

DMT GmbH & Co. KG

Civil & Mining Engineering
Büro Hamburg
Friedrich-Ebert-Damm 145
22047 Hamburg

*Anlage 11.3**Anlage zum
wasserbehördlichen Verfahren**Bremerhaven, den 12. JUNI 2025*

Untersuchungen zur Wellenverteilung in der geplanten Geestemündung in Bremerhaven

Auftraggeber: bremenports GmbH & Co. KG
- Abteilung Bau -
Am Strom 2
27568 Bremerhaven

Bestellnummer: 42843338
Sachverständige DMT: Herr Dr. Stoschek
Herr Storz
Tel.-Durchwahl: 040 85571821
DMT-Bearbeitungs-Nr.: CME3-2019-01331

Hamburg, 16.04.2021
DMT GmbH & Co. KG

Entwurf
(Stoschek) (Storz)

Dieser Bericht besteht aus 49 Seiten



DIN EN ISO
9001
zertifiziert

DIN EN ISO
14001
zertifiziert

Earth. Insight. Values.

Kurzfassung

Aufgrund der Neugestaltung der Hafeneinfahrt soll die Ausbreitung von Wellen im Hafenbereich untersucht werden. Aus diesem Grund werden die zu erwartenden Wellenhöhen im Hafenbereich bei Neubau der Nordmole im Vergleich zum Ist-Zustand untersucht. Hierzu ist ein bestehendes numerisches Strömungsmodell der Wesermündung der DMT angepasst worden um die Wellenhöhen im gesamten Untersuchungsgebiet und im Fischereivorhafen zu ermitteln.

Das Modell ist anhand von Wellenmessdaten einer Messboje vor dem Container-terminal CTIII kalibriert.

Anhand von Messdaten zu Windgeschwindigkeit und -richtung an der Station Bremerhaven sind Windszenarien für die Ermittlung von mittleren Wellenhöhen ermittelt worden. Auf Grundlage der Windmessungen sind zudem Überschreitungswahrscheinlichkeiten einzelner Windereignisse ermittelt worden.

Für den im Rahmen der Untersuchung relevanten Bereich bei mittelstarken Windlagen aus Nordwest und Südwest sind die zugehörigen Wellenhöhen bei Tidehochwasserständen in der Geestemündung ermittelt worden.

Die Auswertung der Messungen der Wellenmessboje zeigt, dass sich mittlere Wellenhöhen bei nicht voll ausgeprägten Windfeldern und mittleren Wasserständen einstellen.

Für Windereignisse aus NW ergeben sich im Planzustand um rund 5 cm größere mittlere Wellenhöhen. Die maximalen berechneten Änderungen der Wellenhöhen treten bei Windstärken von 10,0 m/s auf und betragen bis zu 15,6 cm.

Für Windereignisse aus Südwest zeigen sich keine Veränderungen der Wellenhöhen gegenüber dem Istzustand im Bereich des Fischereivorhafens, sondern nur im Bereich der Hafeneinfahrt vor den Molenbauwerken.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung und Veranlassung	8
2 Beschreibung des Modells	8
2.1 Modellgebiet	8
2.2 Berechnungsmodell	10
2.3 Randbedingungen	11
2.3.1 Bathymetrie	11
2.3.2 Windrichtung	12
2.3.3 Windstärke	13
2.3.4 Wasserstand	20
2.3.5 Reflexionsfaktoren	20
3 Modellkalibrierung	21
4 Ergebnisse der Wellenhöhen im Ist-Zustand	25
5 Ergebnisse der Wellenhöhen im Planzustand 2	33
6 Vergleich der Ergebnisse aus Ist-Zustand und Planzustand 2	38
7 Statistische Einordnung der berechneten Wellenhöhenänderungen	43
7.1 Wellenhöhen bei reduzierten Tidehochwasserständen	44
7.2 Reduktion der Wellenhöhen durch nicht voll ausgebildetes Windfeld	44
7.3 Mittlere Wellenhöhenänderungen	45
7.4 Überschreitungshäufigkeiten der berechneten Wellenhöhenänderungen	47
8 Zusammenfassung und Fazit	48

Abbildungsverzeichnis.....	Seite
Abbildung 1: Überblick – Modellgebiet	9
Abbildung 2: Überblick – Untersuchungsgebiet nach /4/	10
Abbildung 3: Bathymetrie im Istzustand in mNHN bei Plan-Sohlhorizont auf -5,4m LAT	11
Abbildung 4: Bathymetrie im Planzustand 2 in mNHN bei Plan- Sohlhorizont auf -5,4m LAT	12
Abbildung 5: Übersicht der relevanten Windrichtungen	13
Abbildung 6: Zuordnung der Randbedingungen und Reflexionsfaktoren im Bereich der Geestemündung	21
Abbildung 7: Bathymetrie im Istzustand in mNHN bei Plan-Sohlhorizont auf -5,4m LAT mit Wellenmessboje	22
Abbildung 8: Abhängigkeit der Wellenhöhe von der Windgeschwindigkeit (Windrichtungssektor 245°N – 20°N, Zeitraum Thw-2h bis Thw+2h) nach /2/	23
Abbildung 9: Berechnete Wellenhöhen im Untersuchungsgebiet mit Lage der Messboje (t1) bei Windstärke 7,5 m/s und Wind aus NW	26
Abbildung 10: Berechnete Wellenhöhen im Untersuchungsgebiet mit Lage der Messboje (t1) bei Windstärke 10,0 m/s und Wind aus NW	27
Abbildung 11: Berechnete Wellenhöhen im Untersuchungsgebiet mit Lage der Messboje (t1) bei Windstärke 7,5 m/s und Wind aus SW	28
Abbildung 12: Berechnete Wellenhöhen im Untersuchungsgebiet mit Lage der Messboje (t1) bei Windstärke 10,0 m/s und Wind aus SW	29
Abbildung 13: Berechnete Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 7,5 m/s und Wind aus NW im Ist-Zustand	30
Abbildung 14: Berechnete Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 10,0 m/s und Wind aus NW im Ist-Zustand	31
Abbildung 15: Berechnete Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 7,5 m/s und Wind aus SW im Ist-Zustand	32
Abbildung 16: Berechnete Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 10,0 m/s und Wind aus SW im Ist-Zustand	33
Abbildung 17: Berechnete Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 7,5 m/s und Wind aus NW im Planzustand 2	35
Abbildung 18: Berechnete Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 10,0 m/s und Wind aus NW im Planzustand 2	36
Abbildung 19: Berechnete Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 7,5 m/s und Wind aus SW im Planzustand 2	37

Abbildung 20: Berechnete Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 10,0 m/s und Wind aus SW im Planzustand 2	38
Abbildung 21: Differenz der berechneten Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 7,5 m/s und Wind aus NW (Planzustand 2 – Istzustand)	40
Abbildung 22: Differenz der berechneten Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 10,0 m/s und Wind aus NW (Planzustand 2 – Istzustand)	41
Abbildung 23: Differenz der berechneten Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 7,5 m/s und Wind aus SW (Planzustand 2 – Istzustand)	42
Abbildung 24: Differenz der berechneten Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 10,0 m/s und Wind aus SW (Planzustand 2 – Istzustand)	43
Abbildung 25: Differenz der mittleren Wellenhöhen im Bereich des Fischereivorhafens bei Windstärke 7,5 m/s und Wind aus NW (Planzustand 2 – Istzustand)	46
Abbildung 26: Differenz der mittleren Wellenhöhen im Bereich des Fischereivorhafens bei Windstärke 10,0 m/s und Wind aus NW (Planzustand 2 – Istzustand)	47

Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 1:	Verteilung der Stundenwerte der Windmessungen an der Station Bremerhaven im Zeitraum 1986 – 2005 über Windrichtungen und Windstärken in Promille	14
Tabelle 2:	Verteilung der Stundenwerte der Windmessungen an der Station Bremerhaven im Zeitraum 1952 – 2019 über Windrichtungen und Windstärken in Promille	15
Tabelle 3:	Verteilung der Stundenwerte der Windmessungen an der Station Bremerhaven im Zeitraum 2010 – 2019 über Windrichtungen und Windstärken in Promille	16
Tabelle 4:	Vergleich der Häufigkeiten für Windrichtungen aus NW an der Station Bremerhaven für unterschiedliche Auswertungszeiträume in Promille	17
Tabelle 5:	Vergleich der Häufigkeiten für Windrichtungen aus SW an der Station Bremerhaven für unterschiedliche Auswertungszeiträume in Promille	18
Tabelle 6:	Statistische Anzahl von Tagen pro Jahr mit Überschreitung der entsprechenden Windstärke für Windrichtungen SW und NW	19
Tabelle 7:	Vergleich von berechneten und gemessenen Wellenhöhen an der Boje für ausgewählte Starkwindereignisse	23
Tabelle 8:	Vergleich von berechneten Wellenhöhen und Modellergebnissen des SWAN-Berechnungsmodells aus /3/ an der Position der Messboje	24
Tabelle 9:	mittlere und maximale Wellenhöhen im Istzustand und Wellenhöhenänderungen im Planzustand 2 bei Windereignissen aus NW	48

Verwendete Unterlagen

Für die Erstellung des vorliegenden Berichtes sind die nachfolgend aufgeführten Unterlagen genutzt worden:

- /1/ DMT GmbH & Co. KG: Untersuchungen zum Sedimenttransport in der geplanten Geestemündung in Bremerhaven, 2020, unveröffentlicht.
- /2/ Fittschen: Nördliche Erweiterung des Containerterminals Wilhelm Kaisen Bremerhaven (CTIII), Wellenmessungen in der Weser vor Bremerhaven, 1999.
- /3/ Mai, et al.: Seegang in der Weser vor Bremerhaven – ein Vergleich von Naturmessung und numerischer Simulation, Hansa, Jg. 137, H. 9, S.278-281, 2000.
- /4/ Pabst, Kohn, Rogge: Neubau der Geeste-Nordmole. Entscheidungsunterlage Bau, 2018.
- /5/ Zimmermann, Daemrich: Theoretische Voruntersuchungen zu Wasserständen und Seegang und Grenzbetrachtungen zu Überlaufwassermengen. Abschlussbericht, Universität Hannover, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, 1997.

1 Einleitung und Veranlassung

Die Molen am Übergang von der Geeste zur Weser sind abgängig und sollen ersetzt werden. In dem Zusammenhang soll die Möglichkeit der Vertiefung der Geestemündung geschaffen werden, damit tiefergehende Schiffe nahezu tideunabhängig den Fischereihafen erreichen können. Die Konzeption und Ausrichtung der Molenbauwerke ist bereits durch vorhergehende Untersuchungen festgelegt worden.

Die Neugestaltung der Hafeneinfahrt wirkt sich auch die Ausbreitung von Wellen im Hafenbereich aus. Aus diesem Grund sind die zu erwartenden Wellenhöhen im Hafenbereich einer Vorzugsvariante untersucht worden.

Hierzu ist das bestehende numerische Strömungsmodell der Wesermündung der DMT (vgl. /1/), das bisher zur Untersuchung des Sedimenteintrags genutzt wurde, angepasst worden um die Wellenhöhen im gesamten Untersuchungsgebiet und im Fischereivorhafen zu ermitteln.

Das Modell ist anhand von Wellenmessdaten einer Messboje vor dem Container-terminal CTIII (vgl. /2/, /3/ und /5/) kalibriert worden.

Ziel der Untersuchungen ist die Ermittlung der Wellenhöhen in der Geestemündung bei gemessenen mittelstarken Windlagen aus Nordwest (NW) und Südwest (SW), da für diese Windrichtungen die größten Fetchlängen vorhanden sind und somit die größten Wellenhöhen zu erwarten sind.

Eine Untersuchung von Hochwassersituationen mit überfluteter Nordmole ist nicht durchgeführt worden.

2 Beschreibung des Modells

2.1 Modellgebiet

Um die Ausbreitung der Wellenbewegungen nachzubilden und um einen fehlerhaften Einfluss der Randbedingungen zu minimieren umfasst das Modell den Weserabschnitt von Rechtenfleth (Weser-km 46,46) bis Robbensüdsteert (Weser-km 79,94). Die Hafeneinfahrt befindet sich bei Weser-km 65,7. Der Fischereihafen und die Geeste (vom Tidesperrwerk in Bremerhaven bis zur Mündung im Vorhafen) sind ebenfalls Teil des Modellgebiets. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über das gesamte Modellgebiet.

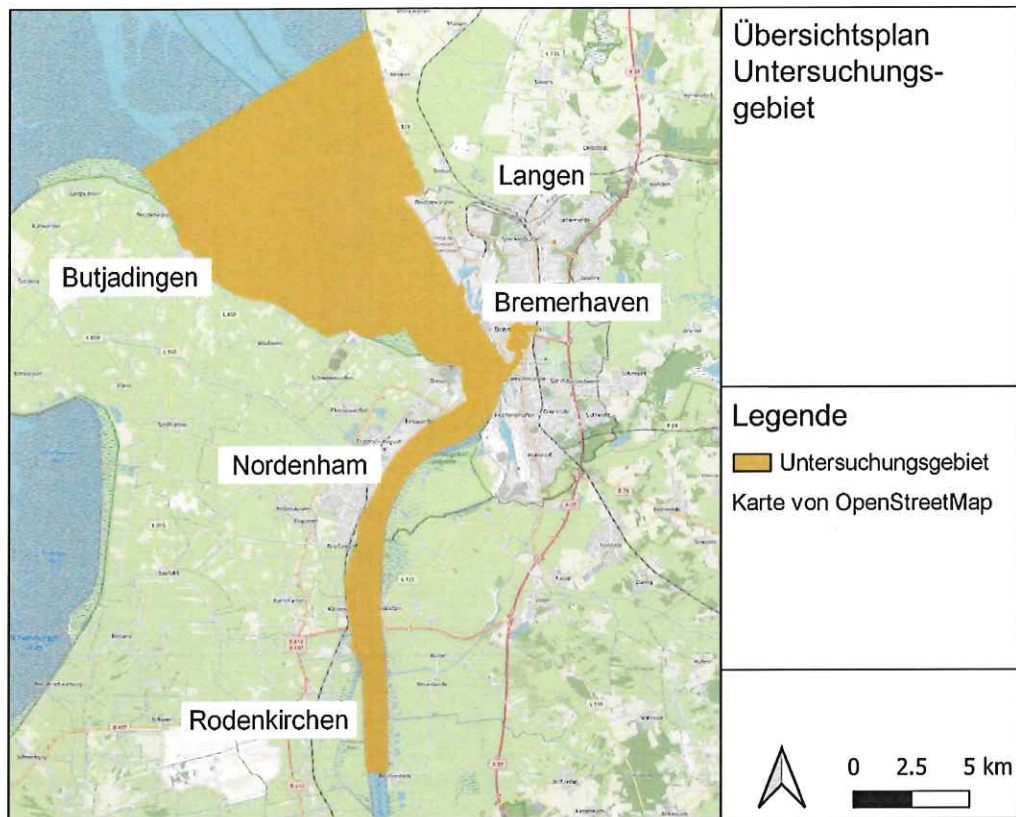


Abbildung 1: Überblick – Modellgebiet

Abbildung 2 zeigt den Bereich der Geestemündung und das Gebiet in dem die Wellenhöhen und Wellenhöhenänderungen untersucht worden sind. In der Abbildung ist ebenfalls die Lage der im Untersuchungsgebiet liegenden Anlegestellen (WSA tonnenhof mit Liegeplätzen, Lotsendienstgebäude mit Anleger, Fähranleger, Zoll / WSP-Anleger) zu erkennen.

