  $\nu = 0,35$  (TAW, 1985).
- Das Bettungsmodul von verdichteten Sand beträgt:  $k_s = 10^8 \text{ N/m}^3$  (TAW, 1985).
- Das Bettungsmodul von Bitumensand beträgt:  $k_s = 5 \cdot 10^8 \text{ N/m}^3$  (TAW, 1985).

Die berechneten Ergebnisse für die Linienlast  $P$ , die auf das Deckwerk einwirkt, sind in der Anlage C hinterlegt.

Die Bestimmung der maximalen Biegespannung  $\sigma_b$ , bei dem ein Versagen der Deckwerkskonstruktion aus Mastix-Schotter eintritt, erfolgt in Abhängigkeit der Lastspielzykluszahl  $n_s$ . Die Lastspielzykluszahl wird mit der Gleichung (4.28) ermittelt. Für die Berechnung wurde eine Sturmdauer von 24 Stunden angenommen, wie sie bei einer schweren Sturmflut in der Nordsee vorkommen kann (Oumeraci, 2001). In der TAW, 1985 sind für verschiedene Lastzyklen die maximalen Biegespannungen angegeben. In der Anlage C sind die errechneten Werte für die maximale Biegespannung  $\sigma_b$  angegeben.

Aus den in diesem Abschnitt angenommenen und berechneten Werten ergeben sich für die Deckschichtdicken aus Mastix-Schotter die in der Tabelle 23 bis Tabelle 28 dargestellten Größen. Die Tabelle 23, Tabelle 24 und Tabelle 25 zeigen die Werte für die Deckschichtdicke, wenn die Mastix-Schotter-Deckschicht auf Bitumensand eingebaut wird. Tabelle 26, Tabelle 27 und Tabelle 28 stellen die Deckschichtdicke bei dem Einbau direkt auf dem geotextilen Filter dar.

Tabelle 23: Deckschichtdicke für ein Deckwerk aus MS auf Bitumensand (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\nu$ [-]	$P$ [N/m]	$\sigma_b$ [N/m <sup>2</sup> ]	$S_m$ [N/m <sup>2</sup> ]	$k_s$ [N/m <sup>3</sup> ]	$t_{\text{Deckschicht}}$ [m]
Borkum	2,91	0,35	91960,77	$3,85 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	0,28
Baltrum	1,37	0,35	20382,51	$3,67 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	0,09
Baltrum	2,36	0,35	60484,02	$3,80 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	0,20
Norderney	3,14	0,35	107072,00	$3,83 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	0,32
Norderney	1,86	0,35	37570,11	$3,75 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	0,14

Tabelle 24: Deckschichtdicke für ein Deckwerk aus MS auf Bitumensandfilter (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\nu$ [-]	$P$ [N/m]	$\sigma_b$ [N/m <sup>2</sup> ]	$S_m$ [N/m <sup>2</sup> ]	$k_s$ [N/m <sup>3</sup> ]	$t_{\text{Deckschicht}}$ [m]
Borkum	2,91	0,35	78336,95	$3,85 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	0,25
Baltrum	1,37	0,35	17362,88	$3,67 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	0,08
Baltrum	2,36	0,35	51523,42	$3,80 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	0,18
Norderney	3,14	0,35	91209,48	$3,83 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	0,28
Norderney	1,86	0,35	32004,17	$3,75 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	0,12

Tabelle 25: Deckschichtdicke für ein Deckwerk aus MS auf Bitumensandfilter (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\nu$ [-]	$P$ [N/m]	$\sigma_b$ [N/m <sup>2</sup> ]	$S_m$ [N/m <sup>2</sup> ]	$k_s$ [N/m <sup>3</sup> ]	$t_{\text{Deckschicht}}$ [m]
Borkum	2,91	0,35	68119,09	$3,85 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	0,22
Baltrum	1,37	0,35	15098,16	$3,67 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	0,07
Baltrum	2,36	0,35	44802,98	$3,80 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	0,16
Norderney	3,14	0,35	79312,59	$3,83 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	0,25
Norderney	1,86	0,35	27829,71	$3,75 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	0,11

Tabelle 26: Deckschichtdicke für ein Deckwerk aus MS auf geotextilen Filter (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\nu$ [-]	$P$ [N/m]	$\sigma_b$ [N/m <sup>2</sup> ]	$S_m$ [N/m <sup>2</sup> ]	$k_s$ [N/m <sup>3</sup> ]	$t_{\text{Deckschicht}}$ [m]
Borkum	2,91	0,35	91960,77	$3,85 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	0,40
Baltrum	1,37	0,35	20382,51	$3,67 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	0,12
Baltrum	2,36	0,35	60484,02	$3,80 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	0,29
Norderney	3,14	0,35	107072,00	$3,83 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	0,46
Norderney	1,86	0,35	37570,11	$3,75 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	0,20

Tabelle 27: Deckschichtdicke für ein Deckwerk aus MS auf geotextilen Filter (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\nu$ [-]	$P$ [N/m]	$\sigma_b$ [N/m <sup>2</sup> ]	$S_m$ [N/m <sup>2</sup> ]	$k_s$ [N/m <sup>3</sup> ]	$t_{\text{Deckschicht}}$ [m]
Borkum	2,91	0,35	78336,95	$3,85 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	0,35
Baltrum	1,37	0,35	17362,88	$3,67 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	0,11
Baltrum	2,36	0,35	51523,42	$3,80 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	0,26
Norderney	3,14	0,35	91209,48	$3,83 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	0,40
Norderney	1,86	0,35	32004,17	$3,75 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	0,18

Tabelle 28: Deckschichtdicke für ein Deckwerk aus MS auf geotextilen Filter (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\nu$ [-]	$P$ [N/m]	$\sigma_b$ [N/m <sup>2</sup> ]	$S_m$ [N/m <sup>2</sup> ]	$k_s$ [N/m <sup>3</sup> ]	$t_{\text{Deckschicht}}$ [m]
Borkum	2,91	0,35	68119,09	$3,85 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	0,32
Baltrum	1,37	0,35	15098,16	$3,67 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	0,10
Baltrum	2,36	0,35	44802,98	$3,80 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	0,23
Norderney	3,14	0,35	79312,59	$3,83 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	0,36
Norderney	1,86	0,35	27829,71	$3,75 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	0,16

## 7.5 Bemessung der Deckwerksdicke für Elastocoast

Momentan, Stand November 2009, existieren noch keine eigenständigen Bemessungsansätze für das innovative und neue Deckwerksystem Elastocoast. Die Bemessung erfolgt deshalb nach TAW, 1985 wie für Mastix-Schotter. Die Ähnlichkeit der Beiden Deckschichten erlaubt diesen Hilfsansatz.

Die Belastung durch Wellen wird durch die Linienlast  $P$  N/m ausgedrückt und die berechneten Werte für die Linienlast sind in der Anlage D angegeben.

Das Steifigkeitsmodul von Elastocoast wurde bis jetzt für eine Körnunggröße von 8/11 mm und 10/14 mm untersucht (Gu, 2007). Die Ergebnisse zeigen, dass das Steifigkeitsmodul von der Temperatur und der Körnunggröße abhängig ist. Aus Sicherheitsaspekten wurde für die hier durchgeführte Bemessung ein geringer Wert für das Steifigkeitsmodul angenommen. Das ausgewählte Steifigkeitsmodul beträgt  $1,6 \cdot 10^9$  N/m<sup>2</sup>.

Für das Bettungsmodul und der damit verbundenen Charakterisierung des anstehenden Untergrundes wurde der Wert auf  $10^8$  N/m<sup>3</sup> festgelegt. Dieser Wert entspricht einem gut verdichteten Sand mit einer Proctordichte von 95%. Eine Proctordichte von 95% für einen sandigen Untergrund wird erreicht, wenn der Sand langeweise eingebaut und dabei gleichzeitig verdicht wird.

Die maximale Biegespannung  $\sigma_b$  die eine Deckschicht aus Elastocoast aufnehmen kann ohne das es zu einem Versagen der Deckschicht kommt wird nach Bijlsma & Voortman, 2009 auf  $10^6$  N/m<sup>2</sup> festgesetzt.

Die Filterschicht unterhalb der Elastocoast-Deckschicht beträgt 0,15 m und gewährleistet damit die Stabilität des Untergrundes. In der Tabelle 29, Tabelle 30 und Tabelle 31 sind die mit der Gleichung (4.27) bestimmten Werte für die Dicke der Deckschicht  $t_{\text{Deckschicht}}$  dargestellt. Ebenso sind die Dicken der Deckwerkskonstruktion  $t_{\text{Deckwerk}}$  angegeben.

Tabelle 29: Deckwerksdicke eines Deckwerks aus EC (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$P$ [N/m]	$\sigma_b$ [N/m <sup>2</sup> ]	$S_m$ [N/m <sup>2</sup> ]	$k_s$ [N/m <sup>3</sup> ]	$t_{\text{Filterschicht}}$ [m]	$t_{\text{Deckschicht}}$ [m]	$t_{\text{Deckwerk}}$ [m]
Borkum	2,91	91960,77	$10^6$	$1,6 \cdot 10^9$	$10^8$	0,15	0,24	0,39
Baltrum	1,37	20382,51	$10^6$	$1,6 \cdot 10^9$	$10^8$	0,15	0,07	0,22
Baltrum	2,36	60484,02	$10^6$	$1,6 \cdot 10^9$	$10^8$	0,15	0,17	0,32
Norderney	3,14	107072,00	$10^6$	$1,6 \cdot 10^9$	$10^8$	0,15	0,27	0,42
Norderney	1,86	37570,11	$10^6$	$1,6 \cdot 10^9$	$10^8$	0,15	0,12	0,27

Tabelle 30: Deckwerksdicke eines Deckwerks aus EC (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	P [N/m]	$\sigma_b$ [N/m <sup>2</sup> ]	$S_m$ [N/m <sup>2</sup> ]	$k_s$ [N/m <sup>3</sup> ]	$t_{\text{Filterschicht}}$ [m]	$t_{\text{Deckschicht}}$ [m]	$t_{\text{Deckwerk}}$ [m]
Borkum	2,91	78336,95	$10^6$	$1,6 \cdot 10^9$	$10^8$	0,15	0,13	0,28
Baltrum	1,37	17362,88	$10^6$	$1,6 \cdot 10^9$	$10^8$	0,15	0,04	0,19
Baltrum	2,36	51523,42	$10^6$	$1,6 \cdot 10^9$	$10^8$	0,15	0,09	0,24
Norderney	3,14	91209,48	$10^6$	$1,6 \cdot 10^9$	$10^8$	0,15	0,15	0,30
Norderney	1,86	32004,17	$10^6$	$1,6 \cdot 10^9$	$10^8$	0,15	0,06	0,21

Tabelle 31: Deckwerksdicke eines Deckwerks aus EC (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	P [N/m]	$\sigma_b$ [N/m <sup>2</sup> ]	$S_m$ [N/m <sup>2</sup> ]	$k_s$ [N/m <sup>3</sup> ]	$t_{\text{Filterschicht}}$ [m]	$t_{\text{Deckschicht}}$ [m]	$t_{\text{Deckwerk}}$ [m]
Borkum	2,91	68119,09	$10^6$	$1,6 \cdot 10^9$	$10^8$	0,15	0,12	0,27
Baltrum	1,37	15098,16	$10^6$	$1,6 \cdot 10^9$	$10^8$	0,15	0,04	0,19
Baltrum	2,36	44802,98	$10^6$	$1,6 \cdot 10^9$	$10^8$	0,15	0,08	0,23
Norderney	3,14	79312,59	$10^6$	$1,6 \cdot 10^9$	$10^8$	0,15	0,13	0,28
Norderney	1,86	27829,71	$10^6$	$1,6 \cdot 10^9$	$10^8$	0,15	0,06	0,21

## 8 Dynamische Kostenvergleichsrechnung für ausgewählte Deckwerksalternativen

Gegenstand dieses Kapitel 8 ist die Durchführung der dynamischen Kostenvergleichsrechnung wie sie im Kapitel 1 beschrieben worden ist.

### 8.1 Vorfeld der Kostenvergleichsrechnung für Deckwerkskonstruktionen

Bei der hier durchgeführten dynamischen Kostenvergleichsrechnung handelt es sich um eine Vorschaurechnung (siehe Abschnitt 2.3). Die Aufgabe einer Deckwerkskonstruktion im aktiven Küstenschutz ist in der Einleitung dieser Diplomarbeit beschrieben. Die alternativen und zu vergleichenden Deckwerkskonstruktionen unterscheiden sich in der Bauausführung und Materialauswahl (siehe Kapitel 3). Die folgenden Deckwerkskonstruktionen werden unterschieden:

- Deckwerke aus geschütteten Wasserbausteinen (siehe Abschnitt 3.2)
- Deckwerke aus gesetzten Betonformsteinen (siehe Abschnitt 3.3)
- Deckwerke aus Mastix-Schotter (siehe Abschnitt 3.4)
- Deckwerke aus Elastocoast (siehe Abschnitt 3.5)

Die Alternativen haben alle den gleichen Nutzen (siehe Abschnitt 1.1) und besitzen auch die gleichen Sozialkosten. Ebenfalls ist ein relativer Wirtschaftlichkeitsnachweis ausreichend um eine aussagekräftige Entscheidung zu treffen. Damit kann die dynamische Kostenvergleichsrechnung angewendet werden.

Für den Ablauf der Kostenvergleichsrechnung werden an dieser Stelle Annahmen und Definitionen getroffen, die für alle ausgewählten und untersuchten Deckwerkskonstruktionen Gültigkeit besitzen. Die Kosten werden für den Untergrund, die Filterschicht sowie für die Deckschicht bestimmt. Die Deckwerksalternativen unterscheiden sich maßgeblich durch die Dicke der Deckwerkskonstruktionen und je dicker die Deckwerke sind umso weniger Sand wird für den Untergrund benötigt. Für den rot markierte Bereich (siehe Abbildung 22) werden die Materialkosten berechnet.

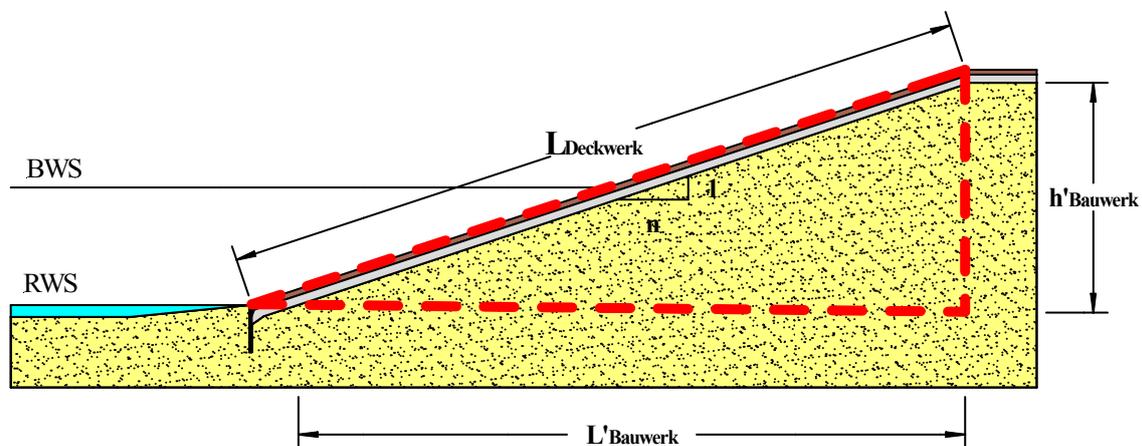


Abbildung 22: Schematische Darstellung des Bereiches für die Kostenermittlung

Desweiteren gelten folgende Annahmen:

- Die Kosten der einzelnen Materialarten werden zuerst als Nettopreise angegeben und erst nach der Kumulation der Einzelkosten mit dem aktuellen Mehrwertsteuersatz von 19 %, Stand November 2009, beaufschlagt.
- Die Kosten werden pro laufenden Meter berechnet und eine eventuelle Reduzierung der Kosten infolge Mengenabnahmerabatte wird nicht berücksichtigt.
- Die meisten Kosten entstammen offiziellen Preislisten, auch hier sind Reduzierung der Kosten durch Skonto und ähnlichen Rabatten in die Untersuchung nicht mit einkalkuliert.
- Als geotextile Filterschicht wird ein Terrafix® 609 der Firma Naue in der Kostenkalkulation benutzt. Die angegebenen Preise für das Geotextil gelten ab einer Abnahmemenge von 4000 m<sup>2</sup> und sind frei Baustelle.
- Ein m<sup>3</sup> Sand entspricht 1,8 Tonnen verdichteter Sand.
- Die Nutzungsdauer der vier Deckwerkskonstruktionsalternativen ist die gleich und beträgt 40 Jahre (LAWA, 2005).
- Der jährliche Zinssatz  $i$  für die Ermittlung des Diskontierungsfaktors  $D_{FJ}$  beträgt 3% (LAWA, 2005).
- Die Unterhaltung- und Instandsetzungskosten werden als jährlich anfallende Kostenreihe angegeben und betragen nach Fleischer & Kayser, 2006 0,04 €/(Jahr·m<sup>2</sup>). Diese durchschnittlichen Kosten werden mit einem Seegangsfaktor  $S_{\text{Faktor}}$  für die höhere Belastung durch Sturmfluten in Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhe und Verklammerungsart erhöht.

## 8.2 Kosten für Deckwerkskonstruktionen aus Wasserbausteinen

Bei Deckwerkskonstruktionen aus geschütteten Wasserbausteinen ist die Lagestabilität des einzelnen Wasserbausteines hauptsächlich von dem Gewicht des Steines sowie der Böschungsneigung abhängig (siehe 3.2).

