

Planfeststellungsverfahren

für den
Ersatz der beiden Kleinen Schleusenammern und
Anpassung der Vorhäfen in Kiel-Holtenau

VORHABENTRÄGER:

WASSERSTRASSEN- UND SCHIFFFAHRTSAMT KIEL-HOLTENAU

SCHLEUSENINSEL 2

24159 KIEL-HOLTENAU



5.12

Seegangsuntersuchung

Seegangsuntersuchung für die Schleusen in Kiel-Holtenau

Version 1-2017



Christiane Eichmanns, M.Sc. RWTH
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf

Bericht 1-2017.B2017008

Seegangsuntersuchung für die Schleusen in Kiel-Holtenau

Version 1-2017

Christiane Eichmanns, M.Sc. RWTH
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf

Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe-Str. 17
D-52056 Aachen

Aachen, im Juli 2017

Inhalt

1	Veranlassung und Vorgehensweise	1
2	Zusammenstellung der hydrologischen und hydraulischen Eingangsgrößen	3
2.1	Wasserstand	3
2.2	Wind	5
2.3	Maßgebender Seegang	8
2.4	Wasserstand-Seegangs-Korrelation	10
2.5	Strömungsgeschwindigkeiten	11
3	Seegangsmodellierung mit SWAN	12
3.1	Einführung	12
3.2	Untersuchungsmatrix	12
3.3	Topographie des Untersuchungsgebiet	13
3.4	Gitternetzerstellung	14
3.5	Modelleinstellungen	14
3.6	Ergebnisdarstellung für ausgewählte Positionen	15
4	Ergebnisse der Seegangsmodellierung	16
4.1	Allgemein	16
4.2	Signifikante Wellenhöhe	18
4.3	Wellenlänge	20
5	Wellenüberlauraten	21
5.1	Zulässige Wellenüberlauraten	21
5.2	Ermittlung der mittleren Wellenüberlauraten für die Schleusentore	24
5.2.1	Auslasskanal	24
5.2.2	Kleine Schleuse	24
5.2.3	Große Schleuse	25
5.2.4	Retention Nord-Ostsee-Kanal	25
6	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	26

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schleusenanlage Kiel-Holtenau (basierend auf GoogleMaps, 2017; WSA Kiel, 2017)	1
Abbildung 2:	Pegel Station Kiel-Holtenau (WSA Lübeck, 2017)	3
Abbildung 3:	Maximale Wasserstände am Pegel Kiel-Holtenau (basierend auf WSA Lübeck, 2015)	3
Abbildung 4:	Hochwassergefahren mit Referenzwasserstände RHW200 des Landes Schleswig-Holsteins an der Kieler Bucht (MELUR, 2012).....	4
Abbildung 5:	Täglich gemittelte Windgeschwindigkeiten an der Station Kiel-Holtenau (basierend auf DWD, 2016).....	6
Abbildung 6:	Stündlich gemittelte Windgeschwindigkeiten an der Station Kiel-Holtenau (basierend auf DWD, 2016).....	6
Abbildung 7:	Windrose mit maximal, stündlich gemittelten Windgeschwindigkeiten für die Jahre 2014 bis 2016 am Pegel Kiel-Holtenau Holtenau (basierend auf DWD, 2016).....	7
Abbildung 8:	Pegel Station Leuchtturm Kiel (WSA Lübeck, 2017)	8
Abbildung 9:	Signifikante Wellenhöhe am Pegel LT Kiel (basierend auf BSH, 2015).....	9
Abbildung 10:	Wellenangriffsrichtung am Pegel LT Kiel (basierend auf BSH, 2015).....	9
Abbildung 11:	Hochwässer seit 1993 am Pegel Kiel-Holtenau	10
Abbildung 12:	Bathymetrie am Untersuchungsgebiet der Kieler Förde.....	13
Abbildung 13:	Bathymetrie am Untersuchungsgebiet der Schleusen Kiel-Holtenau	14
Abbildung 14:	Ausgewählte Positionen zur Bestimmung des Einflusses verschiedener Parameter auf den Seegang in Kiel-Holtenau (basierend auf GoogleMaps, 2017).....	15
Abbildung 15:	Signifikante Wellenhöhe für Simulation 20.....	16
Abbildung 16:	Mittlere Wellenperiode für Simulation 20	17
Abbildung 17:	Wellenangriffsrichtung für Simulation 20.....	17
Abbildung 18:	Signifikante Wellenhöhe in Abhängigkeit der Windrichtung und -geschwindigkeit.....	18
Abbildung 19:	Mittlere Wellenlänge für Simulation 20	20
Abbildung 20:	Zulässige Wellenüberlaufsraten nach EAK (2002)	22

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Simulationsmatrix für durchgeführte Seeganguntersuchungen	12
Tabelle 2:	Durchgeführte Simulationen für Sensitivitätsstudie	13
Tabelle 3:	Simulationsergebnisse der signifikanten Wellenhöhe bei Bemessungswind in Abhängigkeit variierender Windgeschwindigkeiten und -richtungen	18
Tabelle 4:	Simulationsergebnisse der signifikanten Wellenhöhe für Sensitivitätsanalyse	19
Tabelle 5:	Berechnete Wellenlänge nach Airy-Laplace (1845)	20
Tabelle 6:	Zulässige Wellenüberlaufsraten für Baukonstruktionen wie Wellenbrecher, Uferdämmen, Deichen und Dämmen	23
Tabelle 7:	Zulässige Wellenüberlaufsraten zum Schutz des Eigentums hinter dem Schutzbauwerk	23
Tabelle 8:	Zulässige Wellenüberlaufsraten zum Schutz von Mensch und Fahrzeug	23

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BHW	Bemessungshochwasser
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
DOD	Deutsches Ozeanographische Datenzentrum
DWD	Deutscher Wetterdienst
EAK	Empfehlungen des Ausschusses Küstenschutzbauwerke
IWW	Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
LKN	Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz
LT	Leuchtturm
MELUR	Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume
mNHN	Meter über Normalhöhennull
NOK	Nord-Ostsee Kanal
RWTH	Rheinisch Westfälische Technische Hochschule
SH	Schleswig-Holstein
WSA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung

1 Veranlassung und Vorgehensweise

Die Schleusen in Kiel-Holtenau stellen die Einfahrt zum rund 100 km langen Nord-Ostsee-Kanal (NOK) dar, welcher die Verbindung zwischen den Städten Kiel und Brunsbüttel schafft (vgl. Abbildung 2). Durch den NOK wird die Schiffspassage um das Skagerrak um knapp 1.000 km verkürzt (BROCKMANN *et al.*, 2008), weswegen diesem Kanal eine hohe wirtschaftliche Bedeutung zukommt.



Abbildung 1: Lage des Nord-Ostsee-Kanal (WSA KIEL, 2017)

Die Schleusenanlagen des NOK in Kiel-Holtenau bestehen insgesamt aus einem Auslassbauwerk, einer Kleinen und einer Großen Schleuse mit je zwei Schleusenkammern. Die Öffnung der Kleinen Schleuse zeigt in Richtung Ost und die Große Schleuse in Richtung Ostsüdost. Die Schleusenanlage mündet in die Kieler Förde, die wiederum selber im Norden mit der Kieler Bucht als westlicher Teil der Ostsee verbunden ist (vgl. Abbildung 2).

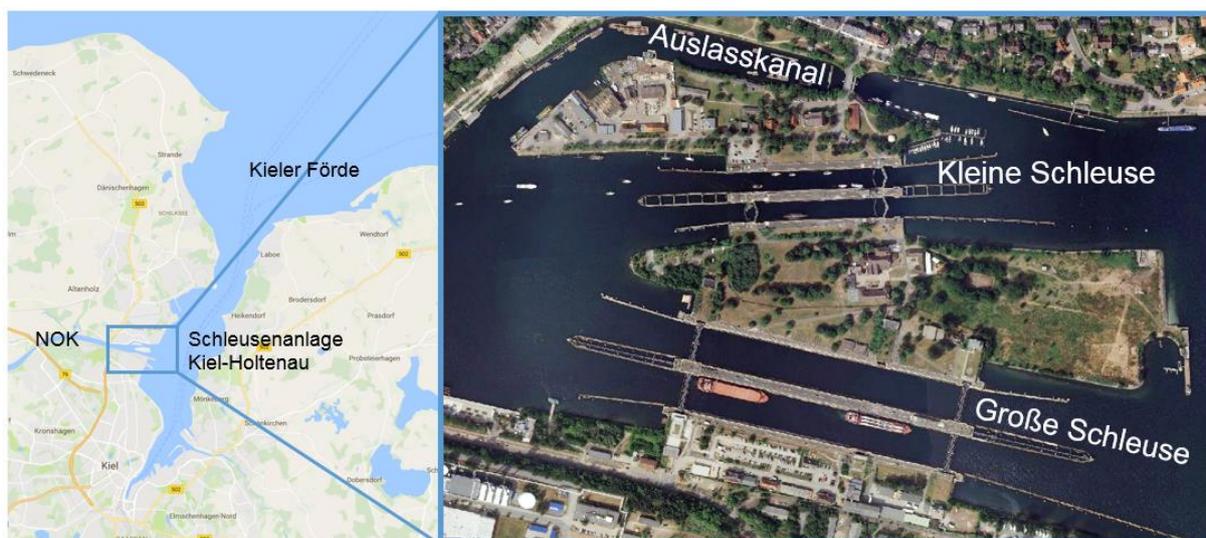


Abbildung 2: Schleusenanlage Kiel-Holtenau (basierend auf GOOGLEMAPS, 2017; WSA KIEL, 2017)

Die Schleusen Kiel-Holtenau haben nicht nur eine Verkehrsfunktion, sondern sind gleichzeitig Element der Küstenschutzlinie des Landes Schleswig-Holstein und erfüllen damit auch eine wichtige Funktion im Rahmen des Sturmflut- und Hochwasserschutzes. Da die Schleusenanlage nicht Bestandteil des Generalplan Küstenschutzes (MELUR, 2012) ist, muss im Rahmen der geplanten Grundinstandsetzung der Schleusenanlage Kiel-Holtenau die Bemessung der Höhen der Schleusentore erfolgen. Hierzu hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University (IWW) zur Bemessung der Stauwandhöhe der Schleusenanlage in Kiel-Holtenau beauftragt.

Um eine Überströmung des Hinterlandes zu vermeiden, muss bei der Bemessung der Stauwandhöhen der Schleusenanlage Kiel-Holtenau folgendes berücksichtigt werden:

- Ermittlung des Bemessungswasserstandes
- Ermittlung des Bemessungsseegangs
- Ermittlung der mittleren Wellenüberlauftrate
- Festlegung der Stauwandhöhen für die Schleusenanlagen Kiel-Holtenau.

2 Zusammenstellung der hydrologischen und hydraulischen Eingangsgrößen

2.1 Wasserstand

Zur Festlegung des Bemessungswasserstandes am Untersuchungsstandort der Schleusen Kiel-Holtenau sind die historischen Wasserstände des Pegels der Wetterstation Kiel-Holtenau (Messstellennummer: 9.610.066; Rechtswert = 575.164; Hochwert = 6.025.538, vgl. Abbildung 3, rote Markierung) essentiell.



Abbildung 3: Pegel Station Kiel-Holtenau (WSA LÜBECK, 2017)

Hierzu sind in Abbildung 4 die jeweiligen Jahreshöchstwerte am Pegel Kiel-Holtenau seit dem Ostseesturmhochwasser vom 13.11.1872 über das hydrologische Jahr aufgetragen. Es wird deutlich, dass im hydrologischen Jahr 1873 das höchste Hochwasser mit 2,97 Meter über Normalhöhennull (mNHN) aufgetreten ist. Das zweithöchste Hochwasser trat am 31.12.1904 mit 2,25 mNHN auf.

