

KFKI-VERBUNDPROJEKT
Modellgestützte Untersuchungen zu extremen
Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK)

SEBOK A
Entwicklung von Methoden zur Bestimmung maßgebender hydrodynamischer Bemessungsparameter für
Küstenschutzanlagen an der Ostsee



ABSCHLUSSBERICHT 2.2

Entwicklung von Methoden zur Bestimmung maßgeblicher Bemessungsparameter für Küstenschutzanlagen an der deutschen Ostseeküste

Autoren	Gerd Bruss, Nestor Jimenez, Hartmut Eiben, Roberto Mayerle
Institut	Forschungs- und Technologiezentrum Westküste, Universität Kiel
Bearbeitungszeitraum	01.07.2005 – 31.12.2008
Fördernummer	BMBF 03KIS053 / KFKI 85
Datum	30.06.2009
Version	2.0

Zitierhinweis: Bruss, G., Jimenez, N., Eiben, H. und 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

Forschungs- und Technologiezentrum Westküste
Christian Albrechts Universität zu Kiel
Otto-Hahn-Platz 3, 24118 Kiel
<http://www.corelab.uni-kiel.de>
bruss @corelab.uni-kiel.de

Zusammenfassung

Ziel des Teilprojektes SEBOK-A ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung von Bemessungsgrößen für Küstenschutzanlagen entlang der deutschen Ostseeküste auf Grundlage von Simulationen extremer Sturmszenarien. Ausgehend von Anfangszuständen der letzten 50 Jahre erzeugte der deutsche Wetterdienst zunächst eine hohe Anzahl (31.800) physikalisch konsistenter Wetterlagen, die nach ihrem Potential hin untersucht wurden, hohe Wasserstände an der deutschen Ostseeküste zu erzeugen. 61 der so ausgewählten Szenarien mit hohem Sturmhochwasserpotential wurden verwendet, um mit einer Modellkette schrittweise die erzeugten Wasserstände und Seegangshöhen zunächst auf überregionaler Ebene und schließlich entlang der gesamten deutschen Ostseeküste lokal sehr hoch aufgelöst abzuschätzen.

Die verwendeten Modelle basieren auf der Modellfamilie des Danish Hydraulic Institute. Sie wurden mit Hilfe von Messdaten kalibriert und verifiziert, und weisen gute Übereinstimmung mit den Naturdaten auf. Auf überregionaler Ebene, d.h. im Bereich der gesamten Ostsee, wurde ein dreidimensionales Strömungsmodell mit einem tiefengemittelten spektralen Seegangsmodell gekoppelt. Auf lokaler Ebene wurden zum einen, um die räumliche Entwicklung von Seegang und mittlerem Wasserstand bis an den Strand berechnen zu können lokal stark verfeinerte, in das großräumige Seegangsmodell eingesetzte, spektrale Seegangsmodelle eingesetzt. Zudem wurden, hochauflösende Profilmodelle verwendet um die morphologische Auswirkung und damit den Gesamtenergieeintrag der Stürme auf den Strandbereich zu bestimmen. Diese küstennahen Modelle werden an den offenen Rändern mit den Ergebnissen der überregionalen Modelle in Form von Wasserstands- sowie Seegangszeitreihen angetrieben.

Die meteorologische Rekonstruktion des historischen Sturmes von 1872 durch das Seewetteramt Hamburg und das BSH sowie die Implementierung der rekonstruierten Windfelder in der gesamten Modellkette ermöglichten die flächendeckende Bestimmung von Wasserstand und Seegang und damit einen direkten Vergleich zwischen Szenarien und Referenzereignis. In der Pommerschen Bucht erzeugten einige der Szenarien deutlich höhere Wasserstände als die Rekonstruktion von 1872. Hier würde sich also ein vergleichsweise hohes Gefährdungspotential der auf Basis des 1872er Sturmes bemessenen Küstenschutzanlagen ergeben. Dagegen haben die Szenarien für den Nordwesten der deutschen Ostsee, z.B. für Flensburg mit 1872 vergleichbare, und in der Mecklenburger Bucht sogar etwas niedrigere Wasserstände ergeben.

Die endgültige Auswahl der Szenarien, die für Bemessungszwecke herangezogen werden können, basiert einerseits auf der Größenordnung von Wasserstand und Seegangsbelastung die direkt auf die zu bemessenden Küstenstrukturen wirken, andererseits auf die Auswirkung der Stürme auf die Morphologie des zu betrachtenden Küstenabschnittes. Der Vergleich der verschiedenen Szenarien untereinander sowie zu dem rekonstruierten Referenzereignis von 1872 führt zu den örtlich jeweils höchsten Belastungen. Das entwickelte Verfahren lässt sich sowohl zur direkten Bemessung künftiger Küstenschutzanlagen als auch zur Sicherheitseinschätzung bestehender Strukturen entlang der gesamten deutschen Ostseeküste einsetzen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	6
2	Beschreibung des Modellsystems	7
2.1	Überregionale Ebene	7
2.2	Lokale Ebene	8
3	Verifikation der Modelle	10
3.1	Strömungsmodell	10
3.2	Spektrales Seegangmodell.....	11
3.3	Morphodynamisches Profilmodell	14
4	Meteorologische Datengrundlage	15
5	Ergebnisse auf überregionaler Ebene	16
5.1	Rekonstruktion 1872	16
5.2	Vorlaufrechnungen (era 40)	17
5.3	Szenariorechnungen	18
5.3.1	Diskussion der Modellgenauigkeit	19
5.3.1.1	Windschubansatz	19
5.3.1.2	Randwerte des Strömungsmodells	20
5.3.2	Scheitelwerte an 18 Stationen	22
5.3.2.1	Wasserstände	22
5.3.2.2	Seegang	25
5.3.3	Scheitelwerte an der Station Kiel	28
5.3.3.1	Wasserstand	28
5.3.3.2	Seegang	34
5.3.4	Räumliche Verteilung der maximalen Scheitelwerte	34
5.3.5	Zeitliche Verläufe	36
6	Untersuchungen im Küstennahbereich.....	38
6.1	Methode	38
6.2	Analyse Gefährdungspotential Probstei	39
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	42
8	Schriftenverzeichnis	44
9	ANHANG I: Vergleich der Ergebnisse der Teilprojekte SEBOK A und SEBOK B . I	
9.1	Einleitung	I
9.2	Konzeptioneller Vergleich	I
9.2.1	SEBOK A	I
9.2.2	SEBOK B	II
9.3	Ergebnisvergleich anhand eines Bemessungsbeispiels	III
9.3.1	Ergebnisse SEBOK A	IV
9.3.2	Ergebnisse SEBOK B	VI
9.4	Zusammenfassung / Schlussfolgerung	IX
10	ANHANG II: Graphische Darstellung aller Szenarien	XI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überregionales Modellsystem.....	7
Abbildung 2: Vergleich Wasserstand Modell - Messung, Februar 2002.	11
Abbildung 3: Seegangsmessstandorte zur Validierung.....	12
Abbildung 4: Vergleich signifikanter Seegangshöhe Februar 2002	12
Abbildung 5: Vergleich signifikanter Seegangshöhe November 2006	13
Abbildung 6: Streudiagramme für simulierte und gemessene signifikante Seegangshöhen an 4 Stationen im Bereich der südwestlichen Ostsee	13
Abbildung 7: Rekonstruktion des 1872 Sturmes am FTZ.....	17
Abbildung 8: Vorlaufrechnung 12.75/01.76, angetrieben durch era40 Windfelder.....	18
Abbildung 9: Vergleich unterschiedlicher Windschubansätze.....	19
Abbildung 10: Vergleich unterschiedlicher Randwerte.....	21
Abbildung 11: Positionen zur Analyse der Scheitelwerte. Blau: Stationen für den Scheitelwasserstand in Abbildung 12; Rot: Stationen für die signifikante Wellenhöhe in.	24
Abbildung 12: Scheitelwasserstände der 61 Szenarien und der Rekonstruktion von 1872 sowie historische Daten von 1872 an 18 Stationen entlang der deutschen Ostseeküste.	24
Abbildung 13: Maximale signifikante Wellenhöhen an den 18 Stationen aus Abbildung 11 für alle 61 Szenarien und die Rekonstruktion des Sturmes von 1872. Oben: farbcodierte Darstellung; Unten: zweidimensionale Darstellung zur Verdeutlichung der Tendenz in der räumlichen Verteilung.	26
Abbildung 14: Dauer in Stunden mit signifikanter Wellenhöhe über 2m an den 18 Stationen aus Abbildung 11 für alle 61 Szenarien und die Rekonstruktion des Sturmes von 1872.....	28
Abbildung 15: Signifikante Wellenhöhen und Wasserstände an der Station Kiel.	30
Abbildung 16: Zeitliche Verläufe von mittlerem Wasserstand der Kieler Bucht und lokalem Wasserstand in Kiel, für 3 Stürme.	30
Abbildung 17: Räumliche Verteilung des Wasserstandes der Kieler Bucht zum Zeitpunkt des Scheitelwasserstandes in Kiel für 3 Stürme.	31
Abbildung 18: Ein- und Ausstromtransporte, sowie die Volumenentwicklung der Kieler Bucht für 3 Stürme.	32
Abbildung 19: Maximalwerte an jeder Gitterzelle aus: links - allen Szenarien rechts - Rekonstruktion 1872 oben - Strömungsmodell unten - Seegangsmodell.....	35
Abbildung 20: Zeitreihen von Wasserstand und Seegang an drei Stationen (Spalten) für die Rekonstruktion von 1872 und drei Szenarien (Zeilen).....	37

Abbildung 21: Schematische Darstellung des morphodynamischen Profilmodells der Probstei zu einem bestimmten Zeitpunkt eines Szenarios (170 Stunden nach Szenariobeginn). Unten: Randbedingungen, H_{m0} und Wasserstand an offenen Rand bei ca. 10m Tiefe sowie die momentane Erosionsrate. Mitte: vertikale Differenz zwischen dem aktuellen Profil und dem Anfangsprofil. Oben: Aktuelles und Anfangsprofil sowie schematisch der mittlere Wasserstand und die räumliche Entwicklung von H_{m0} .	39
Abbildung 22: Ergebnisse der Sturmsimulationen aus SEBOK-A. Unten: Hydrodynamische Größen zum Zeitpunkt der maximalen Bestickhöhe ($mwl+Ru2\%$). Oben: Über den jeweiligen Sturmverlauf ermittelte Erosionsrate relativ zum Maximalwert.	40
Abbildung 23: Virtueller Deich vor Warnemünde.	III
Abbildung 24: Ergebnisse der Sturmsimulationen aus SEBOK-A. Unten: Hydrodynamische Größen zum Zeitpunkt der maximalen Bestickhöhe. Oben: Über den jeweiligen Sturmverlauf ermittelte Erosionsrate relativ zum Maximalwert.	IV
Abbildung 25: Kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeiten Wasserstand / Wellenhöhe	VII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bemessungswerte der 10 höchsten Szenarien und der Rekonstruktion des Sturmes von 1872 für den Küstenabschnitt Warnemünde.	V
Tabelle 2: Bemessungswerte für den Küstenabschnitt Warnemünde ($p_u=0,00077$)	VII
Tabelle 3: Seegangparameter am Deichfuß	VIII
Tabelle 4: Auflauf- und Bestickhöhen für einen virtuellen Deich in Warnemünde ($p_u=0,00077$)	IX
Tabelle 5: Gegenüberstellung von Bemessungsgrößen und Bestickhöhen der beiden Methoden für das Bemessungsbeispiel.	IX

1 Einführung

Bemessungsverfahren für Küstenschutzanlagen entlang der deutschen Ostseeküste basieren derzeit noch weitgehend auf dem Extremereignis des Sturmhochwassers von 1872 (MLR-Schleswig-Holstein, 2001). Die nur für vereinzelte Standorte vorliegenden Aufzeichnungen des Scheitelwasserstandes von 1872 dienen als Grundlage für die Bestimmung des Bemessungswasserstands. Verlässliche Aufzeichnungen des Seegangs sind für das Referenzereignis nicht verfügbar. Der Bemessungsseegang wird stochastisch bestimmt wobei Dauer und relatives zeitliches Eintreten von Hochwasser und hohem Seegang nicht angemessen berücksichtigt werden. Das Ziel des Teilprojektes SEBOK-A (SEegangsBelastung OstseeKüste Teil A) ist daher die Entwicklung einer neuen Methode sowohl zur Sicherheitseinschätzung bestehender als auch zur realistischen Abschätzung von Bemessungsgrößen für die Planung künftiger Küstenschutzanlagen.

Die vorgestellte Strategie verbindet physikalisch konsistente Sturmweatherlagen, generiert mit einem meteorologischen Ensemble Prediction System (EPS), mit hydrodynamisch numerischen Simulationen für Wasserstände und Seegang. Das Konzept für die Modellierung wurde so gewählt, dass von großräumigen Zuständen und Ereignissen schrittweise auf kleinräumige Küstenabschnitte hin verfeinert gearbeitet wird. Abschnitt 6 setzt dabei mit den lokalen Küstenmodellen modelltechnisch den Schlussstein. Die Erfassung und Darstellung der relevanten Belastungen aus Sturmereignissen lässt einen Vergleich der untersuchten Sturmszenarien hinsichtlich des lokal pessimalen Ereignisses zu. Die meteorologische Rekonstruktion des Sturmes von 1872 am Seewetteramt Hamburg ermöglicht den Vergleich zu dem Referenzereignis und somit eine direkte Sicherheitseinschätzung der aktuellen Situation.

2 Beschreibung des Modellsystems

In SEBOK-A wurden mit Hilfe einer hydrodynamischen Modellkette, unter Verwendung der in Kapitel 4 beschriebenen meteorologischen Antriebsdaten, für den lokalen Bemessungsfall relevante Belastungen bestimmt. Das in dieser Studie angewendete Modellsystem basiert auf der MIKE Modellfamilie des 'Danish Hydraulic Institute' (DHI). Für detaillierte Beschreibungen des Modellsystems wird auf Bruss und Bork 2009 und Jimenez et al. 2009 verwiesen.

2.1 Überregionale Ebene

Die überregionalen Strömungs- und Seegangsmodelle sind Ausschnitte von am DHI operativ betriebenen Nord-Ostseemodellen (www.waterforecast.com). Die verwendeten Modellausschnitte decken die gesamte Ostsee ab, die offenen Grenzen liegen im Bereich des Kattegat bzw. Skagerrak. Abbildung 1 zeigt die beiden Modelltopographien mit den jeweils verwendeten Gittern in schematischer Auflösung sowie eine Skizze der verwendeten Kopplungsstrategie. Entsprechend den Projektanforderungen wurden die ursprünglichen Modelle im Bereich der deutschen Ostseeküste weiter verfeinert.

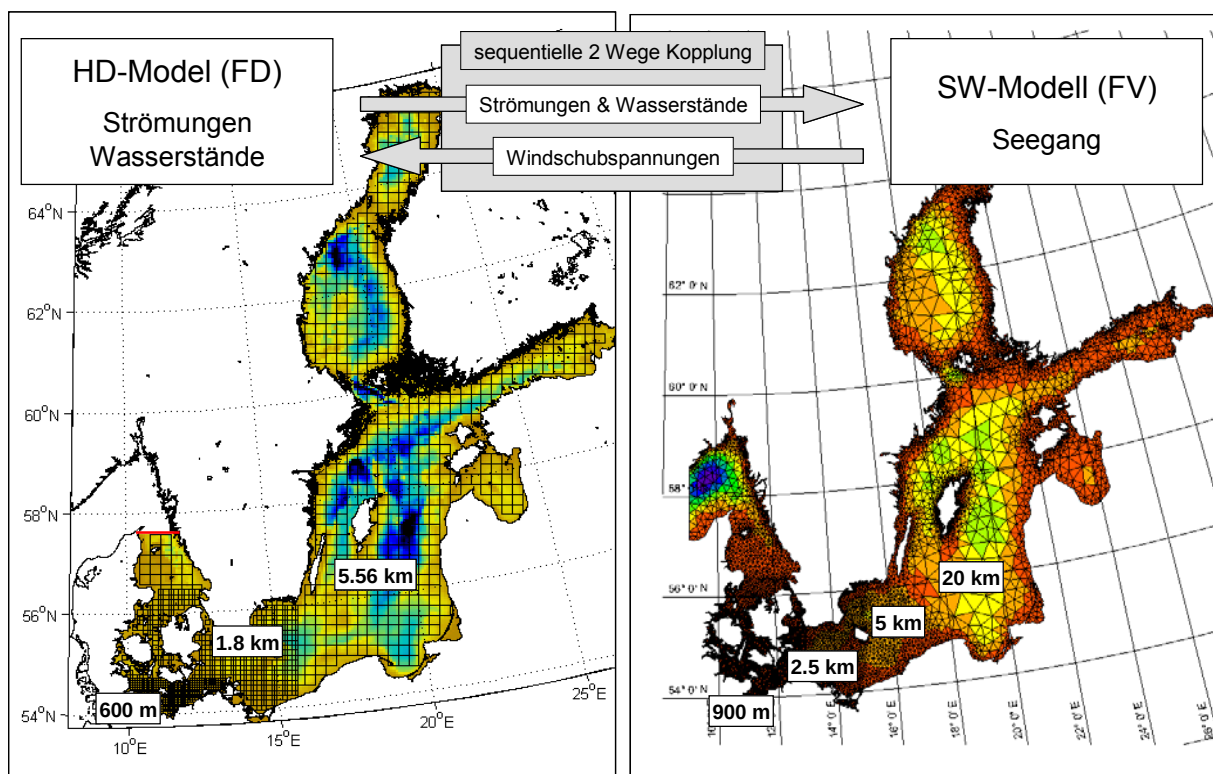


Abbildung 1: Überregionales Modellsystem.

Das Strömungsmodell löst auf einem gleichmäßig-rechtwinkligen Gitter die bekannten Bewegungs- und Kontinuitätsgleichungen im Finite-Differenzen Verfahren. Der Einfluss variabler Dichtegradienten, verursacht durch Temperatur- und Salinitätstransporte wird berücksichtigt. Die horizontale Gitterweite wird mittels interaktivem downscaling von 3nm im Osten bis auf ca. 600m im Bereich der Kieler und Mecklenburger Bucht angepasst. Die vertikale Auflösung beträgt bis auf die tiefenangepasste unterste Schicht konstant 2m.

Das zweidimensionale phasenmittelnde spektrale Seegangmodell basiert auf einem flexiblen Dreiecksgitter, auf dem die Wellenenergiegleichungen im Finite-Volumen Verfahren gelöst werden. Wichtige Faktoren wie Wind, nichtlineare Wellen-Wellen Interaktion sowie Energiedissipation durch ‚whitecapping‘, Bodenreibung und Wellenbrechen werden berücksichtigt. Die Längen der Dreieckskanten variieren zwischen 25km in küstenfernen Bereichen der zentralen Ostsee und ca. 900m in der südwestlichen Ostsee.

Die beiden Modelle werden auf überregionaler Ebene gekoppelt. Die Kopplung erfolgt aufgrund der unterschiedlichen Gitter sequenziell, wobei einerseits Wasserstände und Strömungen vom Strömungs- an das Seegangsmodell weitergegeben werden. In umgekehrter Richtung wurden die Ergebnisse des Seegangsmodells als Antriebsdaten für das Strömungsmodell verwendet um die Unsicherheit empirischer Windschubansätze bei hohen Windgeschwindigkeiten zu vermeiden. Dazu wurden die Windschubspannungen, die im spektralen Seegangsmodell des DHI, ähnlich der im WAM Cycle 4 implementierten „wind-over-waves coupling theory“ nach Janssen (1989, 1991), iterativ bestimmt werden, im Strömungsmodell direkt als Randbedingung an der freien Oberfläche angesetzt (Bruss und Mayerle, 2009).

2.2 Lokale Ebene

Insgesamt wurden für 5 Küstenabschnitte zum einen mit lokalen Verfeinerungen im spektralen Seegangsmodell auf eine Auflösung von ca. 10m die räumliche Entwicklung von Seegang und mittlerem Wasserstand bis an den Strand, bzw. den Fuß von direkt zu Bemessenden oder zu überprüfenden Küstenschutzbauwerken bestimmt. Zum anderen wurde mit hochauflösenden Profilmodellen die morphologische Auswirkung der Stürme und damit die Größenordnung des Gesamtenergieeintrages über den jeweiligen Sturmverkauf berechnet. Angetrieben werden die küstennahen Modelle an den offenen Rändern mit den Ergebnissen der überregionalen Modelle in Form von Wasserstands- sowie Seegangszeitreihen.

Die morphodynamischen Profilmodelle haben eine horizontale Auflösung von 1m. Das zugrunde liegende Modul (Litpack) verbindet Hydrodynamische-, Sedimenttransport- und Morphologische Modelle. Anhand der im hydrodynamischen Modul berechneten Strömungen (Küstenquerströmungen und welleninduzierte Strömungen, also Orbitalgeschwindigkeiten und Grundströmung) werden Sedimenttransportraten, und damit die Veränderung der Topografie abgeschätzt.

Mit Hilfe der beschriebenen küstennahen Modelle lassen sich sowohl Eingangsparameter für konventionelle Bemessungsverfahren am Fuße von Küstenschutzbauwerken als auch der kumulative Energieeintrag gesamter Sturmverläufe auf die Küste bestimmen.

3 Verifikation der Modelle

Eine Verifikation der Modelle wurde für die beiden Stürme Februar 2002 und Oktober 2006 durchgeführt. Für den meteorologischen Antrieb der Modelle wurden jeweils ca. 2 wöchige Reanalysedaten des DWD dieser Zeiträume verwendet. Für eine eingehende Beschreibung der Modellvalidierung sowie den Vergleich zwischen dem Strömungsmodell des BSH und dem am FTZ Büsum eingesetzten Strömungsmodell wird auf Bruss und Bork, (2009) und Jimenez et al. (2009) verwiesen.

3.1 Strömungsmodell

Anfangswerte für das Strömungsmodell wurden mit einer am BSH entwickelten Methode (Bork u. Müller-Navarra 2009) erzeugt. Als Randwerte am offenen Rand im Kattegat wurden Pegeldata der Station Ringhals verwendet. Im Strömungsmodell wurde der für das Projekt maßgebende Parameter Wasserstand gegen Messdaten an 17 deutschen Pegelstandorten verglichen. Die Validierung wurde für verschiedene Windschubansätze durchgeführt. Neben dem standardmäßig verwendeten Ansatz nach Smith und Banke (1975), der ab 30m/s konstant angenommen wurde (S&B 2) wurde eine untere Grenze an die Schar empirischer Funktionen gelegt (uG). Weiterhin wurde die Rückkopplung aus dem spektralen Seegangmodell anhand der dort iterativ bestimmten Windschubspannungen untersucht (SW).

In Abbildung 2 sind Messdaten, sowie die entsprechenden Modellergebnisse für den Sturm im Februar 2002 an 4 Stationen entlang der deutschen Ostseeküste dargestellt. Der Verlauf des Wasserstandes wird im Modell generell an allen 4 Stationen gut reproduziert. Während die Wasserstandsauslenkung während des Sturmes zwischen dem 19. und dem 22. Februar bei Verwendung des Windschubansatzes nach (S&B 2) etwas überschätzt wird, wird sie vor allem bei der Rückkopplung durch das Seegangmodell (SW) korrekt wiedergegeben.

Die berechneten Standardabweichungen der Differenzen zwischen 7 und 16cm für die einzelnen Pegelstandorte stellen eine gute Aussagekraft des Modells dar.

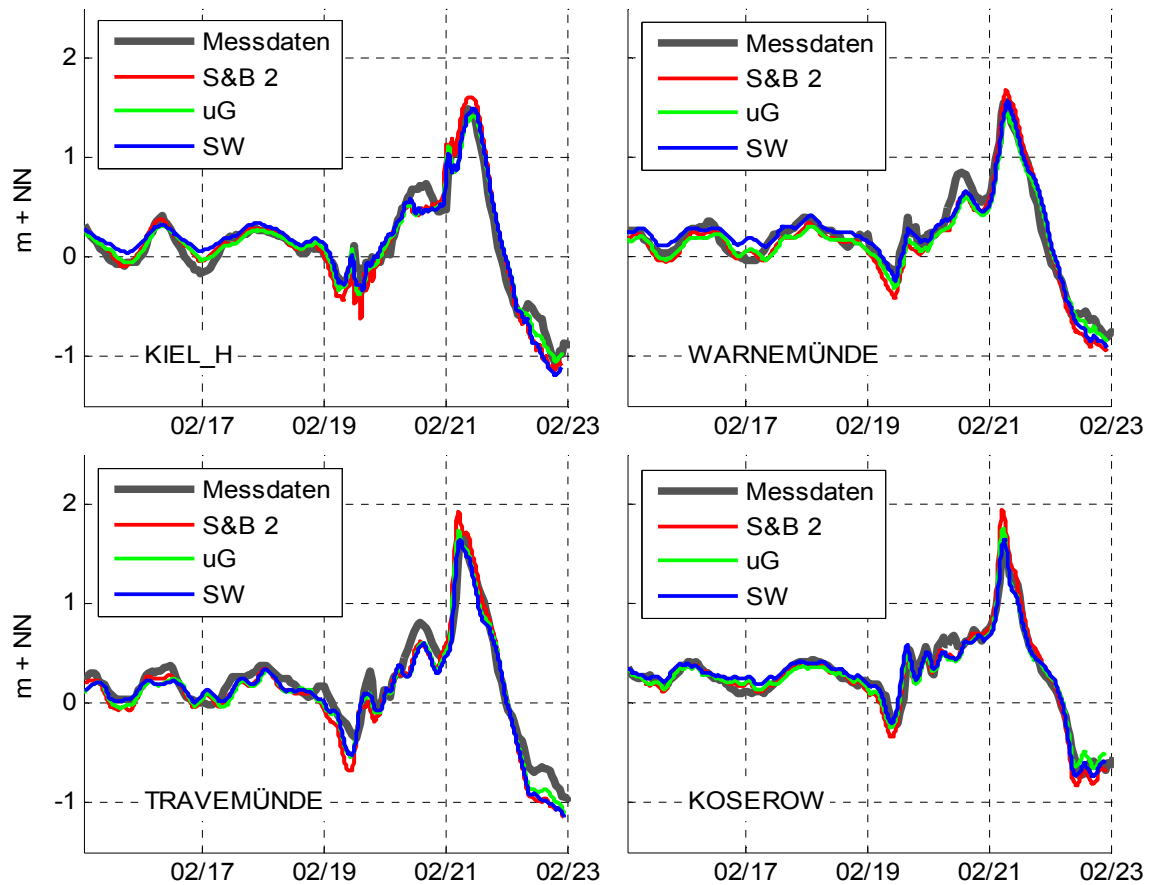


Abbildung 2: Vergleich Wasserstand Modell - Messung, Februar 2002.

3.2 Spektrales Seegangmodell

In Abbildung 3 sind von West nach Ost vier verschiedene Seegangsmessstationen aufgeführt, die sich zur Validierung eignen. Die erste Station (M1) liegt im ufernahen Bereich vor Niendorf als Teil von insgesamt drei ADCP- Einheiten, die vom FTZ Büsum in der inneren Lübecker Bucht ausgelegt wurden. An der Station Niendorf sind Seegangparameter, Wasserstände und Strömungen seit Oktober 2006 aufgezeichnet worden. Die Messdaten der Stationen M2, M3 und M4 wurden vom Staatlichen Amt für Natur und Umwelt (StAUN) Rostock anhand von induktive Strömungsmessgeräte und Seegangsmessbojen (ISM-2000 Series) aufgenommen.



	Station	Quelle	Zeitraum der Validierung
M1	Niendorf	FTZ-Büsum	Nov-2006
M2	Boltenhagen	StAUN	Nov-2006
M3	Arenshoop	StAUN	Feb-2002
M4	Varnkewitz	StAUN	Nov-2006

Abbildung 3: Seegangsmessstandorte zur Validierung

In SEBOK-A wurde das Seegangmodell zur Simulation extremer Sturmverläufe verwendet. Für die Verifizierung wurden daher die beiden Sturmperioden aus der Tabelle in Abbildung 3, für welche Seegangsaufzeichnungen vorlagen, untersucht. Für die erste Periode, den Sturm am 21. Februar 2002, wurden die Zeitreihen der Modellergebnisse mit Messdaten am Standort Arenshoop verglichen (vgl. Abbildung 4). Das Maximum der aufgezeichneten signifikanten Wellenhöhe lag bei ca. 1,50 m. Für den Sturm am 1. November 2006 wurden die drei Stationen Niendorf, Boltenhagen und Varnkewitz zur Verifizierung verwendet, wobei hier das Maximum der signifikanten Seegangshöhe in Varnkewitz bei 2,30 m lag (vgl. Abbildung 5).

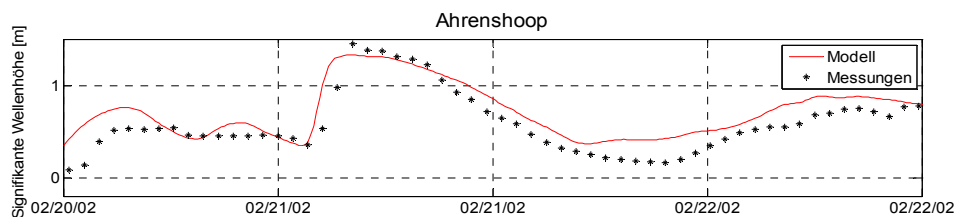


Abbildung 4: Vergleich signifikanter Seegangshöhe Februar 2002

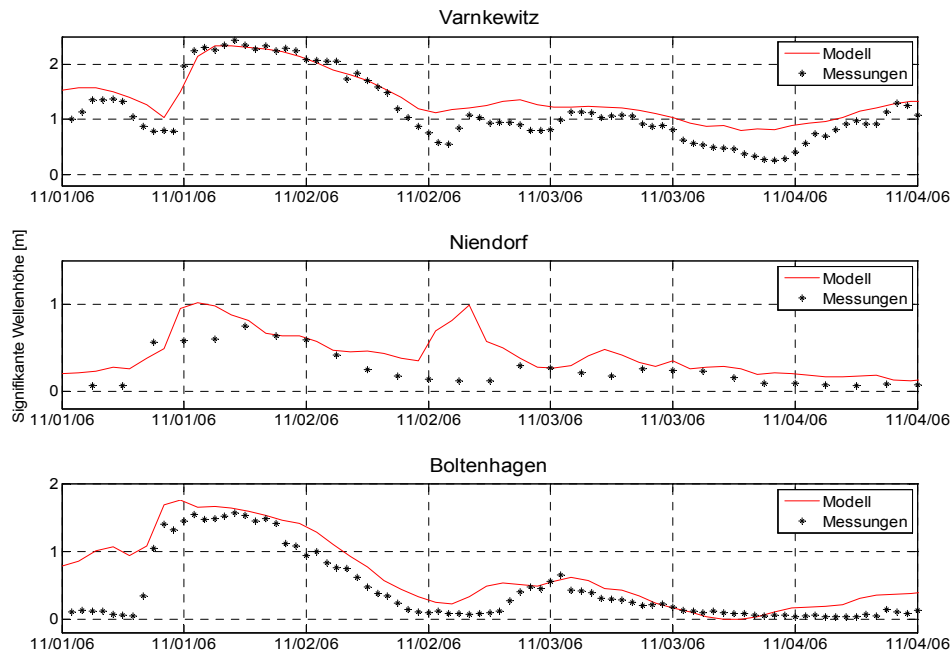


Abbildung 5: Vergleich signifikanter Seegangshöhe November 2006

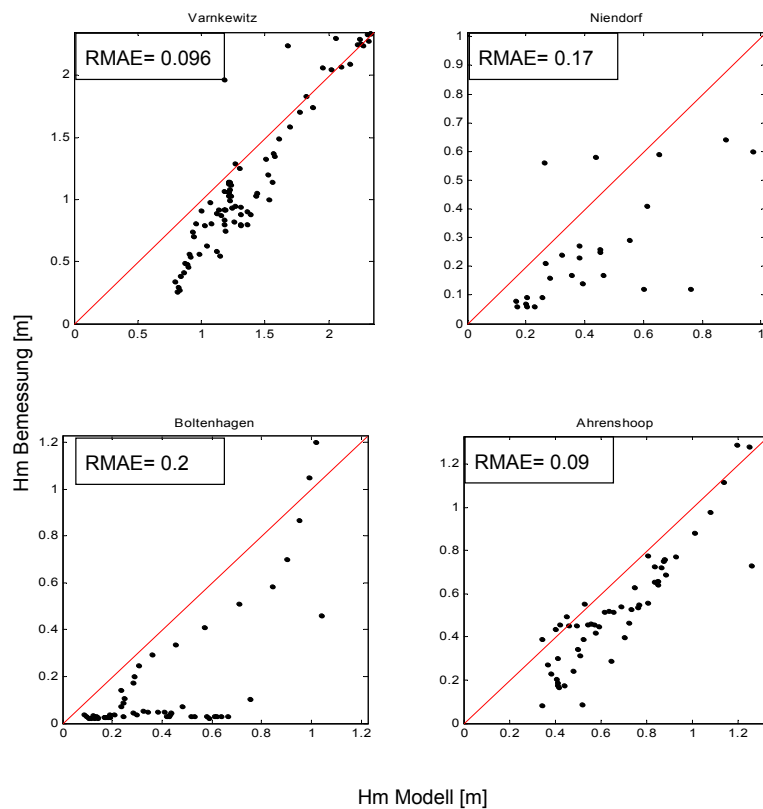


Abbildung 6: Streudiagramme für simulierte und gemessene signifikante Seegangshöhen an 4 Stationen im Bereich der südwestlichen Ostsee

Im Allgemeinen folgt die Seegangsentwicklung der Simulation dem Trend in den Messdaten. Die Übereinstimmung zwischen Modelldaten und Messungen sind vor allem in den relevanten Seegangsspitzen gut. In Abbildung 6 sind Streudiagramme der vier Zeitreihen aus Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt. Die gute Übereinstimmung bei hohem Seegang wird deutlich. Ergänzend ist in der linken Ecke eines jeden Diagramms der relative mittlere absolute Fehler (RMAE) angegeben. Die beste Übereinstimmung der Modellierungsergebnisse mit den Messungen besteht an den Stationen Varnkewitz und Arenshoop mit Werten von 0.09 und 0.096. Entsprechend den statistischen Qualifizierungen von Van Rijn (2002) ist das benutzte Modell danach als „gut“ einzustufen. Nach gleicher Qualifizierung sind die Modellergebnisse der Stationen Niendorf und Boltenhagen als „angemessen“ zu bewerten.