Für die Berechnung der Kosten wurden als erstes die benötigten Mengen an Sand, Geotextil, Anzahl der Wasserbausteine für die Deckschicht sowie die Anzahl der Wasserbausteine für die Filterschicht ermittelt. Die Ermittlung der benötigten Anzahl der Wasserbausteine für die Böschungsfläche erfolgte mit der Gleichung (4.21). Die Anzahl der errechneten Wasserbausteine wurde anschließend mit dem Eigengewicht eines Einzelsteines multipliziert um die Gesamtmenge in Tonnen pro laufenden Meter Deckschicht zu erhalten. Das gleiche Verfahren wurde ebenfalls für die Filterschicht angewendet. Die berechneten Werte der Mengenermittlung sind in der Anlage B hinterlegt.

### 8.2.1 Herstellungskosten

Die mittlere Größe und das mittlere Eigengewicht eines durchschnittlichen Wasserbausteines werden mit den Gleichungen (4.17), (4.18) sowie (4.19) bestimmt. Bei der Gleichung (4.17) wird die Bemessungswellenhöhe mit der dritten Potenz berücksichtigt, womit die Größe und

das Eigengewicht des Wasserbausteines sehr stark von der Bemessungswellenhöhe abhängig sind.

Der schwerste durchschnittliche Wasserbaustein muss über 3,4 Tonnen wiegen (siehe Anlage E) und einen mittleren Durchmesser von 1,09 m besitzen (siehe Anlage B) damit die Lagestabilität des Steines gewährleistet ist. Diese Größenordnung von Wasserbausteinen ist in der Norddeutschen Tiefebene nicht lieferbar. Wasserbausteine dieser Größe werden in Deutschland nur im Süddeutschen Raum in der Nähe der Alpen in Steinbrüchen abgebaut.

In der Tabelle 32, Tabelle 33 und Tabelle 34 sind die Herstellkosten für eine Deckwerkskonstruktion nach den Kostengruppen Sand<sub>v</sub>, Geotextil, Wasserbausteine für die Deckschicht und Wasserbausteine für die Filterschicht gegliedert. Die Kostengruppen wurden dann summiert und mit dem aktuellen Mehrwertsteuersatz von 19 % multipliziert.

Tabelle 32: Herstellungskosten für geschüttete WBS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geotextil [€/lfd. m]	WBS <sub>Filterschicht</sub> [€/lfd. m]	WBS <sub>Deckschicht</sub> [€/lfd. m]	Kosten (Netto) [€/lfd. m]	Kosten (Brutto) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	342,34	52,04	1168,30	3335,93	4898,61	5829,34
Baltrum	1,37	402,01	43,04	454,93	823,25	1723,23	2050,65
Baltrum	2,36	427,08	51,46	936,94	2428,22	3843,69	4573,99
Norderney	3,14	373,82	55,12	1335,31	3812,79	5577,04	6636,68
Norderney	1,86	320,11	43,18	619,62	1408,64	2391,55	2845,94

Tabelle 33: Herstellungskosten für geschüttete WBS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geotextil [€/lfd. m]	WBS <sub>Filterschicht</sub> [€/lfd. m]	WBS <sub>Deckschicht</sub> [€/lfd. m]	Kosten (Netto) [€/lfd. m]	Kosten (Brutto) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	375,89	61,03	1244,92	3554,69	5236,53	6231,47
Baltrum	1,37	514,86	53,78	516,41	934,50	2019,55	2403,27
Baltrum	2,36	535,62	63,20	1045,43	2709,41	4353,66	5180,86
Norderney	3,14	431,31	65,58	1443,30	4121,16	6061,35	7213,00
Norderney	1,86	377,77	52,02	678,18	1541,75	2649,72	3153,17

Tabelle 34: Herstellungskosten für geschüttete WBS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geotextil [€/lfd. m]	WBS <sub>Filterschicht</sub> [€/lfd. m]	WBS <sub>Deckschicht</sub> [€/lfd. m]	Kosten (Netto) [€/lfd. m]	Kosten (Brutto) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	465,68	79,98	1425,19	3693,60	5664,44	6740,69
Baltrum	1,37	682,83	73,18	613,88	1110,88	2480,77	2952,12
Baltrum	2,36	643,54	82,37	1190,22	2705,83	4621,96	5500,13
Norderney	3,14	490,18	83,76	1610,41	4598,31	6782,66	8071,37
Norderney	1,86	504,91	70,42	802,06	1451,41	2828,80	3366,27

### 8.2.2 Unterhaltungs- und Instandsetzungskosten

Nach CIRIA/CUR/CETMEF, 2007 gibt es drei Möglichkeiten eine Deckschicht aus geschütteten Wasserbausteinen instandzusetzen. Als erste Möglichkeit können die verlagerten oder zerstörten Wasserbausteine einzeln ersetzt werden. Zweitens kann die bestehende Deckschicht aus Wasserbausteinen mit einer neuen Deckschicht aus Wasserbausteinen überlagert werden. Die letzte Möglichkeit ist eine andere Deckwerkskonstruktion für den Schutz des Bauwerkes zu errichten.

Bei der Größe und Gewicht (siehe 8.2.1) der Wasserbausteine ist das Ersetzen einzelner Wasserbausteine nur mit Baggern oder vom Schiff aus möglich. Ein manuelles Ersetzen der Steine kann nicht erfolgen. Tabelle 35, Tabelle 36 und Tabelle 37 zeigen die Unterhaltungskosten über die gesamte Nutzungsdauer eines Deckwerkes aus geschütteten Wasserbausteinen.

Tabelle 35: Unterhaltungskosten für geschüttete WBS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$S_{\text{Faktor}}$ [-]	Unterhaltungskosten [€/Jahr·m <sup>2</sup> ]	$D_{\text{FJ}}$ [-]	$L_{\text{Deckwerk}}$ [m]	Unterhaltungskosten (Nutzungsdauer) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	4	0,16	23,11	27,39	101,27
Baltrum	1,37	2	0,08	23,11	22,65	41,87
Baltrum	2,36	3	0,12	23,11	27,09	75,12
Norderney	3,14	4	0,16	23,11	29,01	107,26
Norderney	1,86	2	0,08	23,11	22,73	42,02

Tabelle 36: Unterhaltungskosten für geschüttete WBS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$S_{\text{Faktor}}$ [-]	Unterhaltungskosten [€/Jahr·m <sup>2</sup> ]	$D_{\text{FJ}}$ [-]	$L_{\text{Deckwerk}}$ [m]	Unterhaltungskosten (Nutzungsdauer) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	4	0,16	23,11	32,12	118,80
Baltrum	1,37	2	0,08	23,11	28,30	52,34
Baltrum	2,36	3	0,12	23,11	33,26	92,26
Norderney	3,14	4	0,16	23,11	34,51	127,65
Norderney	1,86	2	0,08	23,11	27,38	50,63

Tabelle 37: Unterhaltungskosten für geschüttete WBS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$S_{\text{Faktor}}$ [-]	Unterhaltungskosten [€/Jahr·m <sup>2</sup> ]	$D_{\text{FJ}}$ [-]	$L_{\text{Deckwerk}}$ [m]	Unterhaltungskosten (Nutzungsdauer) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	4	0,16	23,11	42,10	155,69
Baltrum	1,37	2	0,08	23,11	38,52	71,22
Baltrum	2,36	3	0,12	23,11	43,35	120,24
Norderney	3,14	4	0,16	23,11	44,08	163,04
Norderney	1,86	2	0,08	23,11	37,07	68,54

### 8.3 Kosten für Deckwerkskonstruktionen aus Betonformsteinen

Bei Deckwerkskonstruktionen aus gesetzten und verzahnten Betonformsteinen ist die Lagestabilität wesentlich von der Wellenbrecherkennzahl und der signifikanten Wellenhöhe abhängig (siehe 136.4.2).

#### 8.3.1 Herstellungskosten

Für die Kalkulation der Herstellungskosten von gesetzten Betonformsteinen wurde die Annahme getroffen, dass die Betonformsteine keine Löcher oder sonstige Rauigkeitselemente besitzen. Die Menge an benötigten Beton und die aufgelisteten Einzelkosten der verschiedenen Baustoffe sind in der Anlage F. Die Tabelle 38 zeigt die Herstellungskosten von einer Deckwerkskonstruktion aus gesetzten Betonformsteinen bei einer Böschungsneigung von 1:6.

Tabelle 38: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus gesetzten BFS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geotextil [€/lfd. m]	Betonformsteine [€/lfd. m]	Kosten (Netto) [€/lfd. m]	Kosten (Brutto) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	2367,62	110,16	3523,85	6001,64	7141,95
Baltrum	1,37	1143,67	94,54	1979,26	3217,47	3828,79
Baltrum	2,36	1981,47	117,50	4237,75	6336,72	7540,69
Norderney	3,14	2709,82	122,72	5030,03	7862,57	9356,46
Norderney	1,86	1365,68	89,38	1827,46	3282,52	3906,20

### 8.3.2 Unterhaltungs- und Instandsetzungskosten

Die Unterhaltung von gesetzten Betonformsteinen ist fast identisch mit dem von Wasserbausteinen. Die einzelnen Betonformsteine sind vom Gewicht ebenfalls so hoch, dass sie bei dem Austausch einzelner Betonsteine nicht von Hand eingesetzt werden können. In der Tabelle 39 sind die Unterhaltungskosten für eine Deckwerkskonstruktion aus Betonformsteinen.

Tabelle 39: Unterhaltungskosten für ein Deckwerk aus gesetzten BFS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	S <sub>Faktor</sub> [-]	Unterhaltungskosten [€/Jahr·m <sup>2</sup> ]	D <sub>FJ</sub> [-]	L <sub>Deckwerk</sub> [m]	Unterhaltungskosten (Nutzungsdauer) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	4	0,16	23,11	57,98	214,43
Baltrum	1,37	2	0,08	23,11	49,76	92,01
Baltrum	2,36	3	0,12	23,11	61,84	171,54
Norderney	3,14	4	0,16	23,11	64,59	238,88
Norderney	1,86	2	0,08	23,11	47,04	86,99

## 8.4 Kosten für Deckwerkskonstruktionen aus Mastix-Schotter

Bei der Kostenuntersuchung von Deckwerkskonstruktion aus Mastix-Schotter wurden zwei Ausführungsmöglichkeiten unterschieden. Die Kosten wurden für eine Mastix-Schotter-Deckschicht auf einem Geotextil und auf einem Filter aus Bitumensand ermittelt. Die Deckschichtdicke ist vom Bettungsmodul  $k_s$  des Untergrundes abhängig (siehe 6.4.3).

### 8.4.1 Herstellungskosten

Für die Ausführung von Mastix-Schotter auf Bitumensand wird nach Schönian, 1999 eine Filterschichtdicke des Bitumensandes von 0,25 m angenommen. Die in Abschnitt 7.4 ermittelten Dicken der Mastix-Schotter-Deckschicht liegen teilweise unterhalb der Mindestschichtdicke für Mastix-Schotter. Nach TAW, 1985 beträgt die Mindestschichtdicke 0,12 m. Falls

die berechnete Deckschichtdicke unterhalb der Mindestschichtdicke lag wurden 0,12 m als Deckschichtdicke in der Berechnung der Kosten berücksichtigt.

Die Kosten des Bitumensandes und des Mastix-Schotter entsprechen den aktuellen Preisen in Norddeutschland. Zu beachten ist, dass Bitumen ein Erdölprodukt ist und ähnlich wie Benzin starken preislichen Schwankungen unterliegt. Die Kosten des Mastix-Schotter sind damit ebenfalls mit dem aktuellen Rohölpreisen gekoppelt.

Die einzeln ermittelten Kostenpositionen für die ausgewählten Seegangparameter und Bauwerksgeometrien sind in der Anlage F zusammengefasst.

Die Tabelle 40, Tabelle 41 und Tabelle 42 zeigen die Bruttokosten für ein Deckwerk aus Mastix-Schotter mit einer Filterschicht aus Bitumensand. In der Tabelle 43, Tabelle 44 und Tabelle 45 sind die kalkulierten Kosten für eine Mastix-Schotter-Deckschicht auf einem geotextilen Filter dargestellt.

Tabelle 40: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus MS auf BS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Bitumensand [€/lfd. m]	Mastix-Schotter [€/lfd. m]	Kosten (Netto) [€/lfd. m]	Kosten (Brutto) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	2093,97	1003,08	2740,42	5837,47	6946,59
Baltrum	1,37	1051,04	710,18	830,37	2591,59	3084,00
Baltrum	2,36	1831,69	934,63	1845,41	4611,73	5487,96
Norderney	3,14	2431,65	1080,65	3348,37	6860,67	8164,20
Norderney	1,86	1220,85	764,69	1042,56	3028,10	3603,44

Tabelle 41: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus MS auf BS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Bitumensand [€/lfd. m]	Mastix-Schotter [€/lfd. m]	Kosten (Netto) [€/lfd. m]	Kosten (Brutto) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	2000,83	1111,04	2669,95	5781,81	6880,35
Baltrum	1,37	1333,14	903,24	1056,09	3292,47	3918,04
Baltrum	2,36	2294,44	1179,04	2047,74	5521,22	6570,25
Norderney	3,14	2608,82	1264,79	3447,15	7320,76	8711,70
Norderney	1,86	1241,79	873,40	1047,42	3162,62	3763,51

Tabelle 42: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus MS auf BS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Bitumensand [€/lfd. m]	Mastix- Schotter [€/lfd. m]	Kosten (Netto) [€/lfd. m]	Kosten (Brut- to) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	2006,05	1348,74	2898,30	6253,10	7441,19
Baltrum	1,37	1517,44	1167,14	1364,66	4049,23	4818,59
Baltrum	2,36	2307,74	1432,28	2224,42	5964,44	7097,69
Norderney	3,14	2462,24	1491,06	3633,96	7587,27	9028,85
Norderney	1,86	1355,41	1106,12	1293,31	3754,85	4468,27

Tabelle 43: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus MS auf Geotextil (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Bitumensand [€/lfd. m]	Mastix- Schotter [€/lfd. m]	Kosten (Netto) [€/lfd. m]	Kosten (Brut- to) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	2140,01	78,19	3921,45	6139,65	7306,18
Baltrum	1,37	1113,49	55,36	864,26	2033,11	2419,40
Baltrum	2,36	1886,02	72,85	2640,73	4599,60	5473,52
Norderney	3,14	2474,99	84,23	4791,42	7350,64	8747,26
Norderney	1,86	1272,73	59,61	1491,88	2824,21	3360,81

Tabelle 44: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus MS auf Geotextil (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geotextil [€/lfd. m]	Mastix- Schotter [€/lfd. m]	Kosten (Netto) [€/lfd. m]	Kosten (Brut- to) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	2057,45	86,60	3820,61	5964,66	7097,94
Baltrum	1,37	1414,17	70,41	1056,09	2540,67	3023,40
Baltrum	2,36	2367,57	91,90	2930,25	5389,73	6413,77
Norderney	3,14	2666,97	98,59	4932,77	7698,32	9161,01
Norderney	1,86	1303,24	68,08	1498,83	2870,15	3415,48

Tabelle 45: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus MS auf Geotextil (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geotextil [€/lfd. m]	Mastix-Schotter [€/lfd. m]	Kosten (Netto) [€/lfd. m]	Kosten (Brutto) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	2079,84	105,13	4147,38	6332,36	7535,50
Baltrum	1,37	1621,77	90,98	1364,66	3077,41	3662,11
Baltrum	2,36	2400,42	111,64	3183,07	5695,14	6777,21
Norderney	3,14	2537,15	116,23	5200,08	7853,45	9345,61
Norderney	1,86	1439,09	86,22	1697,40	3222,71	3835,03

### 8.4.2 Unterhaltungs- und Instandsetzungskosten

Bei stärkerer Beanspruchung der Mastix-Schotter-Deckschicht können einzelne Schottersteine aus der Deckschicht herausgelöst werden. Bei der Instandsetzung der lokalen Fehlstellen wird die Deckschicht gereinigt und alle losen Bestandteile entfernt. Anschließend wird die Fehlstelle wieder mit Mastix-Schotter verschlossen.

Nach Fleischer & Kayser, 2006 sind die Unterhaltungskosten für verklammerte Deckwerke geringer als für unverklammerte Deckwerke. Der Faktor für die Seegangbelastung  $S_{\text{Faktor}}$  wird deshalb halbiert.

Die Unterhaltungskosten bei verklammerten Deckwerken sind nur von der Deckschicht abhängig und nicht von der Filterschicht (siehe Tabelle 46, Tabelle 47, und Tabelle 48).

Tabelle 46: Unterhaltungskosten für ein Deckwerk aus MS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$S_{\text{Faktor}}$ [-]	Unterhaltungskosten [€/Jahr·m <sup>2</sup> ]	$D_{\text{FJ}}$ [-]	$L_{\text{Deckwerk}}$ [m]	Unterhaltungskosten (Nutzungsdauer) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	2	0,08	23,11	41,15	76,10
Baltrum	1,37	1	0,04	23,11	29,14	26,94
Baltrum	2,36	1,5	0,06	23,11	38,34	53,18
Norderney	3,14	2	0,08	23,11	44,33	81,98
Norderney	1,86	1	0,04	23,11	31,37	29,01

Tabelle 47: Unterhaltungskosten für ein Deckwerk aus MS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$S_{\text{Faktor}}$ [-]	Unterhaltungskosten [€/Jahr·m <sup>2</sup> ]	$D_{\text{FJ}}$ [-]	$L_{\text{Deckwerk}}$ [m]	Unterhaltungskosten (Nutzungsdauer) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	2	0,08	23,11	45,58	84,29
Baltrum	1,37	1	0,04	23,11	37,06	34,26
Baltrum	2,36	1,5	0,06	23,11	48,37	67,08
Norderney	3,14	2	0,08	23,11	51,89	95,95
Norderney	1,86	1	0,04	23,11	35,83	33,13

Tabelle 48: Unterhaltungskosten für ein Deckwerk aus MS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$S_{\text{Faktor}}$ [-]	Unterhaltungskosten [€/Jahr·m <sup>2</sup> ]	$D_{\text{FJ}}$ [-]	$L_{\text{Deckwerk}}$ [m]	Unterhaltungskosten (Nutzungsdauer) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	2	0,08	23,11	55,33	102,32
Baltrum	1,37	1	0,04	23,11	47,88	44,27
Baltrum	2,36	1,5	0,06	23,11	58,76	81,49
Norderney	3,14	2	0,08	23,11	61,17	113,12
Norderney	1,86	1	0,04	23,11	45,38	41,96

## 8.5 Kosten für Deckwerkskonstruktionen aus Elastocoast

Die Bemessungen von Deckwerkskonstruktionen aus Elastocoast basieren momentan auf den gleichen Bemessungsansätzen wie von Mastix-Schotter (siehe 6.4.3). Die besseren Materialeigenschaften von Elastocoast führen zu kleineren Deckschichtdicken als bei Mastix-Schotter.

