

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Periodical Part, Report, Published Version

Hein, Hartmut; Mai, Stephan; Barjenbruch, Ulrich
Klimabedingt veränderte Tidekennwerte und
Seegangsstatistik in den Küstengewässern

KLIWAS Schriftenreihe

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105387>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Hein, Hartmut; Mai, Stephan; Barjenbruch, Ulrich (2014): Klimabedingt veränderte Tidekennwerte und Seegangsstatistik in den Küstengewässern. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde (KLIWAS Schriftenreihe, 33/2014).

https://doi.org/10.5675/Kliwas_33/2014_2.03.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

**KLIWAS Schriftenreihe
KLIWAS-33/2014**

**Schlussbericht
KLIWAS-Projekt 2.03**

**Klimabedingt veränderte Tidekennwerte
und Seegangstatistik in den Küstengewässern**

Koblenz, im Dezember 2014



KLIWAS

KLIWAS Schriftenreihe KLIWAS-33/2014

Schlussbericht
KLIWAS-Projekt 2.03

Klimabedingt veränderte Tidekennwerte
und Seegangsstatistik in den Küstengewässern

Autoren:

Hartmut Hein,
Stephan Mai,
Ulrich Barjenbruch

Zitiervorschlag:

HEIN, H, MAI, S., BARJENBRUCH, U. (2014): Klimabedingt veränderte Tidekennwerte und Seegangsstatistik in den Küstengewässern. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.03. KLIWAS-33/2014. BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas_33/2014_2.03
URL: http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_33_2014_2.03.pdf

Seite

Kapitel

Inhaltsverzeichnis

06		TABELLENVERZEICHNIS
06		ABBILDUNGSVERZEICHNIS
09	1	KURZFASSUNG
14	2	ZIELE
16	3	STAND DER FORSCHUNG
23	4	METHODEN
23	4.1	PEGELMESSUNGEN
23	4.1.1	DATENGRUNDLAGE UND QUALITÄTSSICHERUNG
25	4.1.2	ERMITTLUNG VON TRENDS
28	4.2	BESCHREIBUNG DER MODELLKETTE
33	4.3	MODELLIERUNG VON TIDEKENNWERTEN
34	4.3.1	NUMERISCHEN LANGZEITMODELLIERUNG DER HYDRODYNAMIK
36	4.3.2	MODELLIERUNG DER NORDSEE
37	4.3.3	MODELLIERUNG DER AUSSENEMS
39	4.3.4	MODELLIERUNG DES ELBEÄSTUARS
41	4.4	MODELKETTE FÜR DIE SEEGANGSSTATISTIK
43	4.5	GEZEITEN UND DEREN ÄNDERUNG
45	5	DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN
49	6	VERNETZUNG DES PROJEKTES, KOOPERATIONSPARTNER
52	7	ERGEBNISSE
52	7.1	QUALITÄTSSICHERUNG HISTORISCHER HYDROLOGISCHER DATEN
52	7.1.1	UNSICHERHEITEN UND QUALITÄTSSICHERUNG VON TIDEKENNWERTEN
54	7.1.2	RÄUMLICH ALEATORISCHE UNSICHERHEITEN VON TIDEKENNWERTEN
56	7.2	UNTERSUCHUNG HISTORISCHER TREND VON TIDEKENNWERTEN
56	7.2.1	HISTORISCHEN TRENDS DES TIDEMITTELWASSERS
58	7.2.2	ZWISCHENJÄHRLICHE VARIABILITÄT VON TIDEKENNWERTEN

Seite	Kapitel	
65	7.2.3	TRENDERMITTLUNG FÜR TIDEKENNWERTE NACH DEM MODALVERFAHREN
67	7.2.4	PHASENVERSCHIEBUNGEN DER TIDEWELLE IN DER DEUTSCHEN BUCHT
68	7.2.5	BRUCHPUNKTE IN DEN ZEITREIHEN DER TIDEKENNWERTE
70	7.3	ZUKÜNFTIGE TIDEKENNWERTE AN DEN KÜSTEN UND IN DEN ÄSTUARE
70	7.3.1	ZUKÜNFTIGER ANSTIEG DES MEERESSPIEGELS
74	7.3.2	ABGEBILDETE FREQUENZEN DER VARIABILITÄT DER MODELLKETTE
77	7.3.3	ZUKÜNFTIGE TIDEKENNWERTE IN DER DEUTSCHEN BUCHT
78	7.3.4	ZUKÜNFTIGE TIDEKENNWERTE IM ELBEÄSTUAR
81	7.3.5	MODELLIERUNG DER STRÖMUNG AN DER VEGETATIONSGRENZE DER UNTERELBE
83	7.4	KÜSTENHYDROLOGISCHE PROZESSE
83	7.4.1	PERIODIZITÄT VON TIDEKENNWERTEN
83	7.4.2	ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG DER GEZEITEN AN DER MÜNDUNG DER ELBE
85	7.4.3	ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG DER GEZEITEN IM ELBEÄSTUAR
87	7.5	SEEGANG
91	8	KERNAUSSAGEN ZU DEN ERGEBNISSEN
91	8.1	DATEN UND QUALITÄT
92	8.2	HISTORISCHE ÄNDERUNG DER TIDEKENNWERTE
92	8.3	ZUKÜNFTIGE ÄNDERUNG DER TIDEKENNWERTE
93	8.4	VARIABILITÄT
93	8.5	SEEGANG
95	9	BETROFFENHEIT DES SYSTEMS WASSERSTRAÙE
96	10	ANPASSUNGSOPTIONEN UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN
97	10.1	MESSEN / MONITORING
97	10.2	QUALITÄTSSICHERUNG
98	10.3	WISSENSKOLLATION UND MODELLKETTEN
98	10.4	SYSTEMANALYSE: UNAUFGEREGTE KONTINUIERLICHE, WISSENSCHAFTLICHE, KÜSTENHYDROLOGISCHE BEGUTACHTUNG

Seite	Kapitel	
99	1	DISKUSSION UND AUSBLICK
101	2	DANKSAGUNG
102	3	LITERATUR
117	4	ABKÜRZUNGEN

Seite

Tabelle

Tabellenverzeichnis

18	3-1	GEGENÜBERSTELLUNG DER PROGNOSEN ZUM MEERESSPIEGELANSTIEG VERSCHIEDENER AUTOREN (AUS: JENNINGS UND SCHÜTTRUMPF, 2012)
44	4-1	ZUSAMMENSTELLUNG AUSGEWÄHLTER MAßGEBENDER GEZEITEN AUS JENNING UND SCHÜTTRUMPF (2012)
51	6-1	PROJEKT 2.03 –KOOPERATIONEN
66	7-1	LINEARER ANSTIEG SEIT 1935 VON TIDEKENNWERTEN AUSGESUCHTER PEGEL (ORANGE - POSITIVER ANSTIEG; GRÜN – NEGATIVER ANSTIEG; GRAU – SEHR GERINGER AN-/ABSTIEG)
67	7-2	ABGELESENE ANSTIEGE SEIT 19935 DER LINEAREN GERADEN DER DIFFERENZEN DER EINTRITTSZEITEN ΔT FÜR THW UND TNW UND DEREN MITTELWERT; JENNING UND SCHÜTTRUMPF (2012)
69	7-3	ZUSAMMENFASSUNG DES ZEITPUNKTES, ANZAHL JAHRE UND JAHRE VON DETEKTIERTEN BRUCHPUNKTEN 8 AUSGESUCHTER PEGEL (JENNING UND SCHÜTTRUMPF, 2012)
78	7-4	ERGEBNIS DER MODELLKETTE: MÖGLICHE ÄNDERUNGEN DER TIDE-KENNWERTE AM PEGELSTANDORT CUXHAVEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES A1B SZENARIOS

Seite

Abbildung

Abbildungsverzeichnis

26	4-1	WAHRSCHEINLICHKEITSDICHTEFUNKTIONEN, JAHRESWEISE, PEGEL BORS THW 1936 BIS 2009, (JENNING UND SCHÜTTRUMPF, 2012)
26	4-2	WAHRSCHEINLICHKEITSDICHTEFUNKTIONEN, JAHRESWEISE, PEGEL BORS TNW 1936 BIS 2009, (JENNING UND SCHÜTTRUMPF, 2012)
27	4-3	WAHRSCHEINLICHKEITSDICHTEFUNKTIONEN, JAHRESWEISE, PEGEL BORS THB 1936 BIS 2009 (JENNING UND SCHÜTTRUMPF, 2012)
29	4-7	GRUNDLEGENDEN DES KONZEPTS ZUR MODELLIERUNG DER NORDSEE UND DES ELBEÄSTUARS IN DEN KLIMALÄUFEN (HEIN ET AL., 2013C, D)
31	4-8	AUFLÖSUNG DER NORDSEETOPOGRAPHIE IM GLOBALEN MODELL (AUS: MATHIES, 2013)
31	4-9	AUFLÖSUNG DER NORDSEETOPOGRAPHIE IM NORDSEEMODELL UND IM AUS
32	4-10	AUFLÖSUNG DER TOPOGRAPHIE IM ELBEMODELL

Seite	Abbildung	
32	4-11	AUFLÖSUNG DER TOPOGRAPHIE IM MODELL DER AUSSENEMS
33	4-12	WELTWEITE VERBREITUNG UND ANWENDUNGSBEREICH DES HYDRO- UND THERMODYNAMISCHEN MODELS HAMSOM (AUS: HEIN ET AL. 2013C, D)
36	4-13	BEISPIELE FÜR DAS VERWENDETE BI-SKALARE GITTER (AUS, HEIN, 2012)
37	4-14	EXEMPLARISCHES ERGEBNIS DER MODELLKETTE (HEIN ET AL. 2013E)
38	4-15	MITTLERE WASSERSTÄNDE VON VIER VERSCHIEDENEN WINTERN IM VERGLEICH [M]
40	4-16	VERÄNDERLICHKEIT DER PHASENGESCHWINDIGKEIT DER TIDEWELLE AUSGEWÄHLTER PARTIALTIDEN (M2, S2, M3, M4) IN ABHÄNGIGKEIT VON DEN PARAMETEREINSTELLUNGEN UND RANDWERTEUNSIKERHEIT (HEIN ET AL., 2014A)
41	4-17	MODELKETTE FÜR DEN SEEGANG
53	7-1	BEISPIELE FÜR GEFÜLLTE LÜCKEN MIT DEM LSP ANSATZ. BAU: DIGITALISIERTEN WERTE. ORANGE: REKONSTRUKTION
54	7-2	BEISPIEL FÜR EINE GEFÜLLTE LÜCKE MITTELS DES FUZZY-LOGIK ANSATZ. BLAU: DIGITALISIERTEN WERTE. ORANGE: REKONSTRUKTION
55	7-3	ABBILDUNGSBEREICH DER PEGEL IM EMS-DOLLART ÄSTUARS, DARGESTELLT ALS ALEATORISCHE UNSICHERHEIT AUS EINER EINJÄHRIGEN SIMULATION. DER FLÄCHIG GEFÄRBT BEREICH DEFINIERT DEN GRENZBEREICH EINER UNSICHERHEIT VON ± 10 CM (2σ) DES GEWÄSSERKUNDLICHEN WASSERSTANDES. DIE LINIEN DEFINIEREN EINEN BEREICH VON ± 20 CM (2σ)
56	7-7	VERÄNDERUNG DES TIDEMITTELWASSERS DER LETZTEN 3500 JAHRE (DATEN AUS BEHRE, 2003)
57	7-8	DER REGIONALE ANSTIEG DES MEERESSPIEGELS (BLAUE KURVE) IN DER SÜDLICHEN DEUTSCHEN BUCHT UND UNSICHERHEITEN (GRAUES BAND); DER LINEARE TREND (ORANGE GESTRICHELTE LINE); LANDSENKUNG MIT UNSICHERHEITEN (GRÜN)
59	7-9	SKALENAUFGELOSTE ANSTIEGSRATEN DES REGIONALEN MEERESSPIEGELS (HEIN ET AL. 2011B)
60	7-10	ANSTIEGSRATEN DES REGIONALEN MEERESSPIEGELS (BLAUE LINIE) UND UNSICHERHEITEN (GRAUES BAND); B –C) DREI WESENTLICHE PERIODIZITÄTEN AUS DER MULTISKALENANALYSE (HEIN ET AL. 2011B, 2012C). DIE ORANGE LINIE ZEIGT DAS 100 JÄHRIGE MITTEL
62	7-11	VERGLEICHENDE WAVELETANALYSE DES TIDEHOCHWASSERS AM PEGEL BORKUM SÜDSTRAND (A) UND NAO-INDEX (B, HURREL, 1995). ZUR VERGLEICHBARKEIT WURDEN BEIDE WERTEBEREICHE AUF $\sigma = 1$ NORMIERT
63	7-12	VERGLEICH DES NEGIERTEN NORMIERTEN NAO-INDEXES (ORANGE) MIT DEN NORMIERTEN THW-MESSUNGEN (BLAU) MITTELS SSA
64	7-13	DER HISTORISCHE VERLAUF DES TIDENHUB FÜR AUSGEWÄHLTE PEGEL

Seite	Abbildung	
70	7-19	KLIMABEDINGTE ANSTIEGSRATE TIDEMITTELWASSER BIS 2100 (AUS MESSUNGEN , FESTES REFERENZSYSTEM)
71	7-20	ABSCHÄTZUNG DES GLOBALEN MEERESSPIEGELANSTIEGES (ORANGE). AUS MESSUNGEN (HISTORISCH); BLAU: GLOBAL, GRÜN: DEUTSCHE BUCHT (VGL. ABBILDUNG 7 8).
73	7-21	ABSCHÄTZUNG MEERESSPIEGELANSTIEGES AN DER DEUTSCHEN NORDSEEKÜSTE AUS DER MODELKETTE; BLAU: JAHRESMITTEL; ORANGE: 19 JÄHRLICHES MITTEL
75	7-22	MULTISKALENANALYSE DES TIDEMITTELWASSERSTANDES: A)MESSUNGEN, B) HINDCASTMODEL, C)KLIMAMODEL, D)KLIMAMODEL (ZUKUNFT); HEIN ET AL. (2012D)
76	7-23	TRANSFORMATION AUS DER MULTISKALENANALYSE DES TIDEMITTELWASSERSTANDES: A)MESSUNGEN VS. HINDCAST, B)MESSUNGEN VS. KLIMAMODEL, D)MESSUNG VS. KLIMAMODEL (ZUKUNFT). GRAU: MESSUNGEN VS. WEIBES RAUSCHEN; HEIN ET AL. (2012D)
77	7-24	VALIDIERUNG DER TIDEKENNWERTE AM BEISPIEL MITTLERES JÄHRLICHES TIDEHOCHWASSER IN DER DEUTSCHEN BUCHT AM BEISPIEL CUXHAVEN; ORANGE: MESSUNGEN; BLAU: MODELLKETTE
80	7-25	ÄNDERUNGEN DER TIDEKENNWERTE IM ELBEÄSTUAR
81	7-26	UNTERSUCHUNGSGBIET DER VEGETATIONSMODELLIERUNG AN DER UNTERELBE (ORANGE; ELBE KM 675 UND KM 700)
82	7-27	STRÖMUNGSINFORMATION AN EINEM PUNKT ALS GRUNDLAGE DER VEGETATIONSMODELLIERUNG
84	7-28	VERÄNDERUNG VON SECHS WESENTLICHEN KOMPONENTEN DER GEZEITEN IN DER ELBEMÜNDUNG (HEIN ET AL. 2014B)
86	7-29	VERÄNDERUNG VON SECHS WESENTLICHEN KOMPONENTEN DER GEZEITEN IM ELBEÄSTAUER (HEIN ET AL. 2014B)
88	7-30	ILLUSTRATION DER MITTLEREN (MITTELUNGSGRÖÖE: 1 WOCHE) WINDRICHTUNG (A), WINDGESCHWINDIGKEIT (B), UND SIGNIFIKANTEN WELLENHÖHE (C) FÜR DEN PEGEL LT ALTE WESER. DIE SCHATTIERTEN BEREICHE ZEIGEN DIE STANDARDABWEICHUNG
89	7-31	VERÄNDERUNG DER ÜBERSCHREITUNGSWAHRSCHEINLICHKEIT VON WINDGESCHWINDIGKEIT UND SIGNIFIKANTER WELLENHÖHE
90	7-32	MAXIMALE SIGNIFIKANTE WELLENHÖHEN IN DER UNTERELBE IM TESTGEBIET WISCHHAVEN (HEIN ET AL. 2013G)
96	10-1	ANPASSUNGSKREISLAUF

1 Kurzfassung

Im Forschungsprogramm KLIWAS werden von der Arbeitsgruppe Küstenhydrologie der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) historische, gegenwärtige und zukünftige Tidekennwerte (*Tidemittelwasser* (Tmw), *Tidehochwasser* (Thw), *Tideniedrigwasser* (Tnw), *Tidehub* (Thb), *Flutdauer* (Tf) und *Ebbdauer* (Te) und Seegangparameter (*Wellenhöhen*, Wellenperioden) in Küstennähe und in den Nordseeästuaren statistisch untersucht. Die Ergebnisse sind einerseits für die Sicherheit und Leichtigkeit in der Schifffahrt, hier beispielsweise für die Anpassung der Tidefahrpläne, andererseits für weitergehende Forschungen zum Sedimenttransport und zur Ökologie notwendig.

Unter Nutzung des Klimawandelszenariens A1B des IPCC wird die *zukünftige* Entwicklung der Statistik der Tidekennwerte im Küstenbereich und in den Ästuaren (Elbe) untersucht. Dazu wird eine Modellkette ausgehend vom Globalmodell für die Atmosphäre und den Ozean bis zu Regionalmodellen für die Ästuare genutzt. Im Projekt wird konsequent der Weg von dem vom IPCC prognostizierten globalen Meeresspiegelanstieg bis zu den Tidekennwerten an der Küste der Deutschen Bucht eingeschlagen.

Es liegt zum ersten Mal ein numerisches Modellsystem vor, welches in der Lage ist mit hinreichender Genauigkeit die physikalischen Prozesse an der Küste auf Zeitspannen von Dekaden abzubilden. Da das Ziel des Projektes die Untersuchungen zu Tidekennwerten ist wurden im Unterschied zu üblichen regionalen Klimamodellierungen die Gezeiten mitberechnet. Es liegt so erstmals für eine Modellierungsperiode von 150 Jahren ein Datensatz von Wasserstand und Strömungen in 10-minütiger Auflösung vor.

Die Untersuchungen starten mit historischen Messungen. Diese Daten werden qualitativ gesichert, insbesondere da die Anforderung an die Qualität der Messwerte für die Analyse von Auswirkungen des Klimawandels besonders hoch ist; es ist z.B. die Homogenität der Daten festzustellen. Mögliche Unsicherheiten werden dokumentiert

und Verfahren zur automatischen Qualitätssicherung werden weiterentwickelt (Hein et al., 2010a), Jennings et al. (2012a, b, c). Testweise wurden historische Pegelmesswerte digitalisiert. Nach Beendigung von KLIWAS wird im Projekt „Pegeldigitalisierung“ nach Möglichkeiten gesucht die Digitalisierung von Pegelbögen möglichst automatisiert und qualitätsgesichert zu unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu operationalisieren.

Die Digitalisierung historischer Pegelmesswerte ist eine mögliche Methode um Unsicherheiten zu bestimmen (Hein et al., 2012a) und ein vertieftes Prozessverständnis herbeizuführen. Zum ersten Mal ist die Modellkette bis in die Ästuar (insbesondere Elbe-Ästuar) heruntergebrochen worden (Hein et al. 2013b, c, d; Hein et al. 2012a, d).

In der südlichen Deutschen Bucht betrug in den vergangenen 100 Jahren der mittlere Anstieg des mittleren Tmw 1,1 mm/Jahr bis 1,9 mm/Jahr - ohne den Einfluss von Landsenkungen. Nimmt man den Einfluss von Landsenkungen hinzu liegt dieser Wert bei 1,6 mm/Jahr bis 2,9 mm/Jahr. Die regionale historische Änderung des Tmw (ohne Landsenkung) fällt geringer aus als der globale historische Meeresspiegelanstieg. Für den Anstieg des mittleren Tmw in der südlichen Deutschen Bucht gilt: Eine Beschleunigung innerhalb der letzten 100 Jahre ist nicht nachweisbar (Hein et al., 2011a).

Bei regionaler Betrachtung ist die Variabilität der Wasserstände auf verschiedenen Zeitskalen mit einzubeziehen. Zeitreihen der gemessenen Tidewasserstände zeigen Variabilität, bzw. Periodizität in kurzen und langen Zeitskalen (Hein et al., 2011a, b, e; Dangendorf et al. 2012). Neben der Saisonalität überlagern sich die Nordatlantischen Oszillation mit einer Periodizität von etwa 4 Jahre bis 7 Jahren, die Nodaltide mit etwa 19 Jahren, dazu Auswirkungen der Schwankungen der Sonnenaktivität in Zeitspannen von 22 Jahren und eine 35-jährige Periodizität. Auch längere Periodizität im Zeitbereich von 60 bis etwa 80 Jahren kann nachgewiesen werden. Die Variabilität zusammen ist stärker als das klimabedingte Änderungsverhalten.

„Sea level is not level“ – der Meeresspiegel ist keine Ebene wird von Gehrels und Long (2008) festgestellt. Daraus folgt für die Tidekennwerte, dass sich keine allge-

meingültigen *flächenhaften* Aussagen zu möglichen Veränderungen durch den Klimawandel treffen lassen. *Vielmehr muss zukünftig projektbezogen eine individuelle Betrachtung erfolgen.*

Die einzelnen Tidekennwerte entwickeln sich anders als der regionale Meeresspiegel (Tmw). Flächendeckende Untersuchungen der historischen Änderungen der Partialtiden sind derzeit schwierig, da hochauflösende Wasserstandsaufzeichnungen meistens nur auf analogen Pegelbögen vorliegen.

Das Thw ist bei den meisten Pegelstandorten in der Deutschen Bucht stärker angestiegen als das Tmw - beim Tnw ist dieses meistens umgekehrt. Daraus folgt eine allgemeine Zunahme des Thb. Je nach Standort verlängert sich die Flutdauer und verkürzt sich die Ebbdauer (z. B. Pegel Bremerhaven und Emden) - oder umgekehrt (z. B. Pegel Büsum und Cuxhaven). Durch den Anstieg des Tmw verkürzt sich die Laufzeit der Tidewelle. Gegenläufige Trends bei einigen Pegeln zeigen aber eine Verformung der Tidekurve durch Änderungen der Partialtiden.

Für belastbare Aussagen über Veränderungen der Tidekennwerte ist immer mindestens ein Nodaltidezyklus (18,61 Jahre) einzubeziehen. Dieses gilt für alle Veränderung der hydrologischen Systeme der Küste und Ästuare der deutschen Bucht. Wegen der 19 jährlichen Nodaltide wird für diese Analysen eine Zeitspanne für die nahe Zukunft auf 2031 bis 2050 und eine Zeitspanne für die ferne Zukunft auf 2081 bis 2100 festgelegt. Eine Festlegung auf 30 Jahre wie dieses für den Binnenbereich erfolgt ist, würde an der Küste nicht der guten wissenschaftlichen Praxis (Baart et al. 2012a,b) entsprechen.

Die Wertebereiche der zukünftigen Änderung des Tmw lassen sich mittels des zugrundeliegenden IPCC Report (IPCC, 2007) abschätzen. Dieser geht begründet von einer zukünftigen Beschleunigung der Meeresspiegelanstieges aus. Typischerweise werden hier *ca. 20 cm bis 60 cm Anstieg des globalen Meeresspiegels bis in die ferne Zukunft* im gängigen A1B Szenario (IPCC, 2007) genannt. Selbst diese breite Spannweite der zukünftigen Änderung ist unsicher. Ein höherer Anstieg des Tidemittelwassers ist nicht auszuschließen. Derzeit wird vom IPCC (AR5, IPCC 2013) ein höherer Anstieg als unwahrscheinlich, aber als nicht auszuschließen eingeschätzt.

Ergebnisse der Modellkette zeigen für die Zukunft eine verstärkte Änderung der Partialtiden und somit eine weitere räumlich inhomogene Änderung der Tidekennwerte (Hein et al., 2014). Die Modellkette zeigt, dass das Thw auch in Zukunft stärker als das Tmw ansteigt. Beim Tnw ist dieses auch in der Zukunft meistens umgekehrt. Daraus folgt eine allgemeine Zunahme des Thb.

Es kann gezeigt werden, dass der Anstieg des Tidenhubes durch eine Veränderung der Gezeiten bedingt ist. So nimmt zum Beispiel die in der Deutschen Bucht dominante M2-Gezeit um etwa 3 % bis 6 %, etwa den Betrag des Nodaltidezyklus, zu. Durch eine Änderung des Verhaltens der Tidewelle im Elbe Ästuar verlagern sich möglicherweise die Maxima des Tidenhubes. Dieses kann sich auf die Salzgehalte, die Trübungszone und die Ökologie im Ästuar auswirken.

Mittels Transferfunktionen zwischen Wellenmessungen oder Modellrechnungen, Windmessungen und der Modellkette lässt sich ein Einfluss der Klimaänderung auf das Wellengeschehen hinreichend genau abbilden (Rütten et al., 2013; Rütten et al., 2013; Mai et al., 2013). Es liegen nur wenige kontinuierliche Seegangsmessungen vor. Derzeitige Formeln zur Bemessung von Seebauwerken auf Seegang unterschätzen zum Teil die bemessungsrelevante Wellenhöhe (Mai et al., 2010). In den inneren Ästuaren sind für die *Zukunft keine signifikanten Änderungen bei der Statistik des Seegangs nachzuweisen*.

„Wenn es Verdacht gibt, dass sich der Kurs der Natur ändert, und dass die Vergangenheit keine Regel für die Zukunft ist, dann wird die ganze Erfahrung nutzlos und die historischen Erfahrungen lassen keine Schlüsse für die Zukunft zu.“ Dieser Satz entstammt der Erkenntnistheorie von Hume (1758) hat aber insbesondere heute, da wir bei der Klimafolgenforschung die Zukunft „schätzen“, noch immer Bedeutung. Deshalb bedeutet ein verantwortungsbewusster Umgang mit Klimafolgenforschung:

Die Anpassung der Küstenregion an den möglichen Klimawandel verlangt eine un-aufgeregte aber kontinuierliche, wissenschaftliche und küstenhydrologische Begut-achtung. Der mögliche Klimawandel ist als Teil eines küstenhydrologischen Gesamtsystems zu verstehen. Es ist notwendig ein besseres regionales küstenhydrologisches Prozessverständnis herbeizuführen. Heutige Abschätzungen der Veränderungen so-

wie zukünftige Messwerte und Klimamodelle (Modellketten) sind in den nächsten Jahren und Dekaden kontinuierlich zu verifizieren und zu analysieren.

Klimabedingt
veränderte
Tidekennwerte
und Seegang-
statistik in den
Küstengewässern

2 Ziele

Ziel dieses Projektes ist es, stochastische Aussagen zu eingetretenen und erwarteten Veränderungen der Wasserstände (Tidekennwerte) und Wellenhöhen (Seegangparameter) zu treffen. Dabei werden historische, aktuelle und zukünftige küstennahe und ästuarine hydrologisch-physikalische Charakteristika und Prozesse untersucht. Unter Berücksichtigung von Unsicherheiten wird die Variabilität des hydrologisch-physikalischen Systems, insbesondere in Relation zum Klimawandel, analysiert. Es soll sowohl die Entwicklung der vergangenen Jahre besser verstanden werden, als auch wahrscheinliche Projektionen der zukünftigen Entwicklung analysiert werden.

Bezüglich der Tidekennwerte werden insbesondere die Statistik von Tidehochwasser, Tideniedrigwasser, Tidemittelwasser, Tidehub, Flutdauer und Ebbdauer analysiert. Dazu werden die historische zeitliche Entwicklung und Variabilität der letzten Dekaden mit Pegelmessungen, die um den Einfluss rezenter Krustenbewegungen (siehe PJ 2.02) korrigiert sind, quantifiziert. Auf diese Weise lässt sich eine möglicherweise bereits jetzt messbare systematische Veränderung der Tidekennwerte quantifizieren und ein Status Quo kann abgeleitet werden.

Unter Berücksichtigung der aleatorischen Unsicherheiten auf Zeitskalen von Monaten bis Dekaden (Stichwort: Nodaltide, NAO) sollen auf Grundlage von hydrodynamischen Simulationen Aussagen über eine probabilistische zukünftige Entwicklung der Tidekennwerte im Küstenbereich und in den Ästuare getroffen werden. Numerische Modelle ermitteln dabei die örtlichen charakteristischen Wahrscheinlichkeitsdichten des hydrologischen Parameters auf Basis einer hinreichend langen Zeitspanne, die den typischen Verhältnissen am Bezugsort gerecht wird.

Bezüglich der Seegangparameter ist es das Ziel dieses Projektes, die Veränderungen in der Statistik der Wellenhöhen und Wellenperioden im Küstenbereich der Nordsee sowie in den Ästuaren unter Angabe von Unsicherheiten zu quantifizieren. Dazu wird auch geprüft, ob vorliegende Seegangsmessungen im Küstengebiet Aussagen hinsichtlich einer möglicherweise bereits eingetretenen Änderung der Seegangstatistik

zulassen. Auch hier ermitteln numerische Modelle die örtlichen charakteristischen Wahrscheinlichkeitsdichten des Seegangs auf Basis einer hinreichend langen Bezugszeitspanne, der die typischen Verhältnisse am Bezugsort widerspiegelt.

Klimabedingt
veränderte
Tidekennwerte
und Seegangs-
statistik in den
Küstengewässern

3 Stand der Forschung

Der globale historische Meeresspiegelanstieg im letzten Jahrhundert oft thematisiert worden (Ablain et al, 2009; Beckley et al., 2007; Berge-Nguyen et al., 2008; Cabanes et al., 2001; Cazenave and Nerem 2004; Cazenave et al., 2009; Cazenave and Llovel, 2010; Chambers et al., 2002; Chambers, 2006; Church et al. 2004; Church and White, 2006; Douglas, 2001; Douglas und Peltier, 2002; Domingues et al., 2008; Grinsted et al., 2007; Holgate and Woodworth, 2004; Holgate; 2007; Jevrejeva et al, 2006; Jevrejeva et al, 2008; Leuliette et al., 2004; Leuliette et al., 2009; Llovel et al., 2009; Lombard et al., 2009; Milne et al., 2009; Peltier, 2009; Plag, 2009; Willis et al., 2008; Woodworth et al., 2009 a, b). Die Bestimmung des langjährigen Trends des Meeresspiegelanstiegs ist demnach keine triviale Aufgabe ist - vielmehr ist es notwendig langjährige Messungen hinsichtlich ihrer epistemischen und aleatorischen Unsicherheiten zu bewerten und daraus einen robusten Trend zu ermitteln.

Für den globalen Meeresspiegel ist ein Anstieg von $1,7 \pm 0,3$ mm pro Jahr (Church, White, 2006) im letzten Jahrhundert messtechnisch ermittelt und Konsens in der wissenschaftlichen Gemeinschaft. Es wird eine Zunahme des Anstiegs seit Ende des Letzten Jahrhunderts (ca. 1990) vermutet, diese ist aber derzeit vor allen auf Grund der räumlichen und zeitlichen Variabilität umstritten. Bei der Suche nach Ursachen des globalen Anstiegs ist immer noch keine einheitliche Erklärung gefunden, zu weit klaffen die Untersuchungen der funktionalen Änderungen mit denen der Messungen auseinander. Das von Munk (2002) so formulierte Rätsel des Meeresspiegelanstiegs hat Bestand.

Wenn nun der regionale Meeresspiegelanstieg betrachtet werden soll wird die Thematik noch um einiges komplexer. Die Analyse der langjährigen Variabilität der Nordsee und der deutschen Küste ist seit Jahren Gegenstand von Wissenschaft und Forschung (Exemplarisch: Weisse und Plüß, 2006; Luyten et al., 2003, Pohlmann 2006, Janssen et al., 1999, Soares et al.2002, Lamb und Weiss,1979). Die Geschichte der Nordseesimulation kann bei Lenhart und Pohlmann (2004) nachgelesen werden. Zu-

sätzlich ist der Einfluss der Atlantik-Region auf die Nordsee Inhalt mehrerer Untersuchungen (Exemplarisch: Pingree, 2005; Klein et al. 2007; Leterme et al., 2008; Tsimplis et al., 2006). Des Weiteren liegen eine Reihe von Untersuchungen von langfristigen historischen Trends in den Tidekennwerten der Pegel im deutschen Küstengebiet vor (Blasi und Jensen, 2001a/b; Jensen et al., 2001; Jensen und Mudersbach, 2004; Jensen et al 2008a, b; Wahl et al, 2008, 2010, 2011). Erste Überlegungen zu Auswirkungen auf die Tidedynamik liegen vor (Duwe, 2000; Plüß, 2004).

Es wird u.a. vermutet, dass Extreme häufiger eintreten (von Storch et al., 1997a, b, 1998), sich also die Form der statistischen Verteilung von Tidehochwasser (Thw), Tideniedrigwasser (Tnw), Tidehub (Thb) sowie Tidehalbwasser ($T_{1/2w}$) ändert. Eine Veränderung von Thw, Tnw und Thb verändert das zeitliche Tidegeschehen: z.B. Veränderungen von Ebbe- (TE), Flutdauer (TF) und die Phasenbeziehung zwischen einzelnen Pegeln (Duwe, 2000). Eine Variation von physikalischen Parametern in der Nordsee auf Zeitskalen von Monaten bis zu Dekaden ist nachgewiesen (Pingree, 2005; Leterme, 2008, Tsimplis et al., 2006).

Untersuchungen deuten auf ein stark von aleatorischen Unsicherheiten geprägtes System hin, eine instationäre Änderung des physikalisch-hydrologischen Systems ist wahrscheinlich, dieses kann bei probabilistischen Aussagen über zukünftige Zustände nicht ignoriert werden (Hein, 2010). Deshalb sind komplexe stochastische Filterverfahren notwendig, wie z.B. das „Monte-Carlo autoregressive padding“ (Wahl et al., 2010), um einen langjährigen nicht-linearen Trend zu bestimmen.

