



Modelluntersuchungen zur Bestimmung des Wellenüberlaufs am Küstenschutz in Wyk auf Föhr

Dr.-Ing.
Nils B. Kerpen

Prof. Dr.-Ing. habil.
Torsten Schlurmann

Juli 2020

Bericht



Summary of the documentation					
1. Date of the report 01.07.2020	2. Type of report Bericht		3. Date 16.07.2020		
4. Title Modelluntersuchungen zur Bestimmung des Wellenüberlaufs am Küstenschutz in Wyk auf Föhr			5a. Contract-Number 51.24-Auftr./Vertr.-2020-51		
			5b. Approval-Number -		
			5c. Programmelements-Nr. -		
6. Authors Dr.-Ing. Nils B. Kerpen kerpen@lufi.uni-hannover.de Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann schlurmann@lufi.uni-hannover.de			5d. Project-Number 60451726		
			5e. Commission-Number 338		
			5f. Arbeitseinheits-Nr. -		
7. Name and address of the executive organisation Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover Ludwig-Franzius-Institut Nienburger Straße 4 D-30167 Hannover Germany			8. Report-Number. (LuFI) 778		
9. Name und Adresse of the client Stadt Wyk auf Föhr Hafenstraße 23 25938 Wyk auf Föhr			10. Acronym of the client -		
			11. Report-Number of the client -		
12. Distribution-/availability status Customer, LuFI Library					
13. Additional notes -					
14. Abstract Im 3D-Wellenbecken des Ludwig-Franzius-Instituts wurden physikalische Modellversuche zur Bestimmung mittlerer Wellenüberlaufmengen am Küstenschutz in Wyk auf Föhr durchgeführt. Die Zielstellung der Untersuchung umfasste die Quantifizierung von mittleren Wellenüberlaufmengen für verschiedene Seegangs-Szenarien, Wasserstände und Erhöhungen des Küstenschutzbau-werks. Die Parameter wurden systematisch variiert, so dass aus den Ergebnissen ein generelles Prozessverständnis zur Entwicklung von Wellenüberlaufmengen entlang der Küstenlinie im Untersuchungsgebiet abgeleitet werden kann. Die Südküste (Profil 51+660 bis 51+800) weist aufgrund ihrer exponierteren Lage im Vergleich zur Ostküste (Profil 52+000 bis 52+150) bei gleicher Freibordhöhe um ein Vielfaches größere mittlere Wellenüberlaufmengen auf. Die Reduktion der mittleren Wellenüberlaufmengen an der Ostküste ist im Wesentlichen auf die – durch Wellentransformationsprozesse (Refraktion, Wellenbrechen) über der relativ flachen Küstenbathymetrie bedingte – Reduktion der Wellenhöhe sowie eines spitzeren Wellenangriffswinkels zurückzuführen. Für einen Wasserstand von +5,1 m NHN sind an der Ostküste keine nennenswerten Wellenüberläufe gemessen worden. Eine Kronenerhöhung auf +7,0 m NHN durch eine senkrechte Wand führte in allen Fällen zu einer signifikanten Reduzierung der gemessenen mittleren Wellenüberlaufmengen. Die Erhöhung der Krone auf ein Niveau von 7,6 m NHN durch eine senkrechte Wand führte im Vergleich zur Erhöhung auf 7,0 m NHN zu einer weiteren Reduzierung der mittleren Wellenüberlaufmengen, allerdings fiel diese im Verhältnis deutlich geringer aus.					
15. Area of expertise Coastal protection, Wave Overtopping, Sea level rise					
16. Safety level: -			17. Limitations of this abstract none	18. Number of pages 28	19a. Name of responsible Prof. Torsten Schlurmann
a. Report confidential until 30.06.2022	b. Abstract none	c. This page none			19b. Telephone +49(0)511-762-19021



Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	II
SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN	III
1 VERANLASSUNG UND AUFGABE DER MODELLVERSUCHE	1
2 UNTERLAGEN FÜR DEN BAU UND BETRIEB DES MODELLS	1
2.1 Planunterlagen	1
2.1.1 Uferpromenade	1
2.1.2 Bathymetrie	3
2.2 Hydraulische Randbedingungen	3
3 HYDRAULISCHE MODELLVERSUCHE	4
3.1 Allgemeines	4
3.2 Modellgrenzen	4
3.3 Ähnlichkeitsbeziehungen und Modellmaßstab	5
3.4 Modellaufbau und Messeinrichtungen	6
3.4.1 Modellbau	6
3.5 Messeinrichtungen	9
3.6 Versuchsprogramm	10
4 DURCHFÜHRUNG DER MODELLVERSUCHE	12
4.1 Versuchsablauf	12
4.2 Mess- und Auswerteverfahren	12
4.2.1 Seegang	12
4.2.2 Mittlere Wellenüberlauftrate	12
4.2.3 Ermittelte Kenngrößen	13
5 ERGEBNISSE	15
5.1 Allgemeines	15
5.2 Entwicklung des Seegangs im Küstennahfeld	15
5.3 Mittlere Wellenüberlauftraten	18
6 MODELLEFFEKTE	22
6.1 Bathymetrie (Unterwassertopographie)	22
6.2 Oberflächenrauheit	23
6.3 Zulaufbreite zu Überlaufbehältern	23
6.4 Vernachlässigte Prozesse	24
7 ZUSAMMENFASSUNG	25



LITERATURVERZEICHNIS	26
ANHANG	27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Querschnitt der Station 52+100 im Maßstab 1:50.	2
Abbildung 2: Lageplan der Station 51+800 bis 52+070 im Maßstab 1:250.	2
Abbildung 3: Beispiel bereitgestellter Bathymetriedaten an Station 51+650.	3
Abbildung 4: a) Modellaufbau im Maßstab 1:45, b) Untersuchungsgebiet auf der Insel Föhr, c) Seegangsrandbedingung im Modellmaßstab, d) Strandprofile und Höhenlagen im Modell.	7
Abbildung 5: Impressionen zum Modellaufbau.	8
Abbildung 6: Ausbildung des Kronendetails.	9
Abbildung 7: Überlaufbehälter Q2 mit vorgelagertem Ultraschallwellenpegel #14 und Pegel #17 im Behälter zur Messung der Änderung von Wasserständen.	10
Abbildung 8: Energiedichtespektrum am Pegelfeld „Offshore“ für Test Nr. 226 (grün) mit Vergleich zum theoretischen Target-Spektrum (schwarz) im Modellmaßstab.	14
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Refraktion im Untersuchungsgebiet für Test Nr. 111 mit Kennzeichnung von Wellenkämmen (rot, solid), Wellenkämme unter Refraktionseinfluss (rot, gestrichelt), Wellenstrahlen (weiß), Küstenorthogonalen (gelb) und Wellenangriffswinkeln an der Südküste ($\beta_{51} + 800$) und Ostküste ($\beta_{52} + 150$).	16
Abbildung 9: Entwickelte Seegangsparameter 30 m vor dem Küstenschutzbauwerk (Profil 51+800 für die Südküste und Profil 52+150 für die Ostküste) im Vergleich zu zugehörigen Seegangsparametern am Übergabepunkt Pegelfeld „Offshore“. a) Entwicklung der Wellenhöhe Hm_0 , b) Peak Wellensteilheit sp und c) Wellenangriffsrichtung β am Bauwerk im Verhältnis zur Wellenrichtung.	17
Abbildung 11: a-e): Mittlere Wellenüberlaufraten q (l/s/m) an vier Profilen entlang der südöstlichen Küstenlinie Föhrs in Abhängigkeit verschiedener geometrischer und hydraulischer Randbedingungen. Randbedingungen a) und e) sollten zur Bemessung verwendet werden. f): Wind- und Wellenrichtung (Google Maps, 2020).	21
Abbildung 12: Steilere Neigung vor der Modellbathymetrie zwischen Profil 51+350 und 51+600.	22
Abbildung 13: Vergleich der Oberflächenrauheit. a) Modell mit sandrauer Oberfläche. b) Modellausschnitt in der Natur mit Bewuchs auf dem Küstenschutz (Quelle: Eugen Miljas, 2018).	23
Abbildung 14: Verringerte Zulaufbreite an Überlaufbehälter Q1 für Versuche mit niedrigem Freibord (Wasserstand: +5,6 m NHN, Kronenhöhe: +6,5 m NHN).	24



Symbole und Abkürzungen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
b	Breite der Einlauföffnung des Überlaufbehälters	m
d	Wassertand	m
f_p	Peak-Frequenz ($1/T_p$)	1/s
$H_{1/3}$	Höhe der 1/3 höchsten Welle der Zeitreihe	m
H_{m0}	Spektrale Wellenhöhe	m
H_{max}	Maximale Wellenhöhe	m
H_s	Signifikante Wellenhöhe ($H_s \cong H_{m0}$)	m
L	Wellenlänge	m
t	Zeit	s
T_p	Peak-Wellenperiode	s
$T_{m-1,0}$	Spektrale Energie Wellenperiode	s
u	Windgeschwindigkeit	m/s
Q	Überlaufvolumen	m ³
q	Mittlere Überlaufmenge	m ³ /s/m
R_c	Freibordhöhe	m
s	Wellensteilheit ($s = H/L$)	-
θ	Mittlere Wellenrichtung	°
θ_p	Peak Wellenrichtung	°
θ_{wind}	Windrichtung (0°: West, linkshändiges Koordinatensystem)	°

Abkürzungen

JONSWAP	Joint North Sea Wave Project
LKN-SH	Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein
NHN	Normalhöhennull
Q1	Überlaufbehälter 1



1 Veranlassung und Aufgabe der Modellversuche

Die Stadt Wyk auf Föhr plant die Umgestaltung des Wellenbadareals „Aquaföhr“. Die Fläche liegt in einem Hochwasserrisikogebiet (Niederungsgebiet der Lüttmarsch), so dass bei einem Neubau besondere Anforderungen an den Hochwasserschutz gestellt werden.

Für einen Neubau besteht die Genehmigungsbehörde auf einen Hochwasserschutz, der die gesamte Lüttmarsch umfasst und die Sicherheitsanforderungen an einen Landesschutzdeich erfüllt. Durch den LKN-SH wurden die folgenden Planungsgrundlagen vorgegeben:

Referenzwasserstand 200-jährlich:	NHN + 5,10 m
Klimazuschlag:	0,50 m

Modelluntersuchungen zu zwei Wasserständen (+5,1 m NHN; + 5,6 m NHN) und drei Freibordhöhen¹ der Hochwasserschutzanlage (+ 6,5 m NHN; + 7,0 m NHN; + 7,6 m NHN) sollen dazu dienen, die derzeitigen Annahmen des Hochwasserschutzes zu überprüfen. Die Überprüfung soll für verschiedene Strandabschnitte an der Südküste sowie an der Ostküste erfolgen. Zugehörige mittlere Wellenüberlauraten (l/s/m) sollen für sich einstellende Freibordhöhen ermittelt werden.

2 Unterlagen für den Bau und Betrieb des Modells

Die im nachfolgenden aufgeführten Randbedingungen wurden dem Anschreiben des Ingenieurbüros Mohn GmbH vom 11.12.2019 entnommen. Zusätzlich wurden weitere Unterlagen auf Nachfrage bereitgestellt.

2.1 Planunterlagen

Zur Planung der Modellgeometrie standen nachfolgende Unterlagen zur Uferpromenade und zur Bathymetrie im Untersuchungsgebiet zur Verfügung. Es wurde mit dem Auftraggeber abgestimmt, dass alle Höhenlagen im Modell anhand der Daten aus einer Laserscanbefliegung (Kapitel 2.1.2) erfolgen. Lediglich die Höhe der Bauwerkskrone im „Ist-Zustand“ war im Modell so anzupassen, dass diese eine exakte Höhe von + 6,5 m ü. NHN aufweist.

2.1.1 Uferpromenade

Es wurden mehrere Querschnitte der Uferpromenade sowie Aufsichten des Modellgebietes bereitgestellt.

- Querschnitt an Station 51+650 im Maßstab 1:50 von 2008
- Querschnitt an Station 51+700 im Maßstab 1:50 von 2005
- Querschnitt an Station 52+100 im Maßstab 1:50 von 2005
- Querschnitt an Station 52+200 im Maßstab 1:50 von 2005

¹ Vertikale Distanz zwischen Ruhewasserspiegel und Bauwerkskrone



- e) Lageplan Profilierungsbereich Station 50+050 bis 51+850 im Maßstab 1:2000 von 2016
- f) Lageplan Profilierungsbereich Station 51+850 bis 53+100 im Maßstab 1:2000 von 2016
- g) Lageplan Station 51+350 bis 51+550 im Maßstab 1:250
- h) Lageplan Station 51+550 bis 51+800 im Maßstab 1:250
- i) Lageplan Station 51+800 bis 52+070 im Maßstab 1:250
- j) Lageplan Station 52+070 bis 52+330 im Maßstab 1:250

Abbildung 1 zeigt exemplarisch die Planungsunterlagen zu Profil 52+100. Abbildung 2 zeigt exemplarisch einen Lageplan der Station 51+800 bis 52+070.

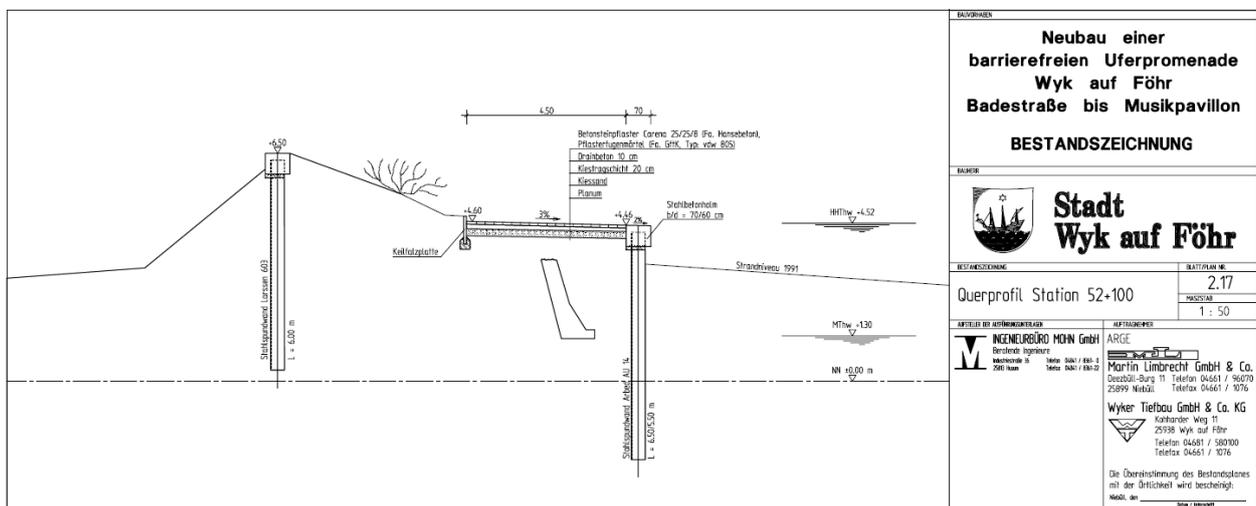


Abbildung 1: Querschnitt der Station 52+100 im Maßstab 1:50.