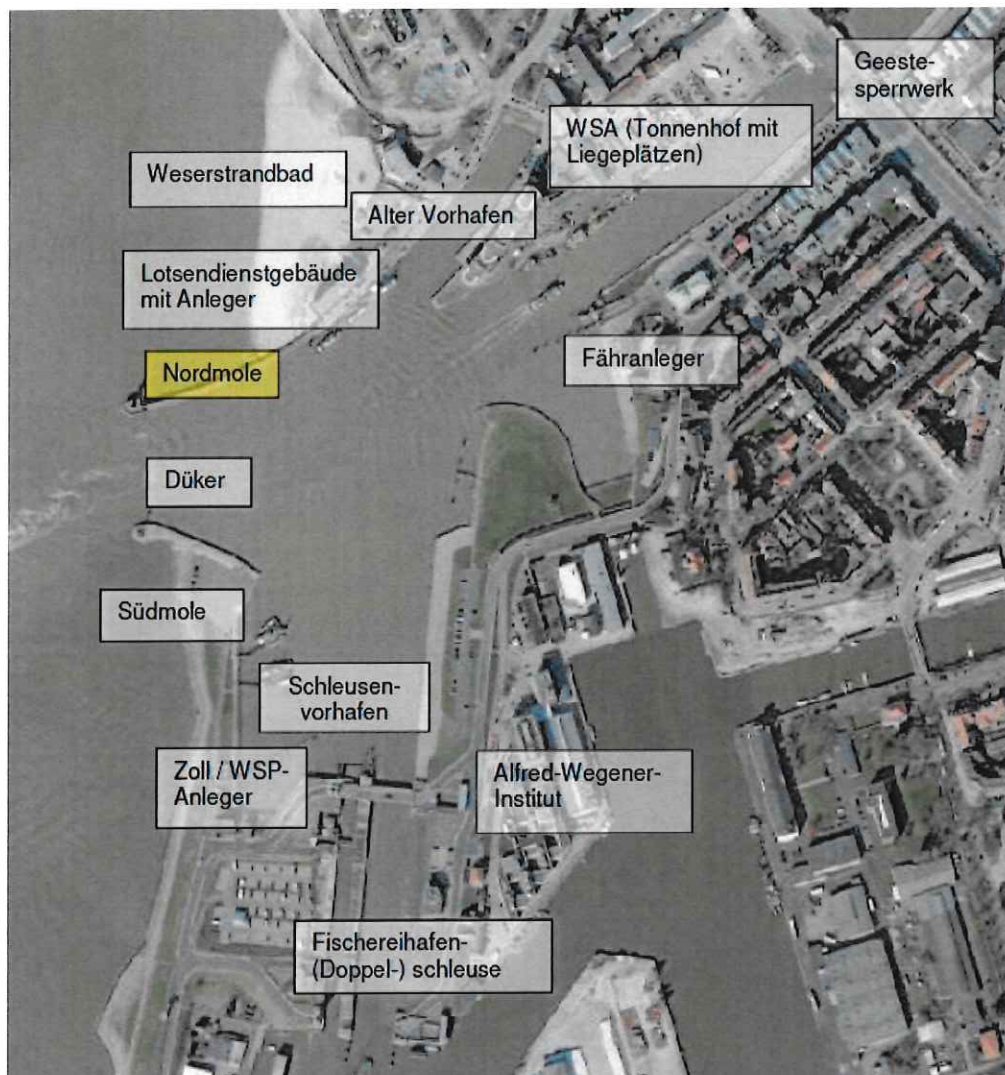


Abbildung 2: Überblick – Untersuchungsgebiet nach /4/

2.2 Berechnungsmodell

Zur Simulation und Berechnung der Wellenhöhen im Untersuchungsgebiet ist das Berechnungsmodell MIKE 21 Spectral Waves der Firma DHI verwendet worden. Mit dem Berechnungsmodell kann Wachstum, Zerfall und Transformation von durch Wind erzeugten Wellen simuliert werden.

2.3 Randbedingungen

2.3.1 Bathymetrie

Für die Berechnung der Wellenhöhen ist die Bathymetrie aus dem Gutachten zur Sedimentation im Bereich der Geestemündung (/1/) genutzt worden. Abbildung 3 zeigt die verwendete Bathymetrie im Bereich des Fischereivorhafens. Es ist von einer Sohltiefe im Hafenbereich von -5,4m LAT ausgegangen worden. Dies entspricht der Plan-Sohltiefe.

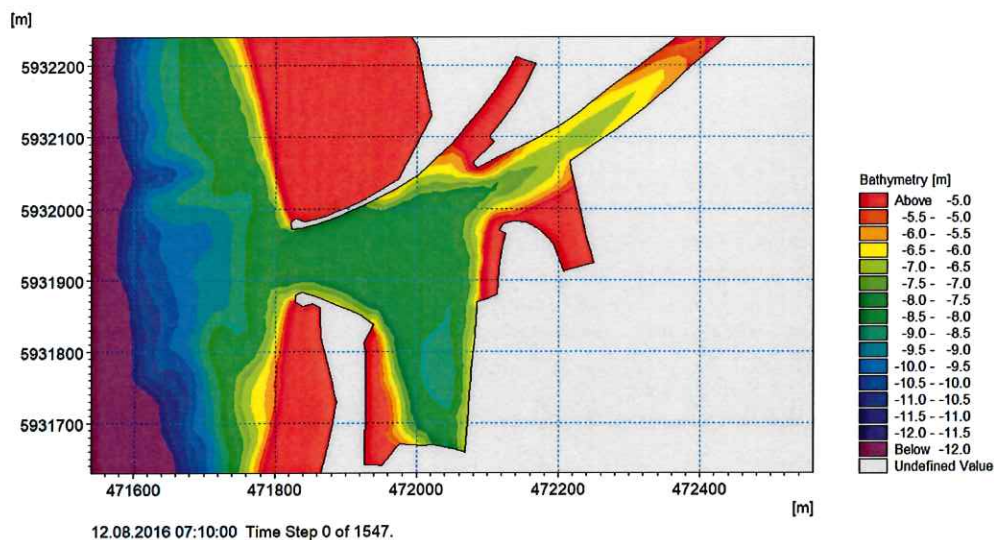


Abbildung 3: Bathymetrie im Istzustand in mNHN bei Plan-Sohlhorizont auf -5,4m LAT

Die in diesem Gutachten untersuchte Variante des geplanten Ausbauzustands entspricht der Plan-Variante 2 aus dem Gutachten zur Sedimentation im Bereich der geplanten Geestemündung (/1/) und wird aus diesem Grund auch in diesem Gutachten weiterhin als Plan-Variante 2 bezeichnet. Die Variante sieht einen Neubau der Nordmole vor. Die Südmole bleibt wie im Ist-Zustand bestehen. Abbildung 4 zeigt die im Modell verwendete Bathymetrie im Planzustand 2 im Bereich des Fischereivorhafens mit der neuen Nordmole. Der Sohlhorizont liegt aus Gründen der Vergleichbarkeit ebenfalls auf -5,4mLAT (geringste geplante Ausbautiefe). Der Einfluss der Sohlhöhe im Bereich des Fischereivorhafens auf die berechneten Wellenhöhen ist aufgrund der zu erwartenden Wellenhöhen jedoch sehr gering.

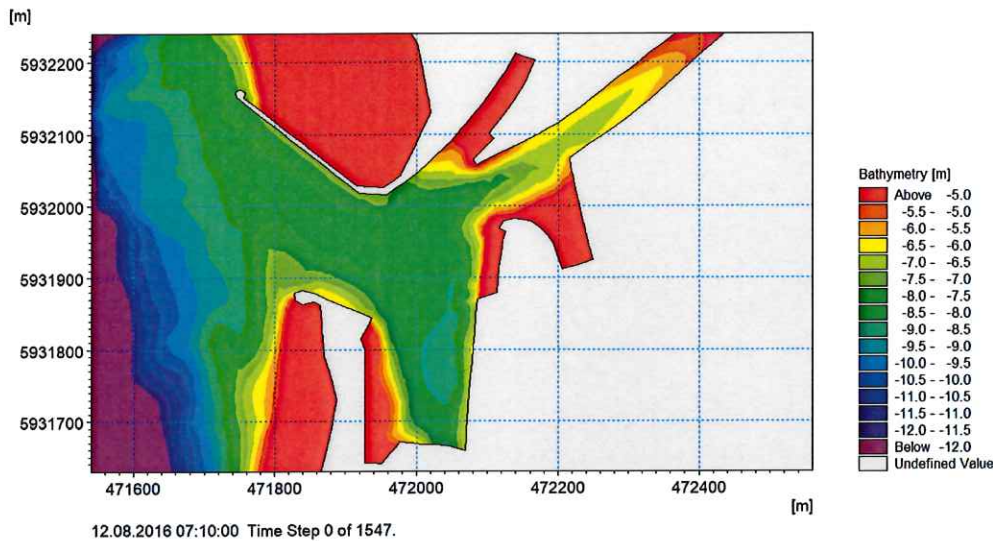


Abbildung 4: Bathymetrie im Planzustand 2 in mNHN bei Plan-Sohlhorizont auf -5,4m LAT

Im Bereich nördlich der Geestemündung sind im Vergleich zu dem im Sedimentationsgutachten verwendeten Berechnungsnetz leichte Anpassungen vorgenommen worden um die Ausbreitung der Wellen über dem Wattgebiet besser abbilden zu können.

2.3.2 Windrichtung

Durch die Betrachtung der Windeinwirklängen (Fetchlängen) sind in einem ersten Schritt die für Wellenereignisse im Fischereivorhafen relevanten Windrichtungen ermittelt worden. Bei Windrichtungen aus Nordwest können Wellen von der Nordsee kommend bis zum Fischereivorhafen laufen. Die Wellen müssen bei dieser Windrichtung zum Teil über das Wattgebiet laufen. Ein ungehindertes Einlaufen der Wellen über das Wattgebiet ist jedoch nur bei hohen Sturmflutwasserständen möglich. Bei den hier betrachteten mittleren Hochwasserständen findet eine Dämpfung der Wellen über dem Wattgebiet statt.

Für Windrichtungen aus Südwest können sich die Wellen entlang der Weser ausbreiten. In diesem Fall können sich die Wellen über eine Fetchlänge von rund 8,5 km ausbreiten. In Abbildung 5 sind die für die Untersuchung der Wellenhöhen im Fischereivorhafen relevanten Wellenrichtungen in der Karte eingezeichnet.

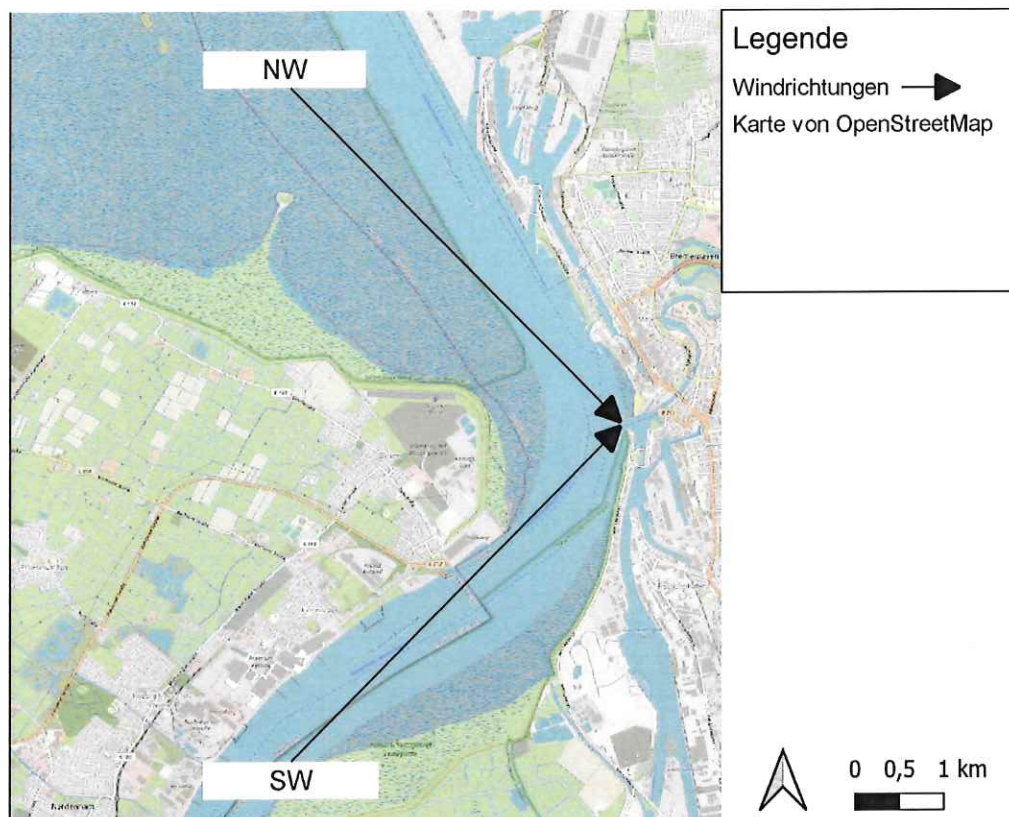


Abbildung 5: Übersicht der relevanten Windrichtungen

Für weitere Windrichtungen sind die Fetchlängen deutlich geringer, somit sind für andere Windrichtungen als aus Nordwest und Südwest auch keine relevanten Wellenhöhen im Fischereivorhafen zu erwarten. Bei Windrichtungen aus Westen beträgt die Fetchlänge nur rund 1,5 km und die zu erwartende windinduzierte Wellenhöhe 0,2 m bei einer Wellenperiode von rd. 1,5 s (10 m/s Windgeschwindigkeit).

2.3.3 Windstärke

Zur Ermittlung der für die Untersuchung relevanten Windstärken sind die Winddaten der Station Bremerhaven des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ausgewertet worden. In Tabelle 1 sind die vom DWD ausgewerteten Stundenwerte der Windmessungen im Zeitraum von 1986 bis 2005 an der Station Bremerhaven über die Windrichtungen und Windstärken dargestellt. Die Tabelle zeigt die Verteilung der Windereignisse über Windrichtung und Windstärke in Promille.

Tabelle 1: Verteilung der Stundenwerte der Windmessungen an der Station Bremerhaven im Zeitraum 1986 – 2005 über Windrichtungen und Windstärken in Promille

Rich- tung		NE	E	SE	S	SW	W	NW	N	Alle
Beau- fort	m/s									
0										5
1	0,3 - 1,5	6	10	11	11	6	6	5	7	63
2	1,6 - 3,3	25	42	35	38	15	16	11	26	208
3	3,4 - 5,4	30	62	41	50	34	44	22	29	312
4	5,5 - 7,9	11	25	13	33	68	66	37	18	272
5	8,0 - 10,7	1	1		6	34	27	21	4	95
6	10,8 - 13,8				2	13	11	10	1	37
7	13,9 - 17,1					2	2	2		7
8	17,2 - 20,7						1			1
9	20,8 - 24,4									
10	24,5 - 28,4									
11	28,5 - 32,6									
12	>32,7									
Alle		73	140	101	141	173	174	109	84	1000

Zur Verifizierung des betrachteten Ereigniszeitraums von 1986 bis 2005 gegenüber den aktuellen Ereignissen der letzten Jahre sind von bremenports und DMT die Winddaten an der Station Bremerhaven über weitere Zeiträume untersucht und ausgewertet worden. Die Ergebnisse der Auswertungen sind analog zu Tabelle 1 in Tabelle 2 für den Zeitraum 1952 – 2019 und in Tabelle 3 für den Zeitraum 2010 – 2019 dargestellt. Die Werte der betrachteten Windrichtungen SW und NW sind rot markiert. Aufgrund der Summation der Werte entstehen bei der Auswertung Rundungsdifferenzen von bis zu +/- 5 Promille.

Tabelle 2: Verteilung der Stundenwerte der Windmessungen an der Station Bremerhaven im Zeitraum 1952 – 2019 über Windrichtungen und Windstärken in Promille

Rich- tung		NE	E	SE	S	SW	W	NW	N	Alle
Beau- fort	m/s									
0										2
1	0,3 - 1,5	6	7	9	10	6	4	4	4	50
2	1,6 - 3,3	31	43	45	41	21	16	15	24	236
3	3,4 - 5,4	37	56	46	47	43	39	26	24	318
4	5,5 - 7,9	12	19	13	25	65	48	35	12	229
5	8,0 - 10,7	1	2	1	6	45	28	27	3	113
6	10,8 - 13,8				1	15	11	12	1	40
7	13,9 - 17,1					2	2	3		7
8	17,2 - 20,7									
9	20,8 - 24,4									
10	24,5 - 28,4									
11	28,5 - 32,6									
12	>32,7									
Alle		87	127	114	130	197	148	122	68	995

Tabelle 3: Verteilung der Stundenwerte der Windmessungen an der Station Bremerhaven im Zeitraum 2010 – 2019 über Windrichtungen und Windstärken in Promille

Rich- tung		NE	E	SE	S	SW	W	NW	N	Alle
Beau- fort	m/s									
0										0
1	0,3 - 1,5	3	5	5	5	4	3	3	2	30
2	1,6 - 3,3	28	41	40	33	19	13	14	22	210
3	3,4 - 5,4	41	63	51	52	41	38	27	21	334
4	5,5 - 7,9	14	24	17	30	67	51	39	8	250
5	8,0 - 10,7	1	3	1	8	47	30	33	2	125
6	10,8 - 13,8				1	16	11	15		43
7	13,9 - 17,1					2	2	5		9
8	17,2 - 20,7									0
9	20,8 - 24,4									0
10	24,5 - 28,4									0
11	28,5 - 32,6									0
12	>32,7									0
Alle		87	136	114	129	196	148	136	55	1001

Ein Vergleich der Auswertungen über die unterschiedlichen Betrachtungszeiträume zeigt leichte Unterschiede in der Verteilung der Windereignisse über die Windrichtungen und Windstärken. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass auch eine ggf. unterschiedliche Methodik in der Auswertung der Windmessungen zwischen DWD und DMT zu leicht abweichenden Ergebnissen führen kann.