3.3 Morphodynamisches Profilmodell

Eine absolute Verifikation des morphodynamischen Modells war aufgrund fehlender Topographieaufnahmen direkt vor und nach abgelaufenen Stürmen leider nicht möglich. Der qualitative Vergleich der Energieeinträge bietet gleichwohl und besonders bei der Beurteilung natürlicher Küstenstrukturen die Möglichkeit einer alternativen Einstufung der Sturmeinwirkungen.

4 Meteorologische Datengrundlage

Die dieser Studie zugrunde liegenden meteorologischen Sturmszenarien wurden im Teilprojekt MUSE-Ostsee vom Deutschen Wetterdienst Offenbach erzeugt (Schmitz, 2007, 2009). Hierbei handelt es sich um physikalisch konsistente, also mögliche Wetterlagen, die jedoch so bisher nicht aufgetreten sind bzw. nicht beobachtet wurden. Zunächst wurde eine große Anzahl von globalen Wettervorhersagen (31.800) mit dem EPS des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF, 2001) gerechnet. Das EPS basiert auf dem operationell am ECMWF betriebenen globalen meteorologischen Integrated Forecast System (IFS). Durch eine Variation der Parametrisierung im Modell und der daraus resultierenden Veränderung von Intensität und Position der Zyklonen sollten möglichst gefährliche Wetterlagen erzeugt werden.

Als Startzeitpunkte wurden zum einen Termine ab 1958, an denen starke Tiefdruckgebiete über der Ostsee aufgetreten sind ausgewählt, zum anderen wurden Zeitpunkte mit einem erhöhten Füllungsgrad der Ostsee berücksichtigt. Die Vielzahl der zunächst erzeugten Wetterlagen wurde anschließend anhand von Windgeschwindigkeit und Richtung sowie anhand des mit der empirischen Formel nach Schmager (1984) berechneten Windstauens gefiltert. Die so ausgesuchten 61 Szenarien wurden dann für die weiteren Untersuchungen am FTZ verwendet. Aus der Summe der Vorhersagestunden aller 31.800 Einzelensemble (11.8 Mio. Stunden) wurde im Teilprojekt MUSE-Ostsee die einheitliche Eintrittswahrscheinlichkeit von $1/1347$ Jahren, bzw. die empirische Unterschreitungswahrscheinlichkeit von $1 - 1/1347 = 0.999258/a$ für die 61 in SEBOK-A untersuchten Szenarien abgeleitet (Mudersbach und Jensen, 2009).

Am Seewetteramt des DWD in Hamburg wurde parallel eine Rekonstruktion der Druck- und Windfelder, die zu dem extremen Hochwasserereignis im November 1872 geführt haben, auf Basis historischer Daten vorgenommen. In einem iterativen Prozess wurden die generierten Windfelder anhand von Vergleichen der im Ozeanmodell des BSH damit errechneten Wasserstände mit den aufgezeichneten Zeitreihe fortlaufend verifiziert und korrigiert (Rosenhagen und Bork, 2008, 2009). Mit den so erzeugten Windfeldern wurde die gesamte Modellkette am FTZ Büsum durchlaufen was den detaillierten Vergleich des Referenzereignisses mit den Szenarien ermöglicht.

5 Ergebnisse auf überregionaler Ebene

Unter Verwendung der vom DWD generierten Sturmszenarien und dem beschriebenen Modellsystem wurde ein Verfahren entwickelt, um die Möglichkeiten dieser neuen Werkzeuge bei der Bemessung von Küstenschutzanlagen nutzen zu können. Zunächst werden Wasserstände und Seegang für die 61 untersuchten Szenarien und die Rekonstruktion des Sturmes von 1872 auf überregionaler Ebene d.h. für die gesamte Ostsee berechnet. Diese Ergebnisse liegen in einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten an jedem Modellgitterpunkt vor. Im Anhang sind für alle Szenarien sowie die Rekonstruktion des Sturmes von 1872 die Verteilung des Wasserstandes sowie das Windfeld über der südwestlichen Ostsee zum Zeitpunkt der jeweils höchsten Wasserstände dargestellt. Aus den Abbildungen kann Ort und Höhe des jeweils maximal erreichten Wasserstandes, sowie Windgeschwindigkeit und maßgebende Windrichtung abgelesen werden.

5.1 Rekonstruktion 1872

In Abbildung 7 werden die am FTZ mit den rekonstruierten Windfeldern des Sturmes von 1872 berechneten Scheitelwasserstände mit den historischen Messwerten verglichen. Mit Ausnahme des Pegels Warnemünde liegen die Abweichungen unter 40cm. Die Wasserstände in Warnemünde und an den Pegeln Thiessow und Greifswald werden in der Rekonstruktion etwas überschätzt, im Westen dagegen recht gut getroffen. Die generelle Verteilung wird ebenfalls gut erfasst. Neben dem Wasserstand konnte anhand der Windfelder außerdem die Seegangsverteilung über der Ostsee während des Ereignisses rekonstruiert werden. In Abbildung 7 sind die maximalen signifikanten Wellenhöhen (H_{m0}) für Positionen in 10m Wassertiefe nahe den 9 Stationen aufgetragen. Vor allem in der Kieler Bucht, aber auch in den anderen beiden Buchten fällt der unterschiedliche Trend zwischen Scheitelwasserstand und maximalem Seegang auf. Entlang der gesamten deutschen Ostseeküste treten in der Rekonstruktion von 1872 maximale signifikante Wellenhöhen zwischen 2.4 und über 4m auf. Für eine detailliertere Beschreibung der Seegangsmodellierung des Sturmes von 1872 siehe Kapitel 5.1. und (Jimenez et al. 2009).

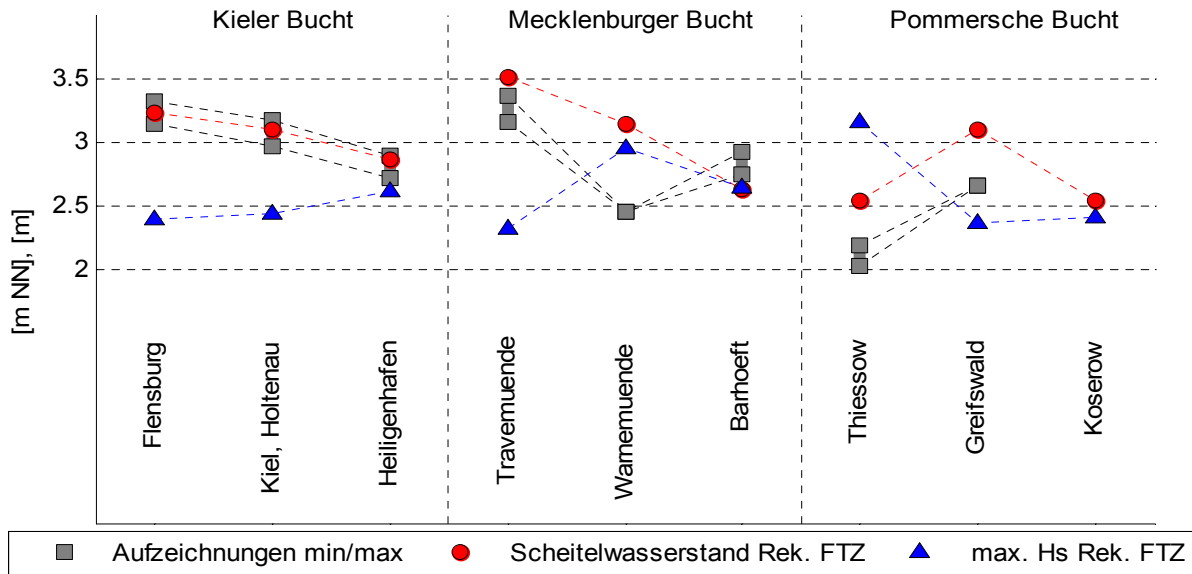


Abbildung 7: Rekonstruktion des 1872 Sturmes am FTZ.

5.2 Vorlaufrechnungen (era 40)

Die Windfelder der EPS-Szenarien umfassen meist nur wenige Tage. Daher wurden, um die Unabhängigkeit von den Ungenauigkeiten der Anfangszustände zu gewährleisten, Vorläufe über die 3-4 jeweils vorangehenden Wochen mit Windfeldern aus dem 'era40' Datensatz gerechnet. Der era40 Datensatz beinhaltet meteorologische Reanalysen der letzten 40 Jahre mit einer zeitlichen Auflösung von 6 Stunden auf dem Gitter des IFS-Modells (ECMWF, 2004). Trends werden damit erfasst, kurzfristige Spitzen z.B. der Windgeschwindigkeit können jedoch fehlen. Als Randwerte für die offene Grenze des Strömungsmodells wurden Wasserstandsmessungen der schwedischen Station Ringhals, auf 57,3°N im Kattegat gelegen, sowie für die Zeiträume 1964, '68 und '71, für die keine Messdaten vorliegen, am BSH berechnete Wasserstände verwendet. Anfangsverteilungen von Salzgehalt und Temperatur wurden anhand klimatologischer Monatsmittelwerte (Janssen et al., 1999) bestimmt. Anfangswasserstände wurden mit der in Kapitel 3.1 beschriebenen Methode erzeugt. Mit diesen Vorlaufrechnungen wurde die Ausgangssituation zu Beginn jedes Szenarios, d.h. die Anfangswerte für den Start der Szenariorechnungen erzeugt.

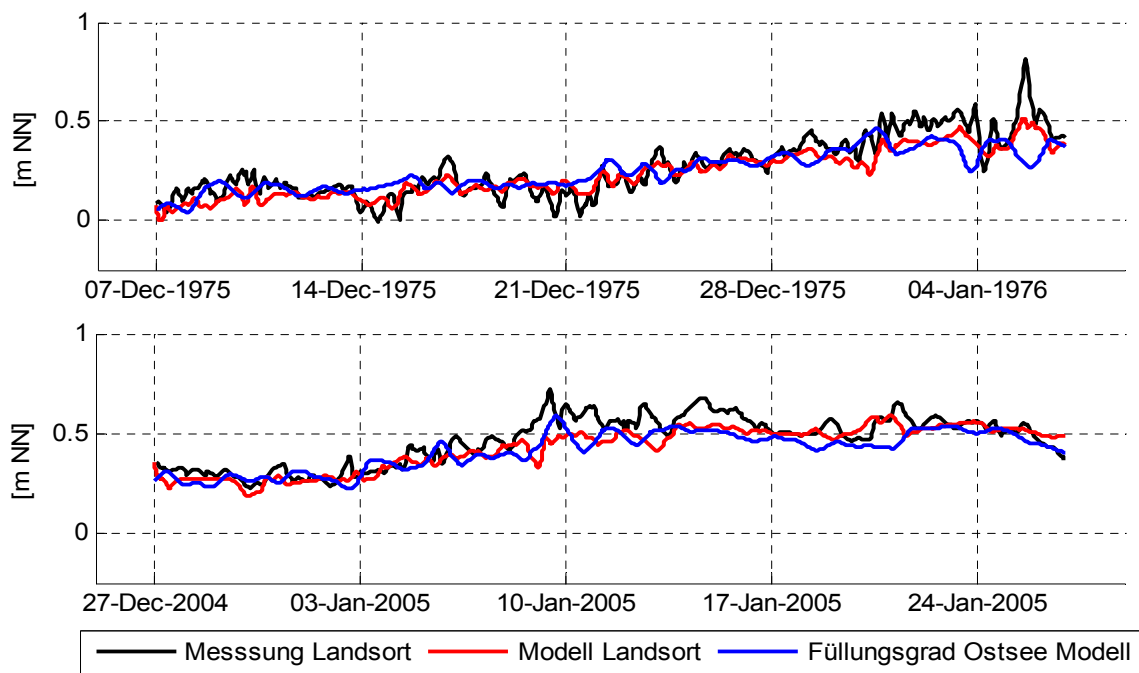


Abbildung 8: Vorlaufrechnung 12.75/01.76, angetrieben durch era40 Windfelder.

Die Ergebnisse der Vorläufe können außerdem verwendet werden, um zu überprüfen, ob das Strömungsmodell mit der offenen Grenze im Kattegat Volumentransporte zwischen Nord- und Ostsee, verursacht durch meteorologische Einflüsse, korrekt erfassen kann. In Abbildung 8 sind am Beispiel der beiden Vorlaufrechnungen Dezember 1975 und Januar 2005 die Ergebnisse des Strömungsmodells, in Form des mittleren Wasserstandes (Füllungsgrad) der gesamten Ostsee und des Wasserstandes an der Station Landsort, dem am Pegel Landsort gemessenen Wasserstand gegenübergestellt. Der Trend des am Pegel Landsort gemessenen Wasserstandes kann als repräsentativ für die Schwankungen des mittleren Wasserstandes der Ostsee angesehen werden (Janssen, 2002). In Anbetracht der oben beschriebenen groben zeitlichen Auflösung der Antriebsdaten ist die Übereinstimmung als gut zu bewerten. Volumenänderungen der Ostsee, verursacht durch meteorologische Einflüsse, können demnach mit dem Strömungsmodell angemessen reproduziert werden (vgl. auch Bruss und Bork, 2009). Die Korrelation zwischen dem Wasserstand am Pegel Landsort und dem Füllungsgrad der Ostsee wird bestätigt.

5.3 Szenariorechnungen

Aufbauend auf die im vorigen Kapitel beschriebenen Vorlaufrechnungen wurden flächendeckend Wasserstände und Seegang für die Sturmszenarien sowie die Rekonstruktion des Sturmes von 1872 berechnet.

5.3.1 Diskussion der Modellgenauigkeit

Zunächst wird kurz auf die Abschätzung der Genauigkeit der Ergebnisse mit Bezug auf den Einfluss des Windschubansatzes sowie den Einfluss der verwendeten Randwerte am offenen Modellrand im Kattegat eingegangen. Andere Einflussgrößen, wie z.B. Niveauunterschiede, werden in (Bruss und Bork, 2009), Unsicherheiten, die durch Unterschiede in den Windfeldern, bei der Verwendung verschiedener meteorologischer Modelle, entstehen können, werden in Bork und Müller-Navarra (2009) näher diskutiert.

5.3.1.1 Windschubansatz

In Kapitel 3 wurde bereits die Verifizierung der Modelle für den Sturm Februar 2002 vorgestellt. Der Wasserstandsverlauf des Sturmes wird vom Strömungsmodell generell gut reproduziert. Jedoch wurde bereits bei diesem Sturm, dessen maximale Windgeschwindigkeiten um 25m/s und damit noch im Gültigkeitsbereich empirischer Windschubansätze liegen, der Einfluss des Windschubkoeffizienten im Strömungsmodell deutlich.

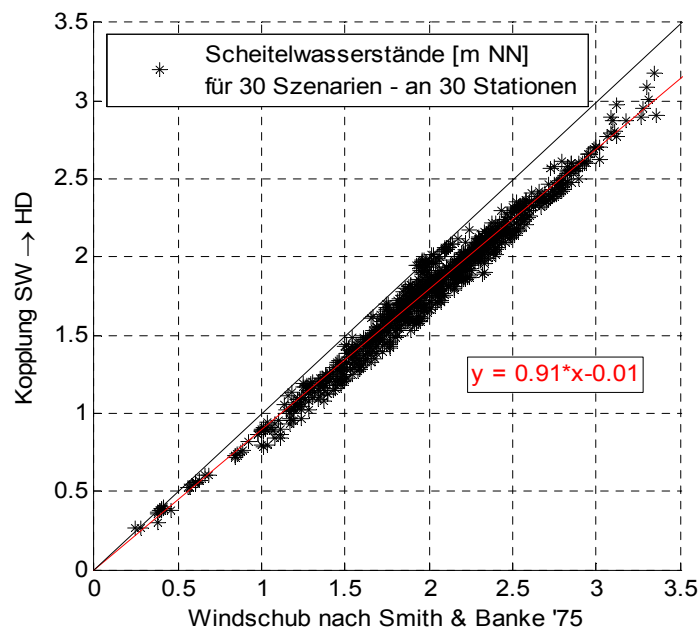


Abbildung 9: Vergleich unterschiedlicher Windschubansätze

Um die Unsicherheit empirischer Windschubansätze bei den hohen Windgeschwindigkeiten der Szenarien zu vermeiden wurde eine Oberflächenkopplung von Seegangs- und Strömungsmodell realisiert (Kopplung SW→HD). Die Windschubspannungen, die im spektralen Seegangsmodells iterativ nach der „wind-over-waves coupling theory“ nach Janssen (1989,

1991) bestimmt werden, werden als Antriebsdaten an der Wasseroberfläche des Strömungsmodells angesetzt (Bruss und Mayerle, 2009). Die Verifizierung der Methode wurde ebenfalls bereits in Kapitel 3.1 vorgestellt. Die so berechneten Wasserstände der Szenarien werden verglichen mit Modellergebnissen unter Verwendung des empirischen Smith und Banke Ansatzes mit konstantem Windschub ab 30m/s (S&B 2). Die zeitlichen Verläufe des Wasserstandes und damit Verweildauer und zeitliches Zusammentreffen mit hohem See-gang weisen zwischen den beiden Windschubansätze (S&B 2 und Kopplung SW→HD) nur geringe Unterschiede auf. Im Wesentlichen wird die Amplitude der Wasserstandsauslenkungen beeinflusst. Daher werden hier lediglich die lokalen Scheitelwerte betrachtet.

In Abbildung 9 sind die Scheitelwasserstände von 30 Stürmen an 30 Stationen entlang der deutschen Ostseeküste dargestellt. Die Scheitelwerte der SW → HD Kopplung sind über den Scheiteln, berechnet mit dem (S&B 2) Ansatz, aufgetragen. Die Scheitel der SW→HD Kopplung liegen tendenziell ca. 7% niedriger als die Werte nach Smith und Banke. Dies bestätigt das Bild der Verifizierung (vgl. Kapitel 3.1) von überschätzten Wasserständen bei Verwendung von (S&B 2).

Die Rekonstruktion der Windfelder des Referenzsturmes von 1872 erfolgte iterativ anhand von Wasserstandsberechnungen des BSH mit dem Windschubansatz nach (S&B 2) (Rosenhagen und Bork, 2009). Um für die küstennahen Untersuchungen die Vergleichbarkeit zu dem Referenzereignis zu erhalten, beziehen sich daher alle im Weiteren vorgestellten Ergebnisse ebenfalls auf Berechnungen mit dem Windschubansatz nach Smith und Banke. Zudem können Wasserstände, berechnet nach (S&B 2), z.B. für Fragen des Küstenschutzes als konservativ und damit relevant angesehen werden. Die beschriebenen Untersuchungen geben jedoch einen Anhaltswert für die Unsicherheit der Scheitelwasserstände als Folge des Windschubansatzes.

5.3.1.2 Randwerte des Strömungsmodells

Für die oben beschriebenen Vorlaufrechnungen der realen Situationen vor Beginn der Szenarien wurden Pegeldaten der Schwedischen Station Ringhals als Randwerte am offenen Rand des Strömungsmodells im Kattegat angesetzt. Sowohl die Modellverifikation anhand der beiden Stürme von 2002 und 2006 (Bruss und Bork, 2009) als auch die Überprüfung der Vorlaufrechnungen bestätigen eine Randsteuerung mit Pegeldaten im Kattegat als adäquate und sinnvolle Praxis für die Simulation hydrodynamischer Prozesse der Ostsee. Transport- und Austauschvorgänge mit der Nordsee werden zufriedenstellend erfasst bei Reduktion der Berechnungszeit im Vergleich zu Nord-Ostsee Modellen. Die EPS-Stürme wurden, aufgrund

der kürzeren Berechnungszeiten des reinen Ostseemodells, zunächst alle mit dem Modellsystem am FTZ unter Verwendung realer Pegeldata in Ringhals berechnet. Diese Ergebnisse dienten zur Auswahl einiger extremer Szenarien, die anschließend am BSH nachgerechnet wurden.

Bei den in Kapitel 4 beschriebenen 61 für die HN-Simulation ausgewählten EPS-Sturmszenarien handelt es sich zwar um physikalisch konsistente, also mögliche Wetterlagen, die anhand ihrer Startzeitpunkte in die reale Zeit eingeordnet werden, die Stürme weichen jedoch von der ursprünglichen Wettersituation ab. Damit kann auch der Wasseraustausch mit der Nordsee vom realen Verlauf abweichen.

Um die Unsicherheiten in den am FTZ berechneten Wasserständen, bedingt durch eine mögliche Abweichung zwischen dem realen, durch den Pegel Ringhals repräsentierten, und einem mit der EPS-Wettersituation im Gleichgewicht stehenden Austausch zwischen Nord und Ostsee, zu untersuchen wurden am FTZ Simulationen für die vom BSH berechneten Stürme mit Wasserständen aus dem BSH Modell als Randwerte im Kattegat durchgeführt. Anhand der Ergebnisse dieser Simulationen konnte der Einfluss der Randwerte auf die berechneten Wasserstände verifiziert werden.

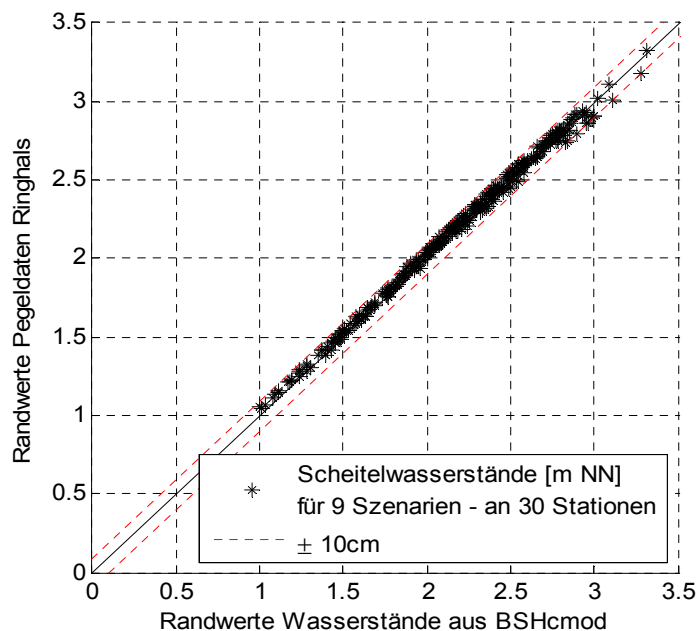


Abbildung 10: Vergleich unterschiedlicher Randwerte

In Abbildung 10 sind die Scheitelwasserstände für 9 EPS-Stürme an 30 Stationen entlang der deutschen Ostseeküste dargestellt. Modellergebnisse aus Rechnungen mit Ringhals Pegeldaten sind über Modellergebnissen aus Rechnungen mit Randwerten aus dem BSH Modell aufgetragen. Die Abweichungen zwischen den Scheitelwasserständen liegen stets unter 10cm. Damit kann die Unsicherheit in den EPS-Ergebnissen, bedingt durch Unsicherheiten der Wasserstände im Kattegat, als untergeordnet angesehen werden. Hauptgründe für den geringen Einfluss der Randwerte sind zum einen die meist kurze Dauer der untersuchten Ereignisse sowie die teilweise geringen Unterschiede zwischen den Randwerten aus dem BSH Modell und den Pegeldaten. Zum anderen wird der Einfluss von Wasserstandsgradienten im Kattegat auf extreme Wasserstandsschwankungen bei Sturmhochwasser an der deutschen Ostseeküste, die hauptsächlich durch Transporte aus der zentralen Ostsee verursacht werden, durch die Belte gedämpft.

5.3.2 Scheitelwerte an 18 Stationen

5.3.2.1 Wasserstände

Die Topographie der deutschen Ostseeküste unterliegt einer starken Gliederung. Großräumig betrachtet sind drei Buchten zu unterscheiden: Kieler-, Mecklenburger- und Pommersche Bucht. Diese werden zum einen durch den Fehmarn Belt bei Marienleuchte, zum anderen durch die Darsser Schwelle zwischen Rügen (Varnkewitz) und Falster getrennt. Abbildung 12 zeigt die Scheitelwasserstände aller Szenarien an 18 Stationen entlang der deutschen Ostseeküste in West – Ost Richtung. Eine Zeile von Abbildung 12 entspricht einem Sturm, eine Spalte einer Station. Die Positionen der einzelnen Stationen können der Karte in Abbildung 11 entnommen werden.

Die für die deutsche Ostseeküste sturmflutwirksame Windrichtung bewegt sich grob zwischen 0° (Nord) und 90° (Ost). Die daraus resultierende Neigung des Wasserstandes in NO-SW Richtung ist bei dem Vergleich der Scheitelwerte zwischen den Stationen sichtbar. Der höhere Windstau im jeweils südwestlichen Teil der Buchten kann durch geschlossene und flache Topographien zusätzlich verstärkt werden. Aus Abbildung 12 ist zu ersehen, dass zwar in manchen Stürmen 1m NN im Scheitel nicht erreicht wird, insgesamt werden aber in ca. 17 Szenarien 2.5m NN lokal überschritten. Nach BSH Klassifizierung (Meinke, 1999) sind diese Stürme als sehr schwere Sturmflut einzustufen.

Neben der Konzentration hoher Scheitelwerte in den südwestlichen Teilen der Buchten wird deutlich, dass hohe Wasserstände je nach Art des Sturmes meist auf eine und maximal auf

zwei Buchten beschränkt bleiben. Kein einzelner Sturm verursacht extreme Wasserstände entlang der gesamten deutschen Ostseeküste. Das Auftreten extremer Scheitelwerte ist zudem häufiger in der östlichen Pommerschen Bucht, die sich weit zur zentralen Ostsee und damit langen Streichlängen aus NO öffnet.

Die untersten, abgesetzten Zeilen in Abbildung 12 zeigen die Scheitelwerte von Rekonstruktion und historischen Daten des 1872er Sturmes. Obwohl die historischen Daten in der Mecklenburger Bucht durch die Rekonstruktion etwas überschätzt werden wird die generelle Verteilung gut wiedergegeben (vgl. Kapitel 5.1). Bemerkenswert an diesem Ausnahmeereignis sind die extrem hohen Wasserstände um und über 3m NN westlich von Wismar und in der gesamten Kieler Bucht. Keines der untersuchten Sturmszenarien führt zu solch einer großen Ausdehnung von extremen Wasserständen im Westen der deutschen Ostsee. Im Osten wird das Referenzereignis, dass hier mit Scheitelwerten um 2.6m nicht so extrem ausfiel, von 4 Szenarien übertroffen.

Die Hauptursache, warum die hohen Werte des 1872er Sturmes im Westen von den Szenarien nicht erreicht werden, ist die unterschiedliche räumliche Ausdehnung hoher Windgeschwindigkeiten. In den rekonstruierten Windfeldern des 1872er Sturmes erstrecken sich Windgeschwindigkeiten über 20m/s über die gesamte zentrale und südwestliche Ostsee inklusive Kattegat. Obwohl in einigen der Szenarien lokal höhere Windgeschwindigkeiten als in der Rekonstruktion von 1872 auftreten sind diese hohen Windstärken immer auf deutlich kleinere Gebiete beschränkt.

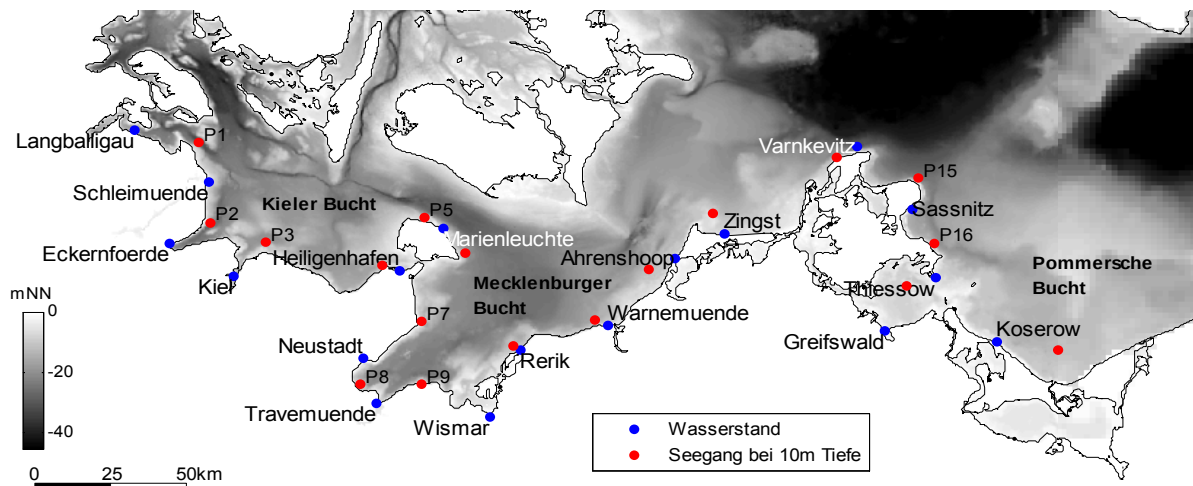


Abbildung 11: Positionen zur Analyse der Scheitelwerte. Blau: Stationen für den Scheitelwasserstand in Abbildung 12; Rot: Stationen für die signifikante Wellenhöhe in.

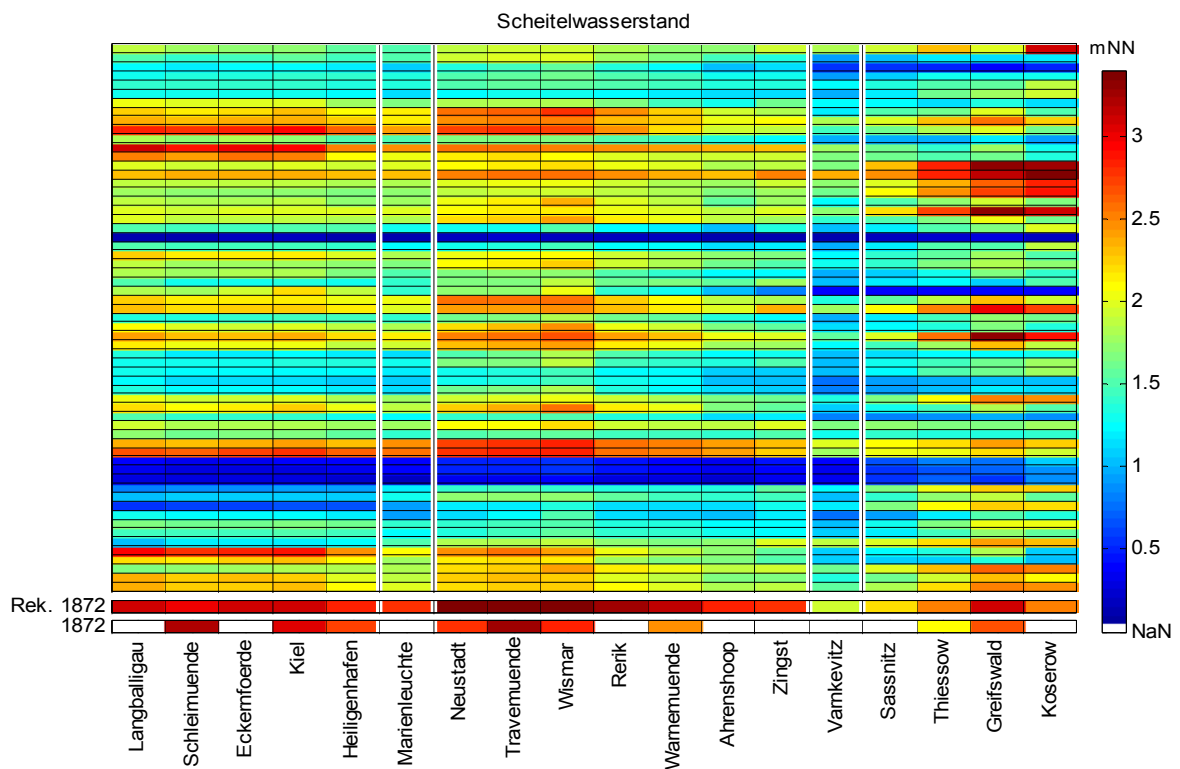


Abbildung 12: Scheitelwasserstände der 61 Szenarien und der Rekonstruktion von 1872 sowie historische Daten von 1872 an 18 Stationen entlang der deutschen Ostseeküste.

5.3.2.2 Seegang

Analog zum Wasserstand wurde der Seegang an 18 Positionen entlang der deutschen Ostseeküste analysiert (vgl. rote Punkte in Abbildung 11). Die Positionen wurden an repräsentativen Stellen entlang der 10m Tiefenlinie angeordnet womit der Einfluss der lokalen Strandtopographie und eines variablen mittlerer Wasserstand auf die hier vorgestellten Ergebnisse gering bleibt.