Stand der Forschung ist es, exakte und absolute Georeferenzierungen der Pegelnullpunkte (insbesondere deren Höhenlagen) zu bestimmen, so dass eine exakte und absolute Georeferenzierung der Wasserstände zu jedem beliebigen Zeitpunkt innerhalb der Aufzeichnungsdauer der Wasserstandssensoren ermöglicht wird. Hinzu kommt die möglichst exakte Bestimmung der tektonisch bzw. anthropogen bedingten Krustenbewegungen. Beides ist international der Stand der Forschung (Altamimi et al., 2002; Baker et al. 1997; Blewitt et al. 2006; Bosch et al., 1999; Schoene, 2006; Teferle, 2006; Wöppelmann, 2007a, b; Zerbini et al., 1996). Die Bestimmung der Pegelnullpunkte und der Landsenkung ist Teil des Forschungsvorhabens KLIWAS (P2.02).

Die so in der Studie von Jennings und Schüttrumpf (2012) ermittelten Anstiege der Tidekennwerte werden in Tabelle 3-1: Gegenüberstellung der Prognosen zum Meeresspiegelanstieg verschiedener Autoren (aus: Jennings und Schüttrumpf, 2012) zusammengefasst.

**Tabelle 3-1:Gegenüberstellung der Prognosen zum Meeresspiegelanstieg verschiedener Autoren
(aus: Jennings und Schüttrumpf, 2012)**

Autor/Quelle	Prognose	Anstieg/Trend
JENSEN UND MUDERS- BACH (2004)	MThw-Anstieg	5 – 10 cm(bis 2020)
	MTmw-Anstieg	3 cm(bis 2020)
MAX-PLANCK (2006)	MTMW, Nordsee	50 cm (bis 2100)
KNMI (2006)	Global thermische Expansion	20,2 – 45,5 cm (bis 2100)
	Gletscher	4,3 – 14,5 cm (bis 2100)
	Grönländisches und antarktisches Eisschild	-0,3 – 32,9 cm (bis 2100)
	MTMW-Anstieg	34,9 – 84,0 cm (bis 2100)
HOFSTEDDE (2007)	Erhöhung der Anstiegsrate in einigen Jahrzehnten	30 – 50 cm (pro 100 Jahre)
RAHMSTORF (2007b)	MTMW-Anstieg durch Landsenkung	10 – 20 cm (bis 2100)
	MTMW-Anstieg durch Abschwächung des Nordatlantikstroms	10 - 20 cm (bis 2100)

Autor/Quelle	Prognose	Anstieg/Trend
	MTMW Anstieg	bis 200 cm (bis 2100)
STERR (2008)	MTMW-Anstieg	60 cm (bis 2100)
KATSMAN ET AL. (2008)	MTMW-Anstieg	30 – 80 cm (bis 2100)
DELTACOMMISSIE (2008)	Global thermische Expansion	12 – 49 cm (bis 2100)
	Regional thermische Expansion	-5 – 20 cm (bis 2100)
	Gletscher	7 - 18 cm (bis 2100)
	Antarktisches Eisschild	-1 - 41 cm (bis 2100)
	Grönländisches Eisschild	13 - 22 cm (bis 2100)
	Maximaler MTMW-Anstieg	65 - 130 cm (bis 2100)
KUHLBRODT ET AL. (2009)	MTMW-Anstieg durch Änderung der thermohalinen Zirkulation	80 cm (bis 2100)

Es wird eine Zunahme des Anstiegs seit Ende des letzten Jahrhunderts (ca. 1990) vermutet, diese ist aber derzeit vor allen auf Grund der räumlichen und zeitlichen Variabilität umstritten. Bei der Suche nach Ursachen des globalen Anstiegs ist immer noch keine einheitliche Erklärung gefunden, zu weit klaffen die Untersuchungen der funktionalen Änderungen mit denen der Messungen auseinander.

Das Vorhaben ist durch drei Thematiken geprägt: Zunächst einmal rein inhaltlich die wissenschaftlichen Kenntnisse über das Langzeitverhalten der Nordseeästuarie. Dazu gibt es zwei technische Fragestellungen, die der offenen Randbedingungen für ästuarine hydro-numerische Modelle und die Optimierung von Modellen für Langzeitläufe.

Die Analyse der langjährigen Variabilität der Nordsee ist seit Jahren Gegenstand von Wissenschaft und Forschung. Einfluss der Unsicherheiten der Modellketten auf die Statistik von Sturmereignissen wurden untersucht (Woth, 2005, Woth et al. 2006).

Zusammenfassend kann der Stand der Forschung der klimatischen Entwicklung der physikalisch-hydrologischen Parameter der Nordsee folgendermaßen beschrieben werden:

- Anstieg des mittleren Meeresspiegel in der Größenordnung des globalen Meeresspiegelanstiegs.
- interanuale Variabilität der Tidekennwerte in Größenordnung des Trends
- Erhöhung der Gezeitendynamik.
- Eine signifikante Variation von physikalischen Parametern in der Nordsee auf Zeitskalen von Monaten bis zu Dekaden ist nachgewiesen (z.B. Einfluss der Nordatlantischen Oszillation).
- Mögliche Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation, z.B. Intensivierung von Westwindlagen.
- Es wird erwartet, dass Extremereignisse häufiger eintreten.

Die hydro-numerische Modellierung von Ästuaren ist vor allem aufgrund der Randbedingungsproblematik immer noch in der Entwicklung. Die Formulierung dieser offenen Randbedingungen ist von fundamentaler Bedeutung für hochaufgelöste Modelle, die über hinreichend lange Zeit betrieben werden. Hierbei wurden im Normalfall an den offenen Rändern Klimatologien vorgeschrieben (Pohlmann, 1996a), in denen Schwankungen naturgemäß nicht enthalten sind.

Bei der Verwendung zeitlich abhängiger Daten (z.B. Schrum und Backhaus, 1999) tritt das Problem auf, dass diese oft nur lückenhaft vorliegen (Janssen et al., 1999). Die Formulierung von offenen Randbedingungen ist seit längerem ein wissenschaftlich hochinteressantes und ungelöstes Problem. Wie Bennett (1992) bereits dargelegt hat, liegt bei der Festlegung von offenen Randbedingungen ein fundamental unterbestimmtes, mathematisches Problem des zugrundeliegenden dynamischen Modellsystems vor. Weiterhin liegen oft ungenügende Informationen darüber vor, welche Eigenschaften von außen über die offenen Ränder in das Modellgebiet hinein propagieren.

Ein Ausweg ist die Verknüpfung („Nesting“) von Modellen von groben aufgelösten beckenweiten Modellen mit hochauflösenden regionalen Küstenmodellen, d.h. das Bilden von Modellketten. Ein solches Verfahren wird u.a. vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie durchgeführt (Kleine, 1994; Dick et al., 2001). Das verwendete Modell ist dabei numerisch ähnlich aufgebaut, wie das in diesem Vorhaben verwendete Modell. Eine HAMSOM-Modellkette wurde im Ästuar des Río de la Plata Simionato et al. (2004) erfolgreich umgesetzt. Einige neuere Untersuchungen (z.B. Nicolle, 2009; Pleskachevsky et al., 2009) haben gezeigt, dass Simulationen von hydro-numerischen Küstenmodellen unter Einbeziehung von Seegang zu erheblichen Verkleinerung von Unsicherheiten der zu ermittelnden Wasserstände führen kann.

Untersuchungen von Schrum et al. (2003) zeigen, dass eine hohe Empfindlichkeit der Wasserstände, insbesondere bei kurzfristigen Schwankungen, bei Verwendung von regionalisierten atmosphärischen Antriebsdaten gefunden werden kann. Schrum et al. (2003) finden jedoch keine Unterschiede in der Reaktion der Wasserstände zwischen der gekoppelten und ungekoppelten Regionalisierung. Es kann deshalb zunächst davon ausgegangen werden, dass für die Modellierung von Wasserständen eine Kopplung der Regionalmodelle nicht notwendig ist.

Es muss festgestellt werden, dass bis Ende 2012 auf langen Zeitskalen keine gekoppelten regionalen Ozean-Atmosphäre Modelle (GROAM) für die Nordsee vorlagen. Aus einem Testlauf (1 Jahr) ist zu entnehmen, dass sowohl die Modellkopplung als auch die Regionalisierung sich auf die modellierten Oberflächentemperaturen der Nordsee auswirken (Schrum et al., 2001, 2003). Von Langzeitläufen zur Ostsee ist

bekannt, „dass regionale Rückkopplungen zwischen Ozean und Atmosphäre in dem gekoppelten System nicht zu erwarten sind“ (Kjellström et al., 2005).

Für das indonesische Seegebiet hat Aldrian et al. (2005) festgestellt, dass die Unsicherheiten bei der Modellierung der Transporte der Wassermassen durch die Verwendung von GROAM sich sogar vergrößern. Weisse und Feser (2003) zeigen für einen „Hindcast“, dass die eine Berücksichtigung der großräumigen Skalen aus den globalen Modellen bei der Regionalisierung der Nordsee zu einer Verbesserung der Genauigkeiten führt.

Um klimatische Veränderungen simulieren zu können, müssen die Simulationsläufe eine so lange Zeitspanne abdecken, dass diese den typischen Verhältnissen am Bezugsort gerecht wird. Da die Tidekennwerte erheblichen interanuale Schwankungen ausgesetzt sind, müssen die Modellläufe mehrere Jahre umfassen. Sowohl die Nodal-tide (Jensen und Mudersbach, 2004), mit einer Frequenz von 18.6 Jahren, als auch die Nordatlantische Oszillation (NAO; Hurrell, 1995; Hurrell und Dickson, 2004) überlagern das Klimasignal.

Um die historische Entwicklung der Wasserstände abschätzen zu können und einen Status Quo herzuleiten, werden lange Zeitreihen von Tidekennwerten ausgesuchter Pegel mittels aktueller stochastischer Analysemethoden untersucht. Dabei werden vor allem Techniken eingesetzt, die es ermöglichen, langfristige (natürliche) Schwankungen zu separieren. Um die Charakteristik zu verstehen, werden mathematische Verfahren eingesetzt, die spektrale Eigenschaften zeitabhängig darstellen können. Derzeit besteht in der Klimafolgenforschung eine Dynamik, bei der Methodiken ständig verfeinert werden. Deshalb ist eine wesentliche Grundlage der Methodik des Projektes 2.03 die ständige Weiterentwicklung der Werkzeuge unter Berücksichtigung des Standes der internationalen Forschung.

4 Methoden

4.1 Pegelmessungen

4.1.1 Datengrundlage und Qualitätssicherung

Grundlage der Untersuchungen der Veränderung des Meeresspiegels sind die Messdaten der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (www.wsv.de) und deren Vorgängerorganisationen. Es liegen Zeitreihen von Tidehochwasser (Thw) und Tide-niedrigwasser (Tnw) von teilweise mehr als hundert Jahren vor. Diese Datensätze gehören weltweit zu den dichtesten, die den Klimawandel inklusive der räumlich dif-ferenzierten sich verändernden Prozesse dokumentieren. Die Definition der Tide-kennwerte wird in DIN 4049-3 (1994) umgehend beschrieben.

Ein kleiner Teil dieser Daten bilden eine anteilige Grundlage der Publikationen zum Thema Meeresspiegelanstieg sowohl für globale als auch regionale Untersuchungen. Die Daten sind auch in die Reporte des IPCC mit eingeflossen. Dieses zeigt die be-sondere Bedeutung der Qualitätssicherung dieser Daten.

In der Zusammenarbeit mit 2.02 werden die Unsicherheiten von Pegelmessungen und deren Bezug zur festen Oberfläche (Sudau und Weiß, 2008a, b) untersucht. Es wird auf die Frage nach der Definierbarkeit des hydrologischen Systems und damit auch der Tidekennwerte eingegangen. Es werden stochastische Untersuchungen zur Signi-fikanz von Veränderungen durchgeführt.

Auf der jüngsten Sitzung der GLOSS Group of Experts (7-11 November 2011, Paris) wurde die Bedeutung der Rettung von Pegeldaten, die derzeit in Nicht-Computer-Form (Grafiken, Tabellen, etc.) gespeichert werden herausgehoben. Der Arbeitsbe-reich der Küstenhydrologie im Referat M1 der BfG hat sich dem Thema angenom-men und testweise 100 Jahre Pegelmessungen digitalisieren lassen.

Im Projekt „AuTiBe“ werden neue automatisierte und objektivierte Verfahren zur Bestimmung der Tidekennwerte entwickelt. KLIWAS 2.03 ist in dieses Projekt involviert und hat die entwickelten Methoden zum Qualitätsmanagement eingesetzt.

Durch die Vernetzung mit Universitäten ist gewährleistet, dass das Werkzeugspektrum dem Stand der Forschung entspricht. Bei der Auswertung von Zeitreihen kommen immer komplexere und verfeinerte Verfahren zum Einsatz: Beispielsweise verschiedene Bandpassfilter, Analysen mit Wavelettransformationen und auf der Analyse substantieller Eigenvektoren räumlicher und zeitlicher Autokorrelation basierende Verfahren.

Die Plausibilisierung kann in unterschiedlichen Schritten erfolgen. Grundsätzlich ist die Plausibilisierung von der Verfügbarkeit einzelner Datensätze abhängig. In einer Studie der Universität Siegen (Jensen et al., 2012) wird auf sechs unterschiedliche Fehlerarten hingewiesen. Fehler erster Art werden angegeben, wenn eine Tide eine außergewöhnliche Flut- oder Ebbdauer aufweist.

Fehler zweiter Art beinhalten solche Stellen in der Wasserstandsganglinie, welche durch eine besonders starke Steigung in Erscheinung treten (z.B. Unstetigkeit). In einer dritten Gruppe werden all jene Stellen zusammengefasst, an denen ein Wasserstand über einen definierten Zeitraum einen konstanten, unveränderlichen Wert annimmt.

Bei den Fehlern vierter Art wird überprüft, ob die Tidekurve einem außergewöhnlich streng linearen Verlauf folgt, während Fehler fünfter und sechster Art Stellen kennzeichnen, an denen ein zuvor aus den digitalisierten Daten selbst errechneter Scheitelwert stark in vertikaler/horizontaler Ausrichtung vom amtlichen Messwert abweicht.

Da in der Studie der Universität Siegen jeder Wert einzeln überprüft wird, können recht hohe Fehlerzahlen entstehen. Diese Fehler resultieren überwiegend aus fehlerhaften Aufzeichnungen des Pegels über einen längeren Zeitraum. Daher werden die detektierten Fehler unabhängig von ihrer Herkunft bzw. Fehlerart in Fehlerbereiche zusammengefasst, um die anschließende händische Überprüfung zu erleichtern. Ein

Fehler wird als unabhängig von den umliegenden Fehlern angesehen, wenn mindestens 4 vollständige Tiden zwischen ihnen liegen.

Es wird auf die Herausforderung der Variabilität Skalenproblem in der Küstenhydrologie eingegangen. Mit diesen Weiterentwicklungen sollen vor allem objektivere Aussagen zum Beschleunigungsverhalten von Trends in Zeitreihen möglich werden. Dadurch kann wiederum die Unsicherheit von zukünftigen Trends reduziert werden.

4.1.2 Ermittlung von Trends

Die Ermittlung der Trends von Tidekennwerten ist auf verschiedene Art und Weise möglich. Am gebräuchlichsten ist die Methode der linearen Regression, welche auf Basis von der Minimierung des quadratischen Abstands von Daten und Trend arbeitet. Diese hat den Vorteil der mathematischen Einfachheit. Der Nachteil ist jedoch, dass lineare Regressionsverfahren eine Normalverteilung nach Gauß und weißes Rauschen als *notwendige* Bedingung an den Datensatz stellen. Anders beim Modalverfahren, hier werden die Messwerte an eine Wahrscheinlichkeitsdichte (*PDF* aus dem Englischen kommend für *probability density function*) angepasst (Jenning et al. 2012a, b, c).

Durch dieses Verfahren ist es möglich den „wahrscheinlichsten“ Tidekennwert eines Jahres zu bestimmen. Der daraus resultierende Trend, vernachlässigt also den Einfluss der Extrema, es wird dann von einem robusten Trend gesprochen. Die Abbildung 4-1, die Abbildung 4-2 und die Abbildung 4-3 zeigen Beispiele des Verfahrens aus Jennings und Schüttrumpf (2012) für Thw, Tnw, Thb für den Beispielpegel Borkum Südstrand. Aus den Maximalwerten der PDF lässt sich Trend ableiten.

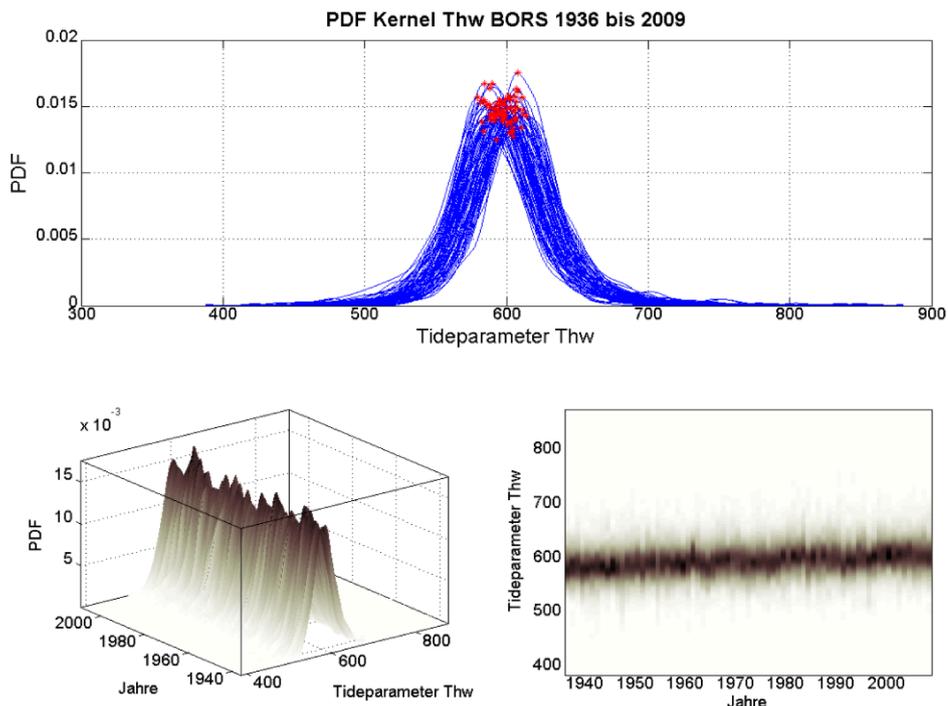


Abbildung 4-1 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen, jahresweise, Pegel BORS *Thw* 1936 bis 2009, (Jenning und Schüttrumpf, 2012).

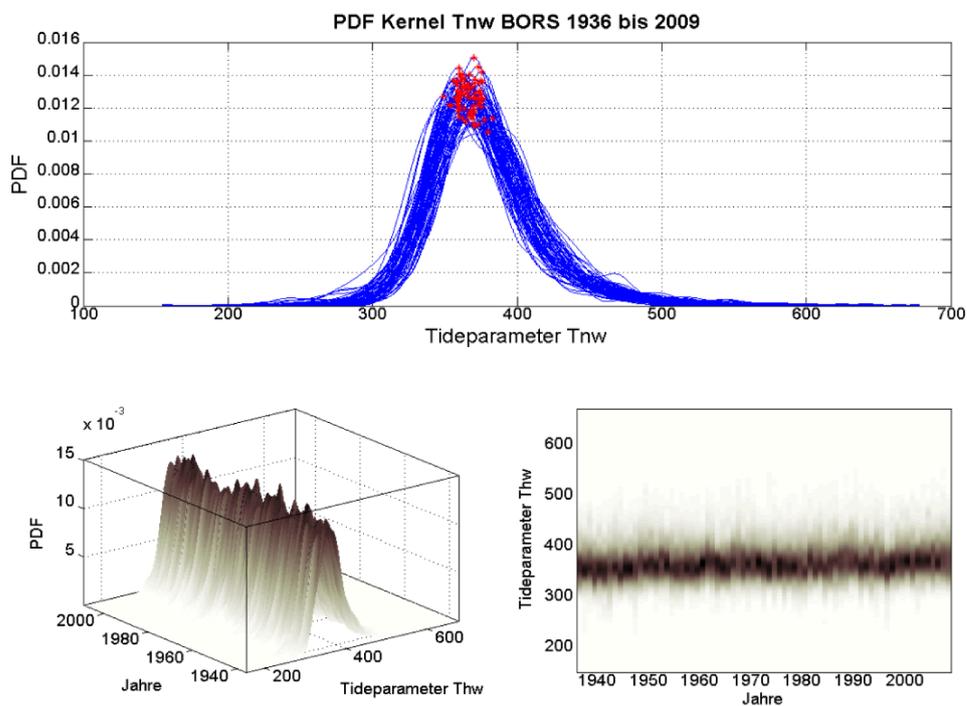


Abbildung 4-2: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen, jahresweise, Pegel BORS *Tnw* 1936 bis 2009, (Jenning und Schüttrumpf, 2012).

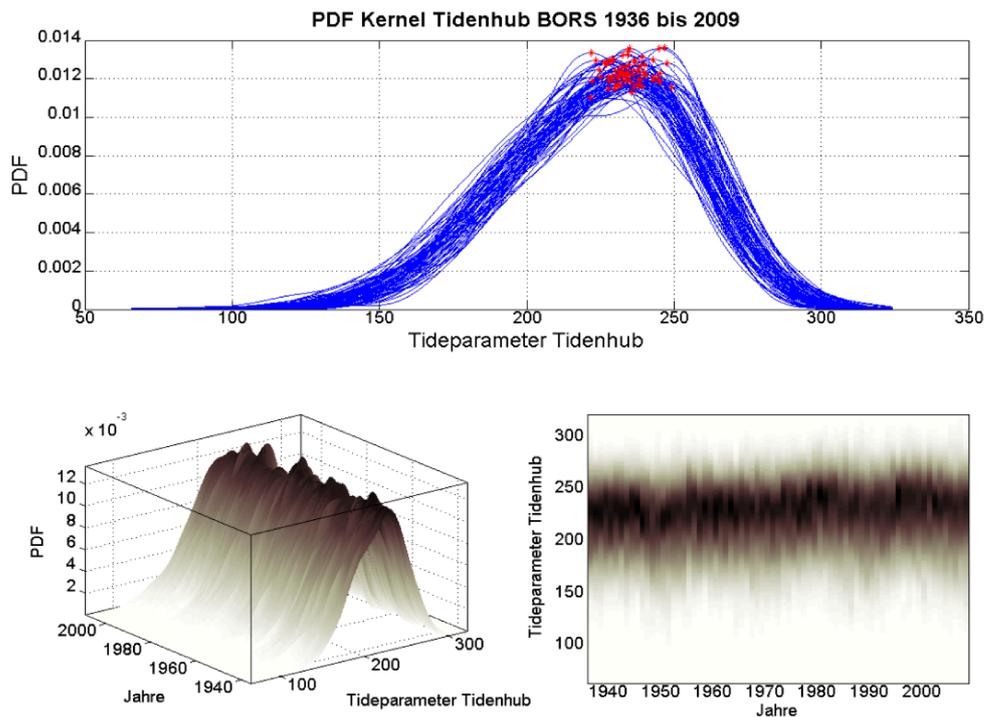


Abbildung 4-3: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen, jahresweise, Pegel BORS *Thb* 1936 bis 2009 (Jenning und Schüttrumpf, 2012).

Der Anstieg des regionalen Meeresspiegels in der Deutschen Bucht hat zwangsläufig zur Folge, dass sich die Kelvinwelle der Tide schneller fortbewegt, d.h. es kommt zu Phasenverschiebungen. Dieses ist in der Studie von Jennings und Schüttrumpf (2012) untersucht worden: In der Untersuchung wurden für gleiche Tidehoch- und Tideniedrigwasserzeitpunkte zeitliche Differenzen zu Nachbarpegeln gebildet. Die Differenz Δt wird dabei immer vom Pegel, an dem die Tidewelle zu einem späteren Zeitpunkt $t_{\text{Pegel spät}}$ eintrifft, zum früheren Pegel $t_{\text{Pegel früh}}$ gebildet:

$$\Delta t = t_{\text{Pegel spät}} - t_{\text{Pegel früh}}$$

Anschließend können diese Differenzen, welche für die Auswertung in Sekunden umgerechnet werden, analysiert werden. Es ist zu erwarten, dass sich die Differenzen zwischen den Eintrittszeiten verkürzen.

Die Untersuchungen verwendeten wiederum das zuvor beschriebene Modalverfahren, das heißt es werden die berechneten Differenzen wie vorher die Tideparameter anhand ihrer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen dargestellt.

Zuletzt erfolgt eine Untersuchung dieser Zeitreihen der Lagen der Brackwasserzone auf Bruchpunkte. Die Ergebnisse zeigen, dass in den unterschiedlichen Zeitreihen unterschiedliche Bruchpunkte detektiert werden, diese können jedoch in zeitliche Gruppen eingeteilt werden (Jenning et al. 2012a, b, c).

4.2 Beschreibung der Modellkette

Für die Berechnung zukünftiger Wasserstände und Strömungen an der deutschen Nordseeküste wurde die KLIWAS Modelkette angewendet (Abbildung 4-7). Diese musste für die Berechnung von Tidekennwerten an der Küste noch weiter verfeinert werden.

Das Ziel der Modellierung von Wasserständen ist hinreichend genau durch ein einseitig gekoppeltes Nordseemodell zu erreichen. Untersuchungen von Schrum et al. (2003) zeigen, dass eine hohe Empfindlichkeit der Wasserstände, insbesondere bei kurzfristigen Schwankungen, bei Verwendung von *regionalisierten* atmosphärischen Antriebsdaten gefunden werden kann. Schrum et al. (2003) finden jedoch *keine* Unterschiede in der Reaktion der Wasserstände zwischen der gekoppelten und ungekoppelten Regionalisierung.

Die Basis für die Berechnungen liefert eine Modellkette ausgehend vom A1B Szenario. Damit wird das gekoppelte globale Modellsystem ECHAM5 – MPIOM angetrieben. Für die Atmosphäre wird das Modell numerisch mittels Remo herunterskaliert. Somit stehen für die Modellläufe Randwerte zur Verfügung. Für den lateralen Rand des Nordseemodells stehen Daten aus dem globalen Modell MPIOM (Wasserstände, Temperatur, Salzgehalte) und für den atmosphärischen Antrieb die Daten aus Remo (Wind, Luftdruck, Globalstrahlung und Lufttemperatur) zur Verfügung.

Die Gezeiten - aus einem globalen Gezeitenmodell - und der Meeresspiegelanstieg wurden zusätzlich ergänzt. Die am Rand berechneten Gezeitenparameter bleiben über die gesamte Zeitspanne statisch. Dieses führt zu einer Idealisierung des Klimawandels, denn es ist davon auszugehen, dass durch den globalen Anstieg des Meeresspiegels sich auch die Gezeitenparameter ändern (vgl. Müller et al. 2011). Es gibt jedoch keine wissenschaftlichen Untersuchungen die den Betrag der Änderung im Bereich unser Modelränder quantifiziert.

Klimabedingt
veränderte
Tidekennwerte
und Seegangs-
statistik in den
Küstengewässern

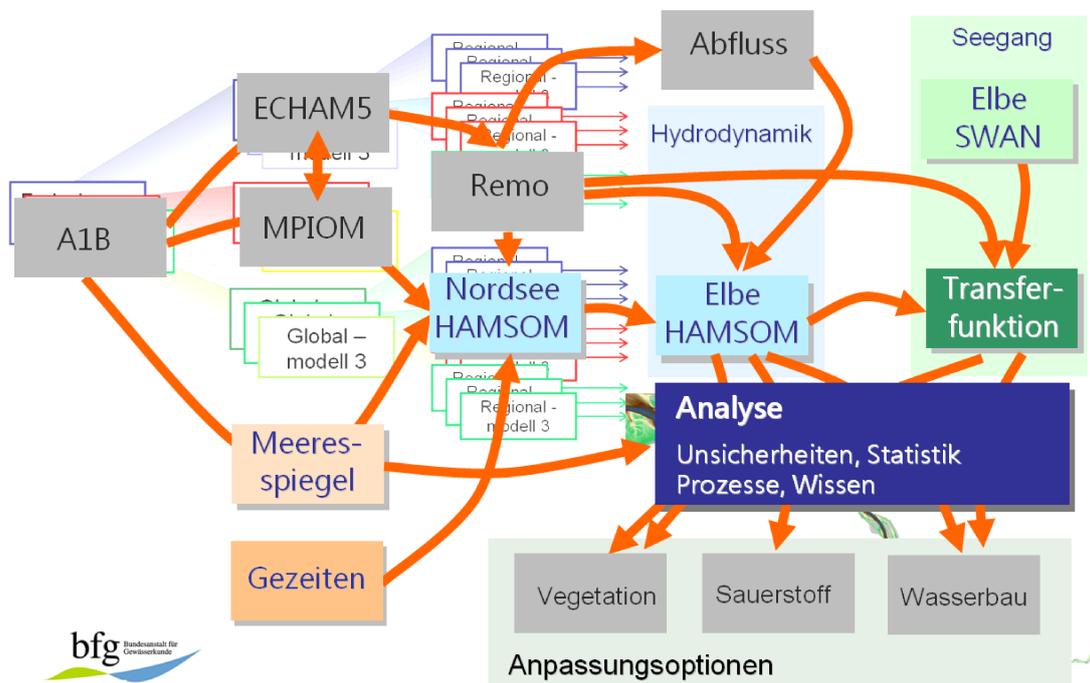


Abbildung 4-4: Grundlegendes des Konzepts zur Modellierung der Nordsee und des Elbeästuars in den Klimäläufen (Hein et al., 2013c, d).

Im Projekt 2.03 ist die Betroffenheit der Bundeswasserstrassen an der Nordseeküste hinsichtlich klimabedingter veränderter Seegangsparameter und Tidekennwerte abzuschätzen. Die große Spannweite des möglichen globalen Meeresspiegelanstieges ist in der Klimaforschung eine seit langem bekannte Größe, ein Grundsatz von KLIWAS ist es, diese Spannweite methodisch zu berücksichtigen.

Zusammen mit der globalen Veränderung des Meeresspiegels wirkt sich die regionale Dynamik, beispielweise repräsentiert durch die astronomischen Tiden oder den Windstau, auf die regionale Variabilität des Wasserstandes aus. Damit sind auch die regionalen Seegangparameter und Tidekennwerte beeinflusst.

Das Nordseemodell bietet eine hinreichende Auflösung von etwa 3 km (Abbildung 4-9) um die Veränderungen an der Küste der Deutschen Bucht abzuschätzen. Um Aussagen auch für die Ästuare treffen zu können wurden die Ergebnisse noch weiter herunterskaliert. Hierfür wurden Modelle für das Elbeästuar und für die Aussenems aufgebaut.

Klimaläufe konnten allerdings nur für die Elbe durchgeführt werden, da nur hierfür Abflüsse aus der Binnenhydrologie aus KLIWAS vorliegen (Nilson et al., 2014, Lingemann et al., 2012). Das Elbemodell hat somit das Alleinstellungsmerkmal den Binnenbereich mit der Küste zu verbinden. Damit wird ein „Cloud to Coast (C2C)“ Konzept umgesetzt (Falconer et al., 2011). Dieses bedeutet eine integrierte Sichtweise auf die Ästuare, in denen Einflüsse sowohl von Binnen als auch von der Küste die Prozesse bestimmen.

Das Herunterskalieren in der Modellkette (Abbildung 4-7) ist am besten durch die Auflösung der Modelltopographie zu sehen. Während im globalen Modell die topographische Auflösung 1 Grad (etwa 110 km, Abbildung 4-8) beträgt, liegt diese in den Ästuarmodellen bei 40 m bzw. 200 m (Abbildung 4-10, Abbildung 4-11), dieses bedeutet eine mehr als zweitausendfache Verfeinerung. Am Ende dieses numerischen Herunterbrechens liegen sowohl räumlich als auch zeitlich (600s bzw. 1200s) extrem hochauflösende Daten über einen Zeitspanne von bis zu 150 Jahren oder bis zu 8.000.000 Zeitschritten vor. Für das Elbemodell liegen entsprechend mehr als 3 Milliarden Einzelwerte zur Analyse bereit.

Die Modellkette ist nur ein Vorprodukt für das zu extrahierende Wissen. Erst durch die Analyse mittels statistischer Methoden und der Einbindung von Expertenwissen ermöglichen es aus einer Modellkette grundlegende Information für Wissen entstehen zu lassen.

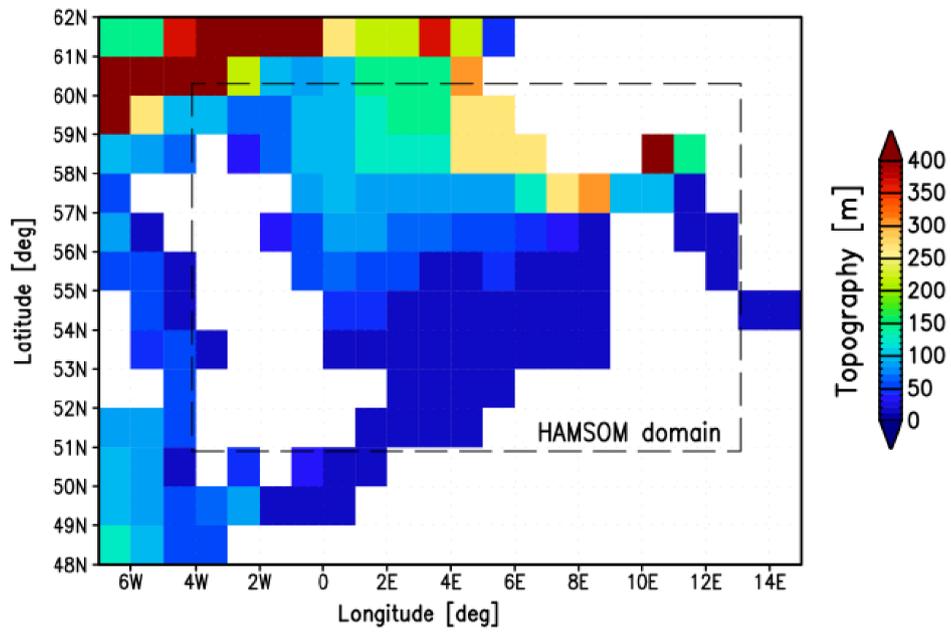


Abbildung 4-5: Auflösung der Nordseetopographie im globalen Modell (aus: Mathies, 2013).