In Tabelle 4 sind die über die unterschiedlichen Auswertungszeiträume ermittelten Häufigkeiten der Windereignisse aus NW in Promille gegenübergestellt; Tabelle 5 zeigt den Vergleich über die Auswertungszeiträume für Windereignisse aus SW. In den Tabellen ist ebenfalls eine erste Bewertung der Windstärken hinsichtlich ihrer Relevanz für die hier durchgeführten Untersuchungen enthalten. Aufgrund der geringen Windgeschwindigkeiten bei Windstärken kleiner 3 Beaufort sind keine relevanten Wellenhöhen im Fischereivorhafen zu erwarten. Die Windstärken von 0 bis 2 Beaufort werden im Zuge der Untersuchung als nicht von Interesse eingestuft, da die Wellenhöhen und die voraussichtlichen Änderungen der Wellenhöhen zu gering sind um eine Beeinträchtigung der Schifffahrt hervorzurufen.

Bei Windstärken ab 6 Beaufort ist in jedem Fall von einer Beeinträchtigung der Schifffahrt durch Wellengang im Vorhafen der Doppelschleuse und an der Nordmole auszugehen. Diese Windstärken treten jedoch recht selten auf und gehen meist mit einem Anstieg des Tidehochwassers einher, der bereits zu Einschränkungen in der Schifffahrt führt. Windstärken ab 6 Beaufort werden somit als nicht relevant für die Normalverhältnisse in der Geestemündung eingestuft. Die durchgeführten Untersuchungen fokussieren sich somit auf die Windstärken von 3 bis 5 Beaufort, da in diesem Fall eine Situation von mittelstarkem Wind vorliegt, dessen Auswirkung auf die Situation in der Geestemündung untersucht werden soll.

Tabelle 4: Vergleich der Häufigkeiten für Windrichtungen aus NW an der Station Bremerhaven für unterschiedliche Auswertungszeiträume in Promille

Zeitraum		1986 - 2005	1952 - 2019	2010 - 2019	
Richtung		NW	NW	NW	
Beaufort	m/s				Bewertung
0					nicht von Interesse
1	0,3 - 1,5	5	4	3	
2	1,6 - 3,3	11	15	14	
3	3,4 - 5,4	22	26	27	relevant
4	5,5 - 7,9	37	35	39	
5	8,0 - 10,7	21	27	33	
6	10,8 - 13,8	10	12	15	nicht relevant
7	13,9 - 17,1	2	3	5	
8	17,2 - 20,7				
9	20,8 - 24,4				
10	24,5 - 28,4				
11	28,5 - 32,6				
12	>32,7				
Alle		109	122	136	

Der Vergleich der Auswertungen über die unterschiedlichen Zeiträume für Windereignisse aus NW zeigt eine deutliche Zunahme an Windereignissen aus NW für die Zeiträume 1952 bis 2019 und 2010 bis 2019 gegenüber der Auswertung des DWD über den Zeitraum 1986 – 2005. Im Folgenden wird deshalb die Auswertung für den Zeitraum 2010 bis 2019 betrachtet, da dies für die Untersuchung den ungünstigsten Fall darstellt. Entsprechend der Auswertung über den Zeitraum von 2010 bis 2019 ist somit für 13,6% (136 Promille) eines Betrachtungszeitraums mit der Windrichtung NW zu rechnen.

Tabelle 5: Vergleich der Häufigkeiten für Windrichtungen aus SW an der Station Bremerhaven für unterschiedliche Auswertungszeiträume in Promille

Zeitraum		1986 - 2005	1952 – 2019	2010 - 2019	
Richtung		SW	SW	SW	
Beaufort	m/s				Bewertung
0					nicht relevant
1	0,3 - 1,5	6	6	4	
2	1,6 - 3,3	15	21	19	
3	3,4 - 5,4	34	43	41	relevant
4	5,5 - 7,9	68	65	67	
5	8,0 - 10,7	34	45	47	
6	10,8 - 13,8	13	15	16	nicht relevant
7	13,9 - 17,1	2	2	2	
8	17,2 - 20,7				
9	20,8 - 24,4				
10	24,5 - 28,4				
11	28,5 - 32,6				
12	>32,7				
Alle		173	197	196	

Der Vergleich der Auswertungen über die unterschiedlichen Zeiträume für Windereignisse aus SW zeigt ebenfalls eine deutliche Zunahme an Windereignissen aus SW für die Zeiträume 1952 bis 2019 und 2010 bis 2019 gegenüber der Auswertung des DWD über den Zeitraum 1986 – 2005. Die Ergebnisse zwischen dem Zeitraum 1952 bis 2019 und 2010 bis 2019 unterscheiden sich lediglich um 1 Promille, so dass auch für die Windereignisse aus SW im Folgenden die Auswertung für den Zeitraum 2010 bis 2019 betrachtet wird. Entsprechend der Auswertung über den Zeitraum von 2010 bis 2019 ist somit für 19,6% (196 Promille) eines Betrachtungszeitraums mit der Windrichtung SW zu rechnen.

Anhand der Auswertung der Windstärken kann eine statistische Aussage getroffen werden, an wie vielen Tagen im Jahr (365 Tage) für bestimmte Windrichtungen eine Überschreitung der jeweiligen Windstärke zu erwarten ist. In Tabelle 6 sind anhand der Auswertung der Zeitreihe von 2010 bis 2019 für die Windrichtungen SW und NW die Anzahl der Tage angegeben, an denen eine Überschreitung der entsprechenden Windstärke zu erwarten ist. Für die Windrichtung SW ist die Windstärke 0 an allen Tagen mit Windrichtung aus SW ($19,6\% \cdot 365 \text{ Tage} = 71,5 \text{ Tage}$) bzw. für die Windrichtung NW an allen Tagen mit Windrichtung aus NW ($13,6\% \cdot$

365 Tage = 49,6 Tage) überschritten. Die Windstärke 7 wird für beide Windrichtungen (SW und NW) an keinem Tag überschritten.

Tabelle 6: Statistische Anzahl von Tagen pro Jahr mit Überschreitung der entsprechenden Windstärke für Windrichtungen SW und NW

Zeitraum		2010 – 2019	2010 - 2019
Richtung		SW	NW
Beaufort	m/s	Anzahl Tage pro Jahr mit Überschreitung der Windstufe	Anzahl Tage pro Jahr mit Überschreitung der Windstufe
0		71,5	49,6
1	0,3 - 1,5	48,6	48,5
2	1,6 - 3,3	43,8	43,4
3	3,4 - 5,4	33,4	33,5
4	5,5 - 7,9	16,4	19,3
5	8,0 - 10,7	4,6	7,3
6	10,8 - 13,8	0,5	1,8
7	13,9 - 17,1	0,0	0,0
8	17,2 - 20,7	0,0	0,0
9	20,8 - 24,4	0,0	0,0
10	24,5 - 28,4	0,0	0,0
11	28,5 - 32,6	0,0	0,0
12	>32,7	0,0	0,0
Alle		71,5	49,6

Anhand der Auswerteten der Überschreitungswahrscheinlichkeiten sind zwei Windstärken für die Berechnung der Szenarien gewählt worden (7,5 m/s und 10,0 m/s).

Für Windrichtungen aus NW wird die Geschwindigkeit von 10,0 m/s mit einer Wahrscheinlichkeit von 2,9% (entspricht 10,7 Tagen pro Jahr) überschritten. Windgeschwindigkeiten zwischen 7,5 m/s und 10,0 m/s treten mit einer Wahrscheinlichkeit von 3,1% (entspricht 11,4 Tagen pro Jahr) auf. In der restlichen Zeit sind die Windgeschwindigkeiten und somit auch die Wellenhöhen geringer

Für Windrichtungen aus SW wird die Geschwindigkeit von 10,0 m/s mit einer Wahrscheinlichkeit von 3,1% (entspricht 11,5 Tagen pro Jahr) überschritten. Windgeschwindigkeiten zwischen 7,5 m/s und 10,0 m/s treten mit einer Wahrscheinlichkeit von 4,7% (entspricht 17,1 Tagen pro Jahr) auf.

2.3.4 Wasserstand

Ein deutlicher Zusammenhang zwischen Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten stellt sich im Untersuchungsgebiet erst im Zeitraum des Tidehochwassers ein (vgl. /3/). Aus diesem Grund können belastbare Aussagen über die Wellenhöhe nur für Wasserstände im Bereich des Tidehochwassers getroffen werden. Bei Tide-niedrigwasser sind die Wattflächen nicht mehr überströmt und die Fetchlänge wird zu gering, um relevante Wellenhöhen zu erzeugen.

Für die Windrichtung SW wird aus diesem Grund für die Szenarienrechnungen ein Wasserstand im Bereich eines mittleren Tidehochwassers von 2,2 mNHN angesetzt.

Für die Szenarienrechnungen mit Windrichtung aus NW wird ein erhöhter Tidehochwasserstand von 3,0 mNHN als Randbedingung gewählt. Der NW-Wind drückt bei diesen Verhältnissen mehr Wasser in die Wesermündung und führt zu erhöhten Wasserständen. Zudem sind bei niedrigeren Wasserständen die Wattflächen mit einer Sohlhöhe im Bereich von 0,0 mNHN bis 1,0mNHN nicht ausreichend überströmt und die Wellen können sich nicht voll ausbilden.

2.3.5 Reflexionsfaktoren

Im Bereich des Fischereivorhafens findet eine Reflexion von Wellen an den Molenbauwerken und Uferstrukturen statt. Von allen vorhandenen und geplanten Bauwerken wird aufgrund von geböschten Uferstrukturen oder aufgelösten Spundwänden und den daraus resultierenden Energieverlusten keine vollkommene Reflexion erwartet. Aus diesem Grund ist im Ist- und Planzustand im Hafenbereich und für die Molenbauwerke ein einheitsloser Reflexionsfaktor von 0,75 verwendet worden um die Reflexion im Bereich des Vorhafens zur Doppelschleuse modelltechnisch zu berücksichtigen. Abbildung 6 zeigt die Verteilung der Randbedingungen und Reflexionsfaktoren im Bereich der Geestemündung. An den in grün und rot markierten Netzrändern „Hafen und Südmole“ und „Hafen und Nordmole“ ist der Reflexionsfaktor von 0,75 aktiv.

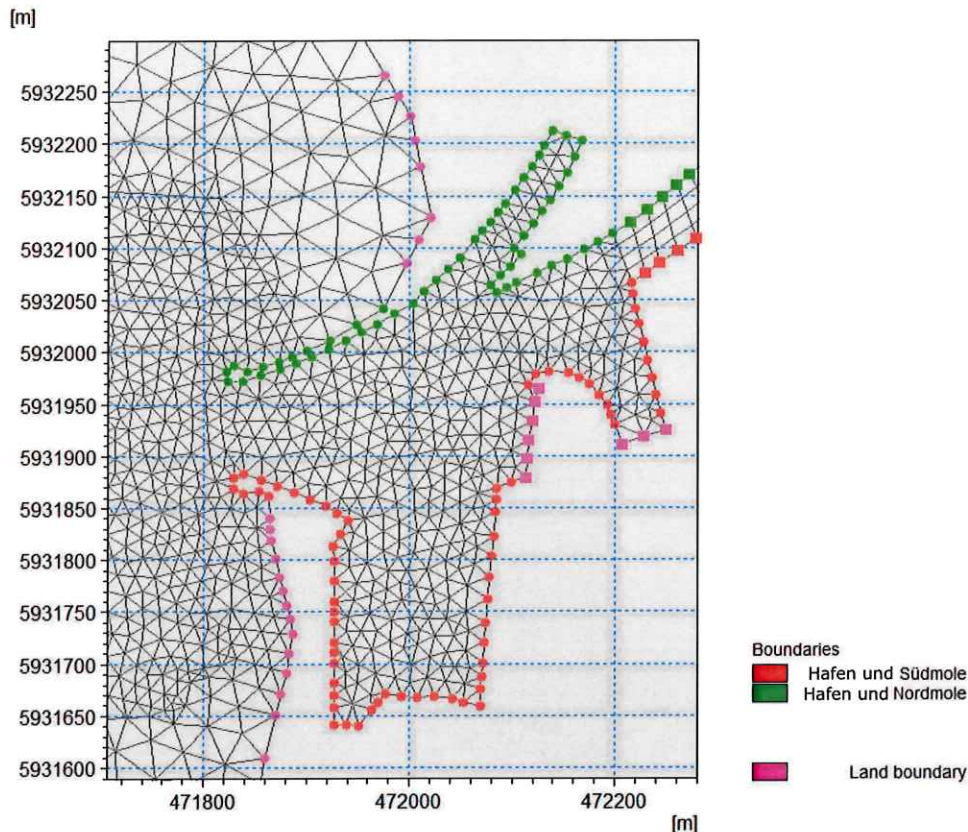


Abbildung 6: Zuordnung der Randbedingungen und Reflexionsfaktoren im Bereich der Geestemündung

3 Modellkalibrierung

Mit den in Kapitel 2 beschriebenen Randbedingungen sind die signifikanten Wellenhöhen h_s im gesamten Modellgebiet berechnet worden.

Zur Kalibrierung der Modellergebnisse stehen Wellenmessungen einer Wellenmessboje bereit. Die Messungen sind im Zeitraum von Februar 1997 bis Ende April 1998 im Zuge einer Überprüfung der hydraulischen Sicherheit der Bauwerke des Containerterminals CT III durchgeführt worden. Die Boje wurde an der Position $53^{\circ}37,88'N/8^{\circ}28,30'E$ angebracht und ist in Abbildung 7 mit Ihrer Position im Untersuchungsgebiet dargestellt (vgl. /2/).

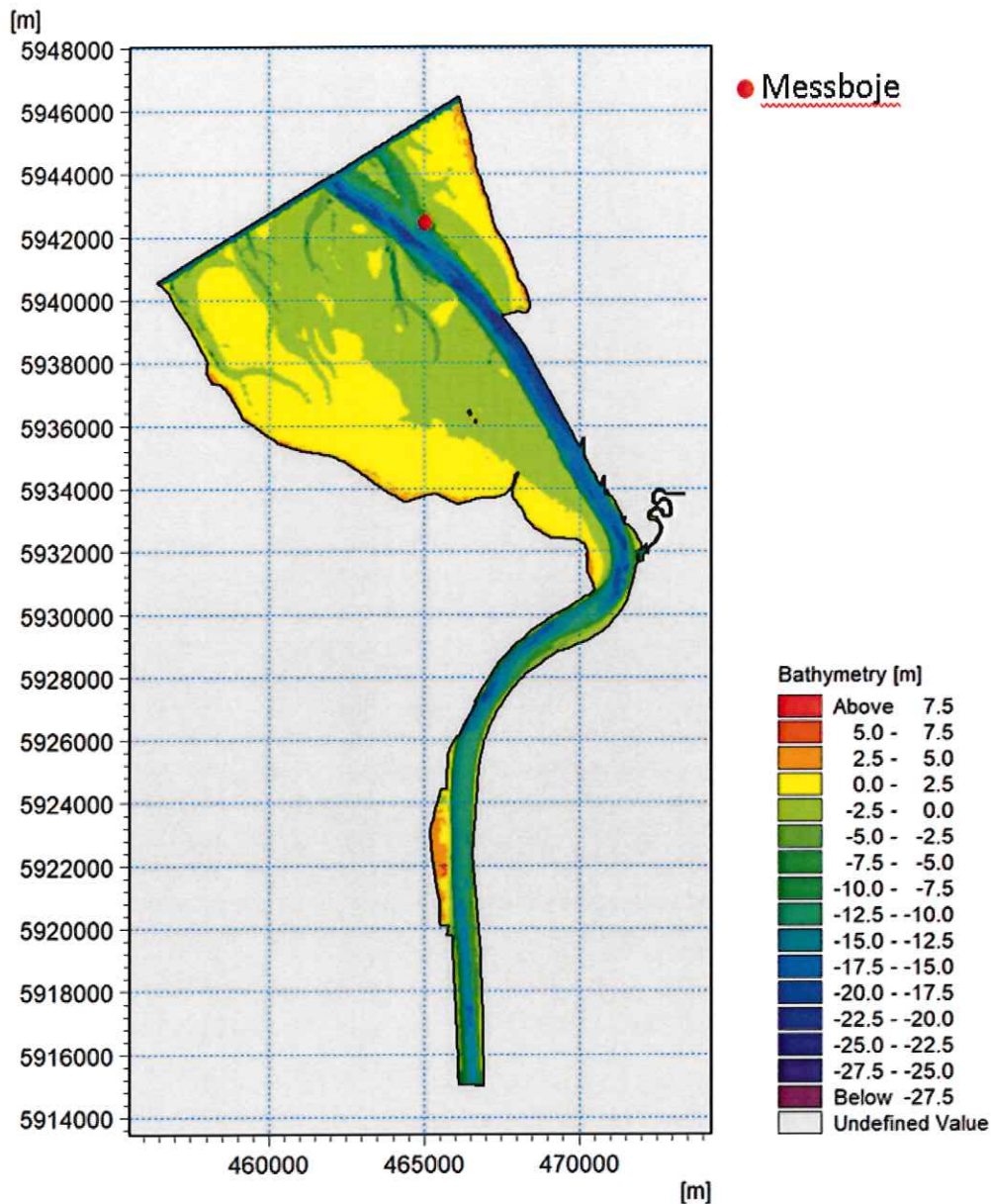


Abbildung 7: Bathymetrie im Istzustand in mNHN bei Plan-Sohlhorizont auf -5,4m LAT mit Wellenmessboje

Für ausgewählte Starkwindereignisse mit vorhandenen Wellenmessungen an der Messboje (vgl. /2/) sind die Wellenhöhen im Untersuchungsgebiet mit dem kalibrierten Modell berechnet worden. Tabelle 7 gibt einen Überblick über die mit dem Modell berechneten Wellenhöhen und an der Messboje gemessenen Wellenhöhen mit den jeweiligen Randbedingungen.