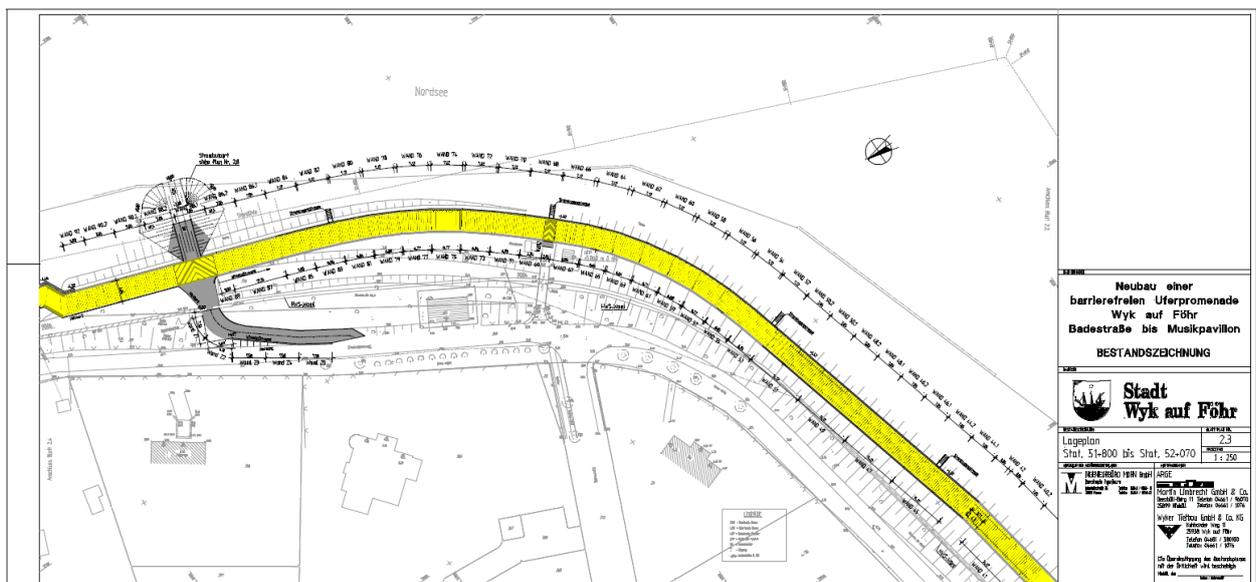


Abbildung 2: Lageplan der Station 51+800 bis 52+070 im Maßstab 1:250.



2.1.2 Bathymetrie

Die Bathymetrie im Untersuchungsgebiet wurde in Form von referenzierten Höhendaten einer Laserscanbefliegung des LKN-SH bereitgestellt. Abbildung 3 stellt beispielhaft die bereitgestellte Bathymetriedaten an Station 51+650 dar.

- k) Daten einer Laserscanbefliegung vom 30.07.2019 (LKN.SH). Von Station 51+350 bis 52+400 mit einem küstenorthogonalen Abstand von je 50 m.

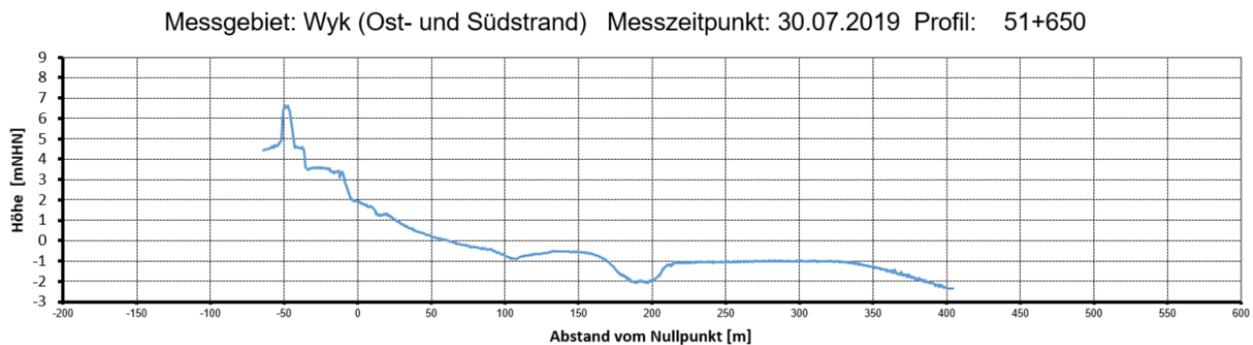


Abbildung 3: Beispiel bereitgestellter Bathymetriedaten an Station 51+650.

2.2 Hydraulische Randbedingungen

Zu untersuchende Wasserstände und der jeweils zugehörige Bemessungsseegang wurden vom Auftraggeber vorgegeben. In einer numerischen Berechnung wurden hierzu bemessungsrelevante Randbedingungen an einem Übergabepunkt vor der Südküste Föhrs (UTM 32 471 918,210/ 60 59105,994) durch den Auftraggeber und den LKN-SH berechnet. Aus diesen Werten wurden die ungünstigsten Kombinationen (größte Wellenhöhe) für die jeweiligen Wasserstände ermittelt und zur Bemessung im Modell herangezogen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Hydraulische Randbedingungen.

Randbedingungen (SWAN Version 40.81)			Berechneter Seegang am Übergabepunkt (UTM 32 471 918,210/ 60 59105,994)			
Windrichtung*	Windgeschwindigkeit	Wasserstand	sign. Wellenhöhe	Wellenperiode	mittlere Wellenrichtung	Peak Wellenrichtung
θ_{wind}	u	d	H_{m0}	T_{m01}	θ	θ_p
(°)	(m/s)	(m NHN)	(m)	(s)	(°)	(°)
225 (SW)	32	5.1	2.00	4.02	60	75
225 (SW)	36	5.6	2.34	4.23	62	75
248 (WSW)	36	5.6	2.20	4.13	50	65

* 0°: West, linkshändiges Koordinatensystem



3 Hydraulische Modellversuche

3.1 Allgemeines

Ein physikalisches Modell ist ein physikalisches System, das (normalerweise in reduzierter Größe) so reproduziert wird, dass die wichtigsten dominanten Kräfte, die auf das System wirken, im Modell im richtigen Verhältnis zum tatsächlichen physikalischen System dargestellt werden. (Hughes, 1993)

Um ein hydraulisches Modell diesen Vorgaben folgend zu errichten sind bestimmte Grenzen und Randbedingungen einzuhalten, die im Folgenden erläutert werden. Im Anschluss sind der eigentliche Modellaufbau sowie die installierte Messtechnik und das Versuchsprogramm dokumentiert.

3.2 Modellgrenzen

Die höchste Welle in einem Wellenspektrum kann zu $H_{max} = 1,86 * H_{1/3}$ angenommen werden (EAK, 2007). Um diese ohne tiefeninduziertes Wellenbrechen ($H_{max} = 0,78$) im Modell einsteuern zu können und deren Energie bis in Küstennähe zu erhalten, ist eine Wassertiefe von $d = 1,86 * 3,0 m / 0,78 = 7,15 m$ erforderlich. Da mit einer Entfernung von ca. 90 m von der Küstenlinie im Bathymetrieprofil der Station 51+650 erst eine Wassertiefe von 4,1 m erreicht ist (bezogen auf HHThw = NHN+4,52 m, vgl. Abbildung 3), wird vor der eigentlichen Bathymetrie in Abstimmung mit dem Auftraggeber aus wirtschaftlichen Gründen eine Anrampung mit einer Neigung von 1:10 vorgesehen, um die erforderliche Wassertiefe zu erreichen. Der Einfluss dieser Wahl des Modellrandes auf die gemessenen Überlaufmengen ist in Kapitel 6.1 auf Seite 22 diskutiert.

Um Skalierungseffekten vorzubeugen, kann ein Modell nicht beliebig verkleinert werden. Hughes (1993) empfiehlt z.B. einen Maßstab zwischen 1:10 und 1:50, um Wellentransformationsprozesse korrekt abzubilden. Nach Frostick *et al.* (2011) sollte die Wellenhöhe in hydraulischen Modellen stets größer als 3 cm sein (>5 cm für die Bemessungswellenhöhe), um z.B. den Einfluss der Oberflächenspannung auf das Ergebnis vernachlässigen zu können. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen wird ein Längenmaßstab im Modell von 1:45 gewählt. Dieser Maßstab erfüllt aus wissenschaftlicher Sicht alle Randbedingungen zur gesicherten Bestimmung von Wellenüberlaufmengen, wie in Tabelle 2 verdeutlicht:

Tabelle 2: Erforderliche Randbedingungen an das hydraulische Modell.

Parameter	Natur (1:1)	Forderung Literatur	3D Modell (1:45)
Wellenhöhe H_s [m]	2,2	> 0,03	0,04 ✓
Wellenlänge L [m]	~ 30,0	-	0,75
Wassertiefe d [m]	4,1	kein tiefeninduziertes Wellenbrechen an der Modellgrenze	>0,3 ✓
Bathymetrie [m]	90,0	$3 * L$	2,25 ✓



3.3 Ähnlichkeitsbeziehungen und Modellmaßstab

Ein naturähnliches wasserbauliches Modell erfordert neben der geometrischen Ähnlichkeit auch die kinematische und dynamische Ähnlichkeit mit der Natur.

Kinematische Ähnlichkeit beinhaltet, dass zeitabhängige Strömungsvorgänge im Modell stets so verlaufen, dass entsprechende Zeitintervalle in der Natur und im Modell in einem konstanten Verhältnis stehen (Zeitmaßstab). Dynamische Ähnlichkeit bedeutet, dass einander entsprechende Kräfte in der Natur und im Modell stets in einem konstanten Verhältnis stehen. Dabei liefert die dynamische Ähnlichkeit die Voraussetzung dafür, dass in geometrisch ähnlichen Modellen zeitabhängige Vorgänge kinematisch ähnlich ablaufen.

Bei Strömungsvorgängen mit freier Oberfläche, in denen Trägheits- und Schwerkraft gegenüber Zähigkeits- und Reibungskräften überwiegen, wird die dynamische Ähnlichkeit durch das FROUDEsche Modellgesetz beschrieben. Danach muss die FROUDEsche Kennzahl Fr (= Verhältnis von Trägheits- und Schwerkraft) im Modell und in der Natur an sich geometrisch entsprechenden Punkten gleich groß sein (FROUDEsches Ähnlichkeitsgesetz):

$$Fr_N = \frac{v_N}{\sqrt{g_N \cdot L_N}} = Fr_M = \frac{v_M}{\sqrt{g_M \cdot L_M}} \tag{1}$$

mit:

- v = mittlere Strömungsgeschwindigkeit (m/s)
- L = Längeneinheit (z.B. Wassertiefe) (m)
- g = Erdbeschleunigung = 9,81 (m/s²), ($g_N = g_M$)
- Index N = Natur
- Index M = Modell

Mit dem gewählten Längenmaßstab von $L_R = 45$ können die hydraulischen Parameter (Wellenhöhen, Wellenperioden, Wasserstände) mit erforderlicher Genauigkeit im Modell erzeugt werden.

Das FROUDEsche Ähnlichkeitsgesetz liefert mit der gewählten Maßstabszahl folgende Übertragungsmaßstabszahlen:

Tabelle 3: Übertragungsmaßstabszahlen.

Zu übertragende geometrische und physikalische Größen	Einheit	Übertragungsmaßstäbe	
		Natur	Modell
Längen, Breiten, Höhen, Tiefen	(m)	L_R	45
Zeit t , Wellenperiode T	(s)	$(L_R)^{0,5}$	6,71
Wellenüberlaufmenge Q	(m ³)	$(L_R)^3$	91.125,0
mittlere Wellenüberlauftrate q	(m ³ /s/m)	$(L_R)^{1,5}$	301,87
Neigungen		L_R/L_R	1



Im Folgenden sind alle Angaben in diesem Bericht und denen dazugehörigen Anlagen, wenn nicht ausdrücklich auf Modellwerte hingewiesen wird, auf die Natur bezogen.

3.4 Modellaufbau und Messeinrichtungen

3.4.1 Modellbau

Das Modell wurde unter Berücksichtigung der Randbedingungen aus Kapitel 3.2 und 3.3 mit einem Modellmaßstab von 1:45 im 3D Wellenbecken des Ludwig-Franzius-Instituts errichtet. In dieser Versuchseinrichtung wird der Seegang von einer Wellenmaschine mit 72 einzelnen Wellenblättern erzeugt, deren individuelle Ansteuerung auch die Möglichkeit der Einsteuerung von Seegang aus unterschiedlichen Richtungen erlaubt. Hierdurch konnte das Modell an einer festen Position im Becken positioniert werden. Der gesamte Modellaufbau mit Instrumentierung kann der Abbildung 4 entnommen werden. Impressionen zum Modellaufbau sind in Abbildung 5 gegeben.

Die Reflexionen des Seegangs an den äußeren Grenzen des Versuchsstandes werden durch passive Wellenabsorber minimiert. Da die Reflexionen des Seegangs im vorliegenden Fall nicht optimal durch das bestehende System absorbiert werden konnten (kleine Wellenhöhen, kleine Wellenperioden), wurde ein zusätzlicher passiver Wellenabsorber aus Schaumstoffmatten im Bereich des offenen Modellrandes installiert. Vom Modell und den passiven Wellenabsorbern reflektierte Energieanteile wurden von der Wellenmaschine durch die so genannte „aktive Absorption“ (Echtzeitkompensation) absorbiert und nicht zurück in das Untersuchungsgebiet reflektiert.

Als westliche Modellgrenze wurde das Profil der Stationen 51+400 gewählt, als nördliche Modellgrenze das Profil der Station 51+250. Zur Maximierung des Untersuchungsgebietes sowie zur bestmöglichen Einsteuerung des Seegangs wurde die nördliche Ausrichtung des Modells um 20° zur Wellenmaschine gedreht (Abbildung 4a und b).

Die Bathymetrie im Modell wurde ausgehend von der Küstenschutzlinie bis zur 0,0 m NHN Kontur nach skalierten Laserscanbefliegungsdaten (Kapitel 2.1.2) errichtet (Abbildung 5). Ab dieser Konturlinie wurden tiefer liegende Bereiche durch eine idealisierte Neigung von 1:10 angenommen (Abbildung 4a und d). Diese Maßnahme war erforderlich um die horizontalen Modellausmaße zu minimieren und gleichzeitig einen möglichst großen Modellmaßstab gewährleisten zu können. Sich einstellende Modelleffekte sind in Kapitel 6.1 näher erläutert.

Die horizontale Genauigkeit des Modelles liegt bei 1,0 cm (45 cm in der Natur). Die Genauigkeit der Höhenlagen im Bereich der vorgegebenen Profile liegt bei 0,2 cm (9 cm in der Natur). Zwischen diesen Profilen wurden die Höhenlagen linear interpoliert. Da die Höhenlage der Bauwerkskrone für den Wellenüberlauf von besonderer Bedeutung ist wurde diese mit einer Genauigkeit von 0,1 cm errichtet (4,5 cm in der Natur). Durch Setzungen des Modells änderte sich die Kronenhöhe im Modell im Millimeterbereich. Diese Abweichungen wurden dokumentiert (Tabelle 4) und sind in der späteren Auswertung berücksichtigt.

