

# Reduzierung der Wellenunruhe im Hafen Schlüttsiel



## VORPLANUNG

Gemeinde Ockholm  
Der Bürgermeister

25842 Ockholm  
matthiasfeddersen@gmail.com  
0175-5836010



Kofinanziert von der  
Europäischen Union



Schleswig-Holstein  
Landesamt für Landwirtschaft  
und nachhaltige Landentwicklung

Bearbeitet:



Ingenieurbüro Mohn GmbH

Beratende Ingenieure

Industriestraße 36

25813 Husum

www.ing-mohn.de

Telefon: 0 48 41 / 83 61 - 0

Telefax: 0 48 41 / 83 61 - 22

e-mail: husum@ing-mohn.de

Aufgestellt: Husum, den 17.06.2025

25-323

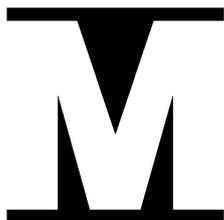
# **Gemeinde Ockholm**

## **Reduzierung der Wellenunruhe im Hafen Schlüttsiel**

### **VORPLANUNG**

**- Erläuterungsbericht -**

Bearbeitet:



**Ingenieurbüro Mohn GmbH**

Beratende Ingenieure

Industriestraße 36 Telefon: 0 48 41 / 83 61 - 0

25813 Husum

[www.ing-mohn.de](http://www.ing-mohn.de)

e-mail: [husum@ing-mohn.de](mailto:husum@ing-mohn.de)

## **1. VERANLASSUNG**

Die Gemeinde Ockholm beabsichtigt, die Wellenunruhe im Hafen Schlüttsiel durch mögliche bauliche Maßnahmen deutlich zu verringern.

Derzeitig ist die Anlegestelle bzw. der Hafen Schlüttsiel insbesondere bei westlichen Windlagen nur bedingt gegen Wellenangriff geschützt, so dass sich vor allem für kleinere Schiffe und bei höheren Wasserständen die vorhandene Wellenunruhe im Hafen negativ bemerkbar macht.

Die Ingenieurbüro Mohn GmbH hat bereits im Jahr 2005 für das damalige Amt Pellworm (Vertrag vom 17.03.2005/20.06.2005) eine Vorplanung zur Verbesserung der Wellenunruhe im Hafen Schlüttsiel zu erstellt.

Nunmehr soll diese Vorplanung überarbeitet und auf den neuesten Stand gebracht werden. Dabei ist insbesondere die Kostenschätzung zu aktualisieren.

## **2. GRUNDLAGEN**

### **2.1 Lage des Gebiets**

Die Lage des Hafens Schlüttsiel ist der Übersichtskarte (Blatt 1.1 der Planunterlagen) zu entnehmen.

Der Hafen liegt vor dem Schleusenauslauf der Schleuse Schlüttsiel westlich des Bongsieler Speicherbeckens vor dem Hauke-Haien-Koog. Über die Nordsee und den vorbeiführenden Priel ist die Anlegestelle an alle wichtigen Küstengewässer und Binnenwasserstraßen angebunden.

Der Anschluss an das Festland ist durch das übergeordnete Straßennetz Bundesstraße Nr. 5 Husum - Niebüll und die Landesstraße 191 von Bredstedt nach Dagebüll gegeben.

### **2.2 Wasserstände**

Folgende Wasserstände wurden gemäß dem Gewässerkundlichen Jahrbuch für den Beobachtungszeitraum 2012/2021 am Pegel Schlüttsiel (AP) aufgezeichnet:

HHThw	=	NHN + 4,80 m (26.01.1990)
HHThw <sub>(2012-2021)</sub>	=	NHN + 4,19 m (06.12.2013)
MHThw	=	NHN + 3,55 m
MHThw <sub>Sommer</sub>	=	NHN + 2,88 m
MThw	=	NHN + 1,62 m
MTnw	=	NHN - 1,58 m
NNTnw	=	NHN - 3,73 m (14.02.1994)

### **2.3 Wind**

Für die Station Hooge liegt eine Windstatistik für den Zeitraum 1.1.1990 bis 31.12.2004 vor (Tabelle 1).

<b>Station Hooge</b>														
<b>Windgeschwindigkeit (auf 10m über Gelände reduziert)</b>														
<b>Auswertezeitraum: von 01.01.1990 bis 31.12.2004, Datenbasis: Stundenmittel</b>														
Richtungssektoren			Geschwindigkeitsklassen										Summe	Anteil
Mitte	min	max	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 25	25 - 30	30 - 35	35 - 40	40 - 45	45 - 50		
°	°	°	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	h	%
360°	348,75°	371,25°	2.789	2.888	773	61	7	0	0	0	0	0	6.518	5,30%
22,5°	11,25°	33,75°	1.456	1.793	306	14	1	0	0	0	0	0	3.570	2,91%
45°	33,75°	56,25°	1.621	1.634	291	15	0	0	0	0	0	0	3.561	2,90%
67,5°	56,25°	78,75°	1.682	2.169	419	17	0	0	0	0	0	0	4.287	3,49%
90°	78,75°	101,25°	3.024	6.527	2.012	68	0	0	0	0	0	0	11.631	9,47%
112,5°	101,25°	123,75°	2.552	4.114	744	3	0	0	0	0	0	0	7.413	6,03%
135°	123,75°	146,25°	1.921	2.969	475	19	0	0	0	0	0	0	5.384	4,38%
157,5°	146,25°	186,75°	1.552	2.702	807	73	2	0	0	0	0	0	5.136	4,18%
180°	186,75°	191,25°	2.288	4.081	1.812	276	11	0	0	0	0	0	8.468	6,89%
202,5°	191,25°	213,75°	1.497	3.720	2.145	422	33	0	0	0	0	0	7.817	6,36%
225°	213,75°	236,25°	1.464	4.453	3.737	732	60	3	0	0	0	0	10.449	8,50%
247,5°	236,25°	258,75°	1.786	5.125	2.868	508	42	4	0	0	0	0	10.333	8,41%
270°	258,75°	281,25°	2.790	6.784	3.777	752	77	16	0	0	0	0	14.196	11,55%
292,5°	281,25°	303,75°	1.839	4.135	2.367	391	49	0	0	0	0	0	8.781	7,15%
315°	303,75°	326,25°	1.843	4.050	2.142	338	19	0	0	0	0	0	8.392	6,83%
337,5°	326,25°	348,75°	1.791	3.400	1.515	232	10	0	0	0	0	0	6.948	5,65%
<b>Summe in Stunden</b>			<b>31.895</b>	<b>60.544</b>	<b>26.190</b>	<b>3.921</b>	<b>311</b>	<b>23</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>122.884</b>	<b>100,00%</b>
<b>relativer Anteil [%]</b>			<b>25,96</b>	<b>49,27</b>	<b>21,31</b>	<b>3,19</b>	<b>0,25</b>	<b>0,02</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>		

Tabelle 1: Windstatistik Station Hooge 1990 – 2004 (Quelle: ALR Husum)

Wie zu erwarten war, treten die westlichen Winde am häufigsten auf. Wind aus dem Richtungssektor 270° (Sektor von 258,75° bis 281,25°) tritt mit 11,6% am häufigsten auf. Die Sektoren 202,5° bis 270° haben insgesamt einen Anteil von 35%, während die Sektoren 112,5° bis 180° lediglich einen Anteil von 21,5% haben. Der Anteil des Windes des Sektors 90° (Ost) ist mit 9,5° ebenfalls relativ groß, zu beachten ist hierbei allerdings, dass der Anteil mit geringen Windstärken groß ist.

Um ein anschauliches Bild der Windstatistik wiederzugeben, wurden aus der Windstatistik Windverteilungsdiagramme erstellt (Abb. 1 bis 3). Abbildung 1 zeigt den prozentualen Anteil der Windrichtungen über den gesamten Messzeitraum. In den Abbildungen 2 und 3 sind die Winddauern in Stunden für die Geschwindigkeitsklassen 10 bis 15 m/s bzw. 15 bis 20 m/s dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die vorherrschenden Windrichtungen insbesondere bei Windstärken oberhalb von 15 m/s im Bereich zwischen Südwest und West liegen.

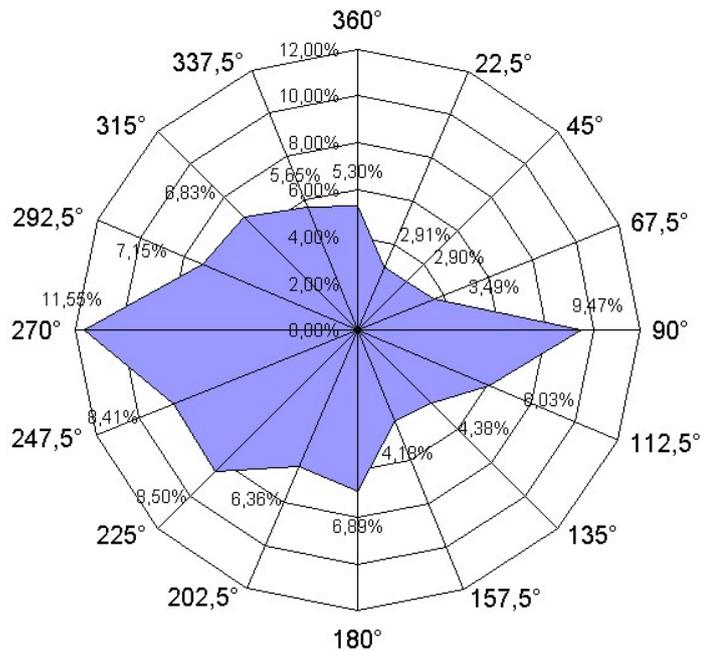


Abb. 1: Windverteilungsdigramm, prozentualer Anteil der Windrichtungen

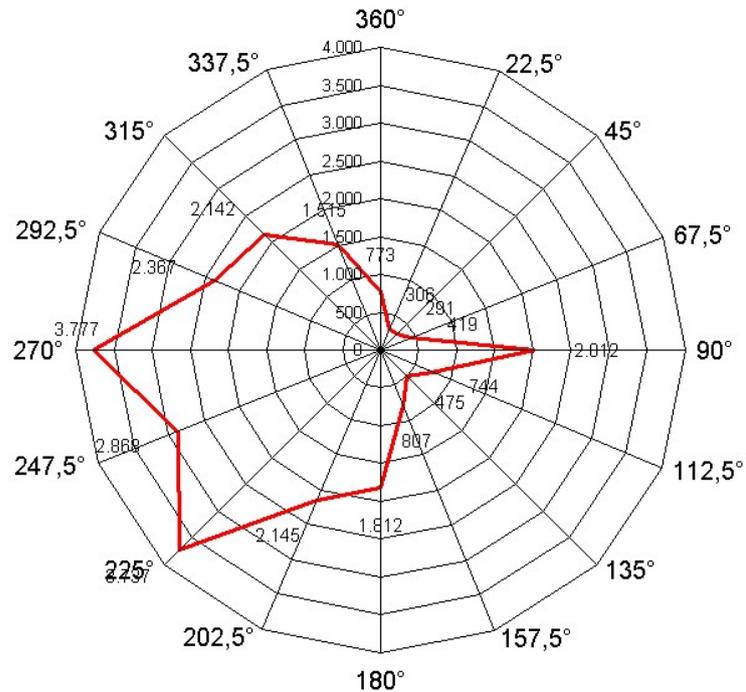


Abb. 2: Windverteilungsdigramm, Winddauer in Stunden  
Geschwindigkeitsklasse 10 bis 15 m/s

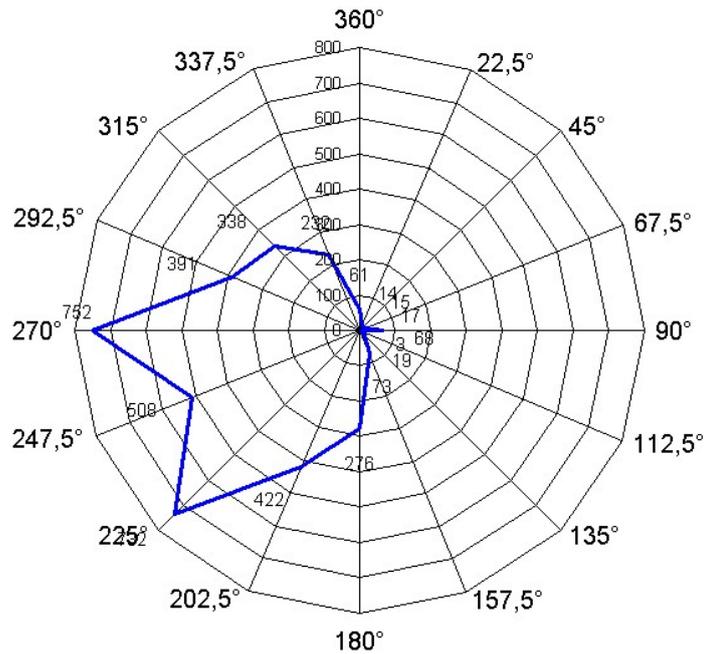


Abb. 3: Windverteilungsdiagramm, Winddauer in Stunden  
Geschwindigkeitsklasse 15 bis 20 m/s

## 2.4 Seegang

Die Ermittlung der vorhandenen Wellenhöhen vor der Hafeneinfahrt wurde mit Hilfe des Seegangsatlases der deutschen Nordseeküste des Franzius-Instituts der Universität Hannover durchgeführt (s. Abb. 4 auf der folgenden Seite). Im betrachteten Seegebiet können somit für unterschiedliche Wassertiefen und Windgeschwindigkeiten die maßgeblichen Seegangs- bzw. Wellenparameter, d. h. die Wellenhöhen und –perioden bestimmt werden.

