

Proceedings

Gönnert, G., Graßl, H., Kelletat, D., Kunz, H.,
Probst, B., von Storch, H., Sündermann, J.

Klimaänderung und Küstenschutz

29. und 30. November
2004



Gönnert, G., Graßl, H., Kelletat, D., Kunz, H.,
Probst, B., von Storch, H. , Sündermann, J.

Klimaänderung und Küstenschutz

29. und 30. November
2004



Vorwort

Klimaänderung und Küstenschutz sind Begriffe, die zunehmend in den Fokus der Betrachtung von Wissenschaft und Gesellschaft rücken. Vor diesem Hintergrund sind in der jüngeren Vergangenheit im verstärkten Maße auch Hochwasser und ihre Folgen für den Küstenschutz in den Mittelpunkt des wissenschaftlichen wie auch des öffentlichen Interesses gerückt.

Der Küstenschutz basiert auf einem hohen Sicherheitsstandard. Forschung und Erfahrung im Bereich von Risiko- und Küstenmanagement entwickeln sich stetig weiter. Die Erkenntnisse zum Thema Klimawandel und seine Folgen werden größer und greifen auf fundierte Ergebnisse zurück. Es ist der Zeitpunkt für einen Fachaustausch zwischen den Experten aus Wissenschaft und Praxis der verschiedensten Disziplinen. Natürlich gibt es daneben viele Fragen, viele Bereiche, die noch nicht umfassend erforscht und entwickelt sind. Hierfür bietet ein solcher Fachaustausch einen guten Rahmen, um sie zu benennen und zu diskutieren.

Bei „Kliku“ werden an der Universität Hamburg Wissenschaftler und Praktiker innerhalb von zwei Tagen wichtige Beiträge aus den Bereichen der Geowissenschaft, der Klimaforschung und der Ingenieurwissenschaft zu den Stichworten Klimaänderung und Küstenschutz vortragen.

Grundlage des Fachaustausches ist die **Klima- und Küstenänderung**. Hier werden am ersten Tag die Eingangsfragen zur Änderung des Sturmflutklimas und der atmosphärischen Zirkulation beantwortet. Darauf basierend können die Folgen für die Küstenform und den Sedimenttransport dargestellt werden. Ergänzt durch den Einfluss von Baumaßnahmen wird auf die Hochwassersicherheit in den Ästuarbereichen eingegangen.

Die Erkenntnisse zur **Sturmflut- und Wasserstandsänderung** bilden eine wichtige Grundlage für den Hochwasserschutz.

Am zweiten Tag präsentieren sich der **Küstenschutz** und das **Küstenzonenmanagement**. Im Block Küstenschutz werden Strategien und Politik des Küstenschutzes in internationalen Vergleich dargestellt, und es stellen sich alle an Nord- und Ostsee grenzenden Bundesländer mit ihren Konzepten vor. Ein fundiertes und hier präsentiertes Wissen über Schadenspotentiale in Verbindung mit Küstenschutzstrategien und Strategien für die nachhaltige Küstenentwicklung liefert wertvolle Bausteine im Küstenzonenmanagement.

Die Küste unterliegt einer Vielzahl an Einflussfaktoren und unterschiedlichsten Interessen und Interessengruppen, die den Küstenschutz beeinflussen. Abgerundet wird „Kliku“ deshalb mit einer Abschlussdiskussion, in der die Thematik „**Risikoraum Küstenschutz**“ über den Begriff Klimaänderung hinaus betrachtet wird.

„Kliku“ findet mit mehr als 130 Teilnehmern aus Wissenschaft und Praxis im Rahmen einer ansprechenden Atmosphäre im Warburg Haus der Universität Hamburg statt. Unterstützt wird „Kliku“ von der HTG, der GKSS sowie der Universität Hamburg, Fachbereich Geowissenschaften und dem ZMAW.

Ein Dank für die große Unterstützung geht an Prof. Dr. Ossenbrügge und Herrn Schiller. Marion Philipps hat mit viel Sorgfalt gemeinsam mit Frau Liesner sämtliche Vorbereitungen und den reibungslosen Ablauf der Tage des Fachaustausches organisiert. Mit Herrn Rudat, der die Website eingerichtet und gepflegt hat, und Bernd Kling rundet sich das Team ab. Für die Technik und das weitere Wohlbefinden sorgen während des Fachaustausches die studentischen Hilfskräfte Frau Appelt und Herr Kummerfeld. Ihnen allen möchten wir ganz besonders danken.