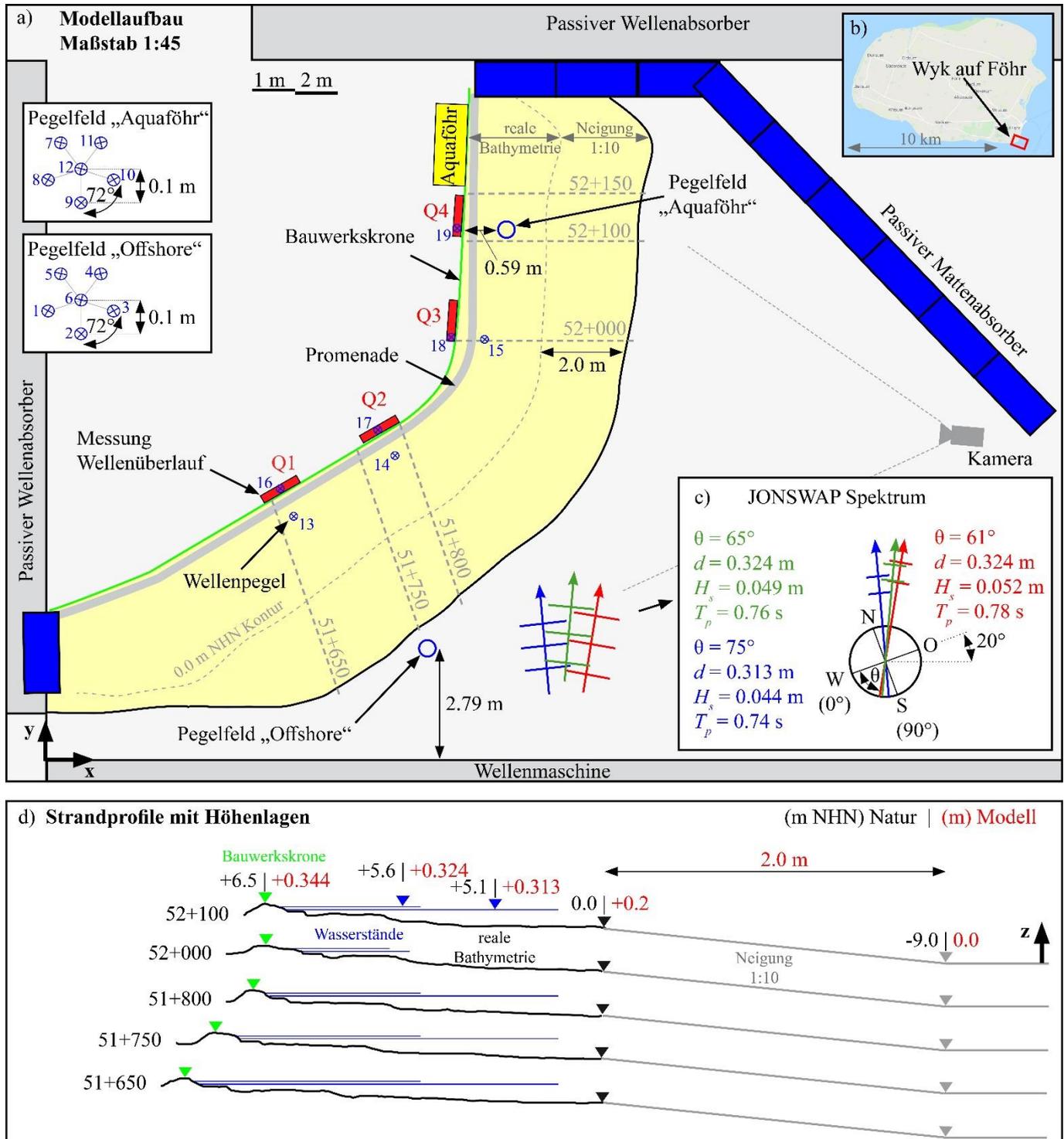


Abbildung 4: a) Modellaufbau im Maßstab 1:45, b) Untersuchungsgebiet auf der Insel Föhr, c) Seegangsrandbedingung im Modellmaßstab, d) Strandprofile und Höhenlagen im Modell.



a) Ausrichtung von Profilen



b) Fixierung von Strandprofilen mit Estrich



c) Verfüllen der Bathymetrikontur mit Estrich



d) Finale Bathymetrie nach dem Abziehen



e) Fertiger Versuchsstand mit Bemessungswasserstand 5.1 m NHN

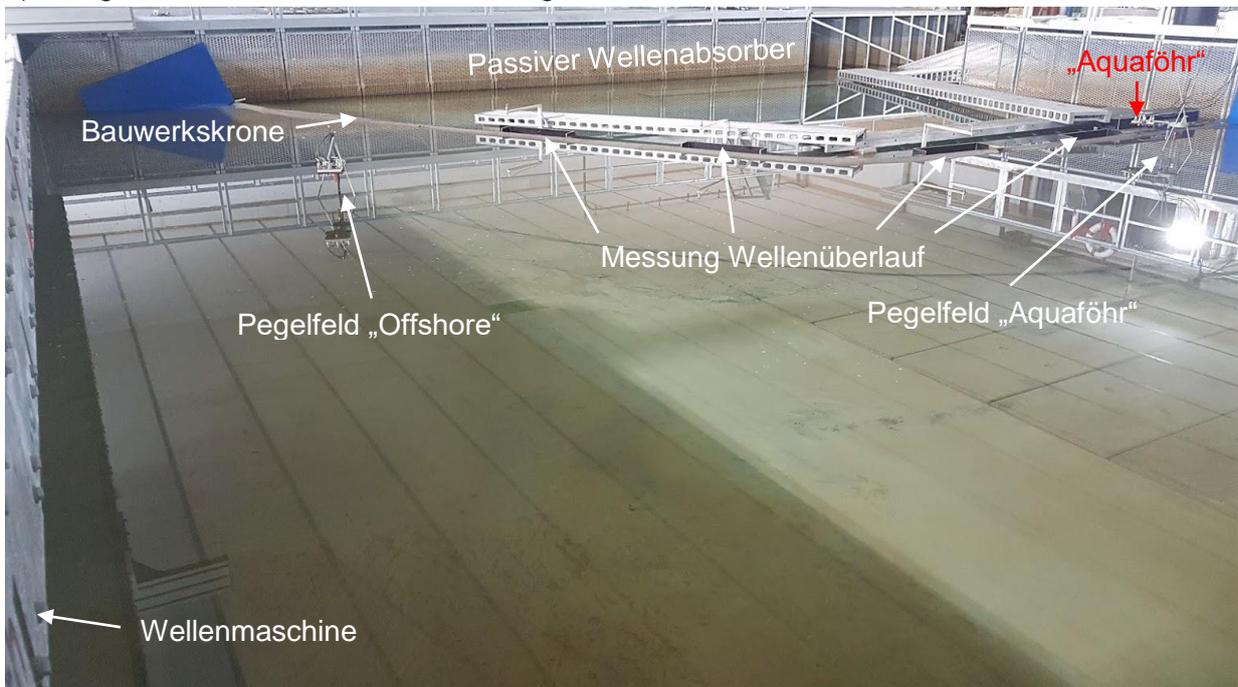


Abbildung 5: Impressionen zum Modellaufbau.

Tabelle 4: Niveau der Bauwerkskrone und Abweichung von der Zielhöhe im Modellmaßstab.

Profil	51+					52+			
	600	650	700	750	800	000	050	100	150
Kronenniveau (cm)	34.1	34.1	34.1	34.5	34.5	34.3	34.3	34.3	34.45
Δ zu 34.4 cm (cm)	- 0.3	- 0.3	- 0.3	+0.1	+0.1	-0.1	-0.1	-0.1	+0.05

Die Erhöhungen der Bauwerkskrone im Modell wurden durch aufgeschraubte Holzleisten simuliert (Abbildung 6).

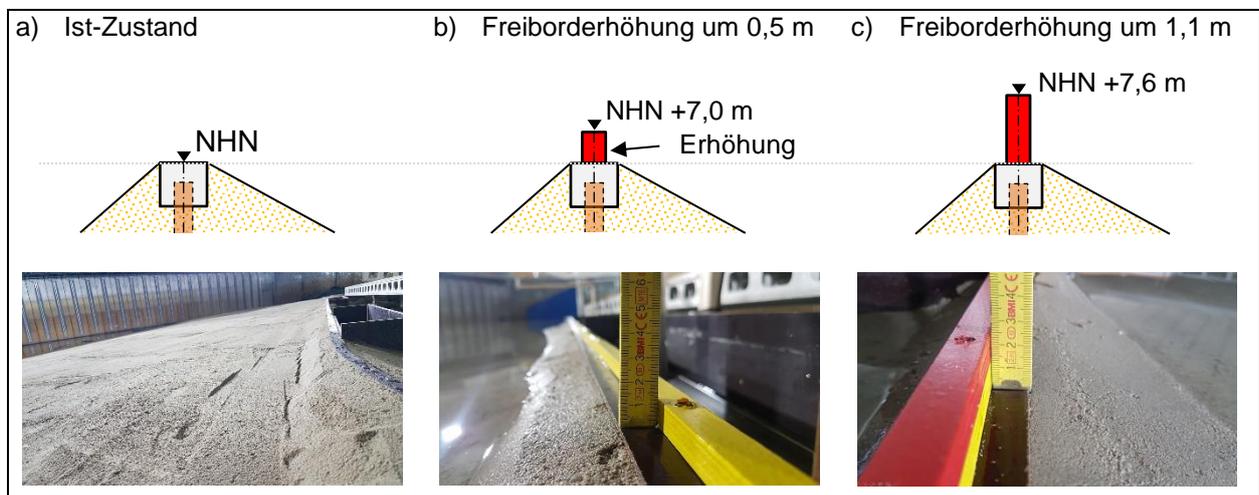


Abbildung 6: Ausbildung des Kronendetails.

3.5 Messeinrichtungen

Die Wasserspiegelauslenkungen im Modell wurden durch Ultraschallwellenpegel (Messbereich: 100 cm, Genauigkeit: 0.2 mm) erfasst. Das Messsystem verfügt über eine Echtzeitkalibrierung. Der einlaufende Seegang am definierten Übergabepunkt wird mittels eines Wellenpegelfeldes (Pegelfeld „Offshore“) dokumentiert. Ebenso der Seegang im Nahfeld des Aquaföhrs (Pegelfeld „Aquaföhr“). (Abbildung 4a, Abbildung 5e)

Die welleninduzierte Überlaufmenge über das Küstenschutzbauwerk wurde in vier Behältern hinter der Bauwerkskrone (Abbildung 4a, Q1 bis Q4) erfasst. Jeder Behälter hatte eine Grundfläche von 0,178 m². Abbildung 7 stellt beispielhaft den Aufbau des Überlaufbehälters Q2 dar. Über die Bestimmung der Wasserstandsänderungen im Behälter mittels beschriebener Ultraschallwellenpegel konnte das Wellenüberlaufvolumen Q mit einer Genauigkeit von 0,2 Litern gemessen werden. Vor jedem der Wellenüberlaufbehälter (Abstand zur Bauwerkskrone: 0,7 m) war ein weiterer Ultraschallwellenpegel installiert, um die für den Wellenüberlauf verantwortlichen Wellen unmittelbar vor dem Überlaufbehälter zu erfassen.



Abbildung 7: Überlaufbehälter Q2 mit vorgelagertem Ultraschallwellenpegel #14 und Pegel #17 im Behälter zur Messung der Änderung von Wasserständen.

In einer zentralen Datenerfassung wurden alle Wasserstandsänderungen im Modell mit einer Messfrequenz von 100 Hz aufgezeichnet.

Jeder Versuch wurde visuell durch eine Videokamera dokumentiert.

3.6 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm beinhaltet eine systematische Variation von hydraulischen und geometrischen Randbedingungen im Modell (Tabelle 5). Für zwei Wasserstände und drei Freibordhöhen wurden verschiedene Seegänge entsprechend der vorgegebenen Unterlagen (Kapitel 2 Abbildung 2) im Modell eingesteuert. Nach Rücksprache mit dem Auftraggeber wurden mit den vorgegebenen Seegangskenngrößen langkämmige JONSWAP Wellenspektren im Modell erzeugt.

Die zur Wellengenerierung erforderliche Peak-Wellenperiode T_p wurde aus der gegebenen Periode T_{m01} errechnet (EAK, 2007):

$$T_{m02} = 0,93 \cdot T_{m01}, \quad T_p = 1,21 \cdot T_{m02} \quad (2)$$

In Ergänzung zu den Vorgaben des Auftraggebers wurden weitere Wellenrichtungen untersucht, um mögliche ungünstige Seegangskonstellationen zu identifizieren.

Die einzelnen Versuche wurden mehrfach wiederholt, um die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten. Ein identischer „Seed“-Wert (Tabelle 5) entspricht dabei einer exakten Reproduktion des Versuchs. Ein variierender „Seed“-Wert repräsentiert einen anderen Phasen-



versatz bei der Generierung der Wellenspektren, wodurch die Abfolge einzelner Wellen im Wellenspektrum modifiziert wird, die spektralen Kenngrößen H_{m0} und T_p des Spektrums aber konstant bleiben.

Tabelle 5. Versuchsprogramm.

Test Nr.	Konfiguration	Kronenhöhe NHN (m)	Freibord R_c (m)	Wasserstand d (m NHN)	Wellenhöhe H_s (m)	Wellen-	Richtung (°)	Seed #	R_d/H_{m0}^{*1} (-)	
						periode T_p (s)				
110	Ist-Zustand	6,5	1,4	5,1	2,0	4,98	75	1	0,70	
111		6,5	1,4	5,1	2,0	4,98	75	2	0,70	
120		6,5	0,9	5,6	2,3	5,24	61	1	0,39	
121		6,5	0,9	5,6	2,3	5,24	61	2	0,39	
122		6,5	0,9	5,6	2,3	5,24	61	3	0,39	
123		6,5	0,9	5,6	2,3	5,24	61	4	0,39	
124		6,5	0,9	5,6	2,3	5,24	61	1	0,39	
125		6,5	0,9	5,6	2,3	4,76	61	1	0,39	
126		6,5	0,9	5,6	2,3	4,76	61	2	0,39	
130		6,5	0,9	5,6	2,2	5,11	65	1	0,41	
140		6,5	0,9	5,6	2,2	5,11	50	1	0,41	
141		6,5	0,9	5,6	2,2	5,11	50	2	0,41	
210		Ist-Zustand + 0,5 m	7,0	1,9	5,1	2,0	4,98	75	1	0,95
211			7,0	1,9	5,1	2,0	4,98	75	2	0,95
220	7,0		1,4	5,6	2,3	5,24	61	1	0,61	
221	7,0		1,4	5,6	2,3	5,24	61	2	0,61	
222	7,0		1,4	5,6	2,3	5,24	61	1	0,61	
225	7,0		1,4	5,6	2,3	4,76	61	1	0,61	
226	7,0		1,4	5,6	2,3	4,76	61	2	0,61	
230	7,0		1,4	5,6	2,2	5,11	65	1	0,64	
231	7,0		1,4	5,6	2,2	5,11	65	2	0,64	
240	7,0		1,4	5,6	2,2	5,11	50	1	0,64	
241	7,0		1,4	5,6	2,2	5,11	50	2	0,64	
310	Ist-Zustand + 1,1 m		7,6	2,5	5,1	2,0	4,98	75	1	1,25
320			7,6	2,0	5,6	2,3	5,24	61	1	0,87
321			7,6	2,0	5,6	2,3	5,24	61	2	0,87
322		7,6	2,0	5,6	2,3	5,24	61	3	0,87	
323		7,6	2,0	5,6	2,3	5,24	61	4	0,87	
324		7,6	2,0	5,6	2,3	5,24	61	1	0,87	
325		7,6	2,0	5,6	2,3	4,76	61	1	0,87	
326		7,6	2,0	5,6	2,3	4,76	61	2	0,87	
330		7,6	2,0	5,6	2,2	5,11	65	1	0,91	
331		7,6	2,0	5,6	2,2	5,11	65	2	0,91	
340		7,6	2,0	5,6	2,2	5,11	50	1	0,91	
341	7,6	2,0	5,6	2,2	5,11	50	2	0,91		

*1 Korrekturen gemäß Tabelle 4 sind zu berücksichtigen

*2 **fett** gedruckte Versuchsreihen entsprechen der Bemessungsrandbedingung



4 Durchführung der Modellversuche

Das in Kapitel 3.6 dargestellte Versuchsprogramm wurde sukzessive getestet.