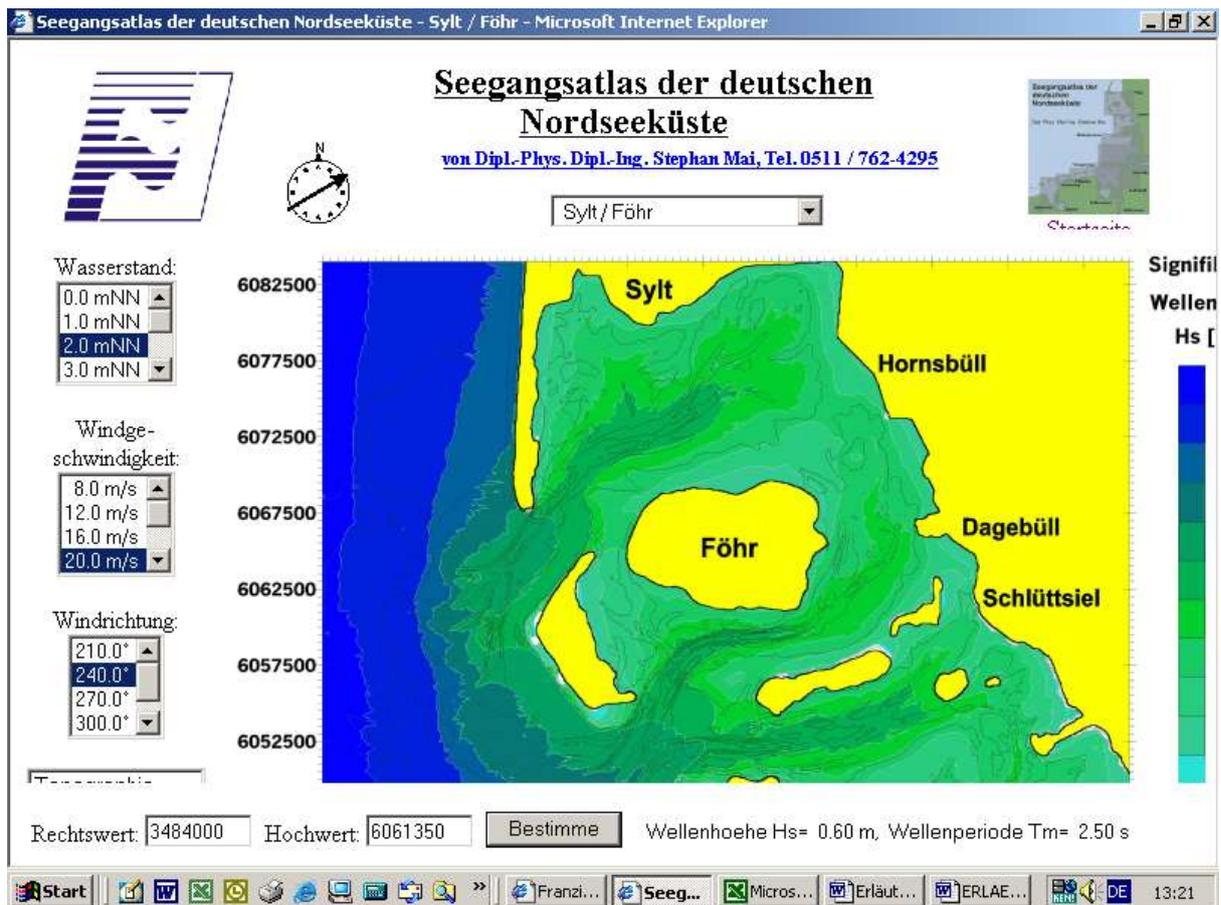


Abb. 4: Seegangsatlas der deutschen Nordseeküste (Leibnitz Universität Hannover, Dr. Stefan Mai, Ludwig-Franzius-Institut)

Für den Bereich vor dem Hafen Schlüttsiel können mit Hilfe des Seegangsatlasses die Seegangparameter für Wasserstände von  $\text{NHN} \pm 0,00 \text{ m}$  bis  $\text{NHN} + 7,00 \text{ m}$  und für Windgeschwindigkeiten von  $8 \text{ m/s}$  bis  $32 \text{ m/s}$  ermittelt werden. Die Bandbreite der betrachteten Wind- bzw. Wellenrichtungen reicht dabei von  $210^\circ$  bis  $330^\circ$ , d. h. die Windrichtungen, die zu den höchsten Wellenhöhen führen.

Im folgenden Bild sind beispielhaft die ermittelten Wellenhöhen im Einfahrtbereich des Hafens für einen Wasserstand von  $\text{NHN} + 2,00 \text{ m}$  dargestellt.

**Seegang vor der Hafeneinfahrt (Wasserstand: NN + 2,00 m)**  
Rechtswert: 3484000, Hochwert: 6061350

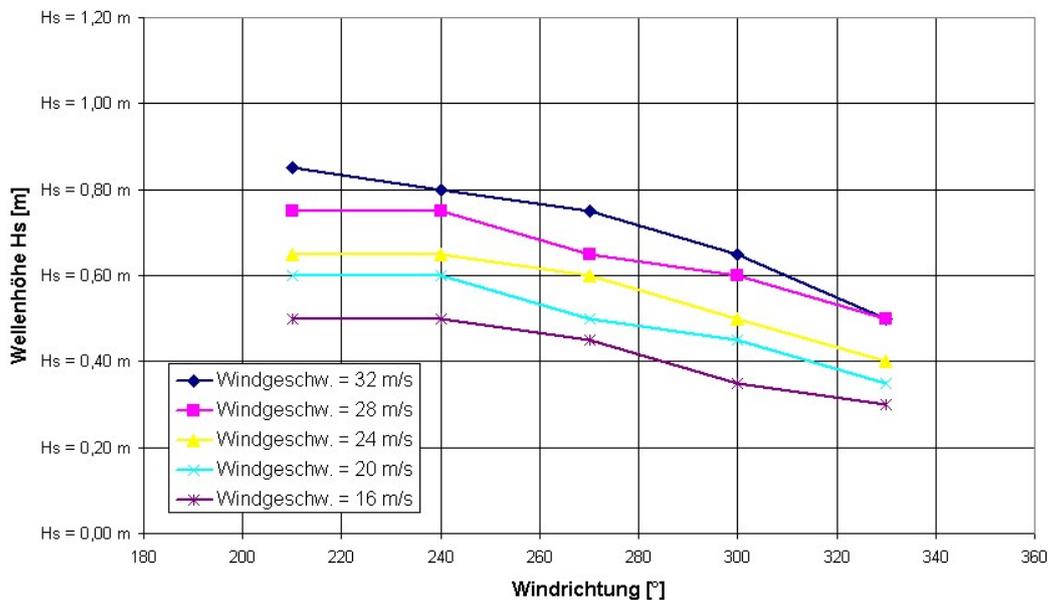


Abb. 5: Wellenhöhen vor der Hafeneinfahrt des Hafens Schlüttsiel

Es ist ersichtlich, dass die größten Wellenhöhen vor dem Hafen Schlüttsiel durch Wetterlagen mit Winden aus den Richtungen 210° bis 240° entstehen. Dies ist dadurch bedingt, dass die Einwirklänge des Windes (Fetchlänge) für diese Windrichtungen am größten ist (vgl. Blatt-Nr. 1.2 der Planunterlagen (Seekarte)), da sich das Wellenfeld zwischen Langeness/Oland und Gröde ungehindert aufbauen kann. Für die Windrichtung 225° ergibt sich beispielsweise eine anzusetzende Fetchlänge von rd. 12,5 km.

Gerade für diese Windrichtung ist der Hafen nicht ausreichend geschützt, so dass die Wellen in den Hafen einlaufen können.

## 2.5 Wellenhöhen im Hafen

Die einlaufenden Wellen werden teilweise an den Leitdämmen gebeugt (Diffraktion) und laufen mit reduzierter Höhe ins Hafennere ein. Auf der anderen Seite können sich die Wellenhöhen durch Reflexionen an den Ufermauern verstärken und somit die Wellenunruhe im Hafen erhöhen. Im Folgenden werden die Einflüsse kurz allgemein erläutert. Im Einzelnen

werden die jeweiligen maßgebenden Bedingungen bei der Variantenuntersuchung in Abschnitt 4 dargestellt.

### **2.5.1 Diffraktion**

Mit Diffraktion (Streuung) bezeichnet man die Ausbreitung von Wellen hinter Bauwerken und Landvorsprüngen in Bereiche, die nicht direkt dem Seegang ausgesetzt sind (Abb. 6 und 7).



Abb. 6: Diffraktion hinter einem Wellenbrecher (aus: Shore Protektion Manual 1984)

Durch den Faktor Bauwerk wird das Wellenfeld verändert. Bezogen auf die Anlaufrichtung der Wellen gibt es einen Bereich hinter dem Bauwerk in den die Wellen nicht direkt, sondern durch "Energieausbreitung in Kammrichtung" einlaufen (Diffraktionsbereich), während an der Vorderseite des Bauwerks die Wellen entsprechend dem Reflexionsgrad der Bauwerksvorderseite reflektiert werden.

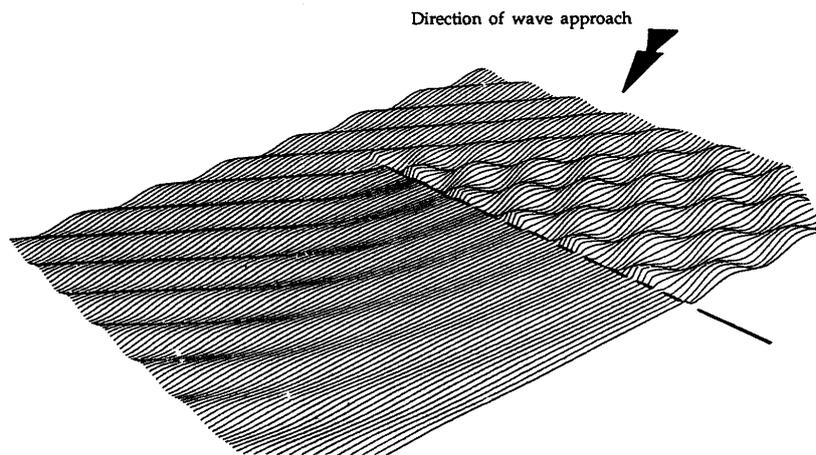


Abb. 7: Diffraction im (theoretischen) Modell

Diffraction in natürlichem Seegang kann durch Überlagerung nach dem Superpositionsprinzip berechnet werden. Dazu wird ein Richtungsspektrum in eine ausreichend große Zahl von linearen Wellen unterschiedlicher Frequenzen, Richtungen und Amplituden zerlegt. Für die vorliegenden Untersuchungen wurden die Berechnungen, wie sie im SHORE PROTECTION MANUAL veröffentlicht sind, zugrunde gelegt. Dabei wurden Diagramme für halbumendliche Wellenbrecher und für Wellenbrecheröffnungen mit verschiedenen Öffnungsweiten (Öffnungsbreite/Wellenlänge ( $B/L$ ) = 1, 2, 4 und 8) verwendet.

### **2.5.2 Reflexion**

Reflexion von Wellen findet statt, wenn ein Wellenfeld auf ein Hindernis trifft und damit der freie Schwingungsvorgang in den Wellen gestört wird. Ein typischer extremer Fall von Reflexion tritt an einer starren senkrechten Wand auf. Theoretisch findet eine Totalreflexion statt, d.h. dass der gesamte Schwingungsvorgang an der Reflexionsstelle ungedämpft eine Richtungsänderung nach dem Gesetz Einfallswinkel = Ausfallswinkel erfährt. Dem einlaufenden Wellenfeld wird das reflektierte Wellenfeld überlagert. Bei senkrechtem Wellenangriff entsteht ein stehendes Wellensystem (Clapotis), bei schrägem Wellenangriff eine Kreuzsee. Die Überlagerung (linear) führt bei Totalreflexion an charakteristischen Stellen zur Verdoppelung der Wasserspiegelauslenkungen (Schwingungsbäuche), an anderen Stellen zur Auslöschung (Schwingungsknoten).

In der vorliegenden Untersuchung wurden die im Hafen auftretenden Reflexionen mit Hilfe des geometrischen Spiegelungsverfahrens ermittelt. Zusätzlich wurden im Einzelnen nicht quantifizierbare Einflüsse aus Reflexionen an Bauwerkskanten etc. sinnvoll abgeschätzt.

An geneigten, porösen oder rauen Bauwerken tritt Teilreflexion auf, weil ein Teil der Wellenenergie durch Wellenbrechen, Reibung, Turbulenz etc. abgegeben wird und für den Schwingungsvorgang nicht mehr zur Verfügung steht. Der Reflexionsgrad  $C_r$  wird als Verhältnis von reflektierter Wellenhöhe  $H_r$  zur anlaufenden Wellenhöhe  $H_i$  angegeben.

### **2.5.3 Reflexion bei schrägem Wellenangriff (MACH-Reflexion)**

An den Grenzen von reflektierenden Bauwerken werden wie bei der Diffraktion Streuungswellen erzeugt. Die Überlagerung von einfallenden und reflektierten Wellen mit den Streuungswellenfeldern führt insbesondere an der Reflexionsstelle (Bauwerksaußenseite) zu Wellenhöhen, die über den Wert  $(1+C_r) \cdot H_i$  anwachsen. Bei kleinen Winkeln zwischen Wellenanlaufrichtung und Richtung der Bauwerksvorderseite (etwa im Bereich von  $10^\circ$  bis  $40^\circ$ ) wird dieser Effekt besonders deutlich.

Der Anstieg der Wellenhöhen auf Werte von mehr als dem Doppelten der Höhe der einlaufenden Wellen (bei Totalreflexion) wird auch heute noch als MACH-Reflexion bezeichnet, obwohl dieses Verhalten durch die lineare Diffraktionstheorie erklärt werden kann.