In Abbildung 13 oben ist die im Verlauf der Stürme maximal aufgetretene signifikante Wellenhöhe für die Szenarien und die Rekonstruktion des Sturmes von 1872 farbcodiert dargestellt. Eine Zeile entspricht einem Sturm, eine Spalte einer Station. In der unteren Grafik von Abbildung 13 sind, zur besseren Veranschaulichung der Tendenz der räumlichen Verteilung, die gleichen Werte in einem zweidimensionalen Diagramm dargestellt. Die höchsten Wellenhöhen treten an Orten mit, relativ zur sturmflutwirksamen Windrichtung, exponierter Lage auf. Da sich die maßgebende Windrichtung in den meisten Stürme zwischen 0° (Nord) und 90° (Ost) bewegt, ist der Seegang jeweils an der Nordseite der Inseln Rügen und Fehmarn am höchsten. An den im Vergleich deutlich höchsten Wellenhöhen von über 5m in der Region um Nord-Rügen ist zudem der Einfluss großer Streichlängen in Nordost-Richtung erkennbar. An Orten nahe erhöhter Landabdeckung wie z.B. vor Timmendorf erzeugten auch die stärksten Stürme nur vergleichsweise geringen Seegang. Die tendenziell geringeren Wellenhöhen der westlichen Kieler Bucht sind Folge der vergleichsweise geringen Streichlängen für nordöstliche Winde. Zudem sind hier die Windgeschwindigkeiten durch die erhöhte Rauheit über Land reduziert. Der geringe Seegang der südlichen Pommerschen Bucht (Thiessow und Koserow) ist hingegen hauptsächlich auf die flache Topographie zurückzuführen. Dieser generellen räumlichen Verteilung des Seegangs, die durch blaue Linie der Mittelwerte im unteren Diagramm von Abbildung 13 repräsentierte wird, ist die Konzentration hohen Seegangs auf einzelne Buchten abhängig vom individuellen Sturmablauf überlagert.

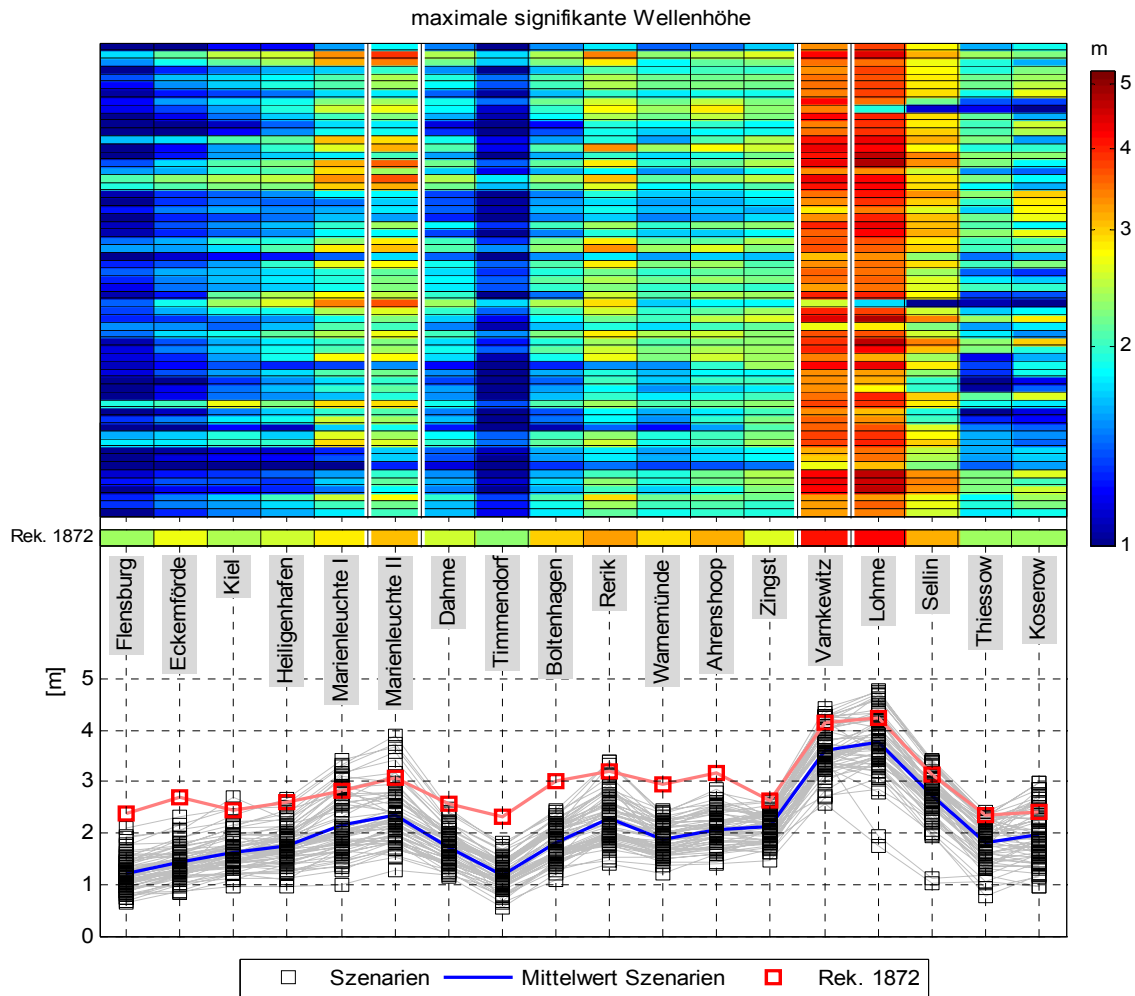


Abbildung 13: Maximale signifikante Wellenhöhen an den 18 Stationen aus Abbildung 11 für alle 61 Szenarien und die Rekonstruktion des Sturmes von 1872. Oben: farbcodierte Darstellung; Unten: zweidimensionale Darstellung zur Verdeutlichung der Tendenz in der räumlichen Verteilung.

In der Verteilung der maximalen signifikanten Wellenhöhen der Rekonstruktion von 1872, als rote Markierungen im unteren Diagramm von Abbildung 13, ist das oben beschriebene Grundmuster ebenfalls erkennbar. Dabei fallen bei der Rekonstruktion von 1872 vor allem die im Vergleich zu den Szenarien hohen Wellenhöhen in der Mecklenburger- und Kieler Bucht auf. Im Westen wird der Seegang der Rekonstruktion nur an einzelnen Stationen, vor allem im Norden Fehmarns, durch einige Szenarien übertroffen. Die durch die aufgezeichneten Wasserstände bekannte vor allem Westliche Ausrichtung des Referenzereignisses wird in der Seegangsrekonstruktion bestätigt. Dabei ist zu bemerken, dass in der Rekonstruktion des Wasserstandes die historischen Scheitelwerte in der Mecklenburger Bucht etwas überschätzt werden (Kapitel 5.1 und Rosenhagen und Bork, 2009). Dies lässt auf möglicherweise lokal überhöhte Windgeschwindigkeiten im rekonstruierten Windfeld schließen. Damit könnte

der Seegang der Rekonstruktion hier ebenfalls etwas zu hoch sein. Im Osten liegen die Seegangshöhen der Rekonstruktion mit ähnlicher Verteilung wie das Mittel der Szenarien, zwar am oberen Rand, jedoch nicht deutlich über den Werten aus den Szenarien.

Die mittlere Verteilung hohen Seegangs ist der Tendenz in der räumlichen Verteilung hoher Wasserstände (s.o.) entgegengesetzt. Dies ist aus Sicht des Küstenschutzes positiv zu bewerten. Entlang der deutschen Ostseeküste wird durch die komplexe Topographie im Westen und die geringen Wassertiefen der südlichen Pommerschen Bucht im Osten ein Zusammentreffen von extremen Wasserständen und extremem Seegang zumeist verhindert. Zudem ist das zeitliche Zusammentreffen von hohem Wasserstand und Seegang zu berücksichtigen. Die in Abbildung 13 dargestellten Werte repräsentieren den im Verlauf der Stürme maximal aufgetretenen Seegang. Der Seegang, der zeitgleich mit dem Scheitelwassertand auftritt fällt meist geringer aus.

In Abbildung 14 ist für die untersuchten Stürme und die Rekonstruktion von 1872 jeweils die Dauer hohen Seegangs ($H_m > 2\text{m}$) an den 18 Stationen dargestellt. Der Mittelwert der Szenarien ist erneut blau, die Werte der Rekonstruktion rot dargestellt. In dieser Darstellung wird der singuläre Charakter des Sturmes von 1872 im Vergleich zu den untersuchten Szenarien erneut deutlich. In der Rekonstruktion trat zwischen Kiel und Thiessow, also nahezu entlang der gesamten deutschen Ostseeküste, im Durchschnitt 24 Stunden lang Seegang über 2m auf. Lediglich in Süden der Mecklenburger Bucht, in Timmendorf, sowie im äußersten West und Osten war die Dauer hohen Seegangs etwas geringer. Die lange Dauer hohen Seegangs der Rekonstruktion wird nur nördlich Rügen und Fehmarns durch zwei der Szenarien übertroffen. Angesichts der in der Rekonstruktion von 1872 ebenfalls im Vergleich zu den Szenarien vor allem im Westen außergewöhnlich hohen Wasserstände wird das hohe destruktive Potential des Sturmes deutlich.

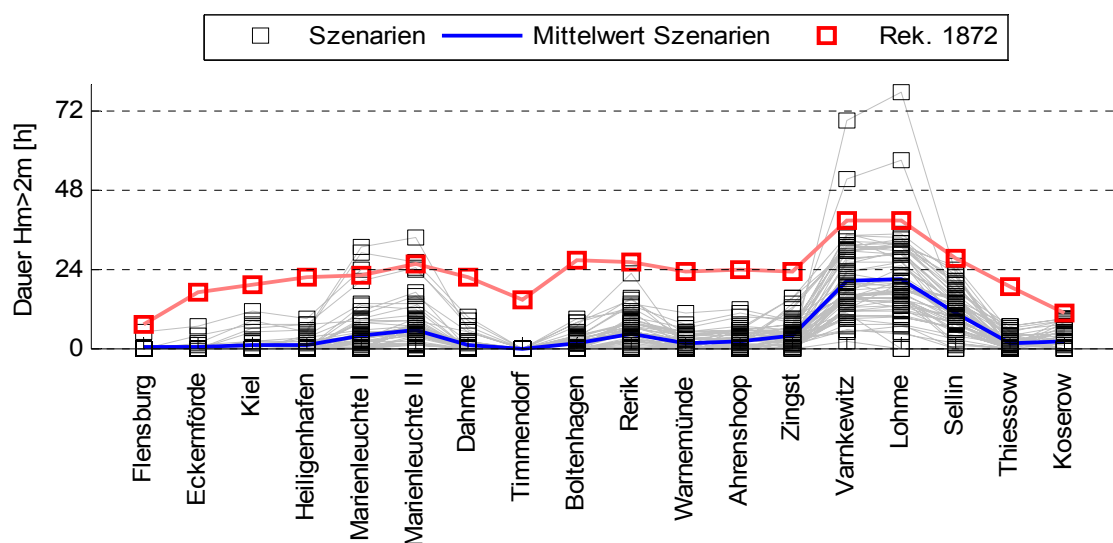


Abbildung 14: Dauer in Stunden mit signifikanter Wellenhöhe über 2m an den 18 Stationen aus Abbildung 11 für alle 61 Szenarien und die Rekonstruktion des Sturmes von 1872.

5.3.3 Scheitelwerte an der Station Kiel

Im Folgenden wird der Einfluss unterschiedlicher Sturmweatherlagen auf die Hydrodynamik der südwestlichen Ostsee am Beispiel der Station Kiel analysiert.

5.3.3.1 Wasserstand

Im unteren Teil von Abbildung 15 sind die Scheitelwasserstände aller Szenarien und der Rekonstruktion von 1872 der Größe nach aufsteigend angeordnet. Der absolute Scheitelwasserstand wurde in drei Anteile aufgespaltet, die in Abbildung 15 durch unterschiedliche Farben dargestellt sind. Die Zerlegung in die Einzelanteile ist in Abbildung 16 anhand der zeitlichen Verläufe des Wasserstandes am Pegel Kiel-Holtenau und des mittleren Wasserstandes der Kieler Bucht am Beispiel zweier EPS-Stürme und der Rekonstruktion von 1872 schematisch dargestellt. Abbildung 17 zeigt die räumliche Wasserstandsverteilung sowie das Windfeld im Bereich der Kieler Bucht für die Stürme aus Abbildung 16 jeweils zum Zeitpunkt des Scheitelwasserstandes in Kiel.

Der mittlere Wasserstand der Kieler Bucht wird aufgrund der Äquidistanz des Gitters als arithmetisches Mittel aller, innerhalb der in Abbildung 17 durch schwarze Linien begrenzten Fläche liegenden, Gitterzellen bestimmt. Als lokaler Sturmbeginn für Kiel wurde jeweils das letzte Minimum des 6-stündigen Mittelwertes des mittleren Wasserstandes der Kieler Bucht vor dem Scheitel in Kiel-Holtenau definiert. Die entsprechende Ausgangssituation, d.h. der mittlere Wasserstand der Kieler Bucht zu Beginn des Sturmes, ist in Abbildung 15 und

Abbildung 16 als weißer Balken dargestellt. Mit der verwendeten Definition wird der Ereignisbeginn auf den Anfang der durch den Sturm verursachten signifikanten positiven Volumenänderung innerhalb der Kieler Bucht gelegt. Diese Volumenänderung während dem Ereignis (blaue Balken) wird als Differenz des Mittelwertes der Kieler Bucht zwischen Ereignisbeginn und Zeitpunkt des lokalen Scheitels in Kiel berechnet. Die zusätzliche lokale Neigung des Wasserstandes (rote Balken) ist die Differenz zwischen dem Wasserstand in Kiel und dem mittlerem Wasserstand der Kieler Bucht ebenfalls zum Zeitpunkt des Scheitels in Kiel.

Untersuchungen von Bork und Müller-Navarra (2009) legen nahe, dass reine Rückschwingungen ohne Windeinwirkung (Seiches) einen vergleichsweise geringen Anteil am Wasserspiegelanstieg der südwestlichen Ostsee während eines Sturmereignisses ausmachen. Begründet wird dies, basierend auf Experimenten mit einem der EPS-Szenarien sowie der Rekonstruktion von 1872, unter anderem mit der unterschiedlichen Phase zwischen Rückschwingung und Sturmwirkung. Versuche durch die Modifikation der Zyklon-Zuggeschwindigkeit einiger Stürme den Phasenunterschied zu reduzieren führten jedoch nur zu geringen Erhöhungen der Scheitelwasserstände (Benkel und Meinke, 2008).

Bei der Betrachtung der 61 Scheitelwasserstände in Abbildung 15 ist ebenfalls keine, den Scheitelwert in Kiel erhöhende, Wirkung einer bei Ereignisbeginn negativen Volumenauslenkung der Kieler Bucht erkennbar. Im Gegenteil war bei 17 der 20 höchsten Stürme die Kieler Bucht am Ereignisbeginn nicht negativ ausgelenkt. Obwohl nicht generell ausgeschlossen werden kann, dass für andere als die untersuchten Konstellationen von Sturmverlauf und Rückschwingung die Überlagerung ungünstiger ausfallen kann, spielt die Großwetterlage mit entsprechenden Windverhältnissen über der zentralen Ostsee und dem Kattegat bei extremen Volumenänderungen der Kieler Bucht die entscheidende Rolle. Zudem hat am Beispiel Kiel die Wasserstandserhöhung als Folge des Volumentransportes bei allen betrachteten Szenarien den größeren Anteil am Scheitelwasserstand.

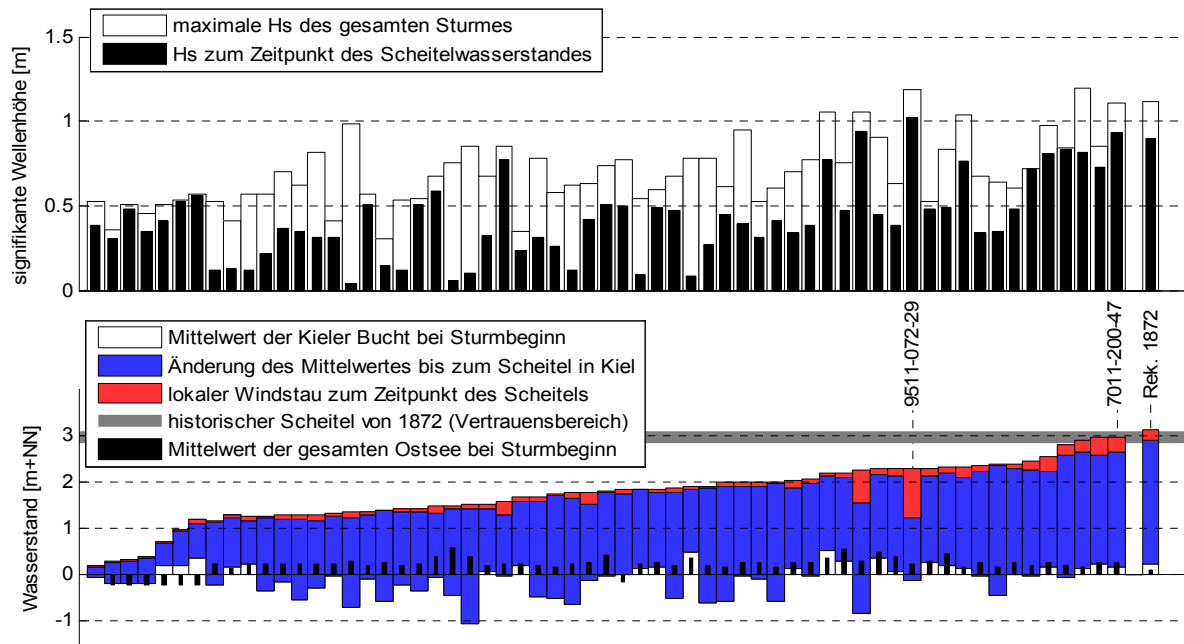


Abbildung 15: Signifikante Wellenhöhen und Wasserstände an der Station Kiel.

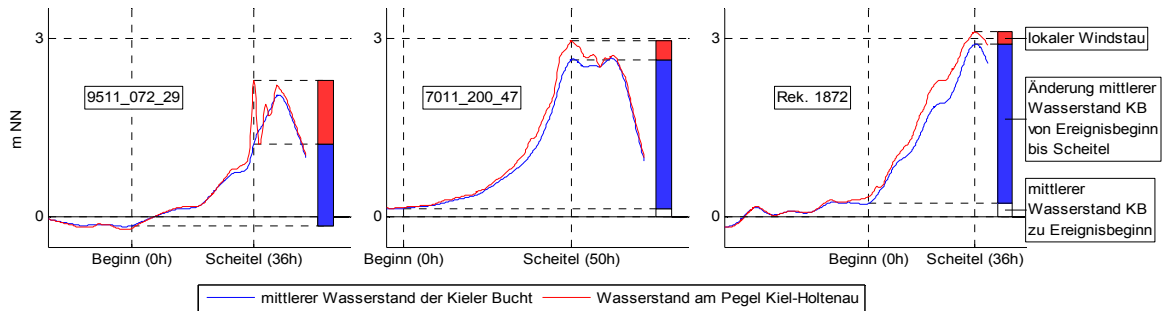


Abbildung 16: Zeitliche Verläufe von mittlerem Wasserstand der Kieler Bucht und lokalem Wasserstand in Kiel, für 3 Stürme.

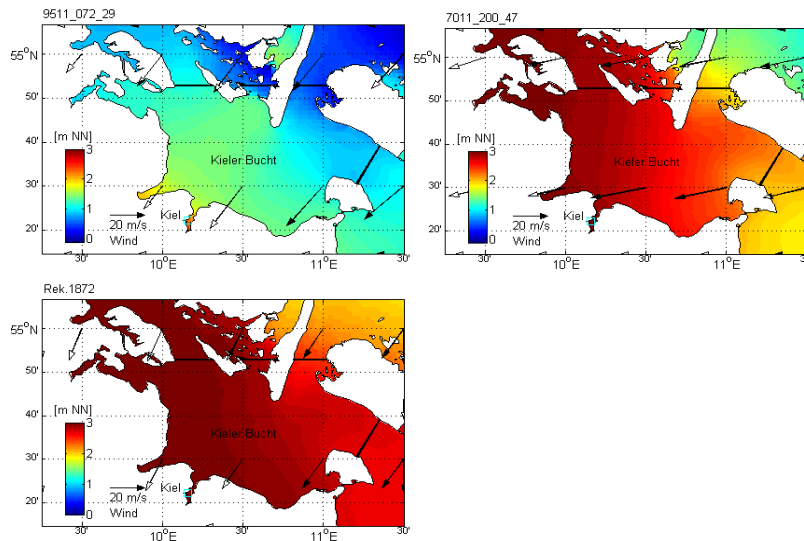


Abbildung 17: Räumliche Verteilung des Wasserstandes der Kieler Bucht zum Zeitpunkt des Scheitelwasserstandes in Kiel für 3 Stürme.

Der Rote Anteil in Abbildung 15 stellt den lokalen Windstau, also die lokale Auslenkung des Wasserstandes um den Mittelwert der Kieler Bucht, dar. Der Sturm 9511 führt zum größten lokalen Windstau in Kiel von ca. 0.8m. Durch den Windstau wird gleichzeitig der lokal höchste Wasserstand des Sturmes erzeugt. Dieser erste Scheitel ist jedoch eng auf die Eckernförder und Kieler Förden begrenzt (vgl. Abbildung 17) und tritt 7.5 Stunden vor der maximalen Volumenerhöhung der Kieler Bucht und dem damit verbundenen zweiten, nur 10cm niedrigeren, Scheitel auf (vgl. Abbildung 16). Derart räumlich und zeitlich isolierte hohe Wasserstände sind in den Szenarien selten. In dem Sturm 7011 tritt der höchste lokale Windstau fast zeitgleich mit dem ersten Scheitel des Buchtenvolumens auf. Die Wasserstände in der gesamten Kieler Bucht liegen über 2.5m NN wobei durch die östliche Windrichtung vor allem im Westen, z.B. in Flensburg, hoher lokaler Windstau entsteht.

Extremer lokaler Windstau von über 0.5m tritt insgesamt nur in 3 der 61 Stürme und nur in 2 Fällen zeitgleich mit dem Scheitel in Kiel auf (vgl. Abbildung 15). Er ist die Folge extremer Windgeschwindigkeiten, die zum einen meist nur über kurze Zeitspannen auftreten, zudem muss der Wind auf entsprechend staufördernde topographische Formen, wie z.B. die engen u. flachen Förden gerichtet sein. Das relative zeitliche Eintreten von maximalem lokalem Windstau und maximalen Buchtenvolumen eines Sturmes ist in den untersuchten 61 Stürmen sehr variabel, wobei in den meisten Fällen hoher Windstau vor dem Erreichen des Buchtenmaximums auftritt. In der Pommerschen Bucht, wo in den Szenarien generell örtlich höhere Windgeschwindigkeiten auftraten, z.B. an der Station Koserow, ist der Anteil des lokalen Windstaues am Scheitelwasserstand etwas höher.

Der 1872 in Kiel-Holtenau aufgezeichnete Scheitelwasserstand, in Abbildung 15 als horizontaler grauer Balken dargestellt, wird von zwei Szenarien knapp erreicht. Anderenorts wurden die Werte von 1872 durch die Szenarien zum Teil deutlich überschritten (vgl. Abbildung 12, und Abbildung 19). Der jeweils ganz rechte Balken in Abbildung 15 stellt den mit den rekonstruierten Windfeldern berechneten Scheitelwasserstand und Seegang des 1872 Ereignisses in Kiel dar. Sowohl in der Rekonstruktion von 1872 als auch in den hohen Szenarien werden die extremen Scheitelwasserstände hauptsächlich durch den Anstieg des mittleren Wasserstandes der Kieler Bucht verursacht.

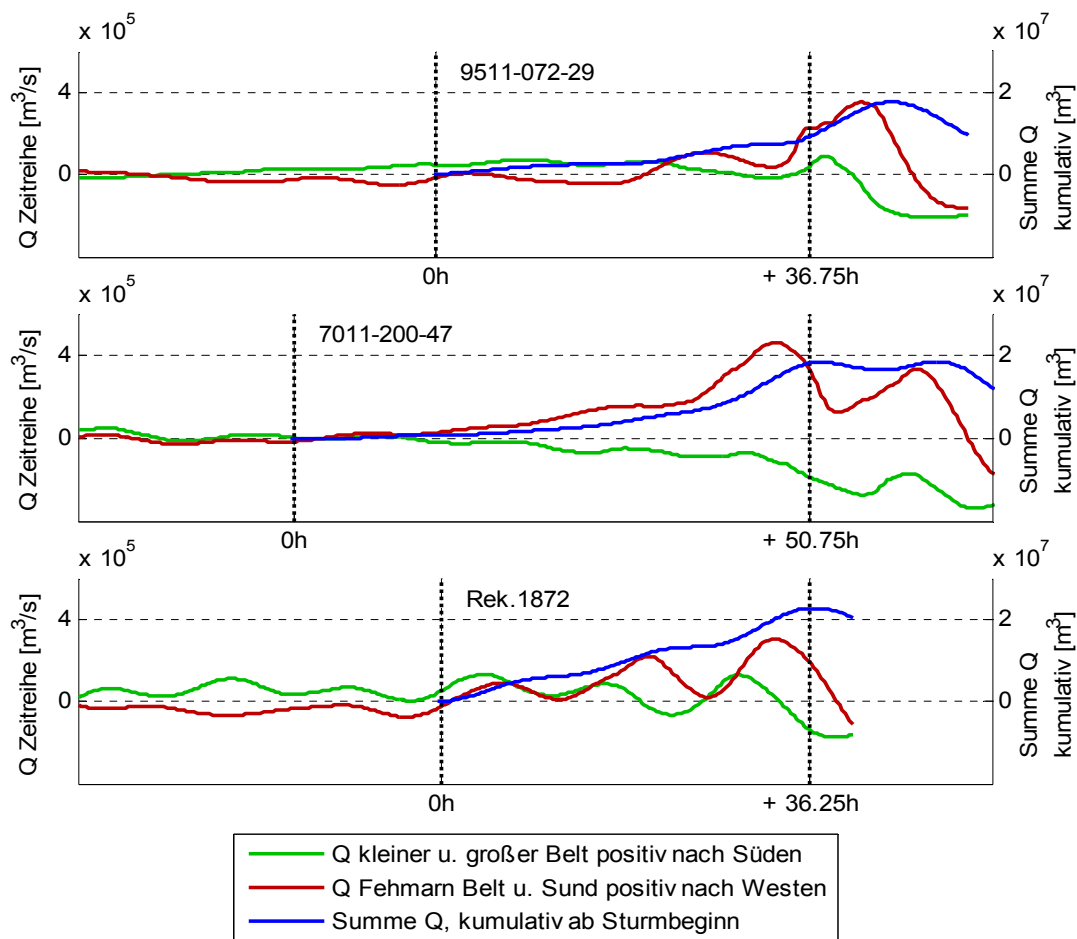


Abbildung 18: Ein- und Ausstromtransporte, sowie die Volumenentwicklung der Kieler Bucht für 3 Stürme.

Abbildung 18 zeigt die Transporte durch die als schwarze Linien in Abbildung 17 markierten Querschnitte für die Stürme aus Abbildung 16. Grün dargestellt ist der Durchfluss aus dem Kattegat durch die dänischen Belte in die Kieler Bucht. Braun eingezeichnet sind die Transporte aus der Mecklenburger- in die Kieler Bucht durch Fehmarn Belt und Sund. Positive Transporte bedeuten jeweils Einstrom in die Kieler Bucht. Die kumulative Summe der Beiden

Durchflüsse, blau dargestellt, repräsentiert somit die zeitliche Entwicklung des Volumens der Kieler Bucht und ist äquivalent zu dem in Abbildung 16 dargestellten Verlauf des mittleren Wasserstandes, wobei hier die Summe ausgehend von dem einheitlichen Volumen von 0m^3 bei Sturmbeginn berechnet wurde. Somit wird, unabhängig von der Ausgangssituation, nur der durch den Sturm verursachte Volumenanstieg verglichen.

Bei allen drei Stürmen wird der Volumenanstieg der Kieler Bucht maßgeblich durch den Zustrom aus Osten verursacht wobei bei der Rekonstruktion von 1872 ein vergleichsweise geringer Ost-West Transport stattfindet. Trotzdem ist der Volumenanstieg der Rekonstruktion des 1872er Sturmes deutlich am höchsten. Der entscheidende Unterschied ist der zusätzliche Zustrom aus dem Kattegat bei der Rekonstruktion. Dem gegenüber wird der extrem hohe Ost-West Transport des Sturmes 7011, als Folge ausgeprägt westlicher Windrichtungen, durch das ebenfalls starke Abfließen nach Norden teilweise kompensiert. Die großräumigen Windverhältnisse der 3 Stürme können den jeweiligen Abbildungen im Anhang entnommen werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine entsprechende großräumige meteorologische Situation über der zentralen und südwestlichen Ostsee mit lokal auftretendem Wind zusammenwirken muss, um extreme Wasserstände an der deutschen Ostseeküste zu erzeugen, wobei die großräumigen Volumentransporte meist den größeren Anteil am Scheitelwasserstand ausmachen. Die im Westen der deutschen Ostsee extrem hohen Wasserstände der Rekonstruktion des Sturmes von 1872 sind hauptsächlich eine Folge der durch die speziellen Windverhältnisse sowohl aus der zentralen Ostsee, als auch aus dem Kattegat in die südwestliche Ostsee und vor allem in die Kieler Bucht induzierten Wassertransporte.

Die Vorfüllung der Ostsee bei Sturmbeginn, die schwarzen Balken in Abbildung 15, wird maßgeblich durch die Vorlaufrechnungen bestimmt, und unterscheidet sich somit bei EPS-Stürmen mit gleichem Startzeitpunkt aber unterschiedlichem Ereignisbeginn nur gering. Trotzdem gibt es, aufgrund der 17 verschiedenen Starttermine eine große Bandbreite unterschiedlicher Vorfüllungen in den 61 Stürmen. Die Korrelation zwischen der Vorfüllung und dem Scheitelwasserstand in Kiel ist nahezu gleich Null (0.01). Dies sagt jedoch nichts über den Einfluss verschiedener Vorfüllungen auf ein und denselben Sturm aus. Die durch die schwache Korrelation angedeutete stochastische Unabhängigkeit zwischen der Vorfüllung der Ostsee und dem Scheitelwasserstand einzelner Stationen wirft vielmehr die Frage auf, inwieweit die hier untersuchten Sturmwaterstände auf eine einheitliche Vorfüllung korrigiert werden können und sollen. Da im Rahmen von MUSTOK zwar für die Rekonstruktion von 1872 ein gewisser Zusammenhang zwischen einer variablen Vorfüllung und dem Scheitel-

wasserstand an einzelnen Pegeln festgestellt wurde (Bork und Müller-Navarra 2009), dieser jedoch nicht übertragbar quantifiziert werden konnte, können entsprechende Korrekturen an dieser Stelle nicht erfolgen.

5.3.3.2 Seegang

Aus den Ergebnissen des überregionalen Seegangmodells sind in Abbildung 15 oben zwei signifikante Wellenhöhen (H_s) aufgetragen. Zum einen (schwarz) handelt es sich um die signifikanten Wellenhöhen des Seegangs der zeitgleich mit dem Scheitelwasserstand aufgetreten ist, und zum anderen (weiß) um den maximal wahren jedes Szenarios erreichten Seegang an der Station Kiel. Die geringen Größenordnungen von $H_s < 1.3\text{m}$ werden durch die geschützte Lage in der Kieler Förde bedingt. Außerhalb der Förde z.B. am Leuchtturm Kiel, etwa 7km seewärts der Station Kiel Holtenau, erreichen die signifikanten Wellenhöhen Werte bis 4.6m.

Aus Abbildung 15 geht hervor, dass nur bei ca. 8% der Szenarien die beiden Maximalwerte von Wasserstand und Seegang zeitgleich auftreten. Das Auftreten von hohem Seegang scheint außerdem nicht an bestimmte (hohe) Wasserstände gebunden zu sein. Die Korrelation zwischen den beiden Maximalwerten von Wasserstand und Seegang ist schwach. Eine höhere Korrelation besteht zwischen den schwarzen Balken der oberen und den roten Balken des unteren Diagramms, also dem lokalen Windstau (unten) und dem Seegang zum Zeitpunkt des Scheitelwasserstandes (oben). Beide treten zeitgleich auf und werden vom lokalen Wind bestimmt.

Die Analyse ungünstigster Belastungsfälle lässt sich folglich nicht auf die Betrachtung der beiden Maximalwerte reduzieren. Relatives zeitliches Eintreten von hohem Wasserstand und Seegang sowie Dauer des Sturmereignisses müssen berücksichtigt werden. Obwohl der lokale Seegang in Kiel für die Rekonstruktion von 1872 vergleichsweise hoch ausfällt, wird dieser durch 4 Szenarien übertroffen. Da die Szenarien in der Kieler Bucht die Scheitelwasserständen von 1872 nur knapp erreichen, jedoch teilweise zu höherem Seegang als in der Rekonstruktion geführt haben, kann die Frage nach dem ungünstigeren lokalen Belastungsfall im Vergleich zwischen Szenarien und 1872 durch die alleinige Betrachtung der Scheitelwerte nicht beantwortet werden.