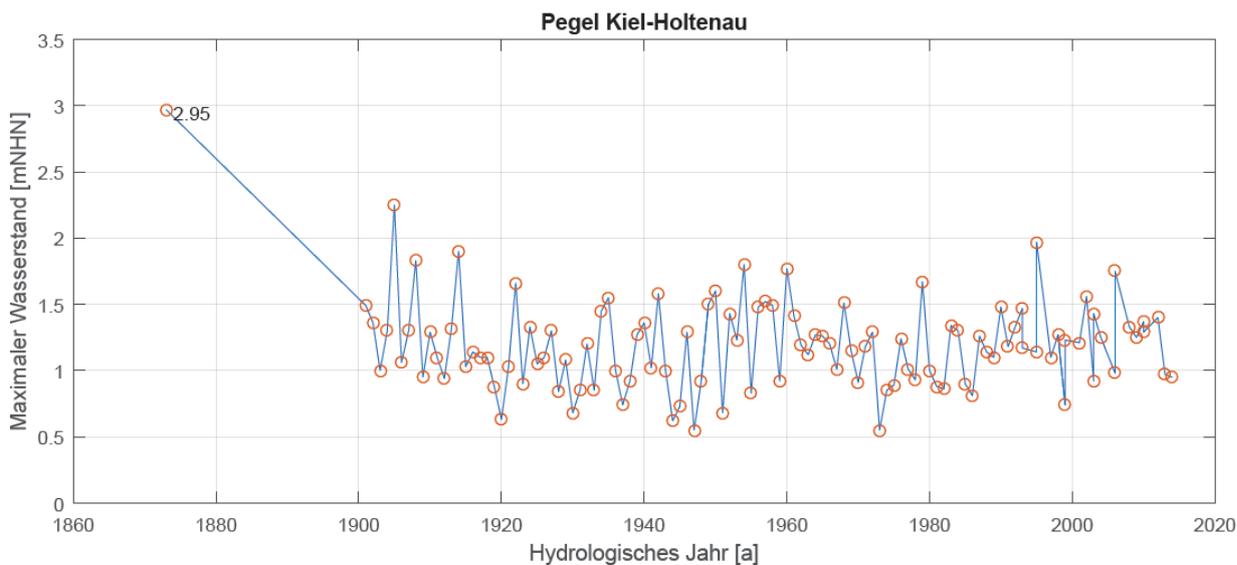


Abbildung 4: Maximale Wasserstände am Pegel Kiel-Holtenau (basierend auf WSA LÜBECK, 2015)

Nach dem Generalplan Küstenschutz Schleswig-Holstein in der Fortschreibung 2012 (MELUR, 2012) sowie in der Hochwasserrahmenrichtlinie (HWRM-RL) (2007) wird für die Bewertung von potentiell signifikanten Hochwasserrisikogebieten in Schleswig-Holstein der maßgebende Referenzwasserstand mit einem statistischen Wiederkehrintervall von 200 Jahren RHW200 (bezogen auf das Stichjahr 2020) nach dem IAWG-Verfahren (MELUR, 2012) herangezogen. Das IAWG Verfahren kombiniert die instationäre Wahrscheinlichkeitsanalyse mit einer regionalen Wahrscheinlichkeitsanalyse. Anschließend wird die Wahrscheinlichkeitsfunktion mit der Kappaverteilung (HOSKING & WALLIS, 2005) auf zwei unbekannte Parameter angewendet (LKN-SH, 2015).

Der nächstgelegene Landschutzdeich zu den Schleusen in Kiel-Holtenau befindet sich etwa 5,0 km entfernt in Friedrichsort. Nach dem Generalplan Küstenschutz Schleswig-Holstein 2012 (MELUR, 2012) wird für den Landschutzdeich Friedrichsort ein RHW200 von 2,6 mNHN festgelegt (vgl. Abbildung 5).

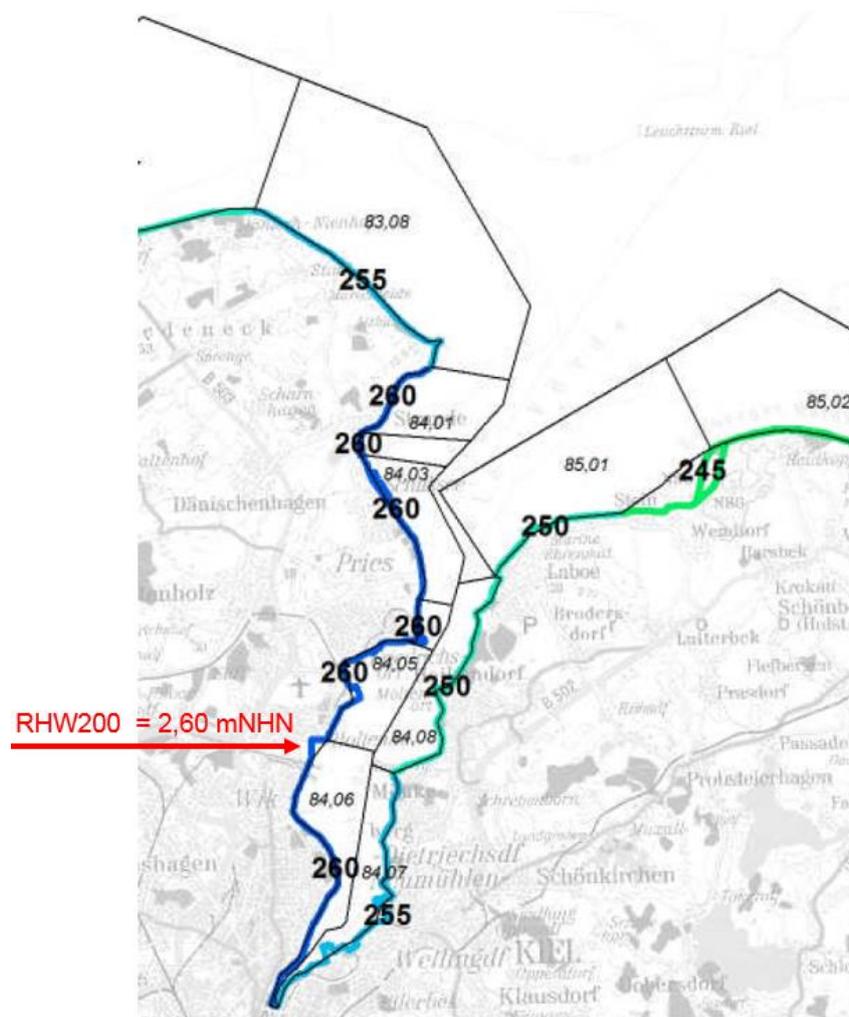


Abbildung 5: Hochwassergefahren mit Referenzwasserstände RHW200 des Landes Schleswig-Holsteins an der Kieler Bucht (MELUR, 2012)

Das BMBF-MUSTOK Vorhaben (MUDERBACH & JENSEN, 2009) hat ebenfalls das RHW200 definiert und für die Deutsche Ostseeküste eine statistische Extremwertanalyse von Wasserständen durchgeführt. Als Datengrundlage werden am Pegel Kiel-Holtenau die Pegelstände von 1901 bis 2006 herangezogen.

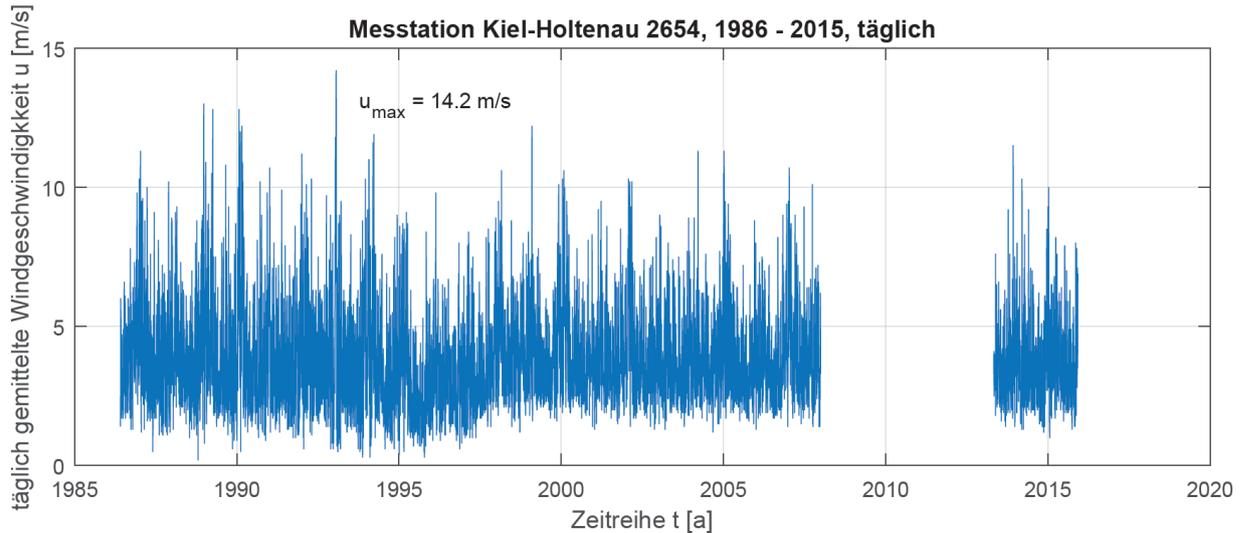


Abbildung 6: Täglich gemittelte Windgeschwindigkeiten an der Station Kiel-Holtenau (basierend auf DWD, 2016)

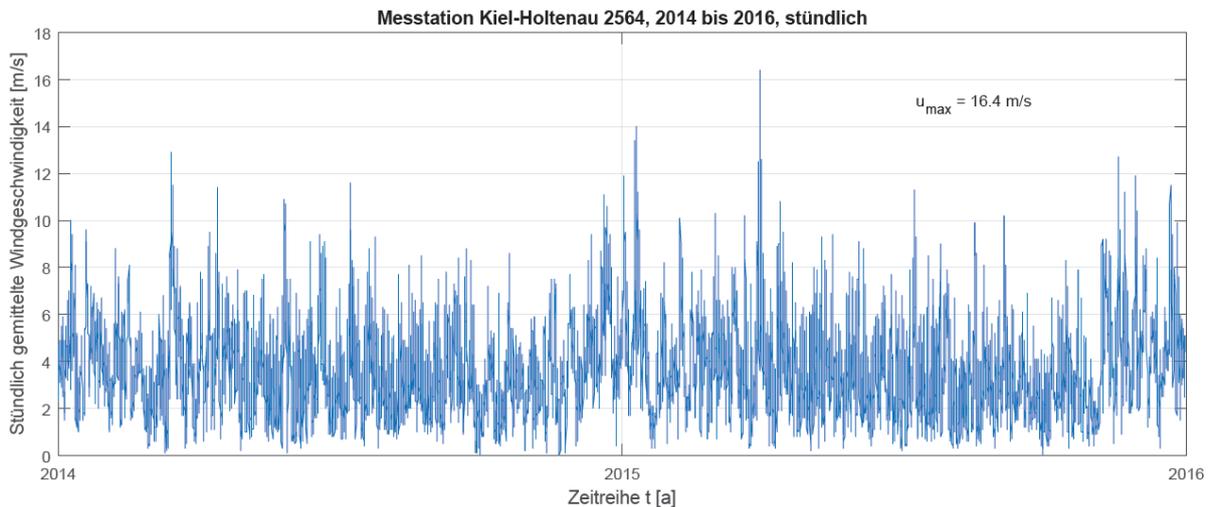


Abbildung 7: Stündlich gemittelte Windgeschwindigkeiten an der Station Kiel-Holtenau (basierend auf DWD, 2016)

Für die täglich gemittelten Windgeschwindigkeiten ergibt sich ein Maximum von 14,2 m/s sowie entsprechend für die stündlich gemittelten Windgeschwindigkeiten ein Maximum von 16,4 m/s.

Zur Darstellung der Windrichtung sind in Abbildung 8 die maximalen, stündlich gemittelten Windgeschwindigkeiten in einer Windrose aufgetragen. Die maximalen Windgeschwindigkeiten treten im Sektor zwischen 40° bis 80° und zwischen 250° und 290° auf. Bei Windrichtungen aus dem Sektor zwischen 40° und 80° werden Windgeschwindigkeiten von durchschnittlich 11,0 m/s erreicht, wobei das Geschwindigkeitsmaximum von 11,7 m/s bei einer Windrichtung von 60° erreicht wird. Bei Winden aus der Richtung 250° bis 290° werden Geschwindigkeiten von durchschnittlich 14,2 m/s erreicht. Hier liegt bei 280° das Geschwindigkeitsmaximum von 16,7 m/s vor.