### 8.5.1 Herstellungskosten

Bei der Berechnung der Herstellungskosten von Elastocoast wurde eine Mindestschichtdicke von 0,15 m angenommen. Die angenommene Mindestschichtdicke von Elastocoast wurde aus Sicherheitsaspekten höher gewählt, da sich das Produkt noch in der Probephase befindet. Die Filterschicht unterhalb der Elastocoast-Deckschicht beträgt 0,15 m. Sie ist so gewählt, dass die Stabilität des anstehenden Untergrundes gewährleistet ist.

Die genauen Mengen und Kosten für das Elastocoast-Deckwerk sind in der Anlage E. Die Bruttoherstellungskosten sind in den nachfolgenden Tabellen dargestellt.

Tabelle 49: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus Elastocoast (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geotextil [€/lfd. m]	EC <sub>Filterschicht</sub> [€/lfd. m]	EC <sub>Deckschicht</sub> [€/lfd. m]	Kosten (Netto) [€/lfd. m]	Kosten (Brutto) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	1238,06	59,89	95,97	2170,53	3564,45	4241,70
Baltrum	1,37	751,83	46,74	74,90	1151,97	2025,43	2410,26
Baltrum	2,36	1169,81	57,88	92,76	1500,37	2820,81	3356,76
Norderney	3,14	1406,56	63,86	102,34	2614,04	4186,80	4982,29
Norderney	1,86	798,51	48,11	77,10	1185,76	2109,48	2510,29

Tabelle 50: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus Elastocoast (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geotextil [€/lfd. m]	EC <sub>Filterschicht</sub> [€/lfd. m]	EC <sub>Deckschicht</sub> [€/lfd. m]	Kosten (Netto) [€/lfd. m]	Kosten (Brutto) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	1288,61	68,71	110,11	1693,41	3160,84	3761,40
Baltrum	1,37	931,14	58,77	94,18	1448,44	2532,53	3013,71
Baltrum	2,36	1412,20	71,81	115,09	1769,96	3369,05	4009,17
Norderney	3,14	1565,53	75,48	120,97	1860,41	3622,39	4310,65
Norderney	1,86	868,46	56,84	91,09	1400,89	2417,28	2876,56

Tabelle 51: Herstellungskosten für ein Deckwerk aus Elastocoast (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geotextil [€/lfd. m]	EC <sub>Filterschicht</sub> [€/lfd. m]	EC <sub>Deckschicht</sub> [€/lfd. m]	Kosten (Netto) [€/lfd. m]	Kosten (Brutto) [€/lfd. m]
Borkum	2,91	1426,79	87,53	140,28	2157,36	3811,96	4536,23
Baltrum	1,37	1137,16	78,52	125,84	1935,29	3276,81	3899,40
Baltrum	2,36	1552,39	91,15	146,08	2246,59	4036,21	4803,09
Norderney	3,14	1636,79	93,50	149,85	2304,52	4184,66	4979,74
Norderney	1,86	1037,68	75,16	120,46	1852,57	3085,87	3672,18

## 8.5.2 Unterhaltungs- und Instandsetzungskosten

Aussagen über die Unterhaltung und Instandsetzung von Elastocoast sind derzeit noch schwierig. Allerdings zeigen die ersten Pilotprojekte, dass Elastocoast der Wellenbelastung eine hohe Widerstandskraft entgegensetzt. Bis jetzt treten nur kleine lokale Fehlstellen auf, die mit geringen Mengen von Elastocoast wieder verschlossen werden können. Auf der nächsten Seite sind die geschätzten Unterhaltungskosten von Elastocoast aufgeführt.

Tabelle 52: Unterhaltungskosten für ein Deckwerk aus EC (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	S <sub>Faktor</sub> [-]	Unterhaltungskosten [€/(Jahr·m <sup>2</sup> )]	D <sub>FJ</sub> [-]	L <sub>Deckwerk</sub> [m]	Unterhaltungskosten (Nutzungsdauer) [€/(Ifd. m)]
Borkum	2,91	2	0,08	23,11	31,52	58,28
Baltrum	1,37	1	0,04	23,11	24,60	22,74
Baltrum	2,36	1,5	0,06	23,11	30,46	42,25
Norderney	3,14	2	0,08	23,11	33,61	62,15
Norderney	1,86	1	0,04	23,11	25,32	23,41

Tabelle 53: Unterhaltungskosten für ein Deckwerk aus EC (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	S <sub>Faktor</sub> [-]	Unterhaltungskosten [€/(Jahr·m <sup>2</sup> )]	D <sub>FJ</sub> [-]	L <sub>Deckwerk</sub> [m]	Unterhaltungskosten (Nutzungsdauer) [€/(Ifd. m)]
Borkum	2,91	2	0,08	23,11	36,16	66,87
Baltrum	1,37	1	0,04	23,11	30,93	28,60
Baltrum	2,36	1,5	0,06	23,11	37,80	52,42
Norderney	3,14	2	0,08	23,11	39,73	73,46
Norderney	1,86	1	0,04	23,11	29,91	27,66

Tabelle 54: Unterhaltungskosten für ein Deckwerk aus EC (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	S <sub>Faktor</sub> [-]	Unterhaltungskosten [€/(Jahr·m <sup>2</sup> )]	D <sub>FJ</sub> [-]	L <sub>Deckwerk</sub> [m]	Unterhaltungskosten (Nutzungsdauer) [€/(Ifd. m)]
Borkum	2,91	2	0,08	23,11	46,07	85,19
Baltrum	1,37	1	0,04	23,11	41,33	38,21
Baltrum	2,36	1,5	0,06	23,11	47,97	66,53
Norderney	3,14	2	0,08	23,11	49,21	91,00
Norderney	1,86	1	0,04	23,11	39,56	36,58

## 8.6 Kostengegenüberstellung und Gesamtbeurteilung

In diesem Abschnitt werden die Kosten für die Herstellung, Unterhaltung- und Instandsetzung sowie der Gesamtnutzungszeit graphisch aufbereitet und gegenübergestellt.

Die Abbildung 23 bis Abbildung 37 stellen die untersuchten Kostengrößen in Abhängigkeit der Bauwerksgeometrie und der Seegangparameter dar. Die Kosten für die Herstellung und Unterhaltung wurden getrennt voneinander ermittelt und die Unterhaltungskosten finanzmathematisch aufbereitet. Die Kosten werden damit realistischer nachgebildet.

Bei der Untersuchung der Kosten wurde festgestellt, dass Elastocoast in 11 von 15 Fällen die kostengünstigste Deckwerkskonstruktion darstellt. In 4 Fällen war eine Deckwerkskonstruktion aus geschütteten Wasserbausteinen das kostengünstigste Deckwerk. Die geschütteten Wasserbausteine waren für die Bemessungseingangsdaten der Insel Baltrum mit einer Bemessungswellenhöhe von 1,37 m den anderen Deckwerken aus Kostenperspektive überlegen (siehe Abbildung 26, Abbildung 27 und Abbildung 28). Die Deckwerkskonstruktionen aus Elastocoast hingegen haben besonders bei hohen Bemessungswellenhöhen einen offensichtlichen Kostenvorteil.

Für die Kostenuntersuchung wurden nur Materialkosten ohne Anlieferungskosten auf die Baustelle berücksichtigt. Weiterhin wurden keine Personal- und Gerätekosten in die Untersuchung einbezogen. Die Kosten für Personal und Arbeitsgeräte sind für die vier ausgewählten Deckwerkskonstruktion ungefähr gleich groß. Der Einbau der verschiedenen Deckwerkskonstruktionen unterscheidet sich nicht gravierend.