4.1 Versuchsablauf

Zu Beginn eines Versuches wurde der Wasserstand im Wellenbecken mit Hilfe eines mechanischen Pegels (Genauigkeit: 0.1 mm) eingestellt. Im Anschluss wurde die Videokamera zur Dokumentation gestartet, darauf die Wellenmaschine mit voreingestelltem Seegangsspektrum (Wellenhöhe, Wellenperiode, Wellenrichtung) und im gleichen Moment die Messwerterfassung. Jedes Spektrum wurde für eine Dauer von $1100 \cdot T_p$ eingesteuert, um eine statistisch repräsentative Anzahl von Einzelwellen im Wellenspektrum zu gewährleisten (Daemrich et al., 2012). Während der Versuche wurde das Überlaufverhalten entlang der Bauwerkskrone fokussiert beobachtet, Auffälligkeiten wurden dokumentiert. Nach Beendigung der Wellengenerierung wurden die Messwerterfassung und die Videoaufzeichnung gestoppt und die Messdaten gespeichert. Ergänzend zur Messung per Ultraschallpegel wurden die Wasserstände in den Überlaufbehältern zur Qualitätssicherung manuell gemessen. Im Anschluss wurden die Überlaufbehälter mit einer Tauchpumpe geleert und für den folgenden Versuch vorbereitet.

4.2 Mess- und Auswerteverfahren

4.2.1 Seegang

Die Zeitreihen der Ultraschallwellenpegel wurden mit der Software WaveLAB3 (Frigaard & Andersen, 2014) ausgewertet. Die Aufbereitung der Zeitreihen beinhaltet eine Offset-Korrektur anhand der ersten 1.000 Datenpunkte sowie die Eliminierung von Spikes durch eine gleitende Mittelwertbildung über fünf aufeinander folgende Datenpunkte.

Die Seegangparameter werden im Frequenzbereich ermittelt (Bandpassfilterung mit unterer cut-off Frequenz von $0,33 \cdot f_p$ und oberer cut-off Frequenz von $3 \cdot f_p$). Die Anzahl der Einzelwellen wird nach dem der „Zero-Downcrossing“-Verfahren im Zeitbereich ermittelt.

Eine Reflexionsanalyse (Bayesian Directional Method, (Hashimoto & Kobune, 1988)) zur Bestimmung der einlaufenden Wellenrichtung und -Energie wird an den sechs Ultraschallwellenpegeln im Pegelfeld „Offshore“ durchgeführt. Nach gleichem Verfahren wird der Seegang im Pegelfeld „Aquaföhr“ analysiert.

4.2.2 Mittlere Wellenüberlaufrate

Das Volumen des Wellenüberlaufs, welcher in den vier Behältern hinter der Bauwerkskrone aufgefangen wurde, wurde indirekt über Wasserstandsänderungen Δh in den Behältern ermittelt, welche mit Ultraschallpegeln gemessen wurden. Die Differenz aus dem Mittelwert der letzten 500 Messwerte (5s) und dem Mittelwert der ersten 500 Messwerte jeder Zeitreihe der Ultraschallpegel in den Überlaufbehältern ergeben Δh . Zusammen mit der Grundfläche des Behälters (0,178 m x 1,0 m, Abbildung 7) ließ sich mit Δh das Überlaufvolumen Q in (m^3) berechnen.



Zur Bestimmung der mittleren Wellenüberlauftrate q wird das Überlaufvolumen mit der Dauer des Versuchs ($t = 1100 \cdot T_p$) und der Breite der Einlauföffnung des Überlaufbehälters b normiert zu

$$q = \frac{Q}{t \cdot b} \left(\frac{m^3}{s \cdot m} \right) \quad (3)$$

4.2.3 Ermittelte Kenngrößen

Die im Modell gemessenen Seegangskenngrößen und zugehörige mittlere Wellenüberlauftraten an den Messstellen Q1 bis Q4 sind in Tabelle 6 gelistet.

Tabelle 6: Ermittelte Kenngrößen.

Konfig.	Test Nr.	H_{m0} (m)	Err. (%)	T_p (m)	Err. (%)	Dir. (°)	Err. (°)	q_1 (l/s/m)	q_2 (l/s/m)	q_3 (l/s/m)	q_4 (l/s/m)
	110	1,77	11,5	5,22	4,7	74,6	0,4	53,65	3,10	-	0,01
	111	1,78	11,0	4,91	-1,3	74,2	0,8	54,85	3,14	-	-
	120	2,14	6,8	5,09	-2,9	58,7	2,3	232,35	139,66	1,61	4,41
	121	2,07	10,1	5,50	4,7	58,2	2,8	237,50	143,73	1,65	4,43
	122	2,23	2,9	5,15	-1,6	58,4	2,6	250,20	152,16	1,81	5,28
Ist-Zu-stand	123	2,15	6,3	5,22	-0,4	58,5	2,5	228,91	164,72	2,92	6,83
	124	2,04	11,4	4,85	-8,0	62,8	-1,8	216,04	156,18	2,00	6,83
	125	2,00	13,2	4,79	-1,3	56,5	-4,5	132,12	71,43	0,75	3,58
	126	1,99	13,7	4,68	1,0	56,3	-4,7	138,57	72,51	0,91	4,25
	130	1,92	12,7	5,15	0,7	49,5	15,5	147,79	118,29	3,40	9,68
	140	1,90	13,5	5,15	0,7	47,4	2,6	160,40	117,34	2,13	8,89
	141	1,91	13,2	5,15	0,7	47,2	2,8	148,75	65,84	1,62	6,96
	210	1,76	12,0	4,68	-6,2	74,2	0,8	3,12	0,89	-	-
	211	1,76	12,0	4,91	-1,3	74,1	0,9	2,79	0,97	0,02	0,02
	220	2,17	5,7	5,22	-0,4	58,5	2,5	169,93	29,73	0,56	0,30
	221	2,15	6,5	5,21	-0,5	58,3	2,7	158,52	21,59	0,56	0,29
Ist-Zu-stand	222	2,15	6,6	5,22	-0,4	58,2	2,8	138,11	-	0,32	0,34
	225	2,00	12,8	4,79	-1,3	56,0	-5,0	39,95	14,38	-	0,47
+ 0.5 m	226	1,98	13,9	4,68	1,0	56,3	-4,7	38,85	15,42	-	0,52
	230	2,04	7,5	4,85	-5,5	62,4	2,6	124,01	65,25	0,58	0,49
	231	2,06	6,4	4,85	-5,5	62,6	2,4	120,95	58,85	0,35	0,28
	240	1,92	12,9	5,15	0,7	47,0	3,0	83,26	17,79	0,05	0,40
	241	1,99	9,7	4,85	-5,5	47,8	2,2	74,09	15,78	0,06	0,39
	310	1,78	11,2	4,91	-1,3	74,3	0,7	0,84	0,67	-	-
	320	2,17	5,7	5,22	-0,4	58,1	2,9	87,67	8,60	0,49	0,08
	321	2,16	6,1	5,21	-0,5	58,3	2,7	72,35	9,08	0,64	0,07
	322	2,17	5,7	5,21	-0,5	58,5	2,5	78,76	9,09	0,48	0,07
Ist-Zu-stand + 1.1 m	323	2,19	4,8	5,21	-0,5	58,1	2,9	81,51	10,23	0,58	0,09
	324	2,19	4,8	5,22	-0,4	57,8	3,2	46,29	-	1,21	0,34
	325	1,98	13,8	4,68	1,0	56,4	-4,6	16,56	7,24	0,04	0,19
	326	1,98	13,7	4,79	-1,3	56,4	-4,6	16,89	6,59	-	0,12
	330	2,05	6,8	5,35	4,4	63,0	2,0	47,34	48,76	0,98	0,32
	331	2,06	6,3	4,85	-5,5	62,8	2,2	39,92	44,78	0,90	0,40
	340	1,92	12,6	5,15	0,7	47,3	2,7	21,68	8,60	-	0,10

* **fett** gedruckte Versuchsreihen entsprechen der Bemessungsrandbedingung

Naturgemäß bestehen Abweichungen zwischen der im System vorgegebenen Seeganggröße und dem tatsächlich gemessenen Wert im Modell. Wellenhöhen fallen im Modell im Mittel 9,5 % geringer aus als vorgegeben ($\Delta_{min} = 2,9 \%$, $\Delta_{max} = 13,9 \%$). Gemessene Peak-Perioden sind im Mittel um 1,6 % kleiner als vorgegeben ($\Delta_{min} = -10,3 \%$, $\Delta_{max} = +4,7 \%$). Die Wellenrichtung weicht im Mittel um $0,7^\circ$ von der Vorgabe ab ($\Delta_{min} = -5,0^\circ$, $\Delta_{max} = 3,2^\circ$). Diese Abweichungen können durch eine Kalibrierung der Eingabewerte im System verringert werden. In wie weit dies im vorliegenden Fall sinnvoll ist wird nachfolgend diskutiert.

Die Abweichungen haben je nach Parameter unterschiedliche Ursachen. Die signifikantesten Abweichungen betreffen die zu gering erzeugten Wellenhöhen (Abweichung: 9,5 %). Als Ursache kann die Leistungsgrenze der Wellenmaschine in Bezug auf die Generierung von Wellen mit einer Frequenz $> 1,8$ Hz ermittelt werden (vgl. Abbildung 8). Der Vergleich des gemessenen Energiedichtespektrums am Pegelfeld „Offshore“ (Reflexionskorrigiert) mit dem theoretischen Target-Spektrum zeigt, dass die erforderlichen Energiekomponenten bis zu einer Frequenz von 1,8 Hz genau reproduziert wurden, für höhere Frequenzen allerdings keine Wellengenerierung erfolgte. Dies hat zur Folge, dass die spektrale Wellenhöhe $H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$, welche aus dem 0. Moment (m_0 : „Integral der Energiedichte“) berechnet wird, zu gering ausfällt, obwohl ein Großteil der Energiekomponenten mit zugehöriger Frequenz $< 1,8$ Hz korrekt eingesteuert wird. Diese Randbedingung ist dem Auftraggeber nach der Kalibrierung der Seegangsdaten mitgeteilt worden. Da die den Wellenüberlauf maßgeblich beeinflussenden Frequenzen im Nieder- und Peak-Frequenzbereich im Modell hinreichend genau erzeugt werden konnten, wurde vereinbart, die Wellen in genau dieser Form zu erzeugen.

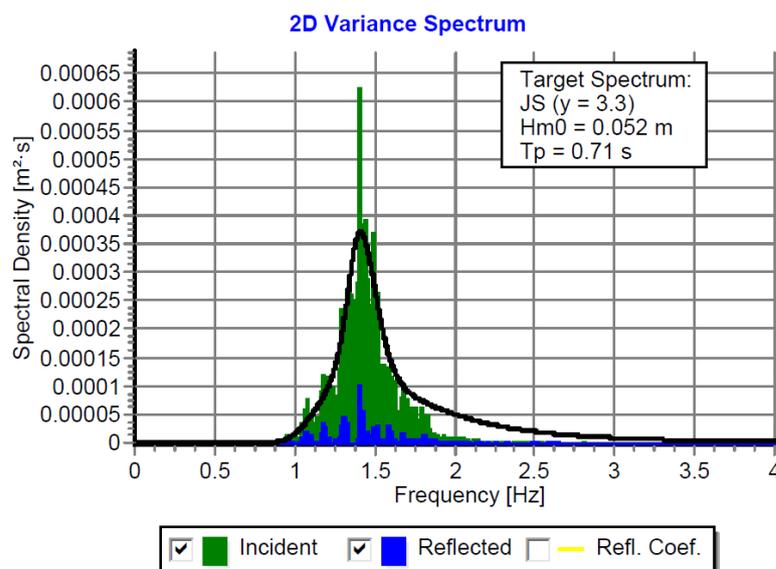


Abbildung 8: Energiedichtespektrum am Pegelfeld „Offshore“ für Test Nr. 226 (grün) mit Vergleich zum theoretischen Target-Spektrum (schwarz) im Modellmaßstab.



Die Abweichung der ermittelten Wellenperioden ist auf die Messgenauigkeit und den Modellmaßstab zurückzuführen. Die größte Abweichung von 8 % für Test Nr. 124 entspricht im Modellmaßstab einer Abweichung von 0,06 s vom Target-Wert und kann demnach als hinreichend genau angesehen werden.

Die Abweichung der Wellenrichtung von wenigen Grad wird ebenfalls als vernachlässigbar bewertet und kann auf das zu Grunde liegende Auswerteverfahren (Kapitel 4.2.1) sowie auf die Ausrichtungsgenauigkeit des Pegelfeldes im Modell zurückgeführt werden.

Wellenüberlaufmengen konnten mit einer Genauigkeit von 0,01 l/s/m bestimmt werden. Geringere Werte sind aus diesem Grund gestrichen „ – “ gekennzeichnet. In Versuch 222 und 324 waren die Überlaufmengen an Messstelle „Q2“ so groß, dass die Kapazität des Überlaufbehälters vor Versuchsende erreicht wurde und aus diesem Grund kein zuverlässiger Wert ermittelt werden konnte. Für diese Konfigurationen stehen alternativmesswerte zur Verfügung (Versuch 221 und 323).

5 Ergebnisse

5.1 Allgemeines

Das Versuchsprogramm ist so aufgestellt worden, dass der Einfluss verschiedener Randbedingungen auf die daraus resultierenden mittleren Wellenüberlaufmengen quantifiziert werden kann. Die Ergebnisse sind in Abbildung 11 (Seite 21) zusammengefasst, welche folgende Vergleiche ermöglicht:

Quantifizierung des Einflusses der

- i. Peak-Wellenrichtung und Mittleren Wellenrichtung (b zu c)
- ii. Windrichtung WSW vs. SW (c zu d)
- iii. Wellensteilheit (d zu e)

auf die mittleren Wellenüberlaufmengen für verschiedene Freibordhöhen.