G. Gönnert, H. Graßl, D. Kelletat, H. Kunz, B. Probst, H. von Storch und J. Sündermann

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	5
Inhaltsverzeichnis	7
Klima- und Küstenänderung	
R. Weisse und H. von Storch Großräumige Änderungen des Wind- Sturmflut- und Seegangsklimas in der Nordsee und mögliche Implikationen für den Küstenschutz	11
H.-J Scheffer Küstenrückgang als Funktion des Meeresspiegelanstiegs	21
J. Jacobeit, R. Glaser, M. Nonnenmacher und H. Stangl Hochwasserentwicklung in Mitteleuropa und Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation	31
Chr. Heinzemann und H. Heyer Überprüfung der Hochwasserneutralität eines weiteren Ausbaus der Seehafenzufahrten nach Hamburg und Bremerhaven	43
H. Zepp und M. Parkenings Strandveränderungen und Erosion des Dünenkliffs im Osten Wangerooes zwischen 1970 und 2004	53
E.V. Stanev, G. Brink-Spalink, and J.-O. Wolff The sensitivity of sedimentary system in the East Frisian Wadden Sea to climate change	63
Posterpräsentationen	
F. Büsching Sturmwellenresonanz an einem Strandriff	73
P. Milbradt und T. Schonert Hydro- und Morphodynamische Simulation unter Berücksichtigung ökologischer Modellkomponenten	83
A. Kortenhans und H. Oumaraci Bestimmung und Management des Überflutungsrisikos – das neue europäische Forschungsprojekt Floodsite	95
W. Günther und Bente Zahl Touristische Effekte von Windkraftanlagen in der Küstenzone	105
Sturmflut- und Wasserstandsänderung	
J. Jensen und Chr. Mudersbach Zeitliche Änderungen der Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten	115

Inhaltsverzeichnis

	Seite
A. Plüß	
Nichtlineare Wechselwirkung der Tide auf Änderungen des Meeresspiegels im Übergangsbereich Küste/Ästuar am Beispiel der Elbe	129
Grabemann, H.-J. Grabemann und D. Eppel	
Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Hydrodynamik im Jade-Weser Gebiet.	139
E. Rudolph	
Einfluss sehr hoher Abflüsse auf die Wasserstände in der Tideelbe	149
J. Jensen, Chr. Mudersbach und Chr. Koziar	
Simulation von extremen Sturmflutwetterlagen in der Nordsee und deren statistische Analyse	159
S. Müller-Navarra und I. Bork	
Modellstudien zu Extremsturmfluten in der Nordsee	171
H. Dette und H. Oumaraci	
Analyse des Langzeitwellenklimas vor Sylt als Grundlage für Maßnahmen im Küstenschutz	183
H. Schüttrumpf, A. Kortenhuis und H. Oumaraci	
Bemessung von Seedeichen – Gegenwart, Zukunft, Herausforderungen	193
K ü s t e n s c h u t z	
M. Kiezebrink and J. Hofstede	
Evaluation of policies and strategies for coastal risk management	203
F. Thorenz	
Inselschutz in Niedersachsen	213
B. Probst	
Dynamisches Deichsystem in Schleswig – Holstein	223
J. Hofstede	
Timmendorfer Strand und Scharbeutz. Zwei Ostseegemeinden schützen sich vor Klimaänderung	233
J. Triebner	
Besonderheiten des Sturmflutschutzes in urbanen Ästuargebieten am Beispiel Hamburgs	243
P. Fröhle, D. Carstensen, K. Sommermeier, B. Gurwell, Chr. Schlamkow, S. Drägerdt	
Methodik zur Ermittlung von Seegangparametern für die Bemessung von Bauwerken - Fortschreibung des Generalplans Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern	255
J. Grüne und J. Gärtner	
Sicherheitsüberprüfung der Schleswig-Holsteinischen Landesschutzdeiche an der Westküste hinsichtlich des Wellenaufbaus bzw. Wellenüberlaufs für den Generalplan 2001	269

Inhaltsverzeichnis

Seite

K ü s t e n z o n e n m a n a g e m e n t

S. Mai, A. Elsner, V. Meyer und C. Zimmermann

Anderung des Sturmflutrisikos der niedersächsischen Küste bei Klimawandel 281

H. Sterr, H.-J. Markau und S. Reese

Risiken eines Klimawandels an den Küsten Schleswig-Holsteins. Schadenpotentiale und Vulnerabilität 291