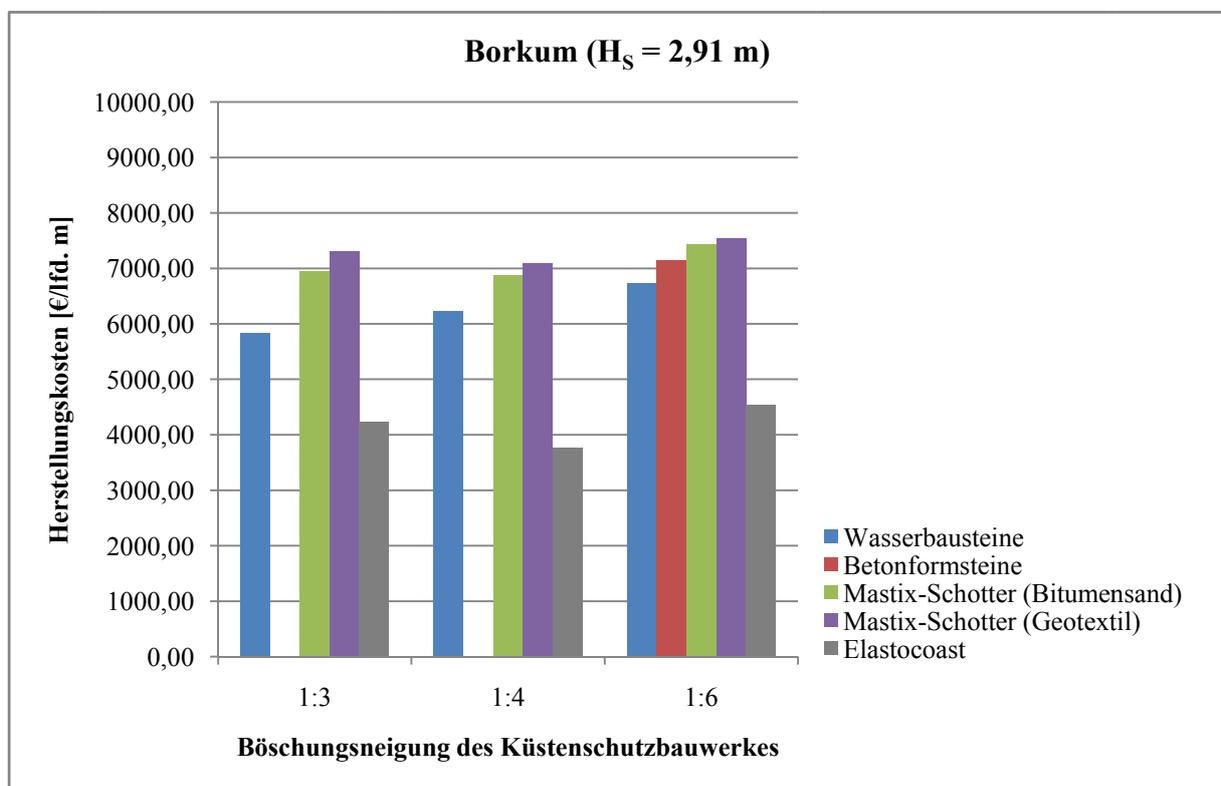


Abbildung 23: Herstellungskosten für die Seegangparameter von Borkum

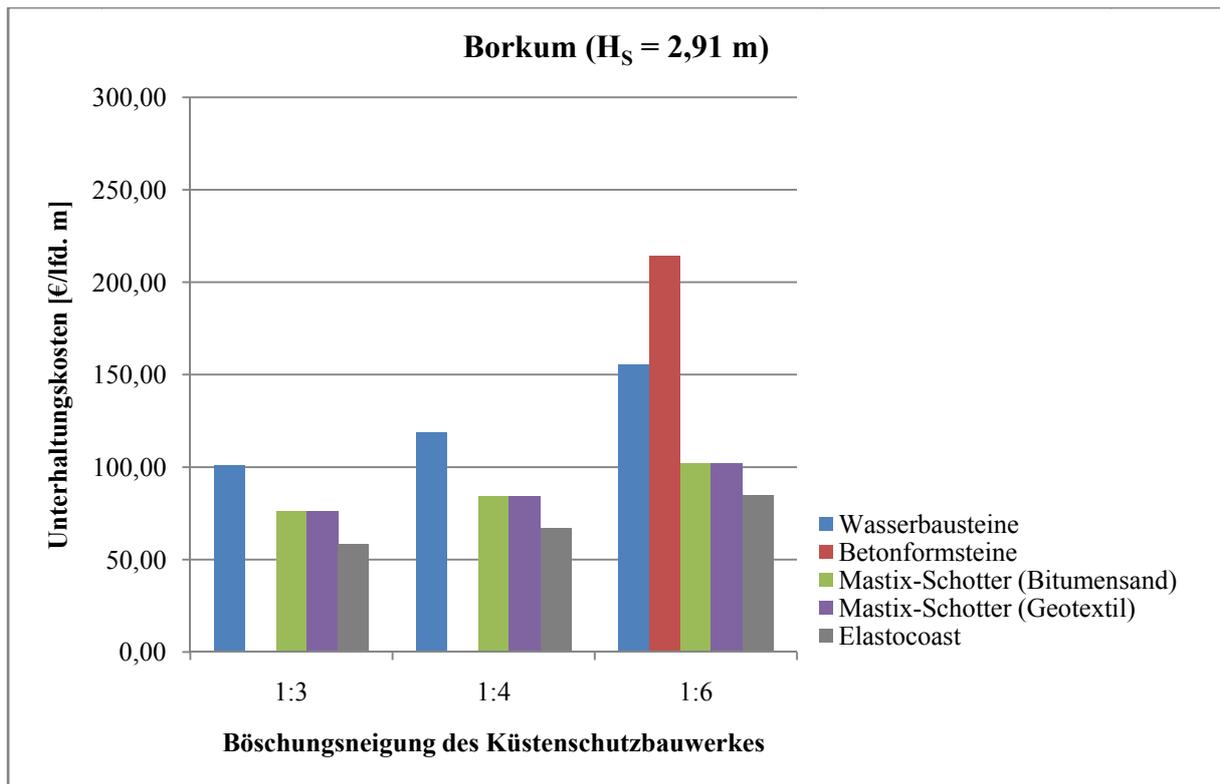


Abbildung 24: Unterhaltungskosten für die Seegangparameter von Borkum

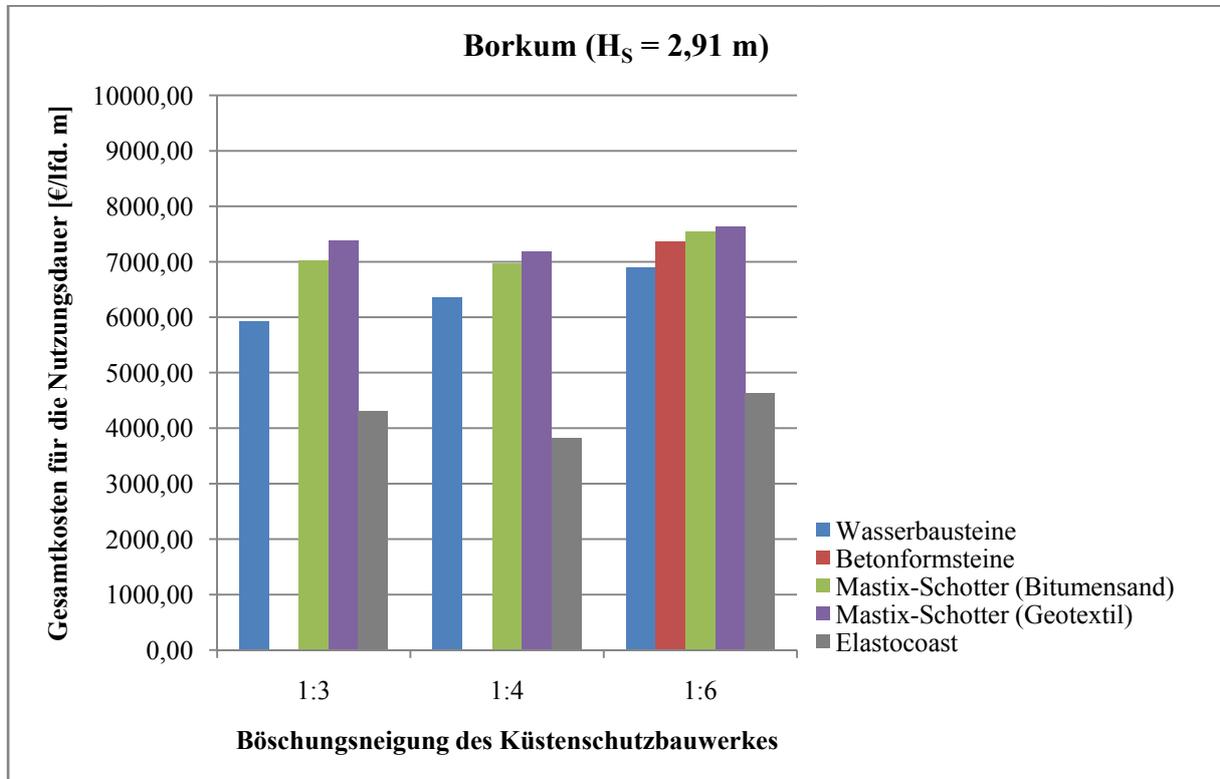
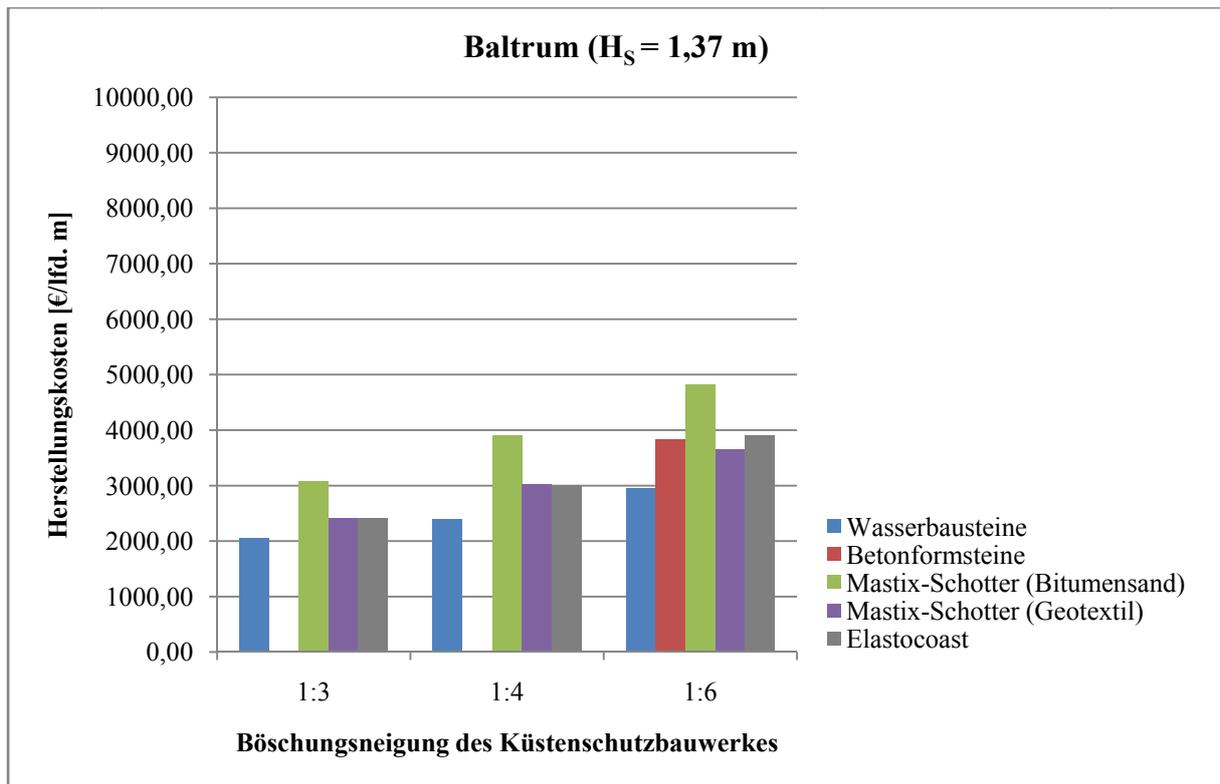
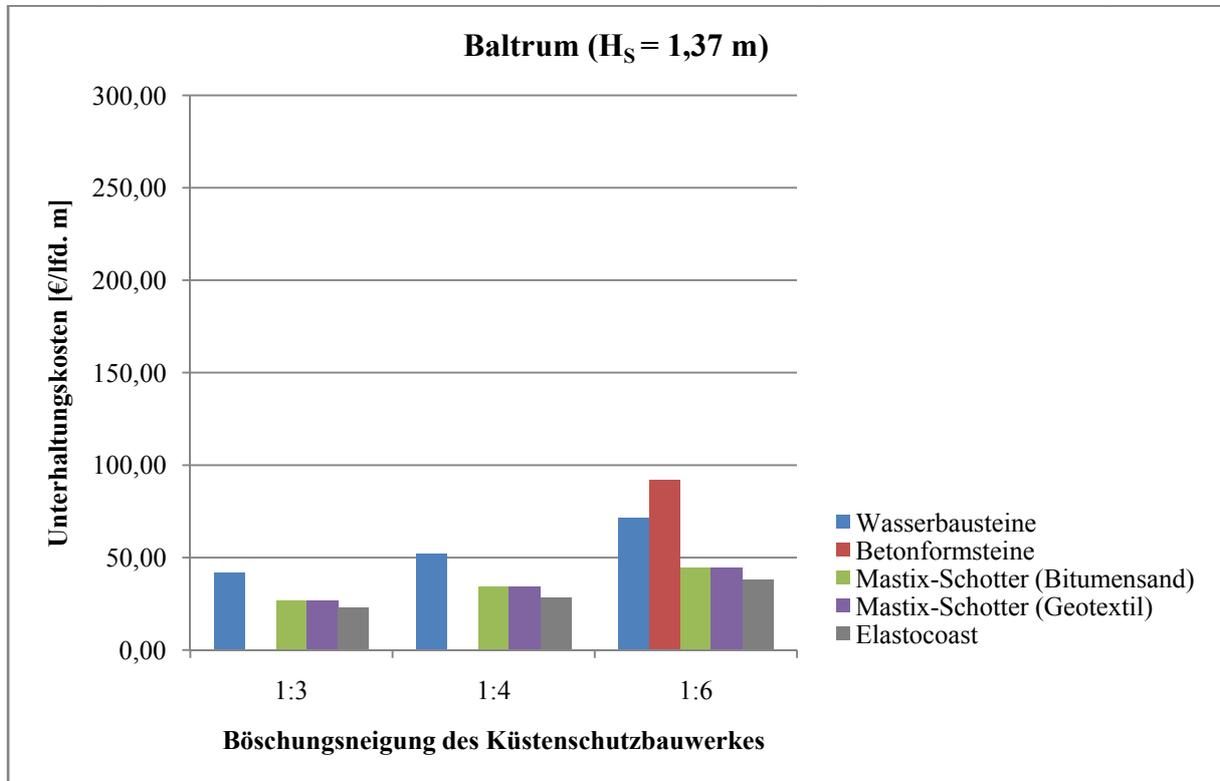
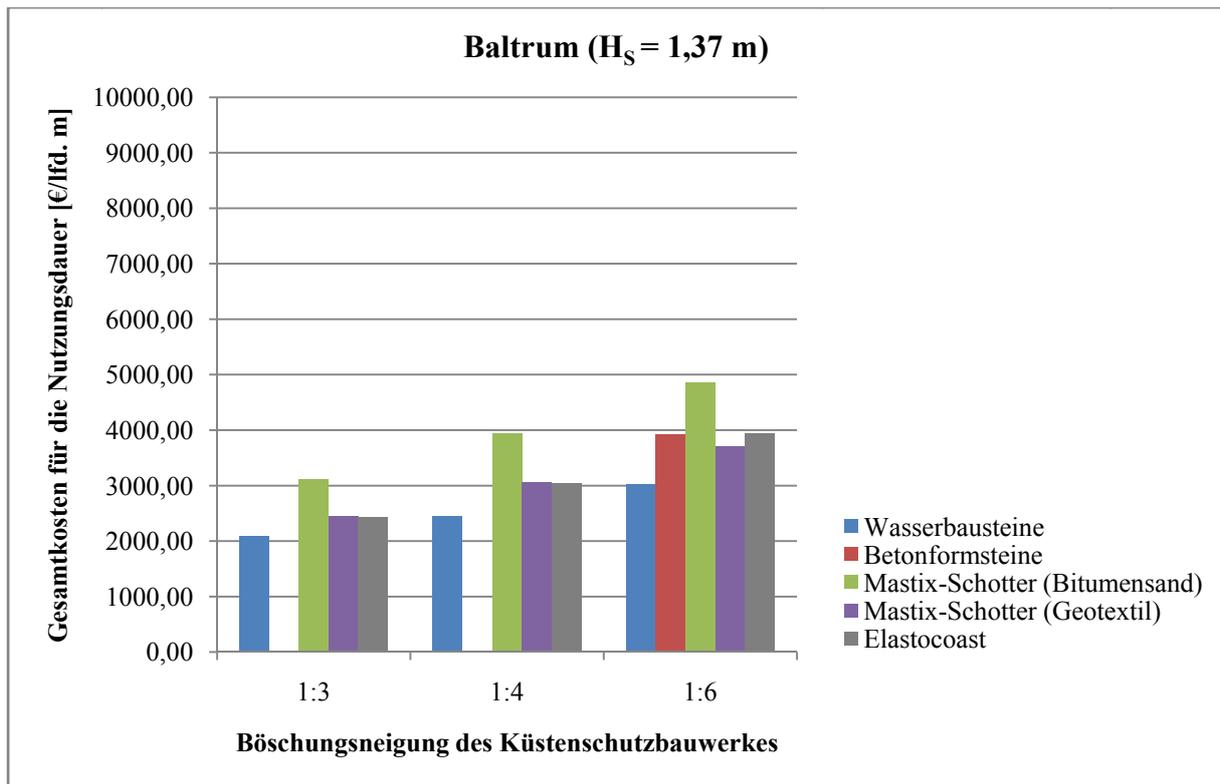
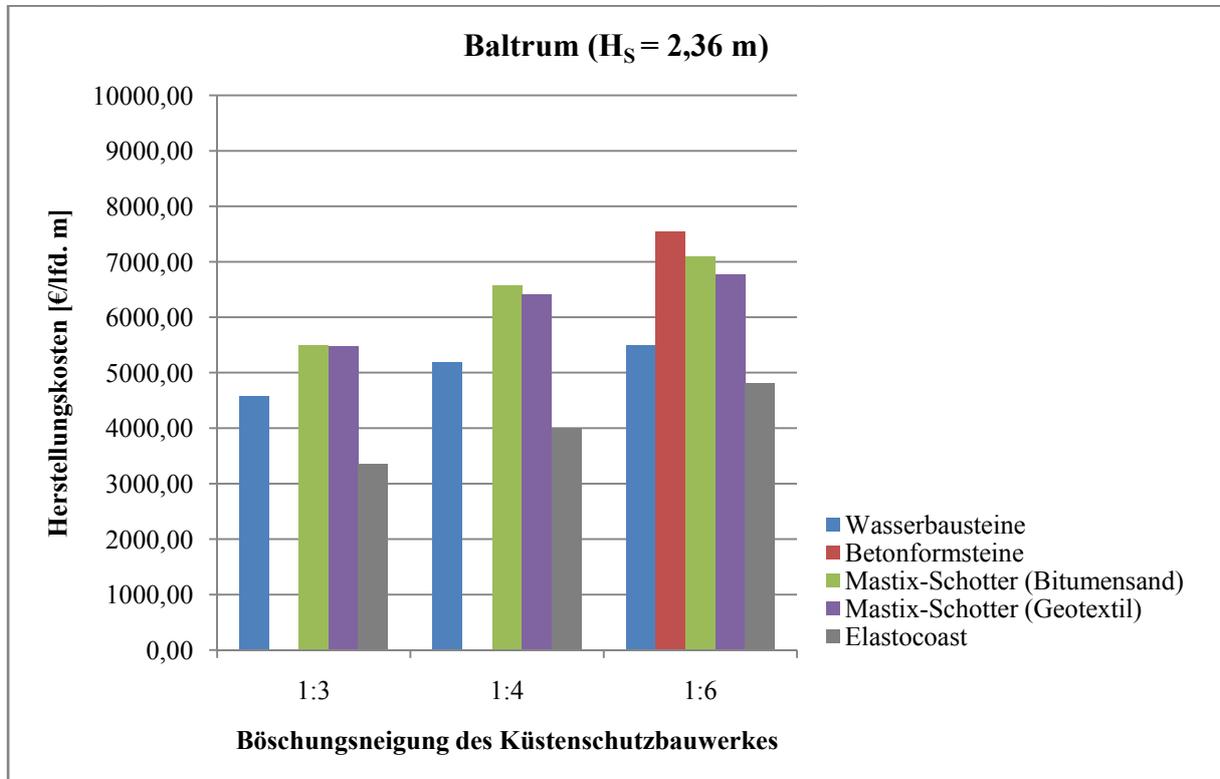
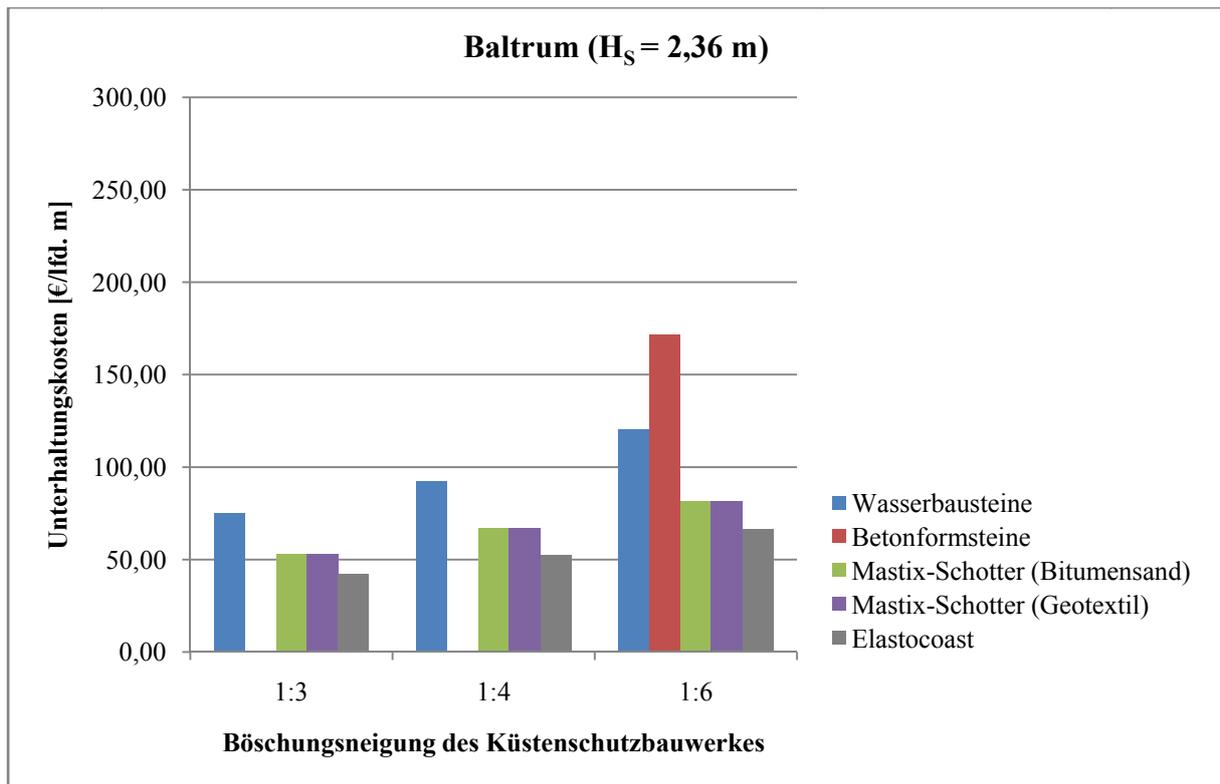
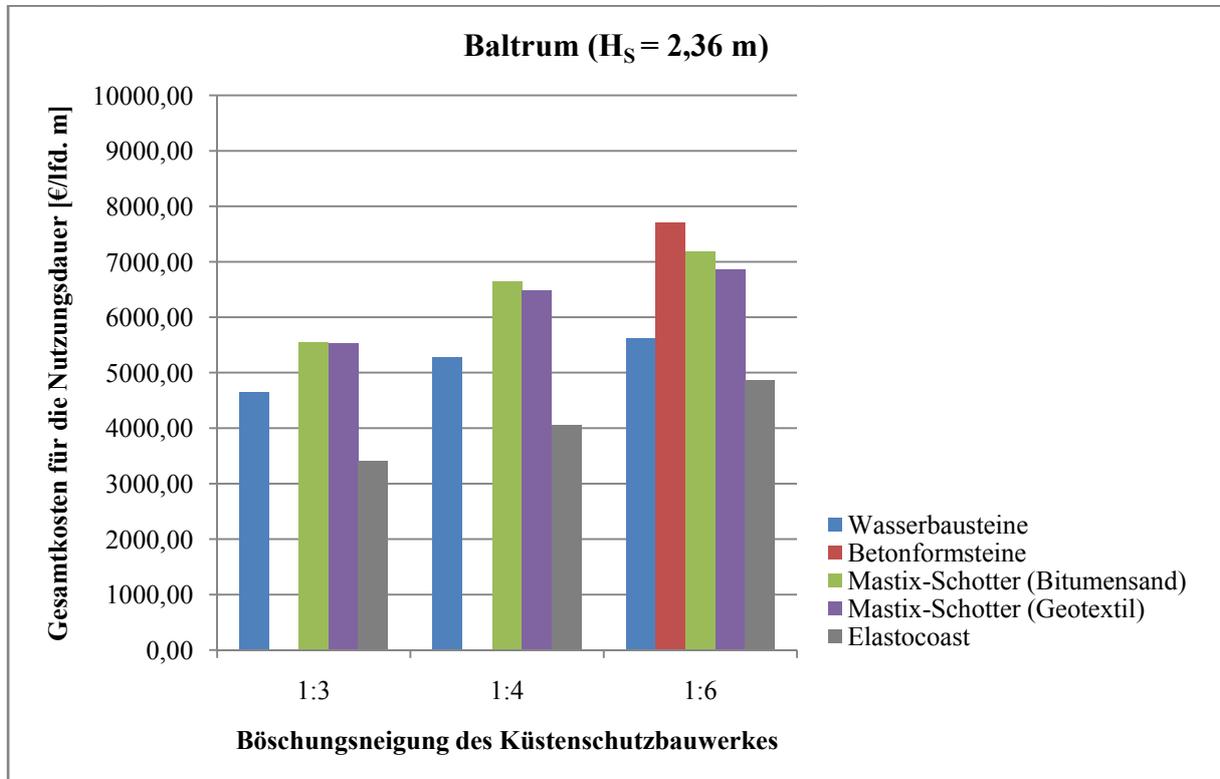
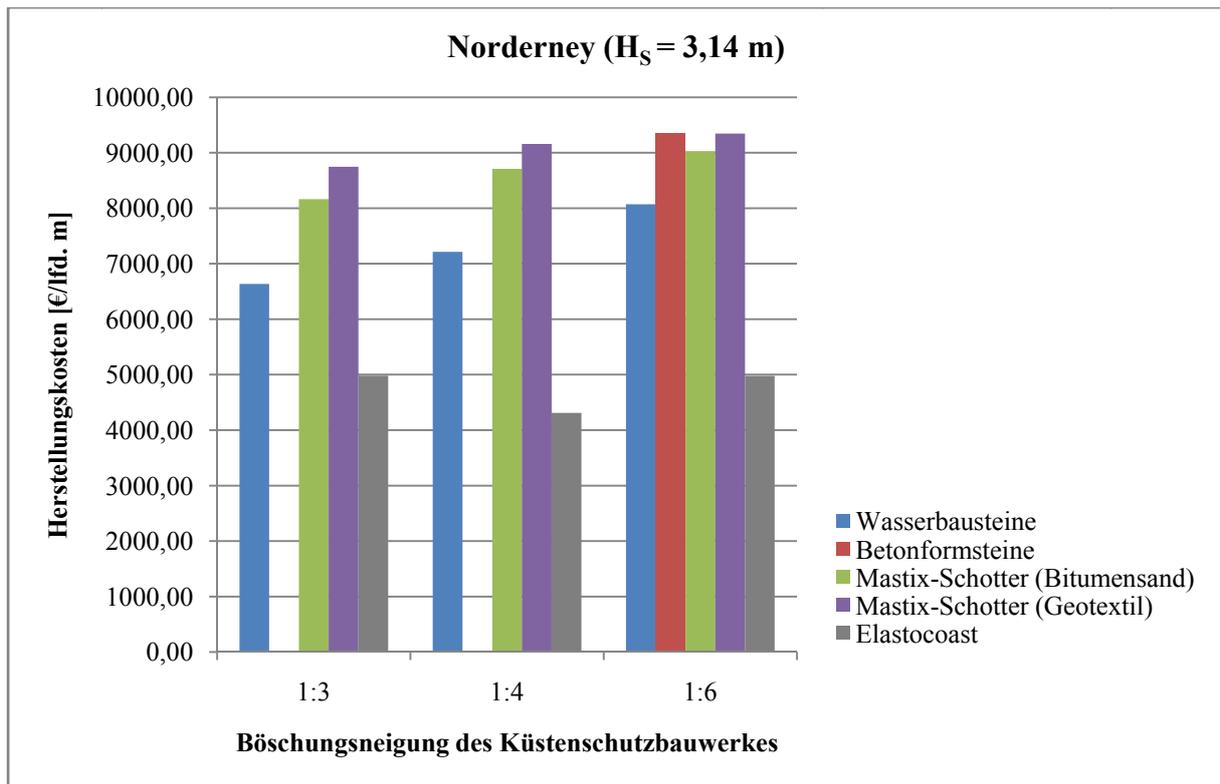
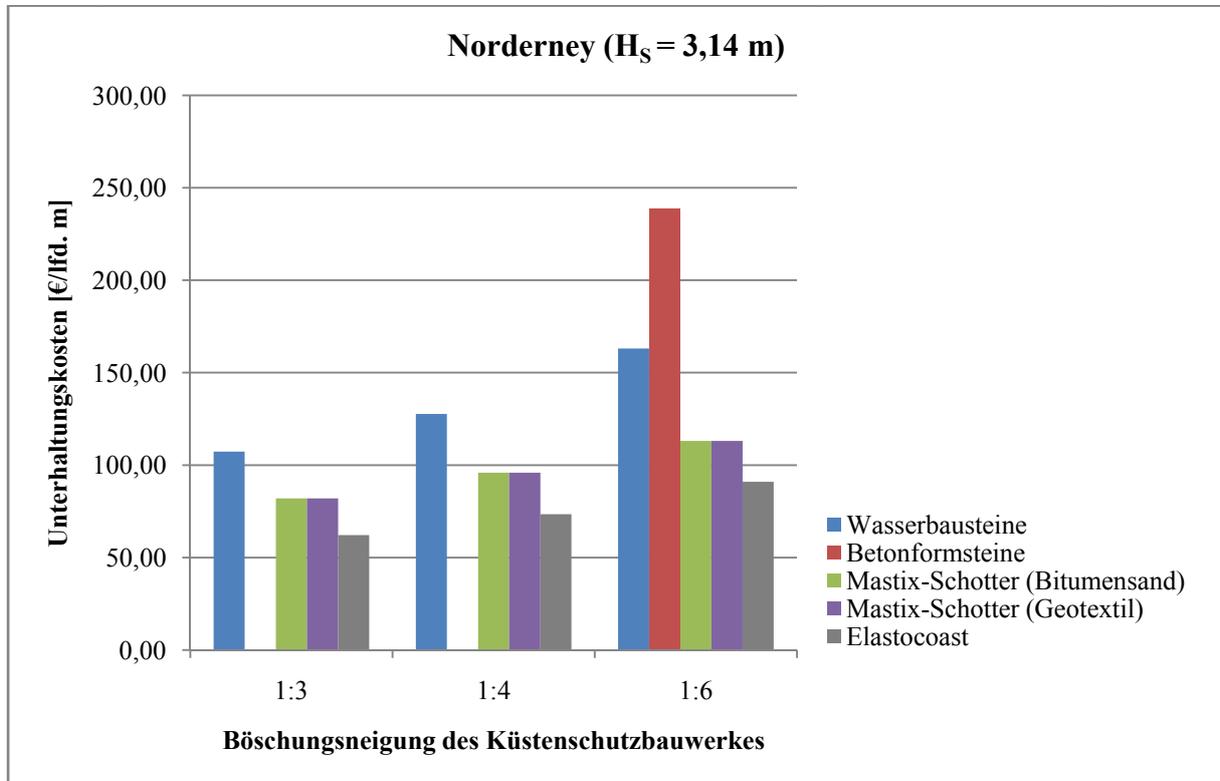