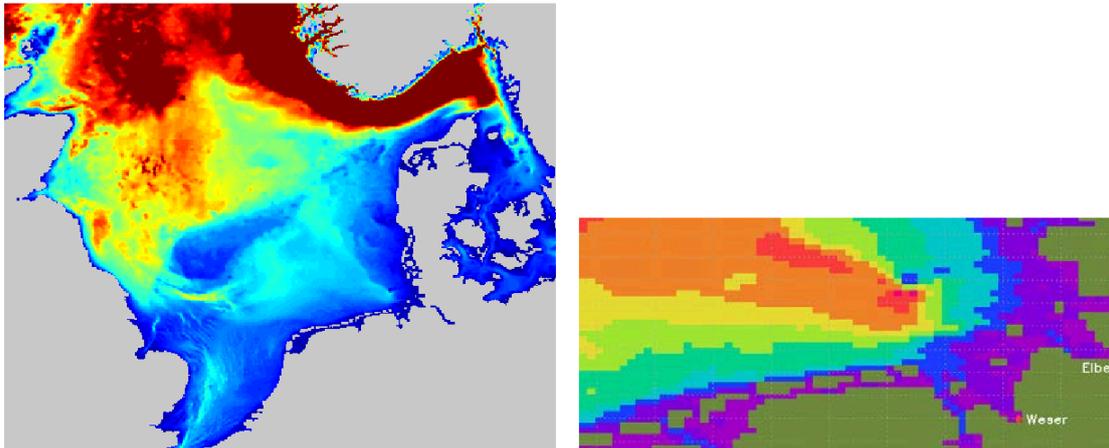


Abbildung 4-6: Auflösung der Nordseetopographie im Nordseemodell und im Ausschnitt der Deutschen Bucht.

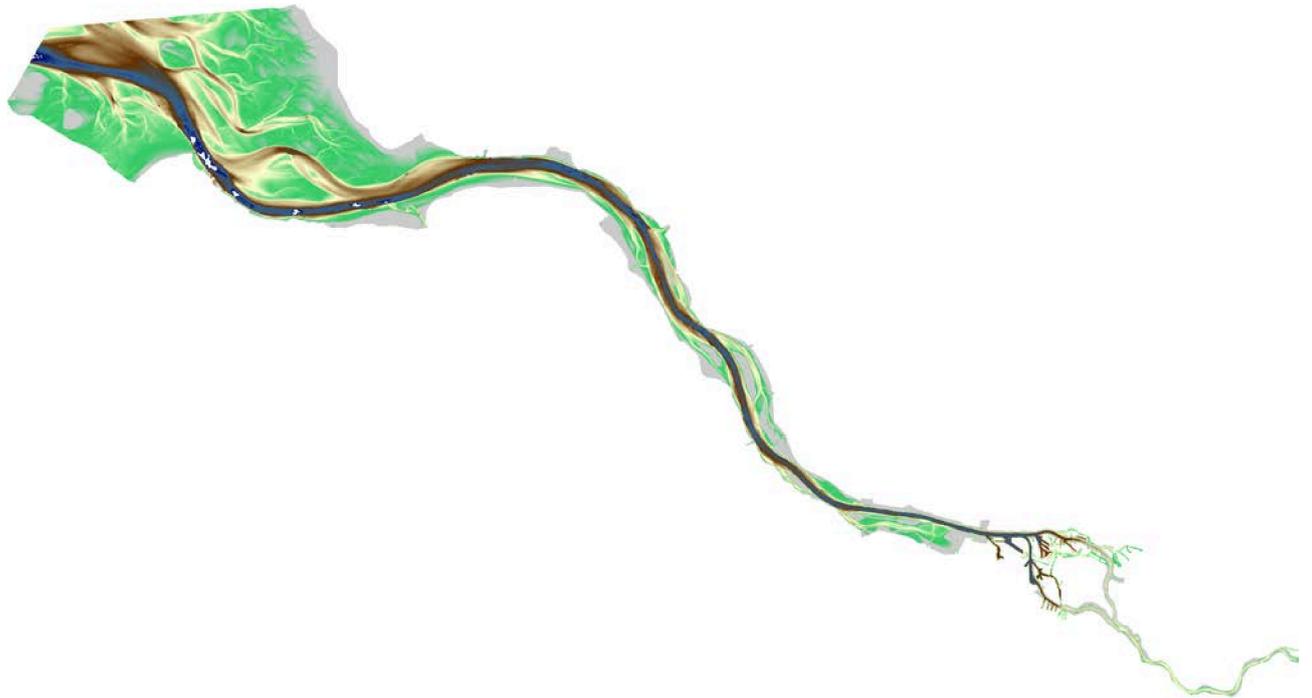


Abbildung 4-7: Auflösung der Topographie im Elbemodell.

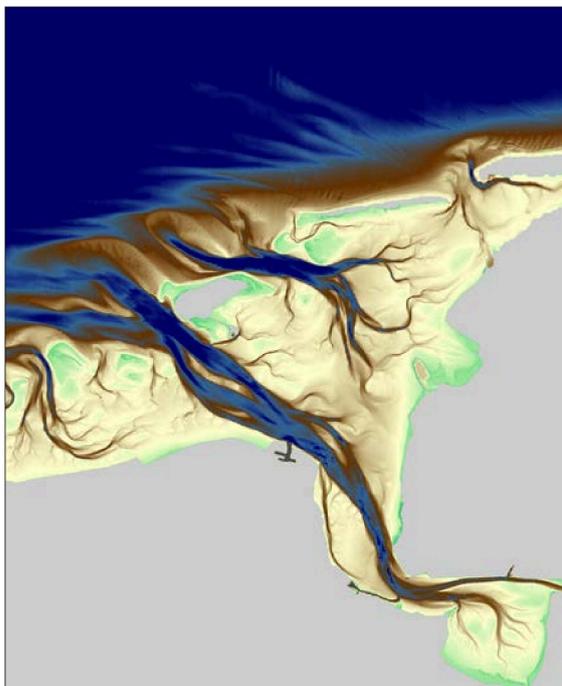


Abbildung 4-8: Auflösung der Topographie im Modell der Aussenems

4.3 Modellierung von Tidekennwerten

Klimabedingt
veränderte
Tidekennwerte
und Seegangs-
statistik in den
Küstengewässern

Um probabilistische zukünftige Entwicklungen abschätzen zu können, ermitteln numerische Modelle die örtlichen charakteristischen Wahrscheinlichkeitsdichten hydrologischer (tide- und seegangsspezifische) Charakteristika und Prozesse auf Basis eines hinreichend langen Bezugs. Hierbei steht die Simulation und Analyse von Langzeitprozessen im Mittelpunkt. Dieses wird methodisch mit dem Einsatz von schnellen und damit einfachen Wirkmodellen umgesetzt.

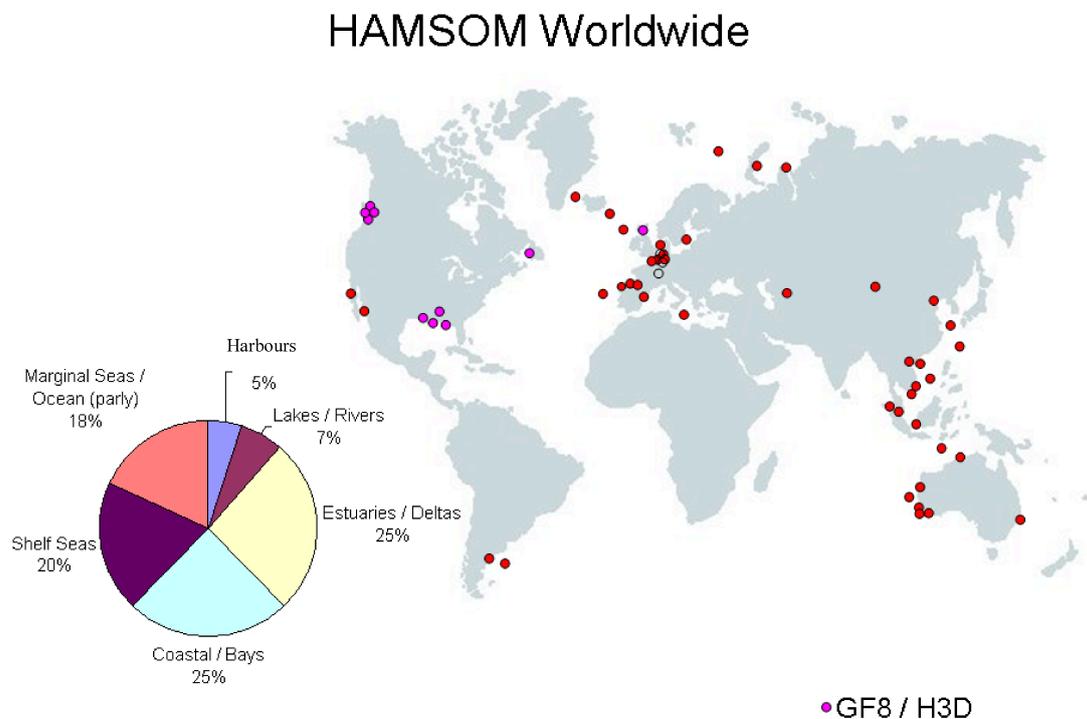


Abbildung 4-9: Weltweite Verbreitung und Anwendungsbereich des hydro- und thermodynamischen Modells HAMSOM (aus: Hein et al. 2013c, d).

Die Verwendung von „Open Source / Community“ Modellen gewährleisten eine ausreichend breite Entwicklungsbasis der Modelle. In diesem Projekt werden HAMSOM (Hydrodynamik) und SWAN (Seegang) eingesetzt. Die Modelle entsprechen dem Stand der Forschung, die Beschreibung des Gleichungssystems von HAMSOM

ist bei Backhaus (1983, 1985), Pohlmann (1991, 1996a, b, c), Schrum et al. (1994, 1997), Hein (2008) und Hein et al. (2007, 2012a, 2013a) zu finden. Eine ausgesprochene Expertise („operationale Vorhersage“, Langzeitsimulation) ist vorhanden, und ein internationaler Anwender- und Entwicklerkreis gewährleistet eine ständige Weiterentwicklung des Modells (Abbildung 4-12).

Wie die Pegelmessungen werden die Simulationsergebnisse auf Grundlage von aktuellen stochastischen Analysemethoden untersucht. Dabei werden vor allem Analysetechniken eingesetzt, die es ermöglichen, langfristige Schwankungen zu erkennen. Auch hier werden mathematische Verfahren eingesetzt, die es ermöglichen, spektrale Eigenschaften zeit- und raumabhängig darzustellen. Dazu werden statistisch-probabilistische Methoden zur Bestimmung von möglichst objektiven Veränderungswahrscheinlichkeiten (weiter-) entwickelt.

4.3.1 Numerische Langzeitmodellierung der Hydrodynamik

Die Modellierung von Hydrodynamik im Ästuar wird üblicherweise auf Zeitspannen von Ereignissen durchgeführt. Diese können ausgesuchte einzelne mittlere Zustände oder auch Extreme wie Sturmfluten sein. Um belastbare statistische Aussagen herausgeben zu können müssen jedoch möglichst *alle* Zustände abgebildet sein. Die Modelle müssen in der Lage sein, das Paradoxon von Langzeitmodellierung und einer gleichzeitig hinreichenden Abbildung der Topographie zu lösen. Bei der Modellierung in der Küstenhydrologie steht die korrekte Wiedergabe der physikalischen Prozesse im Mittelpunkt.

Trotz der heutzutage verfügbaren Großrechner ist es nicht unproblematisch Zeiträume in der Größenordnung von 20 Jahren oder mehr zu simulieren. Es ist dabei Stand der Wissenschaft die hydro-numerischen Modelle zu parallelisieren (Boukas, 1999; Geoffrey W.C., 2008).

Für die Ems liegen Ergebnisse von Sensitivitätsstudien vor, die eine notwendige Grundlage für die Langzeitsimulation darstellen. So wurden mit Hilfe der Seegangsimulationen bessere Grenzflächenbedingungen an der Wasseroberfläche ermittelt,

wodurch die systematische Unsicherheit des atmosphärischen Antriebes verringert wird (Hein et al, 2010b). Die Validierung des so optimierten Modells zeigt eine offensichtlich hinreichende Genauigkeit für den Verwendungszweck (siehe Kapitel 4.4.3).

Die Simulation von Ästuaren stellt mehrere numerische Anforderungen an das Modell (Hein et al., 2007), insbesondere hinsichtlich der numerischen Diffusion. Daher werden Formulierungen höherer Ordnung für die Lösung der Bewegungsgleichung und der Transportgleichung (Hein et al. 2013a) verwendet. Die verwendete Gitterstruktur erlaubt die Verwendung von rotationserhaltenen Verfahren (Schrum, 1997).

Die Bedeutung der Diffusions- und Schichtungsprozessen in den Ästuaren wird durch unterhalb des Gitters stattfindende stochastische Abschätzungen betrachtet. Die horizontalen Prozesse werden durch ein Smagorinsky - Schema (Hein, 2008) abgeschätzt. Die vertikale turbulente Viskosität wird durch einen Koechergin - Pohlmann - Schema berechnet (Pohlmann, 1996a, b, c).

Langzeitmodellierung, insbesondere von Ästuaren, ist keine Selbstverständlichkeit. Vielmehr muss das Paradoxem der räumlich stark variierenden Topographie mit der rechnerischen Effektivität in Einklang gebracht werden. Bei der Langzeitmodellierung können nur grobe Gitterlösungen verwendet werden, diese kann möglicherweise die Topographie nicht in angemessener Weise lösen. Zum Beispiel, kleine Priele oder dünne anthropogenen Strukturen (z. B. Bühnen) verschwinden in der Gitterstruktur.

In KLIWAS wird an der BfG deshalb ein neues Verfahren auf einem bi-skalaren Gitter verwendet, welches in der Lage ist zusätzlich zu dem Gitter für die dynamischen numerischen Lösungen ein weiteres Gitter für Trockenfallen, Reibung und eine laterale Wandfunktion für die Berechnung der horizontalen Turbulenz zur Verfügung zu stellen (Hein et al. 2012a).

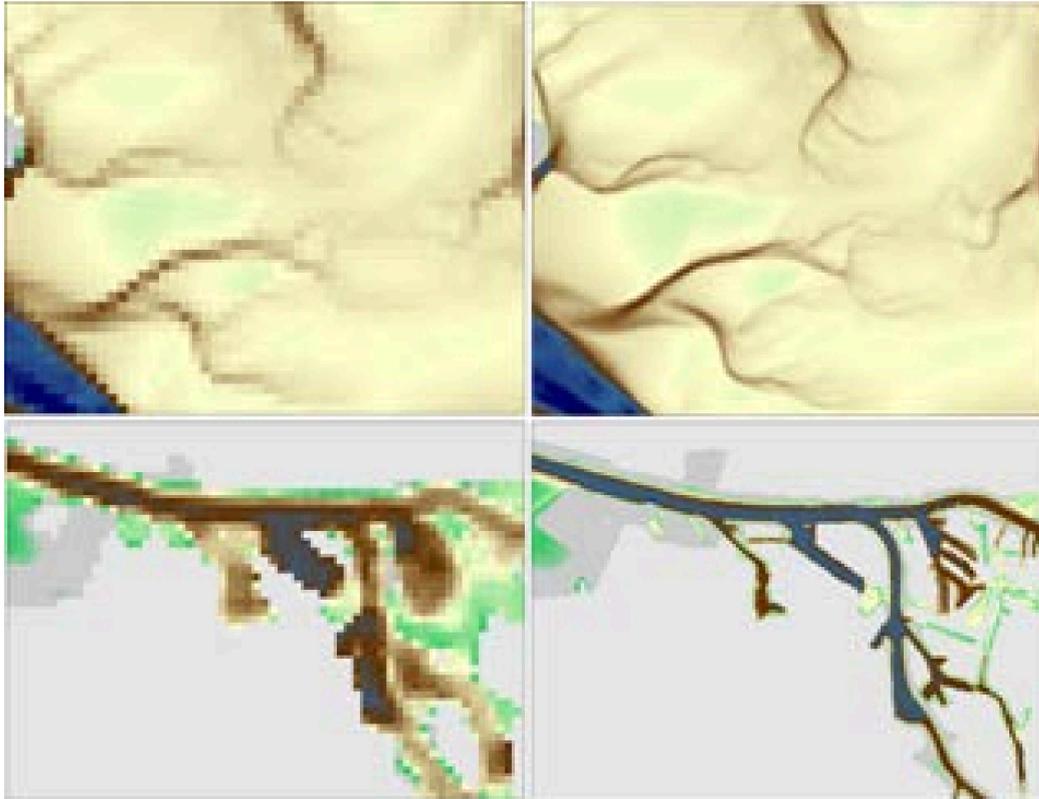


Abbildung 4-10: Beispiele für das verwendete Bi-skalare Gitter (aus, Hein, 2012).

Diese Trennung in zwei Skalen ist deshalb eine funktionierende Lösung, weil sich der Hauptprozess – die Gezeiten – räumlich auf einer Skala von mehreren Kilometern abspielt, die Topographie jedoch viel feiner strukturiert ist. In

Abbildung 4-13 sind zwei Beispiele für das Bi-skalare Gitter zu sehen. Die rechte Seite zeigt gut wie detailreich die Topographie für die Berechnung der Grenze Land / Wasser, der Reibung und der Turbulenz zur Verfügung steht. Eine genauere Beschreibung des Verfahrens ist in Hein et al (2012a) zu finden.

4.3.2 Modellierung der Nordsee

Für die Langzeitläufe der Nordsee mit HAMSOM konnten die im Institut für Meereskunde entwickelten Verfahren für *einseitige* gekoppelte Atmosphären-Ozeanmodellierung verwendet werden. Dieses Verfahren wurde für zwei Berechnungen des historischen Verlaufs (1950 -2000) und zwei Berechnungen der gesamten

Klimaperiode angewendet. Der jeweils zweite Lauf ist tideaufgelöst in der Deutschen Bucht. Hiermit liegen zum ersten Mal umfangreiche hochaufgelöste Datensätze (10 min flächenhaft) zur Abschätzung der Klimaänderung an der deutschen Nordseeküste vor. Hierzu wurden die Wasserstandsdaten der globalen Ozeanmodelle um die wichtigsten Partialtiden ergänzt.

Klimabedingt
veränderte
Tidekennwerte
und Seegang-
statistik in den
Küstengewässern

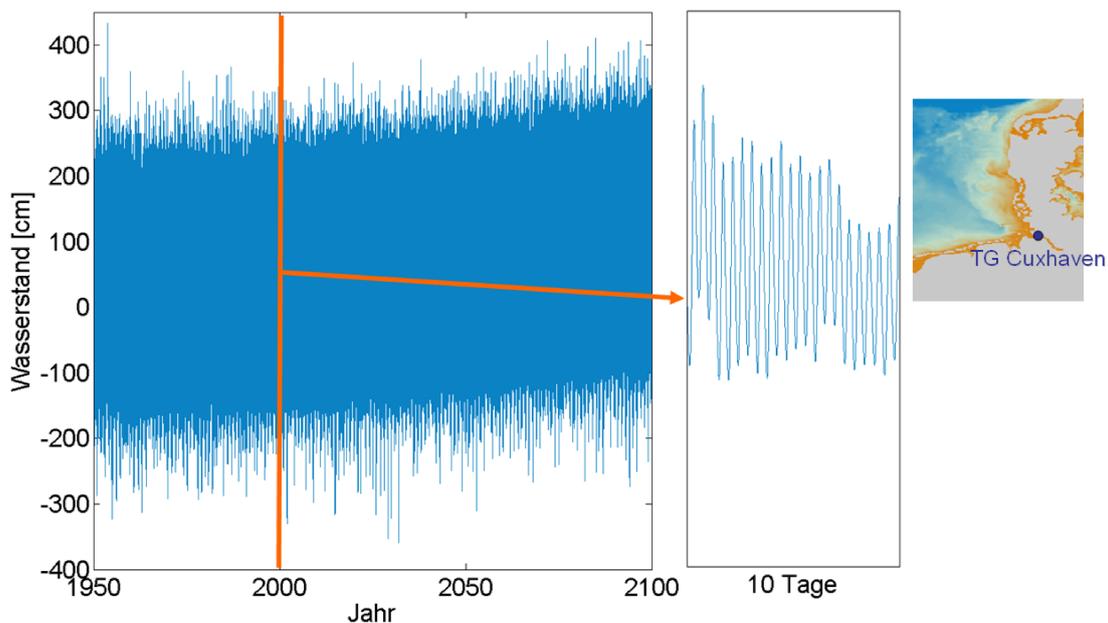


Abbildung 4-11: Exemplarisches Ergebnis der Modellkette (Hein et al. 2013e).

4.3.3 Modellierung der Aussenems

Das erste Modell welches für die Langzeitsimulationen aufbereiten wurde ist das Modell der Aussenems. Dieses Modell wurde insbesondere als Testmodell verwendet. Klimäläufe konnten aufgrund der fehlenden Abflussprojektionen nicht durchgeführt werden. Deshalb wurde nur ein Hindcast berechnet. Datengrundlage dafür war das operationale Modell des BSH.

Die Validierung mittel Pegelmesswerten (Hein et al., 2010b) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Modelldaten mit dem Messdaten (hier Borkum Südstrand). Der Jah-

resgang mit seinen starken signifikanten Schwankungen wird gut abgebildet. Auch einzelne Tidezyklen zeigen nur geringe Differenzen zu den Messungen. Der Windstau wird leicht unterschätzt.

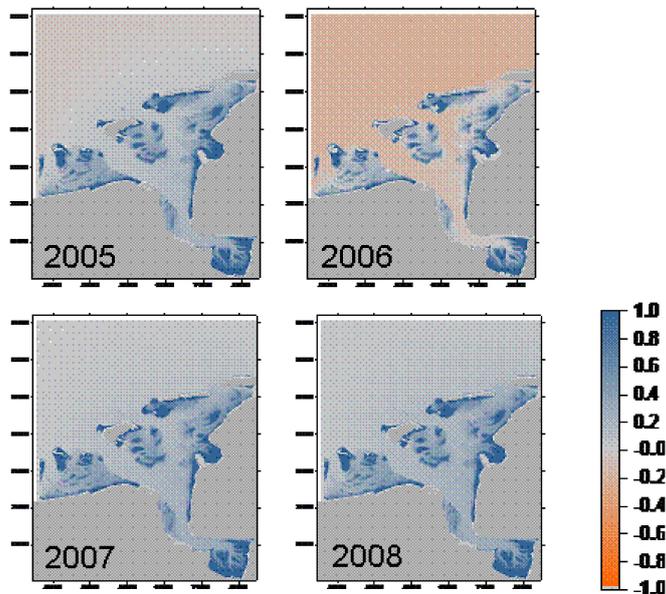


Abbildung 4-12: Mittlere Wasserstände von vier verschiedenen Wintern im Vergleich [m].

Zu einer ersten Abschätzung der zwischenjährliche Variabilität der Wasserstände werden die Winter von vier verschiedenen Jahren untersucht (Abbildung 4-15). Die vier Winter unterscheiden sich deutlich, insbesondere das Jahr 2006 zeigt erheblich niedrigere Wasserstände – dieses Jahr ist deshalb als Ausnahmejahr oder extremes Jahr zu sehen. Die aleatorische Standardabweichung der mittleren Wasserstände der vier Winter beträgt etwa ± 30 cm. Dieses bedeutet, dass bei Verwendung kurzer Zeitreihen Unsicherheiten in dieser Größenordnung anzusetzen sind. Bei gewässerkundlichen Untersuchungen sollten deshalb immer möglichst längere Zeitspannen betrachtet werden.

4.3.4 Modellierung des Elbeästuars

In KLIWAS ist es zum ersten Mal gelungen, ein Modellsystem aufzubauen, welches die Hydrodynamik im Elbeästuar auf für Klimafolgenforschung relevanten Zeitskalen ermöglicht (Hein et al. 2013b, c, d, e, f). Die Betrachtung des Elbeästuars erfolgt generell dem hydrologischem Längsschnitt (Kapitel 7.4.2). Weitergehende Auswertungen zweier Uferregionen als Grundlage von Vegetationsuntersuchungen folgen in Kapitel 7.4.5.

Die Validierung mittels Pegelmesswerten (Hein et al. 2013e, g; Hein et al. 2014a, b) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Modelldaten mit dem Messdaten. Der Jahresgang mit seinen starken signifikanten Schwankungen wird gut abgebildet. Auch einzelne Tidezyklen zeigen nur geringe Differenzen zu den Messungen. Der Windstau wird leicht unterschätzt.

Auch die Statistik wird gut durch das hydrodynamische Modell wiedergegeben. Die Validierung des Tidekennwertes „Thw“ anhand des Vergleiches zweier Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen ergibt, dass die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Tidehochwassern naturnah wiedergegeben werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die epistemischen Unsicherheiten der Tidekennwerte weniger als ein Drittel aleatorischen Unsicherheiten des jährlichen Verlaufs von Tidekennwerten betragen. Im Umkehrschluss bedeutet dieses, dass die Aussagen dreimal so Genau sind als bei der Betrachtung von kürzeren Zeitspannen als ein Jahr. Die in diesem Kapitel gemachten Validierungsangaben beziehen sich jedoch rein auf das Elbemodel, nicht auf die gesamte Modelkette.

Zur Modellierung der Partialtiden soll an dieser Stelle ein Ausblick in die Zukunft der prozessorientierten Modellierung von Gezeiten im Elbeästuar gegeben werden. Die Effektivität des verwendeten Modellierungssystems lässt eine Parameterperturbation zu. Damit ist die Ausbreitung epistemischer oder auch aleatorischer Unsicherheiten im Modellgebiet nachzuvollziehen. Gegenüber Kalibrierungen hat eine solche Vorgehensweise den Vorteil, dass die Prognosefähigkeit abgeschätzt werden kann. Abbildung 4-16 zeigt die Permutation der Phasengeschwindigkeit im Ästuar mit der Veränderung ausgewählter Partialtiden (M2, S2, M3, M4) (Hein et al. 2014a).

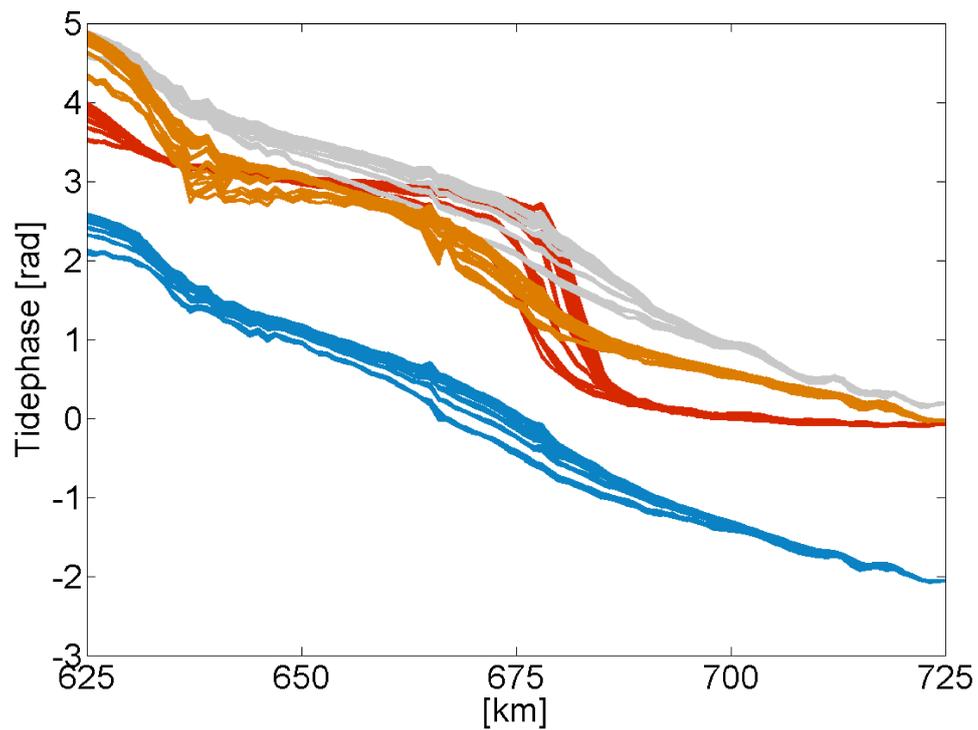


Abbildung 4-13: Veränderlichkeit der Phasengeschwindigkeit der Tidewelle ausgewählter Partiaaltiden (M2, S2, M3, M4) in Abhängigkeit von den Parametereinstellungen und Randwerteunsicherheit (Hein et al., 2014a).

4.3.5 Modelle für die Seegangstatistik

Bei Modellierung des Seegangs wird innerhalb der Modellkette ein Mischverfahren zwischen numerischer Modellierung und einer statistischen Methode angewendet. Hierzu wird eine Matrix von verschiedenen Eingangsparametern aufgestellt. Für den Wind wird für jeweils verschiedene Richtungen für jeweils verschiedene Stärken jeweils eine signifikante Wellenhöhe zugewiesen. Um den Anstieg des Tidemittelwassers zu berücksichtigen wird auch eine Matrix mit Wasserständen aufgebaut. Mit diesen Eingangsdaten wird dann mit dem numerischen Modell SWAN eine Ergebnis-matrix erzeugt.

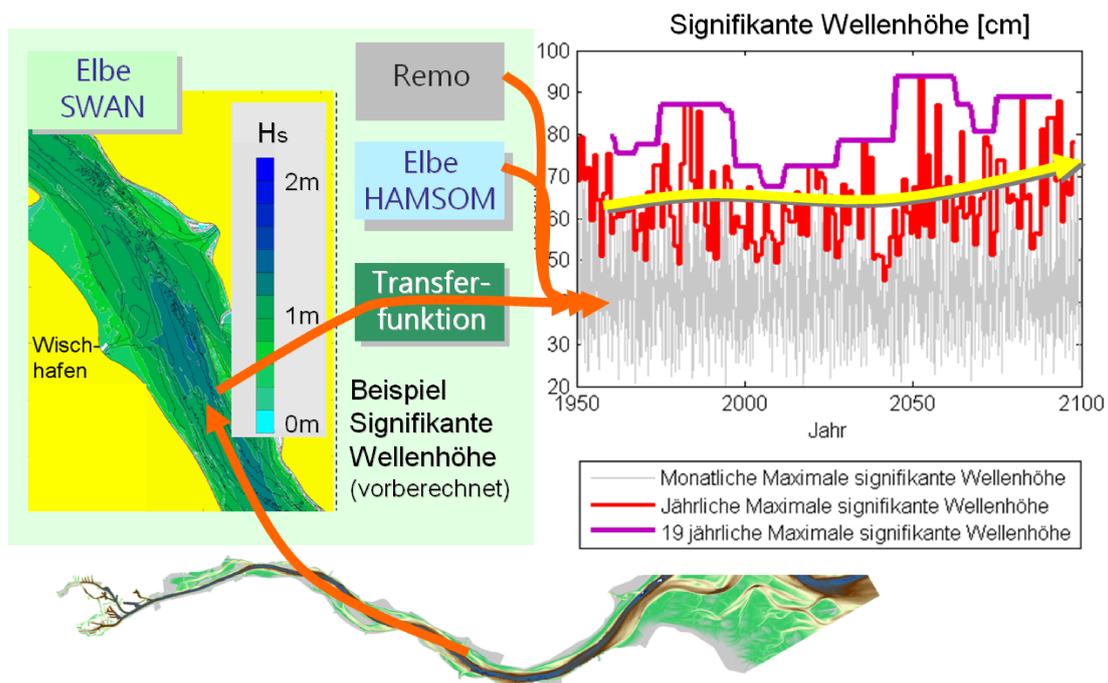


Abbildung 4-14: Modelkette für den Seegang.

Seegangmodelle wie SWAN beschreiben die Auslenkungen der Meeresoberfläche mit Hilfe einer spektralen Energiedichtefunktion oder in Anwesenheit von Strömungen mit Hilfe einer Impulsdichtefunktion unter der Näherung im Vergleich mit der

Wellenlänge nur schwach veränderlicher Seegangparameter. Eine umfangreiche Beschreibung des Seegangmodells SWAN ist bei Booij (2004) zu finden.

Auf eine numerische Modellierung der zeitlichen Entwicklung des Seegangs selbst wird verzichtet und das Modell SWAN nur stationär mit der Eingangsmatrix betrieben. Damit ist es möglich über eine Transferfunktion schnell und effizient lange Windzeitreihen in Seegangparameter zu überführen.

Als weitere Methode werden vorhandene Messdaten verwendet. Der Messaufbau der von der BfG entwickelten Wellenmessstationen besteht aus einem handelsüblichen Radar-Füllstandssensor, der mit dem Ende eines Stützbalkens, an eine küstennahen oder Offshore-Struktur (wie für die "Leuchtturm Alte Weser" angebracht werden kann. Diese Sensoren ermöglichen die Messung von Wasserstand in so hoher zeitlicher Auflösung, dass Wellenparameter wie die signifikante Wellenhöhe abgeleitet werden können. Für weitere Informationen siehe Mai (2004); Mai und Zimmermann (2003) sowie Mai und Zimmermann (2004).

Darüber hinaus betreibt der Deutsche Wetterdienst auf dem "Leuchtturm Alte Weser" eine meteorologische Station (u.a. Windgeschwindigkeit und Windrichtung).

Um künftige Änderungen der signifikanten Wellenhöhen abzuschätzen, wurden zusätzliche Wind-Daten des Globalen Klima Models "ECHAM5" verwendet. Dieses geschieht mit dem gleichen Verfahren, wie dieses zuvor beschrieben ist. Das Programm zur Wellenmodellierung (SWAN) wird jedoch durch die Beobachtungen ersetzt.

Mit den Messdaten ist es möglich eine Transferfunktion in Form von

$$H_{sig}[cm] = f(U, V)$$

zu ermitteln (Rütten et al., 2012; Rütten et al., 2013). Neben Windgeschwindigkeit und-richtung (oder genauer: Windstress und Windfetch) haben verschiedene weitere Faktoren auf die Wellenerzeugung am Leuchtturm Alte Weser Einfluss. So kann allgemein angenommen werden, dass die Winddauer und die Wassertiefe durchaus do-

minierenden Parameter sein können. An diesem speziellen Beobachtungsort, können auch noch einige zusätzliche Aspekte ebenfalls eine wichtige Rolle spielen.

Klimabedingt
veränderte
Tidekennwerte
und Seegang-
statistik in den
Küstengewässern

4.4 Gezeiten und deren Änderung

Aus Beobachtungen sowie den Langzeitmodellen lassen sich sehr gut die einzelnen Partialtiden und deren Bedeutung, sowie deren Veränderung bestimmen. Die Tabelle 4-1 aus Jennings und Schüttrumpf (2012) gibt einen Überblick über die wichtigsten Partialtiden im Untersuchungsgebiet. Die Analyse der einzelnen Partialtiden geben Rückschlüsse über die Veränderung der zugrundeliegenden Prozesse der Tidekennwerte.