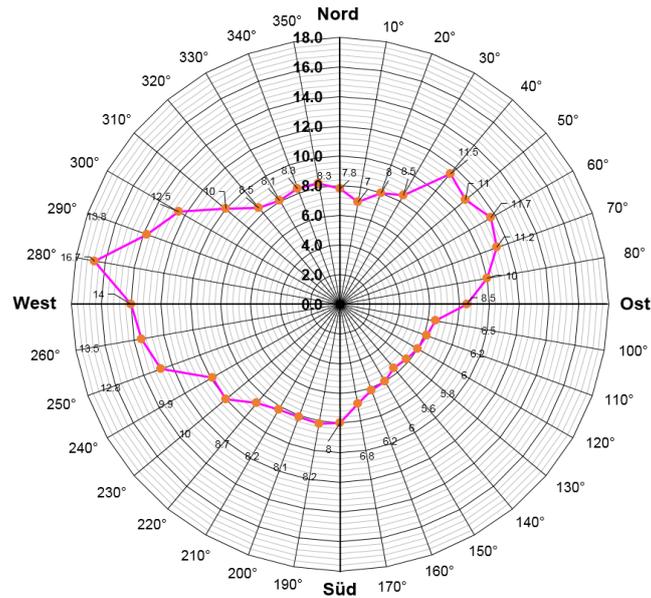


Abbildung 8: Windrose mit maximal, stündlich gemittelten Windgeschwindigkeiten für die Jahre 2014 bis 2016 am Pegel Kiel-Holtenau Holtenau (basierend auf DWD, 2016)

Für die Deutsche Ostseeküste liegt die sturmflutwirksame Windrichtung i.d.R. zwischen 0° (Nord) und 90° (Ost), d.h. das Sturmhochwasserstände vorwiegend durch auflandige Starkwinde aus nördlicher bis östlicher Richtung erzeugt werden, die das Wasser vor der Küstenlinie aufstauen.

Winde aus der Richtung Nordost weisen die größte Windwirklänge an der Deutschen Ostseeküste auf, wobei tendenziell geringere Streichlängen für die westliche Kieler Bucht aufgrund der geschlossenen Küstentopographie vorliegen (LKN-SH, 2015; BRUSS *et al.*, 2009). Bei Windrichtung zwischen Ost über Süd nach West wird aufgrund der Topographie das Wasser aus der Kieler Bucht zurück in die Ostsee gedrückt, sodass hier keine sturmflutwirksamen Windrichtungen vorliegen.

Aufgrund der Ausrichtung der Schleusen in Richtung Osten kann nur bei Windverhältnissen aus Nord-nordost der windinduzierte Seegang in die Kieler Förde einlaufen.

Da dieser Untersuchung nur die stündlich gemittelten Windgeschwindigkeiten für einen Zeitraum von 2014 bis 2016 vorliegen, erfolgt eine Abschätzung des Bemessungswindes unter Berücksichtigung der sturmflutwirksamen Windrichtung wie folgt:

- Windgeschwindigkeit: $U_{10} = 30 \text{ m/s}$
- Windrichtung: $\theta_{\text{Wind}} = 60^\circ$.

Im Rahmen des MUSTOK-Vorhabens wurde u.a. die Sturmflut 1872 in der Ostsee rekonstruiert. Erst bei Windgeschwindigkeiten ab 30 m/s werden die bekannte Windstau- bzw. Wasserstandskurve der Sturmflut 1872 erreicht (SCHMITZ, 2007). Die maximale Windgeschwindigkeit von 30 m/s wurde im Rahmen eines Fachgespräches am IWW am 21.02.2017 vereinbart. Die Annahme einer maximalen Windgeschwindigkeit von 30 m/s hat sich bereits bei der Seegangsbeurteilung an den Schleusen Brunsbüttel bewährt und wird somit hier übernommen (SCHÜTTRUPF & HORSTEN, 2010). Die Bemessungswindrichtung entspricht für die Jahre 2014 bis 2016 dem Maximum aus sturmflutwirksamer Windrichtung (vgl. Abbildung 8). Für die exakte Bestimmung des Bemessungswindes ist ein Gutachten des DWDs üblich,

welcher auf Grundlage von Langzeitreihen die Extremwerte der Windgeschwindigkeiten für verschiedene Wiederkehrperioden auswertet.

Um die Unsicherheiten in der Festlegung des Bemessungswindes in der Bauwerksbemessung zu berücksichtigen, wird eine Variation der Windgeschwindigkeiten und -richtungen im Sinne einer Sensitivitätsanalyse vorgenommen. Für die Simulationen werden folglich die Windrichtungen von West (270°) über Nord (0°) nach Ost (90°) in jeweils 10° Schritten erhöht und Windgeschwindigkeiten von 20 m/s, 25 m/s und 30 m/s angesetzt.

2.3 Maßgebender Seegang

Die Grundlage für die Festlegung des maßgebenden Seegangs ist der Pegel Leuchtturm Kiel (LT Kiel; Hochwert = 574.968, Rechtswert = 6.025.221, vgl. Abbildung 9, rote Markierung), welcher sich ca. 15 km seeinwärts von den Schleusen Kiel-Holtenau in der Kieler Bucht befindet.



Abbildung 9: Pegel Station Leuchtturm Kiel (WSA LÜBECK, 2017)

Für den Pegel LT Kiel liegen die signifikante Wellenhöhen mit entsprechender Peak-Wellenperiode und Wellenangriffsrichtung vom 01.10.2011 bis 01.10.2015 vom Deutschen Ozeanographischen Datenzentrum (DOD) (BSH, 2015) vor. In Abbildung 10 ist die signifikante Wellenhöhe in Abhängigkeit der Peak-Wellenperiode (oben) und die entsprechende Häufigkeitsverteilung der signifikanten Wellenhöhe (unten) aufgetragen. Die rote Markierung zeigt den ausgewählten Bemessungsseegang, welcher das absolute Maximum zwischen den Jahren 2011 und 2015 darstellt.

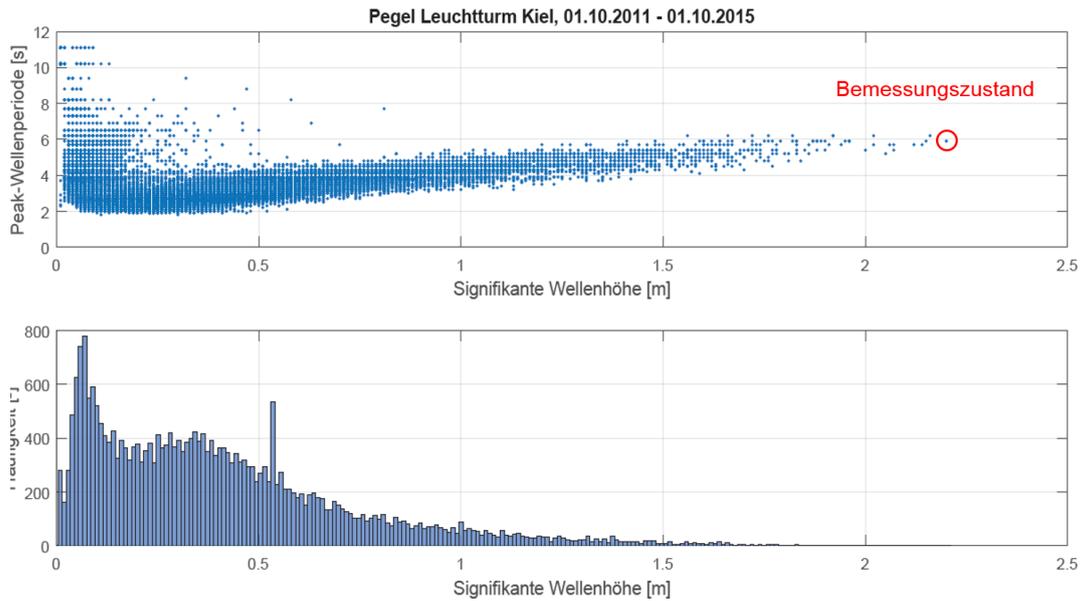


Abbildung 10: Signifikante Wellenhöhe am Pegel LT Kiel (basierend auf BSH, 2015)

In Abbildung 11 ist die Wellenangriffsrichtung in Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhe (oben) und entsprechend die Häufigkeitsverteilung der signifikanten Wellenhöhe (unten) aufgetragen.

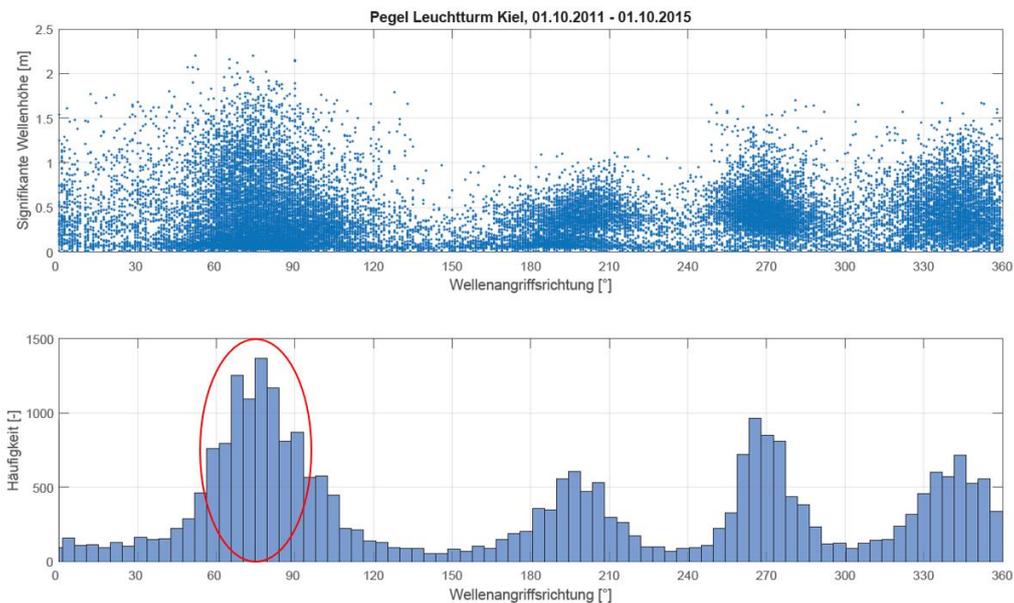


Abbildung 11: Wellenangriffsrichtung am Pegel LT Kiel (basierend auf BSH, 2015)

Anhand des Histogramms wird deutlich, dass vermehrt verstärkter Seegang am Leuchtturm Kiel im Zeitraum vom 01.10.2011 bis zum 01.10.2015 bei Wellenangriffsrichtungen zwischen 60° und 90° aufgetreten ist (rote Markierung). Am 09./10.03.2013 trat der maximale Seegang am Leuchtturm Kiel mit einer gemittelten Wellenangriffsrichtung von $\theta_{\text{Wellen}} = 63^\circ$ auf (BSH, 2015).

Für den Bereich der Schleusen Kiel-Holtenau werden die folgenden Seegangparameter als Eingangsgrößen auf Höhe des Leuchtturm Kiels für die numerische Seegangssimulation festgelegt:

- Signifikante Wellenhöhe $H_{1/3} = 2,2 \text{ m}$
- Wellenperiode: $T_m = 5,9 \text{ s}$
- Wellenangriffsrichtung: $\theta_{\text{Wellen}} = 63^\circ$
- Spreading: $s = 4$, kurzkämmig

Ein spreading von $s = 4$ entspricht der Wellenausbreitung von Windwellen (DELFT3D-WAVE, 201; GODA, 2009). Um die Unsicherheiten in der Festlegung der Bemessungsseegangs ebenfalls zu berücksichtigen, wird eine Variation der Seegangsparameter vorgenommen. Für die Simulationen wird folglich der Seegang sowohl erhöht als auch reduziert. Genauere Werte sind Tabelle 2 zu entnehmen.

2.4 Wasserstand-Seegangs-Korrelation

Wasserstands-Seegangs-Korrelationen wie an der Nordsee sind nicht auf die Ostsee übertragbar. Das MUSTOK-Vorhaben (BORK & MÜLLER-NAVARRA, 2009) hat für die Ostsee eine Untersuchung bezüglich der Korrelation zwischen Wasserstand und Seegang durchgeführt, welche zeigt, dass die maximalen Windgeschwindigkeiten nicht mit den maximalen Wasserständen korrelieren. Die Untersuchung der Kieler Förde im Rahmen des MUSTOK-Vorhabens ist jedoch nicht kleinskalig genug, sodass in dieser Arbeit die Hochwässer seit 1993 in Abhängigkeit der Windverhältnisse gesondert untersucht werden. In Abbildung 12 sind für die jeweiligen Hochwässer die entsprechenden Windgeschwindigkeiten und -richtungen aufgetragen.