5.3.4 Räumliche Verteilung der maximalen Scheitelwerte

Abschließend für die Diskussion der Scheitelwerte wird deren räumliche Verteilung analysiert. In Abbildung 19 kann die räumliche Verteilung der Scheitelwerte von Wasserstand (o-

ben) und signifikanter Wellenhöhe (unten) zwischen den Szenarien (links) und der Rekonstruktion 1872 (rechts) verglichen werden. Dargestellt sind die in allen Szenarien bzw. während der Rekonstruktion 1872 maximal erreichten Werte in jeder Gitterzelle des Strömungs- bzw. Seegangmodells.

Wie bei der Verifikation der Rekonstruktion 1872 gegen historische Daten in Kapitel 5.1 bereits erläutert wurde, werden die Scheitelwerte in Teilen der Mecklenburger und Pommerschen Bucht etwas überschätzt, die generelle Verteilung des Scheitelwasserstandes von 1872 in Abbildung 19 rechts oben ist jedoch durchaus realistisch. Betrachtet man diese Verteilung vereinfacht als die Höhe, auf welche Küstenschutzanlagen derzeit bemessen sind, kann man durch einen Vergleich mit den Szenarien direkt das Gefährdungspotenzial, bezogen auf Scheitelwasserstände, entlang der gesamten deutschen Ostseeküste ablesen. Die Szenarien erreichen z.B. im Osten, in der Pommerschen Bucht, deutlich höhere Werte als die Rekonstruktion von 1872. Hier würde sich ein vergleichsweise hohes Gefährdungspotenzial ergeben. In der Kieler Bucht haben die Szenarien mit 1872 vergleichbare Wasserstände erzeugt.

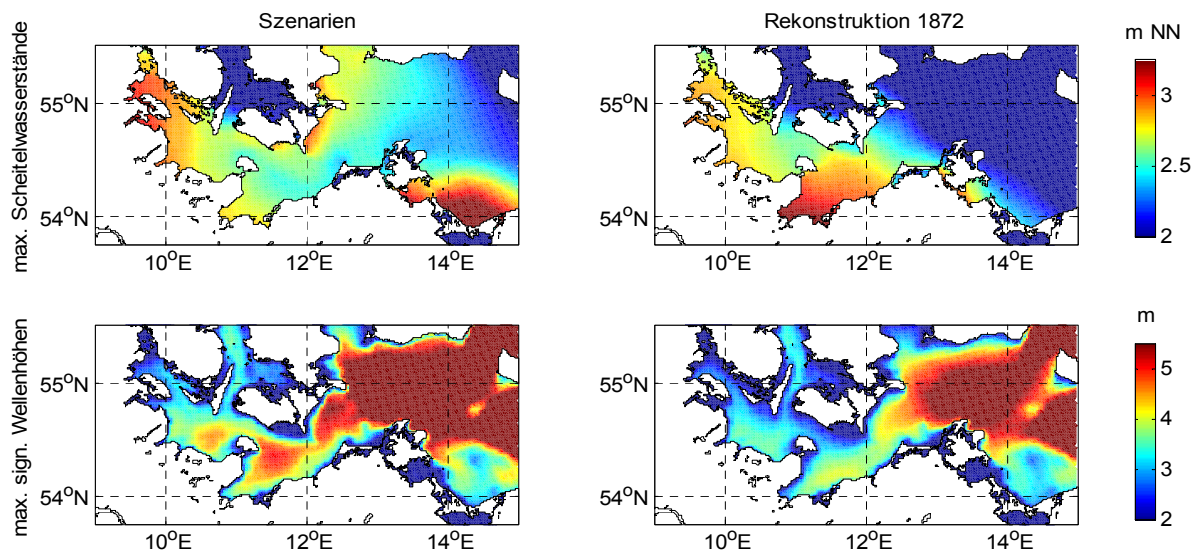


Abbildung 19: Maximalwerte an jeder Gitterzelle aus: links - allen Szenarien | rechts - Rekonstruktion 1872 oben - Strömungsmodell | unten - Seegangmodell

Beim Seegang haben sich bei den Szenarien allgemein etwas höhere Maximalwerte ergeben als bei der Rekonstruktion von 1872 (vgl. Abbildung 15 für Kiel). Dies liegt daran, dass der Seegang direkter auf lokale Windverhältnisse reagiert als der Wasserstand. In den Szenarien ist an jedem Ort eine deutlich größere Bandbreite an Windverhältnissen mit hohen

Windgeschwindigkeiten aufgetreten, die den Wasserstand jedoch nicht extrem beeinflusst haben müssen. Da die physikalische Konsistenz der Szenarien ein entscheidendes Fundament der beschriebenen Methode bildet, ist die simple Überlagerung der beiden Verteilungen von maximalem Wasserstand und maximalem Seegang nicht zulässig. Wie bereits am Beispiel Kiel gezeigt, besteht kein klarer Zusammenhang zwischen den beiden Parametern. Zudem ist das zeitgleiche Eintreten beider Maximalwerte innerhalb eines Sturmes eher selten.

5.3.5 Zeitliche Verläufe

Als Bindeglied zu den weiteren Untersuchungen auf lokaler Ebene zeigt Abbildung 20 die zeitlichen Verläufe von Wasserstand und Seegang an drei offenen Grenzen küstennaher Modelle in ca. 10m Wassertiefe.

Die Ergebnisse sind für die Rekonstruktion von 1872 und drei exemplarische Szenarien dargestellt. Probstei und Timmendorf liegen respektive nahe Kiel und Travemünde (vgl. Karte in Abbildung 11). Die erhebliche räumliche Variabilität sowie die großen Unterschiede im zeitlichen Ablauf der einzelnen Stürme werden deutlich. Die räumlichen Unterschiede unterstreichen die Notwendigkeit, Untersuchungen zum Küstenschutz lokal individuell durchzuführen. Für Bereiche, in denen keine Aufzeichnungen des 1872er Ereignisses existieren, können nun besser fundierte Untersuchungen erfolgen.

Ein anderer interessanter Aspekt in Abbildung 20 ist das relative zeitliche Eintreten von Scheitelwasserstand und maximalem Seegang. Der maximale Seegang tritt meist vor dem Scheitelwasserstand auf. Dies ist ebenfalls die Folge des bereits erwähnten schnelleren Reagierens des Seegangs auf veränderte Windverhältnisse. Zusammen mit der hohen Variabilität der Sturmdauer wird hierdurch einmal mehr die Notwendigkeit betont, gesamte Sturmverläufe für die Untersuchung von Küstenbelastungen heranzuziehen

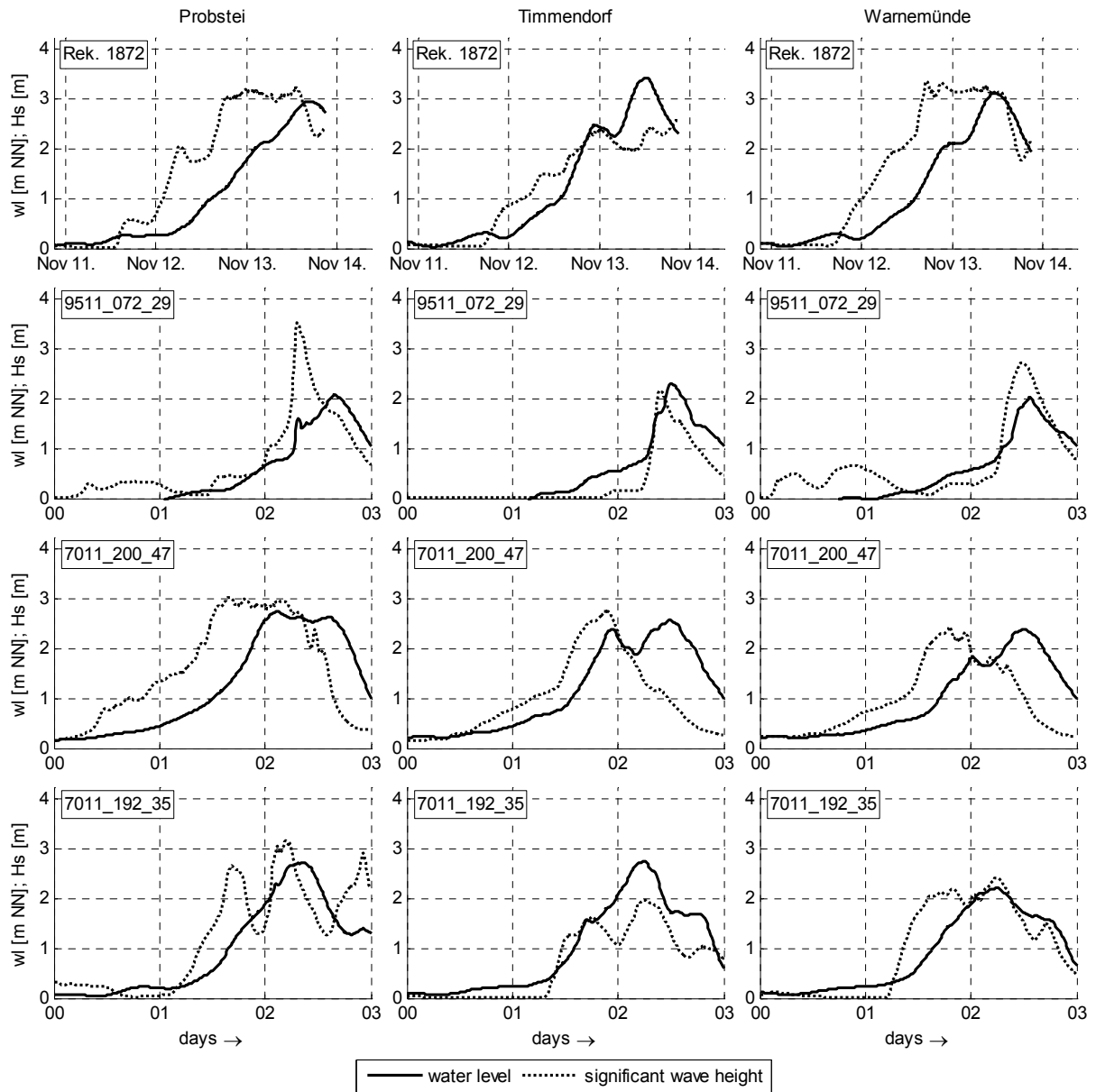


Abbildung 20: Zeitreihen von Wasserstand und Seegang an drei Stationen (Spalten) für die Rekonstruktion von 1872 und drei Szenarien (Zeilen).

6 Untersuchungen im Küstennahbereich

Im vorigen Abschnitt wurde beschrieben, wie auf überregionaler Ebene die Verläufe von Wasserstand und Seegang für die Szenarien sowie die Rekonstruktion des 1872 Ereignisses berechnet wurden. Im Bereich der deutschen Ostseeküste liegen diese Ergebnisse mit einer zeitlichen Auflösung von 10min und einer horizontalen Auflösung von 600m für den Wasserstand sowie ca. 100m für den Seegang vor. Um die räumliche Entwicklung dieser Größen bis in küstennahe, für den Küstenschutz relevante Bereiche verfolgen zu können wurden hochauflösende lokale Modelle für unterschiedliche Anwendungen aufgebaut. Die den Modellen zugrunde liegenden Theorien wurden bereits in Kapitel 2 beschrieben. Die mit den überregionalen Modellen bestimmten Zeitreihen von Wasserstand und Seegangsparametern werden als Antriebsdaten an den offenen Rändern der Küstenmodelle angesetzt.

6.1 Methode

Die Abschätzung der Küstenbelastung erfolgt auf zwei unterschiedliche Arten, um verschiedene örtlich relevanter Belastungsfälle abzudecken.

Zum einen wurden lokale Verfeinerungen an ausgewählten Gebieten in Schleswig Holstein sowie im Bereich vor Warnemünde in das gröbere Gitter des überregionalen spektralen Seegangsmodells eingenestet. Auf diese Weise wurden für alle untersuchten Stürme die zeitlichen Verläufe der Seegangsparameter von der 10m Tiefenlinie ins flache Wasser an den Fuß des betrachteten Deiches transformiert. Der Wellenauflauf auf den Deich wurde anschließend mit dem Ansatz für die deterministische Bemessung einfacher Böschungen nach dem EurOtop Manual (2007) bestimmt. Für jeden Sturm liegt somit der zeitliche Verlauf von Wellenauflauf ($R_{u2\%}$) und mittlerem Wasserstand vor. Aus dem Maximalwert der Summe der Zeitreihen beider Parameter wird die für jeden Sturm erforderliche Bestickhöhe bestimmt.

Zum anderen wird mit Hilfe morphodynamischer Profilmodelle der zeitliche Verlauf von Erosionsraten entlang von Küstennormalprofilen an den gleichen Strandabschnitten bestimmt. In Abbildung 21 ist beispielhaft eine solche Änderung der Profiltopographie als Resultat einer morphodynamischen Berechnung dargestellt. Der Deich der Probstei wurde in diesem Fall durch die Vorgabe nichtkohäsiven Bodenmaterials absichtlich als erodierbar angenommen, um die Energieeinwirkung des Sturmes direkt auf das Bauwerk zu 'messen'. Die Erosionsrate als Differenz von Anfangs und Endtopographie des Deiches kann als Maßstab für den Gesamtenergieeintrag des Sturmes angesehen werden. Diese Art der Auswertung ist zudem

geeignet, um die Stabilität natürlicher Strukturen wie Dünen, die eher anfällig für Erosionsprozesse sind, abzuschätzen.

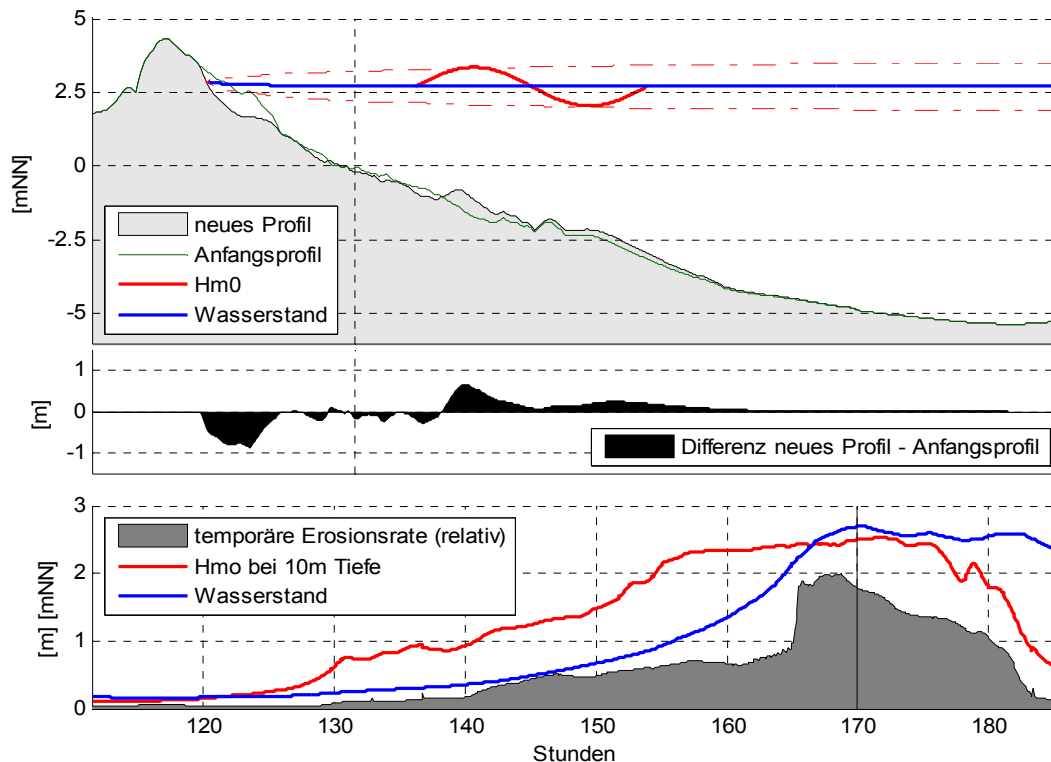


Abbildung 21: Schematische Darstellung des morphodynamischen Profilmodells der Probstei zu einem bestimmten Zeitpunkt eines Szenarios (170 Stunden nach Szenariobeginn). Unten: Randbedingungen, Hm0 und Wasserstand an offenen Rand bei ca. 10m Tiefe sowie die momentane Erosionsrate. Mitte: vertikale Differenz zwischen dem aktuellen Profil und dem Anfangsprofil. Oben: Aktuelles und Anfangsprofil sowie schematisch der mittlere Wasserstand und die räumliche Entwicklung von Hm0.

Im Folgenden wird die beschriebene Methode für eine Sicherheitsüberprüfung am Beispiel der Probstei angewendet. Die Anwendung auf einen Virtuellen Deich vor Warnemünde ist im Anhang in Kapitel 9 im Rahmen des Vergleiches der in den beiden Teilprojekten SEBOK A und SEBOK B entwickelten Methoden beschrieben.

6.2 Analyse Gefährdungspotential Probstei

In Abbildung 22 sind die beiden Belastungstypen Energieeintrag und während dem Sturm maximal erreichte Bestickhöhe als Summe aus Wasserstand und Wellenauflauf für die Szenarien und die Rekonstruktion 1872 für das Beispiel der Probstei aufgetragen. Während die Bestickhöhen als absolute Werte aufgetragen sind, ist die Erosionsrate jeweils relativ zur

maximalen Erosion angegeben. Die Szenarien sind nach absteigenden Bestickhöhen sortiert.

Aus der Darstellung lassen sich die Bandbreite der hydrodynamischen Bedingungen der untersuchten Stürme, sowie die Transformation des Seegangs an den Deichfuss ablesen. An den Zeitpunkten der maximalen Bestickhöhen werden durch die Szenarien mittlere Wasserstände zwischen 1.2mNN und 2.78mNN und signifikante Seegangshöhen im Tiefwasser zwischen 0.6m und 2.6m in variablen Kombinationen abgedeckt. Die Tiefenbegrenzung des Seegangs wird in der tendenziell dominierenden Rollen des Wasserstandes auf die Bestickhöhe deutlich.

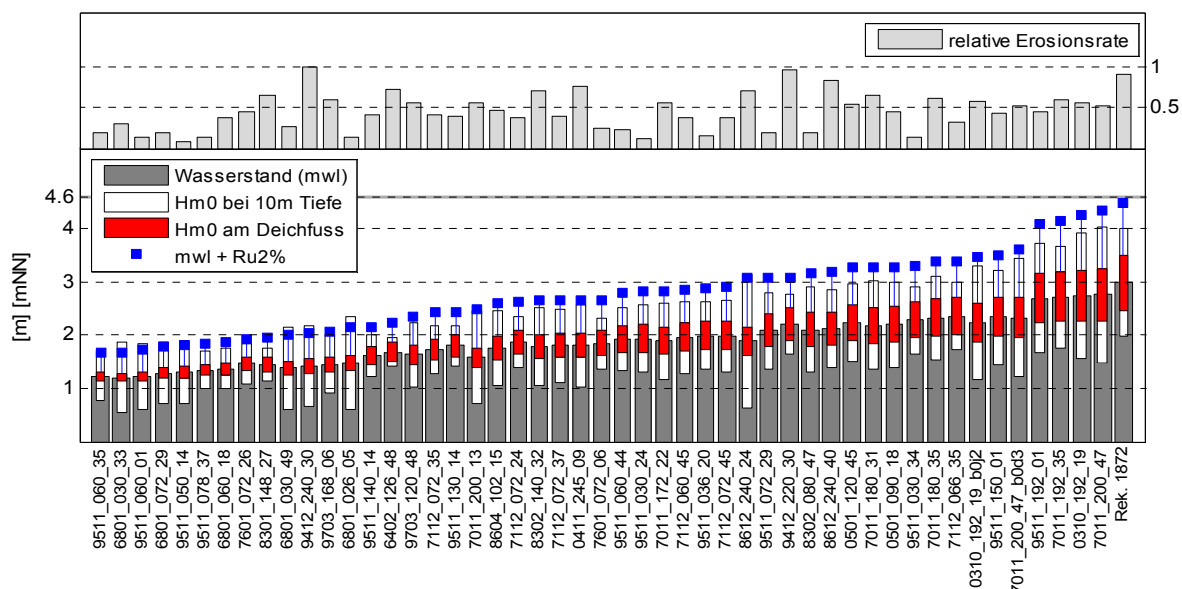


Abbildung 22: Ergebnisse der Sturmsimulationen aus SEBOK-A. Unten: Hydrodynamische Größen zum Zeitpunkt der maximalen Bestickhöhe (mwI+Ru2%). Oben: Über den jeweiligen Sturmverlauf ermittelte Erosionsrate relativ zum Maximalwert.

Die Rekonstruktion des 1872er Ereignisses führt an der Probstei mit dem höchsten Wasserstand von 2.95mNN und einer vergleichsweise geringen signifikanten Wellenhöhe von ca. 2m bei 10m Tiefe zur höchsten Bestickhöhe von 4.5mNN wobei die Unterschiede zu den beiden höchsten Szenarien lediglich 16cm und 23cm betragen.

Obwohl die Rekonstruktion des Sturmes von 1872 an der Probstei zum höchsten Scheitelwasserstand und vergleichsweise hohem Seegang führt, ist das relative zeitliche Eintreten und die Verweildauer der beiden Parameter für zwei der Szenarien ungünstiger, so dass in Bezug auf die Erosionsrate zwei Szenarien den für 1872 rekonstruierten Wert überschreiten. Es wird deutlich, dass zwischen dem lokalen Energiepotential eines Sturmes und der höch-

ten Kombination aus Wellenauflauf und Wasserstand kein direkter Zusammenhang besteht. Zwei in der maximalen Bestickhöhe deutlich niedrigere Stürme übertreffen den Energieeintrag der Rekonstruktion von 1872.

Da der Seedeich der Probstei als weniger anfällig für Erosionsprozesse als z.B. natürliche Dünenformen angenommen werden kann ist hier der Wellenauflauf der für eine Sicherheitsüberprüfung eher maßgebende Belastungsparameter.

Der Vergleich der Deichkronenhöhe von 4.6mNN und der maximal erreichten Bestickhöhe von 4.5mNN in der Rekonstruktion von 1872 lässt angesichts der angenommenen Eintrittswahrscheinlichkeit von 1350 Jahren für die Szenarien und die Rekonstruktion auf ein geringes Gefährdungspotential für die Probstei schließen. Jedoch ist in den beschriebenen Ergebnissen die Auswirkung eines säkularen Meeresspiegelanstieges auf die Stürme nicht enthalten. An anderen Stellen, je nach Küstenstruktur und Art des Küstenschutzes, kann der Energieeintrag die relevantere Belastungsform sein. Die Anwendung der Methode für andere Stellen entlang der deutschen Ostseeküste ergab ein differenziertes Bild in Bezug auf das Gefährdungspotential.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit stellt ein Verfahren vor, die Sicherheit natürlicher Küsten sowie extreme Belastungen von Küstenschutzanlagen entlang der deutschen Ostseeküste durch numerische Simulationen abzuschätzen und daraus neue Bemessungsgrößen abzuleiten.

Ausgehend von überregionalen Berechnungen von Wasserstand und Seegang für 61 physikalisch konsistente Sturmszenarien wurde die räumliche Entwicklung der Parameter mit lokal hochauflösenden Modellen bis in die Strandzone verfolgt. Durch die differenzierte Betrachtung des zeitlichen Ablaufs einzelner Stürme können sowohl die akkumulierte Sturmwirkung, etwa in Form des Energieeintrages auf den betrachteten Strandabschnitt, als auch die zeitliche Entwicklung des Wellenauflaufes direkt auf Schutzbauwerke untersucht werden.

Die meteorologische Rekonstruktion des historischen Sturmes von 1872 ermöglicht die flächendeckende Bestimmung der Verläufe von Wasserstand und Seegang sowie die daraus resultierenden Küstenbelastungen für dieses Referenzereignis. Dies erlaubt im Rahmen des vorgestellten Verfahrens einen direkten Vergleich mit den verwendeten Szenarien.

Die hydrodynamischen Modelle in Verbindung mit den 61 meteorologischen Sturmszenarien und der Rekonstruktion von 1872 bilden ein kompaktes System, das für verschiedene Fragestellungen des konstruktiven Küstenschutzes entlang der gesamten deutschen Ostseeküste eingesetzt werden kann, wie z.B. die Untersuchung der lokalen Auswirkung eines Meeresspiegelanstieges auf die Hydrodynamik der unterschiedlichen Stürme.

Im Unterschied zu bestehenden Bemessungsverfahren, die hauptsächlich auf der Betrachtung von Scheitelwerten basieren, können mit der vorgestellten Methode realistischere Küstenbelastungen als Resultat realistischer Sturmverläufe bestimmt werden. Anwendungen können an beliebigen Orten entlang der deutschen Ostseeküste, z.B. zur Bemessung eines Schutzbauwerks gegen Seegang und hohe Wasserstände, erfolgen. Auf gleiche Weise können die Sicherheit bestehender Küsten überprüft oder Bemessungsparameter direkt abgeleitet werden.

Das System kann auch dazu verwendet werden, um aus den 61 Stürmen lokal relevante Fälle auszuwählen, die für weiterführende kleinräumig - detaillierte numerische Modelluntersuchungen verwendet werden. Die vorhandenen Profilmodelle können zu zweidimensionalen Modellen erweitert werden.

Aufgrund der für alle Szenarien einheitlichen Eintrittswahrscheinlichkeit von ca. 1350 Jahren, lassen sich Anwendungen der Methode wie z.B. die direkte Ableitung von Bemessungsparametern, nur für diese Wahrscheinlichkeiten durchführen. Die gesamte Methode, einschließlich der Erzeugung und Filterung von meteorologischen Sturmszenarien, kann jedoch für beliebige Eintrittswahrscheinlichkeiten angepasst werden.

8 Schriftenverzeichnis

- BENKEL, A. UND MEINKE, I. (2008): Variation von sturmfluterzeugenden Tiefdruckgebieten oder Sturmflutwetterlagen. Abschlussbericht 1.2 zum KFKI-Verbundprojekt Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK), Geesthacht.
- BORK, I. AND MÜLLER-NAVARRA, S. (2008). Sturmflutsimulationen. In Proceedings of the MUSTOK-Workshop 2008 Sturmflutgefährdung der Ostseeküste'.
- BORK, I. UND 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.
- BRUSS, G. UND BORK, I. (2009): Vergleichende Betrachtungen der im Projekt MUSTOK verwendeten hydro-dynamischen Modelle. Die Küste (in Druck).
- BRUSS, G. AND MAYERLE, R. (2009). Investigations on the influence of the wind drag coefficient in storm surge models. In Proceedings of the 3. International Conference in Ocean Engineering, pages 325–332. IIT Madras.
- ECMWF (2001). The new 80-km High-Resolution ECMWF EPS. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Newsletter No. 90.
- ECMWF (2004). Era-40: Ecmwf 45-year reanalysis of the global atmosphere and surface conditions 1957-2002. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Newsletter No. 101.
- JANSSEN, P.A. (1989). Wave-Induced Stress and the Drag of Air Flow over Sea Waves. J. Phys. Oceanogr., 19, 745-754.
- JANSSEN, P.A. (1991). Quasi-linear Theory of Wind-Wave Generation Applied to Wave Forecasting. J. Phys. Oceanogr., 21, 1631-1642.
- JANSSEN, F.; SCHRUM, C. UND BACKHAUS, J. O. (1999): A Climatological Data Set of Temperature and Salinity for the Baltic Sea and the North Sea. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Supplement 9.
- JANSSEN, F. (2002). Statistische Analyse mehrjähriger Variabilität der Hydrographie in Nord- und Ostsee. Möglichkeiten zur Validation und Korrektur systematischer Fehler eines regionalen Ozeanmodells. Phd-thesis, University of Hamburg. In German.
- JENSEN, J. AND MUDERSBACH, C. (2008). Estimation of Occurrence Probabilities of Extreme Water Levels at the Baltic Sea Coastline. In Proceedings of the 31. International Conference in Coastal Engineering. in press.
- JIMENEZ, N., BRUSS, G., EEIBEN, H. AND MAYERLE, R. (2009): Seegangmodellierung der Ostsee für Extremereignisse und Rekonstruktion des Sturmes von 1872. Die Küste (in Druck).

- MEINKE, I. (1999). Sturmfluten in der südwestlichen Ostsee dargestellt am Beispiel des Pegels Warnemünde. Marburger Geographische Schriften, 134:1–23. In German.
- MUDERSBACH, CH. UND JENSEN, J. (2009): Statistische Extremwertanalyse von Wasserständen an der Deutschen Ostseeküste. Abschlussbericht 1.4 zum KFKI-Verbundprojekt Modellgestützte Untersuchungen zu extremen Sturmflutereignissen an der Deutschen Ostseeküste (MUSTOK), Universität Siegen.
- MLR-SCHLESWIG-HOLSTEIN (2001). Generalplan Küstenschutz, Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein. Kiel, Germany. Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein. In German.
- ROSENHAGEN, G. AND BORK, I. (2008). Rekonstruktion der sturmflutwetterlage vom 13. november 1872. In Proceedings of the MUSTOK-Workshop 2008 Sturmflutgefährdung der Ostseeküste'.
- ROSENHAGEN, G. UND BORK, I. (2009): Rekonstruktion der Sturmflutwetterlage vom 12./13. November 1872. Die Küste, (in Druck).
- SCHMAGER, G. (1984). Ein Beitrag zur Dynamik der aperiodischen Wasserstandsschwankungen und ihrer Vorhersage im Übergangsgebiet zwischen Nordsee und Ostsee. Dissertation zur erlangung des doktorgrades, Math.-nat. Fakultät, Humboldt-Universität zu Berlin. In German.
- SCHMITZ, R. (2007). Vorhersage von historisch aufgetretenen Stuermen ueber der Ostsee mithilfe des Ensemble Prediction System und COSMO. in German.
- SCHMITZ, R. (2009): Modellierung und Auswahl extremer Wetterlagen über der Ostsee. Die Küste, (in Druck).
- SMITH, S. AND BANKE, E. (1975). Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 101(429):665– 673.
- VAN DER MEER, J.W. (1998). Geometrical design of coastal structures. Chapter 9 in: "Sea-walls, dikes and revetments". Edited by K.W. Pilarczyk. Balkema, Rotterdam.
- VAN RIJN, L., WALSTRA, D., GRASMEIJER, B., SUTHERLAND, J., PAN, S., AND SIERRA, J. (2002). Simulation of nearshore hydrodynamics and morphodynamics on the time scale of storms and seasons using process-based profile models. In Van Rijn, L., editor, The Behaviour of a Straight Sandy Coast on the Time Scale of Storms and Seasons: Process Knowledge and Guidelines for Coastal Management, pages 1–33. EC MAST Project.

9 ANHANG I: Vergleich der Ergebnisse der Teilprojekte SEBOK A und SEBOK B

9.1 Einleitung

Im Rahmen von MUSTOK wurde in den beiden Teilvorhaben SEBOK A und SEBOK B mit unterschiedlichen Ansätzen, das gleiche Ziel, die Bestimmung von Bemessungsparametern entlang der deutschen Ostseeküste, verfolgt. Daher erscheint ein Vergleich der in den beiden Teilprojekten erarbeiteten Strategien nahe liegend. Zunächst werden die beiden Strategien konzeptionell gegenübergestellt. Anschließend werden die Ergebnisse anhand eines konkreten Bemessungsbeispiels verglichen.

9.2 Konzeptioneller Vergleich

9.2.1 SEBOK A

Die in SEBOK A entwickelte Methode basiert auf der Simulation extremer Sturmszenarien und der Analyse der daraus resultierenden Küstenbelastungen. Die im Teilprojekt MUSE Ostsee am DWD erzeugten und vorgefilterten Sturmweatherlagen dienen dabei als meteorologische Datenbasis zum Antrieb der am FTZ eingesetzten hydrodynamischen Modellkette. Für alle 61 untersuchten Stürme wurde in MUSE Ostsee eine einheitliche empirische Unterschreitungswahrscheinlichkeit von 0.999258/a bestimmt (Mudersbach und Jensen, 2009). Für die Anwendung im realen Bemessungsfall ist die Methode hauptsächlich darauf ausgelegt, lokal relevante Sturmszenarien sowie hydrodynamische Randbedingungen für weiterführende detaillierte Untersuchungen bzw. die tatsächliche modelltechnisch iterative Bemessung bereitzustellen. Die endgültige Auswahl der Szenarien, die für Bemessungszwecke herangezogen werden können, basiert einerseits auf der Größenordnung von Wasserstand und Seegangsbelastung die direkt auf die zu bemessenden Küstenstrukturen wirken, andererseits auf die Auswirkung der Stürme auf die Morphologie des zu betrachtenden Küstenabschnittes während dem Sturm. Durch die differenzierte Betrachtung des zeitlichen Ablaufs realistischer Stürme können mit der Methode in SEBOK A realistische Küstenbelastungen untersucht werden. Die meteorologische Rekonstruktion des historischen Sturmes von 1872 ermöglicht die flächendeckende Bestimmung der Verläufe von Wasserstand und Seegang sowie die daraus resultierenden Küstenbelastungen für dieses Referenzereignis. Dies erlaubt im Rahmen des in SEBOK-A entwickelten Verfahrens einen direkten Vergleich zwischen Szenarien und Referenzereignis. Die hydrodynamischen Modelle in Verbindung mit

den 61 meteorologischen Sturmszenarien und der Rekonstruktion von 1872 bilden ein kompaktes System, das für verschiedene Fragestellungen des konstruktiven Küstenschutzes entlang der gesamten deutschen Ostseeküste eingesetzt werden kann, wie z.B. zur Untersuchung der lokalen Auswirkung eines Meeresspiegelanstieges auf die Hydrodynamik der unterschiedlichen Stürme, oder wie in diesem Fall zum Zwecke des Methodenvergleiches für die direkte Bemessung festgelegter Geometrien.