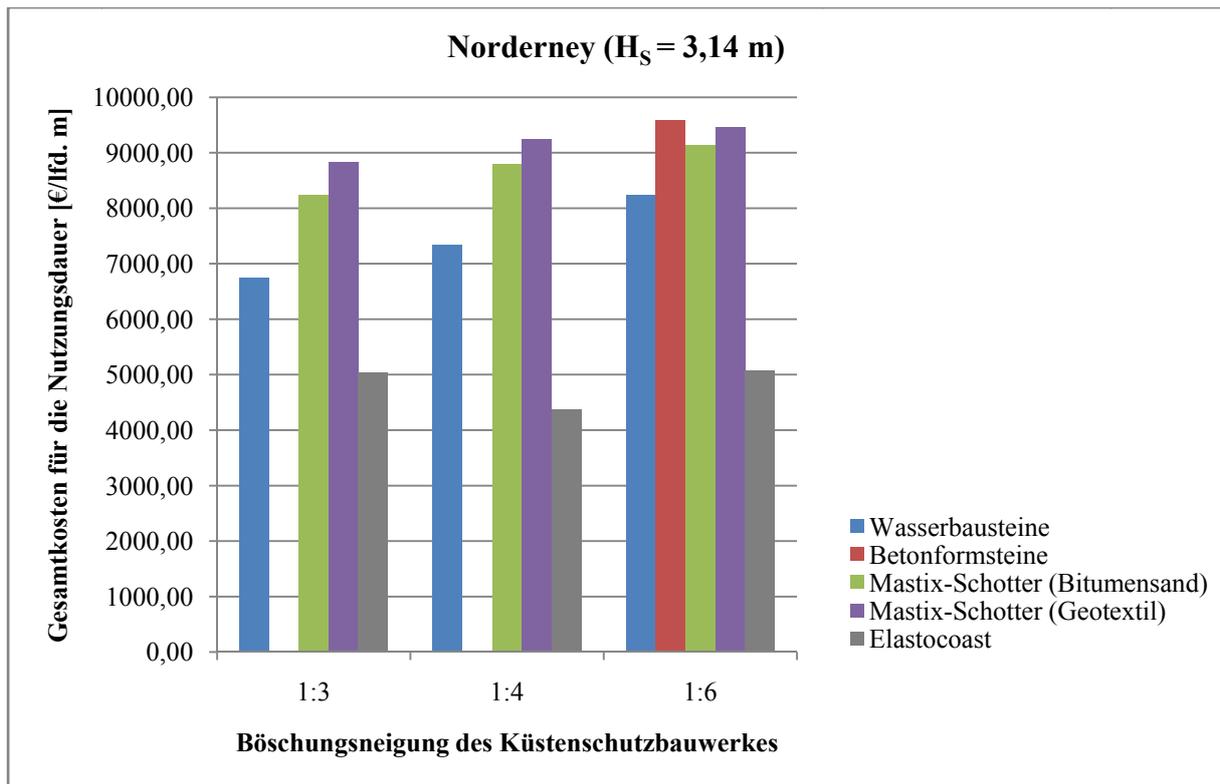
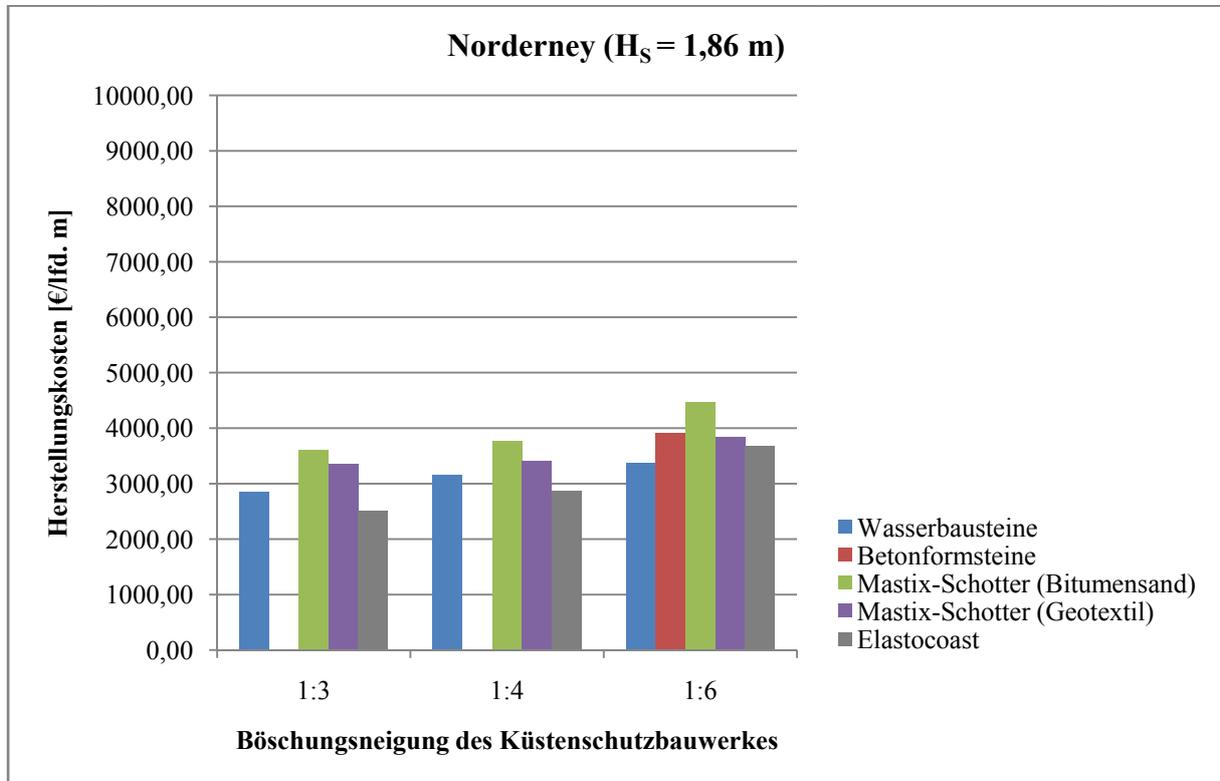
Abbildung 25: Gesamtkosten für die Seegangparameter von Borkum

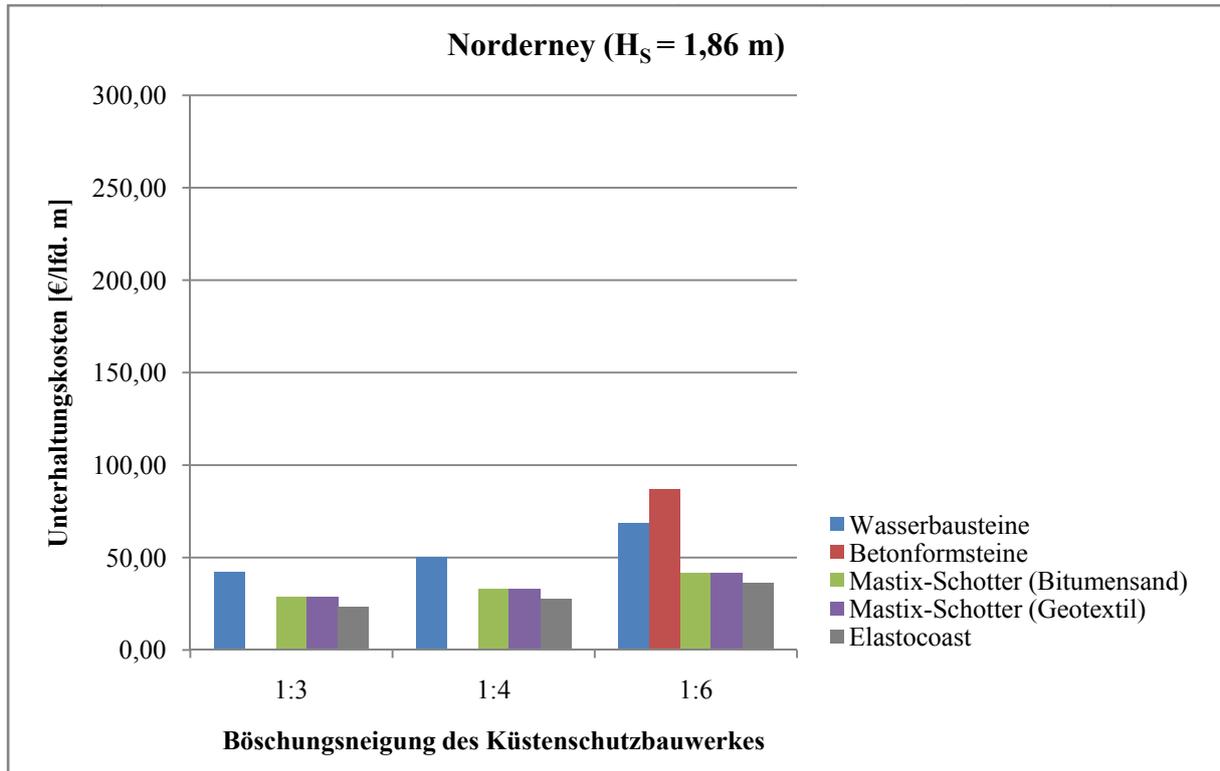
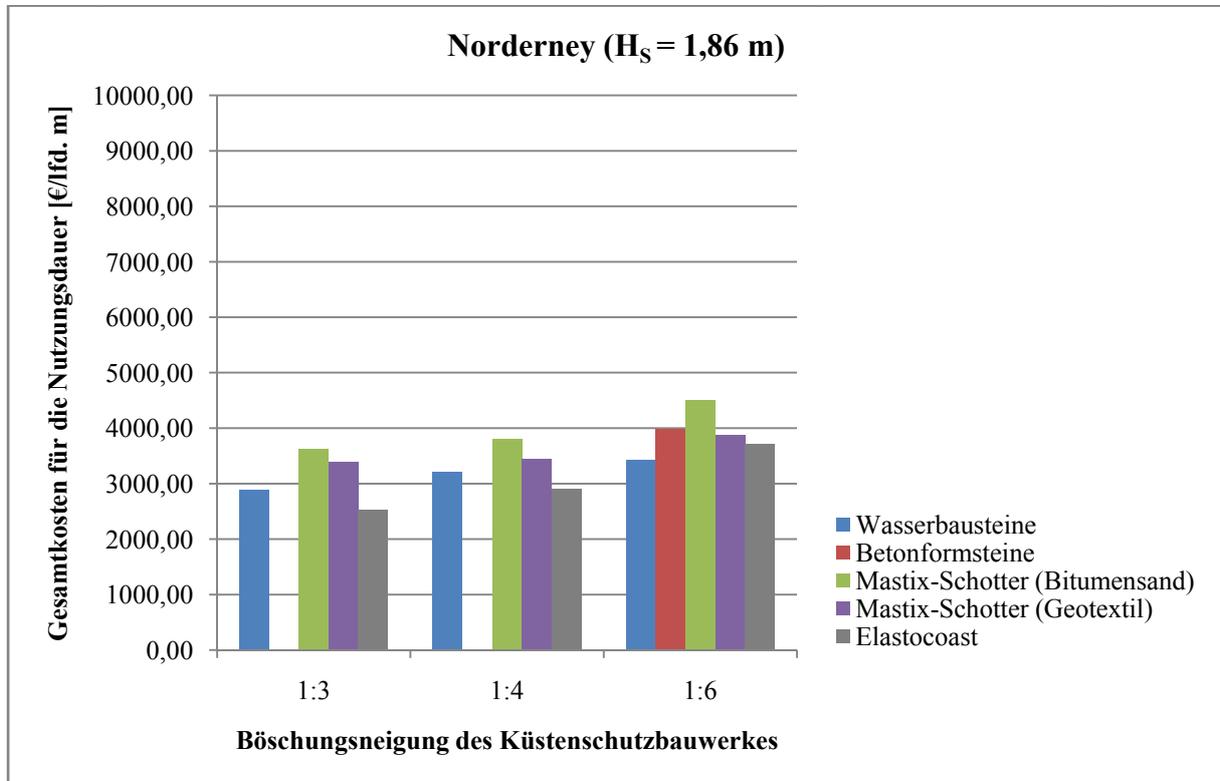

 Abbildung 26: Herstellungskosten für die Seegangparameter von Baltrum ( $H_s = 1,37\text{m}$ )

 Abbildung 27: Unterhaltungskosten für die Seegangparameter von Baltrum ( $H_s = 1,37\text{m}$ )


 Abbildung 28: Gesamtkosten für die Seegangparameter von Baltrum ( $H_s = 1,37$ m)

 Abbildung 29: Herstellungskosten für die Seegangparameter von Baltrum ( $H_s = 2,36$ m)


 Abbildung 30: Unterhaltungskosten für die Seegangparameter von Baltrum ( $H_s = 2,36$ m)

 Abbildung 31: Gesamtkosten für die Seegangparameter von Baltrum ( $H_s = 2,36$ m)


 Abbildung 32: Herstellungskosten für die Seegangparameter von Norderney ( $H_s = 3,14\text{m}$ )

 Abbildung 33: Unterhaltungskosten für die Seegangparameter von Norderney ( $H_s = 3,14\text{m}$ )


 Abbildung 34: Gesamtkosten für die Seegangparameter von Norderney ( $H_s = 3,14$ m)

 Abbildung 35: Herstellungskosten für die Seegangparameter von Norderney ( $H_s = 3,14$ m)


 Abbildung 36: Unterhaltungskosten für die Seegangparameter von Norderney ( $H_s = 1,86$ m)

 Abbildung 37: Gesamtkosten für die Seegangparameter von Norderney ( $H_s = 1,86$ m)

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Hauptziel dieser Diplomarbeit war die Bemessung und Kostenunteruntersuchung für das elastomere Deckwerk Elastocoast sowie anderen Deckwerkskonstruktionen für den Küstenschutz. Hierfür wurden die ausgewählten Deckwerkskonstruktionen zunächst kurz vorgestellt (Kapitel 3). Die Bemessung der einzelnen Deckwerke (Kapitel 7) erfolgte auf Basis der aktuellen Bemessungsgrundlagen für die verschiedenen Deckwerkskonstruktionen. Mit den Bemessungsergebnissen konnte eine dynamische Kostenvergleichsrechnung (Kapitel 8) für alle bemessene Deckwerke durchgeführt werden.