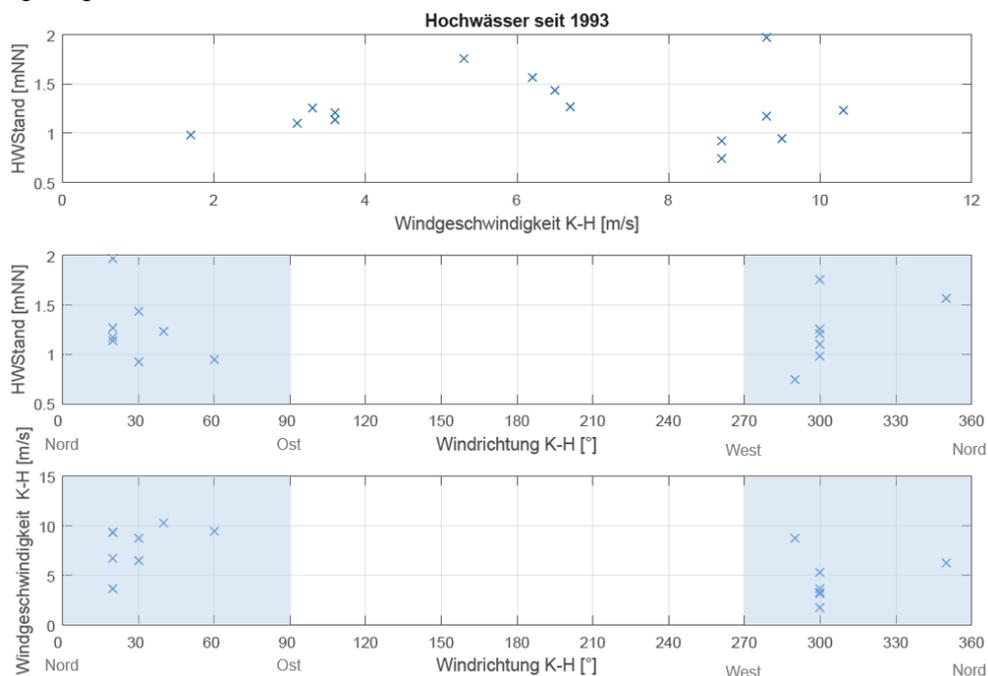


Abbildung 12: Hochwässer seit 1993 am Pegel Kiel-Holtenau

Die Hochwässer seit 1993 traten vorwiegend bei Windrichtungen um die 30° (Nordnordost) bzw. 300° (Westnordwest) bei maximalen Windgeschwindigkeiten von 12 m/s auf. Diese Windrichtungen entsprechen, wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben, den sturmflutwirksamen Windsektoren für die Kieler Förde. Die gemessenen Windgeschwindigkeiten entsprechen aber nicht den maximal aufgetretenen Windgeschwindigkeiten am Pegel Kiel-Holtenau. Das bedeutet, dass die Hochwasserstände nur sehr schwach mit den Maximalwerten von Windgeschwindigkeiten korrelieren, sodass das Auftreten von hohem See-

gang nicht an bestimmte (hohe) Wasserstände gebunden zu sein scheint. Eine Korrelation von Wasserstand und Seegang ist daher als schwach einzustufen, welches mit den Ergebnissen des MUSTOK-Vorhabens (BORK & MÜLLER-NAVARRA, 2009) für die Deutsche Ostsee übereinstimmt.

Dies kann auf die komplexe Topographie der Deutschen Ostseeküste zurückgeführt werden, welche ein zeitgleiches Zusammentreffen von extremen Wasserständen und extremen Seegang verhindert. Der Seegang reagiert schneller auf veränderte Windverhältnisse als der Wasserstand, sodass der maximale Seegang zumeist zeitlich vor dem Scheitelwasserstand auftritt. Somit ist zum Zeitpunkt des Scheitelwasserstands der Seegang geringer als der Maximalwert. Weiter liegen vergleichsweise geringe Streichlängen für nordöstliche Bemessungswinde an der Kieler Förde im Vergleich zur Deutschen Ostseeküste vor. Des Weiteren werden durch erhöhte Rauheiten über Land die Windgeschwindigkeiten reduziert (BORK & MÜLLER-NAVARRA, 2009).

Folglich führt die Überlagerung von maximalem Wasserstand und maximalem Seegang für eine Gefährdungsabschätzung zu einer Überhöhung der Ergebnisse. Somit liegen die Bemessungsparameter auf der „sicheren Seite“.

2.5 Strömungsgeschwindigkeiten

Es kann davon ausgegangen werden, dass bei maximalen Sturmflutwasserständen nur noch geringe Strömungsgeschwindigkeiten zum Zeitpunkt des Sturmflutscheitels im Nahbereich der Schleusen vorliegen. Deswegen werden die Strömungsgeschwindigkeiten hier nicht weiter berücksichtigt (SCHÜTTRUMPF & HORSTEN, 2010).

3 Seegangmodellierung mit SWAN

3.1 Einführung

SWAN ist ein Modul der Software Delft3D, welches ein an der TU Delft entwickeltes spektrales Seegangmodell darstellt. Es berechnet für kurzkämmigen Seegang die vom Wind erzeugten Wellen in Küsten- und Ästuarbereichen. Im Rahmen dieses Projektes wird SWAN als spektrales Seegangmodell 3. Ordnung verwendet. Dies bedeutet, dass die entsprechenden Ansätze zur Wellenentwicklung, zum White-Capping (Wellenbrechen im Tiefwasser durch Überschreitung der Grenzsteilheit) und zu den Quadrupels und den Triad-Interaktionen (Nicht-lineare Wellen-Wellen-Interaktionen) berücksichtigt werden (SCHÜTTRUMPF & HORSTEN, 2010; DELFT3D, 2014).

3.2 Untersuchungsmatrix

Aus den verfügbaren Daten für Wasserstand, Seegang und Wind kann die Untersuchungsmatrix für die Festlegung der maßgebenden Bemessungsparameter erstellt werden, welche in Tabelle 1 dargestellt ist. Die Untersuchungsmatrix berücksichtigt die in Kapitel 2 durchgeführten Voruntersuchungen und wurde in Absprache mit der BfG und der WSV Kiel am 21.02.2017 festgelegt.

Tabelle 1: Simulationsmatrix für durchgeführte Seeganguntersuchungen

Simulation	BHW [mNHN]	Seegang			U ₁₀ [m/s]	Θ _{Wind} [°]
		H _{1/3} [m]	T [s]	Θ _{Welle} [°]		
1/2/3	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	0
3/4/5	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	10
6/7/8	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	20
9/10/11	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	30
12/13/14	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	40
15/16/17	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	50
18/19/20	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	60
21/22/23	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	70
24/25/26	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	80
27/28/29	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	90
30/31/32	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	270
33/34/35	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	280
36/37/38	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	290
39/40/41	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	300
42/43/44	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	310
45/46/47	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	320
48/49/50	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	330
51/52/53	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	340
54/55/56	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	350
57/58/59	3,1	2,2	5,9	63	20/ 25/ 30	360

Zusätzlich wird im Rahmen einer Sensitivitätsstudie der Seegang am Rand des Modellgebietes erhöht bzw. erniedrigt sowie der Bemessungswasserstand variiert. Weiter wird die Wellenangriffsrichtung verändert. Bei allen Simulationen wird der Bemessungswind von 30 m/s mit einer Windrichtung von 60° untersucht (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Durchgeführte Simulationen für Sensitivitätsstudie

Simulation	BHW [mNHN]	Seegang			U ₁₀ [m/s]	Θ _{Wind} [°]
		H _{1/3} [m]	T [s]	Θ _{Welle} [°]		
60	2,8	2,2	5,9	63	30	60
61	3,1	1,5	4,0	63	30	60
62	3,1	3,0	7,0	63	30	60
63	3,1	2,2	5,9	330	30	60

3.3 Topographie des Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst die Kieler Förde und wurde ausgewählt, um den Bemessungsseegang bei Kiel-Holtenau unter Berücksichtigung lokaler Effekte im unmittelbaren Nahbereich der Schleusen möglichst naturnah zu ermitteln. Die Topographie im Untersuchungsgebiet wurde von der BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (BAW, 2013) in Form eines Digitalen Geländemodells zur Verfügung gestellt (vgl. Abbildung 13).

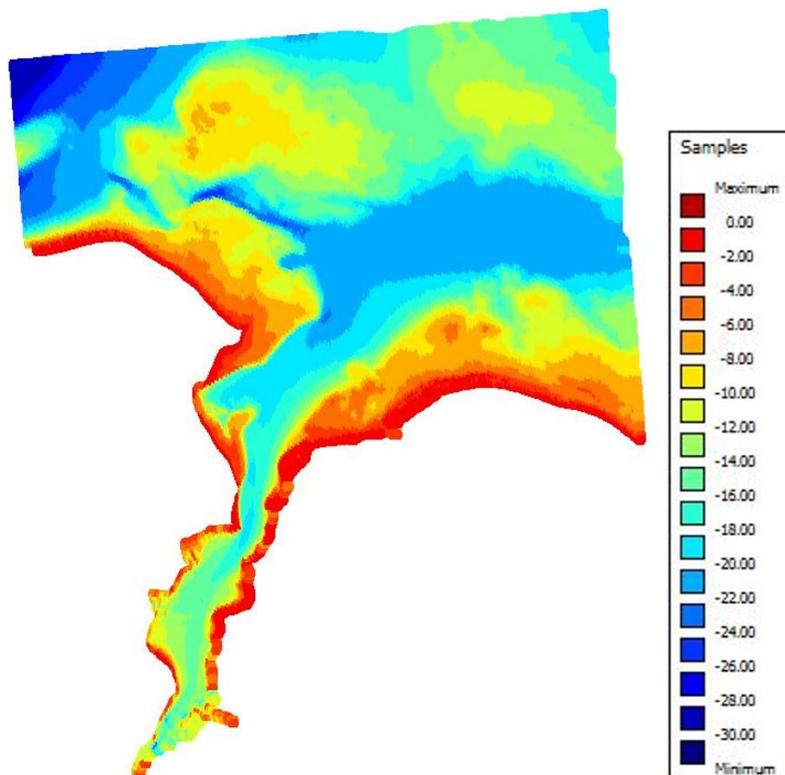


Abbildung 13: Bathymetrie am Untersuchungsgebiet der Kieler Förde

Ein Detail der Modelltopographie im Schleusenbereich ist in Abbildung 14 dargestellt.

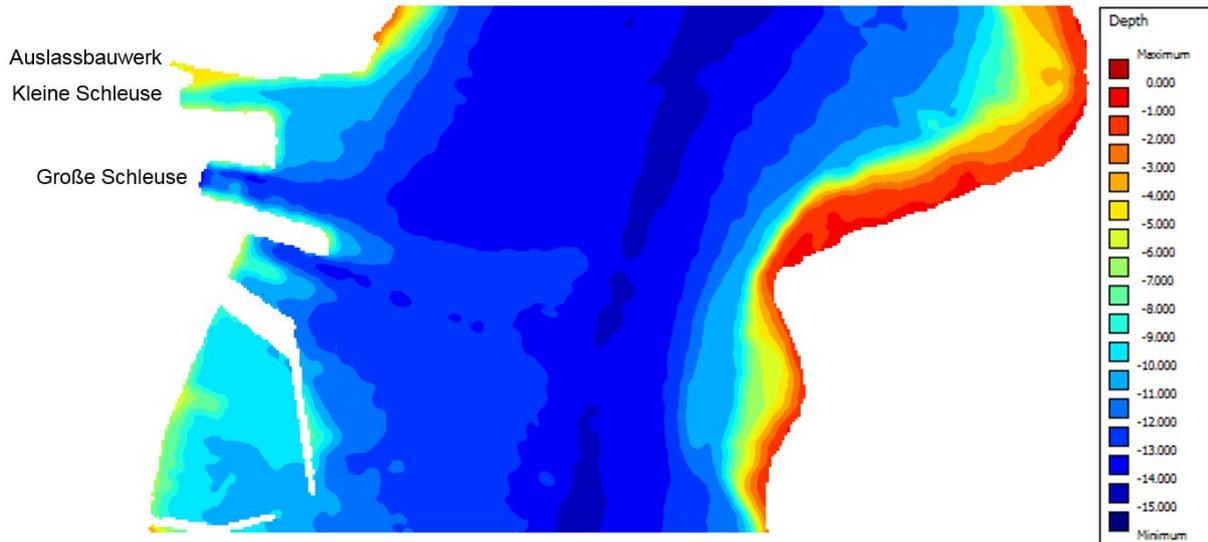


Abbildung 14: Bathymetrie am Untersuchungsgebiet der Schleusen Kiel-Holtenau

3.4 Gitternetzerstellung

Bei der Seegangmodellierung mit der Software SWAN für die Kieler Förde bzw. die Schleusenanlage Kiel-Holtenau wurde das Nesting-Verfahren verwendet. Der windinduzierte Seegang wird im Gesamtmodell durch Vorgabe von Windrichtung und Windgeschwindigkeit und Bemessungsseegang am Pegel Kieler Leuchtturm (Hochwert = 574.968, Rechtswert = 6.025.221) generiert und somit hier die Modellgrenze als Randbedingung definiert. Anschließend werden die Ergebnisse der Seegangmodellierung direkt an das genestete Teilmodell weitergegeben, um dort den Seegang in der Schleusenzufahrt unter Berücksichtigung einer erhöhten Auflösung zu berechnen. Auf dieser Grundlage kann sowohl die Seegangsentwicklung in der Kieler Förde mit dem Gesamtmodell (vgl. Abbildung 13) wie auch im Nahbereich der Schleusen Kiel-Holtenau (vgl. Abbildung 14) mit dem Teilmodell bestimmt werden.