9.2.2 SEBOK B

Im Rahmen des Forschungsvorhabens SEBOK B wurden Bemessungswerte auf der Grundlage von statistischen Untersuchungen möglichst langer Zeitserien der Bemessungsparameter „Wasserstand“ und „Seegang“ ermittelt. Dadurch können die Bemessungswerte grundsätzlich mit beliebigen Eintrittswahrscheinlichkeiten abgeleitet werden.

Die vorhandenen Messdaten wurden zunächst plausibilisiert und vereinheitlicht. Da für den Parameter „Seegang“ die verfügbaren Zeitserien vergleichsweise kurz und auch nicht flächendeckend vorhanden sind, wurden Seeganginformationen für die deutsche Ostseeküste mit folgenden Verfahren abgeleitet:

- Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen für mehrere Lokationen an der deutschen Ostseeküste
- Langzeit-Seegangssimulationen mit dem SOHIP-Modell
- Langzeit-Seegangssimulationen mit dem WODLM-Modell

Details zu den ermittelten Daten sind im Abschlussbericht „SEBOK B“ aufgeführt.

Die ermittelten Zeitserien wurden zunächst einzeln mit Verfahren der Extremwertstatistik untersucht. Dabei wurden zunächst Extremwerte mit ausgewählten mittleren Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Parameter „Wasserstand“, „Wellenhöhe“ und „Dauer der Sturmflut“ berechnet. Im Weiteren wurden kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeiten berechnet und graphisch dargestellt. Zur Darstellung wurden unterschiedliche mittlere Eintrittswahrscheinlichkeiten ausgewählt, wobei die minimale Eintrittswahrscheinlichkeit $p_u=0,001$ (das entspricht einem mittleren Wiederkehrintervall von 1000 Jahren) ist.

Im Konzept von SEBOK B werden die Bemessungswerte grundsätzlich zunächst für räumlich übergeordnete Küstenabschnitte abgeleitet. In einem zweiten Schritt werden dann die abgeleiteten Seegangparameter bis an das zu bemessende Bauwerk transformiert und die

Bauwerksbemessung mit den üblichen Bemessungsansätzen durchgeführt (bspw. die Berechnung von Wellenauflauf nach dem Eurotop Manual).

9.3 Ergebnisvergleich anhand eines Bemessungsbeispiels

Um die beiden konzeptionell unterschiedlichen Methoden zu vergleichen, wurde jeweils die Bemessung eines einheitlichen Bauwerks durchgeführt. Als Bemessungsbeispiel wurde die Bemessung eines „virtuellen“ Deiches in Warnemünde gewählt.

Da die kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeiten in SEBOK B zunächst für den Bereich vor Warnemünde abgeleitet wurden, wurde die Methode aus SEBOK A auf diese Lokation angewendet. Da die Bemessungsparameter im Teilprojekt SEBOK A für eine Eintrittswahrscheinlichkeit von $p_u=0,00077$ (Wiederkehrintervall 1300 Jahre) abgeleitet wurden, wurde die Beispielbemessung in SEBOK B ebenfalls auf diese Eintrittswahrscheinlichkeit durchgeführt. Es wird darauf hingewiesen, dass die im Teilprojekt SEBOK B ermittelten Bemessungswerte damit weit außerhalb der zulässigen Extrapolationsdauer liegen und somit mit großen Unsicherheiten behaftet sind.

Die Küste wird in Warnemünde derzeit in der Realität nicht mit einem Deich sondern mittels einer Hochwasserschutzdüne geschützt. Zur Vereinfachung der Vergleichsbemessungen wurde ein virtuelles Deichprofil an den Strandabschnitt vor Warnemünde gelegt. Der Deichfuß wurde auf eine Höhenlage von NN+0,0m gelegt. Die Kubatur des Deiches wurde als einfache geneigte Ebene mit einer Neigung von 1:6 angenommen (Abbildung 23).

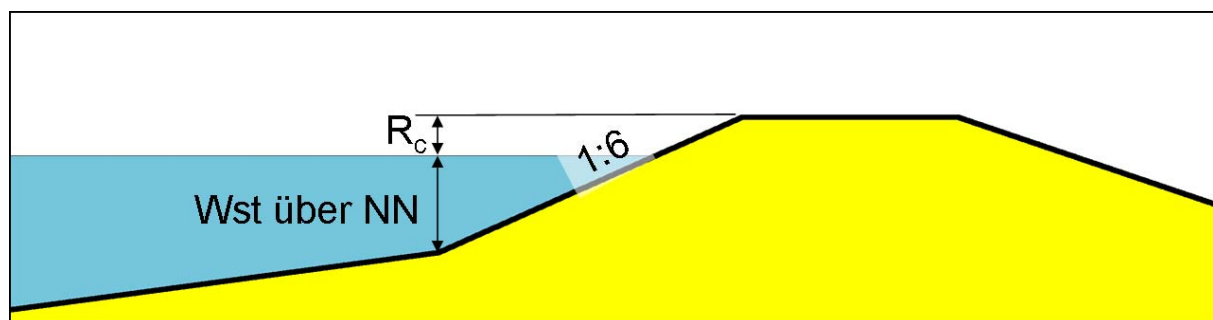


Abbildung 23: Virtueller Deich vor Warnemünde.

9.3.1 Ergebnisse SEBOK A

In SEBOK-A wurden auf überregionaler Ebene, d.h. im Bereich der gesamten Ostsee, die Verläufe von Wasserstand und Seegang für die oben beschriebenen Sturmweatherlagen sowie die Rekonstruktion des 1872 Ereignisses berechnet. Im Bereich der deutschen Ostseeküste liegen diese Ergebnisse mit einer zeitlichen Auflösung von 10min und einer räumlichen Auflösung von 600m für den Wasserstand sowie ca. 100m für den Seegang vor. Um die räumliche Entwicklung des Seegangs bis in flache, für den Küstenschutz relevante Bereiche zu bestimmen wurden lokale Verfeinerungen an 3 ausgewählten Gebieten in Schleswig Holstein sowie im Bereich vor Warnemünde in das gröbere Gitter des überregionalen spektralen Seegangsmodells eingeneset.

Auf diese Weise wurden für alle untersuchten Stürme die zeitlichen Verläufe der Seegangsparameter von der 10m Tiefenlinie an den Deichfuss des virtuellen Deiches vor Warnemünde transformiert. Der Wellenaufbau auf den Deich wurde anschließend auf gleiche Weise wie in SEBOK B mit dem Ansatz für die deterministische Bemessung einfacher Böschungen nach dem EurOtop Manual (2007) mit einem Rauheitsbeiwert von 1 bestimmt. Für jeden Sturm wurde dann aus dem zeitlichen Verlauf der Summe aus Wellenaufbau (Ru2%) und mittlerem Wasserstand (mwl) der jeweilige Maximalwert, also die für den Sturm erforderliche Bestickhöhe bestimmt.

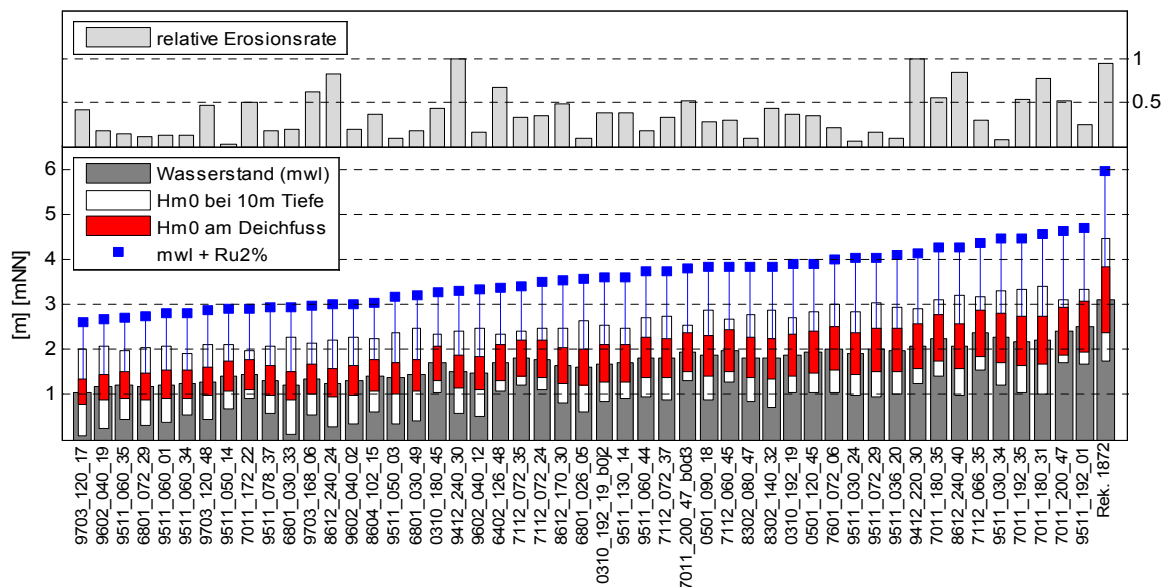


Abbildung 24: Ergebnisse der Sturmsimulationen aus SEBOK-A. Unten: Hydrodynamische Größen zum Zeitpunkt der maximalen Bestickhöhe. Oben: Über den jeweiligen Sturmverlauf ermittelte Erosionsrate relativ zum Maximalwert.

Abbildung 24 unten stellt für die Sturmszenarien sowie die Rekonstruktion des Sturmes von 1872, die Größen mittlerer Wasserstand, signifikante Wellenhöhe bei 10m Wassertiefe, signifikante Wellenhöhe am Deichfuß sowie resultierende Bestickhöhe jeweils zum Zeitpunkt der maximalen Summe aus Wasserstand und Wellenaufbau dar. Aus der Darstellung lassen sich die Bandbreite der hydrodynamischen Bedingungen der untersuchten Stürme, sowie die Transformation des Seegangs an den Deichfuss ablesen. An den Zeitpunkten der maximalen Bestickhöhen werden durch die Szenarien mittlere Wasserstände zwischen 1.2mNN und 2.5mNN und signifikante Seegangshöhen im Tiefwasser zwischen 1.1m und 2.3m in variablen Kombinationen abgedeckt.

Die Tiefenbegrenzung des Seegangs wird in der tendenziell dominierenden Rollen des Wasserstandes auf die Bestickhöhe deutlich. Die höchste Bestickhöhe der Szenarien von 4.70mNN tritt bei dem höchsten Wasserstand von 2.51mNN und einem vergleichsweise geringen Seegang von 1.68m auf. In Tabelle 1 sind die relevanten Größen der 10 höchsten Szenarien und der Rekonstruktion von 1872 aufgelistet.

	Wasserstand [mNN]	Hm0 [m] 10m Tiefe	Tp [s] 10m Tiefe	Hm0 [m] Deichfuss	Ru2% [m]	Bestickhöhe [mNN]
Rekonstruktion 1872	3.09	2.70	6.98	1.46	2.87	5.96
9511_192_01	2.51	1.68	6.06	1.13	2.19	4.70
9511_150_01	2.47	1.85	6.08	1.13	2.20	4.66
7011_200_47	2.40	1.40	6.32	1.07	2.22	4.62
7011_180_31	2.21	2.39	6.64	1.08	2.34	4.56
7011_192_35	2.19	2.32	6.53	1.06	2.29	4.47
9511_030_34	2.26	2.08	6.27	1.07	2.21	4.47
7112_066_35	2.36	1.60	5.74	1.05	2.00	4.36
8612_240_40	2.08	2.22	6.42	1.01	2.19	4.27
7011_180_35	2.25	1.68	5.87	1.03	2.02	4.27
9412_220_30	2.07	1.69	6.08	0.98	2.05	4.12

Tabelle 1: Bemessungswerte der 10 höchsten Szenarien und der Rekonstruktion des Sturmes von 1872 für den Küstenabschnitt Warnemünde.

Auffällig in Tabelle 1 und Abbildung 24 ist der extrem hohe Wellenaufbau der Rekonstruktion von 1872. Der große Unterschied zu den Szenarien wird vor allem durch den hohen mittleren Wasserstand der Rekonstruktion verursacht, wobei der rekonstruierte Seegang vor Warnemünde das Maximum in den Szenarien ebenfalls um ca. 30cm übertrifft. Im Abschlussbericht von SEBOK A (Kapitel 5.1) wurde bereits erwähnt, dass die historischen Scheitelwasserstände im mittleren Bereich der Mecklenburger Bucht zwischen Wismar und Warnemünde

durch die Rekonstruktion überschätzt werden. Diese Tendenz tritt auch in der hydrodynamischen Rekonstruktion durch das BSH auf (Rosenhagen und Bork, 2009) und ist auf lokale Unsicherheiten im rekonstruierten Windfeld zurückzuführen. Zudem ergibt sich für den Wasserstand der Rekonstruktion von 3.09mNN aus der von Mundersbach und Jensen (2009) für den Pegel Warnemünde abgeleiteten Extremwertstatistik eine deutlich höhere Eintrittswahrscheinlichkeit von knapp unter 1:4000 Jahren. Daher wird hier das lokale Ergebnis der Rekonstruktion als gesonderter Wert, und der höchste Wellenauflauf der Szenarien als für die Bemessung maßgebend betrachtet.

Aus der Methode von SEBOK A ergibt sich somit als maximale Kombination aus Wellenauflauf und Ruhewasserstand aus den Szenarien nach Tabelle 1, eine Bemessungshöhe von 4.70m NN für die Eintrittswahrscheinlichkeit von 1:1350 Jahren. Ein säkularer Meeresspiegelanstieg wurde für den Vergleich einheitlich nicht berücksichtigt.

In der Methode von SEBOK-A wird neben der Bestimmung von direkten Bemessungsgrößen die Beurteilung der Sturmszenarien anhand der Analyse von Energieeinträgen durchgeführt. Mit morphodynamischen Profilmodellen wird die lokale morphologische Auswirkung der Stürme auf den Strand und Vorstrandbereich und damit die Größenordnung des Gesamtenergieeintrages über den jeweiligen Sturmverkauf berechnet. Angetrieben werden die küstennahen Modelle an den offenen Rändern mit den Ergebnissen der überregionalen Modelle in Form von Wasserstands- sowie Seegangszeitreihen. Für das Beispiel des Methodenvergleiches wurde der virtuelle Deich im Morphodynamischen Modell durch die Vorgabe nichtkohäsiven Bodenmaterials als erodierbar angenommen, um die Gesamtenergieeinwirkung des Sturmes direkt auf das Bauwerk zu 'messen'.

In Abbildung 24 oben sind die relativen Erosionsraten der Szenarien und der Rekonstruktion von 1872 dargestellt. Es wird deutlich, dass zwischen dem lokalen Energiepotential eines Sturmes und der höchsten Kombination aus Wellenauflauf und Wasserstand kein direkter Zusammenhang besteht. Zwei in der maximalen Bestickhöhe deutlich niedrigere Stürme übertreffen den Energieeintrag der Rekonstruktion von 1872. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, im Rahmen tatsächlicher Bemessungsaufgaben, die aus gesamten Sturmverläufen resultierenden realistischen Küstenbelastungen mit zu berücksichtigen.

9.3.2 Ergebnisse SEBOK B

Um die berechneten Bemessungswerte mit den im Teilprojekt SEBOK A berechneten Werten vergleichen zu können, wurden für den Vergleich zusätzlich die Bemessungswerte für

eine kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeit von $p_u=0,00077$ (das entspricht einem mittleren Wiederkehrintervall von etwa 1300 Jahren) abgeleitet (Abbildung 25). Dies entspricht der mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit der in SEBOK A ermittelten Bemessungswerte.

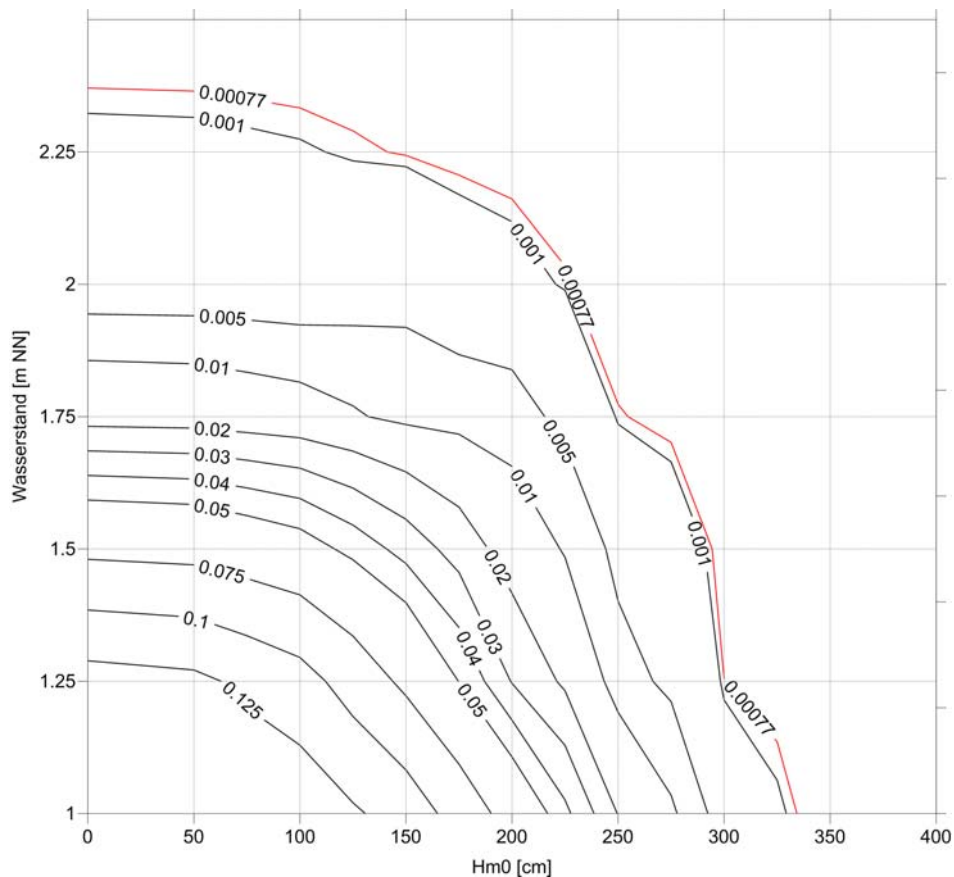


Abbildung 25: Kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeiten Wasserstand / Wellenhöhe

Aus Abbildung 25 wurden die Bemessungswerte für den übergeordneten Küstenabschnitt „Warnemünde“ abgelesen. Die zugehörigen Wellenperioden wurden mittels direkter Korrelation von gemessenen Wellenhöhen / Wellenperioden zugeordnet (Tabelle 2).

Bemessungsfall	Wasserstand [m NN]	Wellenhöhe H_{m0} [m]	Wellenperiode T_{02} [s]
1	1,00	3,30	6,30
2	1,25	3,00	6,00
3	1,50	2,90	5,90
4	1,75	2,55	5,55
5	2,00	2,25	5,25
6	2,25	1,40	4,20

Tabelle 2: Bemessungswerte für den Küstenabschnitt Warnemünde ($p_u=0,00077$)

Die für den übergeordneten Küstenabschnitt abgeleiteten Bemessungsparameter wurden als Grundlage für die Wellenauflaufberechnung bis an den Deichfuß transformiert. Die Grundlage dafür ist das Detailmodell für den Küstenabschnitt Warnemünde (vgl. Abschnitt 6.5 des Abschlussberichtes SEBOK B). Tabelle 3 fasst die transformierten Wellenparameter zusammen.

Bemessungsfall	Wellenhöhe H_{m0} [m]	Welleperiode T_{02} [s]
1	0,59	3,30
2	0,72	3,94
3	0,85	4,37
4	0,96	4,38
5	1,07	4,31
6	1,03	3,83

Tabelle 3: Seegangparameter am Deichfuß

Die Berechnung des Wellenaufbaus wurde auf Grundlage des EurOtop Manual vorgenommen. Dabei wurde die Wellenperiode $T_{m-1,0}$ mit dem Ansatz $T_{m-1,0} = T_p / 1,1 = 1,21 \cdot T_{02} / 1,1$ berechnet. Für die Berechnung der Auflaufhöhe $Ru_{2\%}$ wurden ein mit Gras bedeckter Deich angenommen ($\alpha_f = 1,0$). Die Auflaufberechnungen wurden mit der Formel für deterministische Bemessung durchgeführt. Grundsätzlich können mit den in SEBOK B entwickelten Methoden auch Bemessungsparameter für eine vollständig probabilistische Bemessung abgeleitet werden. Um eine einheitliche Grundlage für den Vergleich SEBOK A / B zu verwenden wurde die probabilistische Bemessung nicht durchgeführt.

Die berechneten Auflauf- und Bestickhöhen sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Die maßgebende Bestickhöhe ergibt sich demnach zu 4,85m. Dabei sind der säkulare Meeresspiegelanstieg und die erforderliche Freibordhöhe des Deiches allerdings noch nicht berücksichtigt (Analog zum Vorgehen SEBOK A). Die Tabelle verdeutlicht, dass sich die höchsten Bestickhöhe nicht für den Bemessungsfall mit dem maximalen Wasserstand oder mit der höchsten Wellenhöhe ergibt, sondern mäßige Bedingungen (mit der selben Eintrittswahrscheinlichkeit) maßgebend werden.

Bemessungsfall	Auflaufhöhe $R_{u2\%}$ [m]	Bestickhöhe [m]
1	1,94	2,94
2	2,04	3,29
3	2,18	3,68
4	2,18	3,93
5	2,18	4,18
6	1,71	3,96

Tabelle 4: Auflauf- und Bestickhöhen für einen virtuellen Deich in Warnemünde ($p_u=0,00077$)

9.4 Zusammenfassung / Schlussfolgerung

Die für das Bemessungsbeispiel in beiden Methoden ermittelten maßgebenden hydrodynamischen Größen sowie die resultierenden Bestickhöhen sind in Tabelle 5 gegenübergestellt. Die ermittelten Bestickhöhen wurden als reine Addition von Ruhewasserstand und Wellenauflauf unter Vernachlässigung eines säkularen Meeresspiegelanstieges bestimmt.

	Wasserstand [mNN]	Hm0 [m] 10m Tiefe	Tp [s] 10m Tiefe	Hm0 [m] Deichfuss	$R_{u2\%}$ [m]	Bestickhöhe [mNN]
SEBOK A	2,51	1,68	6,06	1,13	2,19	4,70
SEBOK B	2,00	2,25	6,32	1,07	2,18	4,18
Differenz (A-B)	0,51	-0,57	-0,26	0,06	0,01	0,52

Tabelle 5: Gegenüberstellung von Bemessungsgrößen und Bestickhöhen der beiden Methoden für das Bemessungsbeispiel.

Für die in SEBOK A ermittelten Bemessungswerte ergibt sich eine Bestickhöhe von 4,70mNN. In SEBOK B wurde eine Bestickhöhe von 4,18 mNN ermittelt. Der Unterschied von 0,52m (12%) ist fast ausschließlich auf die unterschiedlichen Ruhewasserständen im Bemessungsfall zurückzuführen, der berechnete Wellenauflauf ist praktisch gleich. Durch den niedrigeren Wasserstand bei SEBOK B wird der höhere Tiefwasser-Seegang stärker reduziert, so dass die Kombination aus Seegang am Deichfuß und Wellenperiode, in beiden Methoden zum gleichen Wellenauflauf auf den Deich führt.

Die Stürme mit den höchsten Bestickhöhen in SEBOK A weisen im Vergleich zu SEBOK B tendenziell höhere Wasserstände und etwas niedrigere Wellenhöhen auf. In SEBOK B wurde die Kombination von Wasserständen über 2,20 mNN und Wellenhöhen über 1,5 m, die in SEBOK A zu den höchsten Bestickhöhen geführt haben, offensichtlich als deutlich unwahrscheinlicher eingeschätzt.

Die Kombinationen von großen Wellenhöhen und niedrigen Wasserständen (Fälle 1-3 in SEBOK B) treten zu verschiedenen Zeiten innerhalb der Stürme von SEBOK A ebenfalls auf, führten jedoch nicht zu der für den jeweiligen Sturm maximalen Bestickhöhe.

Die in SEBOK A und B entwickelten Verfahren haben unterschiedliche Vor- und Nachteile.

Mit den in SEBOK A ermittelte Verfahren ist es möglich jeweils den gesamten Verlauf von einer Anzahl unterschiedlicher Stürme und damit eine Bandbreite extremer realistischer Belastungen zu Erfassen und in der Bemessung zu berücksichtigen. Nachteilig ist, dass die statistische Einordnung der Bemessungsereignisse schwieriger ist und die Eintrittswahrscheinlichkeiten nicht frei gewählt werden können. In Schleswig-Holstein werden die in SEBOK A untersuchten Sturmszenarien jedoch aufgrund des im Generalplan Küstenschutz (2001) definierten Vergleichswertverfahrens je nach Höhe des Wasserstandes unabhängig von ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit maßgebend.

Die in SEBOK B entwickelten Methoden ermöglichen es, die Eintrittswahrscheinlichkeit für die Bemessungswerte frei zu wählen. Zudem ist eine vollständig probabilistische Bemessung möglich. Durch die Konzentration auf einzelne Bemessungswerte ist es nicht möglich, den zeitlichen Verlauf der Bemessungsereignisse zu berücksichtigen, dies ist allerdings bei vielen Bemessungsverfahren auch nicht erforderlich. Die Unsicherheiten bei der Ableitung der Bemessungswerte bei sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten werden bei extremwertstatistischer Betrachtung vergleichsweise groß.

Beide Methoden sind auf die gesamte deutsche Ostseeküste anwendbar. Durch die Kombination beider Methoden kann bei künftigen Bemessungsaufgaben aus den individuellen Vorteilen und den neuen Erkenntnissen die in beiden Teilprojekten gewonnen wurden profitiert werden.

10 ANHANG II: Graphische Darstellung aller Szenarien

Nachfolgend sind für alle Szenarien sowie als letztes für die Rekonstruktion des Sturmes von 1872 die räumliche Verteilung des Wasserstandes sowie das Windfeld über der südwestlichen Ostsee zum Zeitpunkt der jeweils höchsten Wasserstände dargestellt. In den Abbildungen sind folgende Informationen als Zahlenwerte angegeben:

Bezeichnung des eps-Szenarios in der Form:

eps_yymm_hhh_nn

dabei sind:

yymm: Jahr und Monat des Starttermins des eps-ensembles

hhh: Anzahl der Vorhersagestunden des eps-members

nn: Nummer/Bezeichnung des eps-members

Datum und Zeitpunkt an dem der maximale Wasserstand innerhalb der südwestlichen Ostsee während dem Sturm erreicht wurde in der Form:

yy/mm/dd HH:MM

als: Jahr/ Monat/ Tag Stunde:Minute

Höhe und Ort des maximalen Wasserstandes in der Form:

peak water level xm @ lon°E, lat°N

dabei sind

xm: maximaler Wasserstand in Meter NN

lon: Längengrad

lat: Breitengrad

Höhe und Ort von maximaler Windgeschwindigkeit und Windrichtung zum Zeitpunkt des maximalen Wasserstandes in der Form:

peak wind xm/s, form d° @ lon°E, lat°N

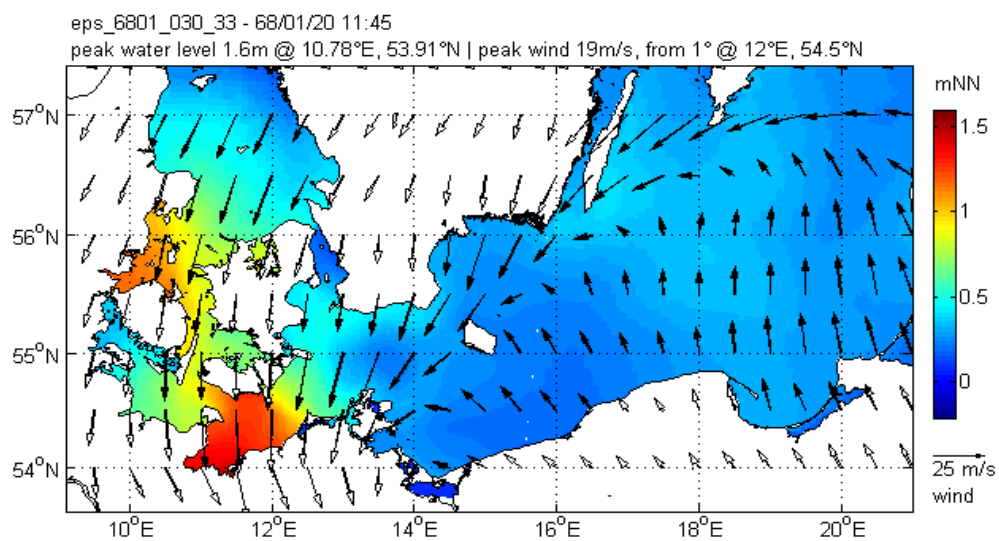
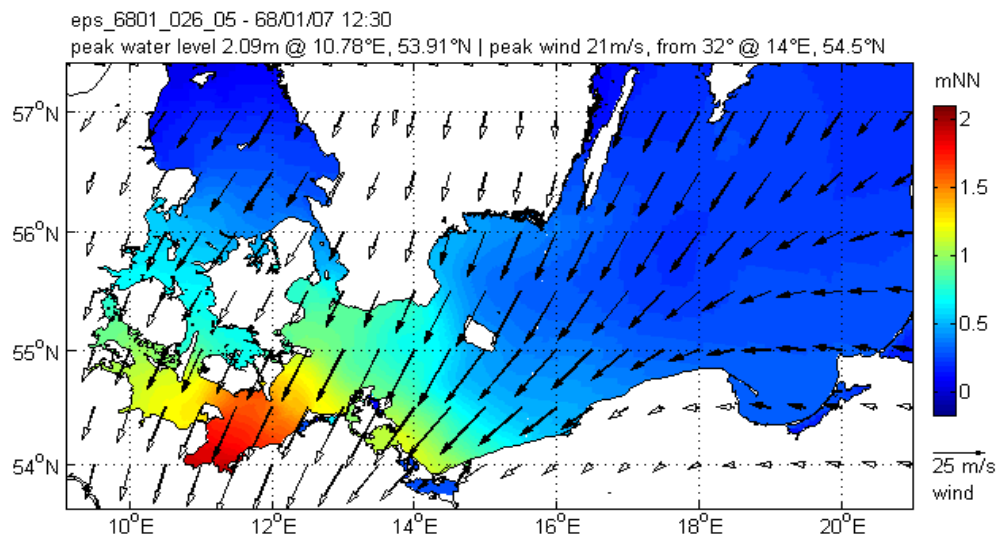
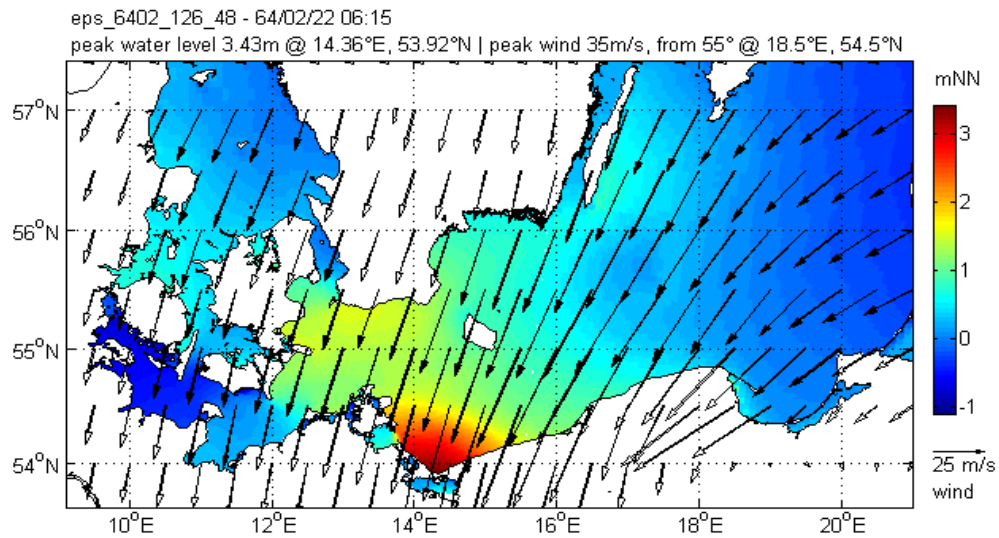
dabei sind