5.2 Entwicklung des Seegangs im Küstennahfeld

Zum besseren Verständnis der Entwicklung mittlerer Wellenüberlaufmengen entlang der Küstenlinie der Südostspitze Föhrs wird zunächst auf die Entwicklung des Seegangs in diesem Bereich eingegangen. Abbildung 9 gibt eine schematische Darstellung der Wellenausbreitung im Untersuchungsgebiet am Beispiel von Test Nr. 111 (Wellenrichtung $\theta_p = 75^\circ$) mit Kennzeichnung von ausgewählten Wellenkämmen (rot, solid), Wellenkämme unter Refraktionseinfluss (rot, gestrichelt), Wellenstrahlen (weiß), Küstenorthogonalen (gelb) und Wellenangriffswinkeln an der Südküste (β_{51+800}) und Ostküste (β_{52+150}). Im hinteren Teil des Wellenbeckens ist keine Bathymetrie nachgebildet, so dass die Wellen sich hier ungehindert ausbreiten können. Die Wellen drehen mit zunehmender Abnahme der Wassertiefe in Küstennähe in Richtung der Küstenorthogonalen ein („Refraktion“, EAK, 2007).

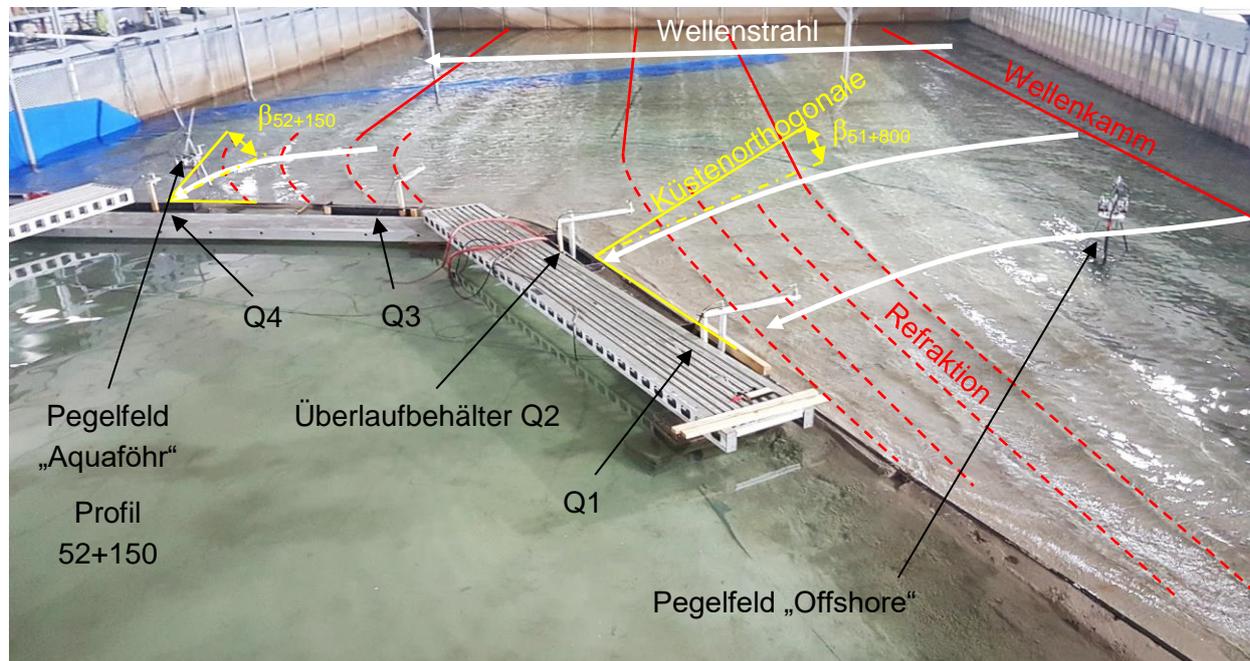


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Refraktion im Untersuchungsgebiet für Test Nr. 111 mit Kennzeichnung von Wellenkämmen (rot, solid), Wellenkämme unter Refraktioneinfluss (rot, gestrichelt), Wellenstrahlen (weiß), Küstenorthogonalen (gelb) und Wellenangriffswinkeln an der Südküste (β_{51+800}) und Ostküste (β_{52+150}).

In Abbildung 10 werden die Entwicklung der signifikanten Wellenhöhe H_{m0} , der Peak Wellensteilheit s_p und der Wellenangriffsrichtung β am Bauwerk betrachtet. Auf die Seegangsrandbedingungen am Übergabepunkt des Modells (Pegelfeld „Offshore“), die zum Vergleich herangezogen werden, wurde bereits in Kapitel 4.2.3 eingegangen.

Die an der Südküste (Profil 51+800) vor dem Küstenschutzbauwerk gemessene signifikante Wellenhöhe ist um etwa 80 % geringer als die Wellenhöhe am Übergabepunkt (Abbildung 10a). Ursache hierfür ist das tiefenbedingte Brechen der größten Wellen im Spektrum während die Wellen über die flacher werdende Bathymetrie in Richtung Küste laufen. Gleichzeitig ist Abbildung 10b) zu entnehmen, dass die Peak Wellensteilheit in diesem Bereich im Vergleich zur Peak Wellensteilheit am Übergabepunkt um etwa 20 % größer ist. Dies lässt sich durch den Shoaling-Effekt (EAK, 2007) erklären. Die Wellenangriffsrichtung an der Südküste (Abbildung 10c) wird aus der Wellenrichtung am Pegelfeld „Offshore“ berechnet (Refraktionseinflüsse werden nicht berücksichtigt), da im Vorfeld des Küstenschutzbauwerks kein weiteres Pegelfeld zur Richtungsanalyse des Seegangs angeordnet ist. Während der Versuche war zu beobachten, dass die Wellen in etwa um 10° zur Küste eindrehen.

Die im Pegelfeld „Aquaföhr“ an der Ostküste (Profil 52+150) gemessene signifikante Wellenhöhe ist um etwa 65 – 70 % geringer als am Pegelfeld „Offshore“ und damit geringer als an der Südküste (Abbildung 10a). Dies ist plausibel, da die Wellen eine größere Strecke in flachem Wasser

zurücklegen und aus diesem Grund stetig an Energie verlieren. Auch die Wellensteilheit ist im Vergleich zur Südküste geringer und beträgt zwischen 70 – 100 % des Wertes am Übergabepunkt (Abbildung 10b). Verantwortlich hierfür sind Transformationsprozesse der Welle über dem flachen Küstennahfeld. Die Wellenangriffsrichtung am Küstenschutz der Ostküste ist mit $60^\circ < \beta \leq 80^\circ$ vergleichsweise küstenparallel orientiert, wodurch lediglich ein geringer Anteil der Wellenergie den Wellenüberlauf erzeugen kann. Interessant ist, dass Offshore-Wellenrichtungen von 45° bis 64° die gleiche Wellenangriffsrichtung β am Küstenschutz der Ostküste aufweisen und lediglich für eine Offshore-Wellenrichtung aus 75° eine deutliche Änderung erkennbar ist. Es ist physikalisch plausibel, dass der geringere Wasserstand dieser Versuchskonstellation (+5.1 m NHN) das Einlenken der Wellen in Richtung Küstenorthogonale stärker forciert. Es ist demnach mit Bezug auf möglichst geringe mittlere Wellenüberlaufsraten an der Ostküste günstig, dass der Seegang bei einem höheren Wasserstand (+5,6 m NHN) unter einem spitzeren Winkel auf die Küste trifft.

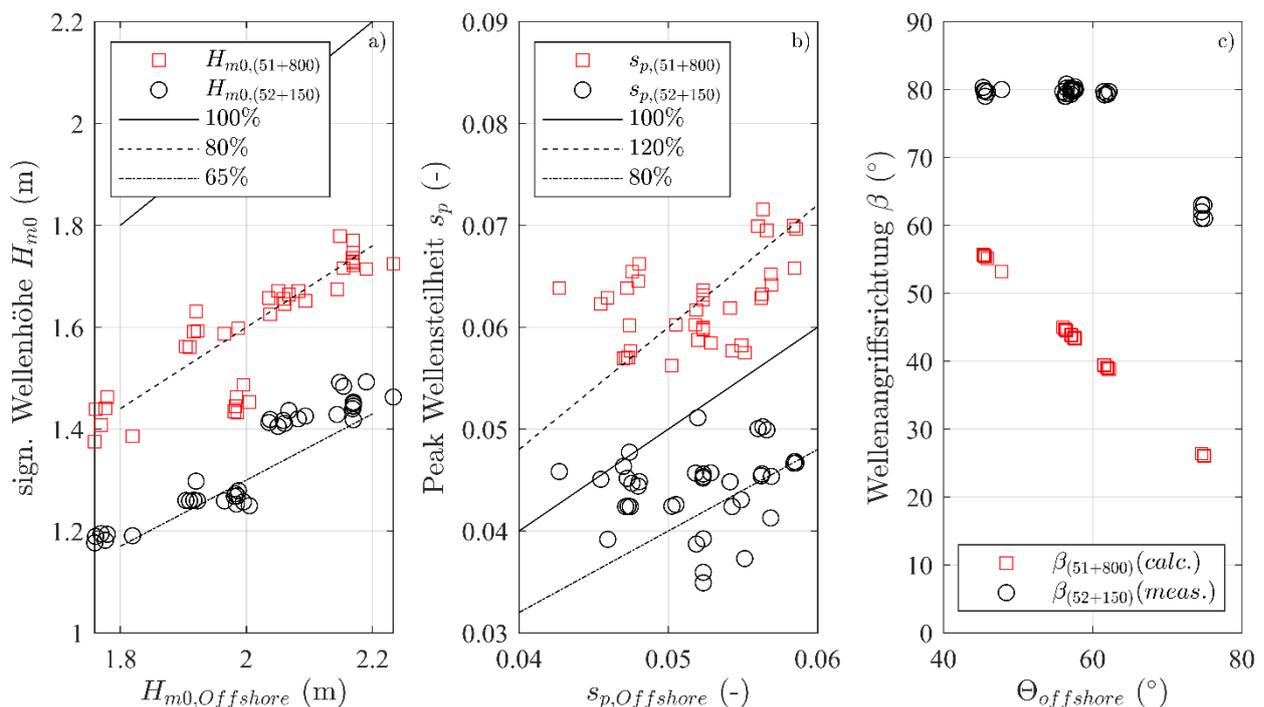


Abbildung 10: Entwickelte Seegangparameter 30 m vor dem Küstenschutzbauwerk (Profil 51+800 für die Südküste und Profil 52+150 für die Ostküste) im Vergleich zu zugehörigen Seegangparametern am Übergabepunkt Pegelfeld „Offshore“. a) Entwicklung der Wellenhöhe H_{m0} , b) Peak Wellensteilheit s_p und c) Wellenangriffsrichtung β am Bauwerk im Verhältnis zur Wellenrichtung.



5.3 Mittlere Wellenüberlaufzeiten

Für unterschiedlichen Wasserstände, Höhen der Bauwerkskrone und Seegangsrandbedingungen wurden mittlere Wellenüberlaufzeiten in Litern pro Sekunde und Meter Deichkrone an vier Positionen im Untersuchungsgebiet ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 11 zusammengefasst. In dieser halblogarithmischen Darstellung ist die mittlere Wellenüberlaufzeit q (l/s/m) über der Freibordhöhe R_c (m) gegeben. Die Variation der Bauwerkskronenhöhe ergibt sich aus den verschiedenen Freibordhöhen. Die geringste Freibordhöhe stellt den „Ist-Zustand“ dar (Abbildung 6a, Seite 9), die nächstgrößere Freibordhöhe eine Erhöhung der Bauwerkskrone um + 0,5 m (Abbildung 6b) und die größte Freibordhöhe eine Erhöhung der Bauwerkskrone um + 1,1 m verglichen zum „Ist-Zustand“ (Abbildung 6c).

Mittlere Wellenüberlaufzeiten sind jeweils für vier verschiedene Profile entlang der Küste gegeben. Ausgewählte Versuche wurden mehrfach wiederholt (Punktwolken). Hierdurch konnte eine Reproduzierbarkeit von Versuchsergebnissen nachgewiesen werden.

Generell zeigen die Ergebnisse, dass der mittlere Wellenüberlauf an der Südküste (Profil 51+650 und 51+800) im Vergleich zur Ostküste (Profil 52+000 und 52+150) höher ausfällt. Dies ist durch den orthogonalen Wellenangriff begründet (Kapitel 5.2). An der Südostspitze Föhrs ändern die Wellen refraktionsbedingt die Richtung und drehen über dem Strand in nordwestliche Richtung ein. Das Profil 52+000 liegt im "Windschatten" der Südostspitze Föhrs und folglich werden hier die geringsten Wellenüberlaufmengen gemessen.

Vor dem Wellenbad „Aquaföhr“ (Profil 52+150) werden für jede Versuchskonstellation geringere Überlaufmengen gemessen als an der Südküste. Ursache ist die weniger exponierte Lage sowie ein größerer Wellenangriffswinkel in diesem Bereich (Abbildung 9). Die Messstelle liegt hinter dem durch die Südostspitze Föhrs geschützten Bereich, wodurch die über der Bathymetrie vollständig refraktierten Wellen wieder auf das Küstenschutzbauwerk treffen.

Für den niedrigeren Wasserstand (+ 5.1 m NHN, Abbildung 11a) werden die größten Überlaufmengen an Profil 51+650² gemessen. Im Bereich des Wellenbades werden bei diesem Wasserstand für alle untersuchten Freibordhöhen mittlere Überlaufmengen unter 0,02 l/s/m gemessen. An Profil 52+000 wird kein Überlauf gemessen.

² Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die im Vergleich zu den übrigen Profilen hohen Überlaufmengen an diesem Profil auf einen Modelleffekt zurückzuführen sind. Die künstliche Verringerung der Wassertiefe durch eine Neigung von 1:10 im Vorfeld der Bathymetrie musste in diesem Bereich aus Platzgründen verkürzt errichtet werden (vgl. Abbildung 4). Hierdurch kann das tiefeninduzierte Wellenbrechen im Modellversuch mit geringerer Intensität ausfallen als in der Natur tatsächlich vorherrschend und somit mehr Wellenenergie bis direkt an das Küstenschutzbauwerk heranlaufen. Es wird daher empfohlen die ermittelten mittleren Wellenüberlaufzeiten dieses Profils als Anhaltspunkt und nicht als Absolut-Wert zu betrachten. Aus physikalischer Sicht sollten die Überlaufmengen von Profil 51+650 und 51+800 sehr ähnlich sein, da deren Expositionslage nahezu identisch ist.



Für die Versuche mit höherem Wasserstand (+ 5.6 m NHN, Abbildung 11b-e) werden die gleichen Tendenzen beobachtet. Die mittleren Überlaufmengen sind erwartungsgemäß höher (an der Südküste signifikant, für eine Freibordhöhe von $R_c < 1$ m erzeugte nahezu jede Welle einen Überlauf).