B. Schuchardt und M. Schirmer

Klimawandel: Die Vulnerabilität einer Küstenregion 301

A. Daschkeit

IKZM – ein Planungsansatz für nachhaltige Küstenentwicklung 313

H. Rudolphi, B. Röber, Ph. Schmidt-Thomé und M. Staudt

Mögliche Reaktionen der Regionalplanung auf einen zukünftigen Meeresspiegelanstieg in der Ostseeregion – Ergebnisse des SEAREG Projektes am Beispiel Usedom 323

Großräumige Änderungen des Wind-, Sturmflut- und Seegangsklimas in der Nordsee und mögliche Implikationen für den Küstenschutz

Ralf Weisse und Hans von Storch

GKSS Forschungszentrum - Institut für Küstenforschung

Summary

Long-term changes in the prevailing wind, wave and storm surge conditions may have profound impact on coastal protection. In many cases data to analyze such changes are limited. A review is provided on the options to enhance the existing data base and contemporary results for the North Sea and the eastern North Atlantic are presented. Subsequently, methods to assess future climate conditions are addressed, results are presented, and limitations are discussed.

Zusammenfassung

Langfristige Änderungen in der Sturm-, Sturmflut- und Seegangsstatistik können gravierende Auswirkungen für den Küstenschutz haben und erfordern adäquate Strategien im Umgang mit diesen. In Anbetracht des oftmals zu geringen Beobachtungsmaterials zur Analyse solcher Änderungen wird auf Möglichkeiten zur Erweiterung der Datenbasis wie z.B. die Analyse von Proxydaten oder numerische Rekonstruktionen eingegangen, und es werden neuere Ergebnisse für den Bereich der Nordsee und des östlichen Nordatlantiks vorgestellt. Anschließend wird auf die Methodik zur Abschätzung möglicher zukünftiger Entwicklungen sowie die damit verbundenen Unsicherheiten eingegangen.

1 Einleitung

Stürme, Sturmfluten und Sturmflutseegang stellen immense Naturgewalten dar, die das Leben in der Küstenregion prägen und die Sicherheit sowohl auf See, als auch im unmittelbaren Küstenbereich nachhaltig beeinflussen. Langfristige Veränderungen sowohl in der Stärke, als auch in der Häufigkeit dieser Naturgewalten haben direkte Auswirkungen auf den Lebensraum Küste und erfordern adäquate Strategien im Umgang mit diesen.

Klimatische Schwankungen werden auf allen Zeitskalen beobachtet. Die Bandbreite reicht dabei von saisonalen und jährlichen Schwankungen bis hin zu den durch den Zyklus von Kalt- und Warmzeiten (etwa 10.000 Jahre) verursachten Variationen. Im Bereich des Küstenschutzes sind dabei vor allem die Schwankungen im Bereich von einigen Jahren bis hin zu einigen Jahrzehnten von praktischer Bedeutung. In diesem Bereich ist das Klimasystem durch eine ausgeprägte natürliche Variabilität gekennzeichnet. Gleichzeitig erwartet man aber auch gerade in diesem Zeitbereich deutliche Änderungen infolge der anthropogenen globalen Erwärmung.

Aufgrund der teilweise sehr beschränkten Datenlage sind, insbesondere über den Ozeanen und im Küstenbereich, Aussagen über die langfristigen Änderungen von Extremereignissen nach wie vor schwierig und zum Teil mit enormen Unsicherheiten behaftet. Der IPCC Bericht in seiner jetzigen Fassung (Houghton et al. 2001) ist, abgesehen vom erwarteten Anstieg des globalen Meeresspiegels,

äußerst zurückhaltend, was definitive Aussagen über eine sich ändernde Bedrohung der Küstenregionen infolge des globalen Klimawandels angeht. Ungeachtet dessen hat sich das Wissen über potentielle Auswirkungen eines möglichen Klimawandels im Küstenbereich in den letzten Jahren deutlich verbessert. Im Folgenden werden gängige Methoden zur Abschätzung langfristiger Änderungen im Sturm-, Sturmflut- und Seegangsklima sowie der gegenwärtige Kenntnisstand für den Bereich der Nordsee und des östlichen Nordatlantiks vorgestellt. Dabei wird neben den Änderungen der jüngsten Vergangenheit auch auf mögliche zukünftige Entwicklungen und Unsicherheiten eingegangen.