Die Ergebnisse aus der Kostenvergleichsuntersuchung zeigen, dass Elastocoast gegenüber anderen Deckwerkskonstruktionen in 11 von 15 Fällen aus wirtschaftlicher Sicht überlegen ist. In einigen Fällen sind die Kosten über die Gesamtnutzungsdauer 30% geringer als die zweitgünstigste Deckwerksalternative.

Bei den Untersuchungen in dieser Diplomarbeit lag der Schwerpunkt auf den Materialkosten der Deck- und Filterschichten in Abhängigkeit von mehreren Bauwerksgeometrien und Seeangangsparametern, wobei keine Transportkosten berücksichtigt worden sind. Diese sollten bei weiteren Untersuchungen im Bezug auf die Wirtschaftlichkeit mit einbezogen werden.

Für weitere Untersuchung bezüglich der Wirtschaftlichkeit und Kostenstruktur von Deckwerkskonstruktionen sollten auch eine einheitliche Bauwerkshöhen festgelegt werden. Die Bauwerkshöhe setzt sich aus dem Bemessungswasserstand und der Wellenauflaufhöhe zusammen. Die Wellenauflaufhöhe wiederum wird sehr stark von einem empirischen Böschungrauheitskoeffizienten beeinflusst. Für diesen empirischen Rauheitskoeffizienten sind viele verschiedene Werte in der Literatur angegeben.

Die in der Literatur angegebenen Materialeigenschaften von Elastocoast widersprechen sich teilweise. Um nachvollziehbare Bemessungen mit dem Material Elastocoast machen zu können sollten in der Zukunft ausgiebige Materialtest unternommen werden.

## Schrifttum

- Allsop, N.W.H.A.; McConnell, K.J. (1999): Revetment protection for coastal and shoreline structures exposed to wave attack. *Handbook of Coastal Engineering*, McGraw-Hill, pp. 2.1 -2.24.
- Battjes, J.A. (1974): Surf similarity. *Proceedings 14th International Conference Coastal Engineering (ICCE)*, ASCE, Volume 1, Copenhagen, Denmark, pp. 466-480.
- Bijlsma, E.; Voortman, H. (2009): Polyurethane Bonded Aggregate (PBA) revetments in coastal engineering. ARCADIS, Amersfoort, The Netherlands.
- BMI (2007): Handbuch für Organisationsuntersuchungen und Personalbedarfermittlung. Bundesministerium des Innern (BMI).
- Breuer, W. (2007): Investitionen I Entscheidungen bei Sicherheit. 3. Auflage Gabler.
- Bruce, T.; Van der Meer, J.W.; Franco, L.; Pearson, J.M. (2008): Overtopping performance of different armour units for rubble mound breakwaters. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, *Coastal Engineering*, No. 56, pp. 166-179.
- Carstensen, P. (2008): Investitionsrechnung kompakt - Eine anwendungsorientierte Einführung. 1. Auflage Gabler, S. 159.
- CIRIA/CUR/CETMEF (2007): The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering. CIRIA / CUR, CIRIA C683, 2nd edition, London, 1236 p.
- CUR/TAW (1995): Design manual for pitched slope protection. Gouda, The Netherlands: Balkema, 297 p.
- DIN 1045-2 (2001): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton (2001-07), Teil 2: Deutsche Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 mit DIN EN 206-1/-A1.
- DIN EN 206-1 (2001): Beton-Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität (2001-07) mit DIN EN 206-1/A1.
- DIN EN 13383-1 (2009): Wasserbaustein, Teil 1: Anforderungen (2009-03).
- EAAW (2007): Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau (Entwurf), Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT). 6. Ausgabe, S. 107.
- EAK (1993): Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken. Heide i. Holst., Germany: *Die Küste. Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee*, Heft 55, Boyens & Co., S. 4-542.
- EAK (2002): Empfehlungen für Küstenschutzwerke. Heide i. Holst., Germany: *Die Küste. Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee*, Heft 65, Boyens & Co., 589 S.
- EurOtop (2007): European Overtopping Manual. Pullen, T.; Allsop, N.W.H.; Bruce, T.; Korstenhaus, A.; Schüttrumpf, H.; Van der Meer, J.W.; Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen: *Die Küste*, Heft 73, [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com).
- Fleischer, P.; Kayser, J. (2006): Analyse bestehender Deckwerke für den Uferschutz bei Binnenwasserstrassen. 31. PIANC Conference, Estoril, S. 51 - 56.

- Führböter, A. (1991): Wellenbelastung von Deich- und Deckwerksböschungen. Hamburg, Germany: HTG, *Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft*, Bd. 46, S. 225-282.
- Götz, U. (2008): Investitionsrechnung Modelle und Analyse zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 6. Auflage Springer.
- Gu, D. (2007): Hydraulic properties of PUR-revetments compared to those of open stone asphalt revetments. *Delft University of Technology*, Delft, The Netherlands, 153 pp.
- Klein Breteler, M.; Bezuijen, A. (1998): Design Criteria for Placed Block Revetments. In: *Pilarczyk, K.W. (ed.): DIKES AND REVETMENTS Design, Maintenance and Safety Assessment* A.A. Balkema.
- Kruschwitz, L. (2008): Investitionsrechnung. 11. Auflage, Oldenburger.
- LAWA (2005): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnung (KVR-Leitlinien). Empfehlungen Wasserwirtschaftliche Grundlagen, 7. Auflage, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA).
- McConnell, K.J. (1998): Revetment systems against wave attack - a design manual. London, U.K.: Thomas Telford, 168 p.
- Neumann, D.; Weinbrenner, U.; Hestermann, U.; Rongen, L. (2006): Fricke/Knöll Baukonstruktionslehre 1, 34. Auflage. B.G. Teubner Verlag.
- Oumeraci, H. (1989): Beanspruchung von Betonplattendeckwerken und ihre Berücksichtigung bei der Bemessung. Karlsruhe, Germany: *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau*, Nr. 66.
- Oumeraci, H. (2001): Küsteningenieurwesen. In: *Lecher, K. and et al. (eds.): Taschenbuch der Wasserwirtschaft*, Berlin, Germany: Paul Parey Verlag, Kapitel 12, S. 657-743.
- Oumeraci, H.; Kortenhaus, A. (2007): Theoretische und versuchstechnische Bearbeitung des Wellenüberlaufs und der Wellenbelastung des Deckwerks auf Baltrum. Berichte Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, Nr. 953, Vorentwurf, Braunschweig, Germany, 59 S.
- Oumeraci, H.; Kortenhaus, A.; Brühl, M.; Brinkmann, F.; Lambrecht, H.-J. (2008): Theoretische und versuchstechnische Bearbeitung der Wellenüberlauf- und Belastungssituation der Strandmauer am Weststrand von Norderney; Nordewest; . Berichte Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, Nr. 963, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 199 pp.
- Oumeraci, H.; Kudella, M.; Staal, T. (2009a): Failure of the Elastocoast revetment during the large-scale model tests in GWK. Berichte Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, Nr. 987, Braunschweig, Germany.
- Oumeraci, H.; Pfoertner, S.; Kortenhaus, A. (2009b): Borkum - Theoretische Bearbeitung der Wellenauf- und Wellenüberlastung des Deckwerks im Abschnitt zwischen Buhne 16 und Buhne 25. Berichte Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, Nr. 981, Braunschweig, Germany.
- Oumeraci, H.; Staal, T.; Pfoertner, S.; Kudella, M. (2009c): ELASTOCOAST Revetment - Scale Model Study in the Large Wave Flume (GWK) - . Berichte Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, Nr. 988, Braunschweig, Germany.

- Poggensee, K. (2009): Investitionsrechnung Grundlagen-Aufgaben-Lösungen. 1. Ausgabe Gabler, S. 401.
- Schönian, E. (1999): The Shell Bitumen Hydraulic Engineering Handbook. Shell International Petroleum Company Ltd, p. 495.
- Schüttrumpf, H. (2001): Hydrodynamische Belastung der Binnenböschung von Seedeichen durch Wellenüberlauf. Ph.D. thesis, *Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig (05.02.2001)*, Braunschweig, Germany.
- Staal, T. (2008): Vorbemessung eines innovativen Deckwerks für den Küstenschutz. *Diplomarbeit am Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Fachbereich Bauingenieurwesen, Technische Universität Braunschweig*, Braunschweig, Germany, 83 S., 7 Anhänge.
- Stephan, H.-J. (1981): Über Schäden an Seedeichen durch Wellen- und Druckschlagbelastung. Ph.D. thesis, *Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig (02.07.1981)*, Braunschweig, Germany.
- TAW (1985): The use of asphalt in hydraulic engineering. Technical Advisory Committee on Waterdefence, no. 37, The Hague, The Netherlands, 308 p.
- TAW (2002): Wave run-up and overtopping at dikes. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), Den Haag, The Netherlands, 63 p.
- Thorenz, F. (2009): Sturmflutschutz für die Insel Norderney - Planung und Umsetzung moderner technischer Maßnahmen für einen bedeutsamen Tourismusstandort. *50. BWK-Fortbildungslehrgang*, Hannover.

## Anlage A: Bemessung Wellenauflaufhöhe

$\gamma'_{\text{Rauheit}}$  eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1,0}$ [-]	$\gamma_{\text{Rauheit}}$ $\xi_{m-1,0} < 1,8$ [-]	$\gamma_{\text{Rauheit}}$ $\xi_{m-1,0} = 10$ [-]	$\gamma'_{\text{Rauheit}}$ [-]
Borkum	2,91	1,71	0,40	1,00	0,40
Baltrum	1,37	2,57	0,40	1,00	0,46
Baltrum	2,36	2,45	0,40	1,00	0,45
Norderney	3,14	2,04	0,40	1,00	0,42
Norderney	1,86	1,68	0,40	1,00	0,40

$\gamma'_{\text{Rauheit}}$  eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1,0}$ [-]	$\gamma_{\text{Rauheit}}$ $\xi_{m-1,0} < 1,8$ [-]	$\gamma_{\text{Rauheit}}$ $\xi_{m-1,0} = 10$ [-]	$\gamma'_{\text{Rauheit}}$ [-]
Borkum	2,91	1,28	0,40	1,00	0,40
Baltrum	1,37	1,93	0,40	1,00	0,41
Baltrum	2,36	1,84	0,40	1,00	0,40
Norderney	3,14	1,53	0,40	1,00	0,40
Norderney	1,86	1,26	0,40	1,00	0,40

$R'_{u2\%}$  eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1,0}$ [-]	$\gamma'_{\text{Rauheit}}$ [-]	$R_{u2\%}$ [m]	$R_{u2\%,\text{max}}$ [m]	$R'_{u2\%}$ [m]
Borkum	2,91	1,71	0,40	3,48	3,58	3,48
Baltrum	1,37	2,57	0,46	2,81	2,06	2,06
Baltrum	2,36	2,45	0,45	4,54	3,47	3,47
Norderney	3,14	2,04	0,42	4,70	4,17	4,17
Norderney	1,86	1,68	0,40	2,19	2,28	2,19

$R'_{u2\%}$  eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1,0}$ [-]	$\gamma'_{\text{Rauheit}}$ [-]	$R_{u2\%}$ [m]	$R_{u2\%,\text{max}}$ [m]	$R'_{u2\%}$ [m]
Borkum	2,91	1,28	0,40	2,61	3,36	2,61
Baltrum	1,37	1,93	0,41	1,89	1,76	1,76
Baltrum	2,36	1,84	0,40	3,06	2,97	2,97
Norderney	3,14	1,53	0,40	3,37	3,78	3,37
Norderney	1,86	1,26	0,40	1,64	2,14	1,64

$R'_{u2\%}$  eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1,0}$ [-]	$\gamma'_{\text{Rauheit}}$ [-]	$R_{u2\%}$ [m]	$R_{u2\%,\text{max}}$ [m]	$R'_{u2\%}$ [m]
Borkum	2,91	0,85	0,40	1,74	2,99	1,74
Baltrum	1,37	1,28	0,40	1,23	1,58	1,23
Baltrum	2,36	1,23	0,40	2,03	2,70	2,03
Norderney	3,14	1,02	0,40	2,25	3,41	2,25
Norderney	1,86	0,84	0,40	1,09	1,90	1,09

$R'_{u2\%}$  eines Deckwerks aus gesetzten BFS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1,0}$ [-]	$\gamma'_{Rauheit}$ [-]	$R_{u2\%}$ [m]	$R_{u2\%,max}$ [m]	$R'_{u2\%}$ [m]
Borkum	2,91	1,71	1,00	8,70	8,95	8,70
Baltrum	1,37	2,57	1,00	6,16	4,52	4,52
Baltrum	2,36	2,45	1,00	10,13	7,74	7,74
Norderney	3,14	2,04	1,00	11,24	9,99	9,99
Norderney	1,86	1,68	1,00	5,47	5,70	5,47

$R'_{u2\%}$  eines Deckwerks aus gesetzten BFS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1,0}$ [-]	$\gamma'_{Rauheit}$ [-]	$R_{u2\%}$ [m]	$R_{u2\%,max}$ [m]	$R'_{u2\%}$ [m]
Borkum	2,91	1,28	1,00	6,53	8,40	6,53
Baltrum	1,37	1,93	1,00	4,62	4,31	4,31
Baltrum	2,36	1,84	1,00	7,60	7,36	7,36
Norderney	3,14	1,53	1,00	8,43	9,45	8,43
Norderney	1,86	1,26	1,00	4,10	5,35	4,10

$R'_{u2\%}$  eines Deckwerks aus gesetzten BFS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1,0}$ [-]	$\gamma'_{Rauheit}$ [-]	$R_{u2\%}$ [m]	$R_{u2\%,max}$ [m]	$R'_{u2\%}$ [m]
Borkum	2,91	0,85	1,00	4,35	7,48	4,35
Baltrum	1,37	1,28	1,00	3,08	3,96	3,08
Baltrum	2,36	1,23	1,00	5,07	6,74	5,07
Norderney	3,14	1,02	1,00	5,62	8,53	5,62
Norderney	1,86	0,84	1,00	2,73	4,75	2,73

$\gamma'_{Rauheit}$  eines Deckwerks aus MS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1,0}$ [-]	$\gamma_{Rauheit}$ $\xi_{m-1,0} < 1,8$ [-]	$\gamma_{Rauheit}$ $\xi_{m-1,0} = 10$ [-]	$\gamma'_{Rauheit}$ [-]
Borkum	2,91	1,71	0,90	1,00	0,90
Baltrum	1,37	2,57	0,90	1,00	0,91
Baltrum	2,36	2,45	0,90	1,00	0,91
Norderney	3,14	2,04	0,90	1,00	0,90
Norderney	1,86	1,68	0,90	1,00	0,90

$\gamma'_{Rauheit}$  eines Deckwerks aus MS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1,0}$ [-]	$\gamma_{Rauheit}$ $\xi_{m-1,0} < 1,8$ [-]	$\gamma_{Rauheit}$ $\xi_{m-1,0} = 10$ [-]	$\gamma'_{Rauheit}$ [-]
Borkum	2,91	1,28	0,90	1,00	0,90
Baltrum	1,37	1,93	0,90	1,00	0,90
Baltrum	2,36	1,84	0,90	1,00	0,90
Norderney	3,14	1,53	0,90	1,00	0,90
Norderney	1,86	1,26	0,90	1,00	0,90

$R'_{u2\%}$  eines Deckwerks aus MS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1,0}$ [-]	$\gamma'_{\text{Rauheit}}$ [-]	$R_{u2\%}$ [m]	$R_{u2\%,\text{max}}$ [m]	$R'_{u2\%}$ [m]
Borkum	2,91	1,71	0,90	7,83	8,06	7,83
Baltrum	1,37	2,57	0,91	5,60	4,11	4,11
Baltrum	2,36	2,45	0,91	9,20	7,03	7,03
Norderney	3,14	2,04	0,90	10,15	9,02	9,02
Norderney	1,86	1,68	0,90	4,92	5,13	4,92