Tabelle 7: Vergleich von berechneten und gemessenen Wellenhöhen an der Boje für ausgewählte Starkwindereignisse

Windstärke	Windrichtung	Wasser- stand	sign. Wellen- höhe	sign. Wellen- höhe	Δh
			Boje	DMT berechnet	berechnet - gemessen
in m/s	in °	in mNHN	in m	in m	in m
22,4	316	2,85	1,21	1,32	0,11
17,5	292	2,83	1,00	0,93	-0,07
18,4	322	2,35	1,09	1,04	-0,06

Für alle drei untersuchten Ereignisse zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit Abweichungen von maximal 0,11 m (<10%). Es ist zu berücksichtigen, dass bei der Berechnung der Wellenhöhen modelltechnisch von einem konstanten Windfeld ausgegangen wird. In der Realität liegen konstante Windverhältnisse jedoch zeitlich oft nur sehr begrenzt vor, da sowohl die Windgeschwindigkeit als auch die Windrichtung zeitlichen Schwankungen unterzogen sind.

Dies führt zu einer Streuung der Wellenhöhen, die sich bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit in der Realität einstellen können. Dies verdeutlicht die Darstellung Abbildung 8 (nach /2/). Dort sind die Messungen der Wellenmessboje für den Windrichtungssektor von 245°N bis 20°N (Wind aus NW) in einem Zeitraum von 2 Stunden vor Tidehochwasser bis 2 Stunden nach Tidehochwasser aufgetragen, also bei annähernd konstantem Wasserstand. Auch dann liegt weiterhin eine Streuung der Messergebnisse bei gleichen Windstärken aufgrund der Varianz im Windfeld vor.

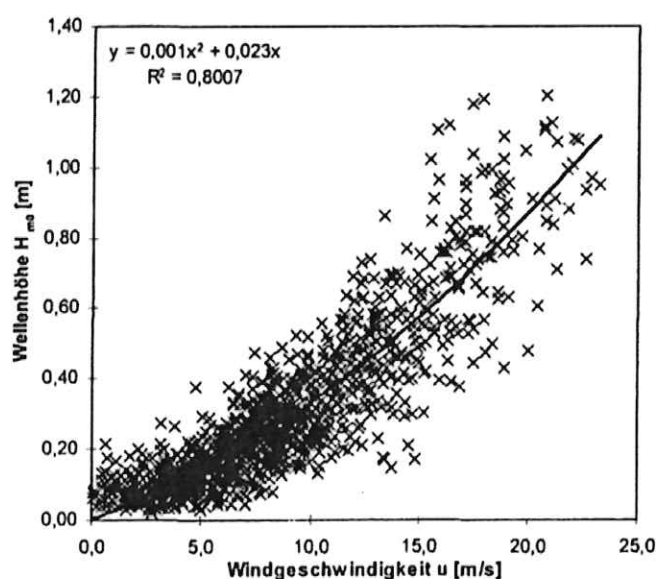


Abbildung 8: Abhängigkeit der Wellenhöhe von der Windgeschwindigkeit (Windrichtungssektor 245°N – 20°N, Zeitraum Thw-2h bis Thw+2h) nach /2/

Vergleicht man die berechneten Modellergebnisse unter Annahme der in Kapitel 2.3 beschriebenen Randbedingungen (Wind aus NW und einem Wasserstand von +3mNHN) zeigt sich auch hier eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Für eine Windstärke von 7,5 m/s wird eine Wellenhöhe an der Messboje von 0,396 m, für eine Windstärke von 10,0 m/s wird eine Wellenhöhe an der Messboje von 0,527 m ermittelt. Die berechneten Werte entsprechen somit gut maximal gemessenen Werten von rund 0,40 m bei Windstärke 7,5 m/s, bzw. rund 0,55 m bei Windstärke 10,0 m/s.

Zur weiteren Kontrolle der Modellgüte sind für ausgewählte Ereignisse die Ergebnisse des Berechnungsmodell mit den Ergebnissen des in /3/ beschriebenen SWAN Berechnungsmodells verglichen worden.

Tabelle 8: Vergleich von berechneten Wellenhöhen und Modellergebnissen des SWAN-Berechnungsmodells aus /3/ an der Position der Messboje

Windstärke	Windrichtung	Wasserstand	sign. Wellenhöhe	sign. Wellenhöhe	Δh
			SWAN-Modell	DMT berechnet	berechnet - SWAN-Modell
in m/s	in °	in mNHN	in m		in m
24	240	4	1,3	1,391	0,091
24	270	4	1,52	1,545	0,025
24	300	4	1,58	1,598	0,018
24	330	4	1,48	1,445	-0,035

Bei geringeren Windstärken weichen die berechneten Werte bei Wind aus SW etwas stärker von den Modellergebnissen des SWAN-Modells ab, weisen aber weiterhin eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten der Messboje auf.

Die unter Annahme der in Kapitel 2.3 beschriebenen Randbedingungen (Wind aus SW und einem Wasserstand von +2mNHN) berechneten Werte des Berechnungsmodells liefern für eine Windgeschwindigkeit von 7,5 m/s eine signifikante Wellenhöhe von 0,289 m und für Windgeschwindigkeiten von 10,0 m/s eine signifikante Wellenhöhe von 0,401 m. Die Ergebnisse liegen somit auch für die Windrichtung aus SW in guter Übereinstimmung mit den maximal gemessenen Werten der Wellenmessboje von rund 0,30 m bei Windstärke 7,5 m/s bzw. 0,40 m bei Windstärke 10,0 m/s.

4 Ergebnisse der Wellenhöhen im Ist-Zustand

Mit dem kalibrierten Berechnungsmodell sind die signifikanten Wellenhöhen h_s für vier Szenarien mit den in Kapitel 2.3 beschriebenen Randbedingungen berechnet worden:

1. Windrichtung: NW, Windstärke: 7,5 m/s, Wasserstand: 3 mNHN
2. Windrichtung: NW, Windstärke: 10,0 m/s, Wasserstand: 3 mNHN
3. Windrichtung: SW, Windstärke: 7,5 m/s, Wasserstand: 2,2 mNHN
4. Windrichtung: SW, Windstärke: 10,0 m/s, Wasserstand: 2,2 mNHN

Die berechneten Wellenhöhen sind für das gesamte Untersuchungsgebiet in Abbildung 9 bis Abbildung 12 dargestellt. An der mit t1 gekennzeichneten Messboje zeigen sich wie in Kapitel 3 beschrieben gute Übereinstimmungen mit den maximal gemessenen Werten.

Bei Windrichtung NW nehmen die berechneten Wellenhöhen von der Messboje bis zur Hafeneinfahrt des Fischereivorhafens um rund 10% ab. Die berechneten Wellenhöhen betragen an der Hafeneinfahrt bei Windstärken von 7,5 m/s noch 0,357 m und bei Windstärken von 10,0 m/s noch 0,467 m.

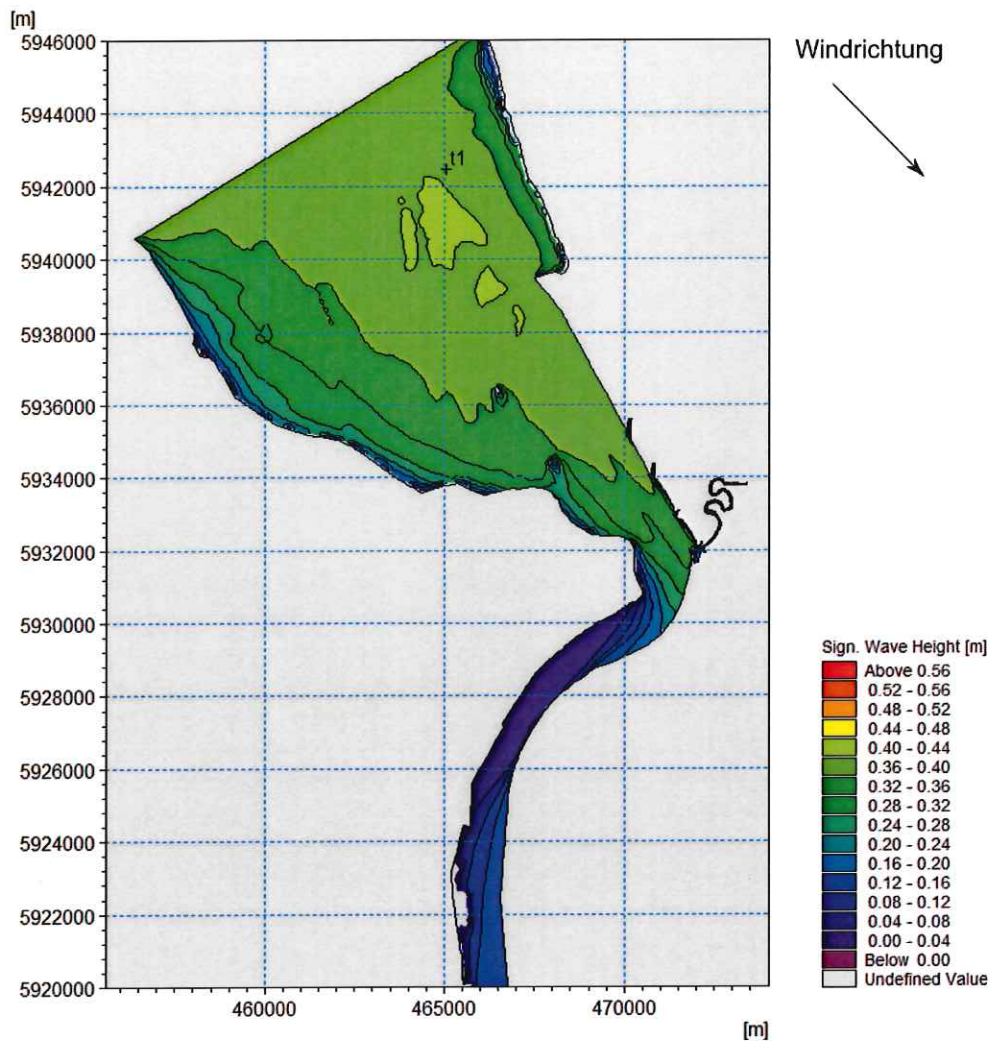


Abbildung 9: Berechnete Wellenhöhen im Untersuchungsgebiet mit Lage der Messboje (t1) bei Windstärke 7,5 m/s und Wind aus NW

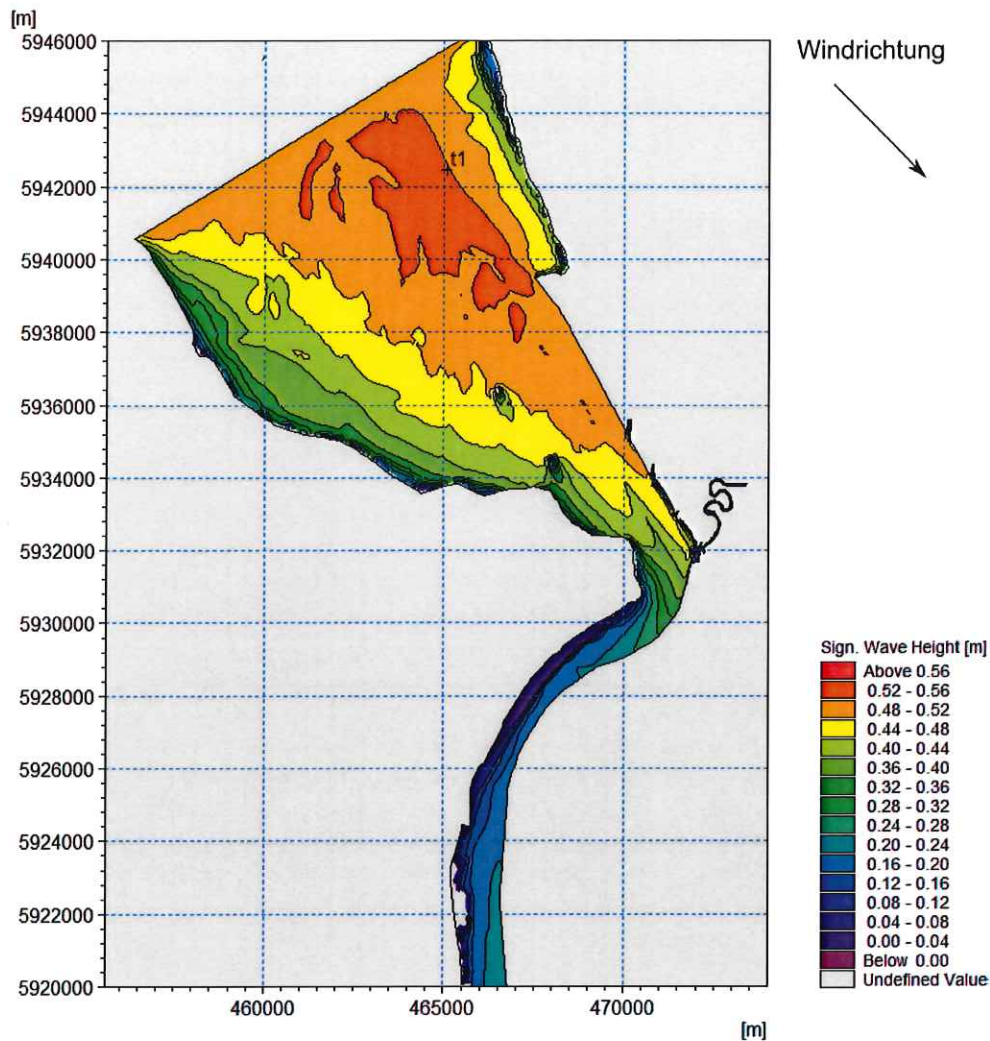


Abbildung 10: Berechnete Wellenhöhen im Untersuchungsgebiet mit Lage der Messboje (t1) bei Windstärke 10,0 m/s und Wind aus NW

Bei Windereignissen aus SW nehmen die Wellenhöhen entlang dem Weserverlauf von Nordenham bis zur Einfahrt des Fischereivorhafens leicht zu und betragen an der Hafeneinfahrt bei Windstärken von 7,5 m/s 0,207 m und bei Windstärken von 10,0 m/s 0,303 m.