2 Analyse der Vergangenheit

Die Analyse vergangener Änderungen des Sturm-, Sturmflut- und Seegangsklimas (im Folgenden kurz als Extremereignisse bezeichnet) liefert sowohl Kenntnisse über die Größenordnung der natürlichen Variabilität, als auch ein Maß zur Bewertung der Auswirkungen möglicher zukünftiger Änderungen infolge des erwarteten globalen Klimawandels. Methodisch sind solche Analysen jedoch mit einigen Problemen behaftet. Zum einen fehlen, insbesondere über den Meeren, hinreichend lange Datensätze, um die volle Bandbreite natürlicher Klimaschwankungen abzudecken, zum anderen können Änderungen in der Messmethodik im Laufe der Zeit zu Fehlinterpretationen langfristiger Änderungen führen. Ein Beispiel hierfür ist die freiwillige Erhebung meteorologischer Daten auf See durch fahrende Handelsschiffe (sog. Voluntary Observing Ships), deren Routen, Geschwindigkeiten und Aufbauten sich im Laufe der Zeit geändert haben und deren Daten so langfristige, nicht klimatisch bedingte Signale (Inhomogenitäten) beinhalten können (z.B. WASA 1998). Zur Analyse langfristiger Änderungen von Extremereignissen sind solche Daten daher nur eingeschränkt verwendbar.

2.1 Methoden

Um angesichts dieser Einschränkungen dennoch zu belastbaren Aussagen über langfristige Änderungen zu kommen, wurden in den letzten Jahren verschiedene Methoden entwickelt und angewandt. Insbesondere bei der Analyse von langfristigen Änderungen des Sturmklimas wird häufig auf Stellvertreterdaten (so genannte Proxydaten) zurückgegriffen. Schmidt und von Storch (1993) beschreiben z.B. eine Methode, bei der geostrophische Windgeschwindigkeiten (als Proxy für die Sturmaktivität) aus Stationsdaten des Bodenluftdrucks berechnet werden. Im Vergleich zu direkten Windgeschwindigkeitsmessungen hat sich die Technik der Luftdruckmessungen im Laufe der Zeit nur wenig geändert, und es kann somit davon ausgegangen werden, dass die mit ihrer Hilfe abgeleiteten Windgeschwindigkeiten weniger stark von Inhomogenitäten beeinflusst sind, als die direkten Messungen. Ein weiterer Vorteil von Proxydaten besteht in ihrer oftmals längeren Verfügbarkeit. So sind Luftdruckmessungen beispielsweise für ein relativ dichtes Stationsnetz verfügbar und reichen teilweise über mehr als 200 Jahre zurück. Andere Proxies zur Analyse der Sturmtätigkeit basieren auf Luftdruckmessungen einzelner Stationen, wie z.B. die jährliche Zahl besonders tiefer Barometerstände oder starker zeitlicher Druckänderungen (z.B. Bärring und von Storch 2004). Für die Küstenbereiche kommen zwei weitere Proxies in Betracht, die in enger Verbindung mit dem Sturmklima stehen: Pegelstände und Seegang. Hierbei stellen insbesondere die Pegelstände eine interessante Option dar, für die ein umfassendes Messnetz seit einem relativ langen Beobachtungszeitraum existiert (z.B. Woodworth und Blackman 2002).

Zur Bewertung großräumiger Veränderungen, insbesondere über relativ datenarmen Gebieten wie beispielsweise den offenen Ozeanen, sind jedoch auch Proxydaten nur bedingt einsetzbar. Häufig werden deshalb zusätzlich numerische Modelle verwandt, um mit ihnen die wenigen vorhandenen Daten räumlich und zeitlich zu interpolieren und in einen dynamisch konsistenten Zusammenhang zu bringen, ein Verfahren, das aus der Wetteranalyse bekannt ist. Im Laufe der Zeit waren jedoch auch diese Verfahren und Techniken gewissen Veränderungen unterworfen. Deshalb werden seit einiger Zeit

so genannte Re-analyse Projekte durchgeführt, bei denen im Gegensatz zur täglichen Wetteranalyse Wetterdaten der letzten Jahrzehnte mit einheitlichen Modellen und Datenassimilationsverfahren reprozessiert werden, um so zumindest die Inhomogenitäten zu reduzieren, die in den Wetteranalysen z.B. infolge von Modellwechseln, wechselnder Datenverfügbarkeit und Qualität oder infolge von Änderungen der Datenassimilation vorhanden sind. Die zwei derzeit umfassendsten Re-analysen sind die des National Center for Environmental Prediction (NCEP) (Kalnay et al. 1996, Kistler et al. 2001) und die des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF, ERA-40) (Simmons and Gibson 2000).