Aufgrund der Auflösung des zur Verfügung stehenden Digitalen Geländemodells, der verfügbaren Rechnerkapazitäten und der Umsetzungsmöglichkeit von SWAN wurde für das genestete Modell des Untersuchungsgebiets der Schleusen Kiel-Holtenau ein quadratisches Gitternetz mit einer Auflösung von 10 m x 10 m und für das Gesamtmodell der Kieler Förde eine Auflösung von 100 m x 100 m gewählt. Diese Auflösung ist ausreichend genau, um die Wellenentwicklung für die vorliegende Fragestellung zu berechnen. Eine höhere Auflösung wie bei hydro-numerischen Strömungssimulationen ist nicht erforderlich, da die Auflösung und die Stabilität des numerischen Lösungsverfahrens nicht von der Strömungsgeschwindigkeit abhängen (SCHÜTTRUMPF & HORSTEN, 2010).

3.5 Modelleinstellungen

Für die Berechnung der mittleren Überlaufrate nach EUROTOP-MANUAL (2016) ist die einlaufende Welle entscheidend, sodass Einflüsse wie Transmission und Reflexion bei geschlossenen Schleusentoren für die Berechnung nicht berücksichtigt und somit nicht mit der Software SWAN modelliert werden.

Der Seegang wird aufgrund von Diffraktion in Richtung der Schleuseneinfahrt gebeugt, folglich kommt es aufgrund einer Wellendiffraktion zu einer erheblichen Abnahme der Wellenhöhe. Diese wird im Rahmen der Untersuchungen nicht weiter berücksichtigt, um so eine Bemessung auf der „sicheren Seite“ durchzuführen.

Des Weiteren erfolgt bei der Simulation mit Delft3D-WAVE die Annahme eines voll ausgereiften Seegangs, welcher sich üblicherweise nach hinreichend langer Einwirkung eines konstanten Windes auf einem ausgedehnten Meeresgebiet entwickelt. Als Vergleichswert wird nach MAI *et al.* (2004) bei einer Windgeschwindigkeit von 30 m/s und einer Fetchlänge von 10 km eine Einwirkdauer des Windes von mind. 75 min angegeben, um einen ausgereiften Seegang zu generieren. In dieser Untersuchung wird direkt der ausgereifte Seegang angesetzt, sodass auch hier eine Berechnung auf der „sicheren Seite“ erfolgt.

3.6 Ergebnisdarstellung für ausgewählte Positionen

Um den Einfluss verschiedener Untersuchungsparameter auf den Seegang im Bereich der Schleusenzufahrt zu identifizieren, werden die Seegangsparameter Wellenhöhe, Wellenperiode und Wellenangriffsrichtung vor den beiden Schleusenzufahrten und dem Auslassbauwerk auf den in Abbildung 15 dargestellten Punkten ermittelt.

Sowohl für das Auslassbauwerk (Punkt 1 und Punkt 2), für die Kleine Schleuse (Punkt 3, Punkt 4, Punkt 5) als auch die Große Schleuse (Punkt 6, Punkt 7 und Punkt 8, Punkt 9, Punkt 10) werden die Mittelwerte aus den jeweiligen Punktergebnissen gebildet. Die Punkte werden parallel zu den Schleusentoren angeordnet, sodass für die Große Schleuse und das Auslassbauwerk eine Ausrichtung der Ergebnisse in Richtung Südost (vgl. Abbildung 15, rot) und entsprechend für die Kleine Schleuse in Richtung Ost (blau) erfolgt.



Abbildung 15: Ausgewählte Positionen zur Bestimmung des Einflusses verschiedener Parameter auf den Seegang in Kiel-Holtenau (basierend auf GOOGLEMAPS, 2017)

4 Ergebnisse der Seegangmodellierung

4.1 Allgemein

Die Ergebnisse der Simulation 20 sind exemplarisch für die Parameter der signifikanten Wellenhöhe (vgl. Abbildung 16), mittlere Wellenperiode (vgl. Abbildung 17) und Wellenangriffsrichtung (vgl. Abbildung 18) für die Schleusenanlage dargestellt. Dieses Szenario wird beispielhaft dargestellt, da es als Eingangsgrößen sowohl den Bemessungsseegang als auch den Bemessungswind beinhaltet. Dies bedeutet konkret:

- Signifikante Wellenhöhe $H_{1/3} = 2,2 \text{ m}$
- Wellenperiode: $T_m = 5,9 \text{ s}$
- Wellenangriffsrichtung: $\theta_{\text{Wellen}} = 63^\circ$
- Spreading: $s = 4$, kurzkämmig
- Windgeschwindigkeit: $U_{10} = 30 \text{ m/s}$
- Windrichtung: $\theta_{\text{Wind}} = 60^\circ$

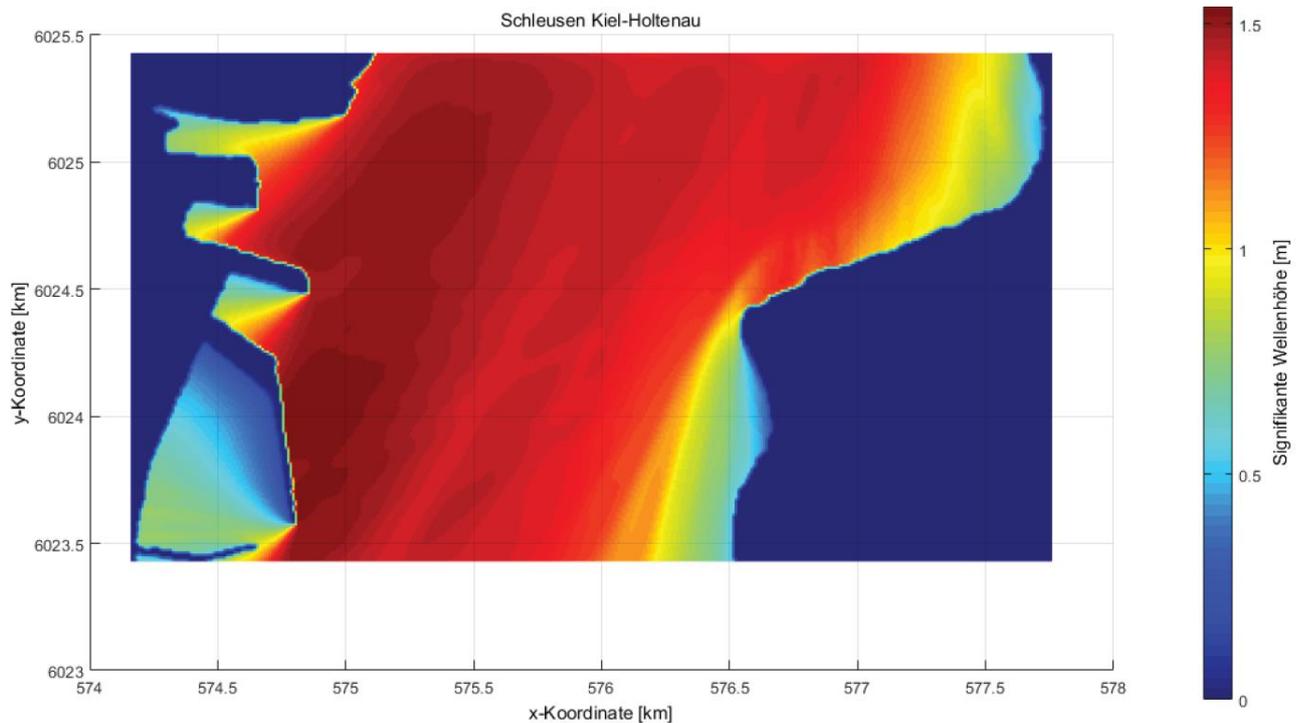


Abbildung 16: Signifikante Wellenhöhe für Simulation 20

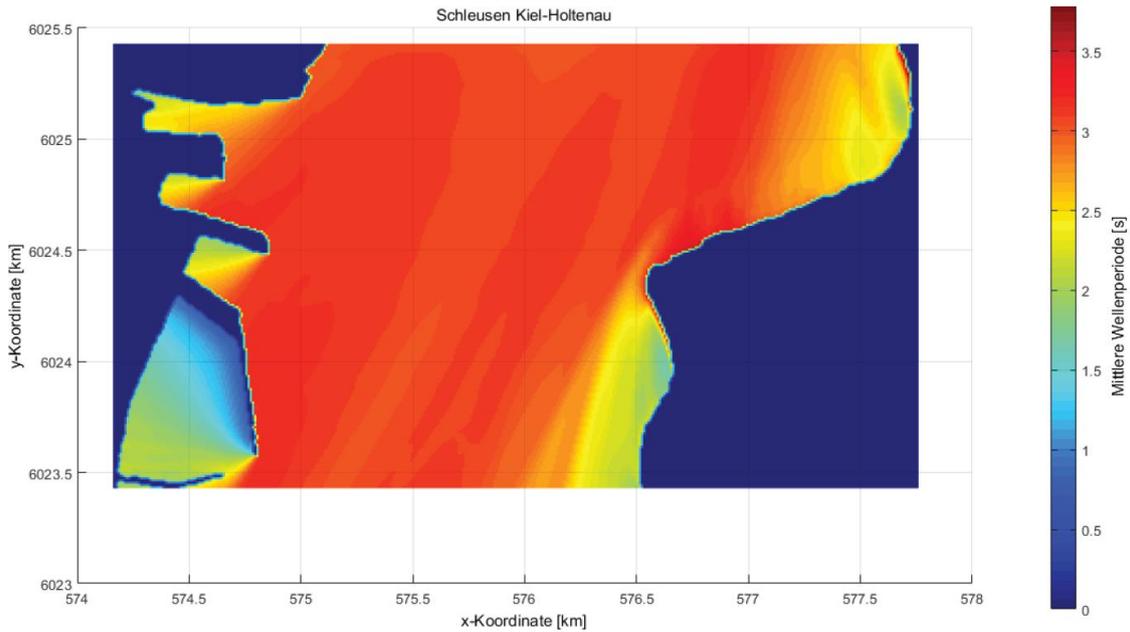


Abbildung 17: Mittlere Wellenperiode für Simulation 20

Aus den Abbildungen wird deutlich, dass der Seegang aus der Kieler Förde in nur abgeschwächter Form vor die Schleusenanlage laufen kann. Aufgrund der geografisch geschützteren Lage des Auslassbauwerks dringen bei Bemessungswind mehr Wellen vor die Kleine als auch die Große Schleuse als vor das Auslassbauwerk. Sowohl für die Kleine als auch die Große Schleuse ergeben sich gemittelt annähernd gleich hohe signifikante Wellenhöhen. Dies liegt daran, dass die Kleine Schleuse sich zwar weiter landeinwärts befindet als die Große Schleuse und somit geografisch geschützter liegt, aber die Kleine Schleuse Richtung Osten ausgerichtet ist. Die Große Schleuse ist hingegen Richtung Südost ausgerichtet. Folglich muss der Wind vor der Großen Schleuse weiter eindrehen, um das Wasser unmittelbar vor die Schleusentore zu drücken.