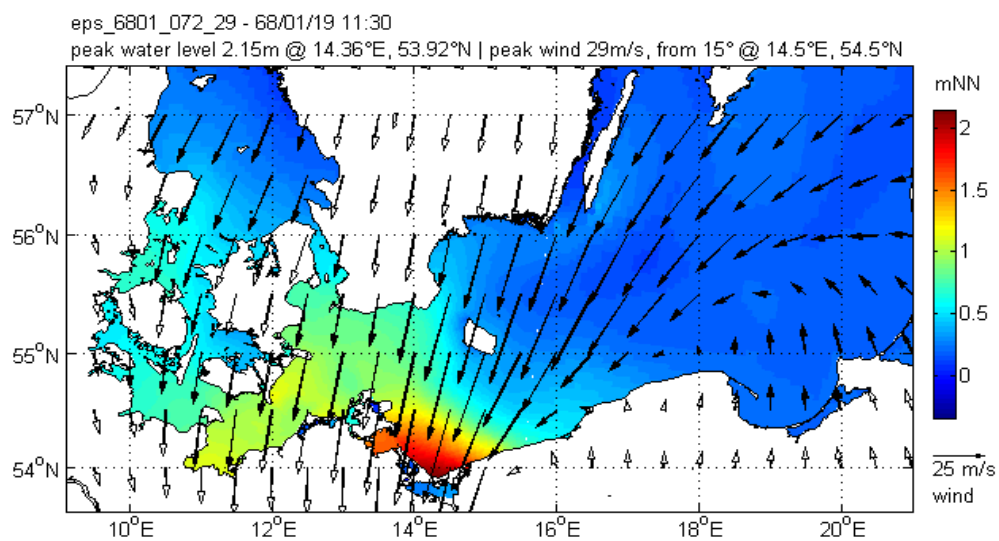
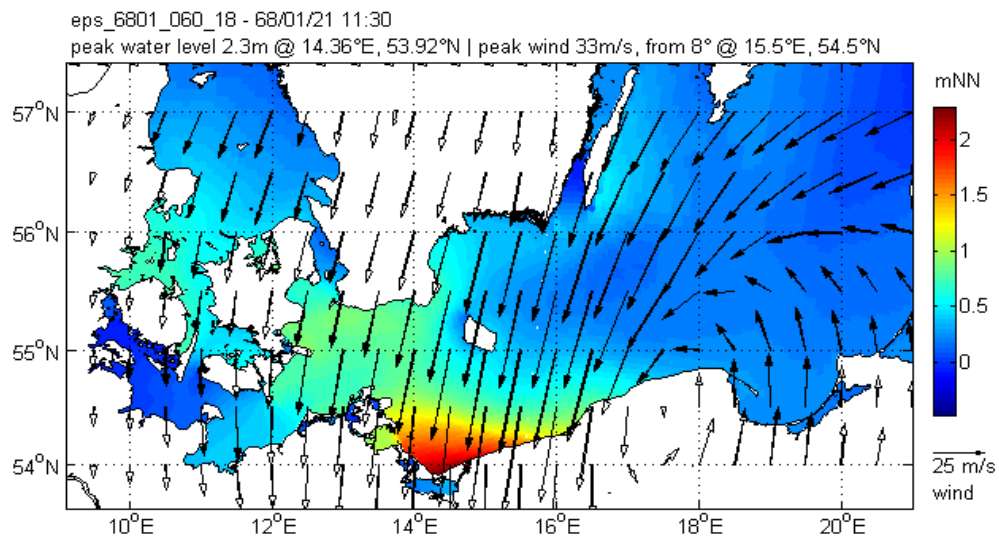
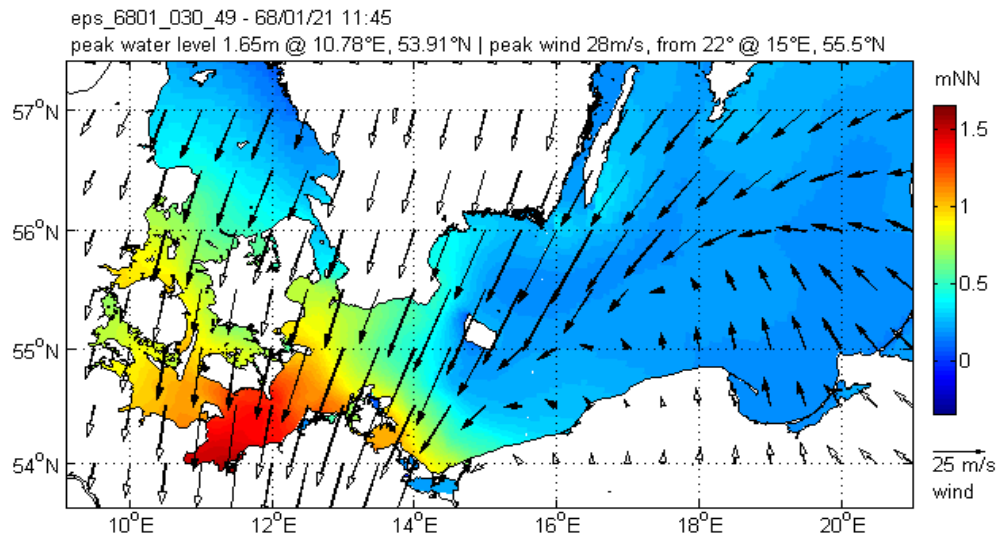
xm: maximale Windgeschwindigkeit in Meter/Sekunde

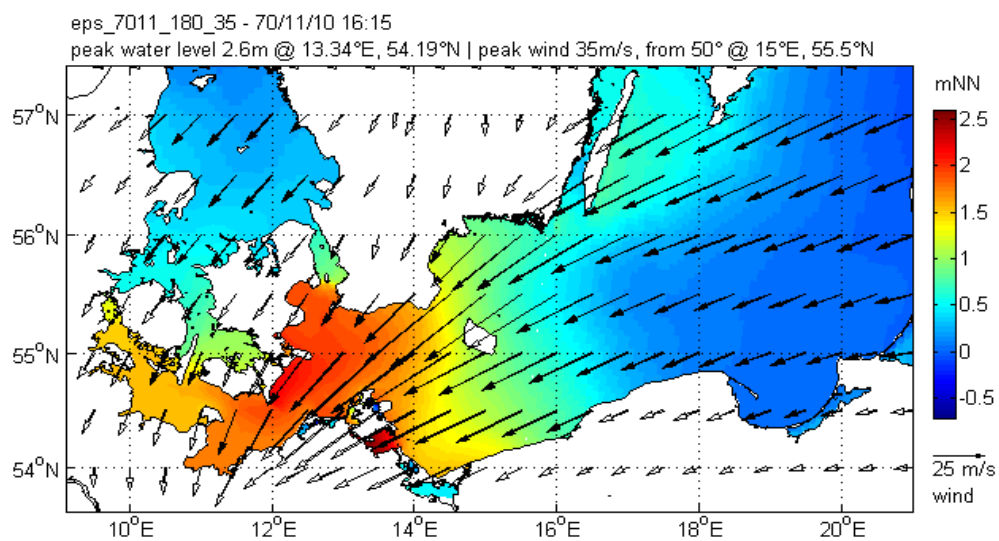
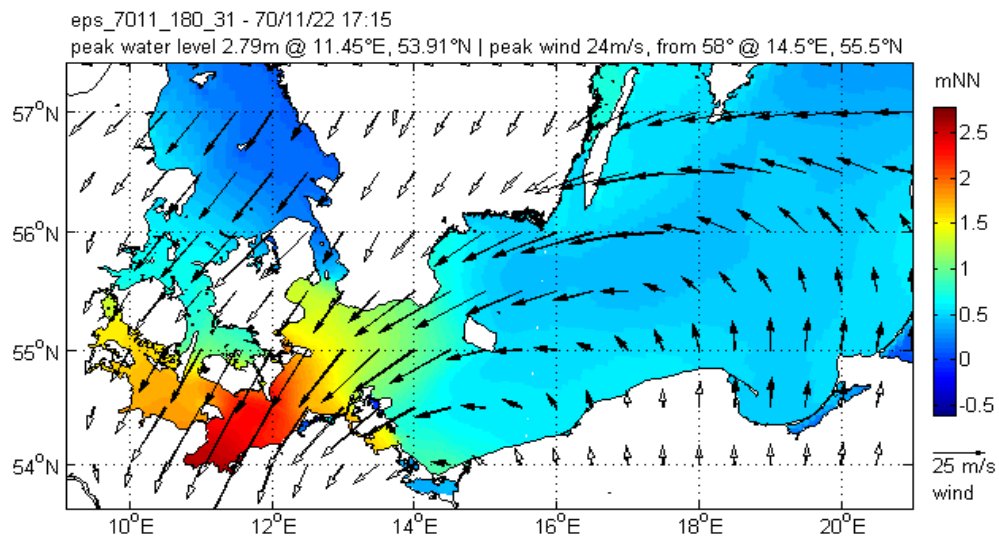
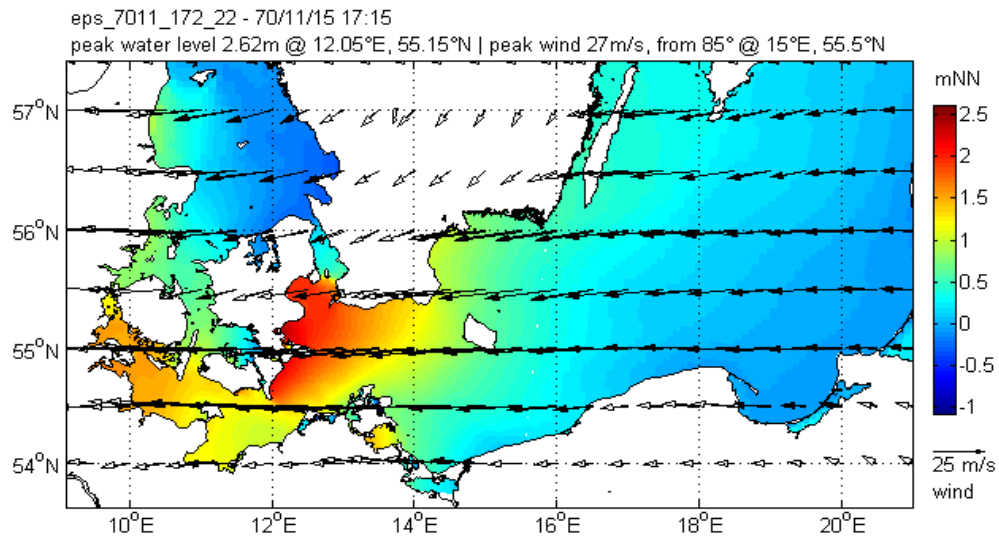
d°: Windrichtung nautisch

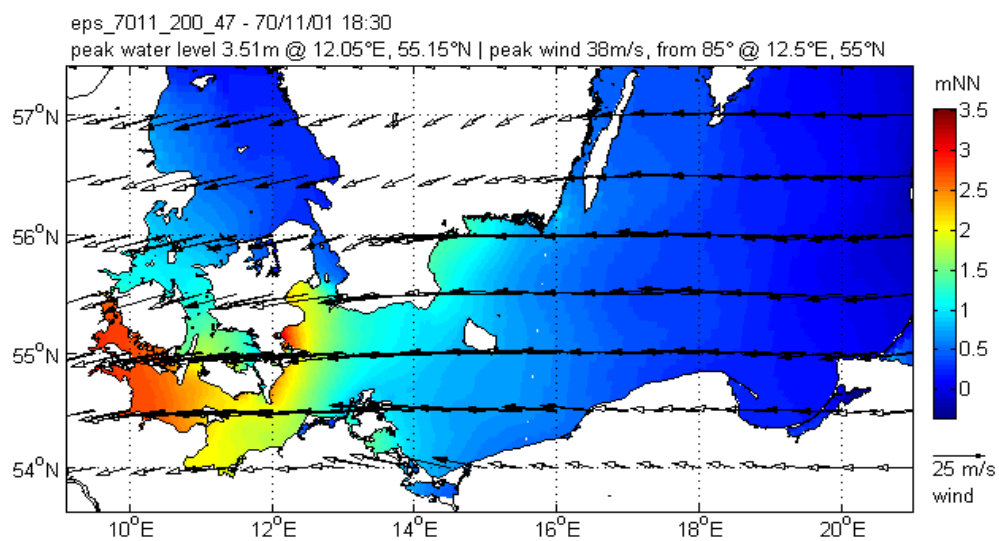
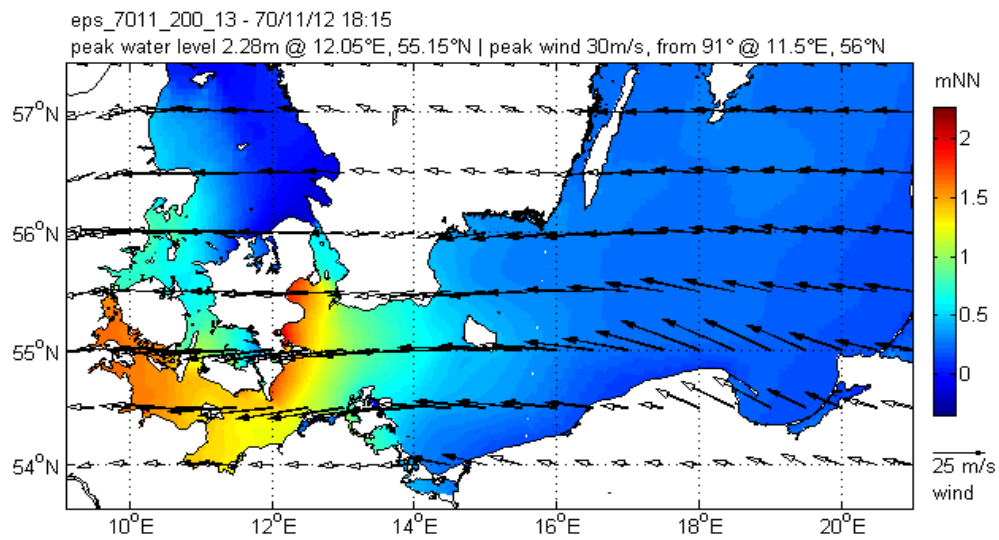
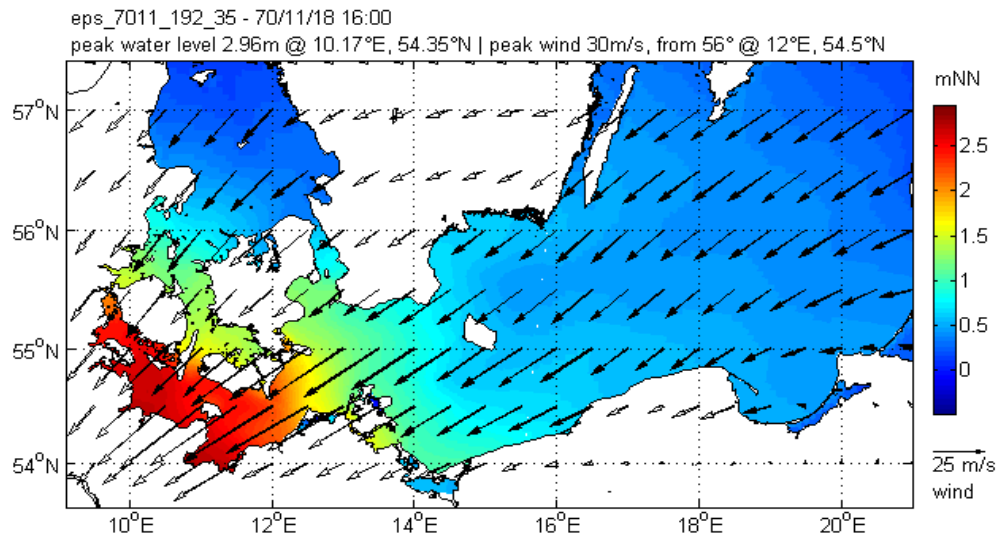
lon: Längengrad

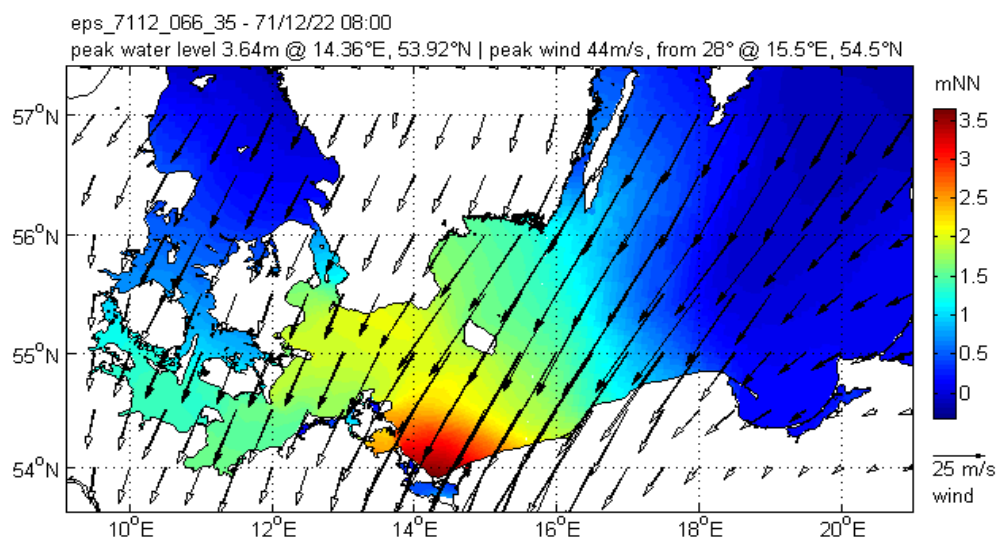
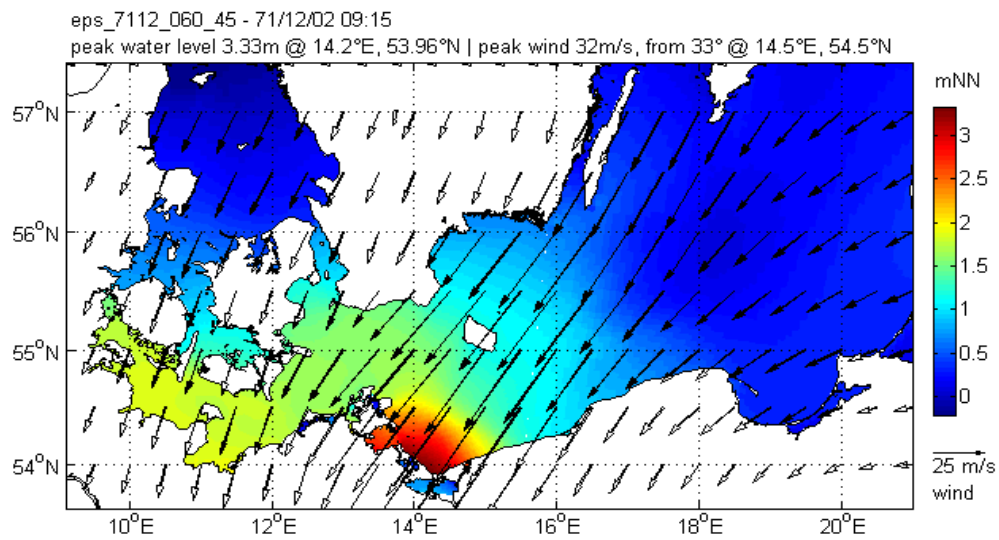
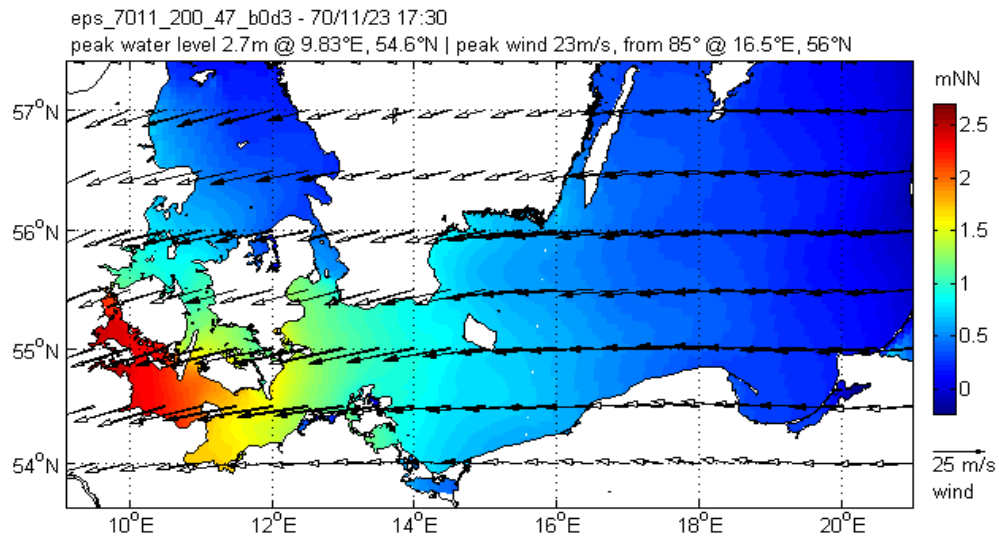
lat: Breitengrad

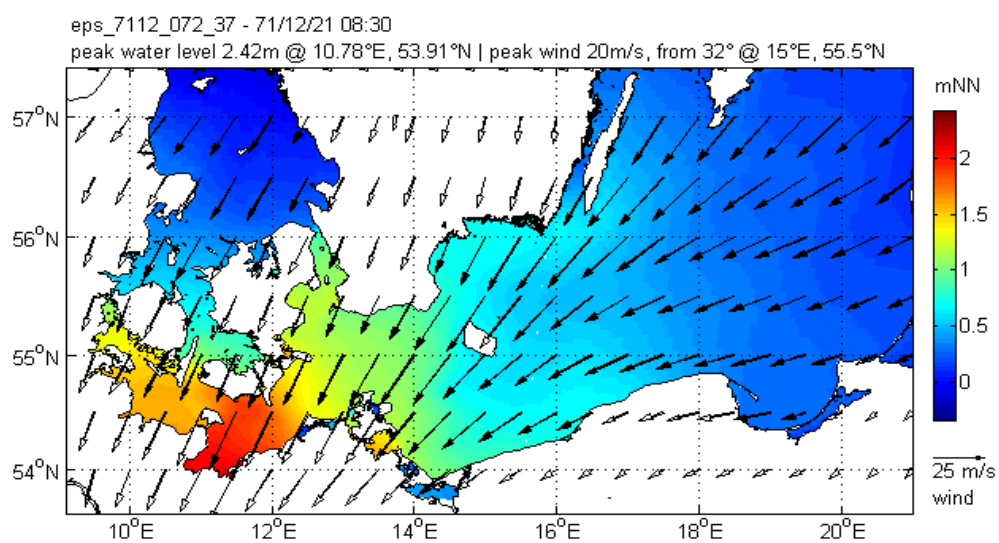
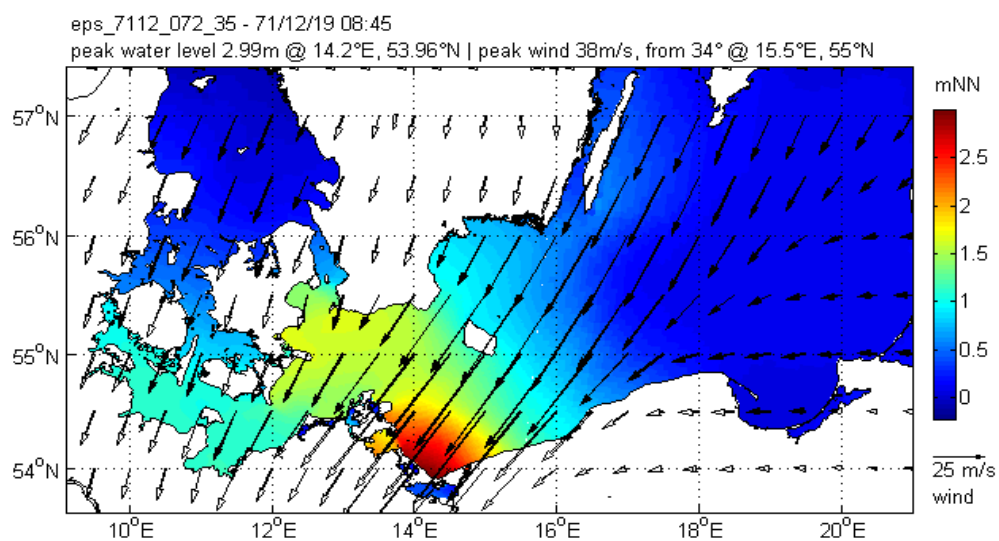
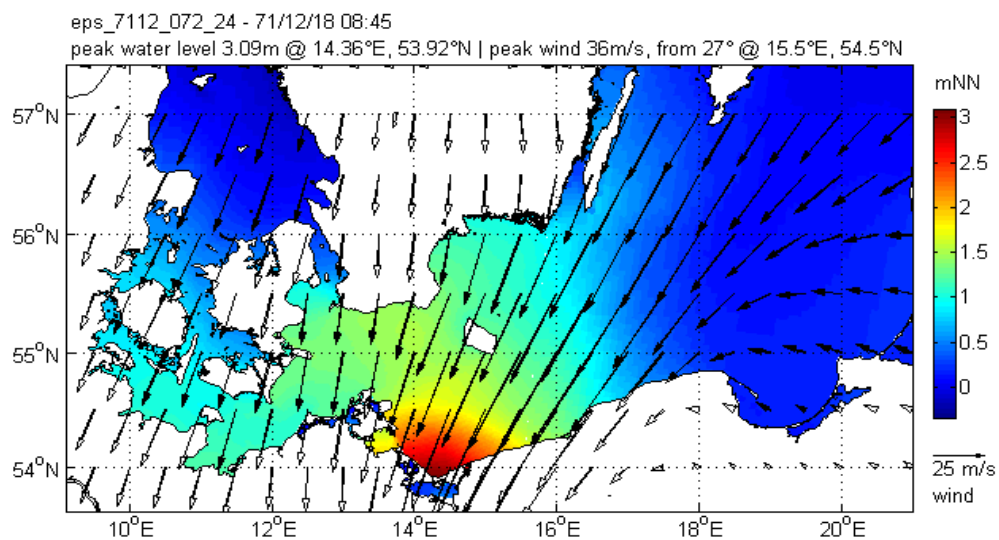


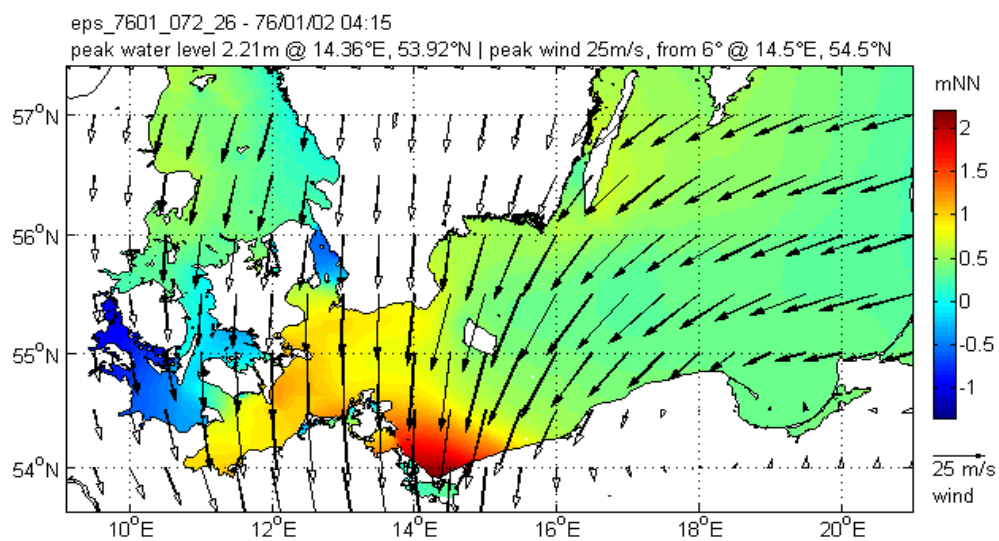
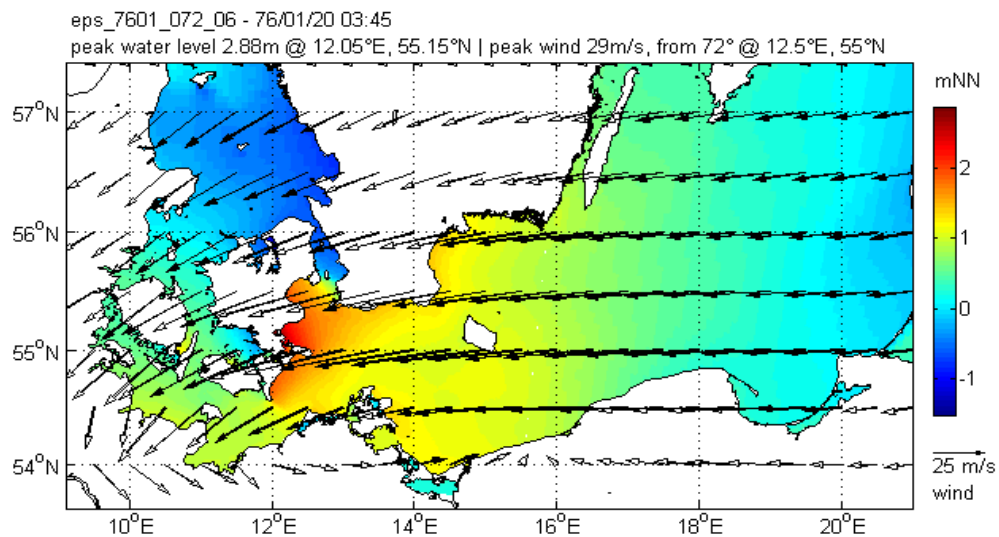
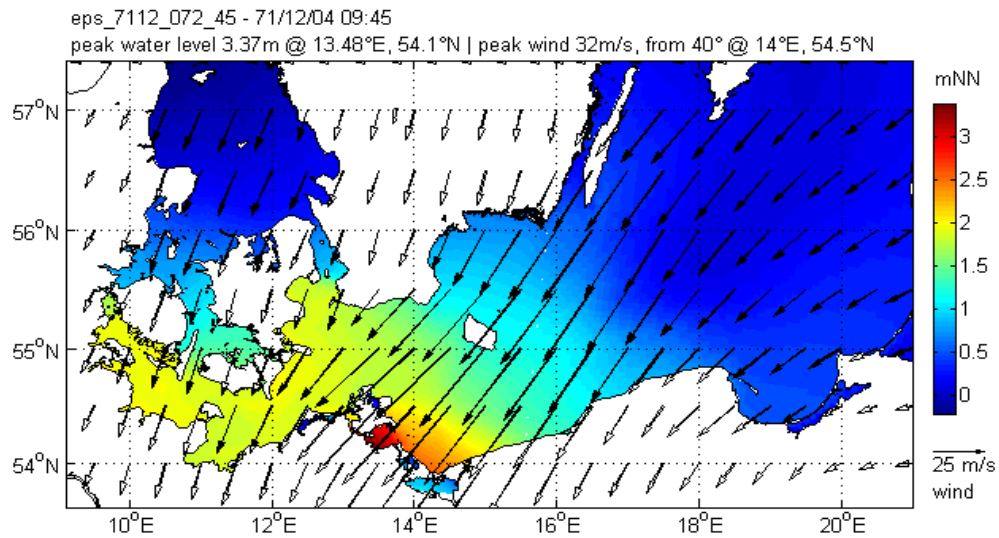






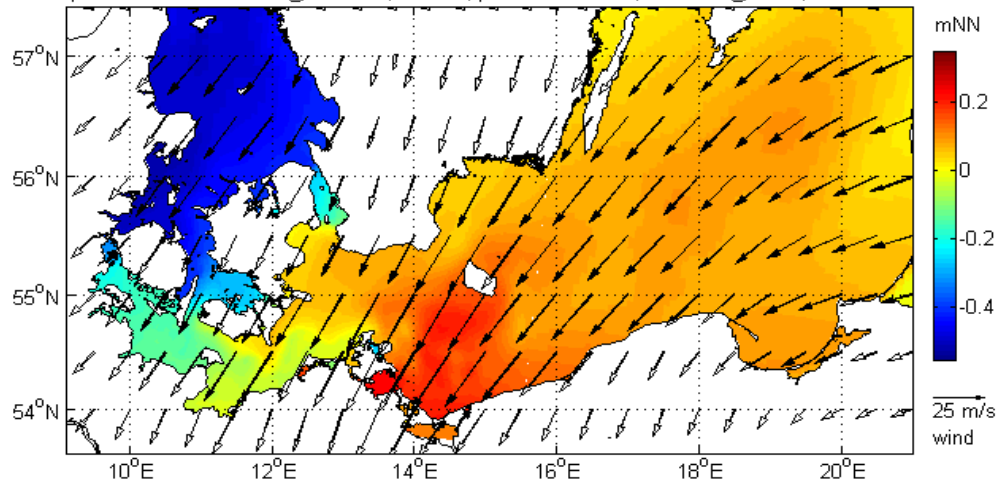






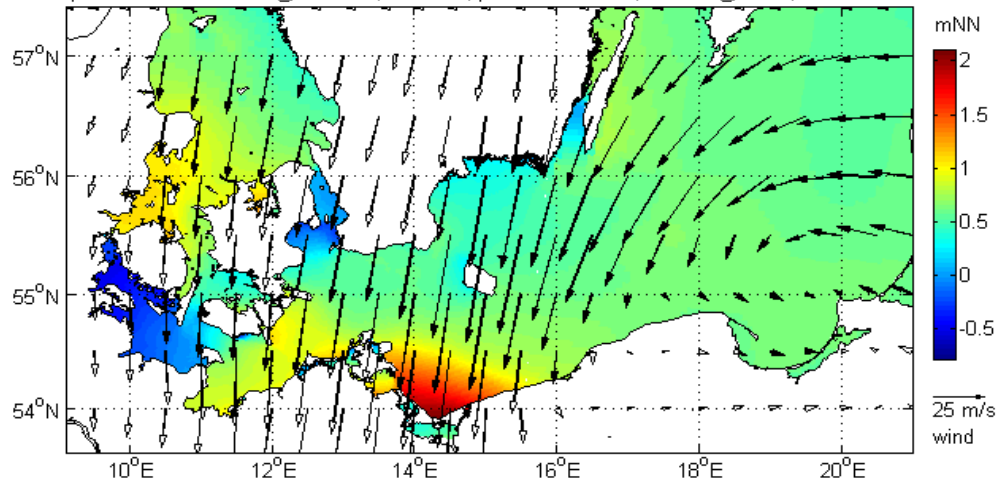
eps_7902_132_49 - 79/02/20 14:15

peak water level 0.35m @ 13.48°E, 54.1°N | peak wind 21m/s, from 29° @ 14°E, 54.5°N