Abb. 8 zeigt die Wellenkammsysteme die zur MACH-Reflexion führen, Abb. 9 die relativen Wellenhöhen in Schnitten senkrecht zur Wandachse und Abb. 10 den Wellenhöhenverlauf an der Bauwerksvorderseite bei unterschiedlichen Wellenanlaufrichtungen (jeweils aus: Daemrich: Bauwerksbedingte Einflüsse, Vorlesungsumdruck 2004)

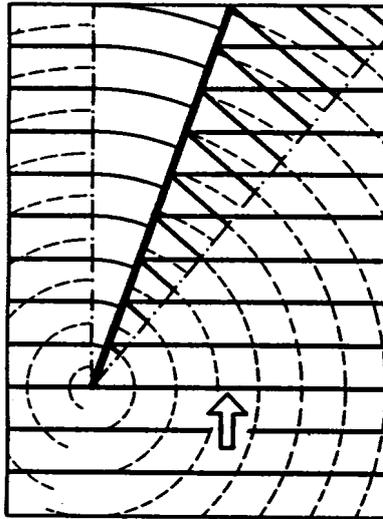


Abb. 8: Geometrische Randbedingungen und Wellenfelder (Beispiel: Wellenanlauf-  
richtung  $20^\circ$ )

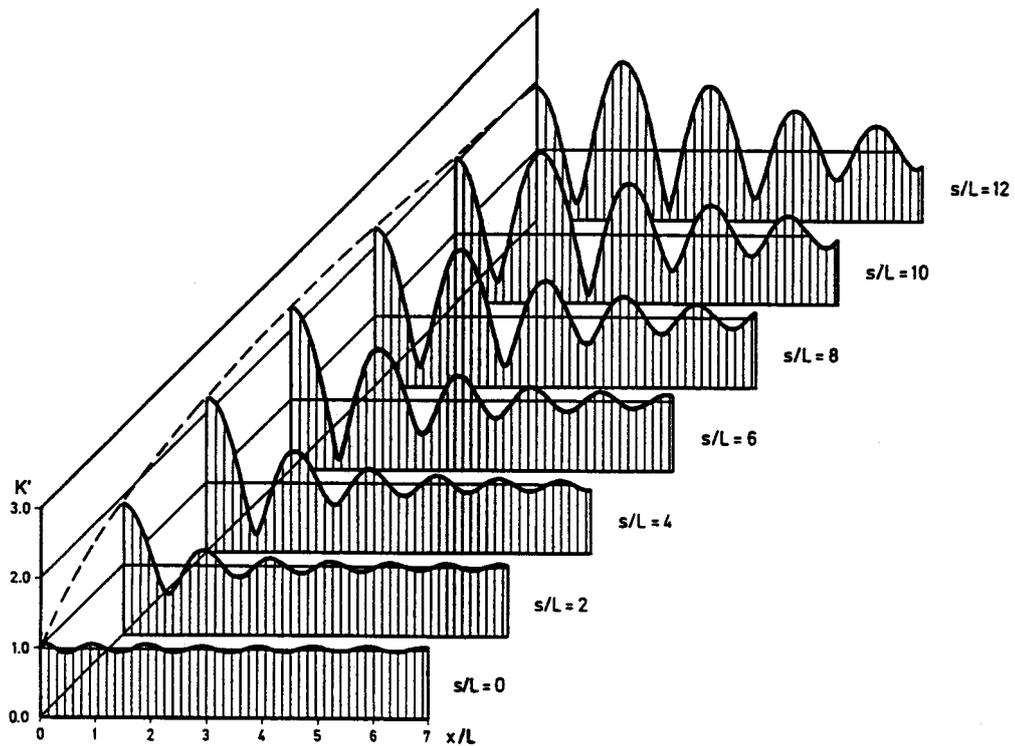


Abb. 9: Wellenhöhenverteilung im Reflexionsbereich (Beispiel Wellenanlauf-  
richtung  $20^\circ$ )

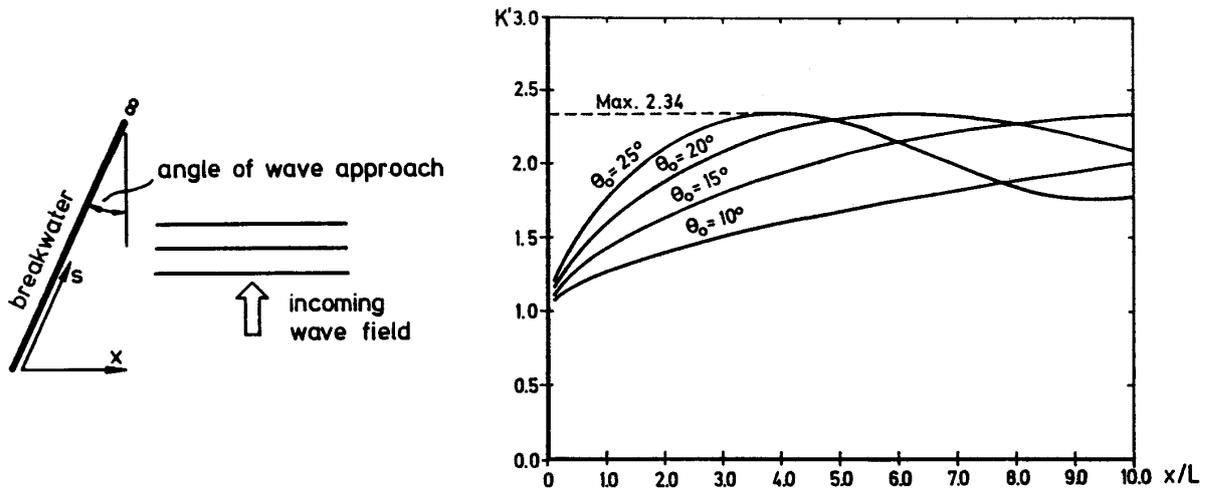


Abb. 10: Wellenhöhen an der Bauwerksvorderseite bei verschiedenen Anlaufrichtungen

### 2.5.4 Transmission

An teildurchlässigen Bauwerken (z.B. geschütteten und massiven Wellenbrechern mit niedrig liegender Krone, Tauchwandkonstruktionen, schwimmenden Wellenbrechern) wird ein Teil der Wellenenergie transmittiert, d.h. in den „geschützten Bereich“ weitergeleitet. Abbildung 11 zeigt einen Ansatz zur Ermittlung der Wellenhöhe hinter dem teildurchlässigen Bauwerk.

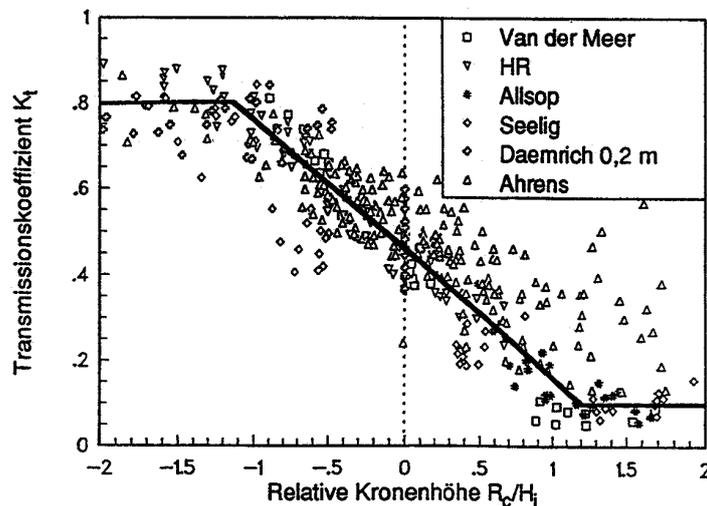


Abb. 11: Vereinfachender Ansatz im Vergleich zu Versuchsergebnissen

## **2.6 Baugrund**

Der Baugrund wurde im Zuge der Instandsetzung der Nordmole 1992 erkundet und im geotechnischen Bericht des Sachverständigen Dr.-Ing. Klaus David, Kiel, vom 28.08.1992 beschrieben.

Es stehen danach im Bereich der Hafenmolen zunächst relativ mächtige Auffüllungen an, die auf der Südseite mächtiger sind als auf der Nordseite. Die Auffüllungen bestehen aus mittelsandigen Grobsanden, Fein- bis Grobsanden und auch kiesigen Fein- bis Grobsanden. Die Mächtigkeiten der Auffüllungen wurden festgestellt zwischen etwa 0,60 m bis zu 3,50 m unter jeweiligem Ansatzpunkt (gemittelt bis etwa NHN - 0,50 m).

Unterhalb dieser Auffüllschichten folgen vorwiegend schwach mittelsandige, schwach schluffige Feinsande mit einzelnen dünnen Kleilagen und innerhalb dieser Sande sind feinsandige, tonige Schluffe mit organischen Beimengungen eingelagert, auch sind innerhalb dieser Schluffe teilweise Pflanzenreste angetroffen worden. Bei diesen bindigen Böden handelt es sich um weichplastische Kleischichten. Die Mächtigkeiten der Kleischichten schwanken zwischen wenigen Dezimetern bis hin zu maximal etwa 3,60 m. Vereinzelt werden die Kleischichten von dünnen Torfschichten durchzogen und es sind auch stark sandige, stark zersetzte Torfschichten unterhalb von Kleischichten festgestellt worden.

Im Übrigen sind die schwach schluffigen Feinsande seinerzeit bis in Tiefen von rd. 20,0 m unter Gelände erkundet worden. Die schluffigen Feinsande sind in unregelmäßigen Tiefen von dünnen bis sehr dünnen Schlufflagen durchzogen.

### **3. BESTAND UND NUTZUNG**

#### **3.1 Beschreibung des Bestandes**

Im Zuge des im Jahr 1959 errichteten Sielauslaufs der Deichschleuse bzw. des Sperrwerks „Schlüttsiel“ wurde seeseitig eine Anlegestelle errichtet. Da sich bereits in den 80er-Jahren zunehmend Schäden an den Bauwerken zeigten, die eine Instandsetzung erforderlich werden ließen, wurde 1994 in einem ersten Bauabschnitt die Nordkaje zurückverlegt und verlängert. Gleichzeitig wurden die vorhandenen Leitdämme erhöht. In einem zweiten Bauabschnitt wurde im Jahr 2003 die Südkaje durch eine Vorrammung instandgesetzt und die Hafensfläche im westlichen Bereich erhöht, so dass in diesem Bereich eine einheitliche Kaihöhe von NHN + 2,50 m geschaffen werden konnte.

Der Hafen Schlüttsiel lässt sich in seiner derzeitigen Gestalt wie folgt beschreiben (siehe auch Blatt-Nr. 2.1 der Planunterlagen, Lageplan Bestand):

Vor dem Sielauslauf liegt der eigentliche Hafenbereich, der sich in eine etwas zurückgesetzte, rd. 150 m lange Nordkaje und eine etwas kürzere Südkaje aufteilt. Die Uferbefestigungen bestehen aus rückverankerten Spundwandkonstruktionen mit senkrechten Wänden, eine Bauweise die besonders anfällig hinsichtlich Reflexionen innerhalb des Hafens ist. Die Oberkante der Kaimauern liegt auf einer Höhe von NHN + 2,50 m. Auf der Südseite ist die Mole im Westen auf rd. NHN + 0,50 m abgesenkt, so dass oberhalb von MThw ein Auslaufen der Wellen auf der Böschung ermöglicht wird. Im anschließenden Bereich der Südkaje befindet sich die Fährbrücke für den Fährverkehr zu den Halligen. Die Südkaje kann also nicht durchgehende Uferwand bezeichnet werden, sondern die Kaimauer ist, wie oben aufgeführt, in Teilabschnitte gegliedert.

Seeseitig der senkrechten Uferbefestigungen schließen sich sowohl auf der Nordseite als auch auf der Südseite zurückgesetzte Schüttsteinmolen mit einer Länge von jeweils rd. 120 m an, die im Einfahrtbereich in Richtung Hafeneinfahrt abknicken und eine Durchfahrtsbreite von rd. 60 m im Bereich des Böschungsfußes freilassen. Die Oberkante dieser Schüttsteinmolen aus NA-Steinen der Größenklasse III-IV liegt planmäßig ebenfalls bei NHN + 2,50 m. Eine örtliche Überprüfung der Höhen dieser Leitdämme ergab Höhen zwischen rd. NHN + 2,40 und NHN + 2,70 m (OK Steindamm) für den südlichen Leitdamm und Höhen zwischen rd. NHN + 2,50 und NHN + 2,60 m für den nördlichen Leitdamm.

Der Hafen ist etwa in Ost-West Richtung gelegen, die genaue Ausrichtung ist 252°/108°. Die planmäßige Hafensohle liegt zwischen NHN – 3,50 und NHN – 4,00 m.

Die Zuwegung zum Hafen von der Landesstraße erfolgt aus von Süden her über eine ausgebaute Deichüberfahrt.

### **3.1 Nutzung**

Die Anlegestelle Schlüttsiel dient zurzeit kleineren Schiffen als Anlege- und Umschlagplatz. Von hier aus erfolgt unter anderem die Versorgung der Halligen Hooge, Langeneß, Oland und Gröde sowie der Insel Amrum mit Baumaterialien und Heizöl.

Desgleichen wird der Ausflugsverkehr in das nordfriesische Wattenmeer und zu den Halligen von der Anlegestelle aus mit kleineren Fahrgastschiffen abgewickelt. Die Nordkaje steht außerdem dem Amt für ländliche Räume Husum als Massengutumschlagplatz für Küstenschutzbaumaterialien zur Verfügung.

Westlich im Anschluss an die Nordkaje befinden sich rd. 25 Liegeplätze des Yacht-Clubs Dagebüll - Schlüttsiel. Die Zuwegung erfolgt über die Sielüberfahrt und weiter über die nördliche Kaifläche.

Ein regelmäßiger Fährverkehr zu den Halligen Hooge und Langeneß wird durch die Wyker Dampfschiffs-Reederei Föhr-Amrum GmbH mit dem Fährschiff „Hilligenlei“ über einen südlichen Fähranleger abgewickelt.

## **4. VARIANTEN ZUR VERRINGERUNG DER WELLENUNRUHE IM HAFEN**

### **4.1 Allgemeines**

Zur Verringerung der Wellenunruhe ist der Hafen besser als derzeit vorhanden gegen Wellenangriff abzuschirmen. Hier ist insbesondere eine Abschirmung gegenüber Wellen aus SSW erforderlich, da aus dieser Richtung die größte Wellenbelastung auftritt (vgl. Abb. 2). Es sollte aber auch Seegang aus nordwestlicher Richtung betrachtet werden, da auch für diesen Fall in verschiedenen Hafengebieten eine nicht unerhebliche Wellenunruhe entsteht.