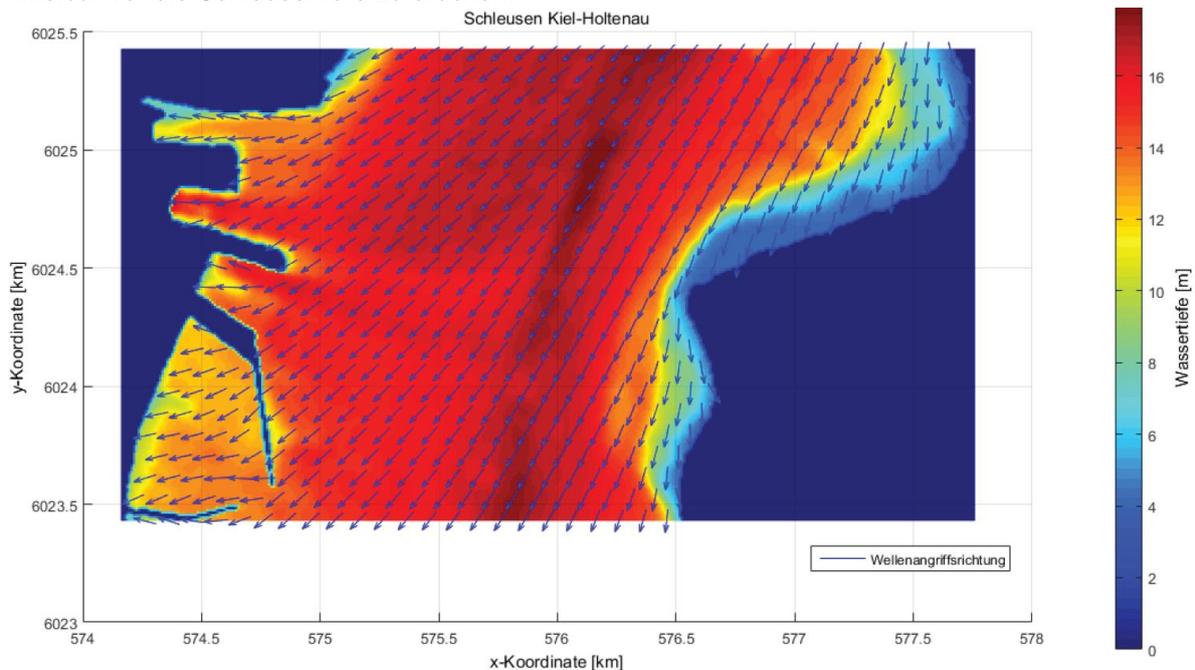


Abbildung 18: Wellenangriffsrichtung für Simulation 20

Beim Bemessungsseegang wird unmittelbar vor den Schleusentoren ein küstennormaler Wellenangriff erreicht, sodass ausgehend von der Wellenangriffsrichtung die Maximalbelastung auf die Schleusentore wirkt.

4.2 Signifikante Wellenhöhe

Vor allem sind die signifikanten Wellenhöhen entscheidend für die Ermittlung der mittleren Wellenüberlaufquote, sodass die Ergebnisse für die ausgewählten Positionen in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeiten 20 m/s, 25 m/s und 30 m/s von West über Nord nach Ost in Abbildung 19 zusammenfassend dargestellt sind.

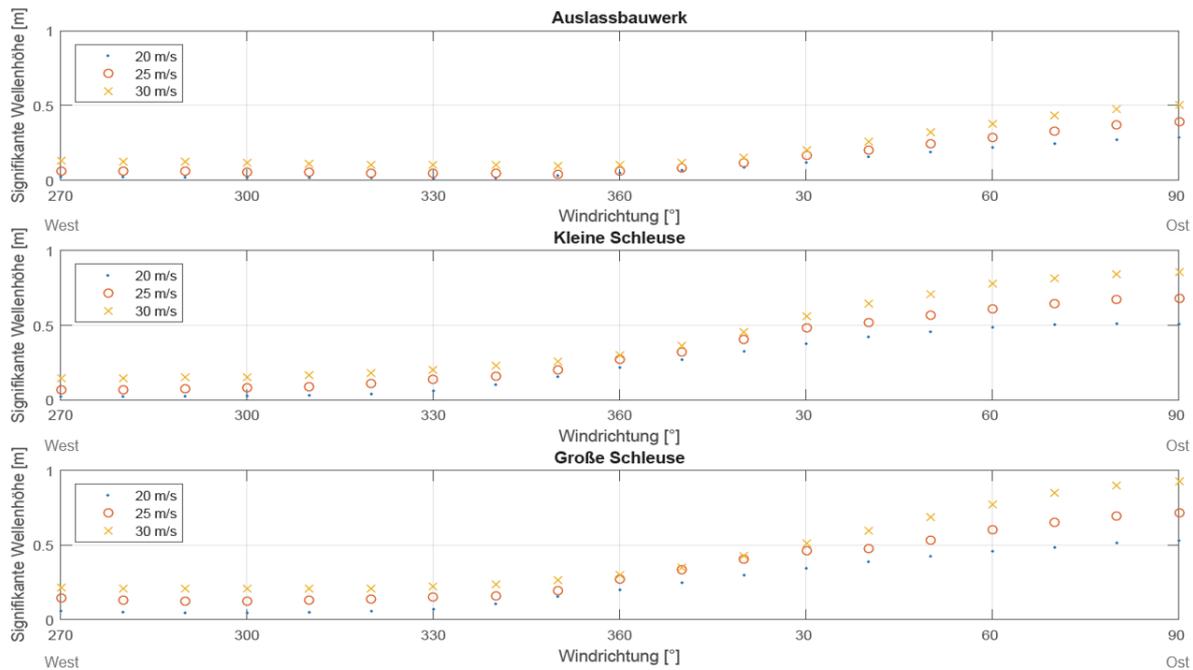


Abbildung 19: Signifikante Wellenhöhe in Abhängigkeit der Windrichtung und -geschwindigkeit

Wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben, beläuft sich die sturmflutwirksame Windrichtung bis maximal Osten. Physikalisch betrachtet ist es nicht möglich, dass Süd-Ost-Winde den Seegang vor der Schleusanlage Kiel-Holtenau in Kombination mit hohen Wasserständen in der Kieler Förde generieren, diese werden hier also nicht weiter untersucht. Die detaillierten Auswertungen der Simulationen sind in Tabelle 3 dargestellt. Die rot markierten Werte heben die Ergebnisse für den Bemessungswind hervor.

Tabelle 3: Simulationsergebnisse der signifikanten Wellenhöhe bei Bemessungswind in Abhängigkeit variierender Windgeschwindigkeiten und -richtungen

	Signifikante Wellenhöhe [m]								
	Auslassbauwerk			Kleine Schleuse			Große Schleuse		
	20 m/s	25 m/s	30 m/s	20 m/s	25 m/s	30 m/s	20 m/s	25 m/s	30 m/s
270° (West)	0.02	0.06	0.13	0.02	0.07	0.15	0.06	0.14	0.22
280°	0.02	0.06	0.13	0.02	0.07	0.14	0.05	0.13	0.21
290°	0.02	0.06	0.12	0.02	0.07	0.15	0.05	0.13	0.21
300°	0.02	0.05	0.12	0.03	0.08	0.15	0.05	0.12	0.20

	Signifikante Wellenhöhe [m]								
	Auslassbauwerk			Kleine Schleuse			Große Schleuse		
	20 m/s	25 m/s	30 m/s	20 m/s	25 m/s	30 m/s	20 m/s	25 m/s	30 m/s
310°	0.02	0.05	0.11	0.03	0.09	0.16	0.05	0.13	0.20
320°	0.01	0.05	0.10	0.04	0.11	0.18	0.06	0.14	0.21
330°	0.01	0.05	0.10	0.06	0.14	0.20	0.07	0.15	0.22
340°	0.01	0.05	0.10	0.10	0.16	0.23	0.11	0.16	0.23
350°	0.03	0.04	0.10	0.16	0.20	0.26	0.15	0.20	0.26
360° (Nord)	0.05	0.06	0.10	0.22	0.27	0.30	0.20	0.27	0.30
10°	0.07	0.08	0.12	0.27	0.32	0.36	0.25	0.33	0.35
20°	0.09	0.11	0.15	0.32	0.41	0.46	0.30	0.40	0.42
30°	0.12	0.16	0.20	0.38	0.48	0.56	0.34	0.46	0.51
40°	0.16	0.20	0.26	0.42	0.52	0.65	0.39	0.47	0.60
50°	0.19	0.24	0.32	0.46	0.56	0.71	0.42	0.53	0.69
60°	0.22	0.29	0.38	0.49	0.61	0.78	0.46	0.60	0.77
70°	0.24	0.33	0.43	0.50	0.64	0.81	0.48	0.65	0.85
80°	0.27	0.37	0.47	0.51	0.67	0.84	0.51	0.69	0.90
90° (Ost)	0.29	0.39	0.50	0.51	0.68	0.85	0.53	0.72	0.93

Um die Unsicherheiten im Rahmen der festgelegten Eingangsparameter und Modelleinstellungen bei der Bauwerksbemessung zu berücksichtigen, wird eine Sensitivitätsanalyse vorgenommen. So wird der Seegang am Rand des Modellgebietes erhöht bzw. erniedrigt sowie der Bemessungswasserstand variiert. Bei allen Simulationen wird der Bemessungswind von 30 m/s mit einer Windrichtung von 60° untersucht. Für die durchgeführte Sensitivitätsanalyse sind die Ergebnisse der Simulation entsprechend in der folgenden Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Simulationsergebnisse der signifikanten Wellenhöhe für Sensitivitätsanalyse

Simulation	Eingangsparameter bei Bemessungswind				Signifikante Wellenhöhe [m]		
	BHW [mNHN]	H _{1/3} [m]	T [s]	Θ _{Welle} [°]	Auslassbauwerk	Kleine Schleuse	Große Schleuse
60	2,8	2,2	5,9	63	0.380	0.774	0.767
61	3,1	1,5	4,0	63	0.380	0.779	0.769
62	3,1	3,0	7,0	63	0.380	0.780	0.769
63	3,1	2,2	5,9	330	0.380	0.777	0.768

Es wird deutlich, dass eine Veränderung der Eingangsparameter einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die Modellierungsergebnisse haben und die Topographie und der Bemessungswind entscheidend für die Generierung des Seegangs unmittelbar vor den Schleusen Kiel-Holtenau sind. Die Simulationsergebnisse sind folglich als belastbar einzustufen.

4.3 Wellenlänge

Der Seegang stellt einen stochastischen Prozess dar, welcher durch Wellentheorien vereinfacht mathematisch räumlich und zeitlich beschrieben werden kann. Nach der Linearen Wellentheorie nach AIRY-LAPLACE (1845) wird die gemittelte Wellenlänge im Tiefwasser (Wassertiefe/ Wellenlänge >0,5) wie folgt definiert (EAK, 2002):

$$L_0 = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} [m] \quad (4.1)$$

- L_0 : Wellenlänge im Tiefwasser [m]
 g : Erdbeschleunigung [$m/(s \cdot m^2)$]
 T : Wellenperiode [s]

Mithilfe der Formel (4.1) wird für die Wellenperiode sowohl die gemittelte als auch die Peak-Wellenperiode berechnet. Daraus resultieren folgende Wellenlängen unmittelbar vor den Bauwerken für den Bemessungsfall (Simulation 20):

Tabelle 5: Berechnete Wellenlänge nach AIRY-LAPLACE (1845)

	Mittlere Wellenperiode [s]	Wellenlänge für mittlere Wellenperiode [m]	Peak-Wellenperiode [s]	Wellenlänge für Peak-Periode [m]
Auslassbauwerk	1,88	5,5	3,08	14,8
Kleine Schleuse	2,44	9,3	3,48	19,0
Große Schleuse	2,39	8,9	3,24	16,4

In Delft3D-Wave wird nach AIRY-LAPLACE (1845) ebenfalls die mittlere Wellenlänge berechnet, welche jedoch nur als Grafikdatei ausgegeben wird. In Abbildung 20 ist entsprechend die mittlere Wellenlänge im Nahbereich der Schleusen dargestellt, welches den Berechnungen in Tabelle 5 entspricht. Unmittelbar vor den Schleusentoren treten deutlich geringere Wellenlängen als an der Schleuseneinfahrt auf.