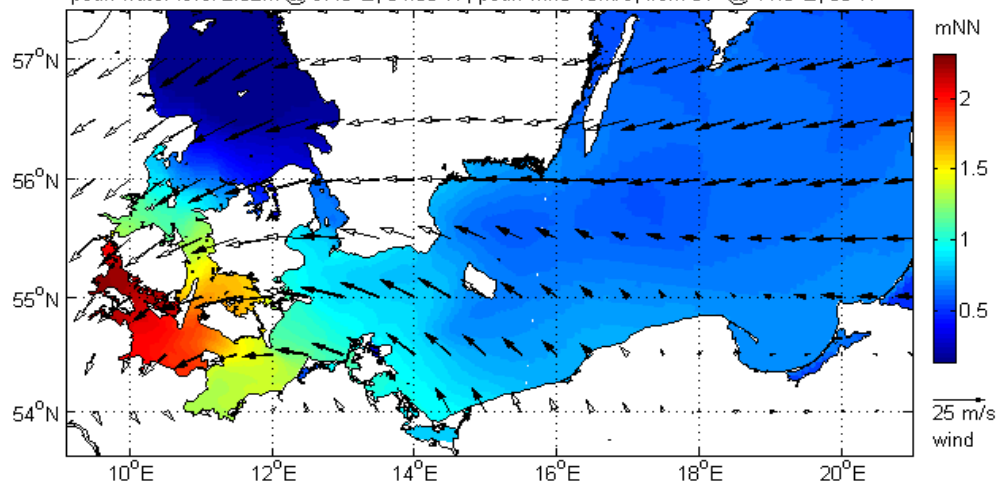
eps_8301_148_27 - 83/01/12 21:30

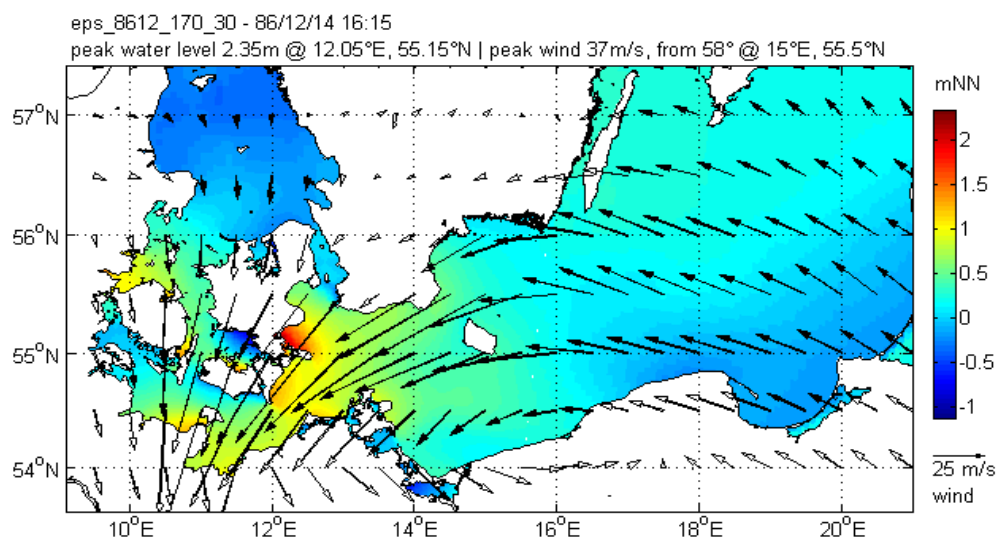
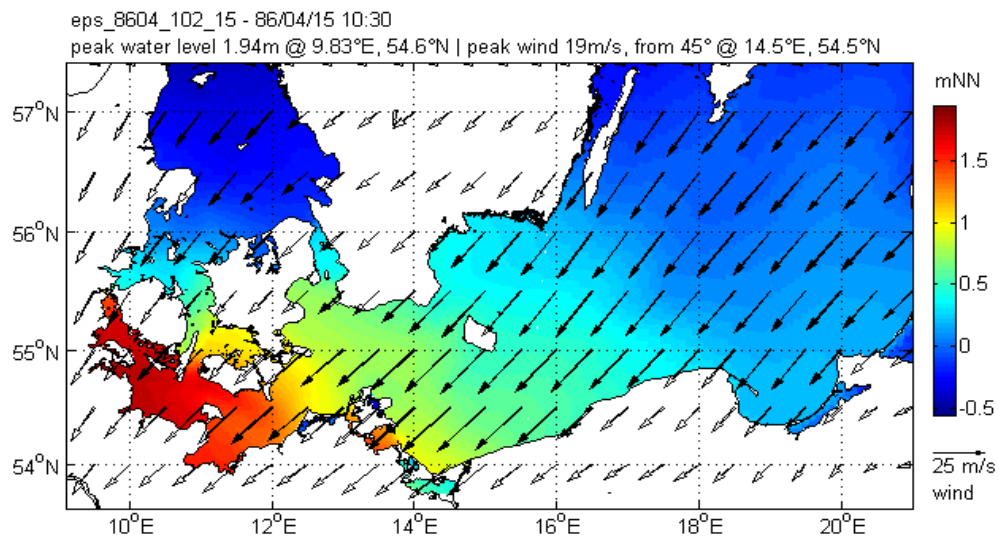
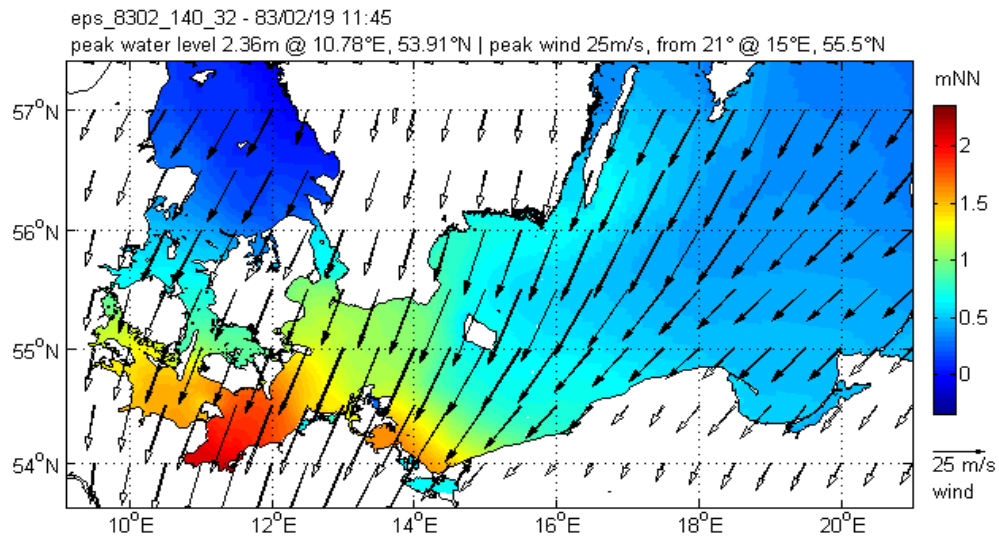
peak water level 2.1m @ 14.36°E, 53.92°N | peak wind 33m/s, from 9° @ 15°E, 55.5°N

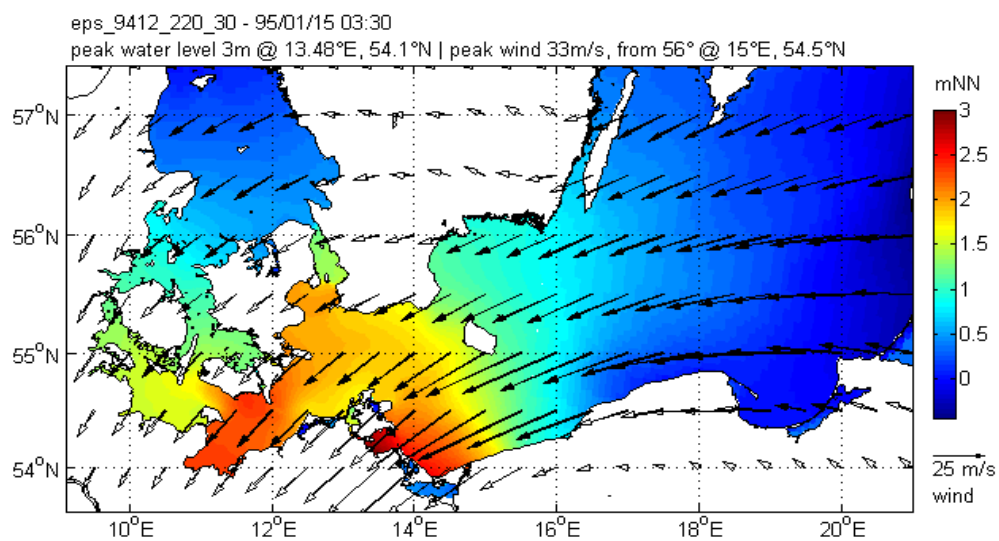
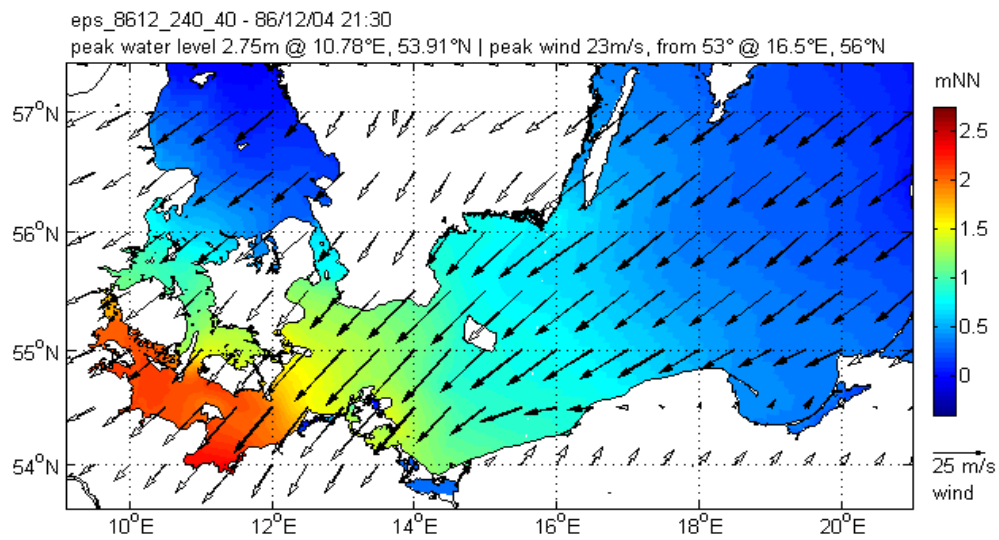
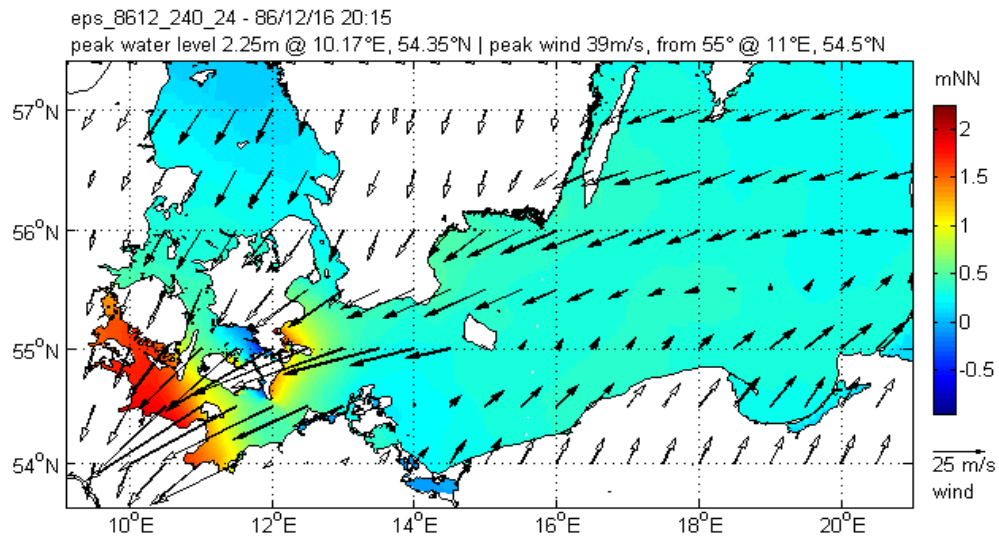


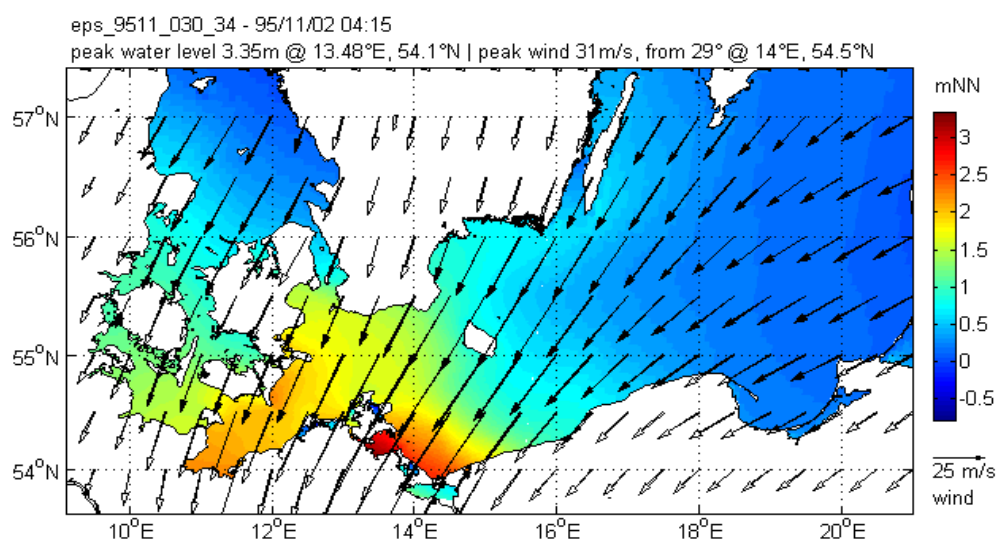
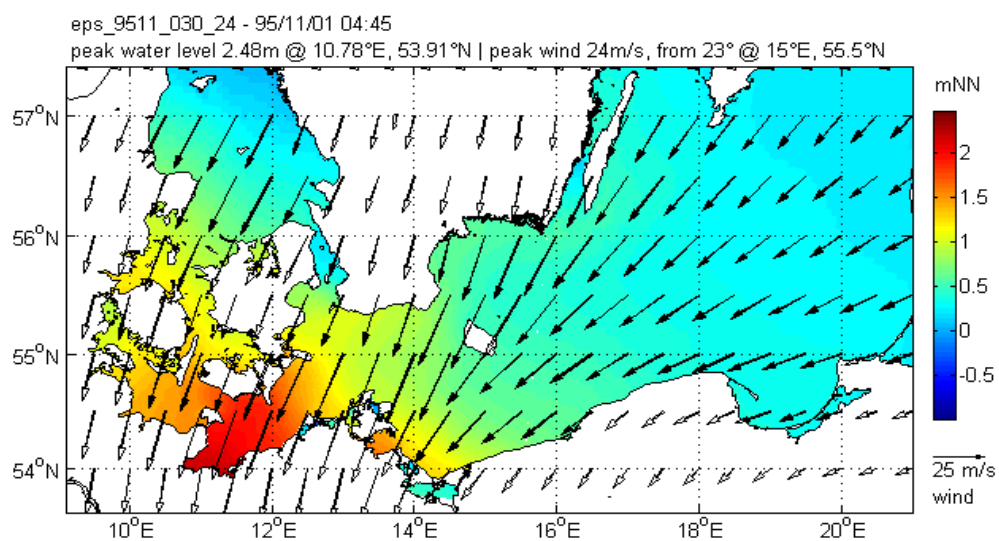
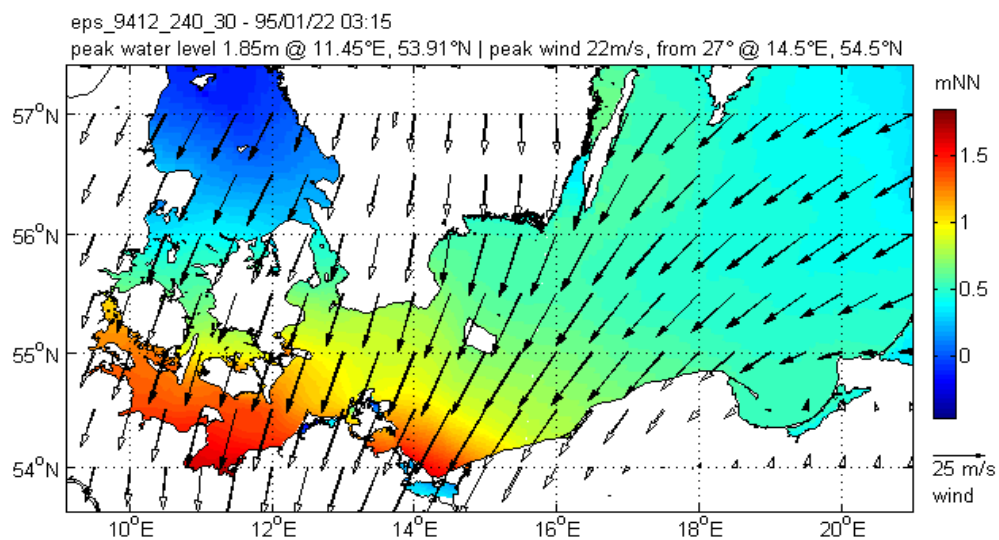
eps_8302_080_47 - 83/02/09 08:30

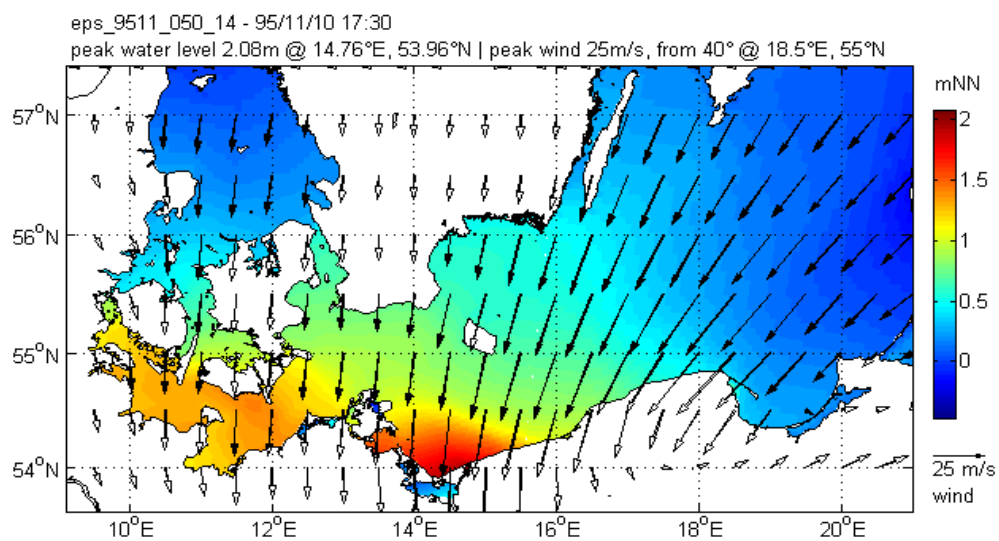
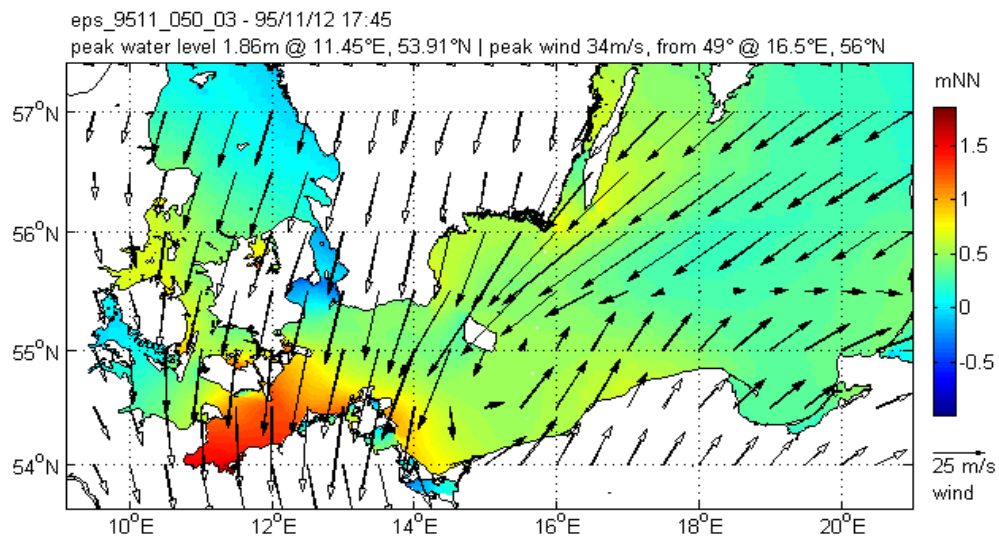
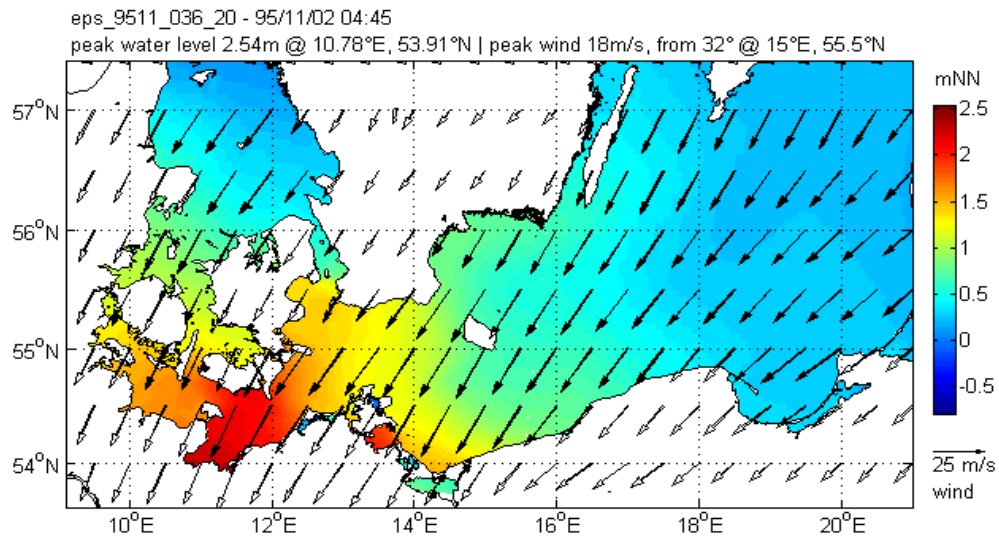
peak water level 2.32m @ 9.46°E, 54.83°N | peak wind 15m/s, from 61° @ 11.5°E, 56°N

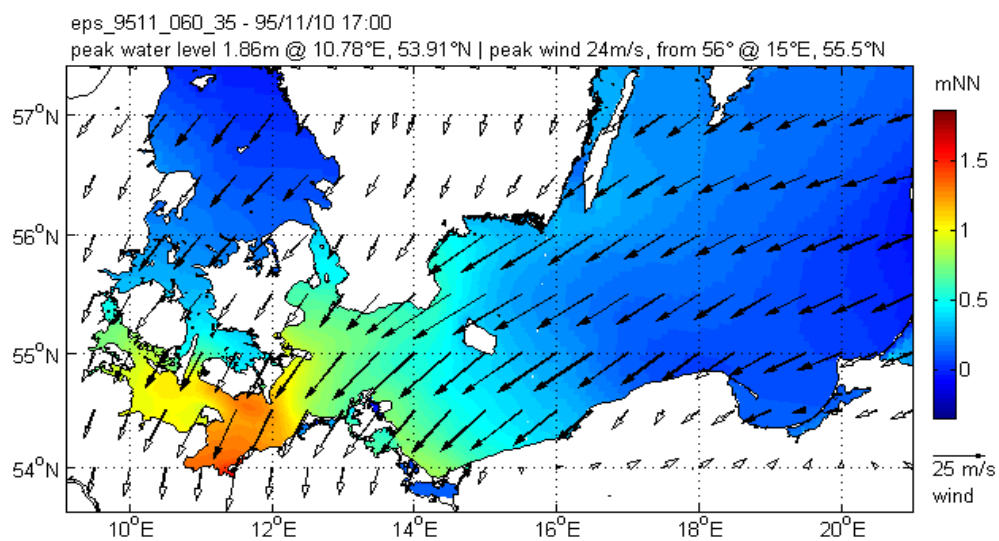
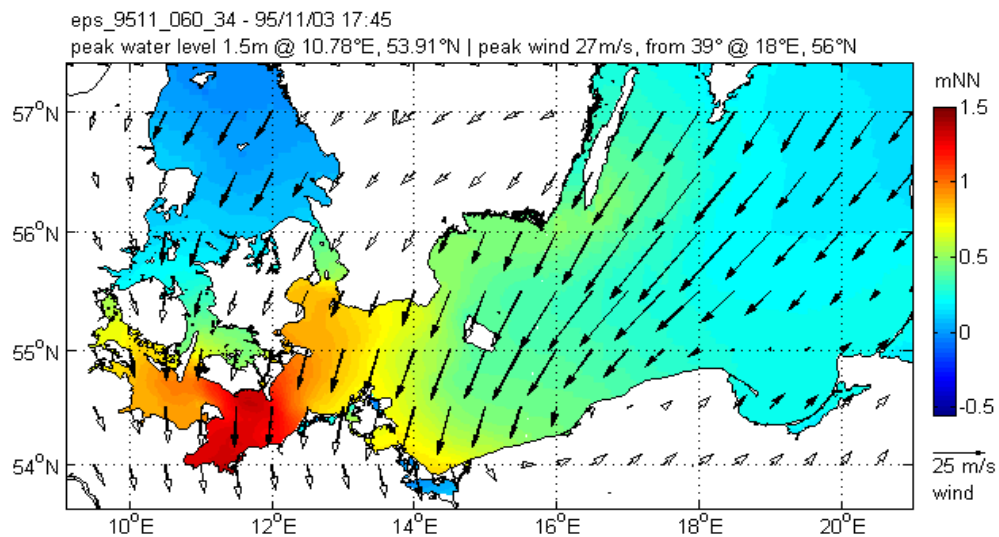
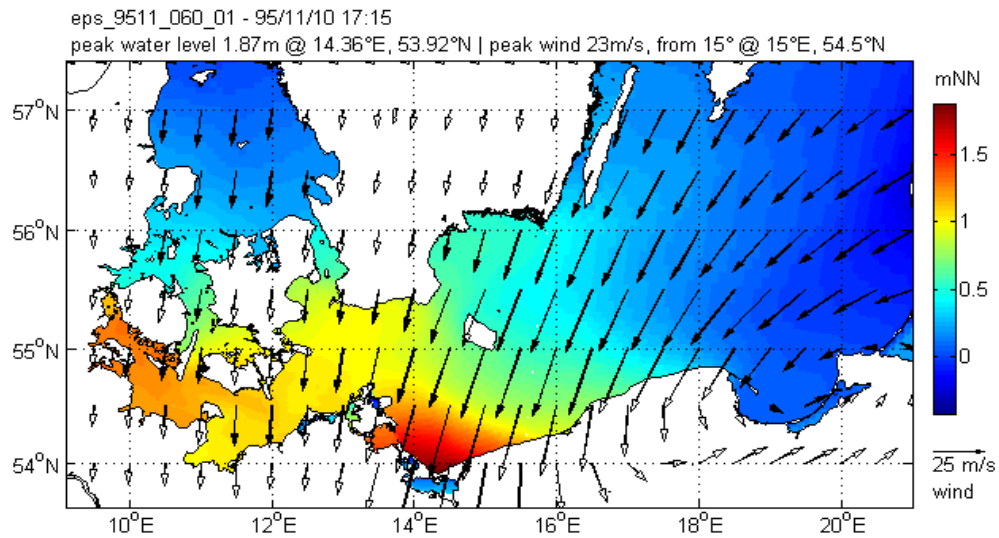


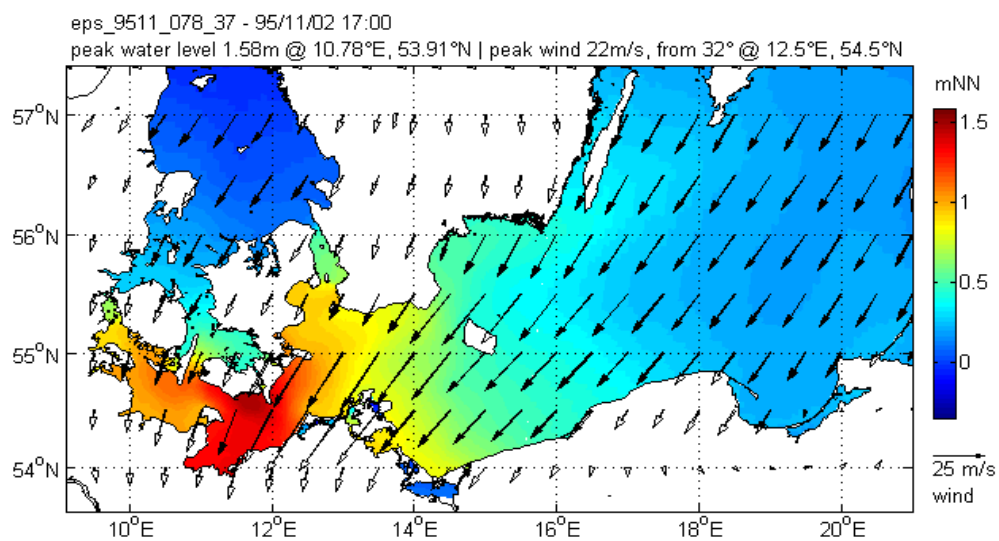
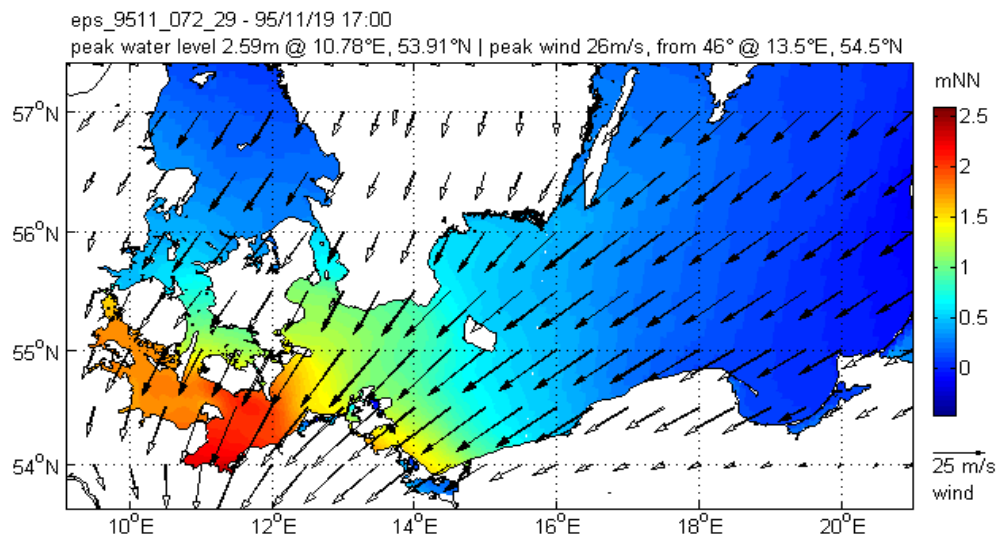
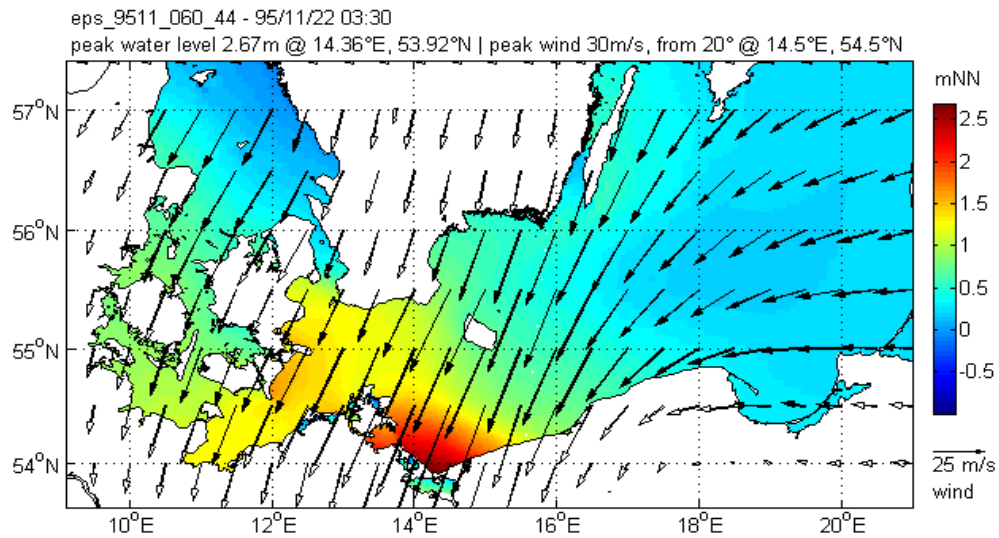