Aufgrund beschränkter Rechnerkapazitäten haben die globalen Re-analysen heute typischerweise Auflösungen von etwa 200 km. Während sie damit für Analysen im großskaligen Bereich geeignet sind, bedient man sich für die Analyse von Änderungen auf der regionalen Skala (z.B. für die Küstenregion) üblicherweise einer weiteren Verfeinerung mit Hilfe statistischer oder dynamischer Downscaling Methoden (z.B. Feser et al. 2001). Insbesondere dynamische Methoden sind dabei in der Lage, zusätzliche Informationen bezüglich des räumlichen und zeitlichen Details als auch hinsichtlich nicht direkt beobachteter Größen wie Wasserstand, Seegang oder Strömungen zu liefern. Zusammen mit der Analyse von Proxydaten stellen sie somit eine ideale Kombination zur Abschätzung und Bewertung vergangener Änderungen dar (Abb. 1).

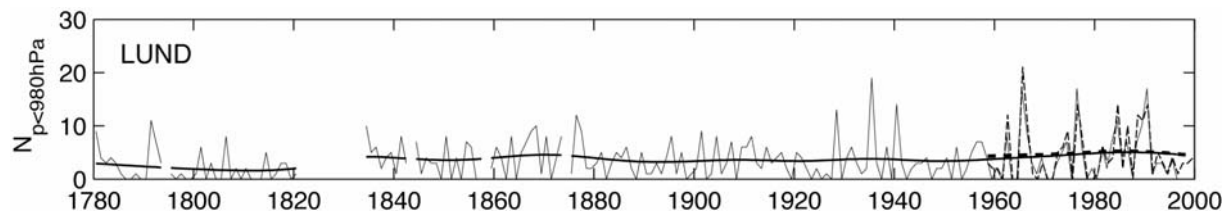


Abb. 1: Beobachtete (durchgezogen, nach Barring und von Storch 2004) und mit Hilfe der Rekonstruktion von Feser et al. (2001) rekonstruierter (gestrichelt) luftdruckbasierter Sturmindex für Lund (Schweden). Gezeigt ist jeweils die jährliche Anzahl von Barometerständen unterhalb 980 hPa, wobei die flache Kurve eine Glättung der jährlichen Werte darstellt. Im Überlappungszeitraum zwischen Beobachtungen und Modellrekonstruktionen ist eine recht gute Übereinstimmung der Sturmstatistiken zu erkennen. Mit Hilfe der Proxydaten können sehr lange Zeiträume, mit Hilfe der Rekonstruktionen zusätzliche Variablen auch an Orten ohne Beobachtungsmaterial analysiert werden (nach Barring, pers. Mitteilung 2004).

2.2 Rekonstruktion der Vergangenheit und gegenwärtige Änderungen des Sturm-, Sturmflut- und Seegangsklimas am Beispiel der Nordsee und des östlichen Nordatlantiks

Basierend auf den NCEP Re-analysen haben Feser et al. (2001) eine atmosphärische Rekonstruktion mit einem Regionalmodell (Jacob und Podzun 1997) für den Bereich der Nordsee und des östlichen Nordatlantiks durchgeführt. Im Vergleich zu den als Randwerten verwendeten Re-analysen haben die Ergebnisse dieser Simulation eine in etwa 16-fach erhöhte räumliche Auflösung und liegen für den Zeitraum 1958-2002 zu jeder vollen Stunde vor. Weisse et al. (2004) verglichen anhand dieser Simulation rekonstruierte Sturmstatistiken mit Beobachtungen und fanden eine recht gute Übereinstimmung. Ein Beispiel für den Bereich der südlichen Nordsee ist in Abbildung 2 dargestellt.