Im Folgenden wird für den Bestand sowie für 4 Varianten eine ausführliche Ermittlung der Wellenhöhen an 4 betrachteten Stellen vorgenommen. Dabei wurden für die einlaufenden Wellen 5 unterschiedliche Wellenrichtungen betrachtet (210°, 240°, 252°, 270° und 300°). Die kennzeichnenden Wellenhöhen für die jeweiligen Windrichtungen, die den mittleren Wellenrichtungen entsprechen, wurden dabei mit Hilfe des Seegangsatlasses ermittelt.

Für die Vergleichsrechnungen wurde eine Windgeschwindigkeit von 20 m/s und ein Wasserstand von NHN + 2,00 m zugrunde gelegt. Es werden also nicht die maximalen Wellenhöhen errechnet, wie sie im Sturmflutfall auftreten können, sondern die Wellenhöhen, die bei einem Sturm mit etwa Windstärke 8 und einem Wasserstand von rd. 50 cm über dem mittleren Tidehochwasser auftreten. Derartige Wellenhöhen können also durchaus auch im Sommer auftreten.

Für den Vergleich der unterschiedlichen Varianten ist dementsprechend der Betrag der Wellenhöhe von geringerer Bedeutung als die prozentuale Verminderung bzw. Erhöhung der örtlichen Wellenhöhe an der betrachteten Stelle. Die prozentuale Veränderung ist prinzipiell auch für niedrigere bzw. höhere Wellenhöhen gültig, für höhere Wellenhöhen gilt dies jedoch nur unter der Voraussetzung entsprechend hoher Schüttsteinböschungen, da sonst durch Teilüberspülung der Schüttsteinmolen andere Verhältnisse entstehen. Für die durchgeführten Berechnungen der Wellenhöhen im Hafen wurde davon ausgegangen, dass die Schüttsteinböschungen nicht oder nur geringfügig überspült werden.

Folgende Bereiche im Hafen wurden näher untersucht (siehe auch Lageplan, Blatt-Nr. 2.1 der Planunterlagen):

Stelle 1: Liegeplätze des Yacht-Clubs Dagebüll – Schlüttsiel im Schutze des nördlichen Leitdamms (Schüttsteinmole) im Anschluss an die Nordkaje.

Stelle 2: Nordkaje

Stelle 3: Südkaje

Stelle 4: Bereich Fähranleger

## 4.2 Nullvariante – Bestand



Abb.12: Luftbild Hafen Schlüttsiel - Bestand

Das Luftbild in Abbildung 12 zeigt die derzeitige Situation (ohne instandgesetzte Südkaje). Es ist der relativ gute Schutz des Hafens vor einlaufenden Wellen aus nördlichen und südlichen Richtungen erkennbar. Bei einem Wellenangriff aus westlichen Richtungen ist der Schutz durch die beiden vorhandenen Leitdämme nicht immer ausreichend. Die Wellen laufen in den Hafen ein und werden teilweise an den senkrechten Uferwänden im Hafenninneren reflektiert, so dass hier eine merkbare Wellenunruhe entsteht. Insbesondere bei Wind aus südwestlicher Richtung entstehen einerseits die größten Wellenhöhen vor dem Hafen, da sich das Wellenfeld zwischen Langeness/Oland und Gröde ungehindert aufbauen kann. Hinzu kommen die angesprochenen Reflexionen im Innenhafen.

Im Bereich der Nordkaje kommt es bei diesen Wellenrichtungen zu einer sog. Mach-Reflexion, d. h. die Wellenhöhen erhöhen sich aufgrund der Überlagerung von einlaufender und reflektierter Welle (vgl. Abschnitt 2.4.3). Diese Erscheinung ist insbesondere bei

Wellenanlafrichtungen von  $10^\circ$  bis  $40^\circ$  relativ zur Ufermauer ausgeprägt. Im vorliegenden Fall erhöht sich bei einer einlaufenden Welle aus  $210^\circ$ , die allerdings durch Diffraktion schon in ihrer Höhe reduzierte Welle um den Faktor 2,1.

In Anlage 3 sind die detaillierten Wellenhöhenberechnungen wiedergegeben. Für die zugrunde gelegten Ausgangswellen (Windgeschwindigkeit: 20 m/s) ergeben sich Wellenhöhen im Hafen von bis zu einem halben Meter bei Ausgangswellenhöhen (Wellenhöhen vor dem Hafen) von 60 cm (für die Wellenrichtungen  $210^\circ$  und  $240^\circ$ ) bis 45 cm (für Wellen aus  $300^\circ$ ). Das bedeutet, dass die Ausgangswellenhöhen teilweise nur geringfügig reduziert werden.

Die Tabelle 2 auf der folgenden Seite zeigt im Überblick das Ergebnis der Wellenhöhenberechnungen an den beschriebenen 4 Bereichen im Hafen für den Bestand.

<b>Bestand, maximale Wellenhöhen</b>	
Wind: 20 m/s, WSp: NHN + 2,00 m	
	max. Wellenhöhe aus Diffraktion, Reflexion und Transmission
	m
<b>Wellenangriffsrichtung 210°</b>	
Ausgangswellenhöhe: 0,60 m	
Stelle 1 (Yachtclub))	<b>0,51</b>
Stelle 2 (Nordkaje)	<b>0,45</b>
Stelle 3 (Südkaje)	<b>0,28</b>
Stelle 4 (Fähranleger)	<b>0,27</b>
<b>Wellenangriffsrichtung 240°</b>	
Ausgangswellenhöhe: 0,60 m	
Stelle 1	<b>0,46</b>
Stelle 2	<b>0,48</b>
Stelle 3	<b>0,42</b>
Stelle 4	<b>0,40</b>
<b>Wellenangriffsrichtung 252°</b>	
Ausgangswellenhöhe: 0,55 m	
Stelle 1	<b>0,35</b>
Stelle 2	<b>0,39</b>
Stelle 3	<b>0,37</b>
Stelle 4	<b>0,40</b>
<b>Wellenangriffsrichtung 270°</b>	
Ausgangswellenhöhe: 0,50 m	
Stelle 1	<b>0,30</b>
Stelle 2	<b>0,32</b>
Stelle 3	<b>0,41</b>
Stelle 4	<b>0,39</b>
<b>Wellenangriffsrichtung 300°</b>	
Ausgangswellenhöhe: 0,45 m	
Stelle 1	<b>0,17</b>
Stelle 2	<b>0,19</b>
Stelle 3	<b>0,22</b>
Stelle 4	<b>0,26</b>
<i>Mittelwert über alle Richtungen und an allen 4 Stellen:</i>	
	<b>0,35</b>

Tabelle 2: Bestand, signifikante Wellenhöhen im Hafen bei einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s und einem Wasserstand von NHN +2,00 m

#### **4.3 Variante 1 – Verlängerung des nördlichen und des südlichen Leitdammes durch neue Leitdammköpfe als Fangedämme**



Abb. 13: Luftbild Hafen Schlüttsiel – Variante 1 (schematisch)

Zur Verringerung der Wellenunruhe ist es notwendig, die Abschirmung des Hafengebiets gegen Wellen zu verbessern. Als Variante 1 ist vorgesehen, die Einfahrtsbreite zum Hafen deutlich zu reduzieren. Schematisch ist diese Variante in Abbildung 13 dargestellt; Vorentwurfszeichnungen finden sich als Blatt-Nr. 2.2 (Lageplan) sowie Blatt-Nr. 3.1 und 3.2 (Fangedamm) in den Planunterlagen.

Um die Zufahrtsbreite für die Schifffahrt nicht einzuengen, kommen hierbei Spundwandbauwerke in Form von Fangedämmen in Frage (siehe Blatt-Nr. 3.1 - Detail Fangedamm). Vorgesehen ist, die Molenköpfe des nördlichen und des südlichen Leitdamms mit Hilfe der Spundwand-Fangedämme um jeweils rd. 20 m zu verlängern. Die Einfahrtsbreite für die Schifffahrt kann somit bei rd. 60 m beibehalten werden.

Wie auf Blatt-Nr. 3.2 der Planunterlagen dargestellt, ist es nicht erforderlich, die Stahlspundwände bis zu der vorgesehenen Sollhöhe zu führen. Es ist vorgesehen, die Spundwände bis zu einer Höhe von  $NHN + 1,50$  m zu führen. Darüber hinaus wird die Ausführung der Molenköpfe in geböschter Bauweise mit Wasserbausteinen vorgenommen. Die Spundwände (z. B. Profil Arcelor AU 20, Stahlgüte S 270 GP) werden bis auf eine Tiefe von rd.  $NHN - 11,50$  m geführt. In der Höhenlage  $NHN + 0,50$  m erfolgt die gegenseitige Verankerung mit Rundstahlankern  $\varnothing 3''$  (Stahlgüte S 355 J2 G3). Als oberer Abschluss dient ein Stahlprofil.

Die Tabelle 3 auf der übernächsten Seite zeigt im Überblick das Ergebnis der Wellenhöhenberechnungen für die beschriebenen 4 Bereiche im Hafen für Variante 1. Es ist erkennbar, dass hiermit eine deutliche Reduzierung der Wellenhöhen in allen Hafengebieten zu erzielen ist. Die gemittelte Reduzierung der Wellenhöhen über alle Richtungen und an allen betrachteten Stellen liegt bei 16,5 %. Allerdings sind insbesondere für die Wellenangriffsrichtungen  $210^\circ$  und  $240^\circ$  im Bereich der Liegeplätze des Yacht-Clubs und an der Nordkaje noch Wellenhöhen von rd. 40 cm zu verzeichnen.

Wie bereits dargestellt, sind für höhere Wasserstände die Voraussetzungen der Wellenberechnungen nur noch zum Teil gültig, da die Leitdämme dann überspült werden und somit ihre Funktion nur noch teilweise erfüllen können. **Damit die Schutzfunktion der Leitdämme auch bei höheren Wasserständen gewährleistet ist, sollten die Leitdämme um rd. 50 cm auf  $NHN + 3,00$  m erhöht werden.** Dies ist bei den vorhandenen Leitdämmen technisch möglich, da sie gemäß Planunterlagen über eine rd. 2,00 m breite Fußvorlage verfügen, so dass eine Erhöhung um rd. 50 cm nicht zu einem Abrutschen und Versinken der zusätzlichen Schüttsteine führt. Die Erhöhung wird mit NA-Schüttsteinen der Größenklasse LMB 40/200 analog der bestehenden Leitdämme durchgeführt. Die Molenköpfe werden dementsprechend ebenfalls auf eine Höhe von  $NHN + 3,00$  m geführt. Mit dieser Erhöhung ist die Schutzfunktion des Hafens auch bei höheren Wasserständen gewährleistet.

In der Kostenschätzung wurden für die Variante 1 Baukosten von rd. 1.180.000 € (netto] ermittelt. Zum Vergleich ist zusätzlich noch eine Variante 1b – ohne Leitdammerhöhung – aufgeführt worden. Die Kosten für die Variante 1b (Baukosten einschl. Baunebenkosten) belaufen sich gemäß Kostenschätzung auf rd. 800.000 € (netto).

<b>Variante 1, maximale Wellenhöhen</b>		
Wind: 20 m/s, WSp: NHN + 2,00 m		
	max. Wellenhöhe aus Diffraktion, Reflexion und Transmission	Reduktion gegenüber Bestand [%]
<b>Wellenangriffsrichtung 210°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,60 m		
Stelle 1	<b>0,42</b>	18,6
Stelle 2	<b>0,37</b>	17,2
Stelle 3	<b>0,22</b>	22,3
Stelle 4	<b>0,21</b>	22,6
<b>Wellenangriffsrichtung 240°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,60 m		
Stelle 1	<b>0,44</b>	4,9
Stelle 2	<b>0,38</b>	21,9
Stelle 3	<b>0,31</b>	25,6
Stelle 4	<b>0,34</b>	16,3
<b>Wellenangriffsrichtung 252°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,55 m		
Stelle 1	<b>0,30</b>	13,7
Stelle 2	<b>0,34</b>	12,3
Stelle 3	<b>0,31</b>	15,1
Stelle 4	<b>0,34</b>	14,3
<b>Wellenangriffsrichtung 270°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,50 m		
Stelle 1	<b>0,25</b>	17,3
Stelle 2	<b>0,28</b>	13,8
Stelle 3	<b>0,27</b>	33,7
Stelle 4	<b>0,32</b>	18,5
<b>Wellenangriffsrichtung 300°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,45 m		
Stelle 1	<b>0,16</b>	5,9
Stelle 2	<b>0,17</b>	10,0
Stelle 3	<b>0,19</b>	12,7
Stelle 4	<b>0,23</b>	10,8
<i>Mittelwert über alle Richtungen und an allen 4 Stellen:</i>		
	<b>0,29</b>	16,5

Tabelle 3: **Variante 1**, signifikante Wellenhöhen im Hafen bei einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s und einem Wasserstand von NHN +2,00 m