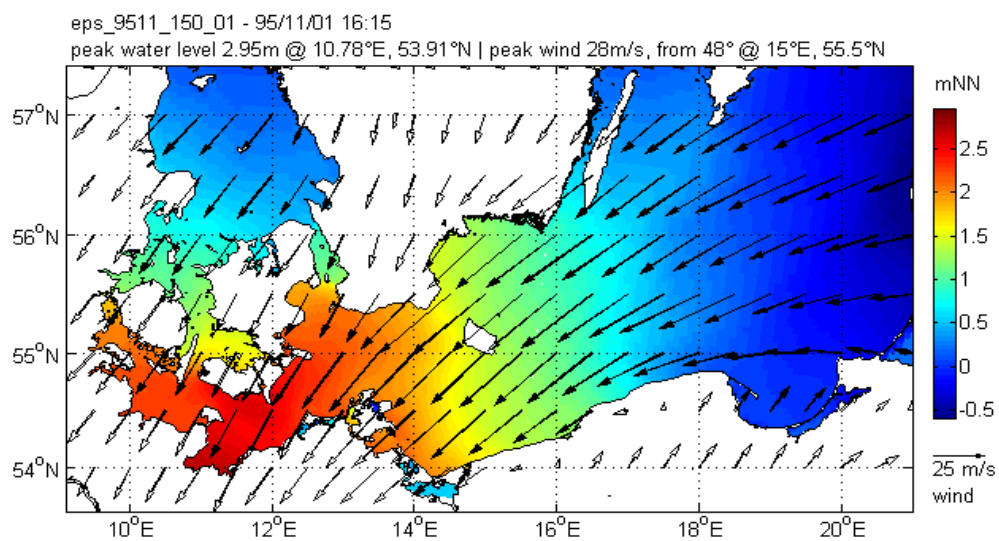
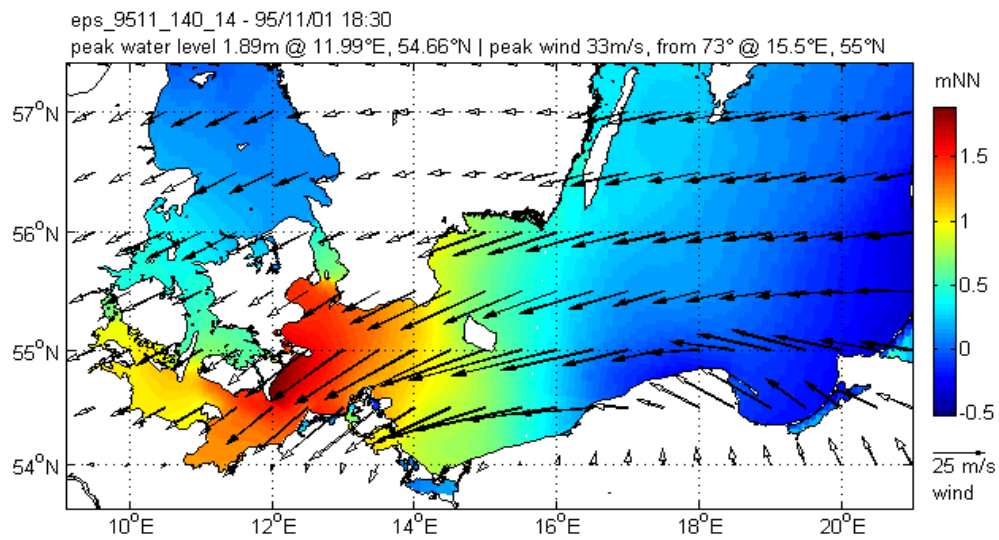
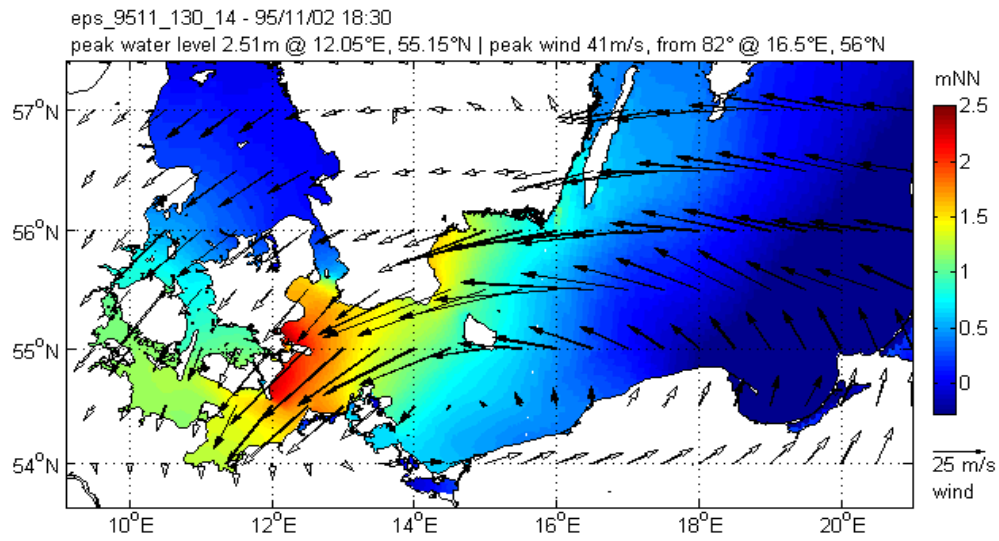


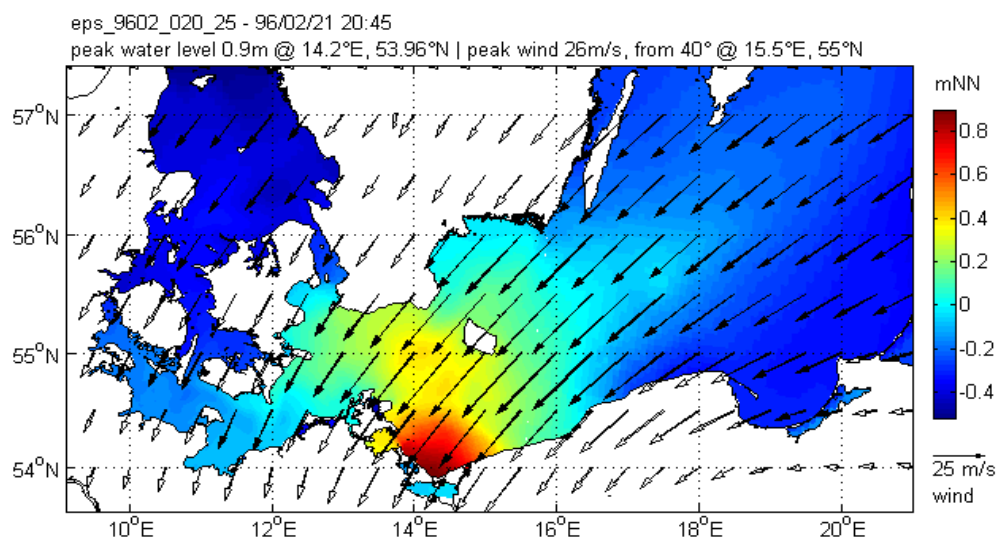
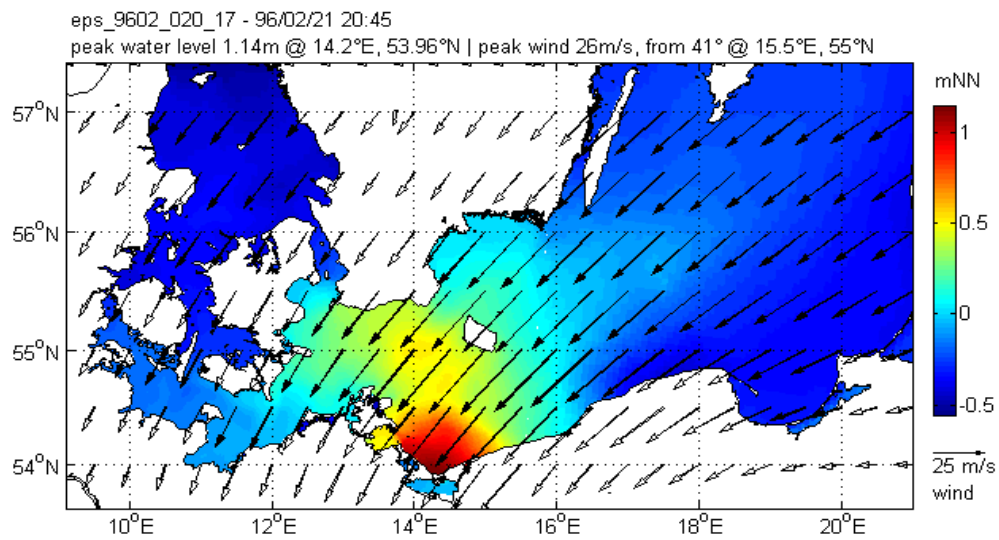
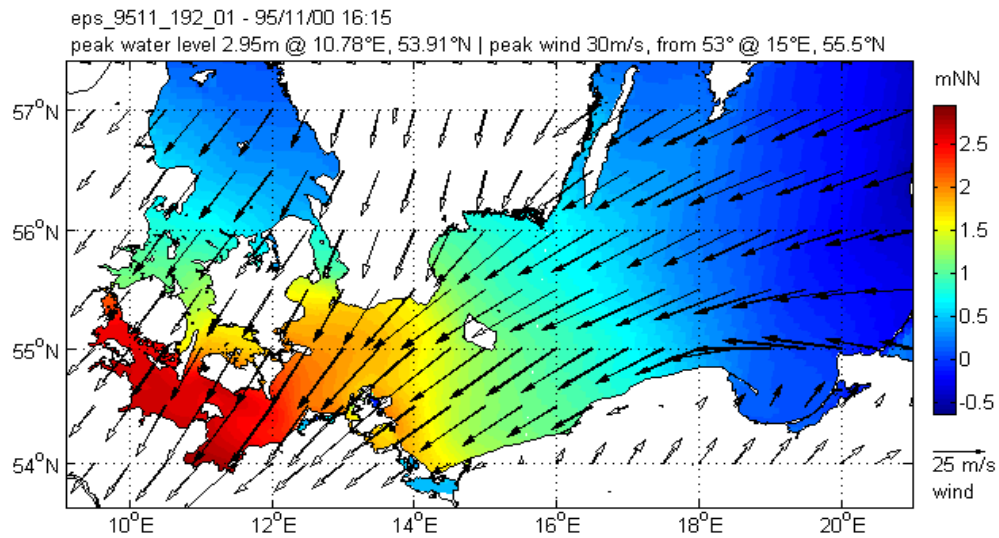


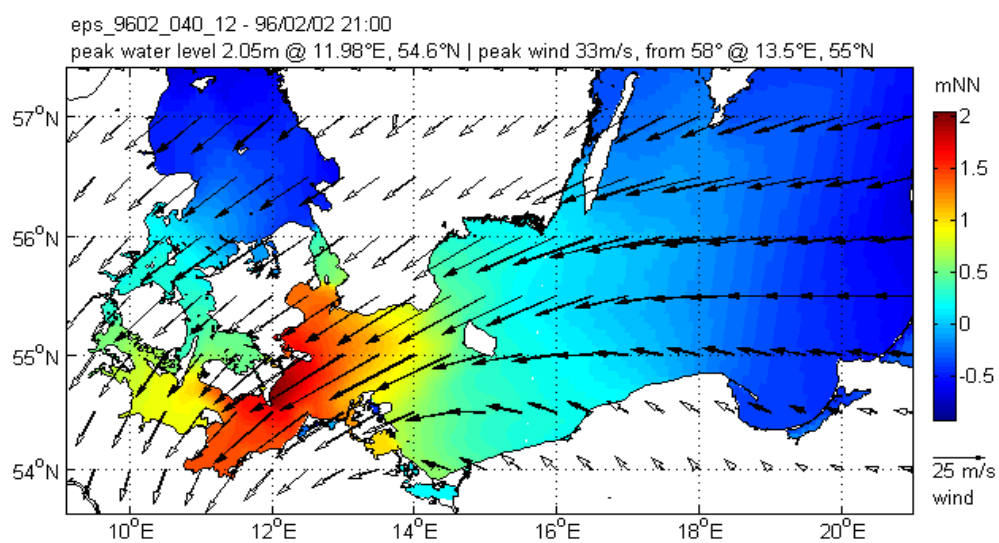
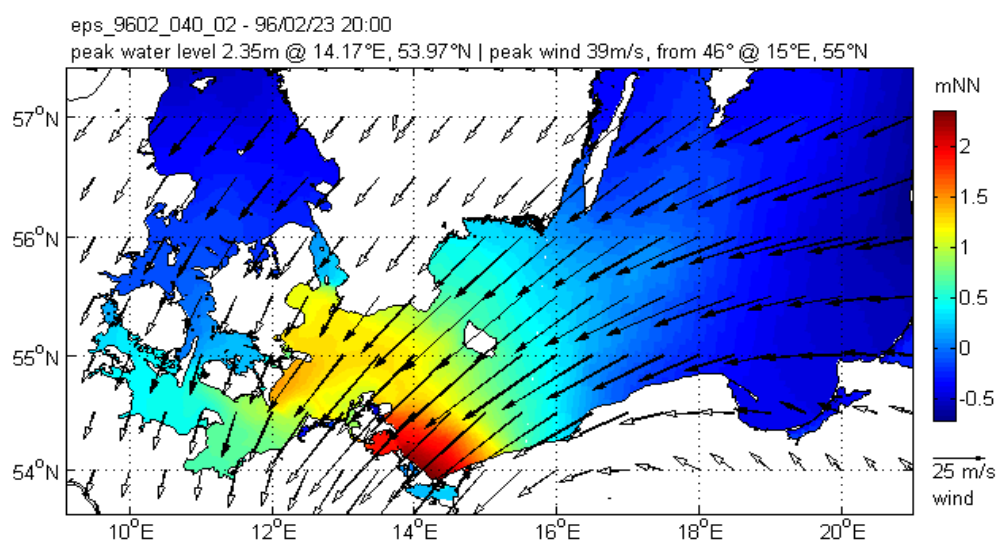
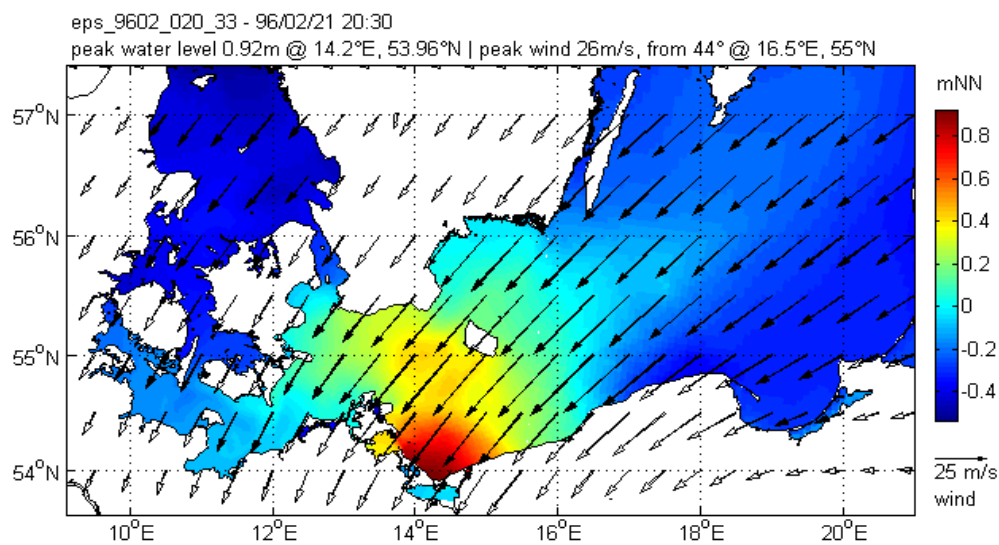


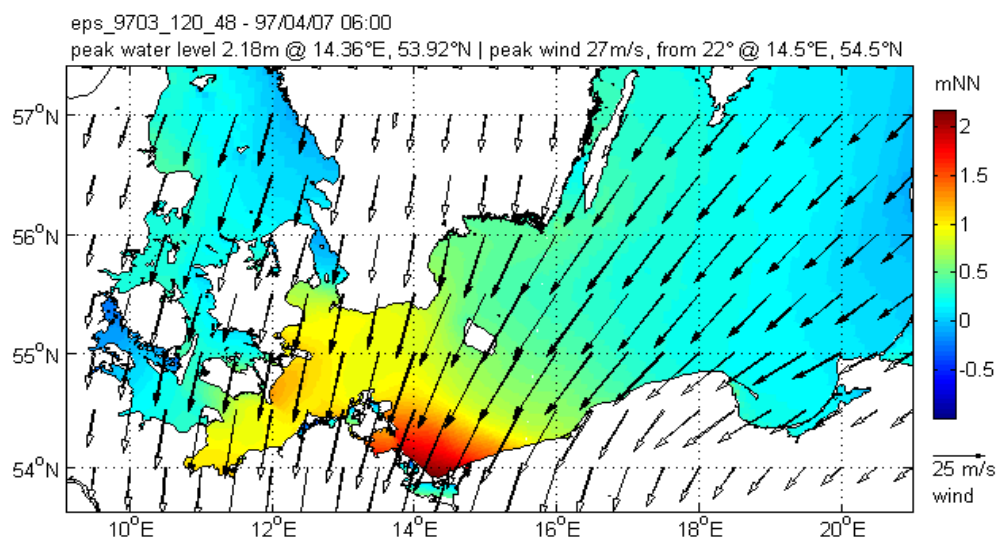
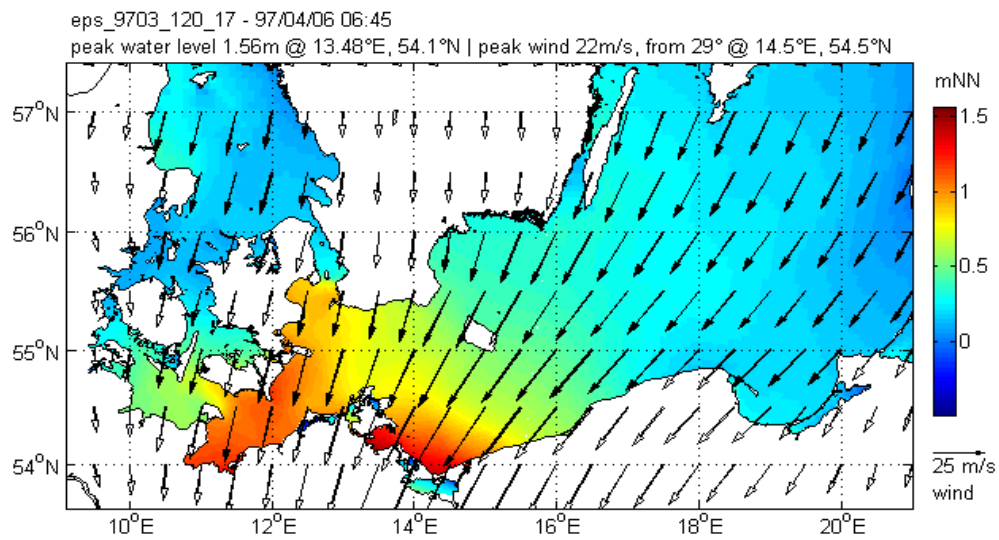
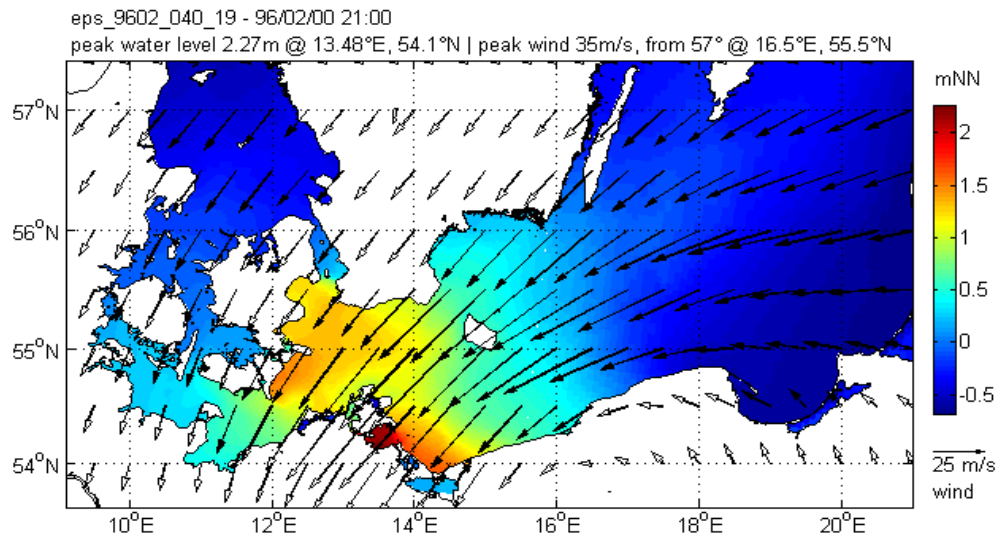






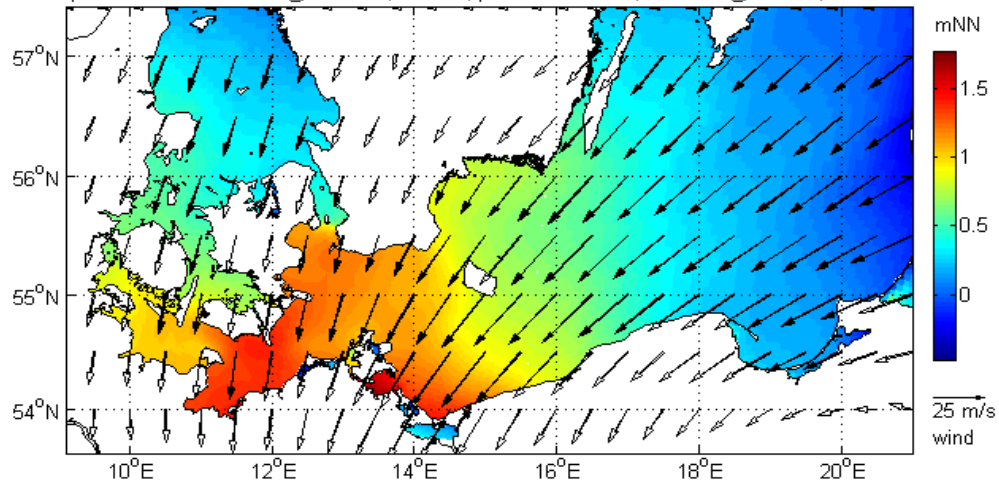






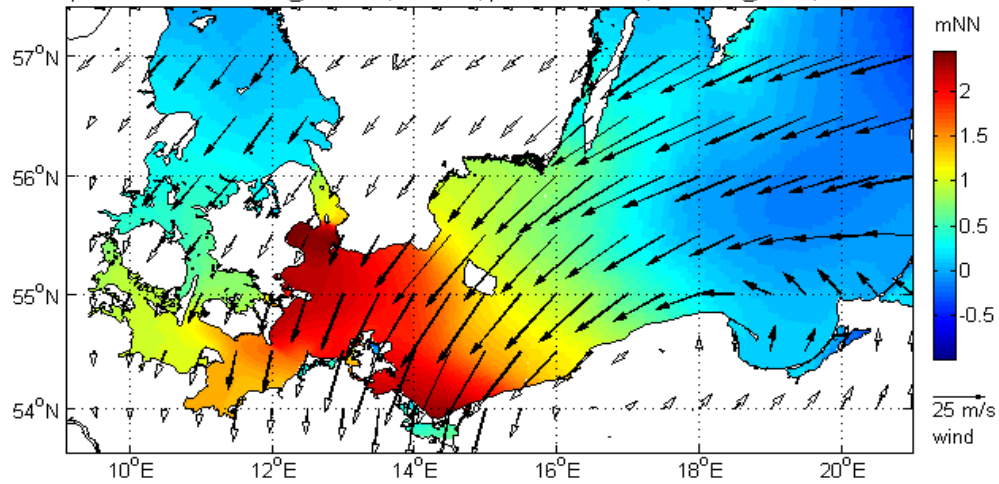
eps_9703_168_06 - 97/04/09 06:15

peak water level 1.78m @ 13.48°E, 54.1°N | peak wind 21m/s, from 40° @ 15.5°E, 55°N



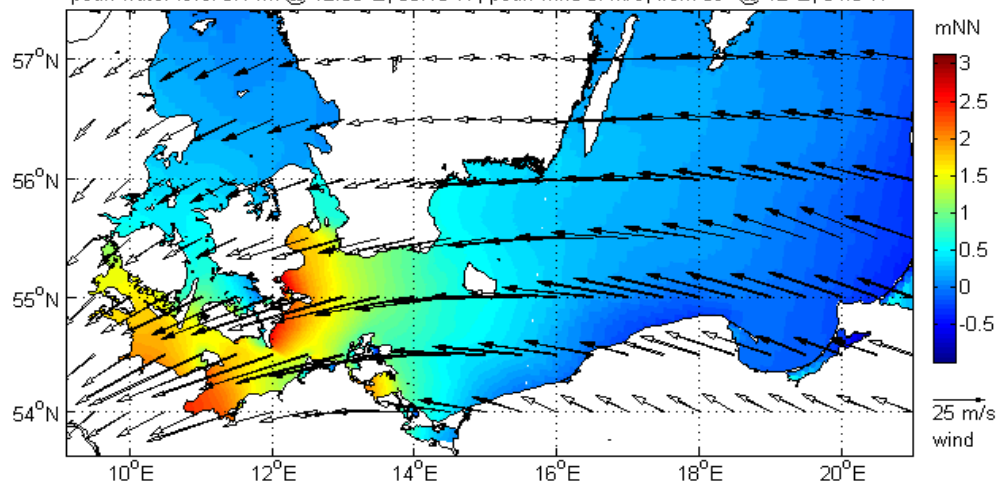
eps_0310_180_45 - 03/10/22 24:00

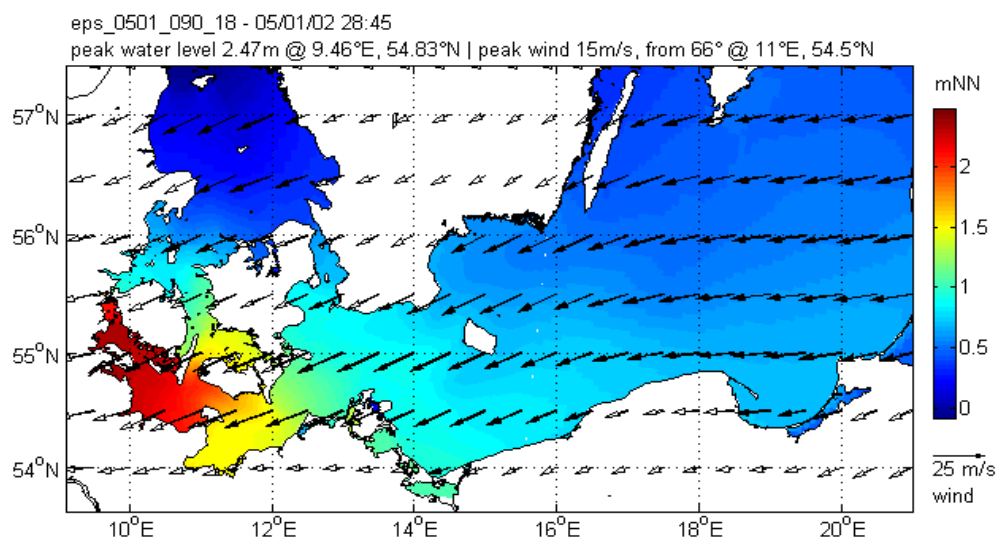
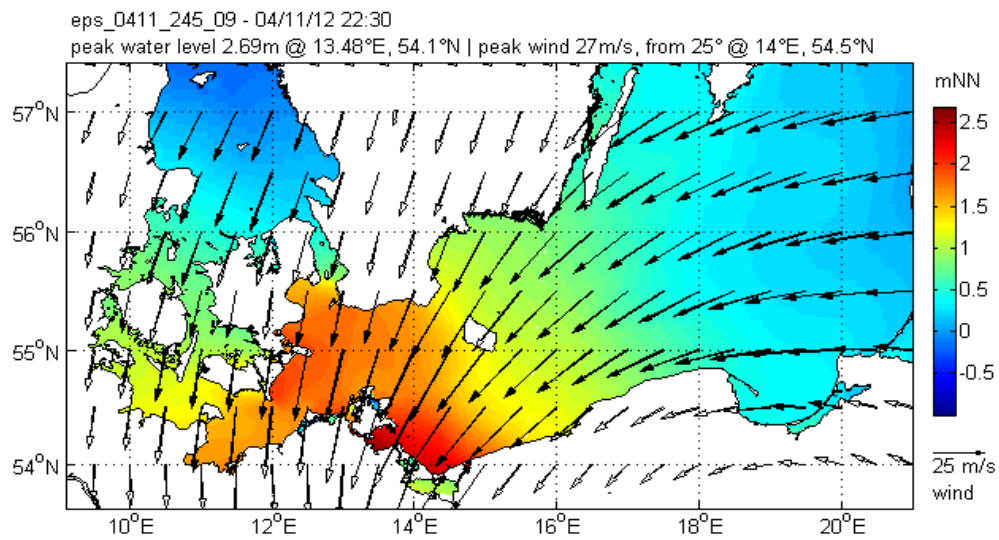
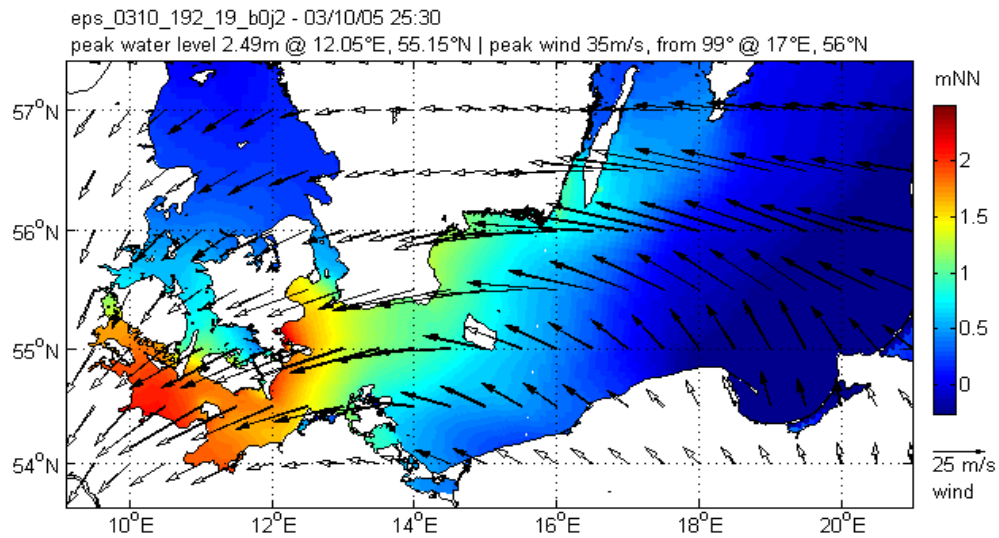
peak water level 2.45m @ 12.92°E, 55.42°N | peak wind 31m/s, from 64° @ 18°E, 56.5°N



eps_0310_192_19 - 03/10/00 25:30

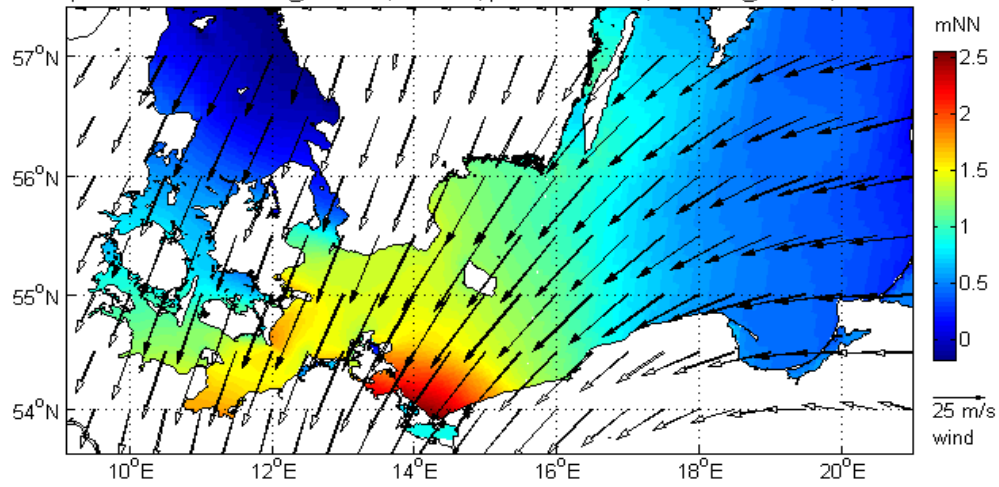
peak water level 3.14m @ 12.05°E, 55.15°N | peak wind 37m/s, from 69° @ 12°E, 54.5°N





eps_0501_120_45 - 05/01/18 27:15

peak water level 2.56m @ 14.25°E, 53.94°N | peak wind 28m/s, from 32° @ 14.5°E, 54.5°N



Rek.1872 - 1872/11/13 11:45

peak water level 3.63m @ 10.78°E, 53.91°N | peak wind 30m/s, from 38° @ 14.5°E, 54.5°N