Tabelle 4-1: Zusammenstellung ausgewählter maßgebender Gezeiten aus Jenning und Schüttrumpf (2012)

Name		Periode
Semidiurnal (halbtägig)		
M ₂	halbtägig, Mond	12,421 h
S ₂	halbtägig, Sonne	12,000 h
N ₂	lunar elliptisch	12,658 h
K ₂	lunisolar	11,967 h
Diurnal (ganztäglich)		
K ₁	lunisolar	23,934 h
O ₁	principal lunar	25,819 h
P ₁	principal solar	24,066 h
ϕ ₁		23,804 h
M ₁	täglich, Mond	24,850 h
ψ ₁		23,869 h
S ₁	tägliche, Sonne	24,000 h
Langzeit		
M _f	vierzehntägig (<u>f</u> ortnightly)	13,661 d
	Spring-Nipptide	14,76 d
M _m	monatlich (<u>m</u> onthly)	27,555 d
S _{sa}	halbjährlich (<u>s</u> emiannual)	0,5 a
S _a	sonnenjährlich (<u>s</u> olar <u>a</u> nnual)	1,000 a
N	Nodaltide	18,613 a

5 Durchgeführte Arbeiten

Literaturrecherche:

- ✓ Weitergehende Auswertung von aktuellen und historischen Quellen zu Untersuchungen der klimabedingten Veränderungen der physikalischen Systeme Nordsee, Nordseeküste, Ästuare usw.
- ✓ Zusätzlich wurde umfangreiche Literatur zum Themenbereich Meeresspiegelanstieg gesichtet und verarbeitet.
- ✓ Auswertung von Literatur die sich mit stochastischen Analysemethoden zur Beschreibung von Zeitreihen gesteckt.

Projekte:

- ✓ Fachliche und organisatorische Betreuung von Kooperationsprojekten: Vom Entwurf der Leistungsbeschreibungen bis zur gemeinsamen Diskussion von Ergebnissen.
- ✓ „Statistisch-Probabilistische Analyse von Pegelstandsmessungen im Tidebereich“
- ✓ „Qualitätsmanagement und Analyse von hochauflösenden Pegelstandsmessungen im Tidebereich“
- ✓ „Langzeitsimulationen zur probabilistischen Abschätzung zukünftiger Tidekennwerte in den Küstengewässern“
- ✓ Fachliche und organisatorische Betreuung des Projektes „Digitalisierung von Pegelmesswerten“. Es entstand ein umfangreicher hochauflösender Testdatensatz der als Referenz für zukünftige Digitalisierungen eingesetzt werden kann.

- ✓ Beteiligung beim Entwicklungsverfahren „AuTiBe“ (Automatische Tidekennwert Bestimmung). Entwicklungsprojekt wurde für die WSV in der BfG durchgeführt. Anwendung der Qualitätssicherungsverfahren auf historische digitalisierte hydrologische Daten.

Statistische Verfahren:

- ✓ Entwicklung von automatisierten Verfahren zur Qualitätssicherung von digitalisierten Pegelmesswerten, Aufbau einer entsprechenden mathematischen Softwarebibliothek.
- ✓ Anwendung und Weiterentwicklung von Verfahren zur Bruchpunkterkennung in Zeitreihen, Aufbau einer entsprechenden mathematischen Softwarebibliothek.
- ✓ Anwendung und Weiterentwicklung von Verfahren zur Multiskalenanalyse von Zeitreihen, Aufbau einer entsprechenden mathematischen Softwarebibliothek.
- ✓ Anwendung und Weiterentwicklung von Verfahren zur Frequenzanalyse nicht gleichabständiger Zeitreihen, Aufbau einer entsprechenden mathematischen Softwarebibliothek.
- ✓ Anwendung von Verfahren zur Frequenzanalyse insbesondere der harmonischen Analyse zur Bestimmung von Partialtiden, Aufbau einer entsprechenden mathematischen Softwarebibliothek.

Numerische Modellierung:

- ✓ Weitere numerische Optimierung der Softwarebibliothek des Modells „HAMSOM“ für ästuarine Anwendungen, Optimierungen hinsichtlich Rechengeschwindigkeiten.
- ✓ Durchführung von Validitätstests.
- ✓ Entwicklung eines Verfahrens zu Trennung von morphologischen und dynamischen Skalen im numerischen Modell „HAMSOM“ zur Lösung des Paradoxons der numerischen Langzeitmodellierung in morphologisch variablen Gebieten.
- ✓ Anpassung des Modells hinsichtlich der Möglichkeit die dynamische Auflösung anwendungsgesteuert zu skalieren. Aufbau eines zur Langzeitsimulation (150 Jahre) geeigneten Elbemodels für küstenhydrologische Anwendung.
- ✓ Durchführung von tideaufgelösten Langzeitsimulationen der Nordsee zur Randwertegenerierung für ästuarine Modelle.
- ✓ Auswertung von Langzeitmodellierungen: Küste der südlichen Deutschen Bucht, Aufbau einer entsprechenden mathematischen Softwarebibliothek.
- ✓ Auswertung von Langzeitmodellierungen: Elbeästuar, Aufbau einer entsprechenden mathematischen Softwarebibliothek.
- ✓ Auswertung von Langzeitmodellierungen und des Ist-Zustands als Grundlage der Vegetationsmodellierung, Aufbau einer entsprechenden mathematischen Softwarebibliothek.

Salzgehalte:

- ✓ Sichtung, Plausibilisierung und Qualitätsanalyse der digital vorhandenen Datenreihen Sichtung, Plausibilisierung und Qualitätsanalyse der Datenreihen Dritter.
- ✓ Statistische Beschreibung der Datensätze und Entwicklung von Auswerteverfahren mit dem Ziel der qualifizierten Verortung zu definierender Isohalinen.

Veröffentlichungen:

- ✓ Teilnahme an wissenschaftliche Fachveranstaltung, halten von Vorträgen.
- ✓ Die Ergebnisse wurden in etwa 30 größtenteils internationalen und zum Teil auch einem „Peer Review“ unterliegenden Verfahren veröffentlicht (siehe Anhang).

6 Vernetzung des Projektes, Kooperationspartner

Das KLIWAS Projekt 2.03 zielt auf die Abschätzung langzeitiger Veränderungen der Reverenzparameter in der Küstenhydrologie. Um dieses auf dem Stand der Forschung umsetzen zu können wurde eine starke externe wissenschaftliche Vernetzung angestrebt und finalisiert. Intern ermöglicht eine intensive direkte Kommunikation, die Semantik küstenhydrologischer Daten - beispielhaft seien Unsicherheiten und Zeitskalen genannt - in andere Projekte zu tragen.

Interne Vernetzung

Im Einzelnen ist Projekt 2.03 mit mehreren Projekten vernetzt:

Projekt 1.03: Liefert die notwendige Referenzdatenbasis für die Beurteilung und Abschätzung der Klimaänderungen und deren Auswirkungen.

Projekt 2.01: Liefert die notwendige Referenzdatenbasis für die Beurteilung und Abschätzung der Klimaänderungen und deren Auswirkungen. Die Schnittstelle ist der Küstenbereich der Nordsee.

Projekt 2.02: Bei Verwendung von Pegeldaten besteht eine enge Zusammenarbeit. Nullpunktkorrekturen und Landsenkungen fließen direkt in die Ergebnisse mit ein. Die erste von mehreren gemeinsamen Publikationen ist veröffentlicht (Hein, 2010b).

Projekt 2.04: In Gesprächen wurde festgestellt, dass sich die hydronumerischen Simulationen ergänzen und zur gegenseitigen Einordnung verwendet werden können. Es wurde aber auch die unterschiedlichen Anforderungen an die numerische Modellierung der Hydrodynamik für küstenhydrologische und wasserbauliche Aufgaben festgestellt.

Projekt 3.03: Beratung des Projektes hinsichtlich zukünftiger Änderung von Tidekennwerten.

Projekt 3.08: Beratung des Projektes hinsichtlich zukünftiger Änderung von Tidekennwerten.

Projekt 3.09: Beratung des Projektes hinsichtlich zukünftiger Änderung von Tidekennwerten. Produktlieferungen wurden durchgeführt.

Projekt 4.01: Liefert die notwendige Referenzdatenbasis für die Beurteilung und Abschätzung der Klimaänderungen und deren Auswirkungen auf den Abfluss. Die Schnittstelle ist der Pegel Neu Darchau.

Externe Vernetzung

Ein Überblick über direkte Kooperationsverträge bietet die Tabelle 1.

Zusätzlich besteht eine Vernetzung mit dem Forschungsverbund „Regionale Klimaänderungen“ (REKLIM) der Helmholtz-Zentren.

Mit dem Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer, Geschäftsbereich Gewässer und Hochwasserschutz, Hamburg (LSBG) wurden Gespräche geführt. Es fand ein Informationsaustausch mit dem Projekt XtremRisk statt. Es zeigt sich, dass durch eine möglichst langfristige Zusammenarbeit Synergieeffekte erzeugt werden würden. Eine Einrichtung eines zentralen operationellen Gewässerprojektionsdienstes könnte zur einer vereinheitlichten Berücksichtigung des Klimawandels in der Bemessungspraxis fördern.

Tabelle 6-1: Projekt 2.03 –Kooperationen

Klimabedingt
veränderte
Tidekennwerte
und Seegang-
statistik in den
Küstengewässern

Kooperationspartner / Auftrag- nehmer	Titel / Laufzeit
Kooperationsvertrag mit der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft,	„Statistisch-Probabilistische Analyse von Pegelstands-messungen im Tidebereich“ /2010 - 2012
Kooperationsvertrag mit der Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt	„Qualitätsmanagement und Analyse von hochauflösenden Pegelstands-messungen im Tidebereich“ / 2010 - 2012
Universität Hamburg, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften, Department Geowissenschaften, Institut für Meereskunde	„Langzeitsimulationen zur probabilistischen Abschätzung zukünftiger Tidekennwerte in den Küstengewässern“ / 2010 - 2013.

7 Ergebnisse

7.1 Qualitätssicherung historischer hydrologischer Daten

7.1.1 Unsicherheiten und Qualitätssicherung von Tidekennwerten

Das Management von Unsicherheiten ist die raison d'être der Abschätzung der Betroffenheit hinsichtlich des Klimawandels, bei der Beurteilung ist äußerste Sorgfalt anzuwenden. Unsicherheiten müssen identifiziert werden, die Art ihrer Ausbreitung in der gesamten Einschätzung muss verstanden werden und sie müssen als Teil der Ergebnisse kommuniziert werden. (nach Jones, 2001).

Die Untersuchung von Unsicherheiten der historischen und zukünftigen Trends von Tidekennwerten ist deshalb die Basis der Ergebnisse. Die Trends der Tidekennwerte basieren auf Modellen und Daten, die durch zufällige oder stochastische physikalisch inhärente Variation der Einflussgrößen (aleatorische Unsicherheit) als auch durch ungenaue Kenntnis der Prozesse (epistemische Unsicherheit) als generell unsicher eingeschätzt werden müssen.

Eine wesentliche Grundlage zum Verständnis der Änderungen der Tidekennwerte durch den Klimawandel ist die Bestimmung und die Bewertung der Unsicherheiten. Eine umfangreiche aber nicht abschließende Beschreibung von Unsicherheiten der historischen Tidekennwerte sind bei Hein et al. (2010a) zu finden.

Verfahren der Qualitätssicherung wurden getestet und angewendet. Hydrologische Messdaten weisen immer wieder und zum Teil im großen Umfang Lücken in den Messzeitreihen auf, z.B. durch Fehlfunktion des Pegels.

Um die Lücken zu füllen wurden zwei Verfahren verwendet. Zunächst wurde das sogenannte Lomb-Scargle Periodogramm (LSP; Lomb, 1976) verwendet. Dieses ist ein frequenzbasierendes Verfahren, welches zur spektralen Filterung von ungleich

verteilten Zeitreihen, d.h. auch bei lückenbehafteten Zeitreihen verwendet werden kann.

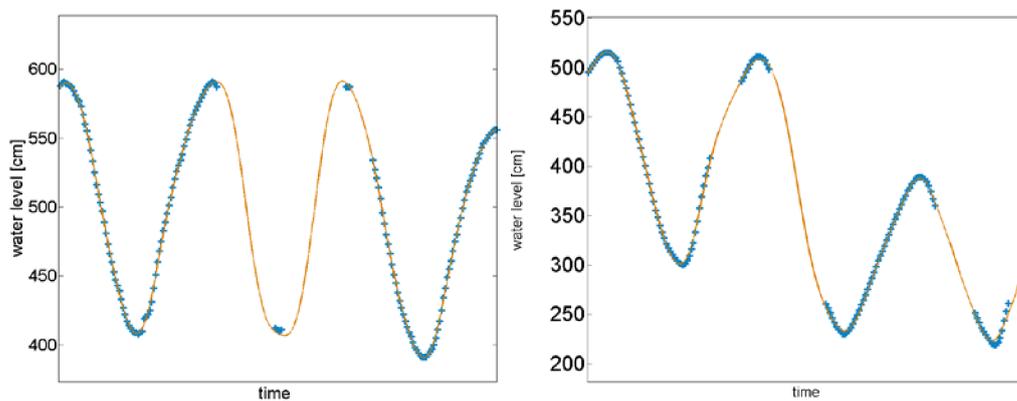


Abbildung 7-1: Beispiele für gefüllte Lücken mit dem LSP Ansatz. Bau: digitalisierten Werte. Orange: Rekonstruktion.

Des Weiteren haben wir einen Fuzzy-Logik Ansatz verwenden, um Lücken in den Zeitreihen zu füllen, diese Methode ist jedoch nur möglich, wenn zwei vergleichbare Datensätze zur Verfügung stehen. Wenn es sich um zwei benachbarte Küstenpegel handelt, ist Fuzzy-Logik eine recht effektive Methode. Dabei erhält man mittels Fuzzy-Logik auch eine zusätzliche Qualitätskontrolle der Zeitreihen: Durch einen Vergleich zwischen trainierten und gemessenen Werte sehen wir Diskontinuitäten, Ausreißer und systematische Fehler in einzelnen Zeitreihen.

Abbildung 7-2 zeigt die Leistungsfähigkeit des Fuzzy-Logik-Ansatzes. In der Mitte der Abbildung befindet sich nicht nur eine Lücke, sondern eine Ansammlung von offensichtlich nicht richtigen Werten. Die Erfahrung zeigt, dass die Rekonstruktion gut funktioniert, wenn die Prädiktionsrichtung gegen die Ausbreitung der Tidewelle gewählt wird.

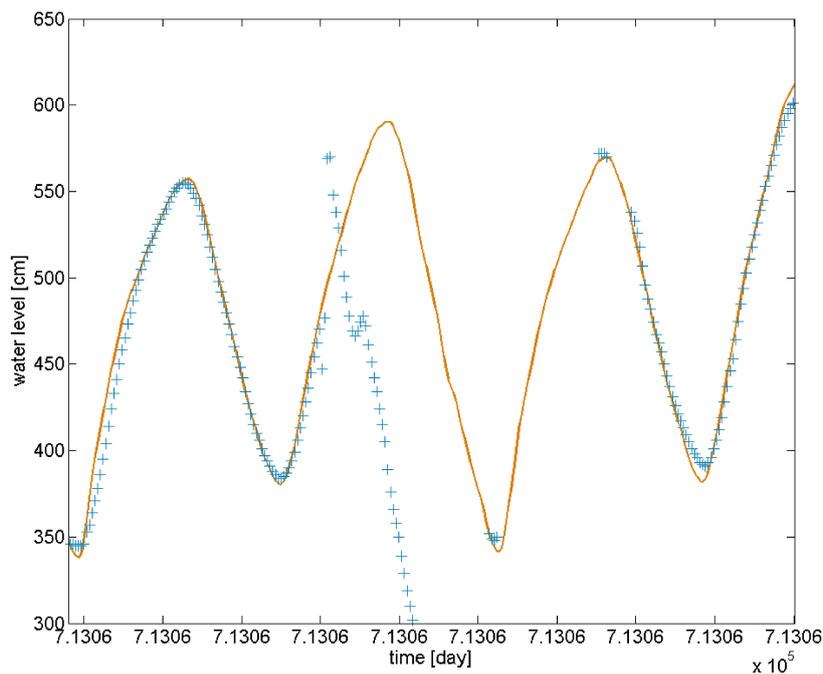


Abbildung 7-2: Beispiel für eine gefüllte Lücke mittels des Fuzzy-Logik Ansatz. Blau: digitalisierten Werte. Orange: Rekonstruktion.

Erkenntnisse in KLIWAS und anderen Projekten zeigen, dass hydrologische Zeitreihen oft durch Bruchpunkte gestört sind. Diese können messtechnischer Natur sein (z.B. Wechsel des Pegelstandortes oder Umbau des Pegels) aber auch physikalisch inhärent.

Als Vorbereitung der Analyse von hydrologischen Zeitreihen ist es notwendig, alle nicht natürlichen Einflüsse auf die Messungen herauszurechnen. Um die Daten allgemeingültig zu halten, sind bei der Homogenisierung nicht nur die Mittelwerte und Streuungsmaße, sondern Verfahren weiterzuentwickeln, die die gesamte Häufigkeitsverteilung und auch die spektrale Leistungsdichte betrachten.

7.1.2 Räumliche aleatorische Unsicherheiten von Tidekennwerten

Pegelmessungen bilden den gewässerkundlichen Wasserstand nur direkt am Pegelstandort ab. Um die Ergebnisse der Pegeluntersuchungen die ja umfangreich vorlie-

gen räumlich einzuordnen, wurde eine Modelstudie durchgeführt (Hein, 2010a). Hierzu wurde ein einjähriger Kurzzeitlauf ausgewertet. Die Modelstudie zeigt den Aufnahmebereich der Pegel (Abbildung 7-3).

Klimabedingt
veränderte
Tidekennwerte
und Seegang-
statistik in den
Küstengewässern

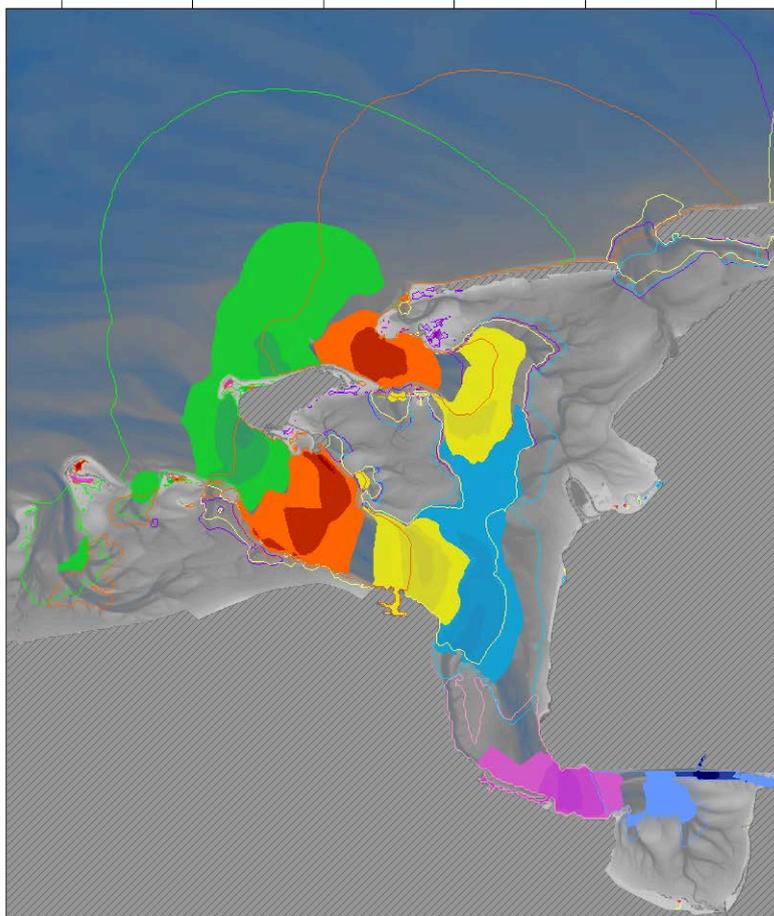


Abbildung 7-3: Abbildungsbereich der Pegel im Ems-Dollart Ästuars, dargestellt als aleatorische Unsicherheit aus einer einjährigen Simulation. Der flächig gefärbte Bereich definiert den Grenzbereich einer Unsicherheit von ± 10 cm (2σ) des gewässerkundlichen Wasserstandes. Die Linien definieren einen Bereich von ± 20 cm (2σ).

So lässt sich der räumlichen Anteil der aleatorischen Unsicherheit bestimmen. Es ist der Abbildung der Zusammenhang zwischen, dem Genauigkeitsanspruch und der Repräsentativität ablesen. Das heißt je höher der Anspruch an die Genauigkeit ist, desto kleiner ist das Gebiet für den der Pegel repräsentativ ist.

7.2 Untersuchung historischer Trends von Tidekennwerten

7.2.1 Historische Trends des Tidemittelwassers

Das Tidemittelwasser ist ständig in Veränderung. Aus archäologischen und geologischen Untersuchungen wissen wir, dass das Tidemittelwasser in den letzten 3000 Jahren der letzten Eiszeit um etwa 3 m angestiegen ist. Abbildung 7-7 zeigt, dass auf geologischen Zeitskalen der relative Anstieg des regionalen Meeresspiegels eher abnimmt.

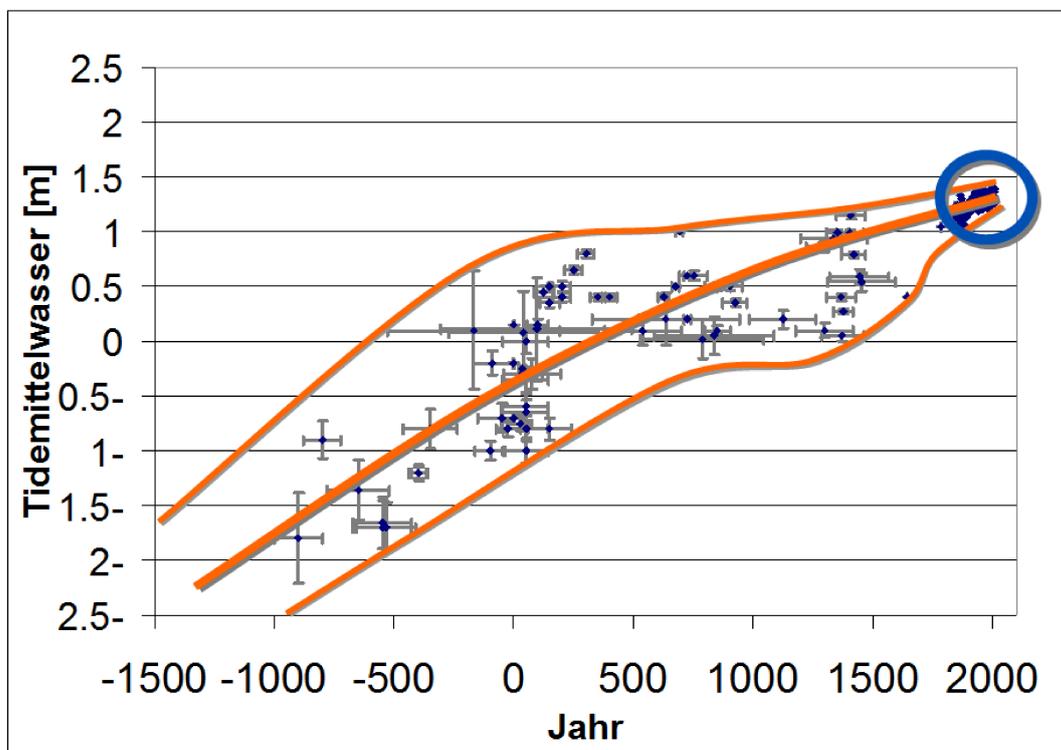


Abbildung 7-4: Veränderung des Tidemittelwassers der letzten 3500 Jahre (Daten aus Behre, 2003).

Die Abbildung 7-8 zeigt den mittleren regionalen Meeresspiegel (Tmw) der südlichen Deutschen Bucht. In Zusammenarbeit mit Projekt 2.02 ist es gelungen die Lagerung des geodätischen Netzwerks zu optimieren. Dadurch liegen für einzelne Punkte Landsenkungsinformation vor. Bei der Berechnung wurde auf die Definition der „International Hydrographic Organisation“ für den „mean sea level“ (mTmw) zurück-

gegriffen: Der regionale Meeresspiegel ist demnach ein 19-jähriges Mittel der Wasserstände an einem Pegelstandort (hier der virtuelle Pegel der südlichen Deutschen Bucht; Hein et al. 2011a, b). Diese Art der Filterung ermöglicht es, kurzfristige Schwankungen, sei es durch atmosphärische Einflüsse oder durch den Einfluss der Tide aus der Betrachtung herauszuhalten. In der Abbildung ist zu erkennen, dass der regionale Meeresspiegel steigt, in den letzten 100 Jahren liegt der Trend bei ca. 11 cm/100a bis 17 cm/100a. In der Zeit vor 1900 liegen nur Daten vom Pegel Cuxhaven vor, es sollten keine Schlussfolgerungen für diese Periode gezogen werden.

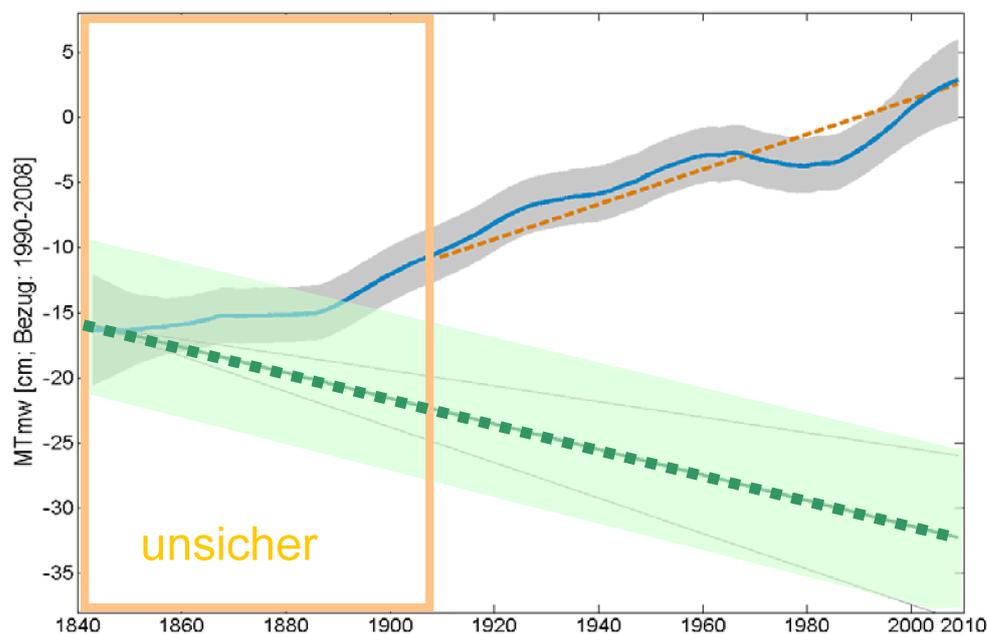


Abbildung 7-5: Der regionale Anstieg des Meeresspiegels (blaue Kurve) in der südlichen deutschen Bucht und Unsicherheiten (graues Band); der lineare Trend (orange gestrichelte Linie); Landsenkung mit Unsicherheiten (grün).

Der festgestellte Trend liegt in der Größenordnung der von Woodworth et al. (2009) für die Küste Großbritanniens festgestellten 14 cm/100a, ist also durchaus plausibel. Gleichzeitig mit dem Meeresspiegelanstieg sinkt das Land an der deutschen Nordseeküste um etwa 4 cm bis 16 cm in den letzten 100 Jahren. Die Landsenkung ist jedoch lokal sehr unterschiedlich verteilt.

Das ausgeprägte Auf und Ab der blauen Linie zeigt, dass der festgestellte Trend des Meeresspiegel ausgeprägt nicht linear ist. Die Anstiegsraten unterliegen einer ständigen Veränderung (Hein et al., 2011d, e). Berechnungen des Trends der *globalen* Wasserstände zeigen eine Beschleunigung (u.a. Church und White, 2011). Für die deutschen Seewasserstraßen gilt dieses nicht: Es lässt sich für die letzten 100 Jahre *keine signifikante Beschleunigung* des Meeresspiegelanstieges nachweisen (Hein et al. 2011b, d, e).

7.2.2 Zwischenjährliche Variabilität von Tidekennwerten

Die Anstiegsraten des Tidemittelwassers zeigen eine starke natürliche Variabilität des regionalen Meeresspiegels (Abbildung 7-9). Die Methoden der Multiskalenanalyse können dieses sichtbar machen (Hein et al. 2011a, b, 2012c). Zum Beispiel ist der Meeresspiegel in den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts gesunken. In den letzten 20 Jahren ist die Rate des regionalen Meeresspiegelanstiegs erhöht. Ein Eindruck von den Prozessen, die hinter den nicht-linearen Veränderungen stehen, kann durch eine Multiskalenanalyse gewonnen werden. Die Küstenhydrologie der BfG hat hier verschiedene Verfahren weiterentwickelt (Hein et al. 2011a, d, e). Neben einfachen spektralen Methoden kommen unter anderem die Singuläre System Analyse (SSA), die Trendbereinigte Fluktuations-Analyse und die Wavelet-Transformation zum Einsatz.

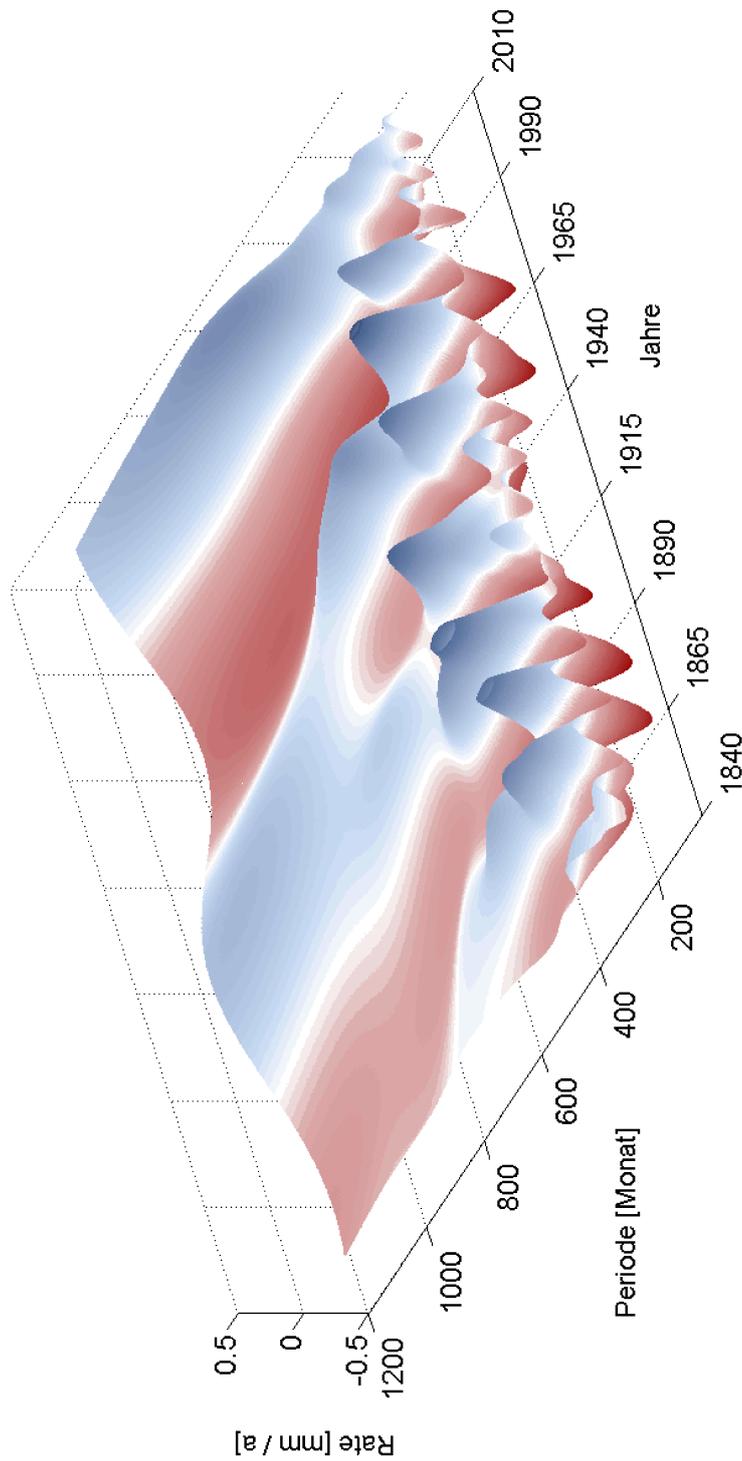


Abbildung 7-6: Skalenaufgelöste Anstiegsraten des regionalen Meeresspiegels (Hein et al. 2011b).

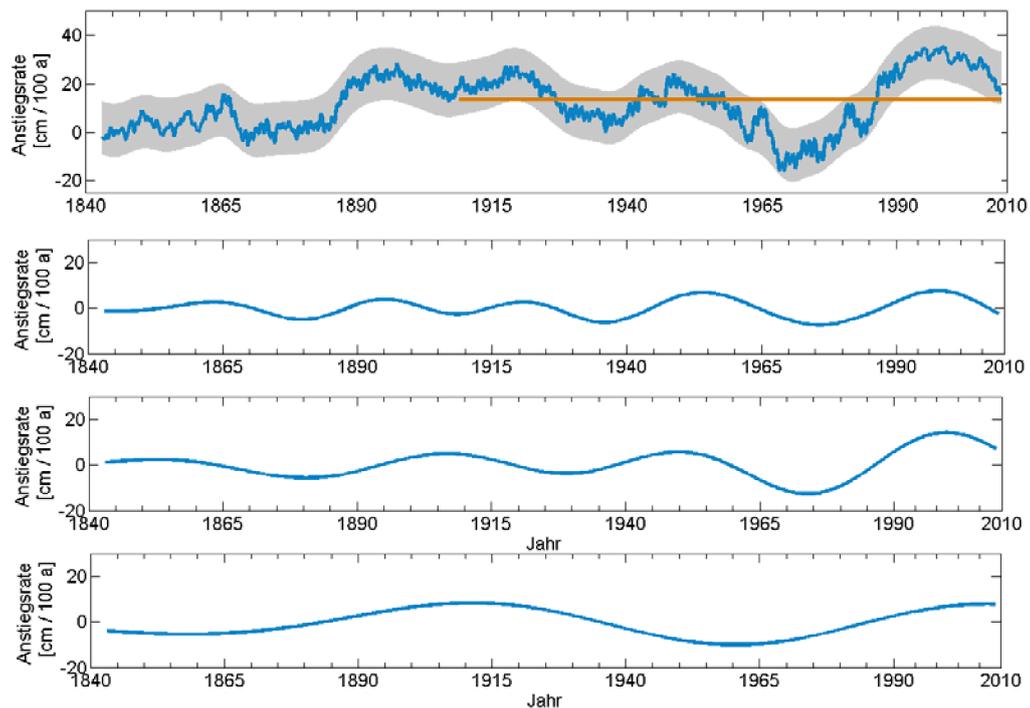


Abbildung 7-7: Anstiegsraten des regionalen Meeresspiegels (blaue Linie) und Unsicherheiten (graues Band); b–c) drei wesentliche Periodizitäten aus der Multiskalenanalyse (Hein et al. 2011b, 2012c). Die orange Linie zeigt das 100 jährige Mittel.