#### 4.4 Variante 2 - Verlängerung und Erhöhung des südlichen Leitdamms

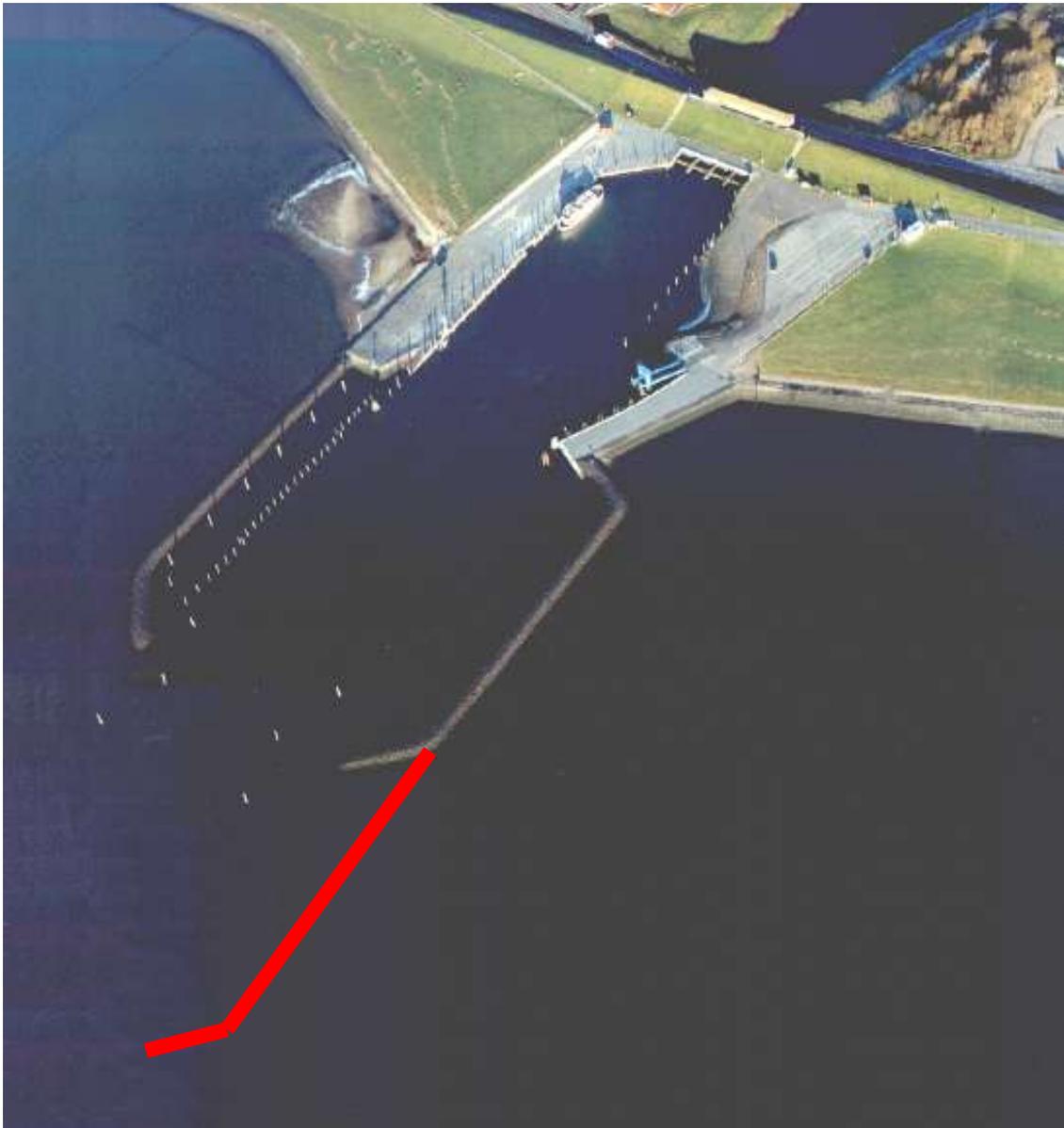


Abb. 14: Luftbild Hafen Schlüttsiel – Variante 2

Zur Verbesserung der Wellenunruhe insbesondere gegenüber den Wellenrichtungen 210° und 240°, d. h. den Richtungen mit dem größten Wellenangriff, wird in Variante 2 eine Verlängerung des südlichen Leitdamms um rd. 120 m vorgesehen. Schematisch ist diese Variante in Abbildung 14 dargestellt; eine entsprechende Vorentwurfszeichnung findet sich als Blatt-Nr. 2.3 der Planunterlagen. Damit kann der Schutz des Innenhafens und hier insbesondere der Liegeplätze im nördlichen Bereich deutlich verbessert werden.

In Form und Gestaltung entspricht der neue Leitdamm den vorhandenen Leitdämmen. Die Leitdämme bestehen aus einer Unterlage aus einem Geotextil (Flächengewicht min. 850 g/m<sup>2</sup>). Darüber befindet sich eine Schüttsteinlage aus 30 cm Geröll auf welcher die Schüttsteine aus Kupferschlacke (NA-Steine, Größenklasse III-IV) liegen. Auf beiden Seiten ist eine Fußvorlage von 1,50 bis 2,00 m vorhanden, die ein Versinken einzelner Steine im Falle eines Abrutschens verhindert und dem Damm zusätzliche Stabilität verleiht. Die Leitdämme haben sich in den über 10 Jahren ihres Bestehens sehr gut bewährt. Es ist weder zu starkem Einsinken (eine örtliche Höhenüberprüfung ergab Höhen von NHN + 2,40 m bis NHN + 2,70 m) noch zu erwähnenswerten Umlagerungen von Steinen auch bei starken Sturmereignissen, wie z. B. dem Sturm „Anatol“, gekommen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll und folgerichtig einen neuen Leitdamm wieder in der bewährten Bauweise zu erstellen.

Die neuen Leitdämme werden jedoch im Gegensatz zu den vorhandenen Leitdämmen auf eine Höhe von NHN + 3,00 m geführt, um auch bei höheren Wasserständen eine optimale Schutzfunktion zu gewährleisten (siehe Blatt-Nr. 3.3 der Planunterlagen) Der vorhandene südliche Leitdamm ist dementsprechend ebenfalls auf NHN + 3,00 m (siehe Blatt-Nr. 3.4 der Planunterlagen) zu erhöhen (vgl. Variante 1).

Die Tabelle 4 auf der übernächsten Seite zeigt im Überblick das Ergebnis der Wellenhöhenberechnungen für die beschriebenen 4 Bereiche im Hafen für Variante 2. Insbesondere für die Wellenangriffsrichtung 210° wird eine Reduzierung der Wellenhöhen in allen Hafengebieten deutlich über Variante 1 hinaus erzielt. Die Reduzierung der Wellenhöhen für diese Richtung liegt gegenüber dem heutigen Zustand teilweise über 100%; die Wellenhöhen betragen hier nur noch rd. 20 cm gegenüber Wellenhöhen von 50 cm zurzeit.

Bei einer Richtung der einlaufenden Wellen von 240° ist die Verbesserung gegenüber Variante 1 nicht mehr so deutlich; hier wird insbesondere im Bereich 1 (Yachthafen) noch eine deutliche weitere Verbesserung erzielt. Für die Wellenangriffsrichtung 252° liegt die Verbesserung gegenüber dem heutigen Zustand nur bei rd. 5 – 10%, während bei den Wellenrichtungen 270° und 300° sogar teilweise eine leichte Verschlechterung gegenüber dem bestehenden Zustand aufgrund von – wenn auch relativ geringen – Reflexionen der Wellen aus diesen Richtungen an der neuen Mole bzw. dem neuen Leitwerk. Für diese Windrichtungen liegen die Wellenhöhen also oberhalb der vorhandenen Wellenhöhen (und auch oberhalb der Wellenhöhen bei Variante 1) in einer Größenordnung von rd. 20 cm bis 40 cm.

Die gemittelte Reduzierung der Wellenhöhen über alle Richtungen und an allen betrachteten Stellen liegt für die vorgegebenen Randbedingungen aufgrund der beschriebenen Verhältnisse jedoch nur bei 14,7 % und ist somit etwas geringer als bei Variante 1. Die größte ermittelte signifikante Wellenhöhe beträgt rd. 40 cm (40 cm, Stelle 1 (Bereich Yachthafen), Wellenangriffsrichtung 210°; 41 cm, Stelle 3, Südkaje, Wellenangriffsrichtung 270°).

In der Kostenschätzung wurden für die Variante 2 Baukosten einschl. Baunebenkosten von rd. 1.520.000 € (netto). Wenn auch der nördliche Leitdamm erhöht wird, erhöhen sich die Kosten um rd. 190.000 € (netto).

<b>Variante 2, maximale Wellenhöhen</b>		
Wind: 20 m/s, WSp: NHN + 2,00 m		
	max. Wellenhöhe aus Diffraktion, Reflexion und Transmission	Reduktion gegenüber Bestand [%]
<b>Wellenangriffsrichtung 210°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,60 m		
Stelle 1	<b>0,23</b>	54,9
Stelle 2	<b>0,16</b>	64,0
Stelle 3	<b>0,18</b>	35,7
Stelle 4	<b>0,18</b>	33,3
<b>Wellenangriffsrichtung 240°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,60 m		
Stelle 1	<b>0,40</b>	13,0
Stelle 2	<b>0,36</b>	25,0
Stelle 3	<b>0,31</b>	26,2
Stelle 4	<b>0,33</b>	17,5
<b>Wellenangriffsrichtung 252°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,55 m		
Stelle 1	<b>0,34</b>	1,7
Stelle 2	<b>0,36</b>	9,0
Stelle 3	<b>0,35</b>	6,5
Stelle 4	<b>0,38</b>	6,0
<b>Wellenangriffsrichtung 270°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,50 m		
Stelle 1	<b>0,34</b>	-11,7
Stelle 2	<b>0,35</b>	-8,3
Stelle 3	<b>0,41</b>	0,8
Stelle 4	<b>0,39</b>	1,0
<b>Wellenangriffsrichtung 300°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,45 m		
Stelle 1	<b>0,21</b>	-21,2
Stelle 2	<b>0,21</b>	-11,1
Stelle 3	<b>0,24</b>	-9,5
Stelle 4	<b>0,26</b>	-1,5
<i>Mittelwert über alle Richtungen und an allen 4 Stellen:</i>		
	<b>0,30</b>	14,7

Tabelle 4: **Variante 2**, signifikante Wellenhöhen im Hafen bei einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s und einem Wasserstand von NHN + 2,00 m

#### **4.5 Variante 3 - Verlängerung und Erhöhung des südlichen Leitdamms, südlicher Leitdammkopf als Fangedamm**

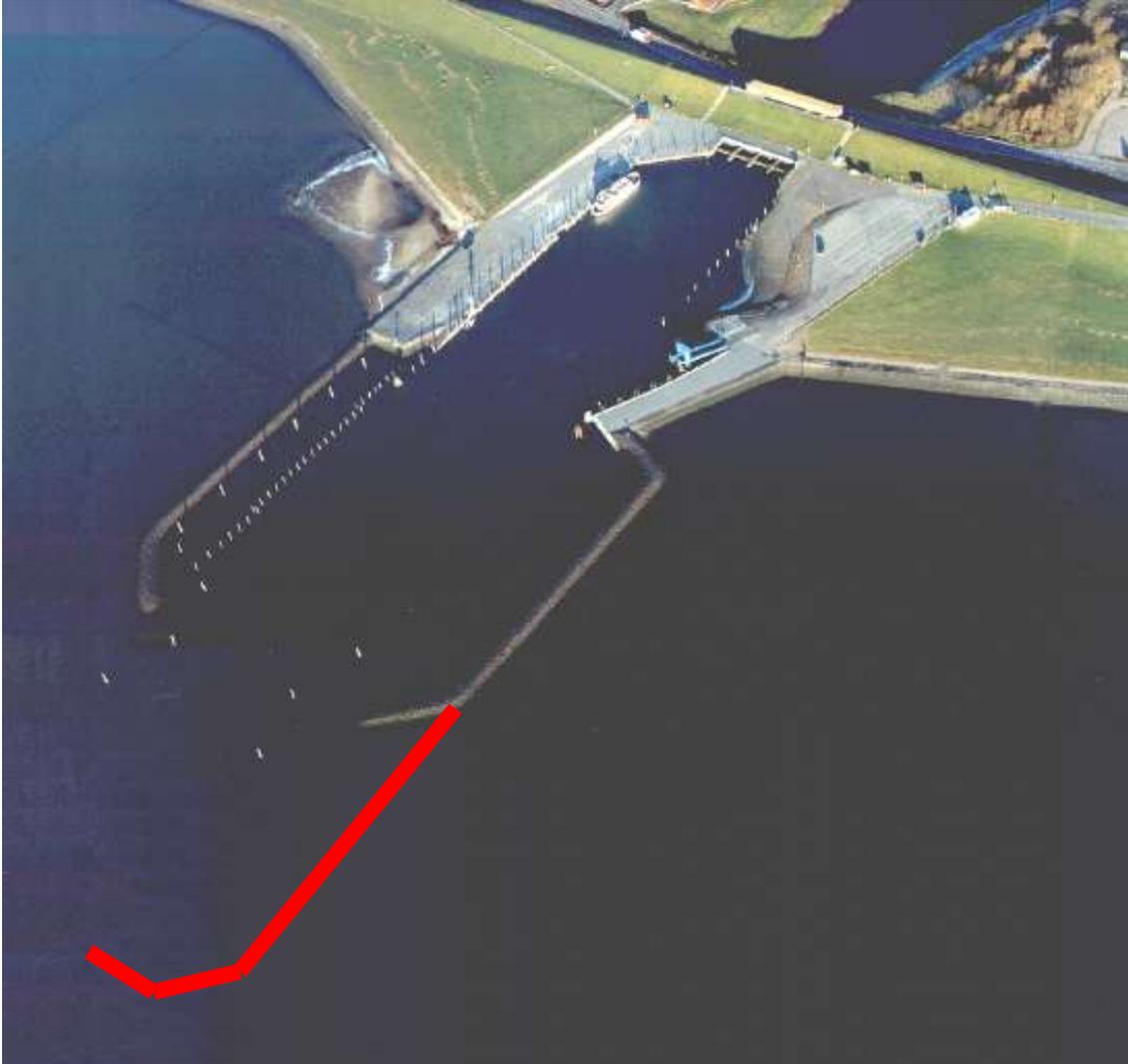


Abb. 15: Luftbild Hafen Schlüttsiel – Variante 3

Um die Wellenhöhen noch weiter zu reduzieren, wurde aus der Variante 2 die Variante 3 entwickelt. Zusätzlich zur südlichen Leitdammverlängerung wird hier der Molenkopf wie bei Variante 1 beschrieben ausgeführt, so dass eine weitere Reduzierung der Eintrittsbreite für den Seegang erzielt wird.

Schematisch ist diese Variante in Abbildung 15 dargestellt; eine entsprechende Vorentwurfszeichnung findet sich als Blatt-Nr. 2.4 der Planunterlagen. Die Oberkante des neuen

Leitdamms und des Molenkopfs liegt bei NHN + 3,00 m. Wie bei Variante 2 ist vorgesehen, den vorhandenen südlichen Leitdamm ebenfalls auf diese Höhe zu erhöhen.