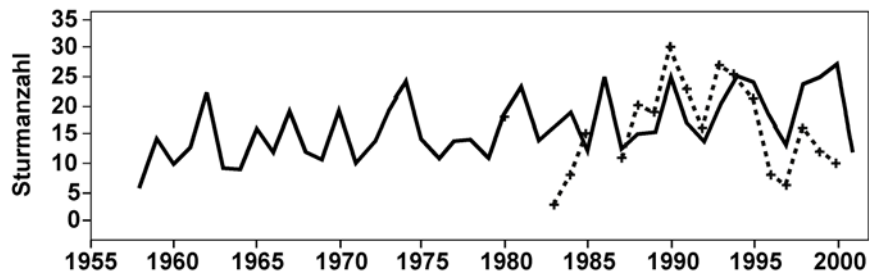


Abb. 2: Beobachtete (gestrichelt) und mit Hilfe der Simulation von Feser et al. (2001) (durchgezogen) rekonstruierte Anzahl von Sturmereignissen mit Windgeschwindigkeiten von Beaufort 8 und mehr an der Plattform K13-Alpha in der südlichen Nordsee (nach Weisse et al. 2004).

Weisse et al. (2004) untersuchten außerdem die langfristigen Änderungen des Sturmklimas in der Rekonstruktion von Feser et al. (2001) und fanden, dass (bezogen auf den Zeitraum 1958-2002) in der Tat eine Zunahme der Sturmaktivität über dem östlichen Nordatlantik und der Nordsee zu beobachten war. Eine detailliertere Analyse lieferte jedoch regional und zeitlich differenziertere Aussagen. So nahm die Sturmaktivität über weiten Teilen des Nordatlantiks zunächst bis etwa 1990-1995 zu. Ab diesem Zeitpunkt bis zum Ende der Rekonstruktionsperiode war dann ein deutliches Abklingen zu beobachten. Für den Bereich der südlichen Nordsee wurde die stärkste Zunahme der Sturmaktivität zu Beginn der Rekonstruktionsperiode beobachtet, wogegen die Anstiegsraten der letzten Jahre deutlich geringer ausfallen (Weisse et al. 2004).

Inwieweit es sich bei den beschriebenen Änderungen um natürliche Schwankungen oder um anthropogen bedingte Änderungen handelt, ist nach wie vor ungeklärt. Analysen von Proxydaten implizieren, dass die natürlichen Schwankungen der Sturmaktivität beträchtlich sein können. Jones et al. (1999) untersuchten z.B. für den Zeitraum 1881-1997 einen Sturmindex für den Bereich der Britischen Inseln und fanden einen Anstieg der Sturmaktivität seit etwa 1960. Bezogen auf den Gesamtzeitraum, konnte jedoch kein langfristiger Trend identifiziert werden. Auch Analysen sturmbedingter Wasserstandsvariationen (z.B. WASA 1998, Woodworth and Blackman 2002) und geostrophischer Windgeschwindigkeiten (Alexandersson et al. 1998, 2000) für den Bereich des Nordatlantiks und der Nordsee lieferten ähnliche Ergebnisse.

Basierend auf den NCEP Re-analysen wurden im Rahmen des europäischen Projekts HIPOCAS (Soares et al. 2002) regionale atmosphärische Rekonstruktionen für verschiedene europäische Küstenregionen durchgeführt und anschließend dazu verwendet, regionale Seegangs-, Strömungs- und Wasserstandsverhältnisse der letzten Jahrzehnte mit hohem zeitlichen und räumlichen Detail zu rekonstruieren. Für den Bereich der Nordsee liegen diese Rekonstruktionen beispielsweise für den Zeitraum 1958-2002 stündlich vor, wobei die räumliche Auflösung in etwa 5 km für den Seegang und bis zu etwa 80 m für die Wasserstände und Strömungen im Bereich der Watten beträgt (Weisse et al. 2003 updated; Plüß pers. Mitteilung). Abb. 3 zeigt die rekonstruierten langfristigen Änderungen extremer Seegangereignisse für die südliche Nordsee. Betrachtet über den Gesamtzeitraum (1958-2002) hat sich das jährliche 99%-Percentil der signifikanten Wellenhöhe im Bereich der Deutschen Bucht um bis zu 1.8 cm/Jahr (also um bis zu etwa 80 cm betrachtet über den Gesamtzeitraum) erhöht. Für den Küstenschutz, aber auch für die Sicherheit des Seeverkehrs kann es wichtig sein, inwieweit diese Änderungen durch eine Zunahme der Häufigkeit, der Intensität oder der Andauer extremer Ereignisse verursacht sind. So kann beispielsweise die Zunahme der Häufigkeit zu einer Verringerung adäquater Wetterfenster für den Schiffsverkehr führen, wogegen für den Küstenschutz Änderungen in der Intensität oder der Andauer der Ereignisse von größerer Bedeutung sein können. Inwieweit die Änderungen des jährlichen 99%-Percentils auf häufigere, längere oder schwerere Seegangereignisse zurückzuführen sind, ist deshalb ebenfalls in Abb. 3 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass insbesondere die jährliche