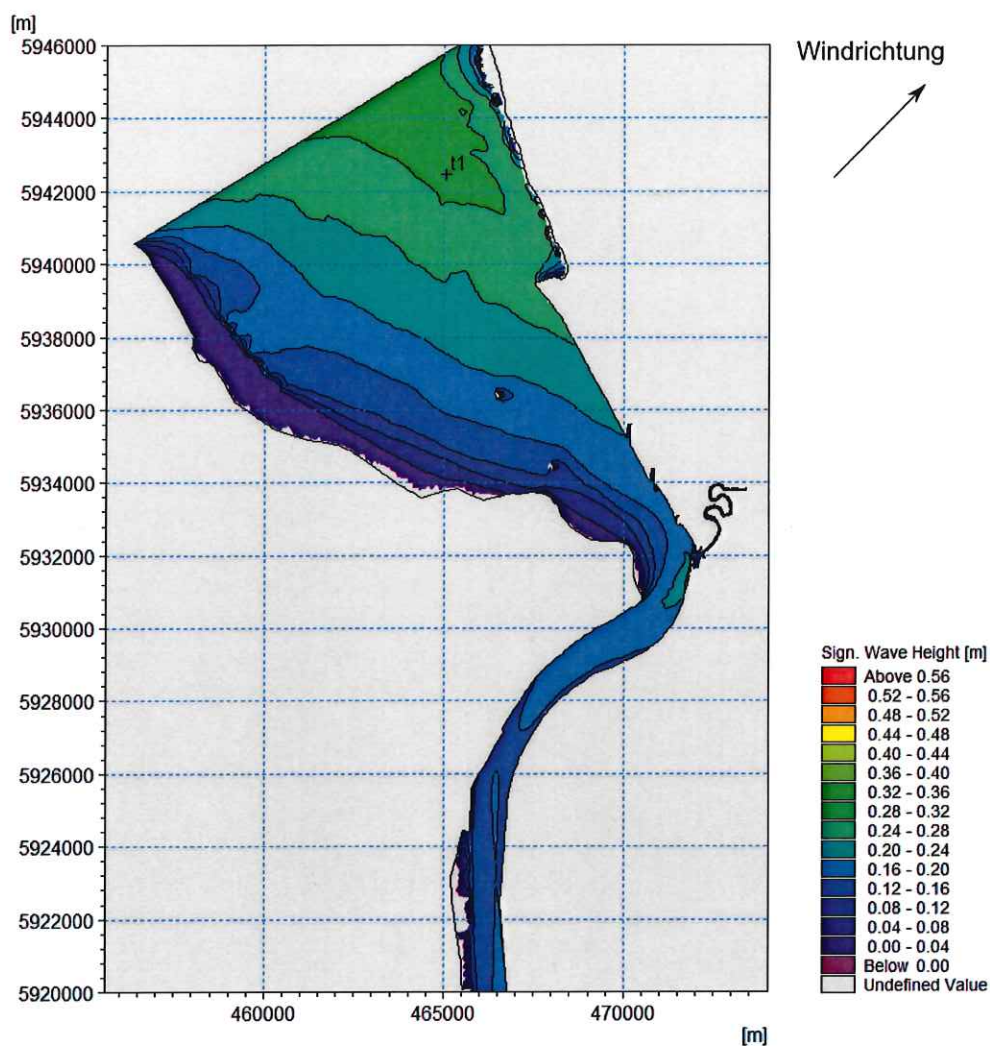


Abbildung 11: Berechnete Wellenhöhen im Untersuchungsgebiet mit Lage der Messboje (t1) bei Windstärke 7,5 m/s und Wind aus SW

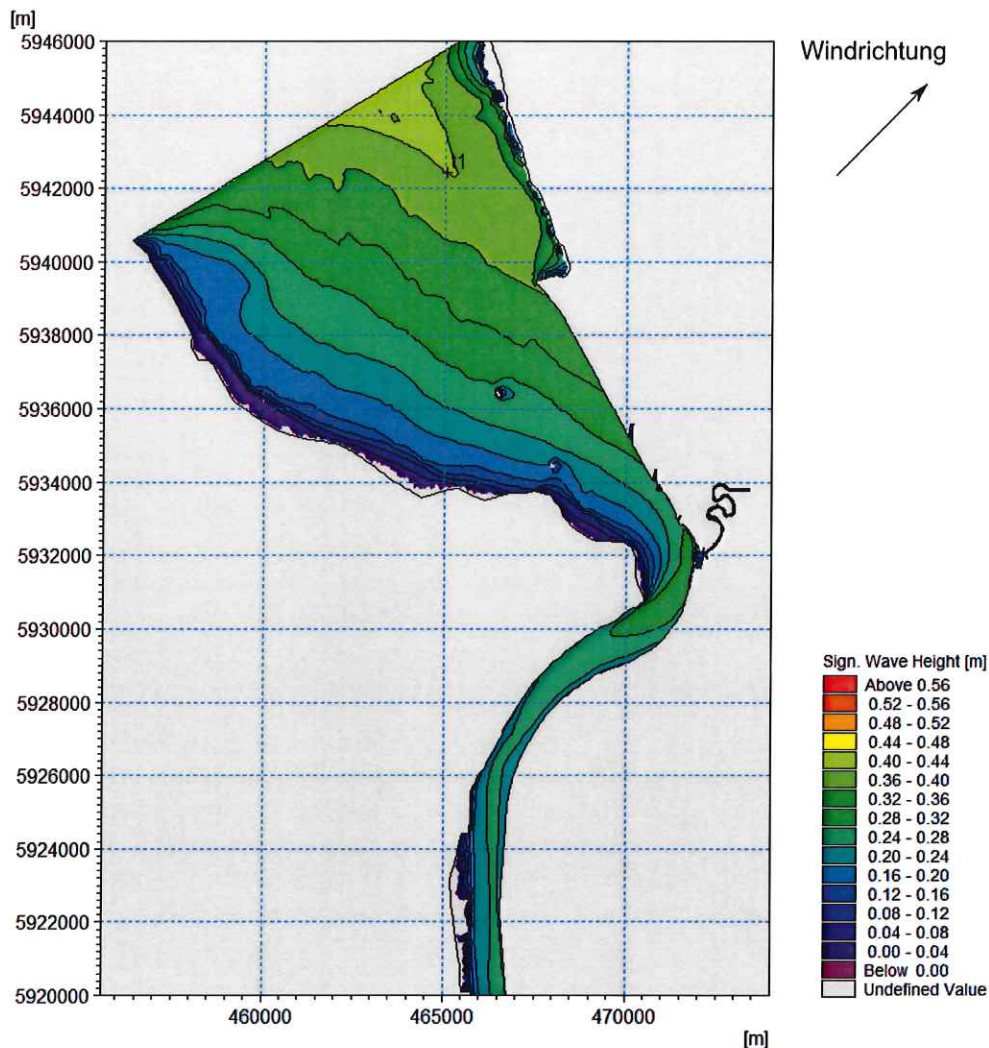


Abbildung 12: Berechnete Wellenhöhen im Untersuchungsgebiet mit Lage der Messboje (t1) bei Windstärke 10,0 m/s und Wind aus SW

Die berechneten Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung sind in Abbildung 13 bis Abbildung 16 dargestellt. Bei Wind aus NW zeigt sich eine deutliche Abnahme der Wellenhöhen im Bereich des Vorhafens zur Doppelschleuse im Vergleich zu den Wellenhöhen vor der Hafeneinfahrt, da die Nordmole den Eintrag von Wellen teilweise verhindert. An der Südmole zeigt sich die Reflexion von Wellen in den Hafenbereich hinein, wodurch die größten Wellenhöhen im südlichen und mittleren Bereich des Hafens auftreten.

Bei Windstärken von 7,5 m/s treffen Wellen mit einer Wellenhöhe von maximal 0,19 m auf die südöstliche Kaimauer im Vorhafen zur Doppelschleuse (unterhalb der Straße *Am Handelshafen*), bei Windstärken von 10,0 m/s liegen die Wellenhöhen in diesem Bereich bei maximal 0,25 m.

Im Bereich der Anlegestege im südwestlichen Teil im Vorhafen zur Doppelschleuse
liegen die Wellenhöhen bei Windstärke 7,5 m/s im Bereich von 0,12 m – 0,16 m,
Bei Windstärke 10,0 m/s im Bereich von 0,16 m – 0,20 m.

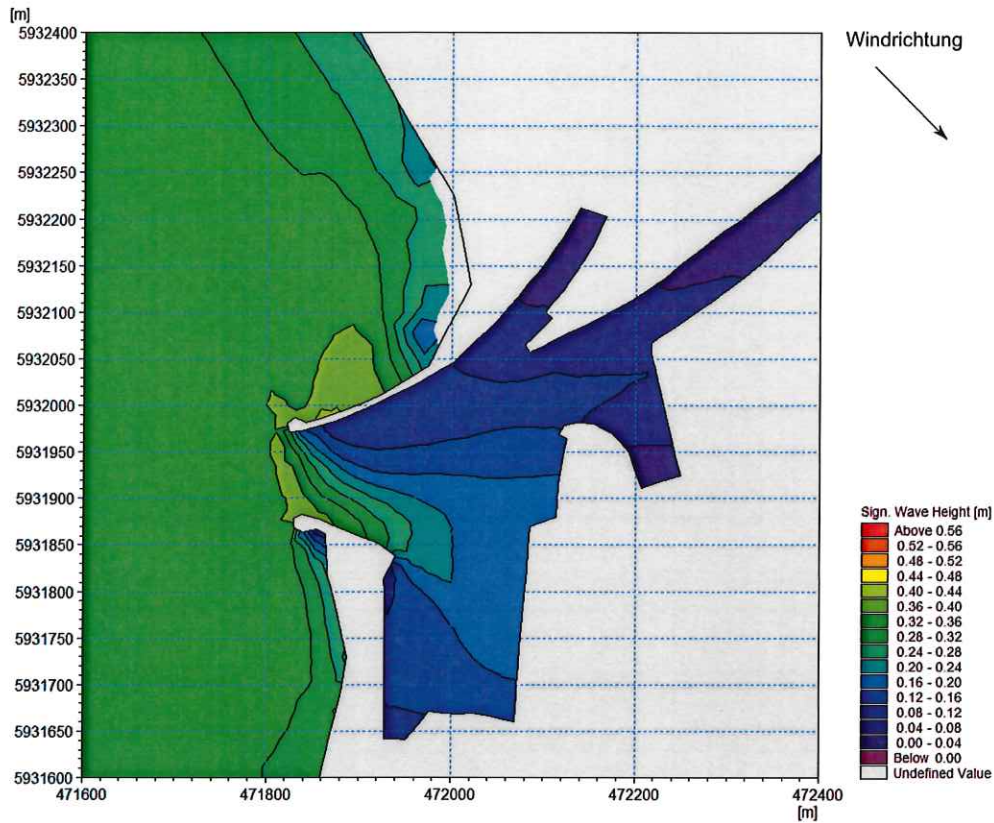


Abbildung 13: Berechnete Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 7,5 m/s und Wind aus NW im Ist-Zustand

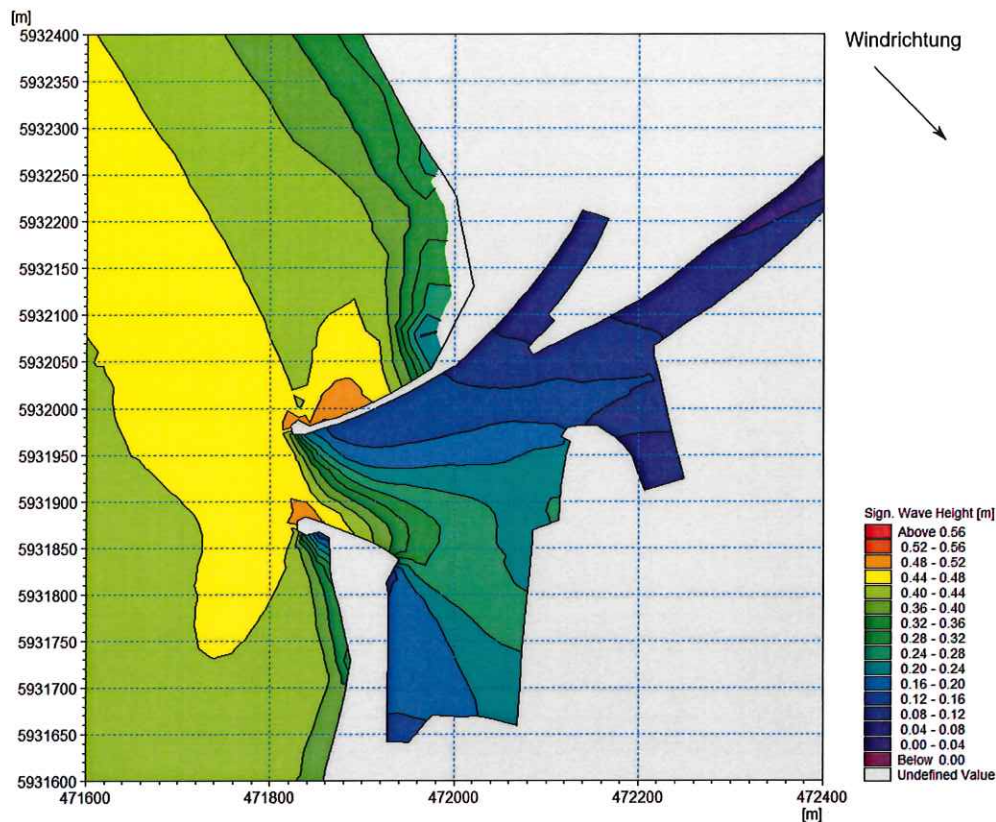


Abbildung 14: Berechnete Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 10,0 m/s und Wind aus NW im Ist-Zustand

Bei Windereignissen aus SW stellen sich aufgrund der geringeren Fetchlänge auch geringere Wellenhöhen als bei Windereignissen aus NW vor der Einfahrt zum Geestevorhafen ein. Durch die Südmole werden die Wellenhöhen im Hafenbereich im Vergleich zu den Wellenhöhen an der Hafeneinfahrt reduziert. Es findet eine Reflexion der Wellen an der Nordmole statt, so dass die größten Wellenhöhen im nördlichen und mittleren Hafenbereich auftreten.

An der Anlegestelle an der Nordmole liegen die berechneten Wellenhöhen bei Windstärke 7,5 m/s im Bereich zwischen 0,12 m und 0,20 m, bei Windstärken von 10,0 m/s im Bereich zwischen 0,20 m und 0,28 m.

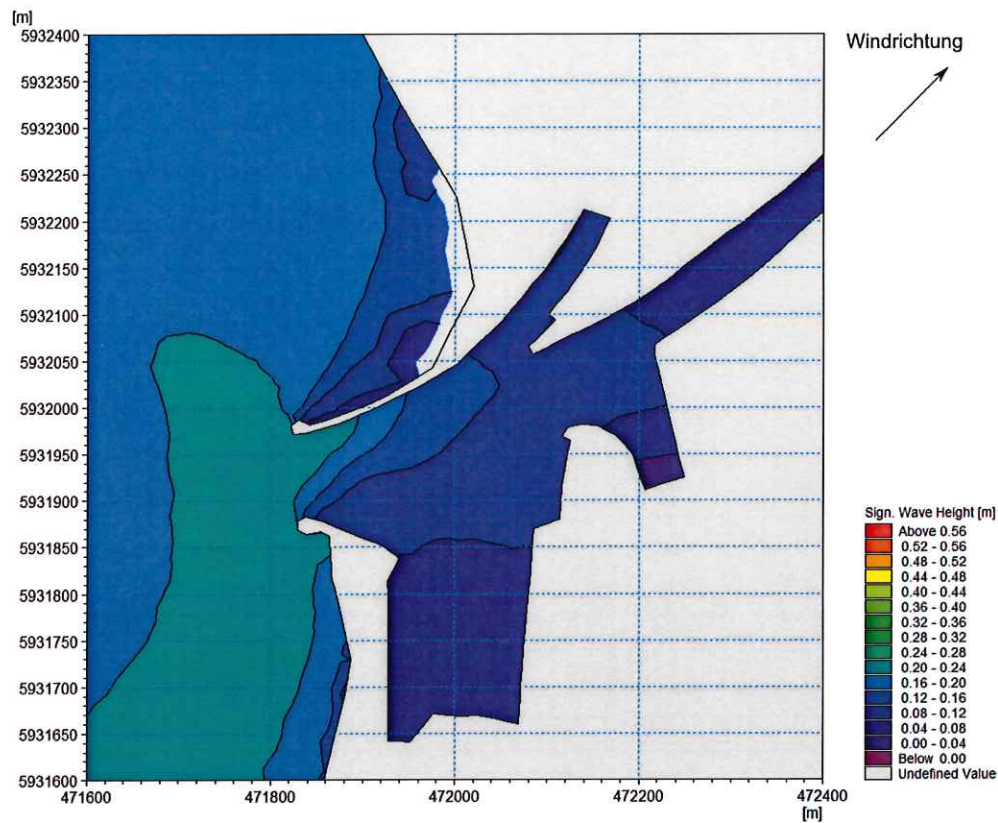


Abbildung 15: Berechnete Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 7,5 m/s und Wind aus SW im Ist-Zustand