Beispielhaft werden Ergebnisse einer Wavelet-Transformation gezeigt (vgl. Hein, 2011a, h): In Abbildung 7-10 sind drei der wesentlichen Periodizitäten der natürlichen Fluktuationen abgebildet. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Reduzierung der Ergebnisse der Wavelet-Transformation auf die drei wesentlichen Periodizitäten eine vereinfachte Darstellung der natürlichen Prozesse ist. Bedeutende Periodizitäten von weniger als 19 Jahren bleiben unberücksichtigt. Insbesondere wird jedoch auch die besondere Möglichkeit der Verfahren der Multiskalenanalyse auch diejenigen Periodizitäten aufzudecken, deren Frequenzen sich durch natürliche Prozesse mit der Zeit ändern, hier nicht abgebildet.

In unseren Analysen zeigen sich unter anderen Periodizitäten von ca. 20 bis 30 Jahren, von 35 bis 40 Jahren und eine Periodizität von 60 bis 80 Jahren. Dieses gibt zum ersten Mal einen neuen prozessorientierten Einblick in die langfristige Veränderung der Wasserstände. Beispielsweise ist der 35 bis 40 jährige Zyklus eine typische Peri-

ode unseres Wettergeschehens und wurde schon 1625 von Francis Bacon beschrieben (Gregory, 1930).

Die Periodizität von 60 bis 80 Jahren ist angesichts der Länge der Zeitreihe mit Vorsicht zu genießen. Jedoch hat die sogenannte Atlantische Multidekadische Oszillation (AMO) eine ganz ähnliche Periodizität (u.a. Kerr, 2000). Wenn die drei abgebildeten Periodizitäten übereinander gelegt werden, kann ein großer Teil der Fluktuationen des Tmw erklärt werden. Insbesondere wird deutlich, dass die scheinbare Beschleunigung der letzten 20 Jahre wahrscheinlich durch eine einfache Interferenz der verschiedenen Periodizitäten hervorgerufen wurde und eher nicht Teil des Klimawandels ist.

Beachtenswert ist die mögliche Zunahme der Variabilität, die in Abbildung 7-10 erkennbar ist. Nicht erkennbar ist in der Abbildung, dass die Zunahme der Variabilität mit einer Veränderung des Frequenzspektrums verbunden ist. Dieses muss noch genauer verifiziert werden, bedeutet eine Zunahme der Variabilität doch eine zusätzliche Herausforderung für die Anpassung – die Wasserstände werden sich unberechenbarer verhalten als im Vergleich zu einem häufig angenommenen stetigen Anstieg.

Obwohl wir keine Beschleunigung der Anstiegsraten in den letzten Jahrzehnten oder innerhalb der letzten 100 Jahre signifikant nachweisen können, bedeutet dieses keine Entwarnung für die deutschen Küsten. Auf Grund der oben gezeigten Periodizität verringert sich die Stärke des Trends des regionalen Meeresspiegelanstieges ein wenig. Die Periodizität bewirkt jedoch, dass in den nächsten zwei Dekaden der Trend sich beschleunigen wird.

Eine wichtige Einflussgröße auf die Tidekennwerte ist die Atmosphäre. Diese unterliegt auch zwischenjähriger Variabilität. Eine dieser Variabilitäten ist die Nordatlantische Oszillation (NAO; Hurrell, 1995). Diese ist definiert als die Schwankung des Druckverhältnisses zwischen dem Islandtief im Norden und dem Azorenhoch im Süden über dem Nordatlantik. Ein für die NAO geschaffener Index, der NAO-Index, gibt die unter der NAO sich verändernde Stärke der Westwinddrift an, die das Wetter in Europa beeinflusst (besonders im Winter). Er basiert heute üblicherweise auf der Differenz der standardisierten Luftdruck-Anomalien zwischen den Azoren und Island.

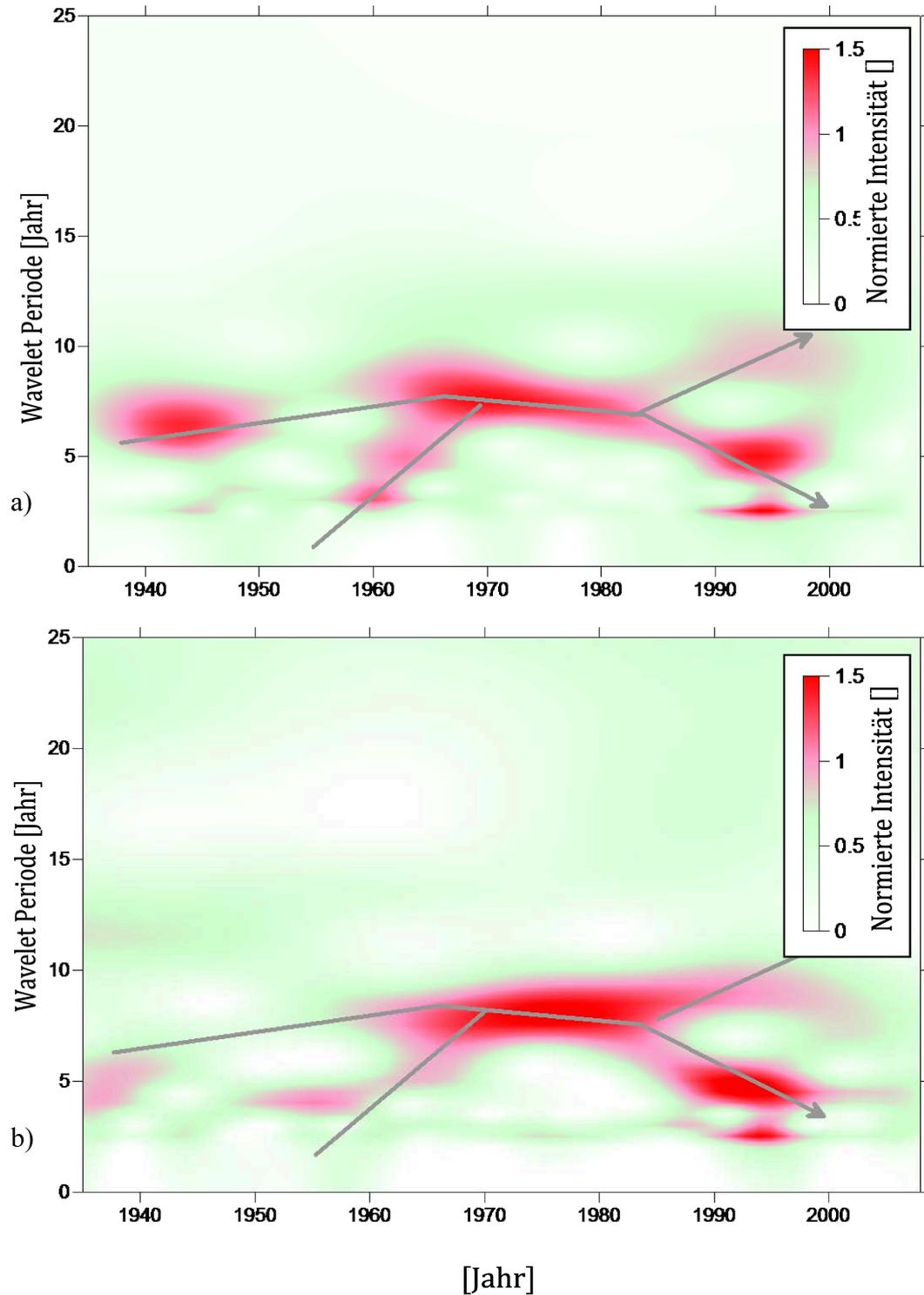


Abbildung 7-8: Vergleichende Waveletanalyse des Tidehochwassers am Pegel Borkum Südstrand (a) und NAO-Index (b, Hurrel, 1995). Zur Vergleichbarkeit wurden beide Wertebereiche auf $\sigma = 1$ normiert.

Der Einfluss der NAO wurde exemplarisch am Pegel Borkum Südstrand untersucht. Dazu wurde eine Wavelet-Transformation sowohl der Wasserstände als auch des Indexes durchgeführt. Dazu wurden sowohl die Wasserstände als auch der NAO normalisiert. Der NAO wurde zusätzlich invertiert, aus den Wasserständen wurde der Einfluss der Nodaltide herausgerechnet. Es zeigt sich eine große Ähnlichkeit der beiden Parameter (Abbildung 7-11).

Als zweite Analyseverfahren wurde eine SSA verwendet (Abbildung 7-12). Die erste signifikante Komponente die hierbei in beiden Datensätzen bestimmt werden kann, passt sehr gut überein und bestätigt die Analyse mittels Wavelets. Aus diesen Analysen lässt sich ableiten, dass eine Betrachtung der Änderung von Wasserständen an der Küste nicht ohne eine Betrachtung der NAO durchgeführt werden sollte. Die durch die NAO variierende Westwindstärke führt zu unterschiedlichem Windstau und somit zu unterschiedlichen mittleren Thw. Die typischen Frequenzen der NAO, 4 bis 7 Jahre sind bei allen Untersuchungen von Tidekennwerten zu beachten.

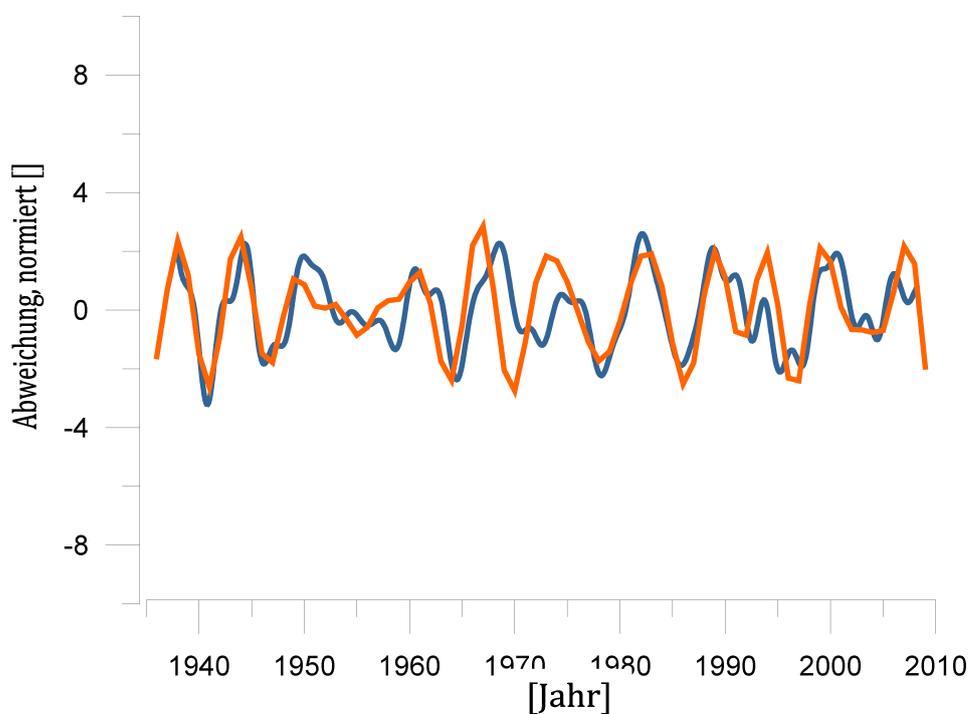


Abbildung 7-9: Vergleich des normierten normierten NAO-Indexes (orange) mit den normierten Thw-Messungen (blau) mittels SSA.

Als ein weiteres Beispiel für eine typische Periodizität wird an dieser Stelle die Nodaltide im Tidenhub aufgezeigt (Abbildung 7-13). Als weitere Beispiele für wichtige Periodizität sei der Jahresgang oder der 14,8 Tage dauernde Spring-Nipp Zyklus genannt.

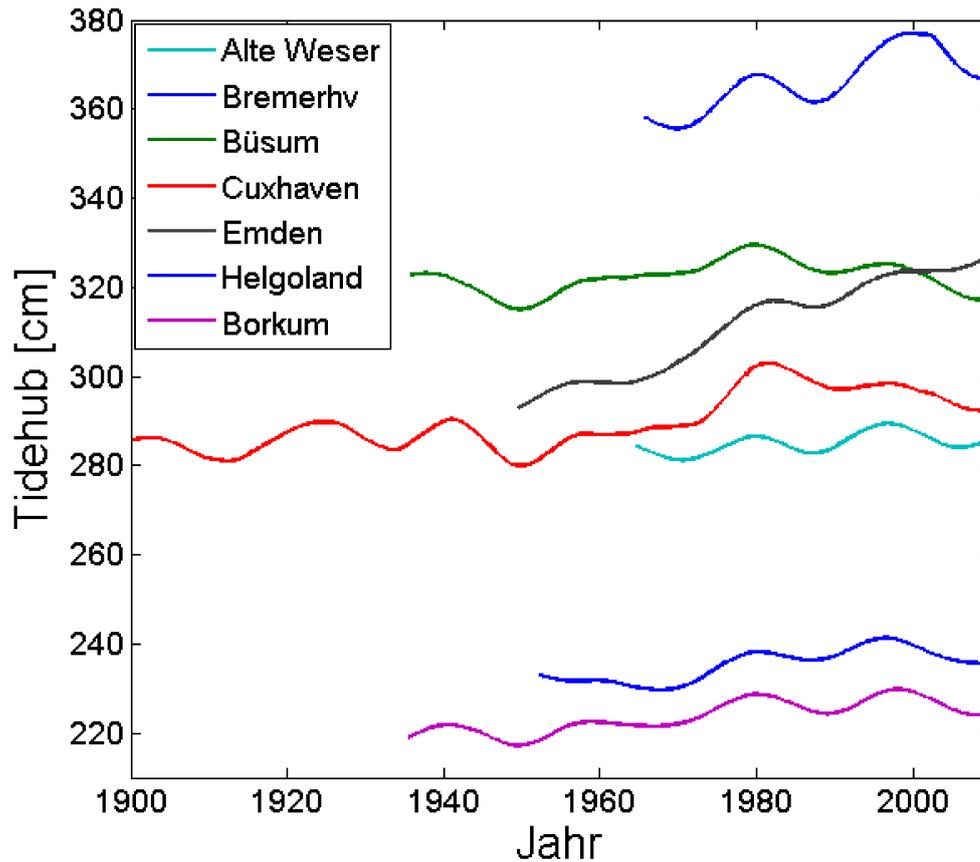


Abbildung 7-10: Der historische Verlauf des Tidenhub für ausgewählte Pegel.

7.2.3 Trendermittlung für Tidekennwerte nach dem Modalverfahren

Neben den Untersuchungen des Tidemittelwassers liegen auch Ergebnisse für die anfangs definierten weiteren Tidekennwerte (Thw, Tnw, Thb, Tf, Te) vor. Für diese Kennwerte ist es nicht mehr möglich einen virtuellen Pegel zu erzeugen. Dieses führt dazu das hier nur beispielweise einzelne Messstellen gezeigt werden können. Um einen robusten Trend zu erzeugen wird das sogenannte Modalverfahren angewandt (Jenning und Schüttrumpf, 2012).

Für acht verteilt ausgewählte Pegel wurde eine Untersuchung der Tidekennwerte durchgeführt. Für das Tidehochwasser ist an allen Pegeln eine Zunahme zu beobachten, was aufgrund der unterschiedlichen Zeiträume unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Im Mittel über alle Pegel beträgt der Anstieg der linearen Trendgeraden 28 cm / 100 Jahre.

Am Pegel Bremerhaven und am Pegel Emden Neue Seeschleuse ist ein Rückgang des Tideniedrigwasserstandes zu beobachten, an allen anderen Pegeln nimmt auch der mittlere Wasserstand bei Tideniedrigwasser zu. Der Mittelwert über alle Pegel gibt einen Anstieg des Tidehochwassers von 23 cm / 100 Jahre wieder (Jenning und Schüttrumpf, 2012).

Da das Thw stärker steigt als das Tnw bzw. letzteres teilweise abnimmt, nimmt auch der mittlere Tidenhub mit der Zeit zu. An den Pegeln, an denen das Tideniedrigwasser sinkt, ist die Zunahme des Tidenhubs besonders deutlich. Im Mittel über alle Pegel beträgt die Zunahme des Tidenhubs 26,5 cm / 100 Jahre (Jenning und Schüttrumpf, 2012).

Tabelle 7-1: Linearer Anstieg seit 1935 von Tidekennwerten ausgesuchter Pegel (orange - positiver Anstieg; grün – negativer Anstieg; grau – sehr geringer An-/Abstieg)

Pegel	Anstiegsraten		
	<i>Thw</i> [cm / a]	<i>Tnw</i> [cm / a]	<i>Thb</i> [cm / a]
Borkum Südstrand (BORS)	0.23	0.12	0.21
Borkum Fischerbalje (BORF)	0.31	0.14	0.16
Emden Neue Seeschleuse (EMDN)	0.34	-0.26	0.59
Bremerhaven (BH)	0.24	-0.27	0.51
Leuchtturm Alte Weser (LHAW)	0.27	0.15	0.15
Cuxhaven (CUX)	0.27	0.08	0.18
Büsum (BU)	0.29	0.20	0.09
Helgoland (HELG)	0.26	0.03	0.22
Mittelwert	0.28	0.02	0.26

Für die Tidekennwerte T_f und T_e können nur geringe signifikante Veränderungen festgestellt werden. Teilweise ist eine Verkürzung der Flutdauer zu beobachten (etwa 1 %). An den drei Pegeln Bremerhaven, Emden Neue Seeschleuse und Leuchtturm Alte Weser tritt aber auch eine Verlängerung der Flutdauer auf. Im Mittel über alle Pegel wächst die mittlere Flutdauer mit der Zeit an (<1 %). Demzufolge nimmt die mittlere Ebbedauer mit der Zeit ab, da sich die Dauer der Tide insgesamt nicht verändert.

7.2.4 Phasenverschiebungen der Tidewelle in der Deutschen Bucht

Ein Anstieg des regionalen Meeresspiegels in der Deutschen Bucht hat zwangsläufig zur Folge, dass sich die Kelvinwelle der Tide schneller fortbewegt, d.h. es kommt zu einer Phasenverschiebung. Die Untersuchungen verwendeten wiederum das zuvor beschriebene Modalverfahren, das heißt es werden die berechneten Differenzen wie vorher die Tideparameter anhand ihrer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen dargestellt.

Die nachstehende Tabelle 7-2 fasst die Ergebnisse der untersuchten Phasenverschiebungen aus Jennings und Schüttrumpf (2012) zusammen. Die Angaben zeigen, dass zwischen allen Pegelkombinationen eine Verkürzung des Abstandes der Eintrittszeiten des Tidehochwasserstandes abzuleiten ist. Dieses deutet an, dass Tidewelle grundsätzlich zunehmend schneller durch die Deutsche Bucht läuft.

Tabelle 7-2 : Abgelesene Anstiege seit 19935 der Linearen Geraden der Differenzen der Eintrittszeiten Δt für Thw und Tnw und deren Mittelwert; Jennings und Schüttrumpf (2012)

Phasenverschiebung		Thw [s / d] / ([min / 100a])	Tnw [s / d] / ([min / 100a])
$t_{Pegel\ früh}$	$t_{Pegel\ spät}$		
BORF	EMDN	-0,0207 / (-12,57)	-0,0540 / (-32,87)
BORF	LHAW	-0,0052 / (-3,14)	-0,0373 / (-22,68)
LHAW	BH	-0,0231 / (-14,04)	-0,0622 / (-37,86)
LHAW	BU	-0,0404 / (-24,57)	0,0353 / (21,50)
LHAW	CUX	-0,0045 / (-2,72)	0,0345 / (21,00)

Zwischen den Pegeln Leuchtturm Alte Weser und Büsum bzw. Cuxhaven ist hingegen ein positiver Trend beim Niedrigwasser abzulesen. Das bedeutet, dass zwischen

diesen Pegeln eine wachsende Zeitdifferenz zwischen den Eintrittszeiten des niedrigsten Wasserstandes zu beobachten ist. Da über diesen Umstand zuvor noch nicht berichtet worden ist, zeigt auch, dass es noch Defizite in der Grundlagenforschung im Bereich der Deutschen Bucht gibt (Jenning und Schüttrumpf, 2012).

7.2.5 Bruchpunkte in den Zeitreihen der Tidekennwerte

Die Tabelle 7-3 fasst die Ergebnisse der Bruchpunktanalyse der Tidekennwerte, abgeleitet aus den Zeitreihen, noch einmal für alle acht ausgewählten Pegel zusammen. Aus den Untersuchungen ergeben sich in fast allen Zeiten Bruchpunkte. Diese treten zu verschiedenen Zeiten auf, was auf lokale Änderungen hinweist. Möglicherweise lokal durchgeführte Ausbaumaßnahmen im Pegelumfeld oder Veränderungen am Pegel selbst könnten die Ursache für viele Bruchpunkte sein.

Auffällig ist eine Anhäufung von Bruchpunkten in der Zeitspanne um 1979 bis 1980 im Thw sowie 1972 bis 1974 im Thb. Diese Häufung deutet auf eine natürliche übergeordnete Ursache dieser Bruchpunkte hin. Ein weiterer Hinweis auf diesen besonderen Bruchpunkt wurde bei Untersuchungen des Abflusses am Pegel Intschede gefunden (Jenning und Schüttrumpf, 2014). Auch in der Abflusszeitreihe ist im Jahr 1979 ein signifikanter Bruchpunkt.

Tabelle 7-3: Zusammenfassung des Zeitpunktes, Anzahl Jahre und Jahre von detektierten Bruchpunkten 8 ausgesuchter Pegel (Jenning und Schüttrumpf, 2012).

Klimabedingt
veränderte
Tidekennwerte
und Seegangs-
statistik in den
Küstengewässern

Name Pegel (Abk.)	Thw	Tnw	Thb
Borkum Südstrand (BORS)	1965	1980	1972
Borkum Fischerbalje (BORF)	1980, 1987	-	1974
Emden Neue See- schleuse (EMDN)	1979	1970	1972, 1977
Bremerhaven (BH)	1979, 1993	1967, 1992	1992
Leuchtturm Alte Weser (LHAW)	1979	-	1965, 1972
Cuxhaven (CUX)	1960	1942	1974
Büsum (BU)	1977 - 1979	1980, 1987	1954
Helgoland (HELG)	1979-1980, 1986	1986	1973, 1974

7.3 Zukünftige Tidekennwerte an den Küsten und in den Ästuar

7.3.1 Zukünftiger Anstieg des Meeresspiegels

Zu Abschätzung des zukünftigen Tmw lassen sich zunächst die Messungen heranziehen. Aus der nicht-linearen Extrapolation aus Messwerten können -10 cm bis 30 cm bis 2100 (relativ zu 1981 -2000) ermittelt werden. Abbildung 7-19 zeigt den möglichen Verlauf der Anstiegsrate bis ins Jahr 2100. Eine Abschwächung des Meeresspiegelanstieges kann also nicht ausgeschlossen werden. Dieses muss allerdings als unwahrscheinlich angesehen werden (IPCC, 2007).

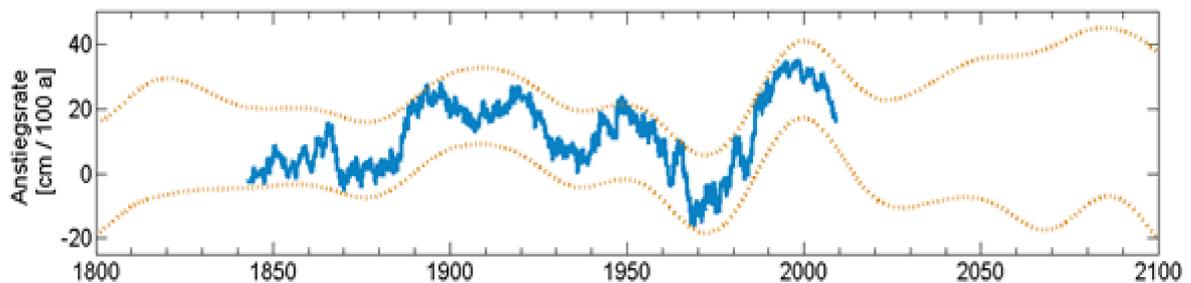


Abbildung 7-11 Klimabedingte Anstiegsrate Tidemittelwasser bis 2100 (aus Messungen , festes Referenzsystem)

Globale ozeanographische Modelle (wie MPIOM) sind volumenerhaltende Modelle, sie können den globalen Anstieg des Meeresspiegels aufgrund der thermischen Ausdehnung nicht abbilden. Darüber hinaus wird die Meeresspiegeländerung aufgrund der zunehmenden Frischwasserversorgung vom Abschmelzen des Grönland- und Antarktiseisschildes und des Verlustes der Landeismassen auch nicht im Modell eingespeist.

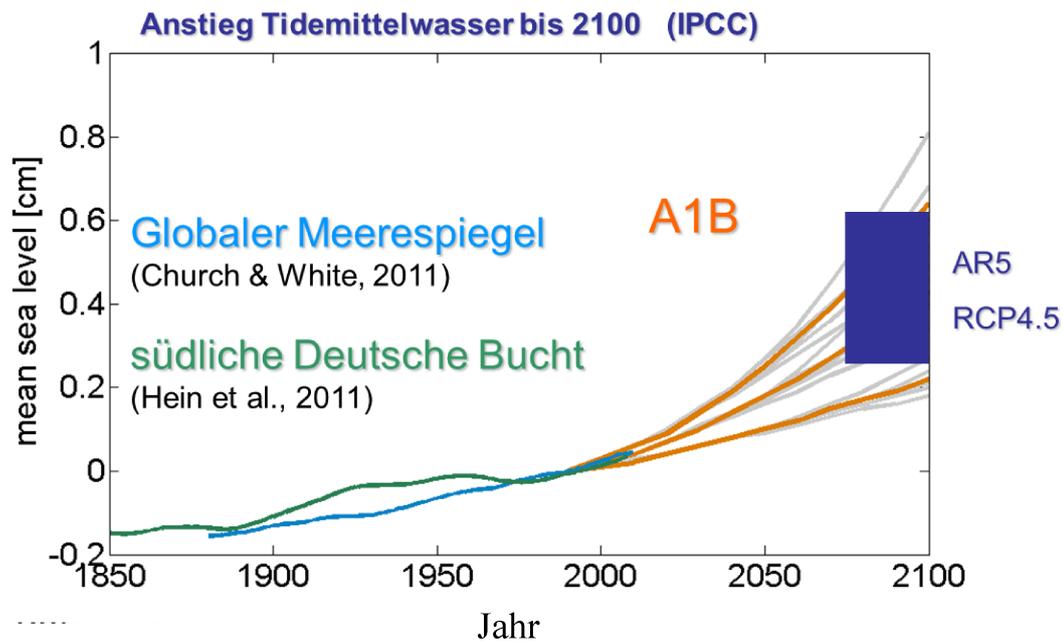


Abbildung 7-12: Abschätzung des globalen Meeresspiegelanstieges (orange). Aus Messungen (historisch); blau: global, grün: Deutsche Bucht (vgl. Abbildung 7-8).

Für die Simulationen von HAMSOM für KLIWAS 2.03 sind Schätzungen der für die verschiedenen Komponenten des globalen Meeresspiegelanstieges notwendig. Die Wertebereiche der zukünftigen Änderung des Tmw wurden auf Basis des aktuellen IPCC Report (IPCC, 2007) abgeschätzt. Die entsprechenden Zeitreihen können bei Mathies (2013) nachverfolgt werden.

In Abbildung 7-20 ist der Verlauf des Meeresspiegelanstieges aus dem IPCC Report zu sehen. Typischerweise werden hier ca. 20 cm bis 60 cm Anstieg des globalen Meeresspiegels bis 2100 im gängigen A1B Szenario (IPCC, 2007) genannt. Selbst diese breite Spannweite der zukünftigen Änderung ist unsicher. Für die Modelkette wurde der mittlere Verlauf der Spannbreite verwendet. Da mittlerweile der nächste IPCC Report (IPCC, 2013) veröffentlicht ist kann hier eine aktualisierte Einordnung gegeben werden. Aus Abbildung 7-20 (blauer Kasten) lässt sich erkennen, dass keine wesentlichen quantitativen Änderungen zum vorherigen Bericht (IPCC, 2007) vorliegen.

Für die Modelkette werden die Entwicklungen der Komponenten, anhand derer der rezente Meeresspiegelanstieg plausibel erklärt werden kann berücksichtigt. Dieses ist die thermische Ausdehnung flacher und tiefer Ozeanschichten. Die sterische Ausdeh-

nung wird aus der globalen Temperaturverteilung des globalen Ozeanmodells berechnet. Dieses ergibt einen Anteil von rund 60 % des gesamten Anstieges des Meeresspiegels. Hinzu kommt der Zufluss der schmelzenden der Eisschilder und Zufluss der schmelzenden Gletscher und Wassermengen von Land.

Die so berücksichtigten Komponenten ergeben für die Modellkette sich ein Anstieg des Meeresspiegels von etwa 50 cm für die ferne Zukunft am Rande der Nordsee (vgl. Matthies, 2013). Dieses entspricht etwa der Obergrenze der ursprünglichen Abschätzungen aus dem IPCC Bericht (IPCC, 2007). Die Abschätzung des IPCC schließt jedoch dynamisches Verhalten von Eisschilden aus. Wird diese Dynamik zusätzlich abgeschätzt liegt der Anstieg des Meeresspiegels der Modellkette bis in die ferne Zukunft im Mittel des Ensembles der Globalen Klimamodelle (vgl. Slangen et al. 2012).

Abbildung 7-21 zeigt den sich für die Untersuchungen ergebenden Verlauf des „Mean Sea Levels“, d.h. des 19-jährigen Mittels des Tidemittelwassers aus der KLIWAS-Modellkette für die deutsche Nordseeküste. Der Anstieg des Meeresspiegels der Modellkette hat demnach einen Wert von etwa 54 cm für die deutsche Nordseeküste. Der Unterschied zu den Randwerten ist nicht signifikant.

Die Kurven in Abbildung 7-19 und Abbildung 7-20 berücksichtigen die Anteile vom Abschmelzen von Gebirgsgletschern und von kontinentalen Eisschilden. Nur dann sind die Modellergebnisse mit den Pegelmessungen vergleichbar. Wenn nur durch die Erwärmung des globalen Ozeans und durch veränderte Windverhältnisse über der Nordsee verursachte Meeresspiegelanstieg betrachtet wird, erhält man nur akademisch relevante Ergebnisse.

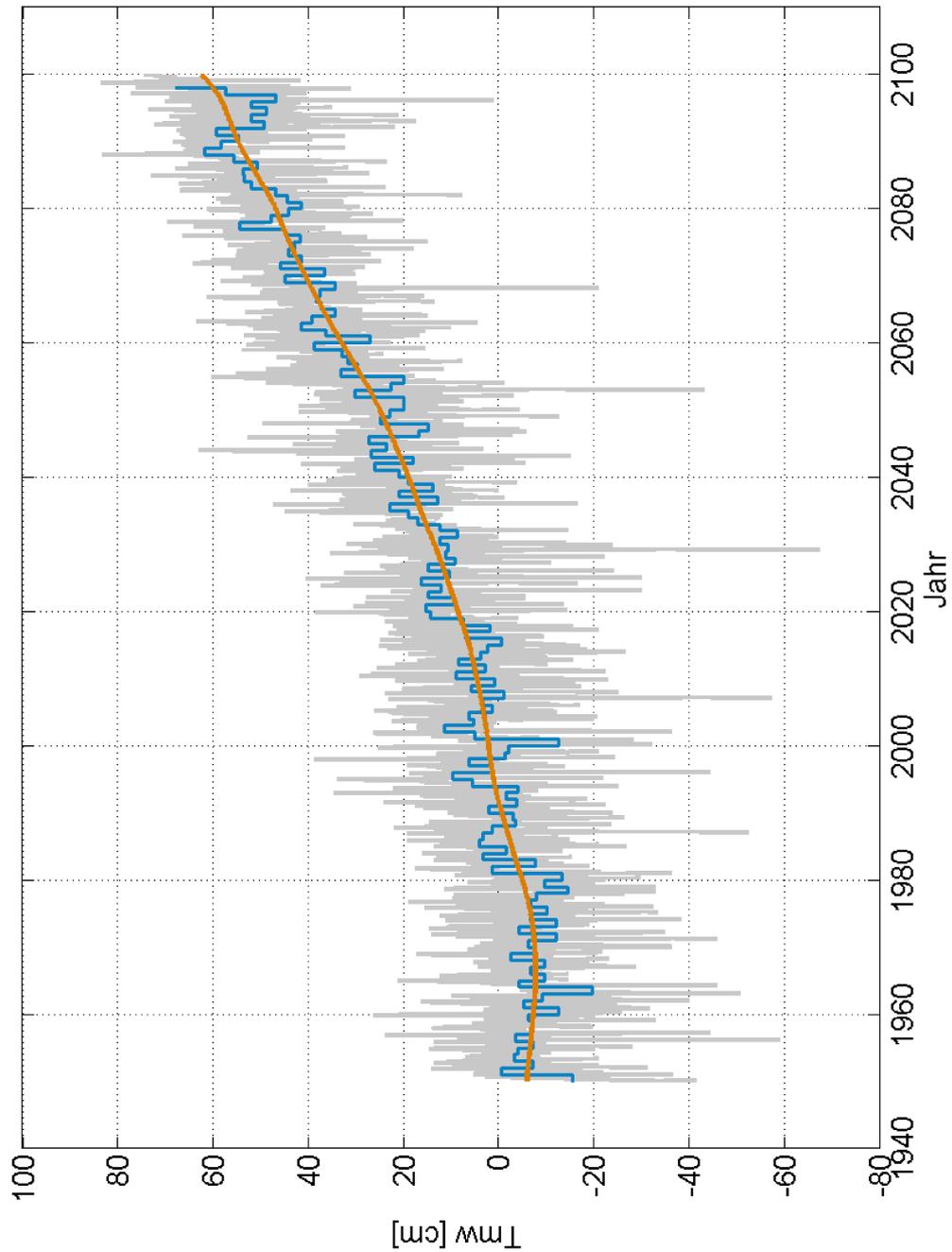


Abbildung 7-13: Abschätzung Meeresspiegelanstieges an der deutschen Nordseeküste aus der Modelkette; blau: Jahresmittel; orange: 19 jährliches Mittel.