Die Tabelle 5 auf der folgenden Seite zeigt im Überblick das Ergebnis der Wellenhöhenberechnungen für die beschriebenen 4 Bereiche im Hafen für Variante 3. Insbesondere für die Wellenangriffsrichtung 240° ergibt sich eine deutliche Verbesserung gegenüber Variante 2. Aber auch für die Wellenrichtung 252°, also direkt in Richtung Hafenöffnung, ergibt sich eine Verbesserung. Für Wellen aus den Richtung 210° ist nur eine geringfügige Verbesserung gegenüber Variante 2 zu verzeichnen, während für die Richtungen 270° und 300° erwartungsgemäß keine Verbesserungen gegenüber der Variante 2 erzielt werden.

Die größte ermittelte signifikante Wellenhöhe bei den vorgegebenen Randbedingungen liegt bei Variante 3 bei 41 cm (Stelle 3, Südkaje, Wellenangriffsrichtung 270° (wie Variante 2)). Die gemittelte Reduzierung der Wellenhöhen über alle Richtungen und an allen betrachteten Stellen liegt bei 19,0 %.

In der Kostenschätzung wurden für die Variante 3 Baukosten einschl. Baunebenkosten von rd. 2.110.000 € (netto) ermittelt. Bei einer zusätzlichen Erhöhung auch des nördlichen Leitdamms, erhöhen sich die Kosten um rd. 190.000 € (netto).

<b>Variante 3, maximale Wellenhöhen</b>		
Wind: 20 m/s, WSp: NHN + 2,00 m		
	max. Wellenhöhe aus Diffraktion, Reflexion und Transmission	Reduktion gegenüber Bestand [%]
<b>Wellenangriffsrichtung 210°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,60 m		
Stelle 1	<b>0,22</b>	56,9
Stelle 2	<b>0,16</b>	64,0
Stelle 3	<b>0,18</b>	35,7
Stelle 4	<b>0,18</b>	33,3
<b>Wellenangriffsrichtung 240°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,60 m		
Stelle 1	<b>0,35</b>	23,9
Stelle 2	<b>0,31</b>	35,9
Stelle 3	<b>0,26</b>	38,1
Stelle 4	<b>0,27</b>	32,5
<b>Wellenangriffsrichtung 252°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,55 m		
Stelle 1	<b>0,34</b>	4,3
Stelle 2	<b>0,34</b>	12,2
Stelle 3	<b>0,32</b>	14,9
Stelle 4	<b>0,35</b>	12,5
<b>Wellenangriffsrichtung 270°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,50 m		
Stelle 1	<b>0,34</b>	-11,7
Stelle 2	<b>0,35</b>	-8,3
Stelle 3	<b>0,41</b>	0,8
Stelle 4	<b>0,39</b>	1,0
<b>Wellenangriffsrichtung 300°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,45 m		
Stelle 1	<b>0,21</b>	-21,2
Stelle 2	<b>0,21</b>	-11,1
Stelle 3	<b>0,24</b>	-9,5
Stelle 4	<b>0,26</b>	-1,5
<i>Mittelwert über alle Richtungen und an allen 4 Stellen:</i>		
	<b>0,28</b>	19,0

Tabelle 5: **Variante 3**, signifikante Wellenhöhen im Hafen bei einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s und einem Wasserstand von NHN +2,00 m

**4.6 Variante 4 – Verlängerung und Erhöhung des südlichen Leitdamms, Erhöhung des nördlichen Leitdamms, südlicher und nördlicher Leitdammkopf als Fangedamm –**

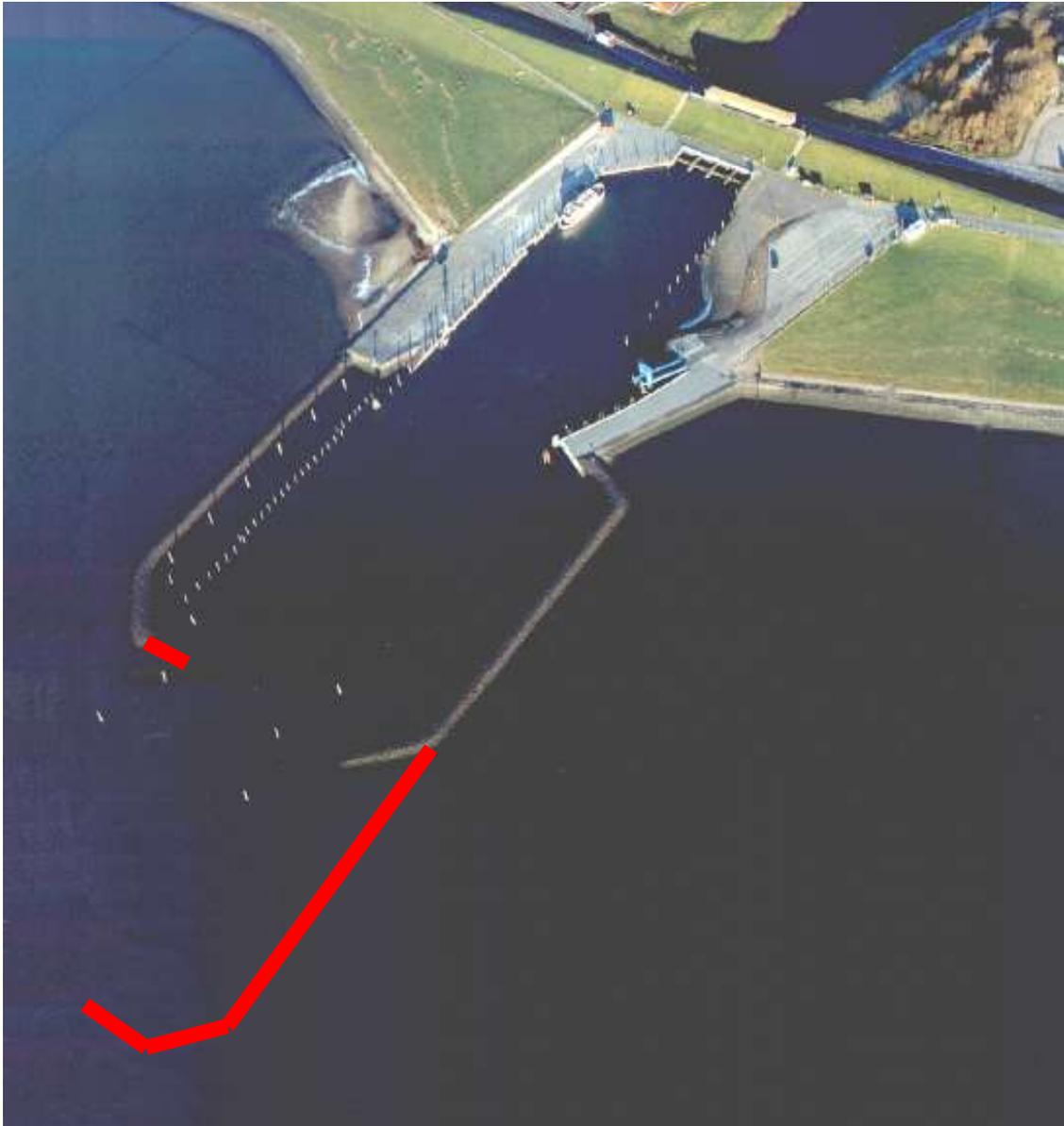


Abb. 16: Luftbild Hafen Schlüttsiel – Variante 4

Um die Vorteile der Variante 1 mit denen der Variante 3 miteinander zu verknüpfen wurde die Variante 4 erarbeitet. Die Variante umfasst einerseits die südliche Leitdammverlängerung mit Molenkopf als Fangedamm wie bei Variante 3, andererseits aber auch die nördliche Molenkopfverlängerung mittels einer Fangedammkonstruktion wie bei Variante 1, um auch gegen Wellen aus nordwestlichen Richtungen einen optimalen Schutz zu bieten.

Schematisch ist diese Variante in Abbildung 16 dargestellt; eine entsprechende Vorentwurfszeichnung findet sich als Blatt-Nr. 2.5 der Planunterlagen. Die Oberkante der neuen Leitdämme und der Molenköpfe liegt bei NHN + 3,00 m. Um einen optimalen Schutz des Hafens zu gewährleisten, ist vorgesehen, die vorhandenen Leitdämme ebenfalls auf diese Höhe zu erhöhen.

Die Tabelle 6 auf der folgenden Seite zeigt im Überblick das Ergebnis der Wellenhöhenberechnungen für die beschriebenen 4 Bereiche im Hafen für Variante 4. Mit dieser Variante kann eine optimale Verbesserung der Wellenunruhe im Hafen Schlüttsiel erreicht werden. Für Wellen aus den Richtungen 240°, 252° (direkt in Richtung Hafenöffnung) und 270° können die Wellenhöhen im Hafen gegenüber Variante 3 nochmals reduziert werden. Aber auch gegenüber Variante 1 kann eine Verbesserung für die Wellenangriffsrichtung direkt in Richtung Hafenöffnung (252°) erzielt werden. Für die Wellenangriffsrichtung 270° können gegenüber dem Bestand Verringerungen der Wellenhöhen zwischen 10 und 20% erzielt werden, diese Werte liegen geringfügig unter denen der Variante 1. Für die Wellenangriffsrichtung 300° liegen die Wellenhöhen ebenfalls unter den Wellenhöhen des Bestandes. Hier werden in der Variante 1 theoretisch etwas bessere Werte erzielt; die Unterschiede sind jedoch insgesamt sehr gering und liegen am Rande der Rechengenauigkeit.

Die größte ermittelte signifikante Wellenhöhe bei den vorgegebenen Randbedingungen liegt bei dieser Variante bei 35 cm gegenüber 51 cm in der Bestandsvariante, 44 cm bei Variante 1, und 41 cm bei den Varianten 2 und 3. Die gemittelte Reduzierung der Wellenhöhen über alle Richtungen und an allen betrachteten Stellen liegt bei 27,8 %. Es ist also eine deutliche Verbesserung sowohl gegenüber Variante 1 als auch gegenüber Variante 3 zu verzeichnen.

In der Kostenschätzung wurden für die Variante 4 Baukosten einschl. Baunebenkosten in Höhe von 2.630.00 € (netto) ermittelt.

<b>Variante 4, maximale Wellenhöhen</b>		
Wind: 20 m/s, WSp: NHN + 2,00 m		
	max. Wellenhöhe aus Diffraktion, Reflexion und Transmission	Reduktion gegenüber Bestand [%]
<b>Wellenangriffsrichtung 210°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,60 m		
Stelle 1	<b>0,22</b>	56,9
Stelle 2	<b>0,16</b>	64,0
Stelle 3	<b>0,18</b>	35,7
Stelle 4	<b>0,18</b>	33,3
<b>Wellenangriffsrichtung 240°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,60 m		
Stelle 1	<b>0,33</b>	29,1
Stelle 2	<b>0,27</b>	43,1
Stelle 3	<b>0,25</b>	40,0
Stelle 4	<b>0,27</b>	31,5
<b>Wellenangriffsrichtung 252°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,55 m		
Stelle 1	<b>0,27</b>	24,0
Stelle 2	<b>0,30</b>	22,1
Stelle 3	<b>0,29</b>	22,7
Stelle 4	<b>0,33</b>	17,0
<b>Wellenangriffsrichtung 270°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,50 m		
Stelle 1	<b>0,25</b>	15,3
Stelle 2	<b>0,29</b>	8,1
Stelle 3	<b>0,31</b>	24,6
Stelle 4	<b>0,35</b>	10,8
<b>Wellenangriffsrichtung 300°</b>		
Ausgangswellenhöhe: 0,45 m		
Stelle 1	<b>0,18</b>	-5,9
Stelle 2	<b>0,18</b>	6,8
Stelle 3	<b>0,21</b>	6,4
Stelle 4	<b>0,23</b>	10,4
<i>Mittelwert über alle Richtungen und an allen 4 Stellen:</i>		
	<b>0,25</b>	27,8

Tabelle 6: **Variante 4**, signifikante Wellenhöhen im Hafen bei einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s und einem Wasserstand von NHN +2,00 m

#### **4.7 Zusammenfassung und Variantenempfehlung**

Auf den folgenden Seiten sind die sich ergebenden Wellenhöhen an den betrachteten Hafengebieten noch einmal für verschiedene Windrichtungen für alle Varianten im Überblick dargestellt.

Bereits **Variante 1** – Verlängerung des nördlichen und des südlichen Leitdamms durch neue Leitdammköpfe als Fangedämme – führt zu einer deutlichen Reduzierung der Wellenhöhen. Die gemittelte Reduzierung der Wellenhöhen über alle Richtungen und an allen betrachteten Stellen liegt bei 16,5 %. Die Variante 1 kann als kostengünstigste Variante empfohlen werden. Es ist im gesamten Hafengebiet eine Reduzierung der Wellenhöhen zu verzeichnen.

Allerdings sind insbesondere für die häufigen Wellenangriffsrichtungen 210° und 240° im Bereich der Liegeplätze des Yacht-Clubs und an der Nordkaje noch Wellenhöhen von rd. 40 cm zu verzeichnen. Eine Reduzierung der Wellenhöhen im Bereich der Liegeplätze des Yachtclubs gegenüber dem Bestand beträgt bei einer Wellenangriffsrichtung von 240° lediglich rd. 5 %. Bei der Wellenangriffsrichtung von 210° wird immerhin eine Reduktion von 18,6 % erreicht.

Falls die Verbesserung der Verhältnisse wie in Variante 1 dargestellt durchgeführt werden soll, sollten in jedem Fall auch die vorhandenen Leitdämme auf eine Höhe von NHN +3,00 m erhöht werden.

Variante 1 führt zwar zu einer deutlichen Verbesserung gegenüber dem Bestand, es muss sich jedoch die Frage gestellt werden, ob die erreichte Verbesserung der Verhältnisse gerade für die größten Wellenhöhen als ausreichend erachtet wird.