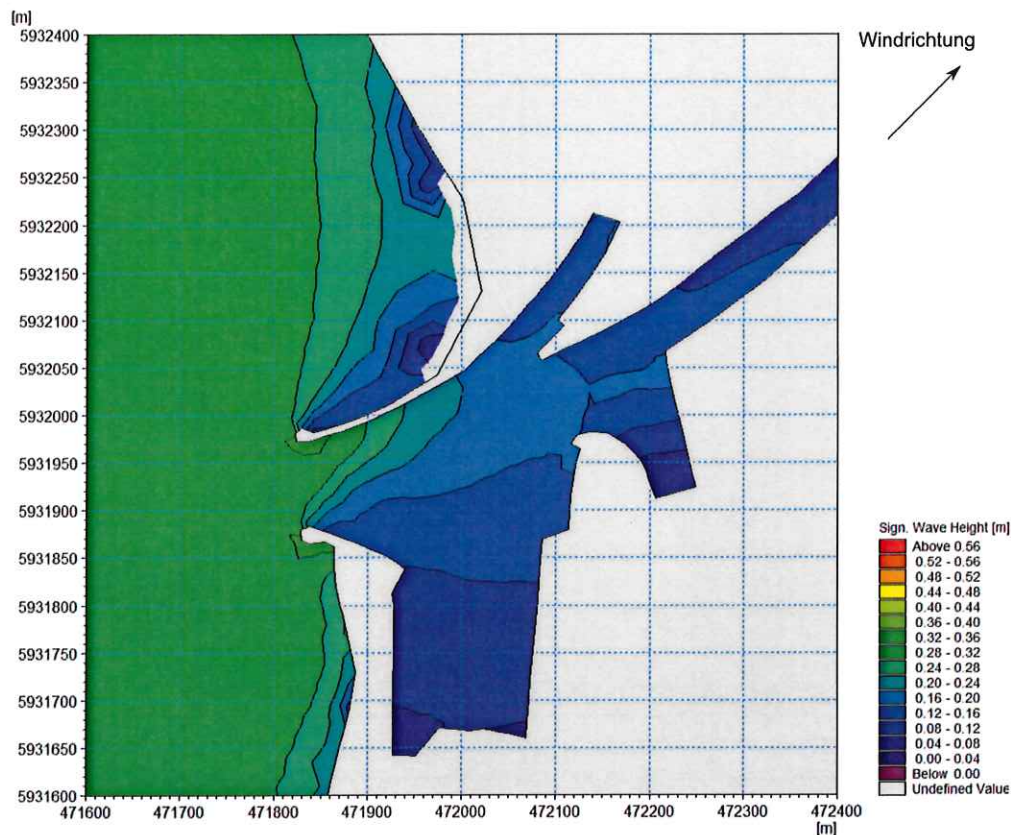


Abbildung 16: Berechnete Wellenhöhen im Bereich der Geestmündung bei Windstärke 10,0 m/s und Wind aus SW im Ist-Zustand

Die Wellenperioden T_p in der Geestmündung liegen bei Windereignisse aus NW und Windgeschwindigkeiten von 7,5 m/s im Bereich zwischen 2,4 s bis 2,7 s und bei Windereignissen von 10,0 m/s im Bereich von 2,6 s bis 2,9 s.

Für Windereignisse aus SW ergeben sich entsprechend der niedrigeren Wellenhöhen auch niedrigere Wellenperioden T_p . Für Windgeschwindigkeiten von 7,5 m/s liegen die Wellenperioden T_p im Bereich von 1,9 s bis 2,0 s und bei Windgeschwindigkeiten von 10,0 m/s im Bereich von 2,1 s bis 2,2 s.

5 Ergebnisse der Wellenhöhen im Planzustand 2

Für den Planzustand 2 sind analog zum Ist-Zustand die Wellenhöhen für die vier in Kapitel 4 beschriebenen Szenarien berechnet worden. Die veränderte Geometrie der Nordmole führt nur zu lokalen Veränderungen der berechneten Wellenhöhen. Auf die Darstellung der berechneten Wellenhöhen im Planzustand über das gesamte Untersuchungsgebiet wird aus diesem Grund verzichtet.

Die berechneten Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung sind für den Planzustand 2 in Abbildung 17 bis Abbildung 20 dargestellt.

Bei Windereignissen aus NW bietet die neue Geometrie der geplanten Nordmole den einlaufenden Wellen deutlich weniger Widerstand, wodurch die Wellen deutlich weniger abgeschwächt werden und mit größeren Wellenhöhen den Bereich des Vorhafens zur Doppelschleuse erreichen.

Bei Windstärken von 7,5 m/s treffen Wellen mit einer Wellenhöhe von maximal 0,30 m auf die südöstliche Kaimauer im Vorhafen zur Doppelschleuse (unterhalb der Straße *Am Handelshafen*), bei Windstärken von 10,0 m/s liegen die Wellenhöhen in diesem Bereich bei maximal 0,39 m.

Im Bereich der Anlegestege im südwestlichen Teil des Vorhafens zur Doppelschleuse liegen die Wellenhöhen bei Windstärke 7,5 m/s im Bereich von 0,16 m – 0,24 m, Bei Windstärke 10,0 m/s im Bereich von 0,24 m – 0,30 m.

Eine Darstellung der Bereiche mit Änderungen der Wellenhöhen gegenüber dem Ist-Zustand folgt in Kapitel 6.

Die Wellenperioden T_p in der Geestemündung liegen bei Windereignisse aus NW und Windgeschwindigkeiten von 7,5 m/s im Bereich weiterhin zwischen 2,4 s bis 2,7 s und bei Windereignissen von 10,0 m/s im Bereich von 2,6 s bis 2,9 s. Im Bereich des Schleusenvorhafens erhöhen sich die Wellenperioden gegenüber dem Ist-Zustand gering.

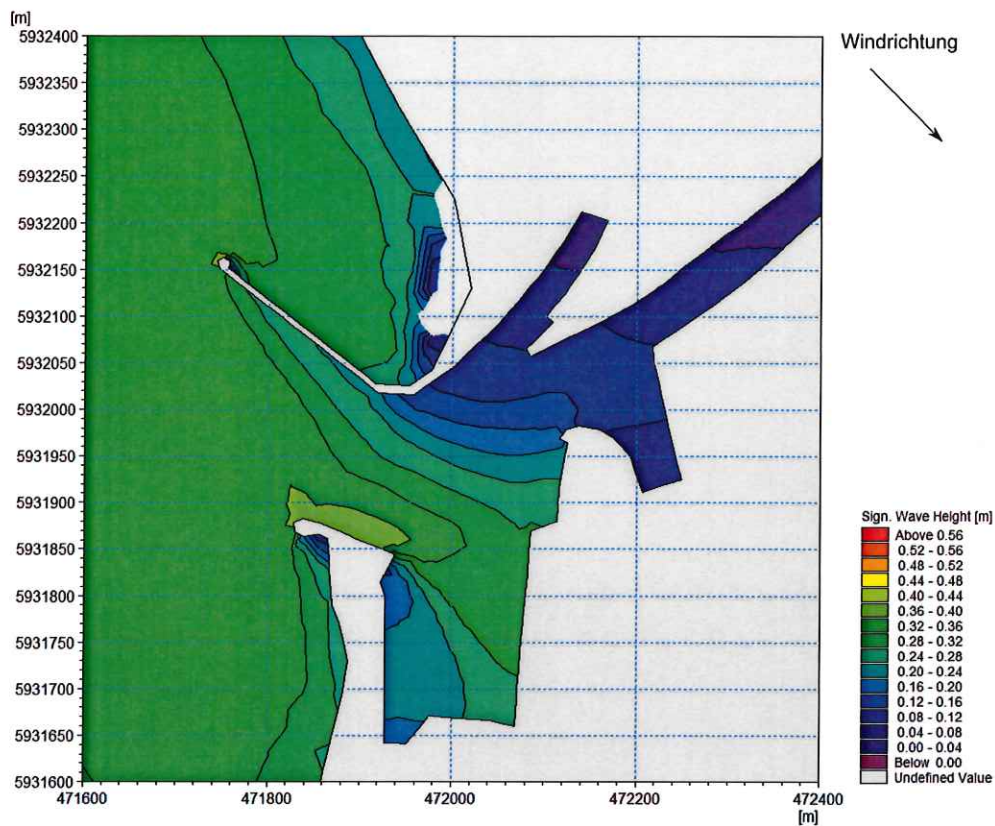


Abbildung 17: Berechnete Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 7,5 m/s und Wind aus NW im Planzustand 2

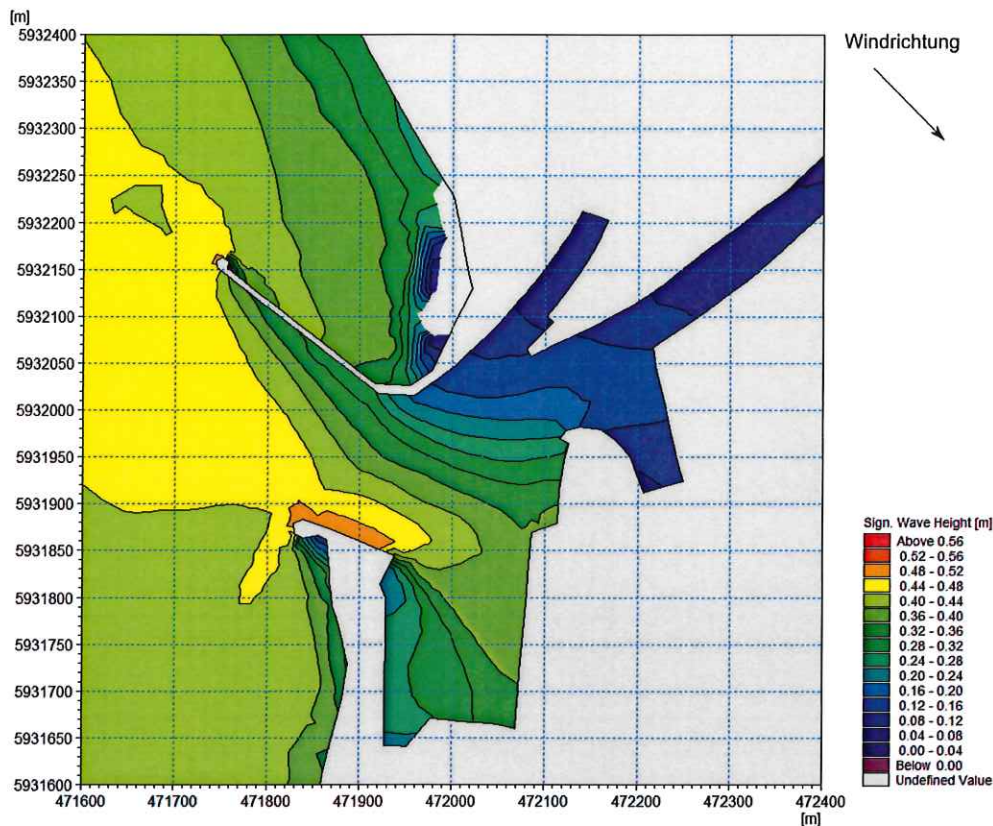


Abbildung 18: Berechnete Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 10,0 m/s und Wind aus NW im Planzustand 2

Im Planzustand 2 zeigt sich bei Windereignissen aus SW ein zum Ist-Zustand vergleichbares Ausbreitungsverhalten der Wellen. Die Südmole schützt den Hafenbereich weiterhin vor dem direkten Einlaufen von Wellen aus der Weser. An der neu geplanten Nordmole findet eine Reflexion der nicht durch die Südmole abgeschwächten Wellen statt. Die Reflexion findet von der Nordmole in südwestliche Richtung zurück in die Weser statt. Es zeigt sich keine Reflexion in Richtung des Vorhafens zur Doppelschleuse, sodass keine signifikanten Änderungen der Wellenhöhen im Vorhafen zur Doppelschleuse gegenüber dem Ist-Zustand zu erwarten sind. Die Spitzenwellenperioden verändern sich gegenüber dem Istzustand ebenfalls nur sehr gering.

Eine Darstellung der Bereiche mit Änderungen der Wellenhöhen gegenüber dem Ist-Zustand für Windereignisse aus SW folgt ebenfalls in Kapitel 6.

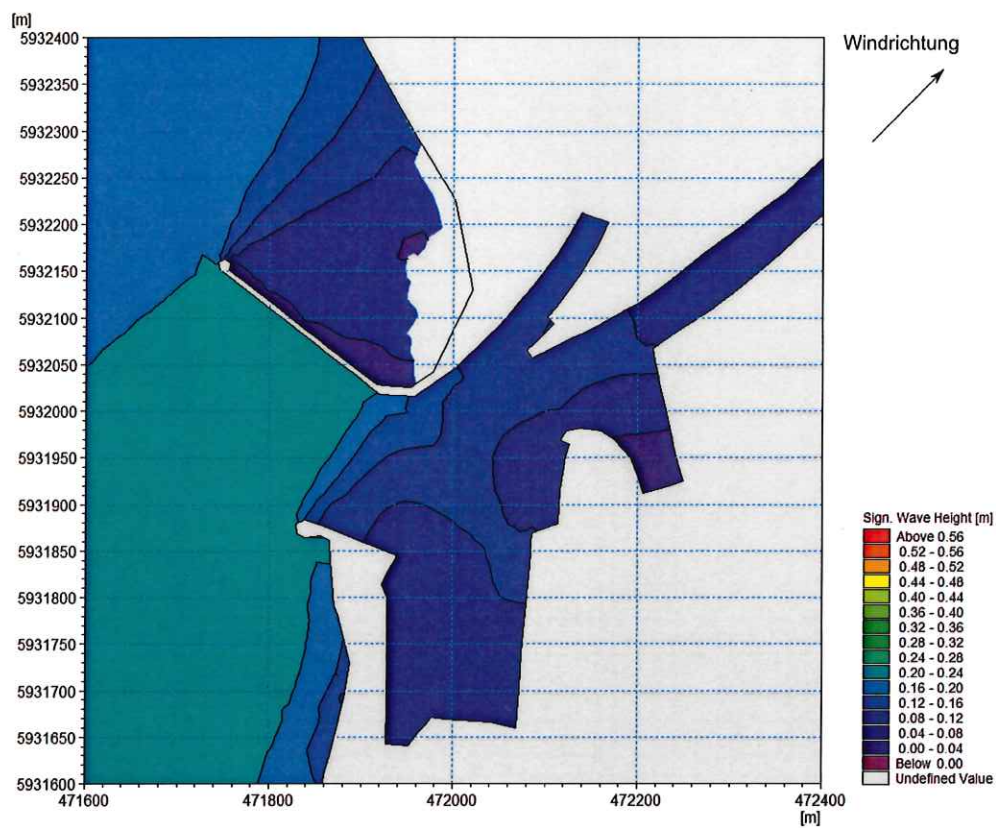


Abbildung 19: Berechnete Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 7,5 m/s und Wind aus SW im Planzustand 2

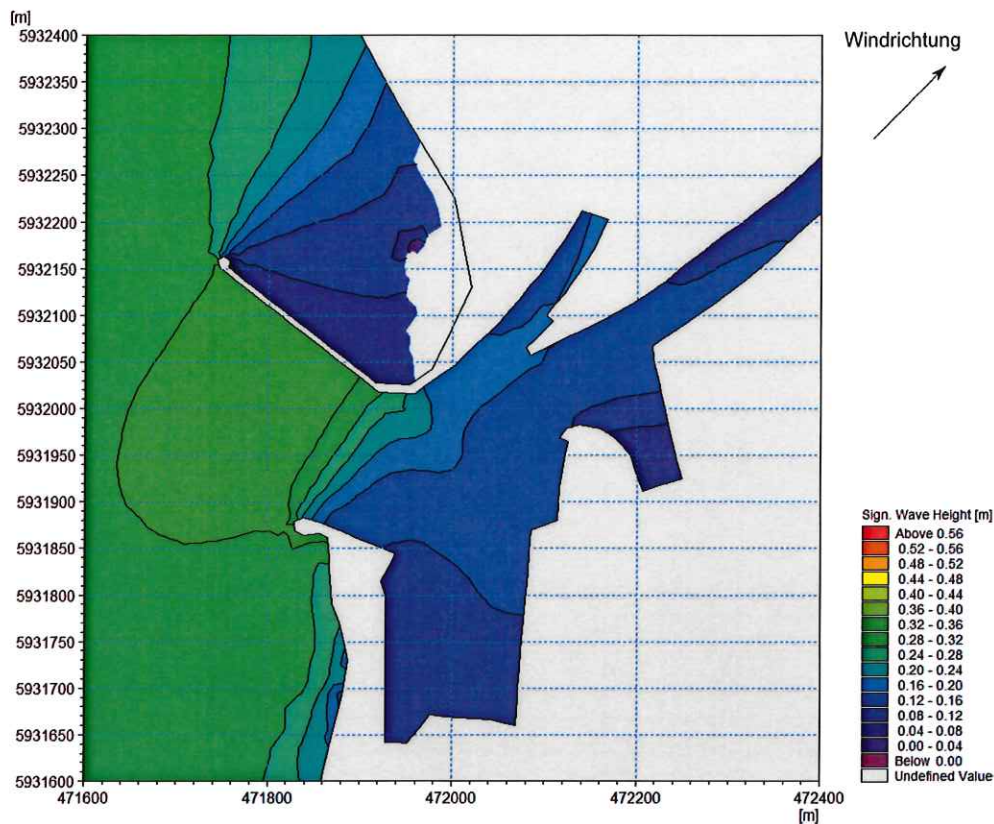


Abbildung 20: Berechnete Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 10,0 m/s und Wind aus SW im Planzustand 2

6 Vergleich der Ergebnisse aus Ist-Zustand und Planzustand 2

Die Randbedingungen der in Kapitel 4 und Kapitel 5 beschriebenen Ergebnisse im Istzustand und im Planzustand 2 unterscheiden sich nur durch die Geometrie der Nordmole. Somit können die zwei Zustände für alle vier berechneten direkt miteinander verglichen werden um den Einfluss der geänderten Nordmole auf die Wellenhöhen im Fischereivorhafen zu ermitteln.