7.3.2 Abgebildete Frequenzen der Variabilität der Modellkette

Sowohl hydrologische Parameter als auch ozeanographische Parameter unterliegen einer Variabilität auf quasi allen Skalen. Dieses ist ein Grund, warum die Abschätzung der Betroffenheit hinsichtlich des Klimawandels sehr komplex ist. Wenn bei der Untersuchung z.B. durch Modellierung nicht die wesentlichen Skalen abgedeckt sind, dann müssen die Ergebnisse wenigstens innerhalb der Variabilität eingeordnet werden.

Eine wichtige Aussage ist die Frage ob die Modellierung der Modellkette überhaupt die physikalisch inhärenten Langzeitprozesse wiedergeben kann. Abbildung 7-22 vergleicht die aus einer Wavelet-Transformation stammende Variabilität von Messungen und Modellierungen. Auf dem ersten Blick sind die Verläufe zwischen dem Hindcast und den Messungen gut vergleichbar. Das Klimamodel bildet ein ähnliches Schwingungsverhalten ab – jedoch phasenverschoben.

Wenn man einen objektiven Vergleich anstrebt, ist es eine Möglichkeit die einzelnen Skalen jeweils aus Messungen und Modellierungen miteinander mittels eines objektiven mathematischen Verfahrens zu verifizieren. Wegen der Nichtlinearitäten küstenhydrologischer Skalen wurde in KLIWAS 2.03 für die Verifizierung der *einzelnen* Skalen die sogenannte Transinformation verwendet.

Abbildung 7-23 zeigt das Ergebnis des Skalenvergleichs. Es zeigt sich das schon der *Hindcast* im Zeitbereich oberhalb von 100 Monaten nicht in der Lage ist die Variabilität abzubilden. D.h. die Variationen länger als die NAO wird nicht abgebildet. Diese Schwäche wurde mit einer Modelloptimierung mittlerweile behoben. Durch die Verwendung anderer ozeanographischer lateraler Randwerte wurde der langfristige Skalenbereich näher an die Messungen gebracht (Prozessoptimierung).

Die Modellkette, die das Klima abbildet zeigt gerade im wichtigen – wie im Kapitel 7.2.2 dargelegt –Skalenbereich der NAO erhebliche Defizite. Gut sind jedoch die typischen klimatischen Schwankungen zwischen 200 und 300 Monaten abgebildet. Dieses hat Auswirkungen auf die Ergebnisinterpretation. Nicht nur die aleatorische sondern auch der epistemische Unsicherheit gebietet einen vorsichtigen Blick auf Zeitspannen unterhalb von Klimaperioden.

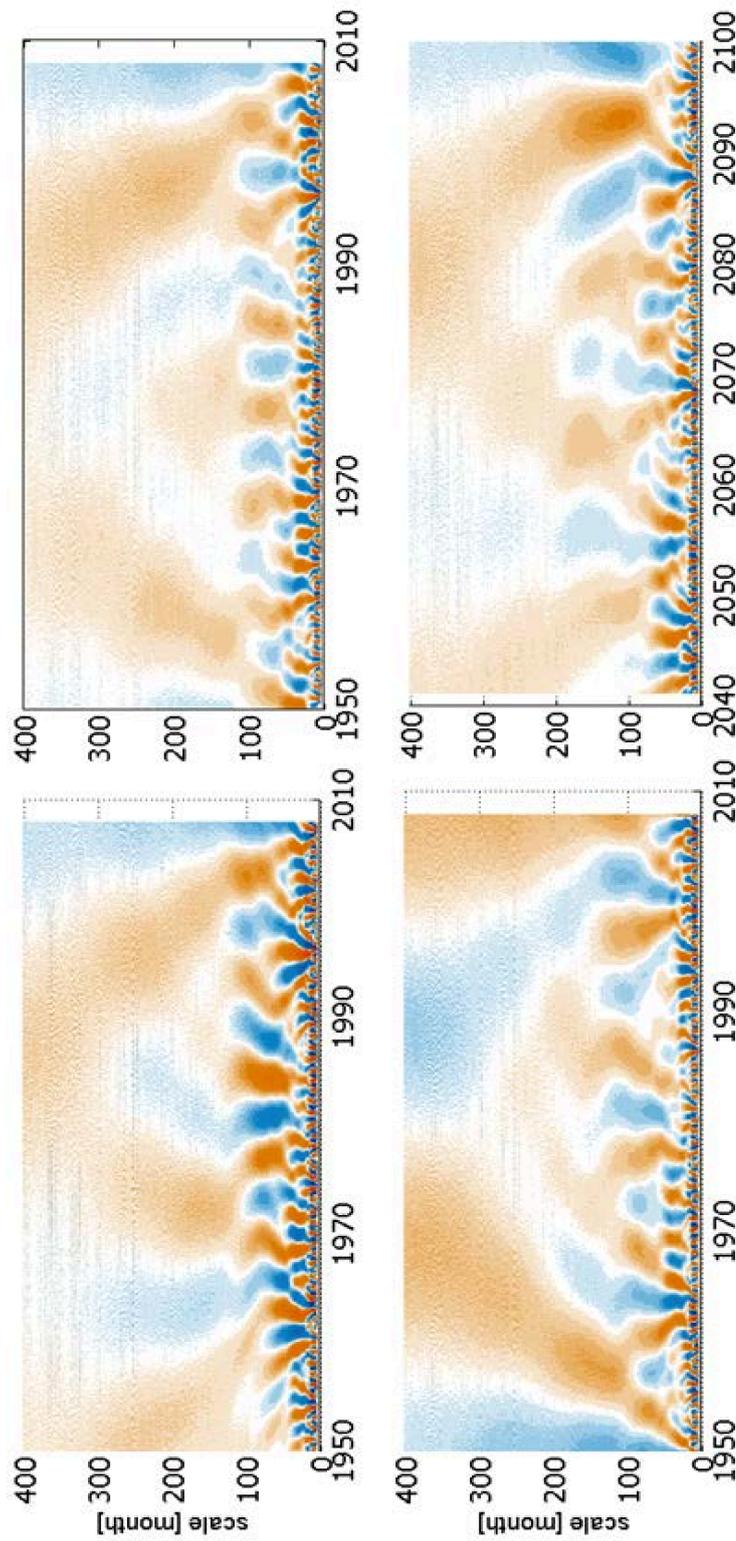


Abbildung 7-14: Multiskalenanalyse des Tidemittelwasserstandes: a) Messungen, b) Hindcastmodell, c) Klimamodel, d) Klimamodel (Zukunft); Hein et al. (2012d).

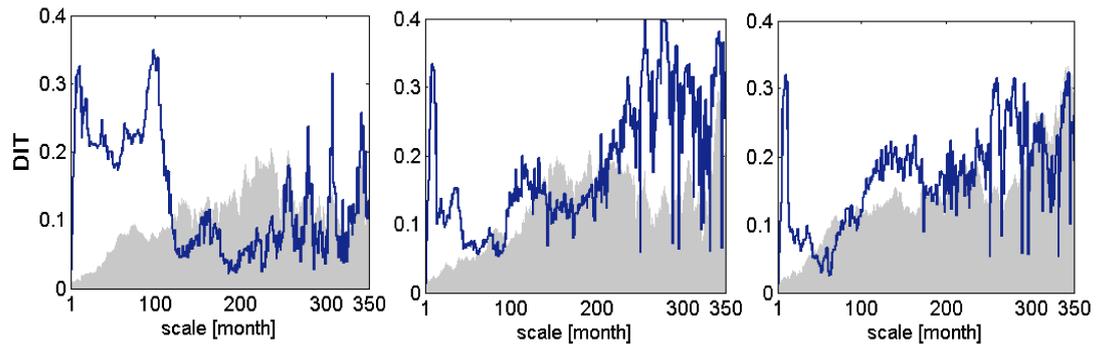


Abbildung 7-15: Transinformation aus der Multiskalenanalyse des Tidemittelwasserstandes:
a) Messungen vs. Hindcast, b) Messungen vs. Klimamodel, d) Messung vs. Klimamodel (Zukunft).
Grau: Messungen vs. weißes Rauschen; Hein et al. (2012d).

7.3.3 Zukünftige Tidekennwerte in der deutschen Bucht

Wie im Kapitel 7.4.2 dargestellt gibt es Schwächen der Modellkette in der Abbildung der Persistenz im Bereich der NAO typischen Skalen. Deshalb soll hier noch einmal der langfristige Verlauf des Thw der Modellkette mit dem Thw der Messungen verglichen werden. Abbildung 7-24 zeigt beide Zeitreihen. Der Trend der Modellkette entspricht dem der Messungen. Wie zu erwarten sind Zeiten mit größeren mittleren Hochwassern in der Modellkette jedoch verschoben.

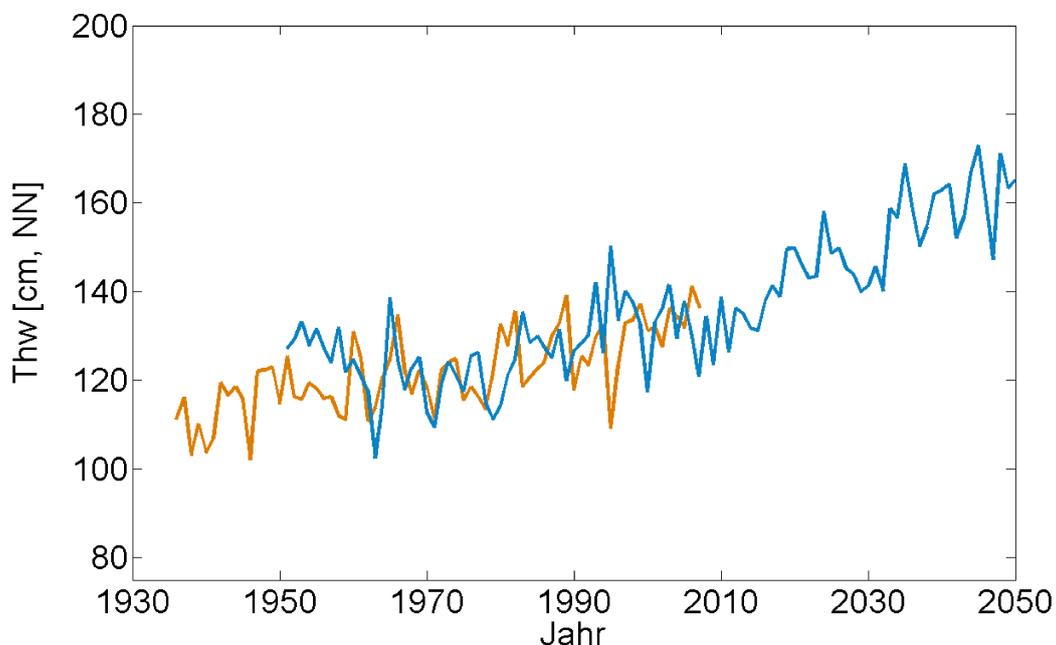


Abbildung 7-16 Validierung der Tidekennwerte am Beispiel mittleres jährliches Tidehochwasser in der deutschen Bucht am Beispiel Cuxhaven; orange: Messungen; blau: Modellkette.

Die Tabelle 7-4 fasst die mögliche zukünftige Entwicklung der Tidekennwerte am Pegelstandort Cuxhaven, unter Berücksichtigung des A1B Szenarios und entsprechenden Unsicherheiten, zusammen. Die Unsicherheiten liegen in der Größenordnung der Änderung. Mindestens ist jedoch weiterhin mit einem linearen Anstieg der Tide-

kennwerte, welcher in der Größenordnung des Anstieges der letzten 100 Jahre liegt, zu rechnen. Aber auch eine Verdreifachung der Anstiegsrate ist möglich. Weiterhin ist mit einem stärkeren Anstieges des mittleren Thw als des mittleren Tmw zu rechnen. Beim Tnw ist dieses umgekehrt. Deshalb kommt es auch zu einer weiteren Zunahme des Tidenhubes am Pegelstandort Cuxhaven. Die mittlere Flutzeitdauer wird sich weiter verkürzen.

Tabelle 7-4: Ergebnis der Modellkette: Mögliche Änderungen der Tidekennwerte am Pegelstandort Cuxhaven unter Berücksichtigung des A1B Szenarios.

Pegel Cuxhaven	Nahe Zukunft 2031 -2050	Ferne Zukunft 2081 -2100
	<i>[cm]</i>	<i>[cm]</i>
MTmw	10 - 20	20 - 55
MThw	10 - 22	22 - 60
MTnw	10 - 18	18 - 50
	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>
MThb	1 - 2	2 - 4
MTf	-1	-1 - -2

Die Ergebnisse des Pegels Cuxhaven lassen sich qualitativ, jedoch nicht quantitativ, auf die anderen Pegelstandorte übertragen. Es wäre jedoch auch möglich, zukünftig auch quantitative Aussagen für alle Nordseepegel zu treffen. Wegen des großen Umfangs an Pegelstandorten sollte dieses jedoch Projektgebunden unter Einbeziehung des Standes der Forschung geschehen.

7.3.4 Zukünftige Tidekennwerte im Elbeästuar

In KLIWAS 2.03 wird die Statistik der langfristigen Veränderung der zukünftigen Tidekennwerte in der Elbe vom Hamburger Hafen bis nach Cuxhaven auf Basis prozessorientierter Modellierungen abgeschätzt. Auf Grundlage der Abschätzungen des

Meeresspiegelanstieges des IPCC Reports (IPCC, 2007) kann unter Angabe der Unsicherheit der derzeitige Stand des Wissens auf die Elbe übertragen werden.

In Abbildung 7-25 ist die mögliche zukünftige Änderung der Tidekennwerte Thw, Tnw und Thb im hydrologischen Längsschnitt zu sehen. Es zeigt sich ein vergleichsweise geringer und linearer Anstieg in der nahen Zukunft. Nur beim Tidenhub kann es zur Änderung der Tidenhubmaxima im Elbeästuar kommen.

Für die ferne Zukunft zeigt sich, dass in Richtung des Hamburger Hafens das Thw etwas stärker ansteigt als an der Küste. Umgekehrt sieht es beim Tnw aus: hier nimmt das Tnw in Richtung Hamburger Hafen weniger zu als an der Küste. Damit ergibt sich das in Richtung Hamburger Hafen der Tidehub stärker zunimmt als an der Küste.

Auffällig ist, dass die Änderung des Thb keinesfalls linear verläuft. Dadurch kommt es zur Änderung der Tidenhubmaxima im Elbeästuar. Die Ergebnisse bestätigen die Ergebnisse von Seifert et al. (2014). In Seifert et al. (2014) werden die Nordseeästuarre mit hochauflösenden für wasserbauliche Zwecke optimierte numerischen Modelle mittels Sensitivitätsstudien auf kurzen Zeitspannen untersucht. Wie wasserbaulich üblich wird dabei ein High-End-Szenario, welches einen Anstieg von 80 cm Anstieg des Tidemittelwassers in der Nordsee annimmt verwendet.

Der Verlauf der Veränderung entlang des Elbeästuars (Abbildung 13a in Seifert et al. (2014)) zeigt wie in dieser Studie eine Zunahme des Tidehochwassers und eine Abnahme des Tideniedrigwassers und damit eine Zunahme des Tidenhubs. Unterschiede zu der Studie des Projektes 2.03 ergeben sich daher, dass das Elbmodell bei uns die Randwerte aus einem Nordseemodell bekommt, d.h. die ermittelte Tidenhubänderung von bis zu 4 % wird mit berücksichtigt.

Durch die Verwendung der Modellkette und einer damit berücksichtigten veränderten Dynamik der Nordsee, scheint die Änderung der Tidekennwerte größer auszufallen, als bei Verwendung von idealisierten Sensitivitätsstudien. Zusätzlich ermöglicht die Langzeitmodellierung eine Berücksichtigung des Nodaltidezykluses, welches in der Abschätzung von Trend der Wasserstände als gute wissenschaftliche Praxis angeführt wird (Baart et al. 2012a, b).

Änderung Tidekennwerte (Elbe) in der nahen Zukunft und fernen Zukunft

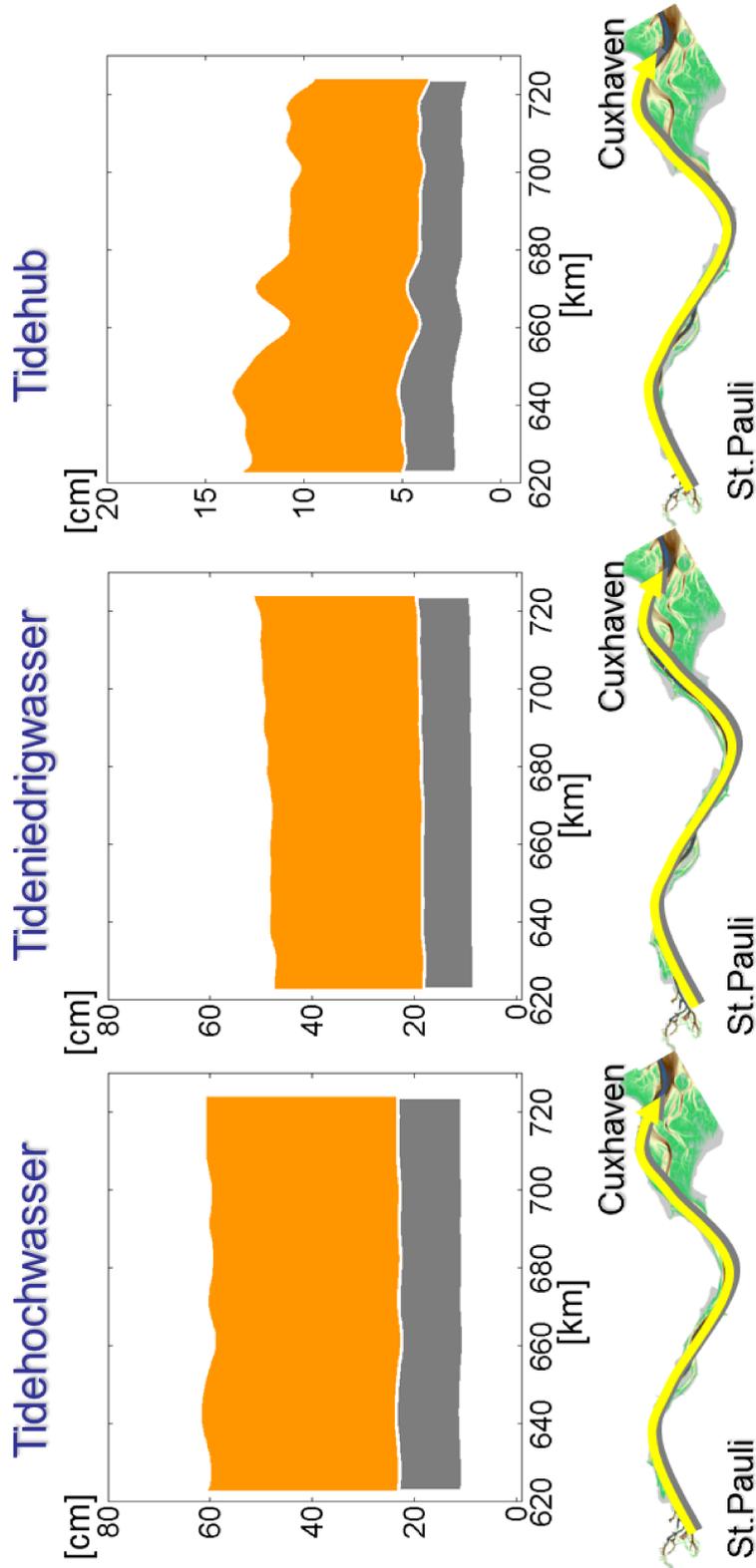


Abbildung 7-17: Änderungen der Tidekennwerte im Elbeästuar.

7.3.5 Modellierung der Strömung an der Vegetationsgrenze der Unterelbe

Klimabedingt
veränderte
Tidekennwerte
und Seegangs-
statistik in den
Küstengewässern

Der integrale Ansatz von KLIWAS benötigt den Austausch von *Informationen* zwischen den einzelnen Fachdisziplinen. Eine einfache Datenübergabe reicht meist nicht, da räumliche und zeitliche Skalen unterschiedlich sind. Deshalb sind Daten und ihre inhärenten Unsicherheiten, im semantischen Zusammenhang der einzelnen Fachdisziplinen zu diskutieren. Neben dem Bereich der Sauerstoffmodellierung ist dieses vor allem im Bereich der Vegetationsmodellierung erfolgt. Abbildung 7-26 zeigt die beiden Untersuchungsgebiete für die Vegetationsmodellierung, näheres zu dieser kann bei Bauer et al. (2014) nachgelesen werden. Die Abbildung 7-27 zeigt Hauptwerte der Strömungen aus einem Hindcast zur Kalibrierung der Vegetationsmodellierung.

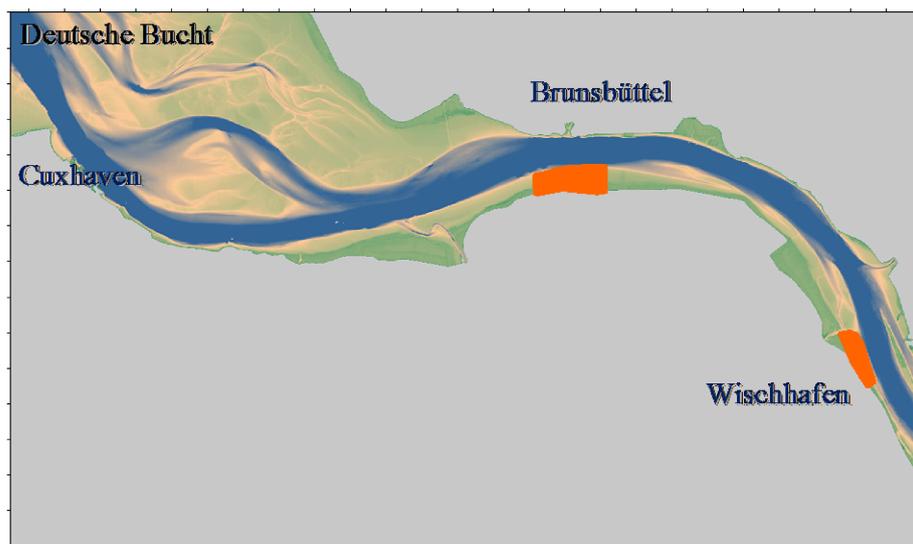


Abbildung 7-18: Untersuchungsgebiet der Vegetationsmodellierung an der Unterelbe (orange; Elbe km 675 und km 700).

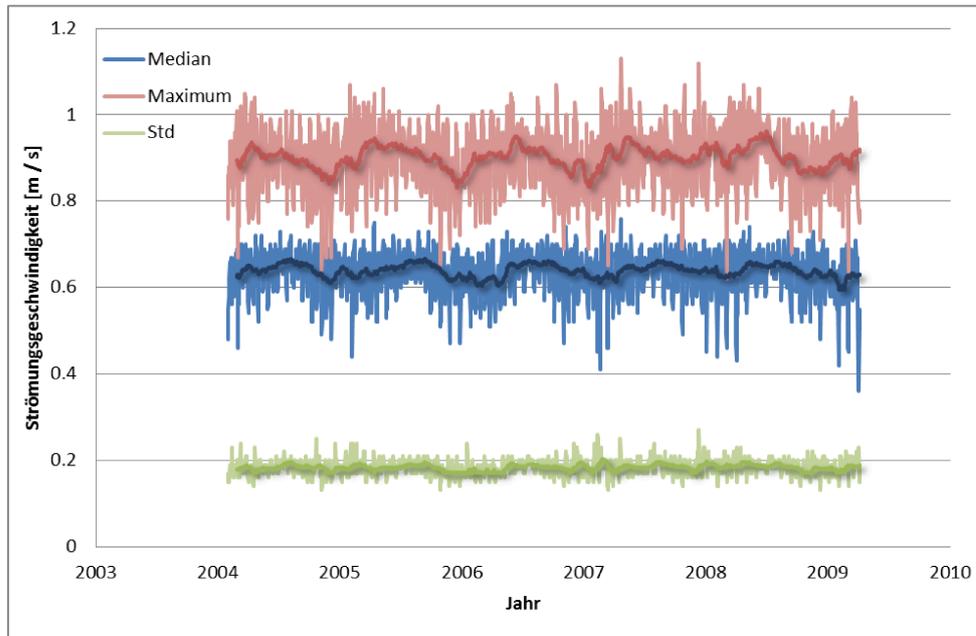


Abbildung 7-19: Strömungsinformation an einem Punkt als Grundlage der Vegetationsmodellierung.

7.4 Küstenhydrologische Prozesse

7.4.1 Periodizität von Tidekennwerten

Es wurde der Einfluss der Gezeiten und anderer fester Perioden auf die Tidekennwerte untersucht. Gemeint sind in diesem Kapitel nicht die typischen Partialtiden, die ein- bis zweimal Täglich oder öfter auftreten, sondern diejenigen Periodizitäten die in den Tidekennwerten zu finden sind.

Die größte Periodizität in der Zeitreihe des Tideniedrigwassers liegt bei etwa 18,5 Jahren, was in etwa der Periode der bereits vorgestellten Nodaltide entspricht. Generell ist die Nodaltide im Hochwasser nicht so ausgeprägt. Die Maximale gefundene Periodizität in der Zeitreihe des Tidehochwassers liegt bei 76,9 Jahren. Die Ergebnisse der Spektralanalyse von Jahresmittelwerten für Thw und Tnw zeigen insgesamt ein unterschiedliches Verhalten (Jenning und Schüttrumpf, 2012).

Die maßgebenden Gezeiten in den Zeitreihen sind oft dieselben, aber die Sortierung der einzelnen Perioden ist Unterschiedlich (Jenning und Schüttrumpf, 2012). Der Spring-Nipptide Zyklus (Periode 14,77 Tage) ist an allen Pegeln deutlich zu erkennen. Aber auch die vierzehntägige Gezeit M_f (Periode 13,66 Tage) sowie die monatlich Gezeit M_m (Periode 27,55 Tage) sind in allen Periodogrammen der Tageswerte unter den stärksten vier Gezeiten. Die viertstärkste Gezeit ist nicht an allen Pegeln gleich und somit gebietsabhängig (Jenning und Schüttrumpf, 2012).

7.4.2 Zukünftige Entwicklung der Gezeiten an der Mündung der Elbe

Im Kapitel 7.2.2 wurde ein stark nichtlinear historischer Verlauf des Tidenhubes aufgezeigt. In Kapitel 7.4.3 konnte dieses auch für den zukünftigen Verlauf des Tidenhubes gezeigt werden. Eine Begründung für diesen Verlauf sind möglicherweise sich ändernde Gezeiten. Müller et al. (2011) zeigen das in den letzten Dekaden sich die Gezeiten grundlegend geändert haben. Unsere Untersuchungen bestätigen dieses Verhalten auch für die südliche Deutsche Bucht.

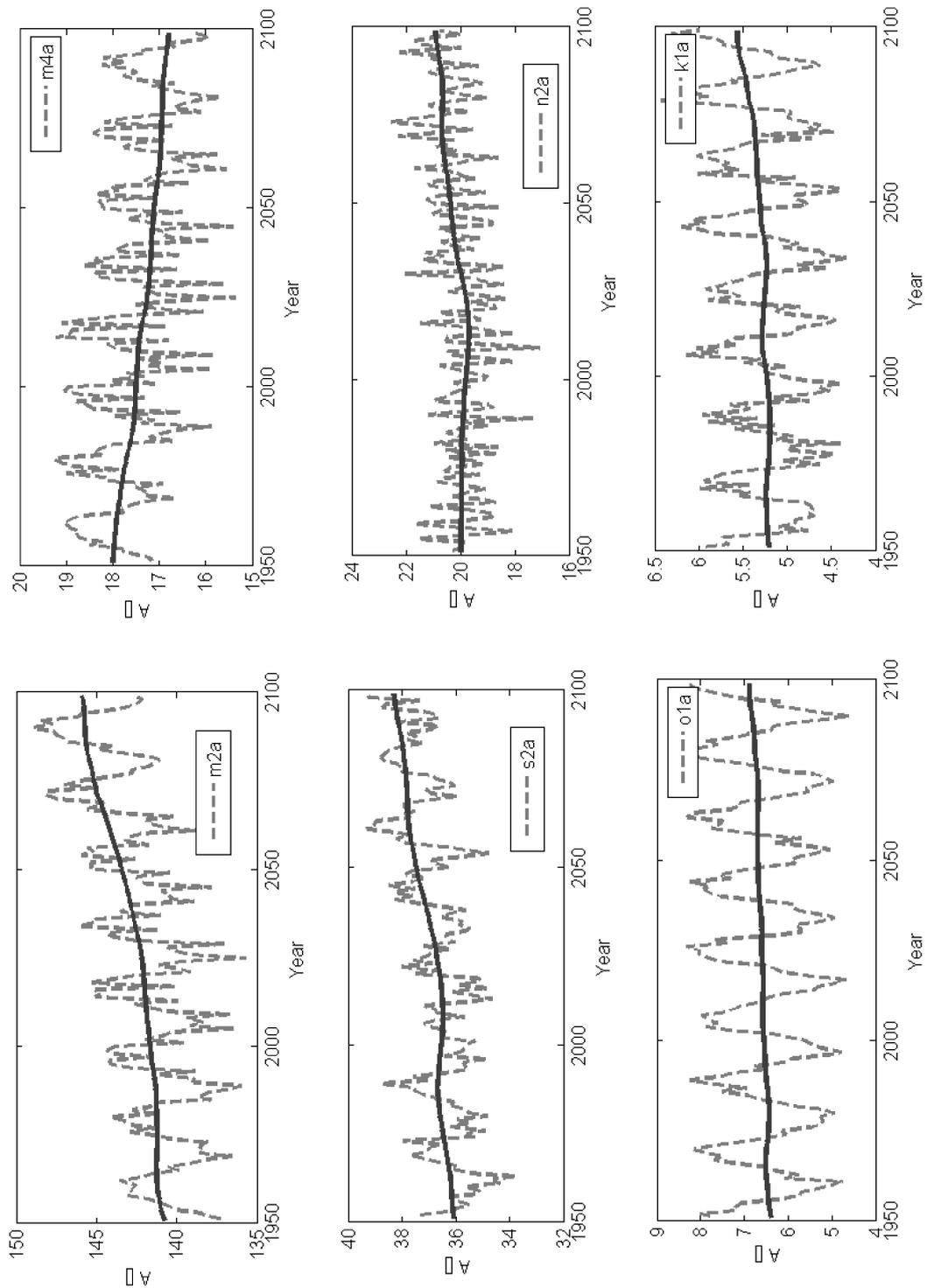


Abbildung 7-20: Veränderung von sechs wesentlichen Komponenten der Gezeiten in der Elbembündung (Hein et al. 2014b).

Im Kapitel 7 und 9 wurde ein stark nichtlinear zukünftiger Verlauf des Tidenhubes aufgezeigt. Eine Begründung für diesen Verlauf sind möglicherweise sich ändernde Gezeiten. Die Ergebnisse einer harmonischen Analyse der Modellkette (Abbildung 7-28) zeigen eine Zunahme der M2-Gezeit in der Größenordnung der Nodaltide (Hein et al. 2014b). Dagegen nimmt die M4-Gezeit etwas ab. Generell ist aber eine Zunahme der Amplituden zu erkennen. Dieses bedeutet eine insgesamt höhere Strömungsdynamik in der südlichen Deutschen Bucht mit Implikationen für den Sedimenttransport (vgl. Gräve et al. 2014).

7.4.3 Zukünftige Entwicklung der Gezeiten im Elbeästuar

Im Verlauf des Elbeästuars von St. Pauli bis Cuxhaven, zeigt sich insgesamt, dass die Änderungsrate etwas geringer wird, je weiter die Gezeiten im inneren des Ästuars betrachtet werden.

Die Phasen der Partialtiden verschieben sich ähnlich wie die Amplitude, mit der Ausnahme, dass kurz vor dem Hamburger Hafen eine sprunghafte Veränderung entsteht. Beides die Veränderung der Amplitude und der Phase der einzelnen Partialtiden führt zu einer sehr nichtlinearen Veränderung der Tidekennwerte im Verlauf des Elbeästuars. Deshalb sind Aussagen wie etwa, wenn der Meeresspiegel um x cm steigt ändern sich die Tidekennwerte um den Betrag y nicht möglich.