Im Folgenden werden die Einflüsse der Wellenrichtung, der Hauptwindrichtung und der Wellensteilheit auf die mittleren Wellenüberlaufmengen erläutert.

i. Einfluss der Wellenrichtung

Um den Unterschied zwischen der in der numerischen Vorstudie (Kapitel 2.2) ermittelten „Mittleren-Wellenrichtung“ (Mittelwert aller Wellenrichtungen in einer Zeitreihe) und der „Peak-Wellenrichtung“ (Richtung der dominierenden Wellenrichtung in einer Zeitreihe) zu quantifizieren, können Abbildung 11b) und c)³ verglichen werden. Zwischen beiden Versuchskonstellationen wird lediglich die Wellenrichtung des langkämmigen Seegangs variiert. Die Daten zeigen, dass die mittleren Wellenüberlaufmengen für die spitzer anlaufende Wellenrichtung (Abbildung 11b) geringer ausfallen. Die Verringerung ist an der Südküste größer als an der Ostküste. Demnach verringert die refraktionsbedingte Transformation des Seegangs den Einfluss der Wellenanlaufrichtung auf die mittleren Wellenüberlaufmengen (Abbildung 10c).

ii. Einfluss der Hauptwindrichtung

Zur Ermittlung, ob Windrichtungen aus Süd-West (SW) oder West-Süd-West (WSW) zu höheren mittleren Wellenüberlaufmengen führen, werden entsprechende Randbedingungen untersucht (Abbildung 11b) und d)). Es zeigt sich, dass an der Südküste höhere mittlere Wellenüberlaufmengen für die Windrichtung SW (Abbildung 11d) gemessen werden. An der Ostküste sind keine signifikanten Unterschiede in den mittleren Wellenüberlaufmengen abzulesen. Die refraktionsbedingten Transformationsprozesse des einlaufenden Wellenfeldes führen zu einer Verringerung der Wellenhöhe und einer küstenparalleleren Fortlaufen der Wellen. Beide Einflüsse wirken sich begünstigend auf die Verringerung von mittleren Wellenüberlaufmengen aus.

iii. Einfluss der Wellensteilheit

Die Wellensteilheit ($s = H_{m0}/L_0$) ist in vielen Versuchen $s \leq 0,05$, wohingegen in der Natur von einer höheren Wellensteilheit ($s \cong 0,06$) auszugehen ist (Tabelle 1). Aus diesem Grund wird eine

³ In den Versuchen zur größten Freibordhöhe mit Kronenhöhe 7,6 m NHN ist an den Profilen 52+000 und 52+150 aufgrund einer Undichtigkeit ein Modellfehler aufgetreten und es sind zu hohe Wellenüberläufe gemessen worden. Referenzversuche konnten den Fehler dahingehend quantifizieren, dass die gemessenen Werte für diese Konfiguration rund 3-fach überschätzt sind. Aus diesem Grund wurde eine Verminderung der mittleren Überlaufmengen dieser beiden Versuchskonfigurationen um den Faktor 3 vorgenommen, um physikalisch plausibel zu bleiben. Die gemessenen Werte sind zum Vergleich grau schattiert dargestellt.



weitere Versuchsreihe zum Einfluss der Wellensteilheit auf die mittleren Überlaufmengen durchgeführt (Abbildung 11d) und e)). Insbesondere an der Südküste führt die erhöhte Wellensteilheit zu einer Halbierung der mittleren Überlaufmengen. An der Ostküste sind die mittleren Überlaufmengen annähernd identisch, was die zuvor gezogene Schlussfolgerung unterstützt, dass in diesem Bereich bereits gänzlich transformierter Seegang (Refraktion, tiefeninduziertes Wellenbrechen) ankommt und feine Unterschiede im ursprünglichen Seegang vor der Südküste Föhrs keine signifikante Änderungen der mittleren Überlaufmengen hervorrufen (Abbildung 10).

Die in Abbildung 11a) (+ 5,1 m NHN) und Abbildung 11e) (+ 5,6 m NHN) dargestellten Ergebnisse sind den vom Auftraggeber zu Beginn der Studie vorgegebenen Randbedingungen (Kapitel 2.2, Seite 3) zuzuordnen. Die weiteren unterschiedlichen Versuchsreihen dienen der Einschätzung des Systemverhaltens zum mittleren Wellenüberlauf bei Änderungen hydraulischer oder geometrischer Randbedingungen am Küstenschutz in Wyk auf Föhr.

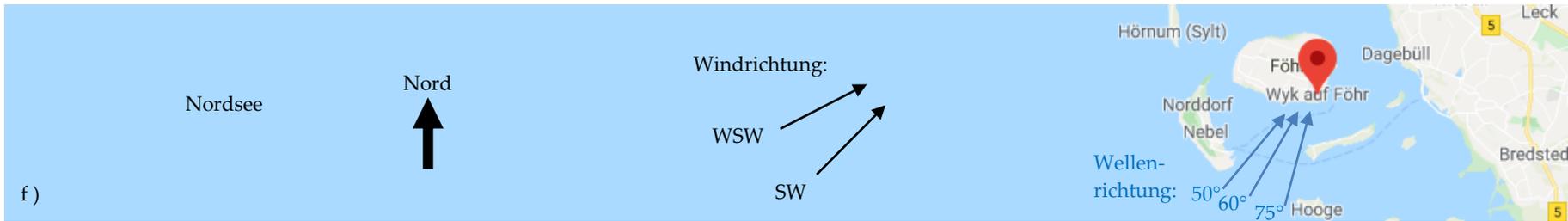
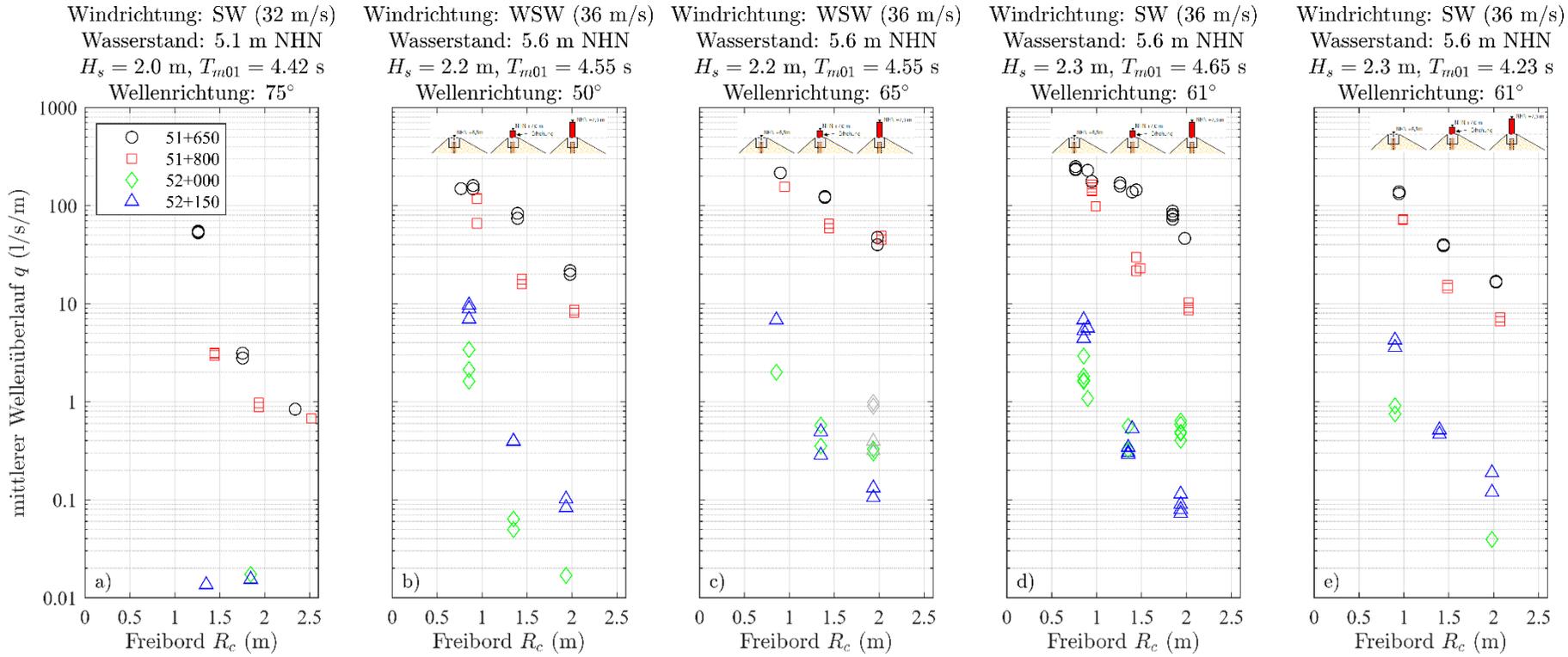


Abbildung 11: a-e): Mittlere Wellenüberlaufsraten q (l/s/m) an vier Profilen entlang der südöstlichen Küstenlinie Föhrs in Abhängigkeit verschiedener geometrischer und hydraulischer Randbedingungen. f): Wind- und Wellenrichtung (Google Maps, 2020).

6 Modelleffekte

Jeder hydraulischer Modellversuch unterliegt Modell- und Maßstabseffekten. Letztere sind in Kapitel 3.3 behandelt. Modelleffekte können aufgrund nicht naturähnlicher Nachbildung des Modells oder der in der Natur maßgebenden Kräfte auftreten. Auch die Erfassung und die Analyse von gemessenen Daten können einen Einfluss haben (Kapitel 3.5 und 4.2). Ursachen von Modelleffekten stellen das Bauwerk in der Natur (z.B. Entwicklung der Unterwassertopographie), die Konstruktion im Modell (z.B. Oberflächenrauheit), die Randsteuerung (z.B. Wellengenerierung), die Messung (z.B. Position und Art des Messgeräts), die Datenerfassung (z.B. Abtastrate), die Datenanalyse (z.B. Analysezeitraum) sowie vernachlässigte Prozesse (z.B. Wind, Strömungen) dar (Schüttrumpf et al., 2007).

Im Folgenden wird auf wichtige Modelleffekte eingegangen bzw. auf entsprechende Kapitel verwiesen, in denen die Einflüsse von Modelleffekten auf Ergebnisse bereits diskutiert sind.

6.1 Bathymetrie (Unterwassertopographie)

Die Bathymetrie hat einen Einfluss auf die Wellentransformation. Die Bathymetrie wurde gemäß Befliegungsdaten aus 2019 erstellt. Da das Küstenvorfeld sandig ist unterliegt es dynamischen Umlagerungsprozessen, die für stetige Änderungen der Bathymetrie verantwortlich sind. Demzufolge stellt die untersuchte Bathymetrie nur eine ähnliche Randbedingung für einen zu einem späteren Zeitpunkt eintretenden Bemessungsfall dar.

Bei der Bestimmung der im Modell nachzubildenden Bathymetrie wurde auf langjährige Erkenntnisse internationaler Wasserbaulaboratorien zurückgegriffen (Frostick et al., 2011; Hughes, 1993). Es wird vermutet, dass die an Überlaufbehälter Q1 gemessenen mittleren Wellenüberlaufmengen aufgrund der verminderten Länge der im Vorfeld nachgebildeten Bathymetrie größer ausfallen als in der Natur. Der vermutete Einfluss ist in Kapitel 4.2.3 näher diskutiert.



Abbildung 12: Steilere Neigung vor der Modellbathymetrie zwischen Profil 51+350 und 51+600.

6.2 Oberflächenrauheit

Das Modell wurde aus Estrich errichtet und die Oberfläche mit einem Richtscheit glatt abgezogen. Die Oberfläche des Modells ist demzufolge sandrau. Der sandige Meeresboden im Untersuchungsgebiet ist ebenfalls sandrau. Das Modell weist demzufolge eine zu hohe Rauheit im Bereich der Bathymetrie auf, woraus eine leicht erhöhte Energiedissipation abzuleiten ist.

Einen wesentlicheren Einfluss hat die Vernachlässigung des in der Natur bestehenden Bewuchses auf dem Küstenschutzbauwerk. Im Modell ist auch dieses sandrau ausgeführt (vgl. Abbildung 13). Diese Ausführung ist mit dem Auftraggeber abgestimmt und wird als konservative Variante gesehen, da im Bemessungsfall der Zustand bzw. die Präsenz von Vegetation auf dem Küstenschutzbauwerk nicht sichergestellt werden kann. Gleichzeitig würde die Präsenz von Vegetation die Oberflächenrauigkeit in der Natur erhöhen und somit die zu erwartenden mittleren Wellenüberlaufmengen reduzieren (EurOtop, 2018).

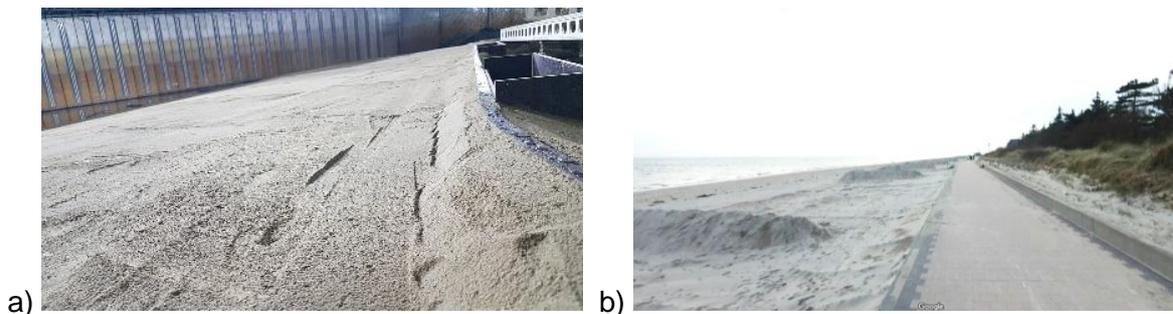


Abbildung 13: Vergleich der Oberflächenrauheit. a) Modell mit sandrauer Oberfläche. b) Modellausschnitt in der Natur mit Bewuchs auf dem Küstenschutz (Quelle: Eugen Miljas, 2018).

6.3 Zulaufbreite zu Überlaufbehältern

Für die geringsten Freibordhöhen musste die Zulaufbreite zu den Überlaufbehältern verringert werden, um das zur Verfügung stehende Volumen des Behälters nicht vor Beendigung des laufenden Versuchs vollständig zu füllen (vgl. Abbildung 14 mit Abbildung 7). Die Überprüfung des Einflusses der Breite des Überlaufbehälters auf die gemessene Überlaufmenge hat ergeben, dass für die Tests mit der schmalsten Öffnung (2 cm, bei den kleinsten Freibordhöhen an der Südküste) die Überlaufmengen 18 % größer ausgefallen sind, als bei einem Versuch, bei dem über die gesamte Öffnungsweite von 1,0 m gemessen wurde. Die in Tabelle 6 und Abbildung 11 verwendeten Werte der mittleren Wellenüberlaufmengen liegen demnach auf der sicheren Seite. Eine ingenieurmäßige Verringerung der Messwerte für Wasserstände von +5,6 m NHN mit zugehöriger Kronenhöhe von +6,5 m NHN ist demzufolge zulässig.