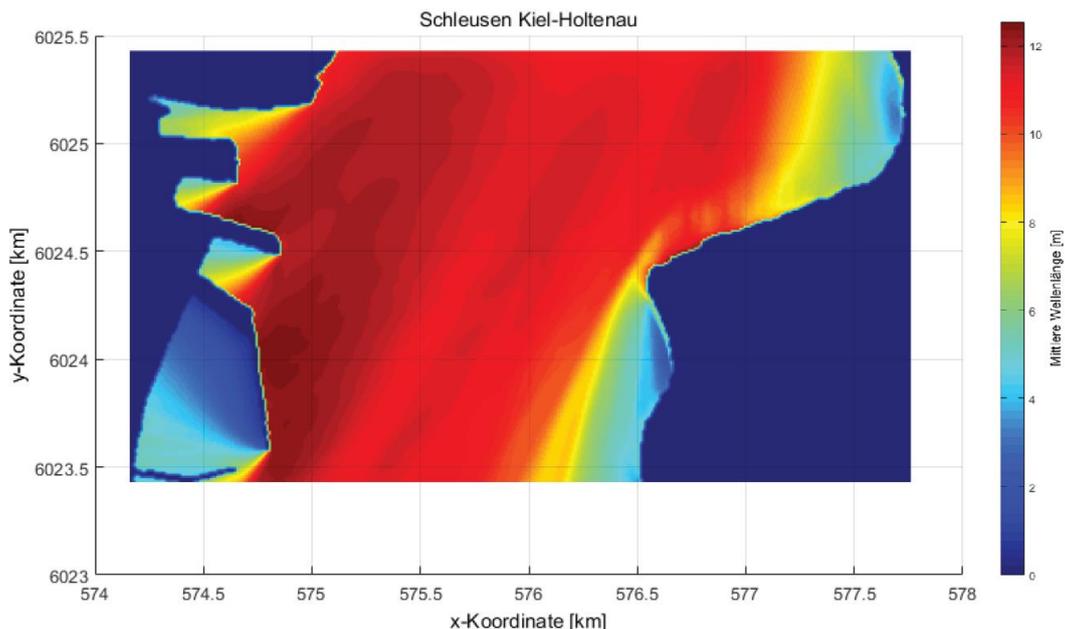


Abbildung 20: Mittlere Wellenlänge für Simulation 20

5 Wellenüberlaufsraten

5.1 Zulässige Wellenüberlaufsraten

Eine mittlere Wellenüberlaufsrate von $2,0 \text{ l/(s} \cdot \text{m)}$ wie bei Deichen ist als zulässiger Grenzwert für Schleusentore nicht sinnvoll, da die Materialeigenschaften der Tore (Stahl) keine Limitierung gegen Erosion wie das Erdbauwerk Deich besitzen und der NOK große Wellenüberlaufsraten ohne nennenswerte Wasserstandsschwankungen aufnehmen kann. Folgende zulässige Wellenüberlaufsraten sind bei der Bemessung von Schleusen zu beachten:

- **Maximal zulässige Wellenüberlaufsraten aufgrund der Standsicherheit der Außenhäupter**
Bautechnische Aspekte werden hier nicht weiter untersucht.
- **Maximal zulässige Wellenüberlaufsraten aufgrund der Auftriebssicherheit der Tore**
Bautechnische Aspekte werden hier nicht weiter untersucht.
- **Maximal zulässige Wellenüberlaufsraten aufgrund der dynamischen Beanspruchung der Schleusentore und –häupter**
Bautechnische Aspekte werden hier nicht weiter untersucht.
- **Maximal zulässige Wellenüberlaufsraten innerhalb der Schleusenkammer ohne Gefährdung von Betriebsanlagen und Ausrüstungen**
Bei Schleusenbetrieb treten in den Schleusenkammern die Wasserstände der Kieler Förde bzw. des NOK auf. Sofern der Lastfall Lenzen konstruktionsbedingt möglich ist, sind die maximal zulässigen Wellenüberlaufsraten in die Schleusenkammern ohne Gefährdung von Betriebsanlagen und Ausrüstungen zu definieren. Es gilt zu klären, welche Wassermenge im Entlastungsfall hydraulisch abgeführt werden können.
- **Maximal zulässige Wellenüberlaufsraten entsprechend der EAK (2002) für vertikale Wände**
Die EAK (2002) gibt Anhaltswerte hinsichtlich der Wirkung von Wellenüberlaufsraten für scharliegende Küstenschutzbauwerke und unterscheidet Kriterien für die funktionelle Sicherheit und die strukturelle Sicherheit der Bauwerke (vgl. Abbildung 21). Die EAK (2002) empfiehlt jedoch eine kritische Überprüfung der Werte im Einzelfall. Für die vorliegende Untersuchung sind diese Werte ungeeignet, da ein Betreten im Sturmflutfall für nicht-autorisierte Personen verboten ist. Am ehesten können für die vorliegende Untersuchung die Grenzwerte für Hochwasserschutzwände bei voller Sicherung der Binnenseite auf die Schleusen übertragen werden.

$$q_{\text{zul,EAK}} = 50 \text{ l/(s} \cdot \text{m)}$$

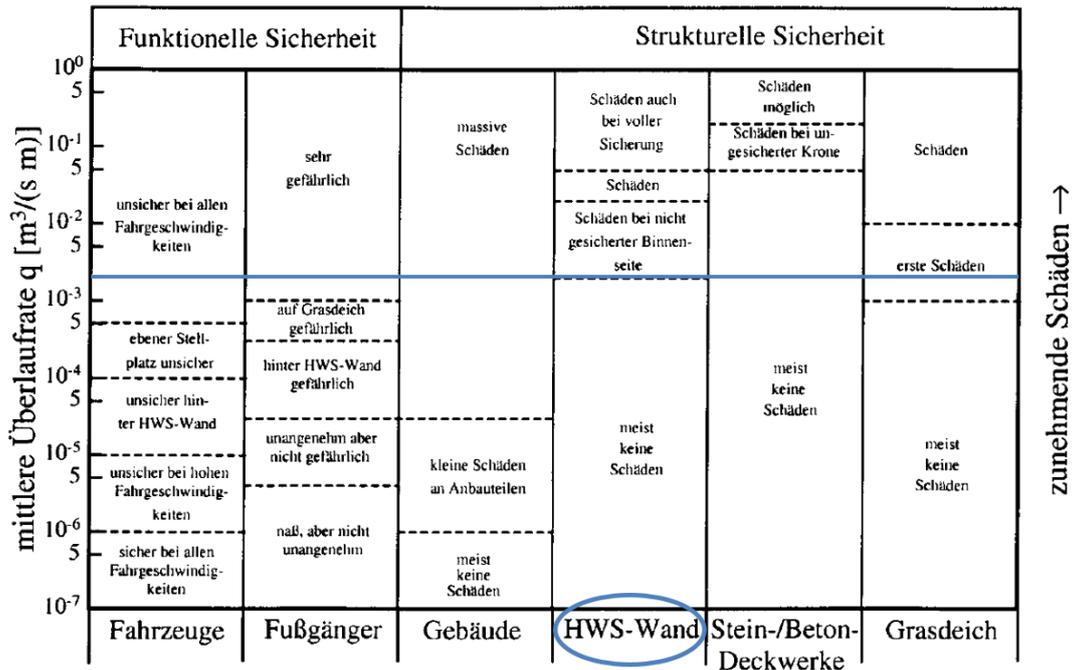


Abbildung 21: Zulässige Wellenüberlaufraten nach EAK (2002)

- Maximal zulässige Wellenüberlaufrate entsprechend der EUROTOP-MANUAL (2016) für vertikale Wände**

Das EUROTOP-MANUAL (2016) gibt Anhaltswerte hinsichtlich der Wirkung von Wellenüberlaufraten für Baukonstruktionen wie Wellenbrecher, Uferdämme, Deiche und Dämme zum Schutz des Eigentums hinter dem Schutzbauwerk bzw. zum Schutz von Mensch und Fahrzeug (vgl. Tabelle 6 bis Tabelle 8), empfiehlt jedoch eine kritische Überprüfung der Werte im Einzelfall. Für die vorliegende Untersuchung sind diese Werte weniger geeignet, da keine Baukonstruktion einer vertikalen Wand ähnelt und da das Vorhandensein einer Yacht in der Schleusenkammer bzw. das Betreten der Schleusentore für nicht-autorisierte Personen bei Sturmflut verboten ist. Am ehesten können für die vorliegende Untersuchung die Grenzwerte eines signifikanten Schadens einer Yacht bei signifikanten Wellenhöhe von 3 – 5 m herangezogen werden, jedoch dient dieser Wert eher als Anhaltswert und nicht als kritische Überlaufrate. Es sei hier angemerkt, dass in der Schleusenanlage Kiel-Holtenau deutlich geringere signifikante Wellenhöhen auftreten und somit mit einer höheren zulässigen Wellenüberlaufrate zu rechnen ist.

$$q_{\text{zul, EuroTop-Manual}} = 20 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{m})$$

Aufgrund der Überlegung zu den maximal zulässigen Überlaufmengen nach EAK (2002) und EUROTOP-MANUAL (2016) wird eine Überlaufrate von 50 l/(s · m) als kritisch angesetzt.

Tabelle 6: Zulässige Wellenüberlaufraten für Baukonstruktionen wie Wellenbrecher, Uferdämmen, Deichen und Dämmen (EUROTOP-MANUAL, 2016)

Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s per m)	Max volume V _{max} (l per m)
Rubble mound breakwaters; H _{m0} > 5 m; no damage	1	2,000-3,000
Rubble mound breakwaters; H _{m0} > 5 m; rear side designed for wave overtopping	5-10	10,000-20,000
Grass covered crest and landward slope; maintained and closed grass cover; H _{m0} = 1 – 3 m	5	2,000-3,000
Grass covered crest and landward slope; not maintained grass cover, open spots, moss, bare patches; H _{m0} = 0.5 – 3 m	0.1	500
Grass covered crest and landward slope; H _{m0} < 1 m	5-10	500
Grass covered crest and landward slope; H _{m0} < 0.3 m	No limit	No limit

Tabelle 7: Zulässige Wellenüberlaufraten zum Schutz des Eigentums hinter dem Schutzbauwerk (EUROTOP-MANUAL, 2016)

Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s per m)	Max volume V _{max} (l per m)
Significant damage or sinking of larger yachts; H _{m0} > 5 m	>10	>5,000 – 30,000
Significant damage or sinking of larger yachts; H _{m0} = 3-5 m	>20	>5,000 – 30,000
Sinking small boats set 5-10 m from wall; H _{m0} = 3-5 m Damage to larger yachts	>5	>3,000-5,000
Safe for larger yachts; H _{m0} > 5 m	<5	<5,000
Safe for smaller boats set 5-10 m from wall; H _{m0} = 3-5 m	<1	<2,000
Building structure elements; H _{m0} = 1-3 m	≤1	<1,000
Damage to equipment set back 5-10m	≤1	<1,000

Tabelle 8: Zulässige Wellenüberlaufraten zum Schutz von Mensch und Fahrzeug (EUROTOP-MANUAL, 2016)

Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s per m)	Max volume V _{max} (l per m)
People at structures with possible violent overtopping, mostly vertical structures	No access for any predicted overtopping	No access for any predicted overtopping
People at seawall / dike crest. Clear view of the sea. H _{m0} = 3 m H _{m0} = 2 m H _{m0} = 1 m H _{m0} < 0.5 m	0.3 1 10-20 No limit	600 600 600 No limit
Cars on seawall / dike crest, or railway close behind crest H _{m0} = 3 m H _{m0} = 2 m H _{m0} = 1 m	<5 10-20 <75	2000 2000 2000
Highways and roads, fast traffic	Close before debris in spray becomes dangerous	Close before debris in spray becomes dangerous

5.2 Ermittlung der mittleren Wellenüberlaufzeiten für die Schleusentore

Die Ermittlung der mittleren Wellenüberlaufzeiten für die Schleusentore Kiel-Holtenau wird auf Grundlage des EUROTOP-MANUALS (2016) für vertikale Wände zur deterministischen Bemessung von Küstenschutzbauwerken unter nicht-impulsiven Bedingungen durchgeführt. Die Formel für die mittlere Wellenüberlaufzeit q [$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$] lautet wie folgt:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0,062 \cdot \exp\left(-2,61 \cdot \frac{R_C}{H_{m0}}\right) \quad (5.2)$$

Mit: $H_{m0} = H_s$

- q : Mittlere Wellenüberlaufzeit [$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$]
- R_C : Freibordhöhe [m] (= vertikaler Abstand zwischen Bemessungswasserstand und Kronenhöhe)
- H_{m0} : Signifikante Wellenhöhe aus der Spektrumsanalyse
- H_s : Signifikante Wellenhöhe, definiert als durchschnittliche Höhe des obersten Drittels der Wellenhöhe

Der Wellenüberlauf wird somit über eine Wellenüberlaufzeit mit der Einheit [$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$] beschrieben und stellt eine über die Zeit gemittelte Wellenüberlaufmenge dar. Hierbei wird ein küstennormaler Wellenangriff angesetzt.

Bei vertikalen Toren spielt der Wellenauflauf keine Rolle, stellt somit keine relevante Bemessungsgröße dar und wird nicht weiter behandelt.