Anzahl extremer Seegangereignisse (um bis zu 0.15 Ereignisse oder bis zu etwa 6-7 Ereignisse pro Jahr betrachtet über den Gesamtzeitraum) zugenommen hat, wogegen die mittlere Intensität und Andauer der Ereignisse keine signifikanten Trends aufweisen (ohne Abb.). Inwieweit sich innerhalb der letzten Jahre, ähnlich wie bei den oben beschriebenen Änderungen der Sturmaktivität, eine Abschwächung oder gar ein Rückgang dieser Entwicklung abzeichnet, bedarf noch einer weitergehenden Analyse.

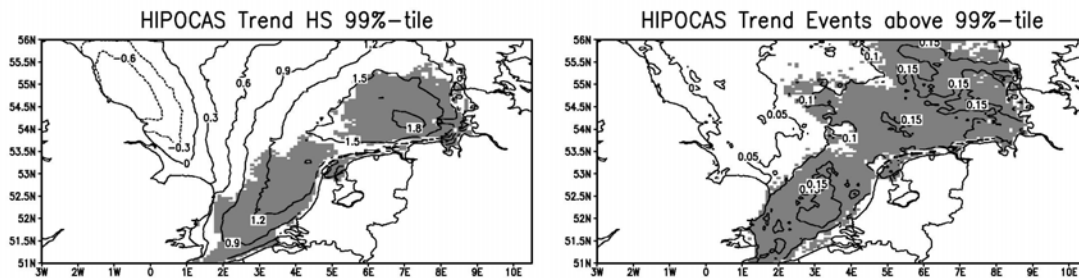


Abb. 3: Linearer Trend 1958-2002 der jährlichen 99%-Perzentile der signifikanten Wellenhöhe in cm pro Jahr (links) und linearer Trend der jährlichen Anzahl von Seegangereignissen mit Wellenhöhen oberhalb des langjährigen lokalen 99%-Perzentils (rechts). Orte, für die die Trends der pre-whitened Zeitserien nach dem Mann-Kendall Test mit 5% Irrtumswahrscheinlichkeit signifikant von Null verschieden sind, sind durch Grauschattierung hinterlegt. Die Abbildungen wurden aus den Ergebnissen einer hochaufgelösten Seegangsrekonstruktion für die südliche Nordsee (Weisse et al. 2003) angetrieben durch die atmosphärische Rekonstruktion von Feser et al. (2001) erstellt. Die Analysen basieren auf stündlichen Daten der Periode 1958-2002.

Neben der Schaffung einer Basis zur Abschätzung gegenwärtiger und natürlicher Veränderungen, können solche regionalen Rekonstruktionen aufgrund ihres hohen zeitlichen und räumlichen Details auch als Grundlage für eine Reihe weitergehender Arbeiten dienen. Beispiele sind die Simulation ozeanischer Transporte oder, darauf aufbauend, die Entwicklung von Szenarien z.B. zur Bekämpfbarkeit von Ölausbreitungen (Callies pers. Mitteilung), die Simulation von Schiffsbewegungen oder die Lieferung von Randwerten für höher aufgelöste Rechnungen im unmittelbaren Küstenbereich (Günther pers. Mitteilung).