Aus diesem Ansatz heraus wurde die **Variante 2** – Verlängerung und Erhöhung des südlichen Leitdamms – entwickelt. Insbesondere für die Wellenangriffsrichtung 210° wird eine Reduzierung der Wellenhöhen in allen Hafengebieten deutlich über Variante 1 hinaus erzielt, die Reduktion der Wellenhöhe liegt hier zwischen 33% und 64%. Bei einer Richtung der einlaufenden Wellen von 240° ist die Verbesserung gegenüber Variante 1 nicht mehr so deutlich, jedoch für den Yachthafenbereich immerhin bei 13 % anstelle von 5%.

Für die Wellenangriffsrichtung 252° liegt die Verbesserung gegenüber dem heutigen Zustand nur bei zwischen 2 und 9%, während bei den Wellenrichtungen 270° und 300° durch die Reflexion am verlängerten südlichen Wellenbrecher sogar teilweise eine Verschlechterung

gegenüber dem bestehenden Zustand festzustellen ist (Stelle 1: Verschlechterung um über 20%). Für diese Windrichtungen liegen die Wellenhöhen also etwas oberhalb der vorhandenen Wellenhöhen in einer Größenordnung von rd. 20 cm.

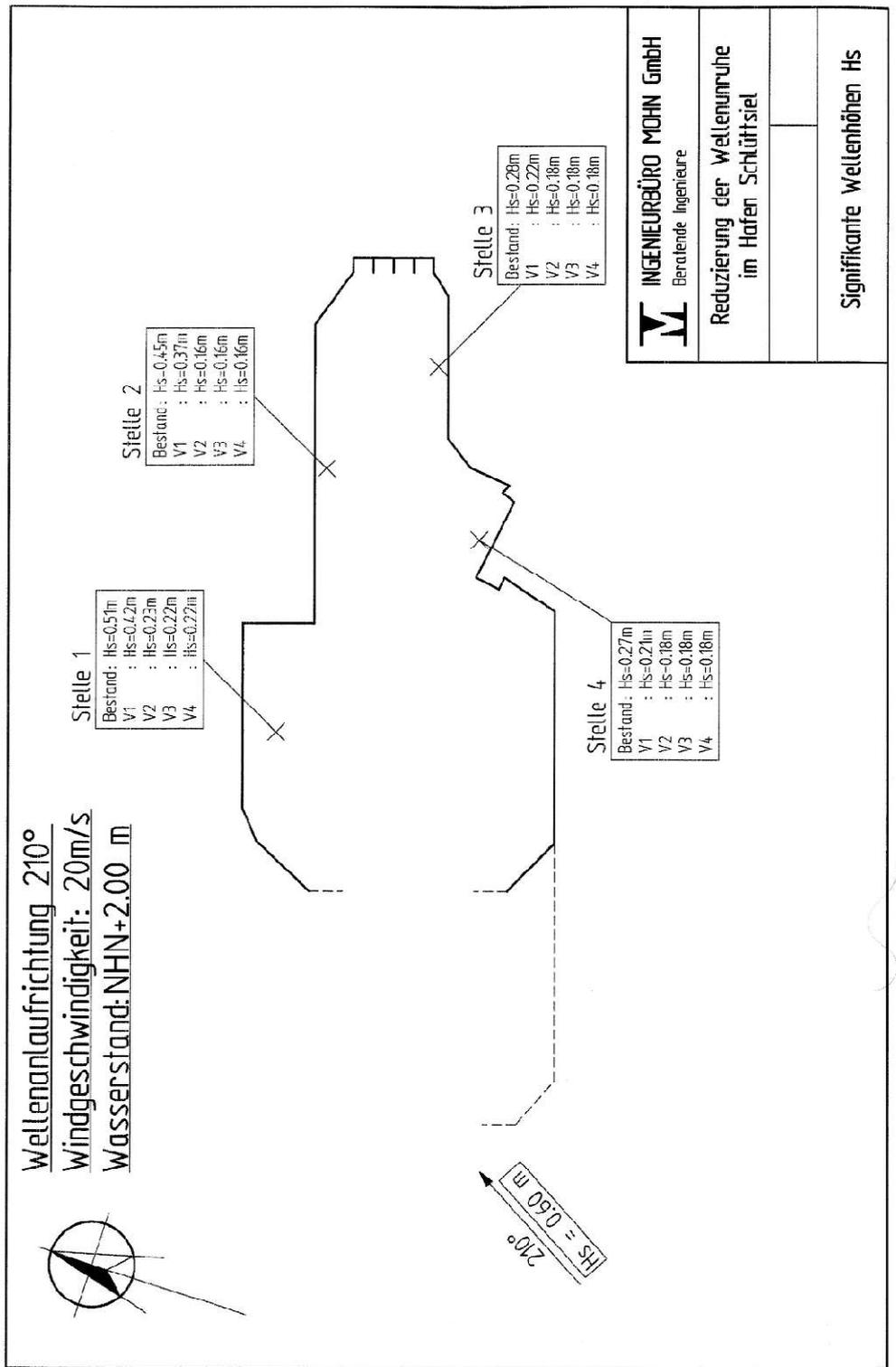


Abb. 17: Signifikante Wellenhöhen im Hafen bei einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s und einem Wasserstand von NHN + 2,00 m  
Wellenanlaufriichtung: 210°

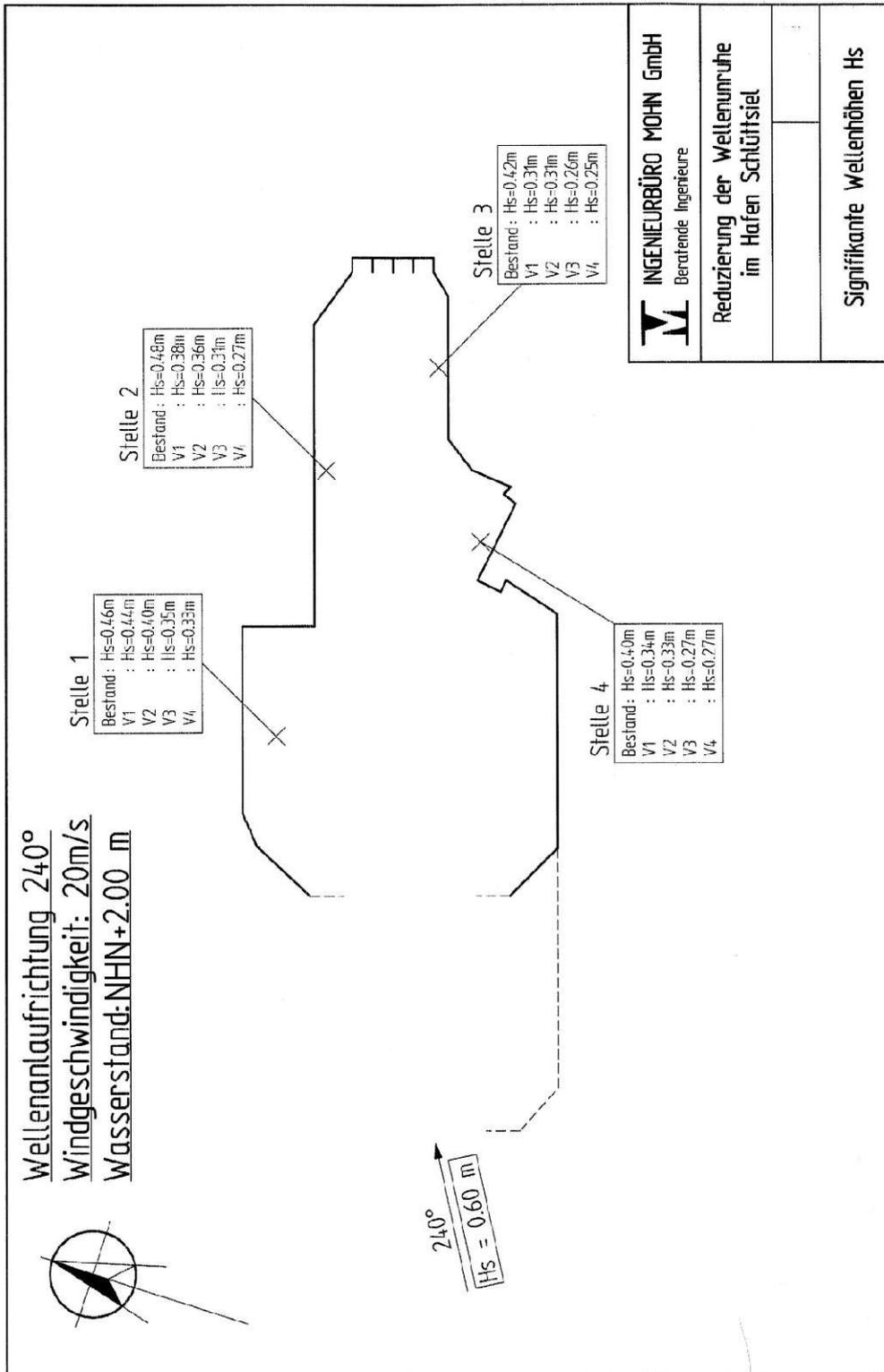


Abb. 18: Signifikante Wellenhöhen im Hafen bei einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s und einem Wasserstand von NHN + 2,00 m  
Wellenanlaufriichtung: 240°

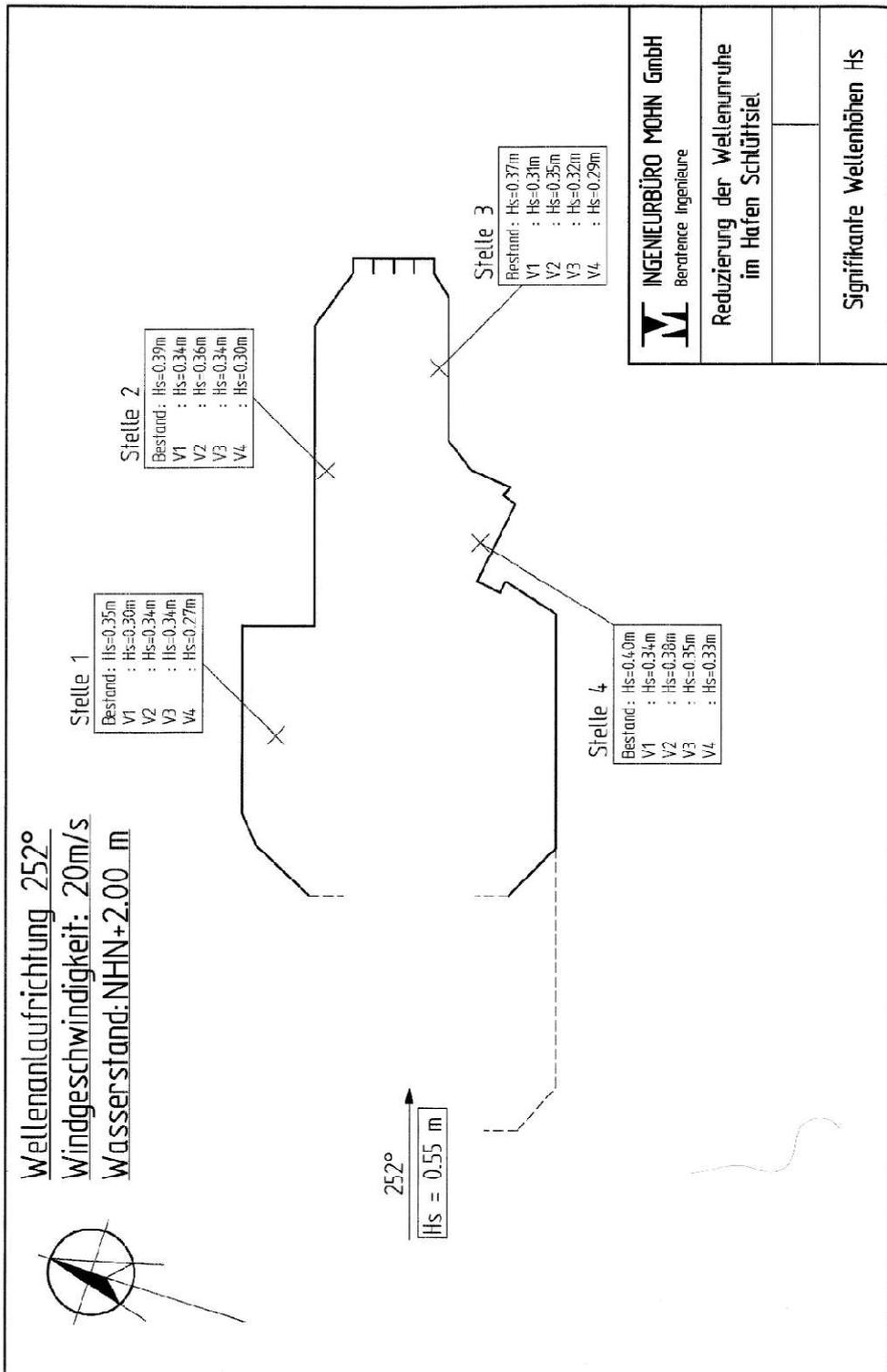


Abb. 19: Signifikante Wellenhöhen im Hafen bei einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s und einem Wasserstand von NHN + 2,00 m  
Wellenanlaufrichtung: 252°