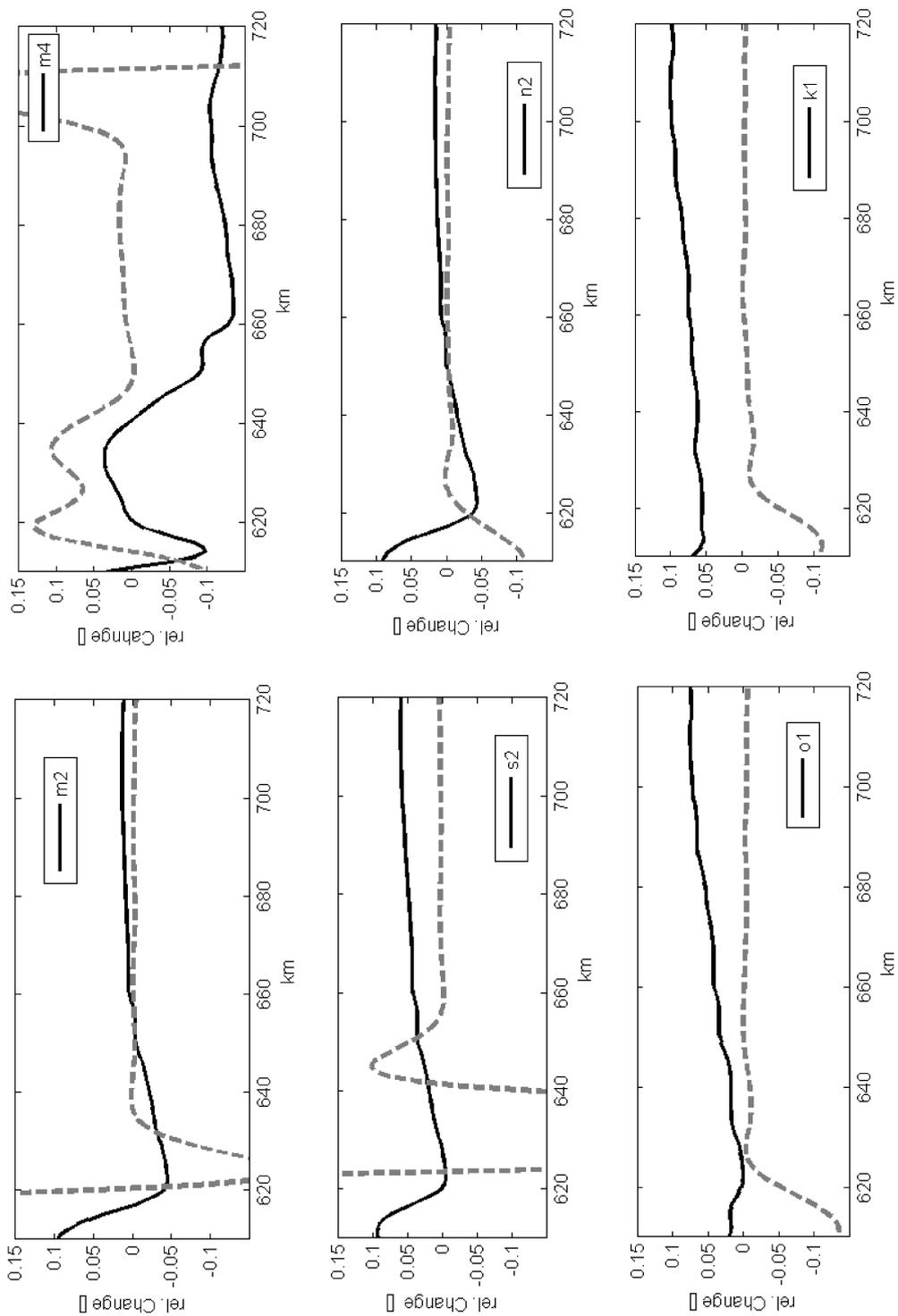


Abbildung 7-21: Veränderung von sechs wesentlichen Komponenten der Gezeiten im Elbeästaur (Hein et al. 2014b).

7.5 Seegang

An der Küste liegen bezüglich des Seegangs keine Messreihen vor, die lang genug sind, um klimatische Aussagen treffen zu können. Zunächst gab es möglicherweise keine technischen Möglichkeiten. Als diese vorhanden waren (Barjenbruch und Wilhelm, 2008), wurde der Seegang trotzdem nur an wenigen Standorten kontinuierlich gemessen. Dennoch können aus der Analyse von ausgewählten Zeitabschnitten Aussagen getroffen werden.

Abbildung 7-30 zeigt die Eingangsdaten und die Validierung des statistischen Wellenmodells. Auffällig ist die Breite des Konfidenzintervall. Diese zeigt die aleatorische Unsicherheit. Diese repräsentiert eine starke Variabilität der Parameter im Bereich unterhalb einer Woche. Insgesamt kann das statistische Modell die signifikante Wellenhöhe H_s recht gut abbilden.

Da die Messstelle sich in der Mündung der Weser befindet, könnte durch die Bedeutung der Tide die Wind-Strömungsinteraktion relevant sein. Hein et al. (2010b) und Hein et al. (2011f) konnten für das Gebiet der Außenems einen Einfluss der Strömung auf die Wellen nachweisen. Darüber hinaus ist die Wassertiefe an der Messstelle (ca. 11 Meter) erheblich von der Tide beeinflusst. Aufgrund der Komplexität der beteiligten Prozesse, eine deterministische Berechnung der Wellenhöhen fast unmöglich (Rütten et al., 2012).

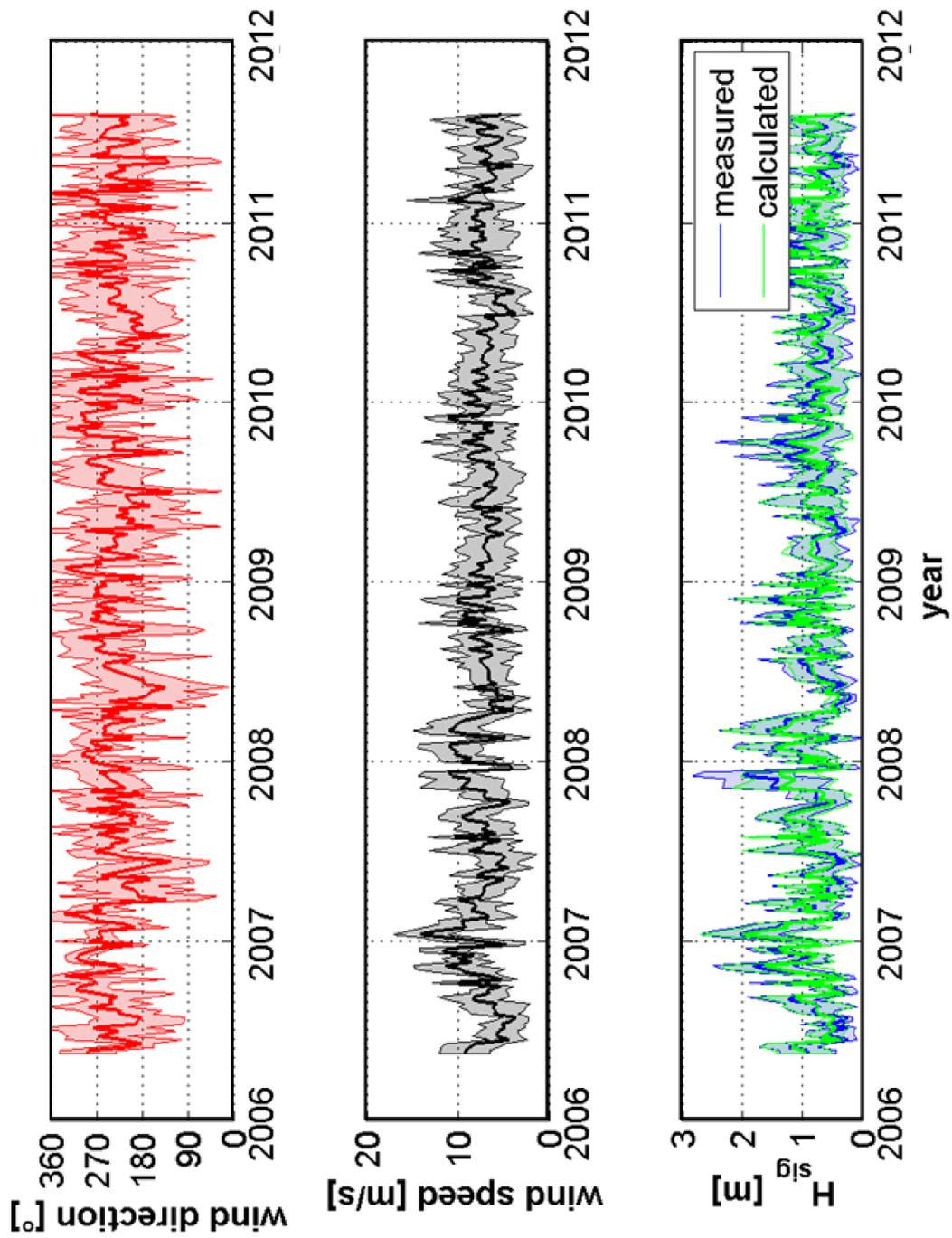


Abbildung 7-22: Illustration der mittleren (Mittelungsgröße: 1 Woche) Windrichtung (a), Windgeschwindigkeit (b), und signifikanten Wellenhöhe (c) für den Pegel LT Alte Weser. Die schattierten Bereiche zeigen die Standardabweichung.

In einem ersten Schritt wurde eine auf dem sogenannten „Quantil-Mapping“ basierende Bias Korrektur für den Standort Leuchtturm Alte Weser mit den gemessenen Wind-Statistiken für das globale Klimamodell angebracht. Damit können Überschreitungswahrscheinlichkeiten von Windgeschwindigkeiten und durch Anwenden der Übertragungsfunktion wurden Wellenhöhen berechnet.

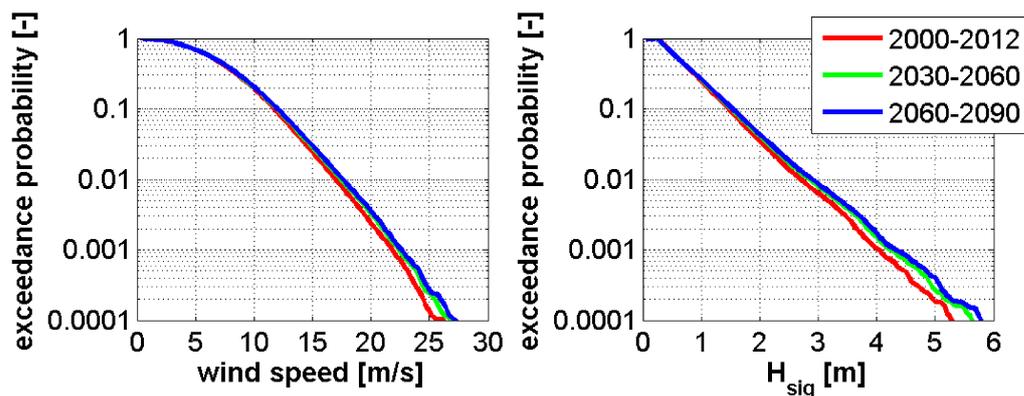


Abbildung 7-23: Veränderung der Überschreitungswahrscheinlichkeit von Windgeschwindigkeit und Signifikanter Wellenhöhe.

Insgesamt lässt sich eine Zunahme von Windgeschwindigkeiten und signifikanten Wellenhöhen feststellen (Abbildung 7-31). Man muss jedoch im Hinterkopf behalten, dass die Unsicherheit der Verteilung der Windgeschwindigkeit aus der Modellkette zu große Unterschieden in den Ergebnissen führen (Rütten et al., 2012). Mai und Zimmermann (2004) untersuchte ein Klima-Szenario für das Jahr 2050 etwa 50 km östlich von der Position LT Alte Weser. Sie stellten eine Erhöhung des 99%-Quantils der signifikanten Wellenhöhe von 0.4cm / Jahr fest, diese Werte sind vergleichbar mit den Ergebnissen dieser Studie.

Eine weitere Möglichkeit ist es signifikante Wellenhöhen mit parametrischen Seegangsmodellen abgebildet werden (Mai, 2008, Hein et al., 2010b). Erste Untersuchungen für die deutsche Küste liegen vor (Hein, 2011c). Daraus lässt sich ableiten, dass alle Parameter, die mit dem Wind direkt zusammenhängen (u. a. Seegang, Wasserstände), über lange Zeiträume betrachtet werden müssen, um belastbare Aussagen über die mögliche Betroffenheit durch Klimaveränderung treffen zu können.

Das Ergebnis der in Kapitel 4.5 beschriebenen Modellkette für den Seegang wurde am Beispiel eines Gebietes nahe Wischhafen hinsichtlich der Maximalwerte der H_s (signifikante Wellenhöhe) untersucht (Hein et al. 2013g). Abbildung 7-32 zeigt die monatliche, jährliche und 19 jährliche Maximale signifikante Wellenhöhe an diesem Punkt im zeitlichen Verlauf. Insgesamt ist kein Trend festzustellen. Bei den maximalen 19 jährigen Wellenhöhen ist in Zukunft ein scheinbar höheres Niveau sehen.

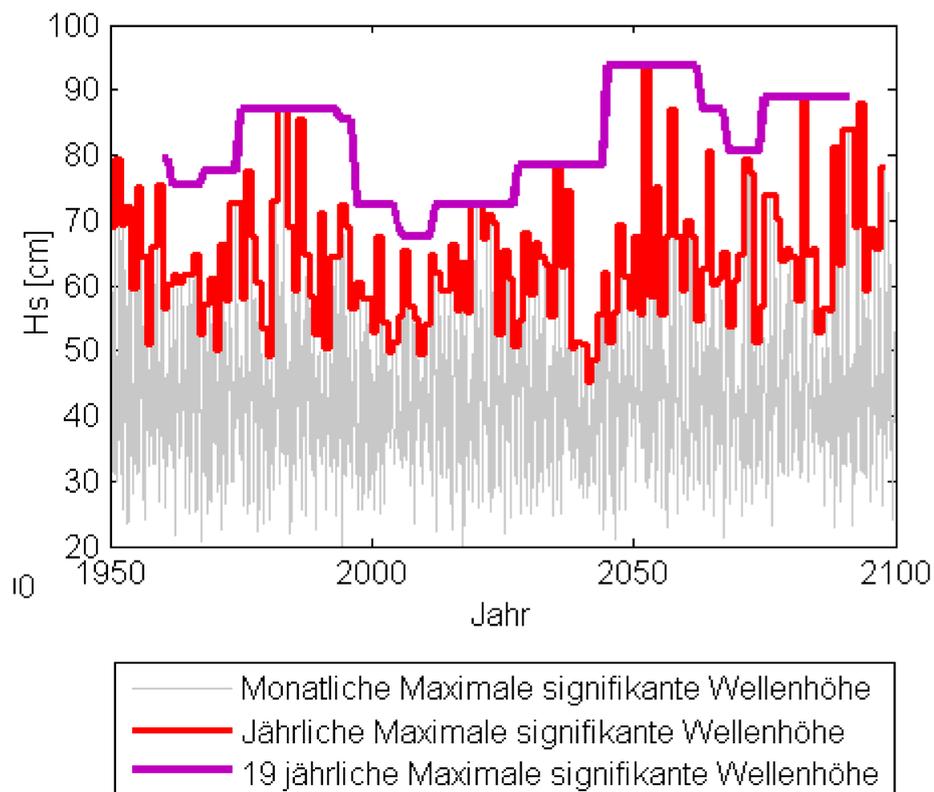


Abbildung 7-24: Maximale signifikante Wellenhöhen in der Unterelbe im Testgebiet Wischhafen (Hein et al. 2013g).

8 Kernaussagen zu den Ergebnissen

- Mögliche Auswirkungen des Klimawandels sind im küstenhydrologischen Gesamtsystem zu betrachten.
- Es ist grundsätzlich notwendig ein besseres regionales küstenhydrologisches Prozessverständnis herbeizuführen.
- Heutige Abschätzungen der Veränderungen sowie zukünftige Messwerte und Klimamodelle (Modellketten) sind in den nächsten Jahren und Dekaden kontinuierlich zu verifizieren und zu analysieren.
- Die Anpassung an den möglichen Klimawandel verlangt eine unaufgeregte aber kontinuierliche, wissenschaftliche und küstenhydrologische Begutachtung.

8.1 Daten und Qualität

- Die Anforderung an die Qualität der Messwerte ist für die Analyse von Auswirkungen des Klimawandels besonders hoch; die Homogenität der Daten ist festzustellen.
- Mögliche Unsicherheiten müssen dokumentiert werden und Verfahren zur automatischen Qualitätssicherung müssen (weiter-) entwickelt werden.
- Die Digitalisierung historischer Pegelmesswerte ist eine mögliche Methode um Unsicherheiten zu bestimmen und ein vertieftes Prozessverständnis herbeizuführen.
- Zum ersten Mal liegt ein numerisches Modellsystem vor, welches in der Lage ist mit hinreichender Genauigkeit die physikalischen Prozesse auf Zeitspannen von Dekaden abzubilden.

8.2 Historische Änderung der Tidekennwerte

- In der südlichen Deutschen Bucht betrug in den vergangenen 100 Jahren der mittlere Anstieg des mittleren Tmw **1,1 mm/Jahr bis 1,9 mm/Jahr** - ohne den Einfluss von Landsenkungen. Nimmt man den Einfluss von Landsenkungen hinzu liegt dieser Wert bei 1,6 mm/Jahr bis 2,9 mm/Jahr.
- Die regionale historische Änderung des Tmw (ohne Landsenkung) in der südlichen Deutschen Bucht fällt geringer aus als der globale historische Meeresspiegelanstieg der 1,4 mm / Jahr bis 2 mm / Jahr (Church, White, 2006).
- Eine Beschleunigung des Meeresspiegelanstieges in der Deutschen Bucht in den letzten 100 Jahren ist nicht nachweisbar.
- Das Thw steigt bei den meisten Pegelstandorten in der Deutschen Bucht stärker an als das Tmw - beim Tnw ist dieses meistens umgekehrt.
- Allgemein nimmt der Thb zu.
- Je nach Standort verlängert sich die Flutdauer und verkürzt sich die Ebbdauer (z. B. Pegel Bremerhaven und Emden) - oder umgekehrt (z. B. Pegel Buisum und Cuxhaven).

8.3 Zukünftige Änderung der Tidekennwerte

- Die Wertebereiche der zukünftigen Änderung des Tmw lassen sich mittels des aktuellen IPCC Report (IPCC, 2007/ IPCC, 2013) abschätzen: ca. 20 cm bis ca. 60 cm Anstieg des globalen Meeresspiegels bis 2100 im gängigen A1B Szenario.
- Die Modellkette zeigt in Zukunft eine verstärkte Zunahme des Thb.
- Für Tidekennwerte lassen sich keine *allgemeingültigen* flächenhaften Aussagen zu möglichen Veränderungen durch den Klimawandel treffen. Vielmehr muss zukünftig projiziert eine individuelle Betrachtung erfolgen.

- Ergebnisse der Modellkette zeigen für die Zukunft eine verstärkte Änderung der Partialtiden und somit eine weitere räumlich inhomogene Änderung der Tidekennwerte.

Klimabedingt
veränderte
Tidekennwerte
und Seegang-
statistik in den
Küstengewässern

8.4 Variabilität

- Die Variabilität der Wasserstände auf verschiedenen Zeitskalen ist bei der Betrachtung des Klimawandels mit einzubeziehen. Zeitreihen der gemessenen Tidewasserstände zeigen Variabilitäten in kurzen und langen Zeitskalen.
- Es kann ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Tmw und der Nordatlantischen Oszillation festgestellt werden. Das Tmw unterliegt einer Saisonalität.
- Für belastbare Aussagen über Veränderungen der Tidekennwerte ist immer mindestens ein Nodaltidezyklus (18,61 Jahre) einzubeziehen.
- Die Berücksichtigung von Variabilitäten gilt nicht nur für klimatologische Fragestellungen. Bei allen Betrachtungen der Veränderung des küstenhydrologischen Systems ist die aufgeführte Variabilität zu beachten.

8.5 Seegang

- Es liegen nur einzelne kontinuierliche Seegangsmessungen vor.
- Derzeitige Formeln zur Bemessung von Seebauwerken auf Seegang unterschätzen zum Teil die bemessungsrelevante Wellenhöhe.
- Transferfunktionen zwischen Wellenmessungen oder Modellrechnungen und Windmessungen können erstellt werden. In Verbindung mit der Modellkette sind diese geeignet den Einfluss der Klimaänderung auf das Wellengeschehen hinreichend genau abzubilden.

- Für die Zukunft sind keine oder nur geringe signifikante Änderungen bei der Statistik des Seegangs nachzuweisen.

9 Betroffenheit des Systems Wasserstraße

Die für die nahe Zukunft projizierten Änderungen lassen erwarten, dass zunächst kein direkter Handlungsbedarf hinsichtlich der Änderung der Tidekennwerte und der Seegangstatistik bei dem zu erwartenden Klimawandels besteht.

Die für die ferne Zukunft projizierten Änderungen lassen erwarten, dass alle Tidekennwerte sich signifikant durch den Klimawandel ändern und zwar nicht linear und regional unterschiedlich. Beim Seegang ist derzeit auch in der fernen Zukunft nur eine geringe Änderung zu erwarten.

Die direkte Betroffenheit des Systems Wasserstraße und des operativen Geschäfts der WSV, wie beispielsweise die hydrologischen Grundlagen des Sedimentmanagement, müssen hinsichtlich der Änderung der Tidekennwerte und der Seegangstatistik im Einzelfall einer Maßnahme abgeschätzt werden.

Insgesamt leiden die Aussagen zur Betroffenheit auch heute noch unter den enormen Unsicherheiten der Modellkette. Es ist noch erheblicher Erkenntnisgewinn der Grundlagenforschung notwendig, um gesicherte Aussagen treffen zu können.

10 Anpassungsoptionen und Handlungsempfehlungen

Als Antwort auf den Klimawandel und unter Berücksichtigung der Analyse der Betroffenheit (siehe oben) zeigen die Untersuchungen aktuelle Handlungsempfehlungen auf. Angelehnt an international verbreitete Anpassungsmaßnahmen anderer Länder (z.B. Niederlande, Australien) wird ein sogenannter Anpassungskreislauf empfohlen.

Anpassungsoption: Adaptive Management Framework

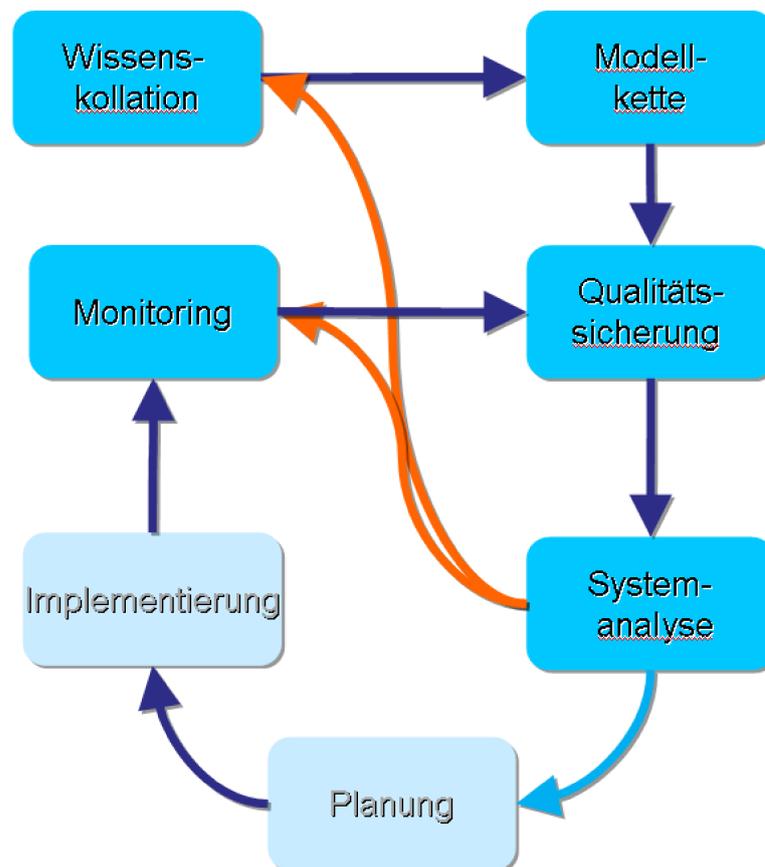


Abbildung 10-1: Anpassungskreislauf

Der Anpassungskreislauf setzt sich im Wesentlichen aus den vier Punkten Monitoring, Wissenskollation, Qualitätssicherung und Systemanalyse zusammen. Als Ergebnis der Systemanalyse kann darüber entschieden werden, ob geplant werden muss oder ob weiterhin nur die Beobachtung der hydrologischen Parameter von Bedeutung ist. International sind 5-jährige Zeitspannen für die Überprüfung verbreitet.

10.1 Messen / Monitoring

Um belastbare Aussagen über zukünftige Trends der Tidekennwerte und der Seegangstatistik treffen zu können, müssen wir diese in hinreichender zeitlicher und räumlicher Auflösung erfassen. Historische hydrologische Daten liegen noch umfangreich in analoger Form vor. Es wird dringend empfohlen diese Daten durch Digitalisierung der Analyse Verfügbar zu machen.

Die natürliche Variabilität der hydrologischen Parameter in den Ästuare ist so groß, dass die Veränderungen durch die lokalen anthropogenen Anpassungen zur Optimierung der Wasserstraßen schwer beurteilbar bleiben. Es sollten Zeitspannen von mindestens **19 Jahren** in Messkampagnen verwendet werden.

Es wird empfohlen, dass das operationale hydrologische Messnetz der WSV in der derzeitigen Form weitergeführt wird. An geeigneten Pegelstandorten sollte zusätzlich der Seegang erfasst werden.

10.2 Qualitätssicherung

Die Anforderung an die Qualität der Messwerte steigt durch den Klimawandel: Es ist noch wichtiger als bisher, die Qualität der Messdaten zu sichern, zusätzlich ist die Homogenität festzustellen. Mögliche Unsicherheiten sind zu dokumentieren. Es sind Verfahren zur automatischen Qualitätssicherung weiterzuentwickeln. Die Digitalisierung historischer Pegelmesswerte ist eine anwendbare Methode, um Unsicherheiten

zu bestimmen. Zukünftige Generationen von Modellketten sind hinsichtlich Tidekennwerten und Seegang aufdatiert gewässerkundlich zu verifizieren.

10.3 Wissensko llation und Modelle tten

Die Klimaforschung endet nicht mit KLIWAS. Ein breit aufgestelltes Netzwerk von Wissenschaftlern erzeugt ständig neues Wissen - dieses ist eine Herausforderung, denn das Wissen sollte für die WSV und andere Nutzer aufbereitet werden. Neue Erkenntnisse müssen in die Modellkette miteinfließen.

10.4 Systemanalyse : Unaufgeregte kontinuierliche , wissenschaftliche , küstenhydrologische Begutachtung

Die Anpassung an den möglichen Klimawandel verlangt eine unaufgeregte aber kontinuierliche, wissenschaftliche und küstenhydrologische Begutachtung. Aufbauend auf Trendermittlungen und Multiskalenanalysen sollte durch die Ressortforschung ein besseres regionales Prozessverständnis herbeigeführt werden. Sensitivitätstest und zukünftige Generationen regionaler und globaler Klimamodelle (Modellketten) sollten in den nächsten Dekaden kontinuierlich eingeordnet, verifiziert und wissenschaftlich-gewässerkundlich analysiert werden. Es sollte fortlaufend untersucht werden, ob sich an der Betroffenheitslage etwas geändert hat und sich Handlungsprioritäten geändert haben.

11 Diskussion und Ausblick

Das Management der Wasserstraßen muss nachhaltig, in Übereinstimmung mit gesellschaftlichen Normen und auf dem Stand des Wissens und der Technik erfolgen.

Die Verfügbarkeit von Messdaten und daraus abgeleiteter Information ist Grundvoraussetzung eines jeden nachhaltigen und optimierten Managementansatzes. Aus diesem Grund betreibt die WSV ein umfangreiches Messnetz in den Küstengewässern, welches die Möglichkeit der gewässerkundlichen Begutachtung, d.h. die Beantwortung vieler Fragestellungen (z.B. der Sicherheit des Schiffsverkehrs) bis hin zu Systemstudien ermöglicht. **Neue Sensortechniken**, erweitern die Möglichkeiten. Bezüglich des Seegangs wurde ein Mangel an Daten festgestellt. Für sicherheitsrelevante Parameter des Seegangs sind die derzeit verwendeten Bemessungsformeln unsicher.

Für Investitionsmaßnahmen in die Bundeswasserstraßen an der Küste werden zukünftige Wasserstandsinformationen auf verschiedenen zeitlichen Skalen benötigt. In den Tidewasserständen konnten Variabilitäten sowohl im Jahresgang, als auch im dekadischen Bereich aufdeckt werden. Eine historische Beschleunigung des Anstieges der Wasserstände kann jedoch nicht festgestellt werden, muss aber bei einer nachhaltigen Planung beispielsweise mittels Szenarien berücksichtigt werden. Als Beispiel für eine mögliche Vorgehensweise bei steigenden aber unsicheren zukünftigen Wasserständen sei das Konzept der Niederlande genannt: Hier werden die zukünftigen Kennwerte für jeden Küstenabschnitt fortlaufen aktualisiert.

Bei der Betrachtung des Messnetzes fällt eine räumliche Heterogenität auf, die in einem historisch gewachsenen Netz begründet liegt. Es müssen Methoden entwickelt werden, die es objektiv ermöglichen den Messnetzbedarf unter wirtschaftlicher Betrachtungsweise und hinsichtlich der Anforderung des nachhaltigen Betriebes der Wasserstraßen unter Klimawandel beurteilen zu können. Bei der Messung und Analyse von Seegang werden derzeit Informationen über die Signalstärke nicht ausgewer-

tet. Hierzu sind neue Methoden zu entwickeln (z.B. für Wellenbrechen oder Extremwellen). Zusätzlich ist der Seegang in der Fläche zu betrachten.

Unsicherheiten über zukünftige Wasserstände sowohl auf saisonalen, dekadischen und klimatischen Zeitachse sind derzeit noch so groß, dass abschließende Empfehlungen nicht gegeben werden können. Für die Abschätzung zukünftiger Parameter müssen die Ergebnisse der Modellkette mit aktuellen und historischen Messungen, mittels zu entwickelnden stochastischer Verfahren, für einzelne Fragestellungen kombiniert werden. In KLIWAS konnten noch keine Aussagen zu der Veränderung des Seegangs- oder der Wasserstände der deutschen Ostseeküste getroffen werden, dieses muss nachgeholt werden.

Für Investitionen in die Bundeswasserstraßen sowie das Verkehrsmanagement werden Vorhersagen auch für die jeweils nächste Saison, das nächste Jahr oder Jahrzehnt benötigt. Deshalb ist es notwendig für die Beratung zukünftig Vorhersagen der küstenhydrologischen Parameter auch auf diesen Zeitskalen zur Verfügung zu stellen. Es besteht der Bedarf die Ergebnisse der Modellkette in enger Absprache mit der WSV gezielt für einzelne Fragestellungen des Tagesgeschäfts anzuwenden. Dazu sind Möglichkeiten zu untersuchen, in wie weit ein weitergehendes Herunterbrechen der Modellkette („Downscaling“) möglich ist. Es muss im Einzelfall betrachtet werden wie unsicher und belastbar die Informationen der Modellkette sind.

12 D a n k s a g u n g

Allen Mitarbeitern der in Kapitel 6 genannten Projekte und Institutionen und den unterstützenden Mitarbeitern der in Kapitel 6 genannten Kooperationspartner gilt unser Dank. Den Mitarbeitern von M1 und anderen Referaten der BfG wird für die vielen Tipps und auch gelegentliche Hilfen herzlichst gedankt. Für wichtigen fachlichen Rat sei insbesondere auch der Herr C. Blasi erwähnt. Insbesondere danken wir auch dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung für die Finanzierung des Forschungsprogramms.

13 Literatur

- Ablain M, Cazenave A, Valladeau G, Guinehut S. (2009) A new assessment of the error budget of global mean sea level rate estimated by satellite altimetry over 1993–2008. *Ocean Sci.* 5.193–201
- Aldrian, E, Sein, D. Jacob, D., Gates, L.D., Podzun, R. (2005) *Modelling Indonesian rainfall with a coupled regional model*, *Climate Dynamics* 25. 1–17, DOI 10.1007/s00382-004-0483-0
- Altamimi Z, Sillard P, Boucher C (2002) ITRF2000. *A new release of the international terrestrial reference frame for earth science applications*. *J Geophys Res* 107(B10)2214.
- Baart, F., Van Koningsveld, M., & Stive, M. J. F. (2012) *Trends in sea-level trend analysis*. *Journal of Coastal Research*, 28(2), 311-315.
- Baart, F., Van Gelder, P. H., De Ronde, J., Van Koningsveld, M., & Wouters, B. (2011). *The effect of the 18.6-year lunar nodal cycle on regional sea-level rise estimates*. *Journal of Coastal research*, 28(2), 511-516.
- Backhaus J. O. (1985) *A three-dimensional model for the simulation of shelf sea dynamics*. *Dt. Hydrogr. Z.* 38, 165–187.
- Backhaus, J. O. (1983) *A semi-implicit scheme for the shallow water equations for applications to shelf sea modeling*. *Continental Shelf Research* 2 , 243–254.
- Baker TF, Woodworth PL, Blewitt G, Boucher C, Woppelmann, G (1997) *A European network for sea-level and coastal land level monitoring*. *J Mar Syst* 13.163–171.
- Barjenbruch U., Wilhelmi, J. (2008) *Application of radar gauges to measure the water level and the sea state*, Proc. of 31st ICCE, 687-695, Hamburg.
- Bauer, E.-M., Heuner, M., Bahls, A., Bildstein, T., Carus, J., Faude, U., Fuchs, E., Jensen, K., Kinkeldey, C., Kleinschmit, B., Kleiß, K., Köhler, U., Kraft, D., Meyerdirks, J., Roeder, A., Schiewe, J., Schmidlein, S., Schoenberg, W., Schröder, B., Schröder, H.-H., Schröder, U., Schuchardt, B., Silinski, A., Sundermeier, A., Wittig, S. (2014) *Klimabedingte Änderung der Vorlandvegetation und ihrer Funktionen in Ästuaren sowie Anpassungsoptionen für die Unterhaltung*. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.09. KLIWAS-24/2014. DOI. 10.5675/Kliwas_24/2014_3.09

- Begnudelli, L. and Sanders, B. F. (2007) Conservative wetting and drying methodology for quadrilateral grid finite-volume models. *J. Hydraul. Eng.*, 133(3), 312-322.
- Behre, K.-E. (2003) *Probleme der Küstenforschung*, Bd.28, Isensee-Verlag, Oldenburg, 2003
- Bennett A. F., (1992). *Inverse Methods in Physical Oceanography*. Cambridge Univ. Press, 346 pp.
- Berge-Nguyen M, Cazenave A, Lombard A, Llovel W, Cretaux JF. (2008) *Reconstruction of past decades sea level using tide gauge, altimetry and in situ hydrographic data*. *Glob. Planet. Change* 62.1–13
- Blasi, C., Jensen, J. (2001a) *Identification and Management of Hydrological System Parameters of the Ems- Estuary*, Proceedings of the 5th International Conference on the MED-COAST- Conference, Hammamet, Tunisia
- Blasi, C., Jensen, J. (2001b) *Investigation of the water levels along the German North Sea coastline*. Book of Abstracts . final workshop of COST Action 40 ; Sea Level in Europe. - Split . Hydrographic Institute of the Republic of Croatia.
- Blewitt G, Altamimi Z, Davis J, Gross R, Kuo C, Lemoine F et al (2006) *Geodetic observations and global reference frame contributions to understanding sea level rise and variability*. World climate research program, Workshop on understanding sea-level rise and variability, 6–9 June 2006, UNESCO/IOC, Paris, France
- Booij, N., Haagsma, I.J., Holthuijsen, L. H., Kieftenburg A., Ris R., van der Westhuysen A. and Zijlema M. (2004) *SWAN User Manual*, Version 40.41. Delft Uni. of Tech., Netherlands.
- Bosch W, Drewes H, Kaniuth K, Kahle H, Hernandez N (1999) *Sea level changes and vertical crustal movement in the southern Caribbean from satellite altimetry, tide gauge records and GPS height determinations*. XXII IUGG General Assembly, Birmingham
- Boukas, L. A. , Mimikou, N. Th. , Missirlis, N. M. , Mellor, G. L. , Lascaratos, A. und Korres G. (1999) *The Parallelization of the Princeton Ocean Model*, Lecture Notes in Computer Science, Volume 1685/1999, Euro-Par'99 Parallel Processing, Seiten 1395-1402
- Cabanes C, Cazenave A, Le Provost C. (2001) *Sea level rise during past 40 years determined from satellite and in situ observations*. *Science* 294.840–42
- Cazenave A, Dominh K, Guinehut S, Berthier E, Llovel W.(2009) *Sea level budget over 2003–2008. A reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo.*, *Glob. Planet. Change* 65.83–88, doi.10.1016/j.gloplacha.2008.10.004

Cazenave A, Nerem RS. (2004) *Present-day sea level change. Observations and causes*. Rev. Geophys. 42,

Cazenave, A. and Llovel W., (2010) *Contemporary Sea Level Rise*, Annu. Rev. Mar. Sci. 2010. 2.145–73

Chambers DP, Mehlhaff CA, Urban TJ, Fujii D, Nerem RS. (2002) *Low frequency variations in global mean sea level. 1950–2000*. J. Geophys. Res. 107(C4)3026, doi.10.1029/2001JC001089

Chambers DP. (2006) *Observing seasonal steric sea level variations with GRACE and satellite altimetry*. J. Geophys. Res. 111(C3)C03010, doi.10.1029/2005JC002914

Church JA, White NJ, Coleman R, Lambeck K, Mitrovica JX. 2004. *Estimates of the regional distribution of sea-level rise over the 1950 to 2000 period*. J. Clim. 17(13)2609–25

Church, J. A. and N.J. White, 2011. *Sea-level rise from the late 19th to the early 21st Century*. Surveys in Geophysics, 32, 585-602.