Für die Darstellung der Veränderungen sind im Folgenden Differenzkarten gewählt worden. Die Darstellung erfolgt auf Grundlage des Planzustands 2 und die berechneten Differenzen ergeben sich aus der Subtraktion der Ergebnisse aus Planzustand 2 mit den Ergebnissen des Ist-Zustands.

Diese Darstellungsweise führt dazu, dass im Bereich der bestehenden Nordmole im Ist-Zustand starke Differenzen auftreten, da sich nun gewisse Bereiche nicht

mehr im direkten Wellenschatten der Mole befinden. Für die Auswertung der Veränderungen sind diese Bereiche von untergeordneter Bedeutung. Im Folgenden werden primär die Veränderungen im Vorhafen zur Doppelschleuse betrachtet.

In Abbildung 21 und Abbildung 22 sind die so ermittelten Differenzen der Wellenhöhen im Bereich des Vorhafens zur Doppelschleuse für Windereignisse aus NW für die Windstärken 7,5 m/s und 10 m/s dargestellt; Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen die Differenzen für die Windereignisse aus SW bei Windstärken 7,5 m/s und 10 m/s.

Im Planzustand 2 erhöhen sich die berechneten Wellenhöhen an der südöstlichen Kaimauer im Vorhafen zur Doppelschleuse (unterhalb der Straße *Am Handelshafen*), bei Windstärken von 7,5 m/s um 11 cm auf maximal 0,30 m bei Windstärken von 10,0 m/s erhöhen sich die Wellenhöhen in diesem Bereich um 14 cm auf maximal 0,39 m.

Im Bereich der Anlegestege im südwestlichen Bereich des Vorhafens zur Doppelschleuse ergeben sich bei Windstärken von 7,5 m/s um 4 cm bis 8 cm höhere Wellen (mit maximalen Wellenhöhen von 0,20 m) gegenüber dem Ist-Zustand und bei Windstärken von 10,0 m/s um 8 cm bis 10 cm höhere Wellen (mit maximalen Wellenhöhen von 0,30 m).

Im Bereich des Anlegers am Lotsendienstgebäude ergeben sich ebenfalls leichte Wellenerhöhungen. Die Erhöhungen an dieser Stelle liegen im Bereich von +3 cm bis +6 cm.

Die maximalen Wellenerhöhungen ergeben sich im mittleren Bereich des Vorhafens zur Doppelschleuse. Bei Windstärken von 7,5 m/s ergeben sich Erhöhungen von 13 cm bei Windstärken von 10,0 m/s von 15,6 cm.

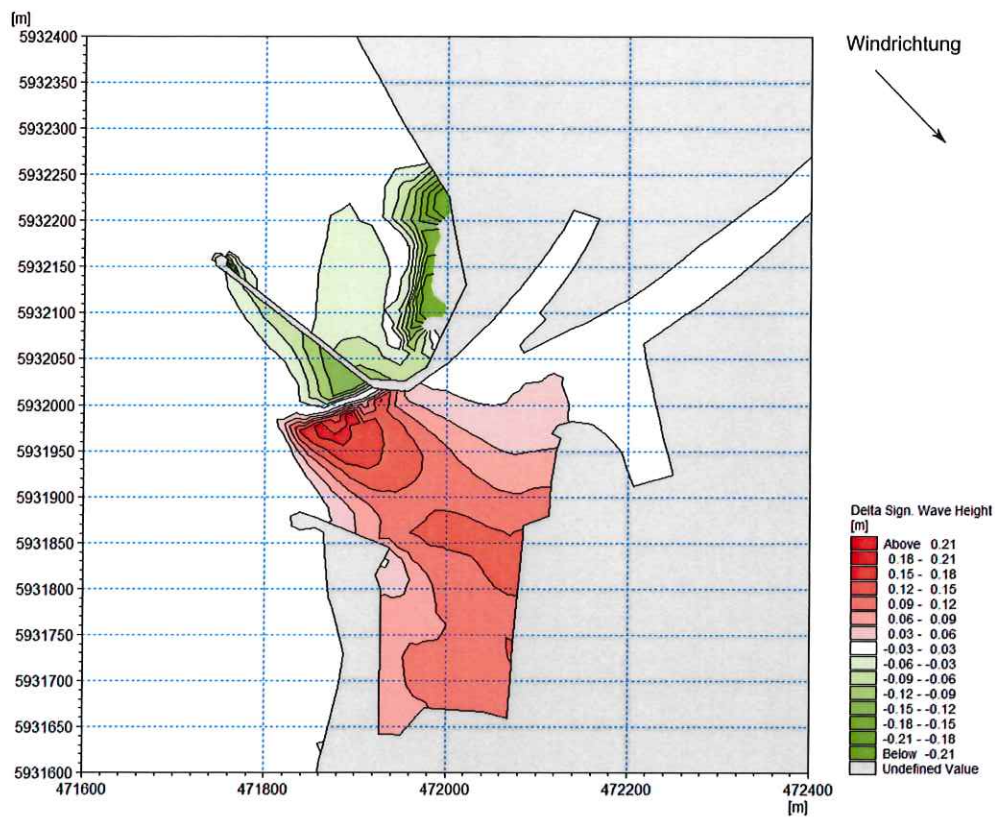


Abbildung 21: Differenz der berechneten Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 7,5 m/s und Wind aus NW (Planzustand 2 – Istzustand)

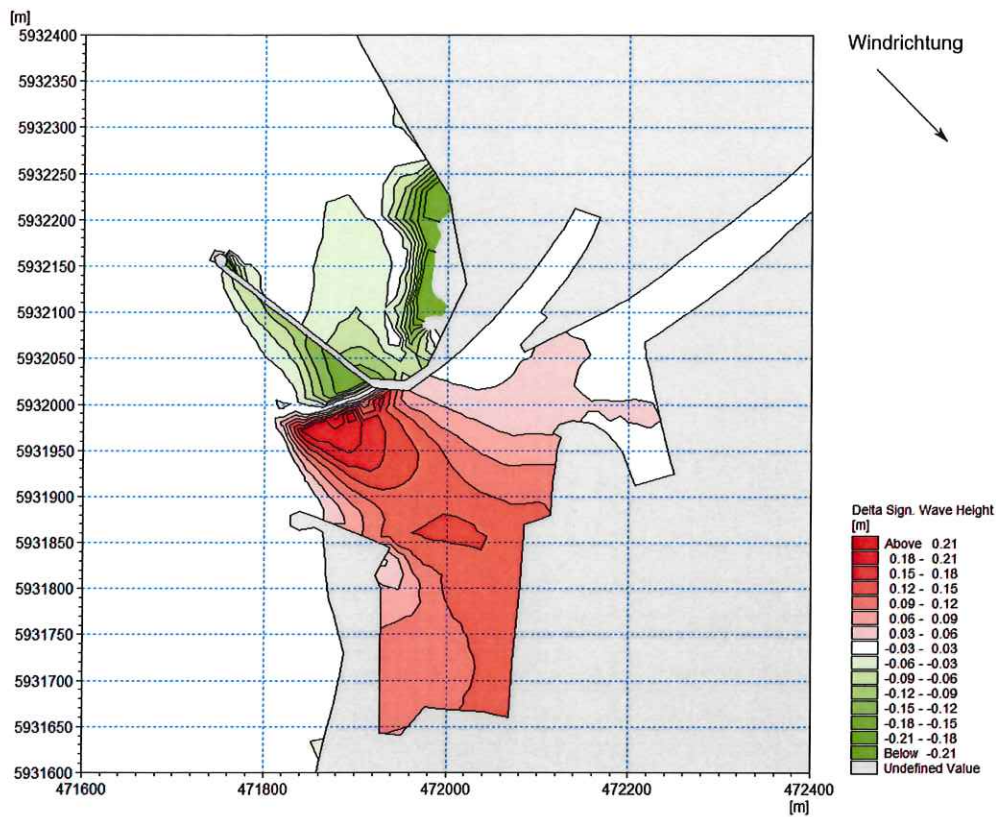


Abbildung 22: Differenz der berechneten Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 10,0 m/s und Wind aus NW (Planzustand 2 – Istzustand)

Bei Windereignissen aus SW zeigen die Berechnungsergebnisse keine Veränderungen der Wellenhöhen im Vorhafen zur Doppelschleuse. Die Reflexion der Wellen verläuft in südwestliche Richtung und somit zurück in die Weser. Dadurch ergeben sich um bis zu 6 cm höhere Wellen im Bereich südwestlich der neu geplanten Nordmole die bei Windstärken von 10,0 m/s rund 200 m von der Nordmole in die Weser reichen.

Der Bereich nordöstlich der neu geplanten Nordmole befindet sich im Planzustand 2 im Wellenschatten. Somit entstehen in diesem Bereich deutlich geringere Wellenhöhen als im Ist-Zustand.

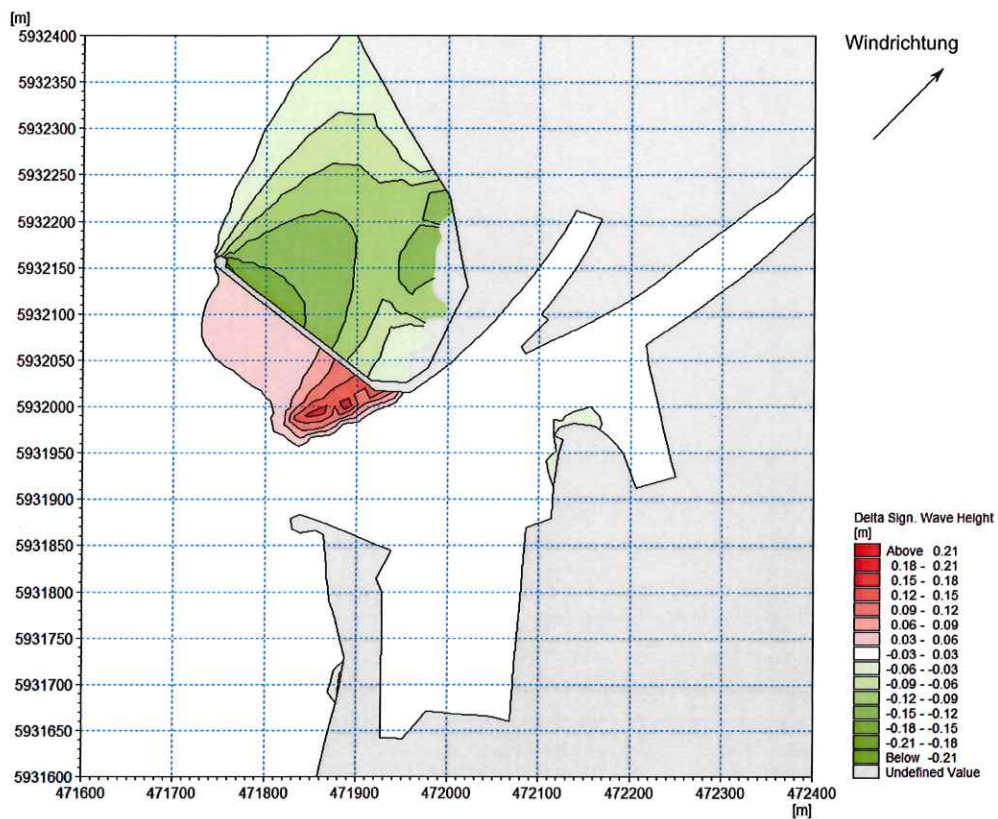


Abbildung 23: Differenz der berechneten Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 7,5 m/s und Wind aus SW (Planzustand 2 – Istzustand)

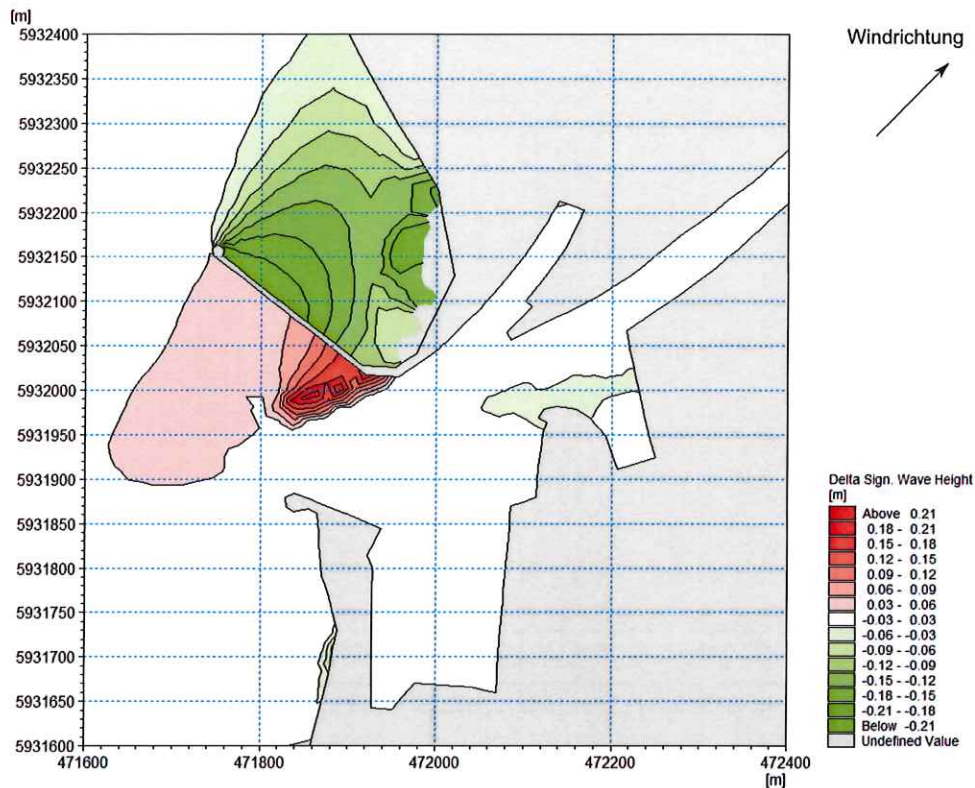


Abbildung 24: Differenz der berechneten Wellenhöhen im Bereich der Geestemündung bei Windstärke 10,0 m/s und Wind aus SW (Planzustand 2 – Istzustand)

7 Statistische Einordnung der berechneten Wellenhöhenänderungen

Die Berechnung der in Kapitel 6 dargestellten Veränderungen der Wellenhöhen beruhen auf der Annahme eines stationären, voll ausgebildeten Windfeldes und Wasserständen im Bereich eines Tidehochwassers (vgl. Kapitel 2.3). Es handelt sich bei den berechneten Werten somit um die maximalen Wellenhöhenänderungen die sich bei der jeweiligen Windstärke einstellen können.

Um Aussagen über die Häufigkeit der berechneten Wellenhöhen treffen zu können werden im Folgenden mittlere Wellenhöhen ermittelt. Der Einfluss des Wasserstands auf die Wellenhöhen wird anhand von weiteren Modellrechnungen mit einem reduzierten Wasserstand von 1,00mNHN berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in Kapitel 7.1 beschrieben. Der Einfluss durch ein nicht voll ausgebildete Windfeld wird auf Grundlage statischer Methoden berücksichtigt und ist in Kapitel 7.2 beschrieben.