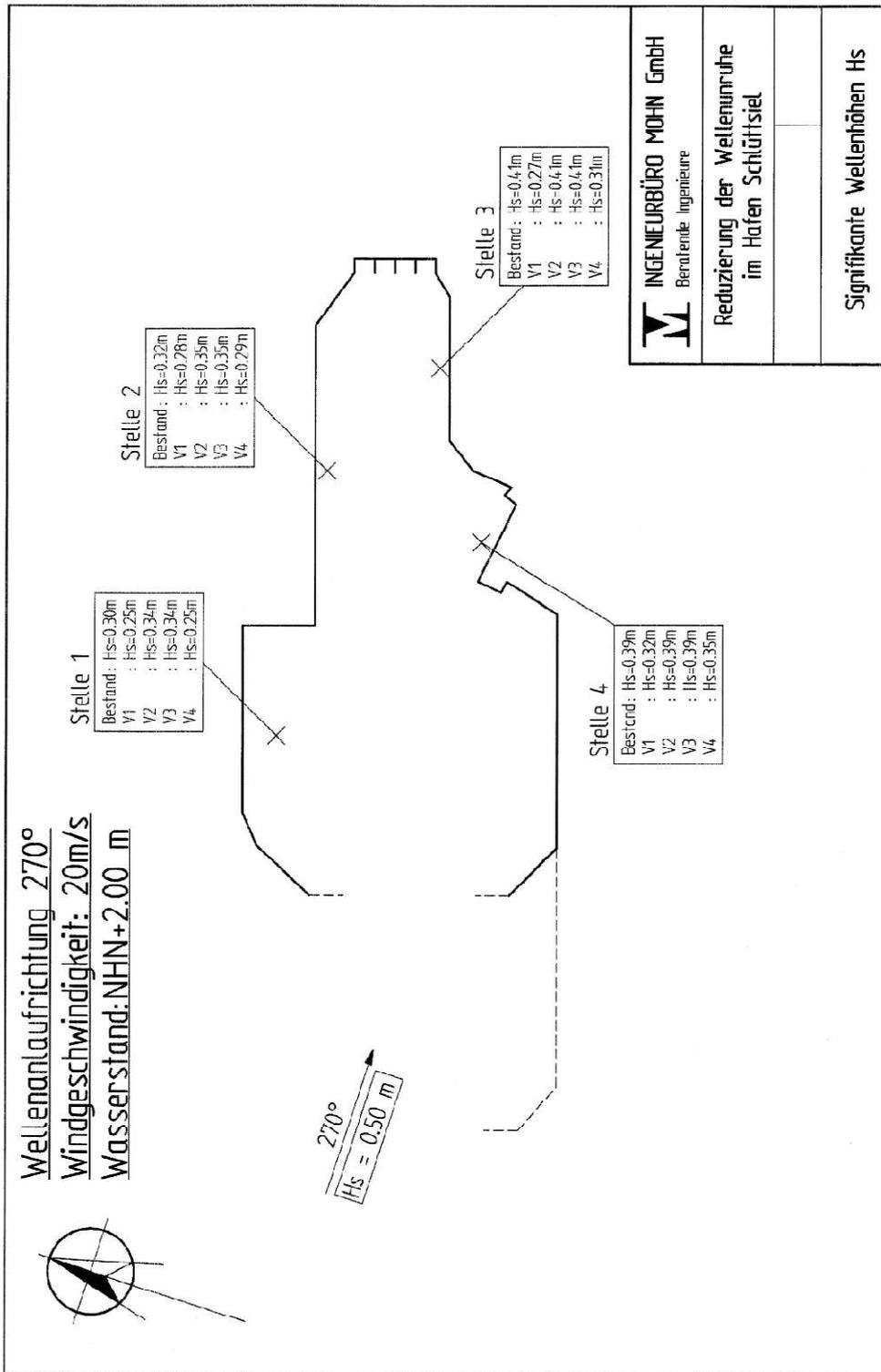


Abb. 20: Signifikante Wellenhöhen im Hafen bei einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s und einem Wasserstand von NHN + 2,00 m  
Wellenanlaufriichtung: 270°

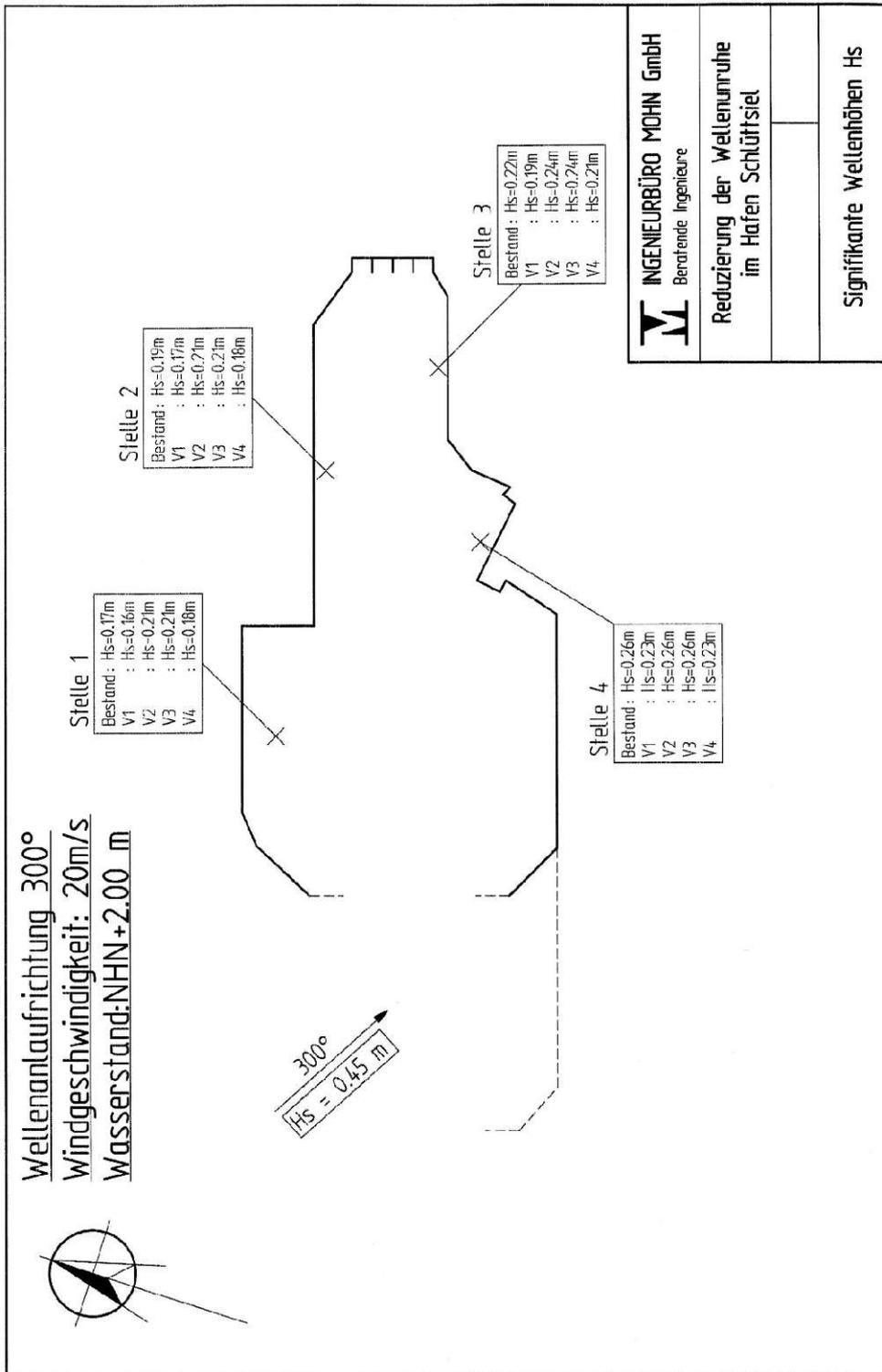


Abb. 21: Signifikante Wellenhöhen im Hafen bei einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s und einem Wasserstand von NHN + 2,00 m  
Wellenanlaufriichtung: 300°

Durch die Variante 2 wird insbesondere eine Verbesserung im Bereich der größten Wellenhöhen aus den Angriffsrichtungen 210° und 240° erzielt. Insgesamt ergibt sich aber nur bei der Wellenangriffsrichtung 210° eine deutliche Verbesserung, während bereits bei einer Wellenangriffsrichtung von 240° die Verbesserung gegenüber Variante 1 nicht sehr ausgeprägt ist. Bei auftretenden Mehrkosten von rd. 340.000 € (netto) gegenüber Variante 1 kann diese Variante nur eingeschränkt empfohlen werden.

Um die Wellenhöhen noch weiter zu reduzieren, wurde aus der Variante 2 die **Variante 3** – Verlängerung und Erhöhung des südlichen Leitdamms, südlicher Leitdammkopf als Fangedamm – entwickelt. Insbesondere für die Wellenangriffsrichtung 240° ergibt sich eine deutliche Verbesserung gegenüber Variante 2. Aber auch für die Wellenrichtung 252°, also direkt in Richtung Hafenöffnung, ergibt sich eine Verbesserung. Für Wellen aus den Richtung 210° ist nur eine geringfügige Verbesserung gegenüber Variante 2 zu verzeichnen, während für die Richtungen 270° und 300° naturgemäß keine Verbesserungen gegenüber der Variante 2 erzielt werden. Insgesamt ergibt sich zwar eine weitere Verbesserung gegenüber Variante 2, aber diese Variante kann ebenfalls nur eingeschränkt empfohlen werden, da für die Wellenrichtungen 270° und 300° keine Verbesserungen gegenüber dem Bestand erzielt werden, bzw. durch die Reflexionen am neuen südlichen Leitdamm eine etwas größere Wellenunruhe auftritt.

Um die Vorteile der Variante 1 mit denen der Variante 3 miteinander zu verknüpfen, wurde die **Variante 4** – Verlängerung und Erhöhung des südlichen Leitdamms, Erhöhung des nördlichen Leitdamms, südlicher und nördlicher Leitdammkopf als Fangedamm – erarbeitet. Mit dieser Variante kann eine möglichst optimale Verbesserung der Wellenunruhe im Hafen Schlüttsiel in allen Bereichen und für alle Wellenangriffsrichtungen erreicht werden.

Für Wellen aus den Richtungen 240°, 252° (direkt in Richtung Hafenöffnung) und 270° können die Wellenhöhen im Hafen gegenüber Variante 3 nochmals reduziert werden. Aber auch gegenüber Variante 1 kann eine Verbesserung für die Wellenangriffsrichtung direkt in Richtung Hafenöffnung (252°) erzielt werden. Für die Wellenangriffsrichtung 270° können gegenüber dem Bestand Verringerungen der Wellenhöhen zwischen 10 und 20 % erzielt werden, diese Werte liegen geringfügig unter denen der Variante 1. Für die Wellenangriffsrichtung 300° liegen die Wellenhöhen bis auf eine Ausnahme ebenfalls unter den Wellenhöhen des Bestandes. Aus dieser Wellenangriffsrichtung ist an dieser Stelle (und insgesamt im Hafen) jedoch die Wellenunruhe auch im Bestand schon recht niedrig:

Ausgangswellenhöhe: 45 cm, Wellenhöhe Bestand: zwischen 17 und 26 cm, Wellenhöhe Variante 4: zwischen 18 und 23 cm)

Die gemittelte Reduzierung der Wellenhöhen über alle Richtungen und an allen betrachteten Stellen liegt bei Variante 4 bei 27,8 %. Es ist also eine deutliche Verbesserung sowohl gegenüber Variante 1 als auch gegenüber Variante 3 zu verzeichnen.

Es wird die Variante 4 und mit Einschränkungen die Variante 1 (als kostengünstigste und am einfachsten umsetzbare Variante) zur Ausführung empfohlen.

**Zusammenfassend lassen sich die Ergebnisse der Wellenberechnungen wie folgt darstellen:**

Für die Wellenangriffsrichtung 210°, d. h. den Richtungen mit dem größten Wellenangriff, ergibt Variante 2 sowohl für den Bereich Yachthafen, als auch für den Bereich des inneren Hafens gute Ergebnisse, die lediglich durch Variante 4 noch einmal verbessert werden. Variante 1 erzielt hier deutlich schlechtere Ergebnisse.

Für die Wellenangriffsrichtung 240° kann für den Bereich des inneren Hafens dasselbe gesagt werden, während für den Yachthafen nur Variante 3 oder Variante 4 eine entscheidende Verbesserung darstellen.

Bei einem direkt in Richtung Hafeneinfahrt wirkendem Wellenangriff (252°) ist Variante 1 ausreichend; die Varianten 2 und 3 schneiden hier sowohl im Bereich Yachthafen, als auch im inneren Hafenbereich etwas schlechter ab, während die Variante 4 eine leichte Verbesserung gegenüber Variante 1 darstellt.

Für die Wellenangriffsrichtung 270° ist ebenfalls Variante 1 ausreichend, die Varianten 2 und 3 können hier nicht empfohlen werden, während die Variante 4 ebenso gut abschneidet.

Bei einem Wellenangriff aus der Richtung 300° gilt prinzipiell dasselbe wie für 270°, allerdings sind hier die Wellenhöhen ohnehin, d. h. bereits beim bestehenden Zustand relativ gering.

Mit geschätzten Baukosten einschließlich Baunebenkosten von 2.630.000 € (netto) ist die Variante 4 allerdings die teuerste Variante. Als kostengünstige Alternative wäre die Variante

1 möglich, für die mit Baukosten einschließlich Baunebenkosten von 1.180.000 € (netto) nur etwa die Hälfte der Kosten anfallen. Insbesondere für die Wellenrichtungen 210° und – teilweise (Bereich Yachthafen) – 240° ist die Reduzierung der Wellenhöhen bei Variante 1, insbesondere im Vergleich zu Variante 4, aber auch zu den Varianten 2 und 3, vergleichsweise gering. Bei besonderem Augenmerk auf den Bereich des Yachthafens ist daher Variante 1 nur eingeschränkt zu empfehlen.

Aus Sicht einer möglichen Genehmigungsfähigkeit erscheint von allen Varianten die Variante 1 am leichtesten umsetzbar, da hier am wenigsten Wattboden zu überbauen ist. Alle anderen Varianten sind diesbezüglich nach derzeitigem Stand nur schwer in einem realistischen Zeitrahmen umsetzbar, da der erforderliche erhebliche Kohärenzausgleich nur sehr schwer umsetzbar erscheint.

## **5. ERFORDERLICHE ZUSÄTZLICHE UNTERSUCHUNGEN**

Für die Aufstellung eines baureifen Entwurfs sind die folgenden ergänzenden Untersuchungen erforderlich:

a) Baugrund:

Zur Beurteilung der Standsicherheit und des Setzungsverhaltens des neuen Leitdamms sowie zur Gründungsbeurteilung und statischen Berechnung der Fangedammkonstruktion sind geotechnische Aufschlüsse und ein geotechnisches Gutachten erforderlich.

b) Vermessung:

Für die Aufstellung eines Entwurfs ist eine Ingenieurvermessung erforderlich.