$R'_{u2\%}$  eines Deckwerks aus MS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1,0}$ [-]	$\gamma'_{\text{Rauheit}}$ [-]	$R_{u2\%}$ [m]	$R_{u2\%,\text{max}}$ [m]	$R'_{u2\%}$ [m]
Borkum	2,91	1,28	0,90	5,88	7,56	5,88
Baltrum	1,37	1,93	0,90	4,16	3,89	3,89
Baltrum	2,36	1,84	0,90	6,84	6,63	6,63
Norderney	3,14	1,53	0,90	7,58	8,50	7,58
Norderney	1,86	1,26	0,90	3,69	4,81	3,69

$R'_{u2\%}$  eines Deckwerks aus MS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1,0}$ [-]	$\gamma'_{\text{Rauheit}}$ [-]	$R_{u2\%}$ [m]	$R_{u2\%,\text{max}}$ [m]	$R'_{u2\%}$ [m]
Borkum	2,91	0,85	0,90	3,92	6,73	3,92
Baltrum	1,37	1,28	0,90	2,77	3,56	2,77
Baltrum	2,36	1,23	0,90	4,56	6,07	4,56
Norderney	3,14	1,02	0,90	5,06	7,68	5,06
Norderney	1,86	0,84	0,90	2,46	4,28	2,46

$\gamma'_{\text{Rauheit}}$  eines Deckwerks aus EC (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1,0}$ [-]	$\gamma_{\text{Rauheit}}$ $\xi_{m-1,0} < 1,8$ [-]	$\gamma_{\text{Rauheit}}$ $\xi_{m-1,0} = 10$ [-]	$\gamma'_{\text{Rauheit}}$ [-]
Borkum	2,91	1,71	0,55	1,00	0,55
Baltrum	1,37	2,57	0,55	1,00	0,59
Baltrum	2,36	2,45	0,55	1,00	0,59
Norderney	3,14	2,04	0,55	1,00	0,56
Norderney	1,86	1,68	0,55	1,00	0,55

$\gamma'_{\text{Rauheit}}$  eines Deckwerks aus EC (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1,0}$ [-]	$\gamma_{\text{Rauheit}}$ $\xi_{m-1,0} < 1,8$ [-]	$\gamma_{\text{Rauheit}}$ $\xi_{m-1,0} = 10$ [-]	$\gamma'_{\text{Rauheit}}$ [-]
Borkum	2,91	1,28	0,55	1,00	0,55
Baltrum	1,37	1,93	0,55	1,00	0,56
Baltrum	2,36	1,84	0,55	1,00	0,55
Norderney	3,14	1,53	0,55	1,00	0,55
Norderney	1,86	1,26	0,55	1,00	0,55

$\gamma'_{\text{Rauheit}}$  eines Deckwerks aus EC (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1.0}$ [-]	$\gamma_{\text{Rauheit}}$ $\xi_{m-1.0} < 1,8$ [-]	$\gamma_{\text{Rauheit}}$ $\xi_{m-1.0} = 10$ [-]	$\gamma'_{\text{Rauheit}}$ [-]
Borkum	2,91	0,85	0,55	1,00	0,55
Baltrum	1,37	1,28	0,55	1,00	0,55
Baltrum	2,36	1,23	0,55	1,00	0,55
Norderney	3,14	1,02	0,55	1,00	0,55
Norderney	1,86	0,84	0,55	1,00	0,55

$R'_{u2\%}$  eines Deckwerks aus EC (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1.0}$ [-]	$\gamma'_{\text{Rauheit}}$ [-]	$R_{u2\%}$ [m]	$R_{u2\%.max}$ [m]	$R'_{u2\%}$ [m]
Borkum	2,91	1,71	0,55	4,79	4,92	4,79
Baltrum	1,37	2,57	0,59	3,65	2,68	2,68
Baltrum	2,36	2,45	0,59	5,94	4,53	4,53
Norderney	3,14	2,04	0,56	6,33	5,63	5,63
Norderney	1,86	1,68	0,55	3,01	3,14	3,01

$R'_{u2\%}$  eines Deckwerks aus EC (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1.0}$ [-]	$\gamma'_{\text{Rauheit}}$ [-]	$R_{u2\%}$ [m]	$R_{u2\%.max}$ [m]	$R'_{u2\%}$ [m]
Borkum	2,91	1,28	0,55	3,59	4,62	3,59
Baltrum	1,37	1,93	0,56	2,57	2,40	2,40
Baltrum	2,36	1,84	0,55	4,20	4,07	4,07
Norderney	3,14	1,53	0,55	4,64	5,19	4,64
Norderney	1,86	1,26	0,55	2,26	2,94	2,26

$R'_{u2\%}$  eines Deckwerks aus EC (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{m-1.0}$ [-]	$\gamma'_{\text{Rauheit}}$ [-]	$R_{u2\%}$ [m]	$R_{u2\%.max}$ [m]	$R'_{u2\%}$ [m]
Borkum	2,91	0,85	0,55	2,39	4,11	2,39
Baltrum	1,37	1,28	0,55	1,69	2,18	1,69
Baltrum	2,36	1,23	0,55	2,79	3,71	2,79
Norderney	3,14	1,02	0,55	3,09	4,69	3,09
Norderney	1,86	0,84	0,55	1,50	2,61	1,50

## Anlage B: Bemessung Deckwerksdicke Wasserbausteine

Gewicht eines Steines mittleren Durchmessers für die Deckschicht (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$k_D$ [-]	$\rho_{WBS}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\cot \alpha$ [-]	$W_{50,Deckschicht}$ [N]
Borkum	2,91	2,00	2650	1025	9,81	3,00	26795,02
Baltrum	1,37	2,00	2650	1025	9,81	3,00	2796,00
Baltrum	2,36	2,00	2650	1025	9,81	3,00	14292,60
Norderney	3,14	2,00	2650	1025	9,81	3,00	33663,87
Norderney	1,86	2,00	2650	1025	9,81	3,00	6997,03

Deckschichtdicke eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$W_{50,Deckschicht}$ [N]	$M_{50,Deckschicht}$ [kg]	$D_{50,Deckschicht}$ [m]	$k_\Delta$ [-]	$n$ [-]	$t_{Deckschicht}$ [m]
Borkum	2,91	26795,02	2731,40	1,01	1,15	2,00	2,32
Baltrum	1,37	2796,00	285,02	0,48	1,15	2,00	1,09
Baltrum	2,36	14292,60	1456,94	0,82	1,15	2,00	1,88
Norderney	3,14	33663,87	3431,59	1,09	1,15	2,00	2,51
Norderney	1,86	6997,03	713,26	0,65	1,15	2,00	1,49

Filterschichtdicke eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$W_{50,Deckschicht}$ [N]	$W_{50,Filterschicht}$ [N]	$M_{50,Filterschicht}$ [kg]	$D_{50,Filterschicht}$ [m]	$t_{Filterschicht}$ [m]
Borkum	2,91	26795,02	1339,75	136,57	0,37	1,12
Baltrum	1,37	2796,00	139,80	14,25	0,18	0,53
Baltrum	2,36	14292,60	714,63	72,85	0,30	0,91
Norderney	3,14	33663,87	1683,19	171,58	0,40	1,20
Norderney	1,86	6997,03	349,85	35,66	0,24	0,71

Tabelle 55: Gewicht eines Steines mittleren Durchmessers für die Deckschicht (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$k_D$ [-]	$\rho_{WBS}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\cot \alpha$ [-]	$W_{50,Deckschicht}$ [N]
Borkum	2,91	2,00	2650	1025	9,81	4,00	20096,27
Baltrum	1,37	2,00	2650	1025	9,81	4,00	2097,00
Baltrum	2,36	2,00	2650	1025	9,81	4,00	10719,45
Norderney	3,14	2,00	2650	1025	9,81	4,00	25247,90
Norderney	1,86	2,00	2650	1025	9,81	4,00	5247,78

Deckschichtdicke eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$W_{50,Deckschicht}$ [N]	$M_{50,Deckschicht}$ [kg]	$D_{50,Deckschicht}$ [m]	$k_{\Delta}$ [-]	$n$ [-]	$t_{Deckschicht}$ [m]
Borkum	2,91	20096,27	2048,55	0,92	1,15	2,00	2,11
Baltrum	1,37	2097,00	213,76	0,43	1,15	2,00	0,99
Baltrum	2,36	10719,45	1092,71	0,74	1,15	2,00	1,71
Norderney	3,14	25247,90	2573,69	0,99	1,15	2,00	2,28
Norderney	1,86	5247,78	534,94	0,59	1,15	2,00	1,35

Filterschichtdicke eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$W_{50,Deckschicht}$ [N]	$W_{50,Filterschicht}$ [N]	$M_{50,Filterschicht}$ [kg]	$D_{50,Filterschicht}$ [m]	$t_{Filterschicht}$ [m]
Borkum	2,91	20096,27	1004,81	102,43	0,34	1,01
Baltrum	1,37	2097,00	104,85	10,69	0,16	0,48
Baltrum	2,36	10719,45	535,97	54,64	0,27	0,82
Norderney	3,14	25247,90	1262,40	128,68	0,36	1,09
Norderney	1,86	5247,78	262,39	26,75	0,22	0,65

Gewicht eines Steines mittleren Durchmessers für die Deckschicht (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$k_D$ [-]	$\rho_{WBS}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	$\cot \alpha$ [-]	$W_{50,Deckschicht}$ [N]
Borkum	2,91	2,00	2650	1025	9,81	6,00	13397,51
Baltrum	1,37	2,00	2650	1025	9,81	6,00	1398,00
Baltrum	2,36	2,00	2650	1025	9,81	6,00	7146,30
Norderney	3,14	2,00	2650	1025	9,81	6,00	16831,94
Norderney	1,86	2,00	2650	1025	9,81	6,00	3498,52

Deckschichtdicke eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$W_{50,Deckschicht}$ [N]	$M_{50,Deckschicht}$ [kg]	$D_{50,Deckschicht}$ [m]	$k_{\Delta}$ [-]	$n$ [-]	$t_{Deckschicht}$ [m]
Borkum	2,91	13397,51	1365,70	0,80	1,15	2,00	1,84
Baltrum	1,37	1398,00	142,51	0,38	1,15	2,00	0,87
Baltrum	2,36	7146,30	728,47	0,65	1,15	2,00	1,50
Norderney	3,14	16831,94	1715,79	0,87	1,15	2,00	1,99
Norderney	1,86	3498,52	356,63	0,51	1,15	2,00	1,18

Filterschichtdicke eines Deckwerks aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$W_{50,Deckschicht}$ [N]	$W_{50,Filterschicht}$ [N]	$M_{50,Filterschicht}$ [kg]	$D_{50,Filterschicht}$ [m]	$t_{Filterschicht}$ [m]
Borkum	2,91	13397,51	669,88	68,28	0,30	0,89
Baltrum	1,37	1398,00	69,90	7,13	0,14	0,42
Baltrum	2,36	7146,30	357,31	36,42	0,24	0,72
Norderney	3,14	16831,94	841,60	85,79	0,32	0,96
Norderney	1,86	3498,52	174,93	17,83	0,19	0,57

## Anlage C: Bemessung Deckwerksdicke Mastix-Schotter

Druckschlag P bei einer Böschungsneigung 1:3

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	b [m]	$K_u$ [-]	$\rho_w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	g [m/s <sup>2</sup> ]	$P_{max}$ [N/m <sup>2</sup> ]	P [N/m]
Borkum	2,91	1,16	2,7	1025	9,81	79004,10	91960,77
Baltrum	1,37	0,55	2,7	1025	9,81	37194,37	20382,51
Baltrum	2,36	0,94	2,7	1025	9,81	64072,05	60484,02
Norderney	3,14	1,26	2,7	1025	9,81	85248,41	107072,00
Norderney	1,86	0,74	2,7	1025	9,81	50497,47	37570,11

Druckschlag P bei einer Böschungsneigung 1:4

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	b [m]	$K_u$ [-]	$\rho_w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	g [m/s <sup>2</sup> ]	$P_{max}$ [N/m <sup>2</sup> ]	P [N/m]
Borkum	2,91	1,16	2,3	1025	9,81	67299,79	78336,95
Baltrum	1,37	0,55	2,3	1025	9,81	31684,09	17362,88
Baltrum	2,36	0,94	2,3	1025	9,81	54579,90	51523,42
Norderney	3,14	1,26	2,3	1025	9,81	72619,02	91209,48
Norderney	1,86	0,74	2,3	1025	9,81	43016,36	32004,17

Druckschlag P bei einer Böschungsneigung 1:6

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	b [m]	$K_u$ [-]	$\rho_w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	g [m/s <sup>2</sup> ]	$P_{max}$ [N/m <sup>2</sup> ]	P [N/m]
Borkum	2,91	1,16	2	1025	9,81	58521,56	68119,09
Baltrum	1,37	0,55	2	1025	9,81	27551,39	15098,16
Baltrum	2,36	0,94	2	1025	9,81	47460,78	44802,98
Norderney	3,14	1,26	2	1025	9,81	63146,97	79312,59
Norderney	1,86	0,74	2	1025	9,81	37405,53	27829,71

Maximal Biegespannung  $\sigma_b$  durch Ermüdung eines Deckwerkes aus MS

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	$t_s$ [s]	$n_s$ [-]	$\sigma_b$ [N/m <sup>2</sup> ]
Borkum	2,91	86400	5503	$3,85 \cdot 10^5$
Baltrum	1,37	86400	7305	$3,67 \cdot 10^5$
Baltrum	2,36	86400	5954	$3,80 \cdot 10^5$
Norderney	3,14	86400	5348	$3,83 \cdot 10^5$
Norderney	1,86	86400	6512	$3,75 \cdot 10^5$

## Anlage D: Bemessung Deckwerksdicke Elastocoast

Druckschlag P bei einer Böschungsneigung 1:3

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	b [m]	$K_u$ [-]	$\rho_w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	g [m/s <sup>2</sup> ]	$P_{max}$ [N/m <sup>2</sup> ]	P [N/m]
Borkum	2,91	1,16	2,7	1025	9,81	79004,10	91960,77
Baltrum	1,37	0,55	2,7	1025	9,81	37194,37	20382,51
Baltrum	2,36	0,94	2,7	1025	9,81	64072,05	60484,02
Norderney	3,14	1,26	2,7	1025	9,81	85248,41	107072,00
Norderney	1,86	0,74	2,7	1025	9,81	50497,47	37570,11

Druckschlag P bei einer Böschungsneigung 1:4

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	b [m]	$K_u$ [-]	$\rho_w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	g [m/s <sup>2</sup> ]	$P_{max}$ [N/m <sup>2</sup> ]	P [N/m]
Borkum	2,91	1,16	2,3	1025	9,81	67299,79	78336,95
Baltrum	1,37	0,55	2,3	1025	9,81	31684,09	17362,88
Baltrum	2,36	0,94	2,3	1025	9,81	54579,90	51523,42
Norderney	3,14	1,26	2,3	1025	9,81	72619,02	91209,48
Norderney	1,86	0,74	2,3	1025	9,81	43016,36	32004,17

Druckschlag P bei einer Böschungsneigung 1:6

Küstenabschnitt	$H_{m0}$ [m]	b [m]	$K_u$ [-]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	g [m/s <sup>2</sup> ]	$P_{max}$ [N/m <sup>2</sup> ]	P [N/m]
Borkum	2,91	1,16	2	1025	9,81	58521,56	68119,09
Baltrum	1,37	0,55	2	1025	9,81	27551,39	15098,16
Baltrum	2,36	0,94	2	1025	9,81	47460,78	44802,98
Norderney	3,14	1,26	2	1025	9,81	63146,97	79312,59
Norderney	1,86	0,74	2	1025	9,81	37405,53	27829,71

## Anlage E: Kostenermittlung Wasserbausteine

Mengenermittlung Sand für ein Deckwerk aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	h' <sub>Bauwerk</sub> [m]	L' <sub>Bauwerk</sub> [m]	Sand [m <sup>3</sup> /lfd. m]	Sand <sub>v</sub> [t/lfd. m]
Borkum	2,91	5,04	15,11	38,04	68,47
Baltrum	1,37	5,46	16,37	44,67	80,40
Baltrum	2,36	5,62	16,87	47,45	85,42
Norderney	3,14	5,26	15,79	41,54	74,76
Norderney	1,86	4,87	14,61	35,57	64,02

Mengenermittlung Sand für ein Deckwerk aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	h' <sub>Bauwerk</sub> [m]	L' <sub>Bauwerk</sub> [m]	Sand [m <sup>3</sup> /lfd. m]	Sand <sub>v</sub> [t/lfd. m]
Borkum	2,91	4,57	18,28	41,77	75,18
Baltrum	1,37	5,35	21,39	57,21	102,97
Baltrum	2,36	5,45	21,82	59,51	107,12
Norderney	3,14	4,90	19,58	47,92	86,26
Norderney	1,86	4,58	18,32	41,97	75,55

Mengenermittlung Sand für ein Deckwerk aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	h' <sub>Bauwerk</sub> [m]	L' <sub>Bauwerk</sub> [m]	Sand [m <sup>3</sup> /lfd. m]	Sand <sub>v</sub> [t/lfd. m]
Borkum	2,91	4,15	24,92	51,74	93,14
Baltrum	1,37	5,03	30,17	75,87	136,57
Baltrum	2,36	4,88	29,29	71,50	128,71
Norderney	3,14	4,26	25,57	54,46	98,04
Norderney	1,86	4,32	25,95	56,10	100,98

Mengenermittlung WBS für ein Deckwerk aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	N <sub>Deckschicht</sub> [Stück/lfd. m]	N <sub>Filterschicht</sub> [Stück/lfd. m]	M <sub>50,Deckschicht</sub> [t/Stück]	M <sub>50,Filterschicht</sub> [t/Stück]	WBS <sub>Deckschicht</sub> [t/lfd. m]	WBS <sub>Deckschicht</sub> [t/lfd. m]
Borkum	2,91	38,90	429,88	2,73	0,14	106,24	58,71
Baltrum	1,37	145,15	1604,18	0,29	0,01	41,37	22,86
Baltrum	2,36	58,48	646,32	1,46	0,07	85,20	47,08
Norderney	3,14	35,38	391,08	3,43	0,17	121,43	67,10
Norderney	1,86	79,00	873,09	0,71	0,04	56,35	31,14