Abbildung 14: Verringerte Zulaufbreite an Überlaufbehälter Q1 für Versuche mit niedrigem Freibord (Wasserstand: +5,6 m NHN, Kronenhöhe: +6,5 m NHN).

6.4 Vernachlässigte Prozesse

Tideströmungen und Wind sind im Modell vernachlässigt, was aufgrund der Komplexität der realitätsnahen Modellierung dieser Effekte der gängigen Praxis entspricht. Dennoch kann insbesondere der Wind in Abhängigkeit der Richtung und Intensität einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die tatsächlichen lokal gemessenen mittleren Wellenüberlaufmengen aufweisen (EurOtop, 2018). Es wird darauf hingewiesen, dass Wind in Richtung des Küstenschutzbauwerks für höhere mittlere Wellenüberlaufmengen verantwortlich sein kann. Dies würde die Südküste Föhrs betreffen. An der Ostküste hingegen kann ablandiger Wind zu einer Verringerung von mittleren Überlaufmengen führen.



7 Zusammenfassung

Im 3D-Wellenbecken des Ludwig-Franzius-Instituts wurden physikalische Modellversuche zur Bestimmung mittlerer Wellenüberlaufzeiten am Küstenschutz in Wyk auf Föhr durchgeführt. Die Zielstellung der Untersuchung umfasste die Quantifizierung von mittleren Wellenüberlaufzeiten für verschiedene Seegangs-Szenarien, Wasserstände und Erhöhungen des Küstenschutzbauwerks. Alle Parameter wurden systematisch variiert, so dass aus den Ergebnissen ein generelles Prozessverständnis zur Entwicklung von mittleren Wellenüberlaufzeiten entlang der Küstenlinie im Untersuchungsgebiet abgeleitet werden kann.

Die im Folgenden zusammengefassten Ergebnisse vereinfachen die Beurteilung der anfallenden mittleren Wellenüberlaufzeiten unter bestimmten Seegangs-Szenarien und Ausbaustufen des Küstenschutzes und bieten somit Grundlagen für eine Optimierung für zukünftige Anwendungsfälle:

- Die Südküste (Profil 51+660 bis 51+800) weist aufgrund ihrer exponierteren Lage im Vergleich zur Ostküste (Profil 52+000 bis 52+150) bei gleicher Freibordhöhe um ein Vielfaches größere mittlere Wellenüberlaufzeiten auf.
- Die Reduktion der mittleren Wellenüberlaufzeiten an der Ostküste ist im Wesentlichen auf die – durch Wellentransformationsprozesse (Refraktion, Wellenbrechen) über der relativ flachen Küstenbathymetrie bedingte – Reduktion der Wellenhöhe sowie eines spitzeren Wellenangriffswinkels zurückzuführen.
- Für einen Wasserstand von +5,1 m NHN sind an der Ostküste keine nennenswerten Wellenüberläufe gemessen worden.
- Eine Kronenerhöhung auf +7,0 m NHN durch eine senkrechte Wand führte in allen Fällen zu einer signifikanten Reduzierung der gemessenen mittleren Wellenüberlaufzeiten. Die Erhöhung der Krone auf ein Niveau von 7,6 m NHN durch eine senkrechte Wand führte im Vergleich zur Erhöhung auf 7,0 m NHN zu einer weiteren Reduzierung der mittleren Wellenüberlaufzeiten, allerdings fiel diese im Verhältnis deutlich geringer aus.
- Variationen in der Wellenangriffsrichtung, der Wellenhöhe und der Wellensteilheit führten lediglich an der Südküste zu nennenswerten Änderungen der mittleren Wellenüberlaufzeiten. Die refraktionsbedingten Transformationsprozesse des einlaufenden Wellenfeldes führten zu harmonisierten hydraulischen Randbedingungen vor der Ostküste.

Die ermittelten mittleren Wellenüberlaufmengen sind unter Berücksichtigung der dargestellten Modell- und Skalierungseffekte entstanden und daher unter Beachtung der Interpretationsgrenzen (z.B. Messungenauigkeiten) zu verwenden.

Sollten weitere detaillierte Untersuchungen zur bauwerksseitigen Optimierung der Reduzierung mittlerer Wellenüberlaufzeiten angestrebt werden (z.B. Kronendetails oder Rauheitselemente auf der Außenböschung), wird empfohlen diese in einem größeren Modellmaßstab durchzuführen.



Literaturverzeichnis

- Daemrich, K.-F., Mai, S., & Kerpen, N. B. (2012). On the reasons of scatter in data for design formula evolution. *6th CG Joint Symp. on Hydr. and Ocean Eng.*, 6.
- EAK. (2007). *Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken* (Bd. 65). Ausschuss für Küstenschutzwerke.
- EurOtop. (2018). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application* (J. W. Van der Meer, N. W. H. Allsop, T. Bruce, J. De Rouck, A. Kortenhaus, T. Pullen, H. F. R. Schüttrumpf, P. Troch, & B. Zanuttigh, Hrsg.; Second Edition 2018). www.overtopping-manual.com. www.overtopping-manual.com
- Frigaard, P., & Andersen, T. L. (2014). *Analysis of Waves: Technical documentation for WaveLab* 3. Department of Civil Engineering, Aalborg University.
- Frostick, L. E., McLelland, S. J., & Mercer, T. G. (2011). *Users guide to physical modelling and experimentation: Experience of the HYDRALAB network* (1st ed.). CRC Press/Balkema.
- Hashimoto, N., & Kobune, K. (1988). Directional spectrum estimation from a Bayesian approach. *21. Coastal Eng Conf*, 62–76. <https://kyushu-u.pure.elsevier.com/en/publications/directional-spectrum-estimation-from-a-bayesian-approach>
- Hughes, S. A. (1993). *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering* (Bd. 7). World Scientific.
- Schüttrumpf, H., Kortenhaus, A., Pullen, T., Allsop, W., & Bruce, T. (2007). Eurotop – Das europäische Wellenüberlaufhandbuch. *Die Küste*, 72, 26.

Anhang

Modellmaßstab 1:45

Test-Nr	Pegel 13				Pegel 14				Pegel 15				Pegel 8				Pegelfeld Offshore				Pegelfeld Aquaföhr				Wellenüberlauf												
	Wellenhöhe	Peakperiode	Energie Periode	Wellenlänge	Wellenhöhe	Peakperiode	Energie Periode	Wellenlänge	Wellenhöhe	Peakperiode	Energie Periode	Wellenlänge	Wellenhöhe	Peakperiode	Energie Periode	Wellenlänge	Reflexionskoeffizient	Wellenhöhe	Peakperiode	Energie Periode	Wellenrichtung (Beckenkoordinaten)	Reflexionskoeffizient	Wellenhöhe	Peakperiode	Energie Periode	Wellenrichtung (Beckenkoordinaten)	Wellenlänge	Versuchszeit	Breite Behälter 1	Breite Behälter 2	Breite Behälter 3	Breite Behälter 4	mittlerer Wellenüberlauf Profil 51+650	mittlerer Wellenüberlauf Profil 51+800	mittlerer Wellenüberlauf Profil 52+000	mittlerer Wellenüberlauf Profil 52+150	Freibordhöhe
	Hm0	Tp	Tm-1,0	L	Cr	Hm0	Tp	Tm-1,0	Dir	Cr	Hm0	Tp	Tm-1,0	Dir	L	t	b1	b2	b3	b4	q1	q2	q3	q4	Rc												
m	s	s	m	m	s	s	m	m	s	s	m	m	s	s	m	-	m	s	s	°	-	m	s	s	°	m	s	m	m	m	m	m ² /s/m	m ² /s/m	m ² /s/m	m ² /s/m	m	
110	0.034	0.731	0.670	0.508	0.031	0.731	0.671	0.490	0.029	0.780	0.714	0.536	0.029	0.780	0.693	0.529	0.27	0.039	0.778	0.726	95.0	0.40	0.027	0.731	0.695	118.0	0.579	816	0.05	1.00	1.00	1.00	0.0001777	0.0000103		0.0000000	0.031
111	0.034	0.738	0.674	0.512	0.033	0.694	0.672	0.491	0.028	0.773	0.710	0.531	0.029	0.738	0.695	0.531	0.27	0.040	0.731	0.732	94.6	0.43	0.027	0.740	0.707	117.0	0.591	816	0.05	1.00	1.00	1.00	0.0001817	0.0000104		0.031	
121	0.042	0.845	0.768	0.637	0.037	0.845	0.754	0.601	0.033	0.795	0.738	0.570	0.036	0.845	0.732	0.580	0.31	0.048	0.759	0.762	77.7	0.47	0.032	0.819	0.759	99.0	0.708	859	0.02	0.02	1.00	0.21	0.0007697	0.0004627	0.0000053	0.0000146	0.020
122	0.041	0.819	0.757	0.621	0.037	0.819	0.749	0.594	0.033	0.819	0.742	0.576	0.036	0.819	0.725	0.571	0.31	0.046	0.819	0.757	77.1	0.48	0.032	0.819	0.763	98.8	0.708	859	0.02	0.02	1.00	0.21	0.0007868	0.0004761	0.0000055	0.0000147	0.020
123	0.044	0.931	0.791	0.671	0.038	0.975	0.798	0.666	0.033	0.920	0.773	0.621	0.037	0.780	0.728	0.575	0.32	0.050	0.768	0.772	77.2	0.46	0.033	0.917	0.774	99.3	0.872	859	0.02	0.02	1.00	0.21	0.0008288	0.0005041	0.0000060	0.0000175	0.020
124	0.043	0.811	0.768	0.638	0.038	0.942	0.786	0.649	0.034	0.811	0.733	0.563	0.037	0.780	0.720	0.563	0.31	0.048	0.778	0.766	77.6	0.48	0.033	0.778	0.760	98.6	0.645	859	0.02	0.02	1.00	0.20	0.0007583	0.0005457	0.0000097	0.0000226	0.020
125	0.036	0.712	0.672	0.509	0.033	0.672	0.648	0.462	0.032	0.803	0.694	0.509	0.033	0.745	0.675	0.506	0.33	0.044	0.714	0.710	76.5	0.45	0.028	0.714	0.705	98.8	0.556	780	0.02	0.05	1.00	0.20	0.0004377	0.0002366	0.0000025	0.0000119	0.021
126	0.034	0.845	0.676	0.515	0.032	0.672	0.644	0.457	0.033	0.803	0.697	0.512	0.032	0.752	0.677	0.508	0.33	0.044	0.698	0.707	76.3	0.46	0.028	0.749	0.709	100.0	0.604	780	0.02	0.05	1.00	0.20	0.0004590	0.0002402	0.0000030	0.0000141	0.021
130	0.039	1.011	0.759	0.624	0.036	0.920	0.732	0.571	0.035	0.803	0.721	0.545	0.037	0.803	0.712	0.553	0.31	0.045	0.723	0.746	82.0	0.49	0.032	0.808	0.740	99.7	0.691	840	0.02	0.02	1.00	0.20	0.0007157	0.0005174	0.0000066	0.0000226	0.020
140	0.042	0.803	0.767	0.636	0.036	0.803	0.754	0.602	0.031	0.766	0.717	0.540	0.034	0.725	0.707	0.547	0.33	0.043	0.768	0.759	67.8	0.45	0.029	0.749	0.750	99.0	0.604	839	0.02	0.02	1.00	0.20	0.0004896	0.0003919	0.0000113	0.0000321	0.020
141	0.041	0.920	0.786	0.665	0.035	0.803	0.760	0.610	0.031	0.766	0.720	0.544	0.033	0.752	0.713	0.554	0.32	0.042	0.768	0.761	65.9	0.44	0.028	0.749	0.750	99.4	0.604	839	0.02	0.02	1.00	0.20	0.0005314	0.0003887	0.0000070	0.0000294	0.020
210	0.033	0.719	0.672	0.509	0.031	0.752	0.675	0.495	0.027	0.780	0.720	0.543	0.029	0.752	0.687	0.521	0.28	0.039	0.698	0.732	94.6	0.40	0.026	0.798	0.708	118.0	0.675	816	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0000103	0.0000029		0.042	
211	0.034	0.694	0.672	0.510	0.032	0.694	0.670	0.488	0.028	0.773	0.711	0.531	0.029	0.890	0.717	0.560	0.27	0.039	0.731	0.732	94.6	0.43	0.026	0.740	0.706	116.0	0.591	816	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0000092	0.0000032	0.0000001	0.0000001	0.042
220	0.045	0.811	0.772	0.644	0.039	0.910	0.782	0.643	0.033	0.811	0.744	0.578	0.036	0.942	0.749	0.603	0.32	0.048	0.778	0.767	77.5	0.45	0.032	0.819	0.773	99.2	0.708	859	0.02	0.05	1.00	1.00	0.0005629	0.0000985	0.0000019	0.0000010	0.031
221	0.034	0.738	0.677	0.516	0.032	0.738	0.676	0.497	0.028	0.773	0.708	0.528	0.029	0.752	0.691	0.526	0.27	0.039	0.731	0.733	94.6	0.43	0.026	0.740	0.704	117.0	0.591	816	1.00	1.00	1.00	1.00	0.0000028	0.0000022		0.055	
222	0.044	0.811	0.773	0.645	0.040	0.942	0.791	0.656	0.033	0.811	0.736	0.567	0.037	0.942	0.745	0.599	0.33	0.048	0.778	0.767	77.2	0.48	0.033	0.830	0.764	98.9	0.726	859	0.02	0.05	1.00	1.00	0.0004575		0.0000011	0.0000011	0.031
225	0.035	0.890	0.682	0.522	0.032	0.712	0.650	0.465	0.032	0.803	0.691	0.505	0.033	0.745	0.679	0.510	0.36	0.045	0.714	0.709	76.0	0.45	0.028	0.714	0.707	99.3	0.556	780	0.05	0.05	1.00	1.00	0.0001323	0.0000476		0.0000015	0.032
226	0.034	0.845	0.675	0.513	0.032	0.672	0.643	0.456	0.032	0.803	0.697	0.513	0.032	0.752	0.677	0.508	0.34	0.044	0.698	0.708	76.3	0.46	0.028	0.749	0.709	100.0	0.604	780	0.05	0.05	1.00	1.00	0.0001287	0.0000511		0.0000017	0.032
230	0.040	0.920	0.746	0.606	0.037	0.920	0.743	0.586	0.034	0.803	0.721	0.545	0.036	0.803	0.713	0.555	0.34	0.045	0.723	0.745	81.5	0.49	0.031	0.808	0.745	99.3	0.691	840	0.02	0.05	1.00	1.00	0.0004108	0.0002161	0.0000019	0.0000016	0.031
231	0.040	0.828	0.731	0.586	0.037	0.910	0.727	0.564	0.034	0.828	0.727	0.554	0.037	0.845	0.713	0.554	0.33	0.046	0.723	0.742	81.6	0.47	0.031	0.853	0.738	99.8	0.763	840	0.02	0.05	1.00	1.00	0.0004007	0.0001950	0.0000012	0.0000009	0.031
240	0.043	0.920	0.788	0.667	0.035	0.803	0.767	0.620	0.031	0.766	0.718	0.542	0.033	0.752	0.712	0.552	0.34	0.043	0.768	0.762	65.3	0.45	0.028	0.788	0.753	98.7	0.660	839	0.02	0.05	1.00	1.00	0.0002758	0.0000589	0.0000002	0.0000013	0.031
241	0.041	0.828	0.781	0.656	0.036	0.828	0.760	0.610	0.030	0.862	0.730	0.559	0.034	0.752	0.705	0.544	0.34	0.044	0.723	0.756	65.6	0.45	0.028	0.788	0.753	100.0	0.660	839	0.02	0.05	1.00	1.00	0.0002454	0.0000523	0.0000002	0.0000013	0.031
310	0.044	0.845	0.772	0.644	0.038	0.845	0.760	0.610	0.033	0.795	0.741	0.573	0.036	0.872	0.736	0.585	0.34	0.048	0.778	0.767	77.1	0.47	0.032	0.819	0.762	99.2	0.708	859	0.02	0.05	1.00	1.00	0.0005251	0.0000715	0.0000019	0.0000010	0.031
320	0.045	0.811	0.771	0.641	0.039	0.910	0.787	0.650	0.033	0.811	0.744	0.578	0.036	0.942	0.747	0.601	0.34	0.048	0.778	0.767	77.1	0.45	0.032	0.945	0.773	99.0	0.923	859	0.02	0.05	1.00	1.00	0.0002904	0.0000285	0.0000016	0.0000003	0.044
321	0.045	0.845	0.768	0.638	0.038	0.845	0.759	0.608	0.032	0.795	0.742	0.575	0.036	0.795	0.724	0.569	0.34	0.048	0.778	0.767	77.1	0.47	0.032	0.878	0.766	98.9	0.803	859	0.02	0.05	1.00	1.00	0.0002397	0.0000301	0.0000021	0.0000002	0.044
322	0.044	0.819	0.760	0.627	0.038	0.819	0.755	0.603	0.033	0.819	0.747	0.582	0.036	0.819	0.723	0.568	0.34	0.048	0.778	0.767	77.1	0.48	0.032	0.819	0.763	99.2	0.708	859	0.02	0.05	1.00	1.00	0.0002609	0.0000301	0.0000016	0.0000002	0.044
323	0.047	0.931	0.794	0.677	0.039	0.910	0.792	0.657	0.033	0.920	0.775	0.623	0.037	0.920	0.759	0.618	0.34	0.048	0.778	0.767	77.1	0.46	0.032	0.931	0.780	99.7	0.897	859	0.02	0.05	1.00	1.00	0.0002700	0.0000339	0.0000019	0.0000003	0.044
324	0.045	0.811	0.777	0.651	0.038	0.942	0.788	0.652	0.033	0.811	0.738	0.569	0.036	0.811	0.726	0.572	0.33	0.049	0.778	0.766	76.5	0.48	0.033	0.830	0.765	98.2	0.726	859	0.05	1.00	1.00	1.00	0.0001533		0.0000040	0.0000011	0.044
325	0.034	0.845	0.677	0.516	0.032	0.845	0.670	0.488	0.032	0.803	0.696	0.511	0.032</																								