5.2.1 Auslasskanal

Die geplante Stauwandhöhe im Auslasskanal beträgt 3,2 mNHN und liegt somit 0,1 m über dem Bemessungswasserstand. Die mittlere Wellenüberlaufzeit für ein Freibord von $R_C = 0,1$ m beträgt somit nach Formel (5.2) für den Bemessungsfall:

$$q_{\text{Auslassbauwerk}} = 22,9 \frac{\text{l}}{\text{s} \cdot \text{m}} < q_{\text{kritisch}} = 50 \frac{\text{l}}{\text{s} \cdot \text{m}}$$

Die mittlere Wellenüberlaufzeit am Auslassbauwerk $q_{\text{Auslassbauwerk}} = 22,9 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{m})$ ist somit deutlich kleiner als die kritische Wellenüberlaufzeit $q_{\text{krit}} = 50 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{m})$. Bei einer Breite der Sieltore von 20 m folgt eine Gesamtüberlaufzeit von 0,46 m^3/s für das Auslassbauwerk.

5.2.2 Kleine Schleuse

Die Kronenhöhe der Stemmtore der geplanten kleinen Schleuse beträgt 3,55 mNHN und liegt somit 0,45 m über dem Bemessungswasserstand. Die mittlere Wellenüberlaufzeit für ein Freibord von $R_C = 0,45$ m beträgt somit nach Formel (5.2) für den Bemessungsfall:

$$q_{\text{Kleine Schleuse}} = 29,2 \text{ l/(s} \cdot \text{m)} < q_{\text{kritisch}} = 50 \frac{\text{l}}{\text{s} \cdot \text{m}}$$

Die mittlere Wellenüberlaufrate an der Kleinen Schleuse $q_{\text{Kleine Schleuse}} = 29,2 \text{ l/(s} \cdot \text{m)}$ ist somit deutlich kleiner als die kritische Wellenüberlaufrate $q_{\text{krit}} = 50 \text{ l/(s} \cdot \text{m)}$. Bei einer Breite der Stemmtore von je 25 m folgt eine Gesamtüberlaufrate von $1,45 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Schleusenkammer für die Kleine Schleuse.

5.2.3 Große Schleuse

Die Kronenhöhe der Schiebetore der geplanten großen Schleusentore beträgt $3,91 \text{ mNHN}$ und liegt somit $0,81 \text{ m}$ über dem Bemessungswasserstand. Die mittlere Wellenüberlaufrate für ein Freibord von $R_c = 0,81 \text{ m}$ beträgt somit nach Formel (5.2) für den Bemessungsfall:

$$q_{\text{Große Schleuse}} = 8,3 \text{ l/(s} \cdot \text{m)} < q_{\text{kritisch}} = 50 \frac{\text{l}}{\text{s} \cdot \text{m}}$$

Die mittlere Wellenüberlaufrate an der Großen Schleuse $q_{\text{Große Schleuse}} = 8,3 \text{ l/(s} \cdot \text{m)}$ ist somit deutlich kleiner als die kritische Wellenüberlaufrate $q_{\text{krit}} = 50 \text{ l/(s} \cdot \text{m)}$. Bei einer Breite der Schiebetore von je 45 m folgt eine Gesamtüberlaufrate von $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$ pro Schleusenkammer für die Große Schleuse.

Derzeit beträgt die Schleusentore der Großen Schleuse $3,2 \text{ mNHN}$, sodass sich ein Freibord von $R_c = 0,1 \text{ m}$ (Bestand) ergibt. Für den Bemessungsfall folgt eine mittlere Wellenüberlaufrate von $q_{\text{Große Schleuse, Bestand}} = 93,0 \text{ l/(s} \cdot \text{m)}$.

5.2.4 Retention Nord-Ostsee-Kanal

Zunächst gelangt der Wellenüberlauf der Schleusentore in die Schleusenkammer. Ist der maximale Füllstand in der Schleusenkammer erreicht, erfolgt der Überlauf über das Binnentor in den NOK. Der NOK weist eine Gesamtlänge von rund 100 km und eine mittlere Breite von rund 300 m auf. Bei einer geringen Wasserspiegeländerung von $0,5 \text{ m}$ (Annahme) beträgt das Retentionsvolumen des NOK rund $15.000.000 \text{ m}^3$ (SCHÜTTRUMPF, 2002). Die Summe der Gesamtüberlaufzeiten für Kleine, Große Schleuse und Auslassbauwerk beträgt $2,66 \text{ m}^3/\text{s}$. Um dieses Retentionsvolumen des NOK zu füllen, ist eine Überlaufzeit von rund 65 Tagen notwendig.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen zur Stauhöhenbemessung der Schleusentore in Kiel-Holtenau wurden die Wellenüberlaufdaten für den Bemessungswasserstand nach EUROTOP-MANUAL (2016) ermittelt und mit zulässigen Wellenüberlaufdaten verglichen. Des Weiteren wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um die Belastbarkeit der Eingangsparameter zu überprüfen.

Auf der Grundlage der Wellenüberlaufrechnung kann gezeigt werden, dass die berechneten mittleren Wellenüberlaufdaten für die geplanten Schleusentore mit max. rund $30 \text{ l/(s} \cdot \text{m)}$ deutlich unter den zulässigen Wellenüberlaufdaten nach EAK (2002) von $50 \text{ l/(s} \cdot \text{m)}$ liegen, welche am ehesten für die vorliegende Untersuchung als zulässige Wellenüberlaufdaten herangezogen werden kann.

Die Berechnung der mittleren Überlaufdaten wurden auf ein worst-case-Szenario ausgelegt. Es wurde eine maximale Windgeschwindigkeit von 30 m/s angesetzt, um die Unsicherheiten in der Festlegung der Bemessungswindgeschwindigkeit in der Bauwerksbemessung zu berücksichtigen. Des Weiteren ist das Zusammentreffen von maximalen Wasserstand aufgrund der Windrichtung und maximalen Seegang eher unwahrscheinlich (vgl. Kapitel 2.4) und die Simulationsergebnisse wurden nicht durch Diffraktion abgemindert, obwohl der Seegang in Richtung der Schleuseneinfahrt gebeugt wird und zu einer Abnahme der Wellenhöhe führt.

Auch die durchgeführte Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass selbst eine Erhöhung des maßgebenden Seegangs kaum einen Einfluss auf die mittlere Wellenüberlaufdaten mit sich führt.

Somit ist die Höhe der neuen Schleusentore als ausreichend bemessen einzustufen bzw. eine Erhöhung der Schleusentore ist aus hydraulischer Sicht derzeit nicht erforderlich. Es werden jedoch bautechnische Untersuchungen empfohlen, um die Standsicherheit der Schleusenhäupter, die Auftriebssicherheit der Schleusentore und deren Sicherheit gegen dynamische Beanspruchung zu ermitteln.

Literatur

- BORK, I & MÜLLER-NAVARRA, S.H. (2009): *Simulation und Analyse extremer Sturmhochwasser an der Deutschen Ostseeküste*. Abschlussbericht 1.3 zum KFKI-Verbundprojekt Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK), Hamburg.
- BROCKMANN, J.; HEELING, A.; POHL, M.; ULIZCKA, K. (2008) *The Kiel Canal (Nord-Ostsee-Kanal)*. Die Küste, Heft 74. S. 317-332.
- BRUSS, G.; JIMENZ, N., EIBEN, H. & MAYERLE, R. (2009): *Entwicklung von Methoden zur Bestimmung maßgeblicher Bemessungsparameter für Küstenschutzanlagen an der deutschen Ostseeküste*. Abschlussbericht 2.2 zum KFKI-Verbundprojekt Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK), Kiel.
- BUNDESAMTS FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE (BSH) (2015): *Wellendaten Kiel Leuchtturm 2011 – 2015*. Deutsches Ozeanographische Datenzentrum.
- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (BAW) (2013): *Digitales Geländemodell der Kieler Förde*. ETRS89, Zone 33. Referenz NHN.
- BAW (2014): *Hydraulische Untersuchung „Große Schleuse“ Kiel-Holtenau*. BAW-Nr. A39530310156 – März 2014.
- BAW (2016): *Füllschütze Kleine Schleuse Kiel-Holtenau*. BAW-Nr. B3953.03.31.10178 –September 2016.
- DELFT3D-WAVE (2014): *Simulation of short-crested waves with SWAN*. User Manual. Hydro-Morphodynamics. Deltares, Netherlands.
- EMPFEHLUNGEN DES AUSSCHUSSES KÜSTENSCHUTZBAUWERKE (EAK) (2002): *Die Küste. Empfehlungen für Küstenschutzbauwerke*. Heft 65 Korrigierte Ausgabe 2007. Hrsg.: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen.
- GODA, Y. (2009): *Random Seas and Design of maritime Structures*. 3rd edition. In: Advanced Series on Ocean Engineering. Volume 33.
- GOOGLEMAPS (2017): *Karten von Kiel-Holtenau*. Online verfügbar unter: <https://www.google.de/maps>. Zuletzt geprüft am 09.03.2017.
- HEIN, H., MAI, S., BARJENBRUCH, U. (2014): *Klimabedingt veränderte Tidekennwerte und Seegangsstatistik in den Küstengewässern*. Buch, 122 Seiten, Dezember 2014, DOI: 10.5675/Kliwas_33/2014_2.03.

-
- HOCHWASSERRAHMENRICHTLINIE (HWRM-RL) (2007): *Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken*. Amtsblatt der Europäischen Union.
- HOSKING, J. R. M. & WALLIS, J. R. (2015): *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*. Cambridge University.
- ILIC, S. (1994): *The role of offshore breakwaters in the coastal defence: comparison of two measurement systems*. Tech. rep., University of Plymouth School of Civil and Structural Engineering.
- JENSEN, J. & FRANK, T. (2003): *Zur Abschätzung von Sturmflutwasserständen mit sehr kleinen Überschreitungswahrscheinlichkeiten*. In: Die Küste, Heft 67, S. 367-405.
- LANDESBETRIEB FÜR KÜSTENSCHUTZ, NATIONALPARK UND MEERESSCHUTZ SCHLESWIG-HOLSTEIN (2015): *Fachplan Küstenschutz Ostseeküste*. Grundlagen. Hydrologie. Stand 10.09.2015.
- MAI, S., PAESLER, C. & ZIMMERMANN, C. (2004): *Wellen und Seegang an Küsten und Küstenbauwerken mit Seegangsatlas der Deutschen Nordseeküste*. Mitteilungen, Heft 90a/ 2004. Vorlesungsergänzungen des Lehrstuhls für Wasserbau und Küsteningenieurwesen Franzius-Institut, Universität Hannover.
- MINISTERIUM FÜR ENERGIEWENDE, LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND LÄNDLICHE RÄUME DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN (HRSG.) (2001): *Generalplan Küstenschutz. Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein*. Kiel, Deutschland. Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein.
- MELUR (HRSG.) (2012): *Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein*. Hansadruck und Verlag GmbH + Co. KG, Kiel.
- MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ MECKLENBURG-VORPOMMERN (HRSG.) (MLUV) (2009): *Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern*. Übersichtsheft. Grundlagen, Grundsätze, Standortbestimmung und Ausblick. Ostseedruck Rostock GmbH, Rostock.
- MUDERBACH, C.; & JENSEN, J. (2009): *Statistische Extremwertanalyse von Wasserständen an der Deutschen Ostseeküste*. Abschlussbericht 1.4. Forschungsinstitut Wasser und Umwelt der Universität Siegen. KFKI-VERBUNDPROJEKT. Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK).
- SCHMITZ, R. (2007): *Vorhersage von historisch aufgetretenen Stürmen über der Ostsee mithilfe des Ensemble Prediction Systems (EPS) und COSMO*. Abschlussbericht 1.1. Deutscher Wetterdienst, Offenbach. KFKI-VERBUNDPROJEKT. Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK).

SCHÜTTRUMPF, H. (2002): *Untersuchung zum Hochwasserschutz für die NOK-Schleusen in Brunsbüttel*. Abschlussbericht. Bundesanstalt für Wasserbau. Dienststelle Hamburg.

SCHÜTTRUMPF, H. & HORSTEN, S. (2010): *Festlegung der Bemessungswellenparameter für die Schleuse Brunsbüttel*. Abschlussbericht. Bundesanstalt für Wasserbau. Dienststelle Hamburg.

WASSERSTRASSEN- UND SCHIFFFAHRTSVERWALTUNG (WSA) LÜBECK (2015): Maximaler Wasserstände seit 1901 an der Messstation Kiel-Holtenau.

WSA KIEL (2017): *Schleusenanlage Kiel-Holtenau*. Online verfügbar unter: <http://www.wsa-kiel.wsv.de/>. Zuletzt geprüft am 09.03.2017.

WSA LÜBECK (2017): *PegelOnline*. Online verfügbar unter: <https://www.pegelonline.wsv.de/>. Zuletzt geprüft am 07.03.2017.