Church, J.A., White, N.J., 2006. *A 20th-century acceleration in global sea-level rise*, Geophys. Res. Lett. 33.

Dangendorf, S., H. Hein, J. Jensen, S. Mai, C. Mudersbach, T. Wahl, 2012. *Mean Sea Level Variability and Influence of the North Atlantic Oscillation on Long-term Trends in the German Bight.*, Water, Special Issue. Flood Risk Management.

Deltacommissie, (2008) *Working together with water. A living land builds for its future Findings of the Deltacommissie 2008*, <http://www.deltacommissie.com>

Dick, S., E. Kleine, S. H. Müller-Navarra, H. Klein, H. Komo (2001) *The Operational Circulation Model of BSH (BSHcmod) – Model description and validation*. Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie 29, 49 pp.

DIN 4049-3 (1994), *Hydrologie, Teil 3. Begriffe zur quantitativen Hydrologie*.

Domingues C, Church J, White N, Gleckler PJ, Wijffels SE, (2008) *Improved estimates of upper ocean warming and multidecadal sea level rise*. Nature 453.1090–93, doi.10.1038/nature07080

Douglas BC. (2001) *Sea level change in the era of the recording tide gauge*. In *Sea Level Rise, History and Consequences*, ed. BC Douglas, MS Kearney, SP Leatherman, pp. 37–64. San Diego, CA. Academic Press

- Douglas, B. C., and W. R. Peltier, (2002) *The puzzle of global sea-level rise*, Phys. Today, 55, 35–40.
- Duwe, K. (2000) *Zirkulation und Austauschprozesse in Küstengewässern und Ästuaren der Nord- und Ostsee*. Verbundprojekt "Klimatologie und Prognose klimainduzierter Änderungen hydrographischer Größen in Nord- und Ostsee (KLINO), Projekt C", Abschlußbericht, 57 S.
- Falconer, R.A., Akande K., Boye B.A. (2011), *Environmental hydraulics. integrated water management solutions from cloud to coast*, Proceedings of 3rd International Conference on Managing Rivers in the 21st Century, Penang, Malaysia, (2011) 4-14
- Gehrels, R., & Long, A. (2008) *Sea level is not level*. Geography, 93(Part 1)
- Geoffrey W.C., (2008) *Parallelization of the Fvcom Coastal Ocean Model*, International Journal of High Performance Computing Applications, v.22 n.2, p.177-193, May 2008
- Gräwe, U., Burchard, H., Müller, M., & Schuttelaars, H. M. (2014). *Seasonal variability in M2 and M4 tidal constituents and its implications for the coastal residual sediment transport*. Geophysical Research Letters, 41(15), 5563-5570.
- Gregory, R., (1930) *Weather recurrences and weather cycles*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 56. 103–120. doi. 10.1002/qj.49705623402
- Grinsted A, Moore JC, Jevrejeva S. (2007) *Observational evidence of volcanic impact on sea level and the global water cycle*. P.N.A.S. 104(50)19730–34
- Grinsted, A., J. Moore, and S. Jevrejeva. (2009) *Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD*. Climate Dynamics, doi.10.1007/s00382–008–0507–2.
- Hein, B. (2013) Processes of stratification and destratification in the Mekong ROFI-seasonal and intraseasonal variability, Dissertation, Hamburg, 2013.
- Hein, H., Karfeld, B., Pohlmann, T. (2007) *Mekong water dispersion. Measurements and consequences for the hydrodynamic modelling*, J. of Water Res. and Env. Eng., Special Issue, August 2007, 21 – 28.
- Hein, H. (2008) *Vietnam Upwelling - Analysis of the upwelling and related processes in the coastal area off South Vietnam*, PhD Thesis, <http://www.sub.uni-hamburg.de/opus/volltexte/2008/3931/>
- Hein, H., R. Weiss, U. Barjenbruch, S. Mai (2010a) *Uncertainties of tide gauges & the estimation of regional sea level rise*. Textbeitrag zur Konferenz, Hydro 2010, Warnemünde, 2010.

Hein, H., Mai, S., Barjenbruch, U. (2010b) *Simulation of interactions between wind-waves and currents in estuaries with a focus on climate change*. Proc. of the 9th Int. Conf. on Hydro Science and Engineering, ICHE, Madras, Indien, 2010.

Hein, H., Mai, S., Barjenbruch, U. (2011a) *Coastal long term processes, tidal characteristics and climate change*, 5th International Short Conference on Applied Coastal Research, Aachen, Conference Proceedings.

Hein, H., Mai, S., Barjenbruch, U. (2011b) *Der Meeresspiegelanstieg an der deutschen Nordseeküste – unter der Lupe betrachtet*, Poster, KLIWAS Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland, 2. Statuskonferenz - am 25./26.10.2011 im BMVBS, Berlin.

Hein, H., Mai, S., Barjenbruch, U., (2011c) *Interaction of Wind Waves and Currents in the Ems Estuary*. Int. Journal of Ocean and Climate Systems, vol. 2, no. 4 2011a.

Hein, H., Mai, S., Barjenbruch, U.(2011d) *What Tide Gauges Reveal about the Future Sea Level* Proc. of the 4th Conf. Acqua Alta, http://acqua-alta.de/fileadmin/design/acqua-alta/pdf/abstracts/paper/13_10/Hein_Harmut_full_papers.pdf

Hein, H., Moser, H., Mai, S., Barjenbruch, U, (2011e) *Decomposition of Sea Level Rise in the Southern North Sea*, Poster, IUGG2011, IAPSO, JP03, Global and regional sea-level change.

Hein, H., S. Jennings, H. Schüttrumpf, (2011f) *Statistisch-Probabilistische Analyse von Pegelstandsmessungen im Tidebereich*, Hydrobrief 54, September 2011.

Hein, H., S. Mai, S., U. Barjenbruch (2011g) *Interaction of Wind-Waves and Currents in the Ems-Dollard Estuary*. International Journal of Ocean and Climate Systems. Vol. 2, No. 4, December 2011, p. 249 - 258.

Hein, H., S. Mai, S., Barjenbruch, U. (2012a) *Uncertainties of drying periods of coarse coastal climate impact models*, Proc. of the 2nd IAHR Europe Congress, Water - infinitely deformable but still limited, München 2012.

Hein, H., Mai, S., Barjenbruch, U, Blasi, C., (2012b) *Computer-aided quality assurance of high-resolution digitized historic tide-gauge records*, . Proc. of the Int. Conf. Hydro 2012, Rotterdam.

Hein, H., Mai, S., Barjenbruch, U, Ganske, A. (2012c) *Tidekennwerte und Seegangstatistik – eine Trendanalyse*, Tagungsband der 2. KLIWAS Statuskonferenz, Berlin.

Hein, H., Mai, S., Barjenbruch, U., Mayer, B., Pohlmann, T. (2012d) *A multi-scale and model approach to estimate future tidal high water statistics in the southern German Bight*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, EGU2012-8285-1, EGU General Assembly. 2012.

Hein, H., Hein, B., & Pohlmann, T. (2013a) *Recent sediment dynamics in the region of Mekong water influence*. Global and Planetary Change. 110, 183-194.

Hein, H., Mai, S., Barjenbruch, U., Mayer, B., Pohlmann, T. (2013b) *Process based downscaling of a global climate model into the Elbe estuary*, Book of Abstracts, ICWRER, 2013

Hein, H., Mai, S., Barjenbruch, U., Mayer, B., Pohlmann, T. (2013c) *Variations of regional sea level and coastal tides. observations and model results*, Book of Abstracts, ICWRER, 2013

Hein, H., Mayer, B., Mai, S., Barjenbruch, U. (2013e) *Process based downscaling of a global climate model into the Elbe estuary*. Proc. of 6th Int. Conf. on Water Resources and Environment Research (ICWRER), Koblenz, 2013.

Hein, H., S. Mai, S., Barjenbruch, U. (2013f) *The long way from uncertain data and knowledge to adaptive management of coastal waterways*. Proc. Of the Int. Conf. European Climate Change Adaptation Conference 2013, Hamburg.

Hein, H., S. Mai, S., Barjenbruch, U. (2013g) *Simulated future tides and sea state in the Elbe estuary*. Mitteilungen des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt der Universität Siegen, 36-45, Siegen.

Hein, H., S. Mai, S., Barjenbruch, U. (2014a) *Permutated numerical modeling of the M2-subharmonics in the Elbe estuary*, International Conference on Computational Methods in Water Resources (CMWR 2014), Stuttgart, Germany; 06/2014.

Hein, H., Mai, S., Barjenbruch, U. (2014b) *Long-term Changes of the Tidal Amplitudes and Phases in the Elbe Estuary*, ICHE2014, Hamburg, 2014, Lehfeldt & Kopmann (eds) - © 2014 Bundesanstalt für Wasserbau ISBN 978-3-939230-32-8.

Hofstede, J. (2007) *Entwicklung des Meeresspiegels und der Sturmfluten. Ist der anthropogene Klimawandel bereits sichtbar?* In. Coastline Reports, Vol. 9, pp. 139-148. - ISSN 0928-2734

Holgate S.J., und Woodworth P.L. (2004) *Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s*. Geophys. Res. Lett. 31.L07305, doi.10.1029/2004GL019626

- Holgate, S. J. (2007) *On the decadal rates of sea level change during the twentieth century*. In. Geophysical Research Letters, Vol. 34, pp. L01602- DOI 10.1029/2006GL028492.
- Holleman R., Stacey M.T., Fringer O.B. (2013) Numerical diffusion for flow-aligned unstructured grids with application to estuarine modeling. Int. J. Numer. Methods Fluids.
- Horton, R.; Herweijer, C.; Rosenzweig, C.; Liu, J.; Gornitz, V.; Ruane, A.C., (2008) *Sea level rise projections for current generation CGCMs based on the semi-empirical method*. Geophysical Research Letters, Vol. 35, L02715, doi.10.1029/2007GL032486
- Hume, D., (1758) *An Enquiry Concerning Human Understanding* In. David Hume, Essays and Treatises on Several Subjects, 2. Band, London 1758.
- Hurrell, J.W., (1995) *Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation*. Regional Temperatures and Precipitation. Science. 269, 676-679.
- Hurrell, J.W., and R.R. Dickson, (2004) *Climate variability over the North Atlantic*. Marine Ecosystems and Climate Variation - the North Atlantic. N.C. Stenseth, G. Ottersen, J.W. Hurrell, and A. Belgrano, Eds. Oxford University Press, 2004.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (1995) *Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2001) *Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*
- IPCC, 2010. *Workshop on Sea Level Rise and Ice Sheet Instabilities*. Kuala Lumpur, Malaysia, Workshop Report, 21–24 June 2010.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) *Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*
- Janssen F., Schrum C., Hübner U., Backhaus J. (1999) *Uncertainty analysis of a decadal simulation with a regional ocean model for the North Sea and Baltic Sea*. In. Sündermann J, Lenz W (eds) Impact of climate change on the coastal zone. CR SPECIAL 10. Clim Res 18.55-62
- Jenning, S. & Schüttrumpf, H. (2012) *Statistisch-Probabilistische Analyse von Pegelstandsmessungen im Tidebereich*, Abschlussbericht Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen.

Jenning, S., H. Hein, S. Mai, H. Schüttrumpf (2012a) *Analyzing regional sea level changes. Tidal characteristics, intra- and inter-annual frequencies, probabilistic trends*, ICWRER, 2013.

Jenning, S., H. Hein, S. Mai, H. Schüttrumpf (2012b) *Breaks and long term trends of the tidal characteristics in the southern German Bight*, Conference Proceeding, ICCE, International Conference of Coastal Engineering, Santander, 2012.

Jenning, S., H. Hein, S. Mai, H. Schüttrumpf (2012c) *Bruchpunkte und Langzeittrends von Wasserstandsmessungen im Tidebereich der Deutschen Bucht*. Tagungsband JuWi-Treffens, München 2012.

Jenning, S., H. Hein, S. Mai, H. Schüttrumpf (2014) *Die historische Änderung der Salzgehalte im Weserästuar*, KLIWAS-Bericht, in Abstimmung, Koblenz 2014.

Jensen J., Wahl T., Frank T., Blasi C.J. (2008) *Mean Sea Level and Tidal Analysis at the German North Sea Coastline, Observations and Causes of Sea Level Changes*. A Session to Mark the 75th Anniversary of the Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), European Geosciences Union, Generalversammlung, Wien

Jensen, J. & Mudersbach, Ch. (2004) *Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten*. In. Klimaänderung und Küstenschutz pp. 115-128.

Jensen, J., Bender, F., Blasi, C. (2001) *Analysis of Water levels along the German North Sea Coastline*, Proceedings of the 5th International Conference on the MEDCOAST- Conference, Hammamet, Tunisia

Jensen, J., Mudersbach, C. (2004) *Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten*. In. Tagungsband Workshop. Klimaänderung und Küstenschutz. Hamburg, S. 115-128

Jensen, J., Mudersbach, C., Dangensdorf, S. (2012) *Qualitätsmanagement und Analyse von hochauflösenden Pegelstandsmessungen im Tidebereich*, Projektbericht fwu Siegen, 119 Seiten.

Jensen, J., Wahl, T. und Mudersbach, C. (2008) *Sea Level Variations at the German North Sea and Baltic Sea Coastlines*, Proceedings of the 7th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (PIANC COPEDEC VII), Dubai

Jevrejeva S, Grinsted A, Moore JC, Holgate S. (2006) *Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records*. J. Geophys. Res. 111.C09012, doi.10.1029/2005/JC003229

Jevrejeva S, Moore JC, Grinsted A, Woodworth PL. (2008) *Recent global sea level acceleration started over 200 years ago?* Geophys. Res. Lett. 35.L08715, doi.10.1029/2008GL03361

Jones, R. N. (2001) An environmental risk assessment/management framework for climate change impact assessments. *Natural Hazards*, 23(2-3), 197-230.

Katsman, C.; Hazeleger, W.; Drijfhout, S. S.; van Oldenborgh, G. J.; Burgers, G. (2008) Climate scenarios of sea level rise for the northeast Atlantic Ocean. a study including the effects of ocean dynamics and gravity changes induced by ice melt. In. *Climatic Change*, Vol. 91, No. 3-4, pp. 351-374.

Kerr, R. A., (2000) A North Atlantic climate pacemaker for the centuries. *Science* 288, 1984–1985.

Kjellström, E., Döscher, R., & Meier, H. (2005). Atmospheric response to different sea surface temperatures in the Baltic Sea: coupled versus uncoupled regional climate model experiments. *Nordic Hydrology*, 36, 397-409.

Klein, H., Hughes, S.L., Svendsen, E. (2007) *North Sea Variability. Changing Influence of Atlantic Water and ecological consequences*. CLIVAR Exchanges, 40, 11-16.

Kleine E., (1994) *Das operationelle Modell des BSH für Nordsee und Ostsee, Konzeption und Übersicht*. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Technical Report, Hamburg, Germany. 126 pp.

KNMI (2006) *Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands*.

Kuhlbrodt, T.; Rahmstorf, St.; Zickfeld, K.; Vikebø, F. B.; Sundby, S.; Hofmann, M.; Link, P. M.; Bondeau, A.; Cramer, W.; Jaeger, C. (2009) *An Integrated Assessment of changes in the thermohaline circulation*. In: *Climatic Change*, Vol. 96, pp. 489-537. DOI 10.1007/s10584-009-9561-y.

Lamb, H.H., Weiss, I. (1979) *On Recent Changes of the Wind and Wave Regime of the North Sea and the Outlook*. Fachliche Mitteilungen des Amtes für Wehrgeophysik, GeophysBDBw-FM 194, 108 S.

Lenhart, H.-J., T. Pohlmann, (2004) *North Sea Hydrodynamic Modelling. a Review*. Senckenbergiana Maritime 34.53-88

Leterme S.C, Pingree, R., Skogen, M.D., Seuront, L., Reid P.C., Attrill, M.J. (2008) Decadal fluctuations in North Atlantic water inflow in the North Sea between 1958-2003. Impacts on temperature and phytoplankton populations, *OCEANOLOGIA*, 50 (1), 59-72.

- Leuliette E, Miller L. (2009) *Closing the sea level rise budget with altimetry, Argo and GRACE*. Geophys. Res. Lett. 36.L04608, doi. 10.1029/2008GL036010
- Leuliette EW, Nerem RS, Mitchum GT. (2004) Results of TOPEX/Poseidon and Jason-1 Calibration to Construct a Continuous Record of Mean Sea Level. Mar. Geodesy 27.79–94
- Lingemann, I, Nilson E., Krahe P. (2012) *Änderungen des Abflussregimes im 21. Jahrhundert*. Aktuelle Ergebnisse des Forschungsprogramms KLIWAS, Kolloquium, Dresden.
- Llovel W, Cazenave A, Rogel P, Berge-Nguyen M. (2009) 2-D reconstruction of past sea level (1950–2003) using tide gauge records and spatial patterns from a general ocean circulation model. Clim.Past. 5.1–11
- Lomb, N. R. (1976) Least-squares frequency analysis of unequally spaced data, Astrophysics and Space Science, vol. 39, Feb. 1976, p. 447-462.
- Lombard A, Garric G, Penduff T, Molines JM. (2009) *Regional variability of sea level change using a global ocean model at 1/4 resolution*. Ocean Dyn, doi. 10.1007/s10236-009-0161-6
- Luyten P.J., Jones, J.E., Proctor, R., (2003) A Numerical Study of the Long- and Short-Term Temperature Variability and Thermal Circulation in the North Sea, Journal of Physical Oceanography, Article. pp. 37-56
- Mai, S., Zimmermann, C. (2003) *Vulnerabilität des Küstenhinterlands an Jade und Weser bei Klimaänderung*. Tagungsband des 4. FZK-Kolloquiums "Küsten - Morphodynamik und Küstenschutzwerke", S. 75 - 79, Hannover, Germany, 2003.
- Mai, S., Zimmermann, C. (2004) Veränderung der Seegangsbedingungen an den Küsten von Jade und Weser als Folge der Klimaänderung. Coastal Reports, H. 1, S. 93 - 100.
- Mai, S. (2004) *Klimafolgenanalyse und Risiko einer Küstenzone am Beispiel der Jade-Weser-Region*. Von dem Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Hannover genehmigte Dissertation, 391 S., Hannover, 2004 (auch in: Mitteilungen des Franzius-Instituts, H. 91, S. 1 - 275, Hannover, 2004)
- Mai, S. (2008) *Statistics of Waves in the Estuaries of the Rivers Ems and Weser - Measurement vs. Numerical Wave Model*. Proc. of the 7th Int. Conf. on Coastal and Port Engineering in Developing Countries COPEDEC, CD-ROM, Dubai, United Arab Emirates, 2008.
- Mai, S., J. Wilhelmi, U. Barjenbruch (2010) *Wave height distributions in shallow waters*. Textbeitrag zur Konferenz, 32nd Int. Conf. on Coastal Engineering ICCE, Shanghai, China, 2010.

Mai, S., Rütten, S., Barjenbruch, U. Hein, H., (2013) *Impact of climate change on wave statistics in the estuary of the river Elbe*, Poster, ICWRER, 2013

Mathis, M., (2013) Projected Forecast of Hydrodynamic Conditions in the North Sea for the 21st Century, <http://ediss.sub.uni-hamburg.de/volltexte/2013/6169/>

Max-Planck (2006) *Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert*. In. MPI-M, Vol. Januar 2006.

Milne G, Gehrels WR, Hughes C, Tamisiea M. (2009). *Identifying the causes of sea level changes*. Nat. Geosci.2.471–78

Müller, M., Arbic, B. K., & Mitrovica, J. X. (2011) *Secular trends in ocean tides. Observations and model results*. Journal of Geophysical Research. Oceans (1978–2012), 116(C5)

Munk, W., (2002) *Twentieth century sea level. An enigma*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 99.6550–6555.

Nicolle, Karpytchev, M., Benot, M. (2009) Amplification of the storm surges in shallow waters of the Pertuis Charentais (Bay of Biscay, France), Ocean Dynamics, 59 (6)

Nilson, E., Krahe, P., Lingemann, I., Horsten, T., Klein, B., Carambia, M., Larina, M. (2014) *Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland*. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01. KLIWAS-43/2014. DOI. 10.5675/Kliwas_43/2014_4.01

Pingree R. (2005) *North Atlantic and North Sea Climate Change. curl up, shut down, NAO and Ocean Colour*, J. Mar. Biol. Ass. U.K. (2005), 85, 1301-1315.

Plag HP. (2006) *Recent relative sea level trends. An attempt to quantify forcing factors*. Philos. Trans. R. Soc. Lond. A 364.1841–69

Pleskachevsky, A., Eppel, D., Kapitza H. (2009) *Interaction of waves, currents and tides, and wave-energy impact on the beach area of sylt island*, Ocean Dynamics, Vol. 59, no. 3, 451-461.

Plüß, A. (2004) *Nichtlineare Wechselwirkung der Tide auf Änderungen des Meeresspiegels im Übergangsbereich Küste/Ästuar am Beispiel der Elbe*. In Gönnert, G., H. Grassl, D. Kelletat, H. Kunz, B. Probst, H. von Storch, und J. Sündermann (Eds) "Klimaänderung und Küstenschutz", 129-138.

Pohlmann, T. (1991) *Untersuchung hydro- und thermodynamischer Prozesse in der Nordsee mit einem dreidimensionalen numerischen Modell*. Berichte des Zentrums für Meeres- und Klimaforschung, Nr. 23.

Pohlmann, T. (1996a) *Predicting the Thermocline in a Circulation Model of the North Sea -- Part I. Model Description, Calibration and Verification*. Continental Shelf Research, Vol. 16, No. 2, 131-146.

Pohlmann, T. (1996b) *Calculating the annual cycle of the vertical eddy viscosity in the North Sea with a three-dimensional circulation model*. Continental Shelf Research, Vol. 16, No. 2, 147-161.

Pohlmann, T. (1996c) *Calculating the development of the thermal vertical stratification in the North Sea with a three-dimensional circulation model*. Continental Shelf Research, Vol. 16, No. 2, 163-194.

Pohlmann, T. (2006) *A meso-scale model of the central and southern North Sea. consequences of an improved resolution*. Continental Shelf Research 26, 2367 – 2385.

Rahmstorf, S. (2007) *A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise*. In: Scienceexpress, Vol. 315, No. 5810, pp. 368-370. DOI 10.1126/science.1135456.

Rütten, S., Mai, S., Wilhelmi, J., Zenz, T., Hein, H., & Barjenbruch, U. (2012) *Results of operational sea-wave monitoring with radar gauges*. Proc. of the Int. Conf. Hydro 2012, Rotterdam.

Rütten, S., Mai, S., Wilhelmi, J., Zenz, T., Hein, H. & U. Barjenbruch (2013) *Results of operational monitoring of waves with radar gauges*. International Hydrographic Review, International Hydrographic Bureau, Monaco (Download journal: http://www.iho.int/mtg_docs/IHReview/2013/IHR_May2013.pdf)

Schoene T (2006) *Linking GPS to tide gauges and tide gauge benchmarks*, World climate research program workshop on understanding sea-level rise and variability, 6–9 June 2006, UNESCO/IOC, Paris, France

Schrum C., (1994) *Numerische Simulation thermodynamischer Prozesse in der Deutschen Bucht*. Berichte aus dem Zentrum für Meeres- und Klimaforschung, Reihe (B), Nr.15. 175 S.

Schrum, C. (1997). *Thermohaline stratification and instabilities at tidal mixing fronts: results of an eddy resolving model for the German Bight*. Continental Shelf Research, 17(6), 689-716.

Schrum C (2001) *Regionalization of climate change for the North Sea and the Baltic Sea*. In: Sündermann J, Lenz W (eds) *Impact of climate change on the coastal zone*. CR SPECIAL 10. Clim Res 18.31-37

Schrum C, Hübner U, Jacob D, Podzun R. (2003) *A coupled atmosphere/ice/ocean model for the North Sea and the Baltic Sea*. Clim Dyn 2003, 21.131-151.

Seifert, R., Hesser, F., Büscher, A., Fricke, B., Holzwarth, I., Rudolph, E., Seheli, A., Seiß, G., Winkel, N. (2014): *Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Küste und die Ästuare. Mögliche Betroffenheiten der Seeschiffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports*.

Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02. KLIWAS-36/2014. DOI: 10.5675/Kliwas_36/2014_3.02

Simioniato, CG, Dragani, W, Nunez, M, Engel, M., (2004) *A set of 3-D nested models for tidal propagation from the Argentinean Continental Shelf to the Ri' o de la Plata Estuary—Part I M2*. Journal of Coastal Research, 20(3), 893–912.

Slangen, A. B. A., Katsman, C. A., van de Wal, R. S. W., Vermeersen, L. L. A., & Riva, R. E. M. (2012). *Towards regional projections of twenty-first century sea-level change based on IPCC SRES scenarios*. Climate dynamics, 38(5-6), 1191-1209.

Soares C, Weisse R, Carretero J, Alvarez E (2002) *A 40 years hindcast of wind, sea level and waves in European waters in*. Proc.21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic.

Sterr, H. (2008) *Assessment of Vulnerability and Adaptation to Sea-Level Rise for the Coastal Zone of Germany*. In: Journal of Coastal Research, Vol. 24, No. 2, pp. 380-398. - ISSN 0749-0208

Storch von, H. (1997) *Auswirkungen von Klimaänderungen auf Sturmentwicklung und Extremwasserstände in der Nordsee - Hochwasserstatistik*. BMBF-Projekt 01 LK 9510/0, Abschlußbericht, 31 S.

Storch, von, H., Reichart, H. (1997) *A scenario of storm surge statistics for the German Bight at the expected time of doubled atmospheric carbon dioxide concentration*. J. Climate, 10, 2653-2662.

Storch, von, Hans, H. Langenberg, Th. Pohlmann, (1998) *Stürme, Seegang und Sturmfluten im Nordostatlantik*. In: Warnsignal Klima. Eds.. J. Lozan, H. Graßl, P. Hupfer, Verlag Wissenschaftliche Auswertungen, 182-189.

Sudau A., Weiß R. (2008a) *Elevations levels of gauge reference datums, recent vertical crustal movements and water level variations of long periodicity on the German North Sea Coast*, KFKI-Aktuell, Heft 1-2008

Sudau A., Weiß R. (2008b) *IKÜS - Integrated Coastal Monitoring System*, poster-paper-manuscript, ICCE-2008.

Teferle FN, Bingley RM, Williams SDP, Baker TF, Dodson AH (2006) *Using continuous GPS and absolute gravity to separate vertical land movements and changes in sea level at tide gauges in the UK*. Philos Trans R SocA364, 917–930, 910.

Tsimplis M. N., Shaw A. G. P., Flather R. A. and D. K. Woolf. (2006) *The influence of the North Atlantic Oscillation on the sea-level around the northern European coasts reconsidered. the thermosteric effects*. Philosophical Transactions of the Royal Society A 364. 845-856

Wahl, T., Jensen, J., Frank, T. (2008) *Changing Sea Level and Tidal Dynamics at the German North Sea Coastline*, Proceedings of the Coastal Cities Summit 2008 - Values and Vulnerabilities, St. Petersburg, Florida, USA.

Wahl, T., Jensen, J., Frank, T., & Haigh, I. D. (2011) *Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years*. Ocean Dynamics, 61(5), 701-715.

Wahl, T.; Jensen, J.; Frank, T. (2010) *On analysing sea level rise in the German Bight since 1844*. In. Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 10, pp. 171-179

Weisse, R. and F. Feser (2003) *Evaluation of a method to reduce uncertainty in wind hindcasts performed with regional atmosphere models*. Coastal Eng., 48, 211–225.

Weisse, R. und Plüß, A., (2006) *Storm-related sea level variations along the North Sea coast as simulated by a high-resolution model 1958-2002*, Ocean Dynamics, Volume 56, Number 1, DOI 10.1007/s10236-005-0037-y, 16-25.

Woodworth, P. L., N. Teferle, R. Bingley, I. Shennan, S.D. Williams, (2009) *Trends in UK mean sea level revisited*, Geophys. J. Int., 176, 19–30.

Woodworth, P. L.; White, N. J.; Jevrejeva, S.; Holgate, S. J.; Church, J. A.; Gehrels, W. R. (2009) *Evidence for the accelerations of sea level on multi-decade and century timescales*. In. International Journal of Climatology, Vol. 29, pp. 777-789. DOI 10.1002/joc.1771.

Woth, K. (2005) *North Sea storm surge statistics based on projections in a warmer climate. How important are the driving GCM and the chosen emission scenario?* Geophys. Res. Lett., 32, L22708, doi.10.1029/2005GL023762.

Woth, K., Weisse, R., von Storch, H. (2006) *Climate change and North Sea storm surge extremes. An ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models*. Ocean Dynamics, doi.10.1007/s10236-005-0024-3.

WSV (2012) Wöchentliche Salzgehalte und Salzmessverfahren.xls.

Zerbini S, Plag HP, Baker TF, Becker M, Billiris H, Burki B et al (1996) *Sea level in the Mediterranean. a first step towards separating crustal movements and absolute sea level variations*. Glob Planet Change 14.1–48.

14 Abkürzungen

AMO	Atlantische Multidekadische ...
AR4	Fourth Assessment Report
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BMVBS (BMVI)	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrografie
BSHcmod	BSH circulation model
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECHAM5	Globales Atmosphären-Klimamodell des MPI
ECHAM5 – MPIOM	globales Klimamodell des MPI Meteorologie
FINO	Forschungsinsel Nord- und Ostsee (FINO-1, FINO-2 und FI- NO-3)
GIA	Global Isostatic Adjustment
GNSS	Global Navigation Satellite System
HAMSOM	Hamburg Shelf Ocean Model
HS	signifikante Wellenhöhe, entspricht etwa dem Mittel über das höchste Drittel aller Wellen siehe $(H \ 1/3)$
IFM	Institut für Meereskunde
IKÜS	Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küs- tenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik

IPCC	Inter-Governmental Panel on Climate Change
LAT	Lowest Astronomical Tide
MPI	Max-Planck-Institut
MPIOM	Max-Planck Institute Ocean Model
MTMW	“Mean Sea Level”, 19jähriges Mittel des Tidemittelwassers
NAO	Nordatlantische Oszillation
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
REMO	REgionales KlimaMOdell des MPI Meteorologie
SSA	Singular Spectrum Analysis
SSH	Sea Surface Height
Tf, Te	Flutdauer, Ebbedauer
Thb	Tidehub
Thw	Tidehochwasser
Tmw	Tidemittelwasser
Tnw	Tideniedrigwasser
WSA	Wasser- und Schifffahrtsamt
WSV	Wasser- und Schifffahrtsverwaltung



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Bundesanstalt für Wasserbau
(BAW)**

Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

www.baw.de
info@baw.de

**Bundesamt für Seeschifffahrt
und Hydrographie (BSH)**

Bernhard-Nocht-Straße 78
20359 Hamburg

www.bsh.de
posteingang@bsh.de



**BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE**



Deutscher Wetterdienst (DWD)

Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach/Main

www.dwd.de
info@dwd.de

**Bundesanstalt für
Gewässerkunde (BfG)**

Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz

www.bafg.de
posteingang@bafg.de



IMPRESSUM

Herausgeber:

Bundesanstalt für Gewässerkunde
KLIWAS Koordination
Am Mainzer Tor 1
Postfach 20 02 53
56002 Koblenz
Tel.: 0261 / 1306-0
Fax: 0261 / 1306-5302
E-Mail: kliwas@bafg.de
Internet: <http://www.kliwas.de>

Redaktion: KLIWAS-Koordination
Bundesanstalt für Gewässerkunde

Autoren: Hartmut Hein, Stephan Mai,
Ulrich Barjenbruch,

Layout: Christin Hantsche und Tobias Knapp,
Bundesamt für Seeschifffahrt
und Hydrographie - Rostock

Druck: Bundesanstalt für Gewässerkunde

DOI: 10.5675/Kliwas_33/2014_2.03