Prototyp Maßstab 1:1

Test-Nr	Pegel 13				Pegel 14				Pegel 15				Pegel 8				Pegelfeld Offshore					Pegelfeld Aquaföhr					Wellenüberlauf														
	Wellenhöhe	Peakperiode	Energie Periode	Wellenlänge	Wellenhöhe	Peakperiode	Energie Periode	Wellenlänge	Wellenhöhe	Peakperiode	Energie Periode	Wellenlänge	Wellenhöhe	Peakperiode	Energie Periode	Wellenlänge	Wellenhöhe	Peakperiode	Energie Periode	Wellenrichtung	Reflexionskoeffizient	Wellenhöhe	Peakperiode	Energie Periode	Wellenrichtung	Reflexionskoeffizient	Wellenhöhe	Peakperiode	Energie Periode	Wellenrichtung	Wellenlänge	Versuchszeit	Breite Behälter 1	Breite Behälter 2	Breite Behälter 3	Breite Behälter 4	mittlerer Wellenüberlauf Profil 51+650	mittlerer Wellenüberlauf Profil 51+800	mittlerer Wellenüberlauf Profil 52+000	mittlerer Wellenüberlauf Profil 52+150	Freibordhöhe
	Hm0	TP	Tm-1,0	L	Hm0	TP	Tm-1,0	Dir	Cr	Hm0	TP	Tm-1,0	Dir	Cr	Hm0	TP	Tm-1,0	Dir	L	t	b1	b2	b3	b4	q1	q2	q3	q4	Rc												
m	s	s	m	m	s	s	m	m	s	s	m	m	s	s	m	m	s	s	°	-	m	s	s	°	-	m	s	s	°	m	s	m	m	m	m	m ² /s/m	m ² /s/m	m ² /s/m	m ² /s/m	m	
110	1.514	4.906	4.497	22.838	1.408	4.906	4.501	22.043	1.295	5.234	4.791	24.125	1.314	5.234	4.651	23.793	0.27	1.769	5.217	4.869	75.0	0.40	1.195	4.906	4.660	98.0	26.067	5474	2.25	45.00	45.00	45.00	0.05365	0.00310	0.00000	0.00001	1.395				
111	1.546	4.951	4.522	23.044	1.463	4.657	4.505	22.077	1.253	5.184	4.764	23.879	1.319	4.951	4.662	23.886	0.27	1.779	4.906	4.908	74.6	0.43	1.193	4.965	4.744	97.0	26.614	5474	2.25	45.00	45.00	45.00	0.05485	0.00314	0.00000	0.00000	1.395				
121	1.910	5.665	5.149	28.674	1.674	5.665	5.056	27.056	1.487	5.335	4.953	25.638	1.616	5.665	4.911	26.110	0.31	2.144	5.088	5.111	57.7	0.47	1.429	5.495	5.090	79.0	31.868	5762	0.90	0.90	45.00	9.45	0.23235	0.13966	0.00161	0.00441	0.900				
122	1.854	5.495	5.075	27.967	1.664	5.495	5.021	26.721	1.499	5.495	4.980	25.901	1.622	5.495	4.864	25.680	0.31	2.067	5.495	5.076	57.1	0.48	1.436	5.495	5.116	78.8	31.868	5762	0.90	0.90	45.00	9.45	0.23750	0.14373	0.00165	0.00443	0.900				
123	1.972	6.245	5.304	30.191	1.725	6.542	5.350	29.989	1.482	6.174	5.186	27.924	1.658	5.234	4.886	25.876	0.32	2.233	5.152	5.181	57.2	0.46	1.463	6.151	5.189	79.3	39.227	5762	0.90	0.90	45.00	9.45	0.25020	0.15216	0.00181	0.00528	0.900				
124	1.922	5.441	5.151	28.694	1.716	6.316	5.274	29.209	1.522	5.441	4.919	25.320	1.648	5.234	4.827	25.345	0.31	2.154	5.217	5.140	57.6	0.48	1.484	5.217	5.096	78.6	29.031	5762	0.90	0.90	45.00	9.00	0.22891	0.16472	0.00292	0.00683	0.900				
125	1.598	4.778	4.505	22.899	1.487	4.505	4.346	20.772	1.427	5.387	4.654	22.889	1.477	4.996	4.529	22.755	0.33	1.995	4.792	4.764	56.5	0.45	1.257	4.792	4.729	78.8	25.032	5232	0.90	2.25	45.00	9.00	0.13212	0.07143	0.00075	0.00358	0.945				
126	1.521	5.665	4.537	23.172	1.433	4.505	4.321	20.567	1.471	5.387	4.672	23.050	1.452	5.042	4.540	22.845	0.33	1.985	4.684	4.743	56.3	0.46	1.269	5.026	4.756	80.0	27.187	5232	0.90	2.25	45.00	9.00	0.13857	0.07251	0.00091	0.00425	0.945				
130	1.760	6.782	5.090	28.101	1.625	6.174	4.913	25.701	1.560	5.387	4.837	24.546	1.649	5.387	4.774	24.870	0.31	2.038	4.849	5.002	62.0	0.49	1.419	5.423	4.961	79.7	31.113	5635	0.90	0.90	45.00	9.00	0.21604	0.15618	0.00200	0.00683	0.900				
140	1.871	5.387	5.146	28.642	1.631	5.387	5.061	27.101	1.398	5.136	4.808	24.285	1.536	4.863	4.743	24.596	0.33	1.920	5.152	5.093	47.8	0.45	1.298	5.026	5.031	79.0	27.187	5628	0.90	0.90	45.00	9.00	0.14779	0.11829	0.00340	0.00968	0.900				
141	1.857	6.174	5.275	29.910	1.562	5.387	5.095	27.433	1.374	5.136	4.830	24.484	1.474	5.042	4.783	24.948	0.32	1.904	5.152	5.108	45.9	0.44	1.260	5.026	5.032	79.4	27.187	5628	0.90	0.90	45.00	9.00	0.16040	0.11734	0.00213	0.00889	0.900				
210	1.506	4.821	4.505	22.899	1.375	5.042	4.529	22.287	1.235	5.234	4.827	24.453	1.295	5.042	4.609	23.430	0.28	1.760	4.684	4.910	74.6	0.40	1.177	5.352	4.752	98.0	30.390	5474	45.00	45.00	45.00	45.00	0.00312	0.00089			1.890				
211	1.536	4.657	4.511	22.949	1.439	4.657	4.492	21.976	1.262	5.184	4.768	23.916	1.318	5.973	4.810	25.188	0.27	1.761	4.906	4.909	74.6	0.43	1.189	4.965	4.733	96.0	26.614	5474	45.00	45.00	45.00	45.00	0.00279	0.00097	0.00002	0.00002	1.890				
220	2.009	5.441	5.181	28.980	1.736	6.106	5.246	28.925	1.481	5.441	4.993	26.024	1.612	6.316	5.022	27.143	0.32	2.169	5.217	5.143	57.5	0.45	1.440	5.495	5.185	79.2	31.868	5762	0.90	2.25	45.00	45.00	0.16993	0.02973	0.00056	0.00030	1.395				
221	1.545	4.951	4.543	23.217	1.441	4.951	4.536	22.344	1.259	5.184	4.749	23.739	1.325	5.042	4.636	23.660	0.27	1.776	4.906	4.916	74.6	0.43	1.182	4.965	4.722	97.0	26.614	5474	45.00	45.00	45.00	45.00	0.00084	0.00067			2.475				
222	1.999	5.441	5.186	29.032	1.779	6.316	5.305	29.523	1.498	5.441	4.938	25.498	1.657	6.316	5.000	26.934	0.33	2.148	5.217	5.147	57.2	0.48	1.492	5.570	5.125	78.9	32.656	5762	0.90	2.25	45.00	45.00	0.13811		0.00032	0.00034	1.395				
225	1.580	5.973	4.574	23.475	1.454	4.778	4.363	20.907	1.447	5.387	4.637	22.740	1.465	4.996	4.555	22.969	0.36	2.005	4.792	4.757	56.0	0.45	1.250	4.792	4.745	79.3	25.032	5232	2.25	2.25	45.00	45.00	0.03995	0.01438		0.00047	1.440				
226	1.527	5.665	4.525	23.066	1.435	4.505	4.314	20.513	1.458	5.387	4.676	23.080	1.441	5.042	4.541	22.850	0.34	1.981	4.684	4.747	56.3	0.46	1.268	5.026	4.755	80.0	27.187	5232	2.25	2.25	45.00	45.00	0.03885	0.01542		0.00052	1.440				
230	1.780	6.174	5.001	27.266	1.657	6.174	4.984	26.364	1.548	5.387	4.834	24.521	1.642	5.387	4.784	24.954	0.34	2.036	4.849	4.996	61.5	0.49	1.413	5.423	4.998	79.3	31.113	5635	0.90	2.25	45.00	45.00	0.12401	0.06525	0.00058	0.00049	1.395				
231	1.808	5.551	4.903	26.362	1.656	6.106	4.880	25.390	1.539	5.551	4.878	24.934	1.662	5.665	4.783	24.948	0.33	2.059	4.849	4.974	61.6	0.47	1.417	5.724	4.953	79.8	34.327	5635	0.90	2.25	45.00	45.00	0.12095	0.05885	0.00035	0.00028	1.395				
240	1.917	6.174	5.285	30.004	1.592	5.387	5.143	27.905	1.382	5.136	4.819	24.378	1.478	5.042	4.773	24.858	0.34	1.917	5.152	5.110	45.3	0.45	1.260	5.284	5.049	78.7	29.699	5628	0.90	2.25	45.00	45.00	0.08326	0.01779	0.00005	0.00040	1.395				
241	1.829	5.551	5.238	29.539	1.598	5.551	5.096	27.446	1.343	5.784	4.900	25.136	1.515	5.042	4.731	24.484	0.34	1.987	4.849	5.071	45.6	0.45	1.279	5.284	5.054	80.0	29.699	5628	0.90	2.25	45.00	45.00	0.07409	0.01578	0.00006	0.00039	1.395				
310	1.989	5.665	5.179	28.960	1.722	5.665	5.098	27.465	1.467	5.335	4.969	25.798	1.623	5.846	4.935	26.327	0.34	2.169	5.217	5.147	57.1	0.47	1.445	5.495	5.109	79.2	31.868	5762	0.90	2.25	45.00	45.00	0.15852	0.02159	0.00056	0.00029	1.395				
320	2.024	5.441	5.169	28.863	1.746	6.106	5.276	29.230	1.472	5.441	4.992	26.011	1.616	6.316	5.012	27.048	0.34	2.169	5.217	5.147	57.1	0.45	1.449	6.341	5.187	79.0	41.522	5762	0.90	2.25	45.00	45.00	0.08767	0.00860	0.00049	0.00008	1.980				
321	2.030	5.665	5.152	28.700	1.729	5.665	5.089	27.374	1.458	5.335	4.978	25.882	1.614	5.335	4.857	25.613	0.34	2.169	5.217	5.147	57.1	0.47	1.418	5.888	5.140	78.9	36.157	5762	0.90	2.25	45.00	45.00	0.07235	0.00908	0.00064	0.00007	1.980				
322	1.964	5.495	5.100	28.197	1.727	5.495	5.065	27.147	1.465	5.495	5.012	26.205	1.637	5.495	4.853	25.576	0.34	2.169	5.217	5.147	57.1	0.48	1.453	5.495	5.120	79.2	31.868	5762	0.90	2.25	45.00	45.00	0.07876	0.00909	0.00048	0.00007	1.980				
323	2.120	6.245	5.329	30.447	1.770	6.106	5.310	29.577	1.477	6.174	5.198	28.045	1.652	6.174	5.094	27.827	0.34	2.169	5.217	5.147	57.1	0.46	1.450	6.245	5.235	79.7	40.349	5762	0.90	2.25	45.00	45.00	0.08151	0.01023	0.00058	0.00009	1.980				
324	2.033	5.441	5.213	29.295	1.715	6.316	5.287	29.338	1.500	5.441	4.949	25.606	1.640	5.441	4.871	25.747	0.33	2.190	5.217	5.138	56.5	0.48	1.493	5.570	5.132	78.2	32.656	5762	2.25	45.00	45.00	45.00	0.04629		0.00121	0.00034	1.980				
325	1.539	5.665	4.543	23.																																					