Mengenermittlung WBS für ein Deckwerk aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	N <sub>Deckschicht</sub> [Stück/lfd. m]	N <sub>Filterschicht</sub> [Stück/lfd. m]	M <sub>50,Deckschicht</sub> [t/Stück]	M <sub>50,Deckschicht</sub> [t/Stück]	WBS <sub>Deckschicht</sub> [t/lfd. m]	WBS <sub>Deckschicht</sub> [t/lfd. m]
Borkum	2,91	55,26	610,69	2,05	0,10	113,19	62,55
Baltrum	1,37	219,65	2427,60	0,21	0,01	46,95	25,95
Baltrum	2,36	86,99	961,46	1,09	0,05	95,06	52,53
Norderney	3,14	50,99	563,53	2,57	0,13	131,23	72,52
Norderney	1,86	115,29	1274,21	0,53	0,03	61,67	34,08

Mengenermittlung WBS für ein Deckwerk aus geschütteten WBS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	N <sub>Deckschicht</sub> [Stück/lfd. m]	N <sub>Filterschicht</sub> [Stück/lfd. m]	M <sub>50,Deckschicht</sub> [t/Stück]	M <sub>50,Deckschicht</sub> [t/Stück]	WBS <sub>Deckschicht</sub> [t/lfd. m]	WBS <sub>Deckschicht</sub> [t/lfd. m]
Borkum	2,91	94,90	1048,87	1,37	0,07	129,61	71,62
Baltrum	1,37	391,77	4329,83	0,14	0,01	55,83	30,85
Baltrum	2,36	148,58	1642,07	0,73	0,04	108,23	59,81
Norderney	3,14	85,34	943,21	1,72	0,09	146,43	80,92
Norderney	1,86	204,54	2260,60	0,36	0,02	72,94	40,31

Kosten für Sand und Geotextil bei WBS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [t/lfd. m]	Sand <sub>v</sub> [€/t]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geotextil [m <sup>2</sup> /lfd. m]	Geotextil [€/m <sup>2</sup> ]	Geotextil [€/lfd. m]
Borkum	2,91	68,47	5,00	342,34	27,39	1,90	52,04
Baltrum	1,37	80,40	5,00	402,01	22,65	1,90	43,04
Baltrum	2,36	85,42	5,00	427,08	27,09	1,90	51,46
Norderney	3,14	74,76	5,00	373,82	29,01	1,90	55,12
Norderney	1,86	64,02	5,00	320,11	22,73	1,90	43,18

Kosten für Sand und Geotextil bei WBS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [t/lfd. m]	Sand <sub>v</sub> [€/t]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geotextil [m <sup>2</sup> /lfd. m]	Geotextil [€/m <sup>2</sup> ]	Geotextil [€/lfd. m]
Borkum	2,91	75,18	5,00	375,89	32,12	1,90	61,03
Baltrum	1,37	102,97	5,00	514,86	28,30	1,90	53,78
Baltrum	2,36	107,12	5,00	535,62	33,26	1,90	63,20
Norderney	3,14	86,26	5,00	431,31	34,51	1,90	65,58
Norderney	1,86	75,55	5,00	377,77	27,38	1,90	52,02

Kosten für Sand und Geotextil bei WBS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [t/lfd. m]	Sand <sub>v</sub> [€/t]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geotextil [m <sup>2</sup> /lfd. m]	Geotextil [€/m <sup>2</sup> ]	Geotextil [€/lfd. m]
Borkum	2,91	93,14	5,00	465,68	42,10	1,90	79,98
Baltrum	1,37	136,57	5,00	682,83	38,52	1,90	73,18
Baltrum	2,36	128,71	5,00	643,54	43,35	1,90	82,37
Norderney	3,14	98,04	5,00	490,18	44,08	1,90	83,76
Norderney	1,86	100,98	5,00	504,91	37,07	1,90	70,42

## Kosten für Deck- und Filterschicht bei WBS (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	WBS <sub>Filterschicht</sub> [t/lfd. m]	WBS <sub>Filterschicht</sub> [€/t]	WBS <sub>Filterschicht</sub> [€/lfd. m]	WBS <sub>Deckschicht</sub> [t³/lfd. m]	WBS <sub>Deckschicht</sub> [€/t]	WBS <sub>Deckschicht</sub> [€/lfd. m]
Borkum	2,91	58,71	19,90	1168,30	106,24	31,40	3335,93
Baltrum	1,37	22,86	19,90	454,93	41,37	19,90	823,25
Baltrum	2,36	47,08	19,90	936,94	85,20	28,50	2428,22
Norderney	3,14	67,10	19,90	1335,31	121,43	31,40	3812,79
Norderney	1,86	31,14	19,90	619,62	56,35	25,00	1408,64

## Kosten für Deck- und Filterschicht bei WBS (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	WBS <sub>Filterschicht</sub> [t/lfd. m]	WBS <sub>Filterschicht</sub> [€/t]	WBS <sub>Filterschicht</sub> [€/lfd. m]	WBS <sub>Deckschicht</sub> [t³/lfd. m]	WBS <sub>Deckschicht</sub> [€/t]	WBS <sub>Deckschicht</sub> [€/lfd. m]
Borkum	2,91	62,56	19,90	1244,92	113,21	31,40	3554,69
Baltrum	1,37	25,95	19,90	516,41	46,96	19,90	934,50
Baltrum	2,36	52,53	19,90	1045,43	95,07	28,50	2709,41
Norderney	3,14	72,53	19,90	1443,30	131,25	31,40	4121,16
Norderney	1,86	34,08	19,90	678,18	61,67	25,00	1541,75

## Kosten für Deck- und Filterschicht bei WBS (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	WBS <sub>Filterschicht</sub> [t/lfd. m]	WBS <sub>Filterschicht</sub> [€/t]	WBS <sub>Filterschicht</sub> [€/lfd. m]	WBS <sub>Deckschicht</sub> [t³/lfd. m]	WBS <sub>Deckschicht</sub> [€/t]	WBS <sub>Deckschicht</sub> [€/lfd. m]
Borkum	2,91	71,62	19,90	1425,19	129,60	28,50	3693,60
Baltrum	1,37	30,85	19,90	613,88	55,82	19,90	1110,88
Baltrum	2,36	59,81	19,90	1190,22	108,23	25,00	2705,83
Norderney	3,14	80,93	19,90	1610,41	146,44	31,40	4598,31
Norderney	1,86	40,30	19,90	802,06	72,94	19,90	1451,41

## Anlage F: Kostenermittlung Betonformsteine

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [t/lfd. m]	Sand <sub>v</sub> [€/t]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geotextil [m <sup>2</sup> /lf. m]	Geotextil [€/m <sup>2</sup> ]	Geotextil [€/lfd. m]	BFS [t/lfd. m]	BFS [€/t]	BFS [€/lfd. m]
Borkum	2,91	473,52	5,00	2367,62	57,98	1,90	110,16	35,24	100,00	3523,85
Baltrum	1,37	228,73	5,00	1143,67	49,76	1,90	94,54	19,79	100,00	1979,26
Baltrum	2,36	396,29	5,00	1981,47	61,84	1,90	117,50	42,38	100,00	4237,75
Norderney	3,14	541,96	5,00	2709,82	64,59	1,90	122,72	50,30	100,00	5030,03
Norderney	1,86	273,14	5,00	1365,68	47,04	1,90	89,38	18,27	100,00	1827,46

## Anlage G: Kostenermittlung Mastix-Schotter

Kosten für Deck- und Filterschicht bei MS auf Bitumensand (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [t/lfd. m]	Sand <sub>v</sub> [€/t]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	BS [t/lfd. m]	BS [€/t]	BS [€/lfd. m]	MS [t <sup>3</sup> /lfd. m]	MS [€/t]	MS [€/lfd. m]
Borkum	2,91	418,79	5,00	2093,97	15,43	65,00	1003,08	21,92	125,00	2740,42
Baltrum	1,37	210,21	5,00	1051,04	10,93	65,00	710,18	6,64	125,00	830,37
Baltrum	2,36	366,34	5,00	1831,69	14,38	65,00	934,63	14,76	125,00	1845,41
Norderney	3,14	486,33	5,00	2431,65	16,63	65,00	1080,65	26,79	125,00	3348,37
Norderney	1,86	244,17	5,00	1220,85	11,76	65,00	764,69	8,34	125,00	1042,56

Kosten für Deck- und Filterschicht bei MS auf Bitumensand (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [t/lfd. m]	Sand <sub>v</sub> [€/t]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	BS [t/lfd. m]	BS [€/t]	BS [€/lfd. m]	MS [t <sup>3</sup> /lfd. m]	MS [€/t]	MS [€/lfd. m]
Borkum	2,91	400,17	5,00	2000,83	17,09	65,00	1111,04	21,36	125,00	2669,95
Baltrum	1,37	266,63	5,00	1333,14	13,90	65,00	903,24	8,45	125,00	1056,09
Baltrum	2,36	458,89	5,00	2294,44	18,14	65,00	1179,04	16,38	125,00	2047,74
Norderney	3,14	521,76	5,00	2608,82	19,46	65,00	1264,79	27,58	125,00	3447,15
Norderney	1,86	248,36	5,00	1241,79	13,44	65,00	873,40	8,38	125,00	1047,42

## Kosten für Deck- und Filterschicht bei MS auf Bitumensand (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [t/lfd. m]	Sand <sub>v</sub> [€/t]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	BS [t/lfd. m]	BS [€/t]	BS [€/lfd. m]	MS [t <sup>3</sup> /lfd. m]	MS [€/t]	MS [€/lfd. m]
Borkum	2,91	401,21	5,00	2006,05	20,75	65,00	1348,74	23,19	125,00	2898,30
Baltrum	1,37	303,49	5,00	1517,44	17,96	65,00	1167,14	10,92	125,00	1364,66
Baltrum	2,36	461,55	5,00	2307,74	22,04	65,00	1432,28	17,80	125,00	2224,42
Norderney	3,14	492,45	5,00	2462,24	22,94	65,00	1491,06	29,07	125,00	3633,96
Norderney	1,86	271,08	5,00	1355,41	17,02	65,00	1106,12	10,35	125,00	1293,31

## Kosten für Deck- und Filterschicht bei MS auf Geotextil (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [t/lfd. m]	Sand <sub>v</sub> [€/t]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geo [t/lfd. m]	Geo [€/t]	Geo [€/lfd. m]	MS [t <sup>3</sup> /lfd. m]	MS [€/t]	MS [€/lfd. m]
Borkum	2,91	428,00	5,00	2140,01	41,15	1,90	78,19	31,37	125,00	3921,45
Baltrum	1,37	222,70	5,00	1113,49	29,14	1,90	55,36	6,91	125,00	864,26
Baltrum	2,36	377,20	5,00	1886,02	38,34	1,90	72,85	21,13	125,00	2640,73
Norderney	3,14	495,00	5,00	2474,99	44,33	1,90	84,23	38,33	125,00	4791,42
Norderney	1,86	254,55	5,00	1272,73	31,37	1,90	59,61	11,94	125,00	1491,88

## Kosten für Deck- und Filterschicht bei MS auf Geotextil (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [t/lfd. m]	Sand <sub>v</sub> [€/t]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geo [t/lfd. m]	Geo [€/t]	Geo [€/lfd. m]	MS [t <sup>3</sup> /lfd. m]	MS [€/t]	MS [€/lfd. m]
Borkum	2,91	411,49	5,00	2057,45	45,58	1,90	86,60	30,56	125,00	3820,61
Baltrum	1,37	282,83	5,00	1414,17	37,06	1,90	70,41	8,45	125,00	1056,09
Baltrum	2,36	473,51	5,00	2367,57	48,37	1,90	91,90	23,44	125,00	2930,25
Norderney	3,14	533,39	5,00	2666,97	51,89	1,90	98,59	39,46	125,00	4932,77
Norderney	1,86	260,65	5,00	1303,24	35,83	1,90	68,08	11,99	125,00	1498,83

## Kosten für Deck- und Filterschicht bei MS auf Geotextil (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [t/lfd. m]	Sand <sub>v</sub> [€/t]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geo [t/lfd. m]	Geo [€/t]	Geo [€/lfd. m]	MS [t <sup>3</sup> /lfd. m]	MS [€/t]	MS [€/lfd. m]
Borkum	2,91	415,97	5,00	2079,84	55,33	1,90	105,13	33,18	125,00	4147,38
Baltrum	1,37	324,35	5,00	1621,77	47,88	1,90	90,98	10,92	125,00	1364,66
Baltrum	2,36	480,08	5,00	2400,42	58,76	1,90	111,64	25,46	125,00	3183,07
Norderney	3,14	507,43	5,00	2537,15	61,17	1,90	116,23	41,60	125,00	5200,08
Norderney	1,86	287,82	5,00	1439,09	45,38	1,90	86,22	13,58	125,00	1697,40

## Anlage H: Kostenermittlung Elastocoast

Kosten für Sand und Geotextil bei EC (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [t/lfd. m]	Sand <sub>v</sub> [€/t]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geotextil [m <sup>2</sup> /lfd. m]	Geotextil [€/m <sup>2</sup> ]	Geotextil [€/lfd. m]
Borkum	2,91	247,61	5,00	1238,06	31,52	1,90	59,89
Baltrum	1,37	150,37	5,00	751,83	24,60	1,90	46,74
Baltrum	2,36	233,96	5,00	1169,81	30,46	1,90	57,88
Norderney	3,14	281,31	5,00	1406,56	33,61	1,90	63,86
Norderney	1,86	159,70	5,00	798,51	25,32	1,90	48,11

Kosten für Sand und Geotextil bei EC (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [t/lfd. m]	Sand <sub>v</sub> [€/t]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geotextil [m <sup>2</sup> /lfd. m]	Geotextil [€/m <sup>2</sup> ]	Geotextil [€/lfd. m]
Borkum	2,91	257,72	5,00	1288,61	36,16	1,90	68,71
Baltrum	1,37	186,23	5,00	931,14	30,93	1,90	58,77
Baltrum	2,36	282,44	5,00	1412,20	37,80	1,90	71,81
Norderney	3,14	313,11	5,00	1565,53	39,73	1,90	75,48
Norderney	1,86	173,69	5,00	868,46	29,91	1,90	56,84

Kosten für Sand und Geotextil bei EC (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	Sand <sub>v</sub> [t/lfd. m]	Sand <sub>v</sub> [€/t]	Sand <sub>v</sub> [€/lfd. m]	Geotextil [m <sup>2</sup> /lfd. m]	Geotextil [€/m <sup>2</sup> ]	Geotextil [€/lfd. m]
Borkum	2,91	285,36	5,00	1426,79	46,07	1,90	87,53
Baltrum	1,37	227,43	5,00	1137,16	41,33	1,90	78,52
Baltrum	2,36	310,48	5,00	1552,39	47,97	1,90	91,15
Norderney	3,14	327,36	5,00	1636,79	49,21	1,90	93,50
Norderney	1,86	207,54	5,00	1037,68	39,56	1,90	75,16

Kosten für Deck- und Filterschicht bei EC (Böschungsneigung 1:3)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	EC <sub>Filterschicht</sub> [t/lfd. m]	EC <sub>Filterschicht</sub> [€/t]	EC <sub>Filterschicht</sub> [€/lfd. m]	EC <sub>Deckschicht</sub> [t/lfd. m]	EC <sub>Deckschicht</sub> [€/t]	EC <sub>Deckschicht</sub> [€/lfd. m]
Borkum	2,91	6,62	14,50	95,97	9,73	223,00	2170,53
Baltrum	1,37	5,17	14,50	74,90	5,17	223,00	1151,97
Baltrum	2,36	6,40	14,50	92,76	6,73	223,00	1500,37
Norderney	3,14	7,06	14,50	102,34	11,72	223,00	2614,04
Norderney	1,86	5,32	14,50	77,10	5,32	223,00	1185,76

## Kosten für Deck- und Filterschicht bei EC (Böschungsneigung 1:4)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	EC <sub>Filterschicht</sub> [t/lfd. m]	EC <sub>Filterschicht</sub> [€/t]	EC <sub>Filterschicht</sub> [€/lfd. m]	EC <sub>Deckschicht</sub> [t/lfd. m]	EC <sub>Deckschicht</sub> [€/t]	EC <sub>Deckschicht</sub> [€/lfd. m]
Borkum	2,91	7,59	14,50	110,11	7,59	223,00	1693,41
Baltrum	1,37	6,50	14,50	94,18	6,50	223,00	1448,44
Baltrum	2,36	7,94	14,50	115,09	7,94	223,00	1769,96
Norderney	3,14	8,34	14,50	120,97	8,34	223,00	1860,41
Norderney	1,86	6,28	14,50	91,09	6,28	223,00	1400,89

## Kosten für Deck- und Filterschicht bei EC (Böschungsneigung 1:6)

Küstenabschnitt	H <sub>m0</sub> [m]	EC <sub>Filterschicht</sub> [t/lfd. m]	EC <sub>Filterschicht</sub> [€/t]	EC <sub>Filterschicht</sub> [€/lfd. m]	EC <sub>Deckschicht</sub> [t/lfd. m]	EC <sub>Deckschicht</sub> [€/t]	EC <sub>Deckschicht</sub> [€/lfd. m]
Borkum	2,91	9,67	14,50	140,28	9,67	223,00	2157,36
Baltrum	1,37	8,68	14,50	125,84	8,68	223,00	1935,29
Baltrum	2,36	10,07	14,50	146,08	10,07	223,00	2246,59
Norderney	3,14	10,33	14,50	149,85	10,33	223,00	2304,52
Norderney	1,86	8,31	14,50	120,46	8,31	223,00	1852,57