Da sich für Windereignisse aus SW keine signifikanten Veränderungen der Wellenhöhen im Fischereivorhafen ergeben, werden die mittleren Wellenhöhen nur für Windereignisse aus NW ermittelt.

7.1 Wellenhöhen bei reduzierten Tidehochwasserständen

Bei reduzierten Tidehochwasserständen reduzieren sich aufgrund der nicht mehr überströmten Wattbereiche nordwestlich des Fischereivorhafens die Fetchlängen. Dadurch verringern sich die Wellenhöhen im Vergleich zu Verhältnissen, bei denen die Wattbereiche vollständig überströmt sind.

Zur Ermittlung der Wellenhöhen bei reduzierten Tidehochwasserständen für Windrichtung aus NW ist die Wasserstands-Randbedingung im Modell auf einen Wasserstand von 1 mNHN angepasst worden. Aufgrund der nur geringen Überströmungshöhen auf den Wattgebieten ist bei diesem Wasserstand mit reduzierten Wellenhöhen zu rechnen.

Aus den Modellergebnissen mit Wasserstand von 1 mNHN ist ein Verhältnis der Wellenhöhen bei Tidehochwasserständen von 1 mNHN und Tidehochwasserständen bei 3 mNHN ermittelt worden. Es liegt über den gesamten Bereich des Fischereivorhafens relativ konstant bei rund 75%. Die Reduktion R1 der Wellenhöhen bei reduzierten Wasserständen im Vergleich zu den in Kapitel 4 und Kapitel 5 beschriebenen maximalen Wellenhöhen aufgrund des Einflusses von mittleren hohen Wasserständen wird somit im Folgenden mit 25% angesetzt.

7.2 Reduktion der Wellenhöhen durch nicht voll ausgebildetes Windfeld

Unter der Annahme, dass sich der Einfluss von nicht voll ausgeprägten Windfeldern aufgrund von instationären Verhältnissen an der Messboje im gleichem Maße auf die Wellenhöhen in der Geestemündung auswirken, werden im Folgenden mit Hilfe statistischer Ansätze die Einflüsse auf die berechneten maximalen Wellenhöhen betrachtet.

Anhand der Messdaten der Boje, lässt sich der Einfluss nicht voll ausgeprägter Windfelder ableiten. In Abbildung 8 in Kapitel 3 ist bereits die Streuung der Wellenhöhen in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeiten für Windrichtungen für Windrichtungen aus West bis Nord bei annähernd konstantem Wasserstand (Zeitraum Thw-2h bis Thw+2h) aufgezeigt. Anhand der Darstellung lässt sich für den Bereich

von 5 m/s bis 10 m/s ein Verhältnis der mittleren gemessenen Wellenhöhen und der maximalen gemessenen Wellenhöhen ermittelt.

Die Reduktion R2 der Wellenhöhen bei nicht voll ausgeprägten Windfelder im Vergleich zu den in Kapitel 4 und Kapitel 5 beschriebenen maximalen Wellenhöhen wird auf Grundlage der beschriebenen Daten der Wellenmessboje somit im Folgenden mit 40% angesetzt.

7.3 Mittlere Wellenhöhenänderungen

Anhand der berechneten maximalen signifikanten Wellenhöhen h_s können die mittleren signifikanten Wellenhöhen $h_{s,m}$ durch Reduktion mit den Reduktionsfaktoren R1 (=0,25) und R2 (=0,4) entsprechend ermittelt werden:

$$h_{s,m} = h_s - R1 * h_s - R2 * h_s$$

Analog lassen sich aufgrund des Superpositionsprinzips aus den maximalen Änderungen der signifikanten Wellenhöhen zwischen Istzustand und Planzustand 2 mittlere Änderungen der signifikanten Wellenhöhen ermitteln:

$$\Delta h_{s,m} = \Delta h_s - R1 * \Delta h_s - R2 * \Delta h_s$$

In Abbildung 25 und Abbildung 26 sind die mittleren Sohlhöhenänderungen für Windereignisse aus NW bei Windgeschwindigkeiten von 7,5 m/s und 10,0 m/s dargestellt. Die maximalen mittleren Sohlhöhenänderungen betragen in der Mitte des Fischereivorhafens bei Windgeschwindigkeiten von 7,5 m/s 4,5 cm und bei Windgeschwindigkeiten von 10,0 m/s 5,5 cm und nehmen über den Fischereivorhafen entsprechend der Abbildungen in Richtung der Kaimauern ab.

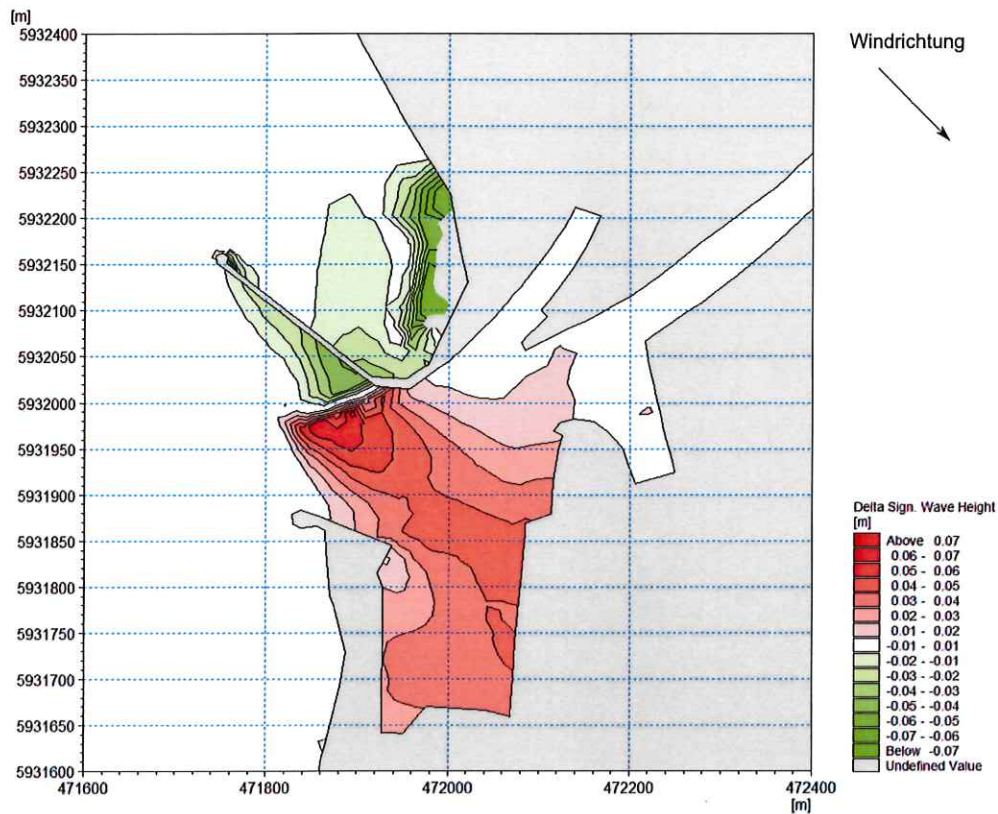


Abbildung 25: Differenz der mittleren Wellenhöhen im Bereich des Fischereivorhafens bei Windstärke 7,5 m/s und Wind aus NW (Planzustand 2 – Istzustand)

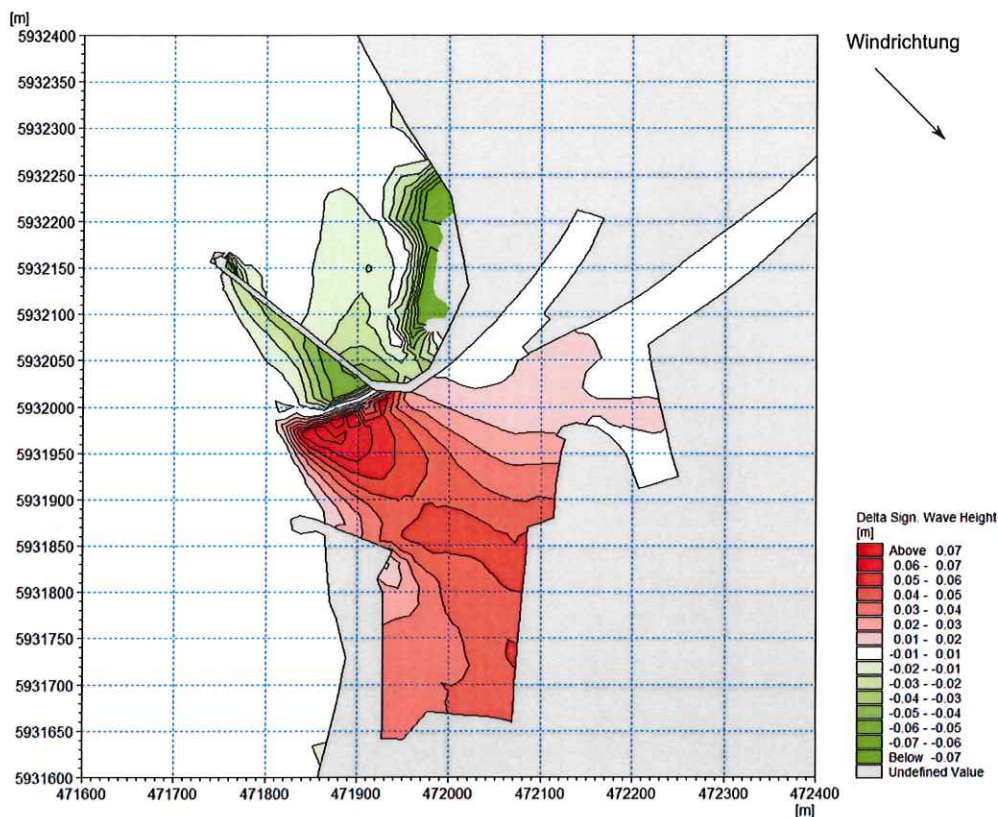


Abbildung 26: Differenz der mittleren Wellenhöhen im Bereich des Fischereivorhafens bei Windstärke 10,0 m/s und Wind aus NW (Planzustand 2 – Istzustand)

7.4 Überschreitungshäufigkeiten der berechneten Wellenhöhenänderungen

Anhand der in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Statistik der Windgeschwindigkeiten können Überschreitungshäufigkeiten für einzelne Windstärken ermittelt werden. Wie bereits in beschrieben wird im Folgenden der Auswertungszeitraum von 2010 bis 2019 verwendet.

In Tabelle 9 ist für Windereignisse aus NW und die Windstärkenintervalle 5,0 m/s bis 7,5 m/s, 7,5 m/s bis 10 m/s und Windstärken größer 10 m/s die Häufigkeit der Ereignisse in Tagen pro Jahr angegeben. Für die Windstärkenintervalle ist jeweils die berechnete mittlere und maximale Wellenhöhe im Istzustand angegeben sowie die mittlere und maximale Wellenhöhenänderung im Planzustand 2 gegenüber dem Istzustand. Die angegebenen Werte beziehen sich jeweils auf den Punkt mit

den größten Wellenhöhenänderungen (im mittleren Bereich des Fischereivorhafens). Im restlichen Hafenbereich stellen sich geringere Wellenhöhenänderungen ein (vgl. Abbildung 21, Abbildung 22, Abbildung 25 und Abbildung 26).

Die Betrachtung des Einflusses von Starkwindereignissen (mit Windstärken größer 10 m/s) auf die Wellenhöhen im Fischereivorhafen ist nicht untersucht worden. Für diesen Bereich können somit nur bedingt Aussagen getroffen werden. Die mittleren und maximalen Wellenhöhen und Wellenhöhenänderungen sind für Windstärken größer 10 m/s in jedem Fall größer als die für das Windstärkenintervall von 7,5 m/s bis 10,0 m/s berechneten.

Tabelle 9: mittlere und maximale Wellenhöhen im Istzustand und Wellenhöhenänderungen im Planzustand 2 bei Windereignissen aus NW

Windstärke	Häufigkeit	mittlere Wellenhöhe Istzustand	maximale Wellenhöhe Istzustand	mittlere Wellenhöhenänderung im Planzustand 2	maximale Wellenhöhenänderung im Planzustand 2
in m/s	in Tagen pro Jahr	in m	in m	in cm	in cm
5,0 - 7,5	13,3	0,07	0,19	4,5	13,0
7,5 - 10	11,4	0,09	0,27	5,5	15,6
>10	10,7	>0,09	>0,27	>5,5	>15,6

8 Zusammenfassung und Fazit

Die Vorzugsvariante des Gutachtens zum Sedimenttransport (Planzustand 2, vgl. /1/) führt zu veränderten Randbedingungen für die Ausbreitung von Wellen im Fischereivorhafen. Für mittelstarke Windereignisse sind die Veränderungen der Wellenhöhen im Hafenbereich untersucht worden. Hierbei sind die Windrichtungen aus NW und SW untersucht worden, da sich bei diesen Windrichtungen die größten Fetchlängen einstellen.

Das Modell ist anhand von Wellenmessdaten aus dem Zeitraum von Februar 1997 bis Ende April 1998 kalibriert worden und ist mit Ergebnissen eines weiteren Berechnungsmodells weiter plausibilisiert worden. Die Berechnungsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten und mit den Ergebnissen des SWAN-Berechnungsmodells.

Anhand von Messdaten zu Windgeschwindigkeit und -richtung an der Station Bremerhaven sind Berechnungsszenarien für die Ermittlung von maximalen Wellenhöhen ermittelt worden. Auf Grundlage der Windmessungen sind zudem Überschreitungswahrscheinlichkeiten einzelner Windereignisse ermittelt worden.

Mit dem kalibrierten Berechnungsmodell sind bei Tidehochwasserständen maximale Wellenhöhen für Windgeschwindigkeiten von 7,5 m/s und 10,0 m/s für den Istzustand und den Planzustand 2 ermittelt worden. Durch Differenzenbildung der Ergebnisse aus Istzustand und Planzustand 2 sind maximale Wellenhöhenänderungen für die Szenarien berechnet worden. Für Windstärken von 7,5 m/s ergeben sich bei Windereignissen aus NW maximale Wellenhöhenänderungen von +13,0 cm und für Windstärken von 10,0 m/s +15,6 cm. Für Windereignisse aus SW zeigen sich keine Veränderungen der Wellenhöhen im Bereich des Vorhafens zur Doppelschleuse. Durch Reflexion an der Nordmole in Richtung Weser ergeben sich um bis zu 6 cm höhere Wellen im Bereich der Hafeneinfahrt vor den Molen.

Der Einfluss von mittleren Wasserständen und nicht voll ausgeprägten Windfeldern auf die Wellenhöhen ist anhand von weiteren Modellrechnungen und statistischen Methoden berücksichtigt worden. Mit Hilfe von Reduktionsfaktoren sind mittlere Wellenhöhen berechnet worden. Anhand dieser Ergebnisse lassen sich Aussagen über die Häufigkeit der auftretenden mittleren Wellenhöhen treffen.

Zusammenfassend zeigt sich für Windereignisse aus NW eine Zunahme der Wellenhöhen im Bereich des Fischereivorhafens. Für das Windstärkenintervall von 5,0 m/s bis 7,5 m/s welches statistisch an 13,3 Tagen im Jahr auftritt zeigt sich eine Erhöhung der mittleren Wellenhöhen von +4,5 cm im mittleren Bereich des Vorhafens. In den restlichen Bereichen des Hafens zeigen sich geringere Änderungen. Bei Tidehochwasser und voll ausgeprägten Windverhältnissen können sich Wellenhöhenänderungen von bis zu +13,0 cm einstellen.

Für das Windstärkeintervall von 7,5 m/s bis 10,0 m/s bei Windrichtung NW welches statistisch an 11,4 Tagen im Jahr auftritt, zeigt sich eine Erhöhung der mittleren Wellenhöhen von +5,5 cm im mittleren Bereich des Vorhafens. In den restlichen Bereichen des Hafens zeigen sich geringere Änderungen. Bei Tidehochwasser und voll ausgeprägten Windverhältnissen können sich Wellenhöhenänderungen von bis zu +15,6 cm einstellen.

Statistisch treten an 10,7 Tagen im Jahr Windereignisse mit Wind aus NW mit Windstärken größer 10,0 m/s auf. Diese Ereignisse sind im Rahmen der Untersuchung nicht betrachtet worden, die Wellenhöhen und Wellenhöhenänderungen liegen für diese Ereignisse aber in jeden Fall über den Wellenhöhen und Wellenhöhenänderungen des Windstärkeintervalls von 7,5 m/s bis 10,0 m/s.