3 Szenarien möglicher zukünftiger Entwicklungen

Abschätzungen zukünftiger regionaler Entwicklungen über relative lange Zeiträume (Jahre bis Jahrzehnte), wie sie im Zusammenhang mit klimatisch bedingten Änderungen zu betrachten sind, sind nach wie vor mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Nicht nur gibt es Unterschiede in den Aussagen der einzelnen Klimamodelle (z.B. Rauthe et al. 2004), z.B. aufgrund der unterschiedlichen Behandlung (Parametrisierung) der wesentlichen Prozesse in diesen Modellen, sondern auch erhebliche Unsicherheiten über die zukünftige Entwicklung der Antriebsfaktoren, wie beispielsweise über das Niveau der zukünftigen Konzentrationen oder des genauen zeitlichen Verlaufs der weiteren Zunahme atmosphärischer Treibhausgase. Um im Rahmen solcher Unsicherheiten dennoch zu Aussagen über mögliche Entwicklungen zu kommen, bedient man sich im Allgemeinen der Szenarienmethode, d.h.

der Beantwortung von Fragen des Typs „Was wäre, wenn ...?“. Ein Szenario repräsentiert deshalb eine plausible, aber nicht notwendigerweise eine wahrscheinliche zukünftige Entwicklung.

Ein im Klimabereich häufig untersuchtes Szenario ist das der CO₂-Verdopplung, d.h. welche Änderungen simulieren die Modelle im Falle einer Verdopplung des atmosphärischen Kohlendioxids gegenüber dem vorindustriellen Wert oder im Falle eines äquivalenten Anstiegs anderer atmosphärischer Treibhausgase. Je nach erwarteter ökonomischer und gesellschaftlicher Entwicklung wird eine solche Verdopplung realistischerweise in etwa 70-100 Jahren erwartet.

Realitätsnahe Klimamodelle, in denen dynamische Modelle der Atmosphäre, des Ozeans und anderer Klimakomponenten miteinander wechselwirken, sind heute bis zu einem gewissen Grad in der Lage, die natürliche Variabilität des Klimasystems sowie dessen Sensitivität auf einen CO₂-Anstieg zu simulieren. Jedoch können solche Modelle aufgrund beschränkter Rechenkapazitäten nur mit relativ groben Auflösungen betrieben werden. Für die im Klimabereich üblichen Simulationen liegt die Auflösung typischerweise um etwa 500 km. Regionale Details wie die Zugbahnen der Stürme, die vom Wind getriebenen lokalen Änderungen des Wasserstandes oder des Seegangs können damit nicht zufrieden stellend simuliert werden. Um aber trotzdem zu Aussagen über regionale Detailvorgänge zu kommen, bedient man sich so genannter Zeitscheibenexperimente. Hierbei wird auf die großräumigen Ergebnisse eines grob aufgelösten Klimamodells zurückgegriffen. Diese werden zusammen mit den erhöhten atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen in ein hochauflösendes globales Atmosphärenmodell eingegeben. Dieses Modell wird dann für eine relativ kurze Zeitspanne (typischerweise etwa 5-30 Jahre) gerechnet und simuliert so, beispielsweise für den Zeitpunkt einer CO₂-Verdopplung, regionale Detailvorgänge deutlich besser. Die Ergebnisse solcher Zeitscheibenexperimente können anschließend mit regionalen Atmosphärenmodellen weiter verfeinert werden. Aufgrund der in den letzten Jahren gestiegenen Rechenkapazitäten sind auch die Auflösungen globaler Klimamodelle deutlich verbessert worden, so dass heute auch immer öfter regionale Atmosphärenmodelle ohne den Zwischenschritt der Zeitscheibe direkt mit den Ergebnissen der gekoppelten Klimamodellsimulationen angetrieben werden. Die Zeitscheiben oder die atmosphärischen Regionalsimulationen können anschließend mit anderen hochauflösenden Regionalmodellen (beispielsweise des Wasserstands oder des Seegangs) weiter untersucht werden und so die Auswirkungen der Klimaänderungen auf die entsprechenden Umweltparameter analysiert werden. Dabei ist zu beachten, dass die Aussagefähigkeit der regionalen Analysen natürlich auch in entscheidendem Maße von der Realitätsnähe des grobauflösenden Klimamodells sowie dem der Simulation zugrunde liegenden Emissionsszenario für die atmosphärischen Treibhausgase abhängt.

Abb. 4 zeigt als Beispiel die Änderung der bodennahen Windfelder und der signifikanten Wellenhöhe in einem Klimaänderungsexperiment, wie sie nach neueren Rechnungen für den Bereich des östlichen Nordatlantiks erwartet werden. Hierbei zeigen die Extreme der Windgeschwindigkeiten über weiten Teilen des Nordatlantiks eine Tendenz zur Abschwächung von bis zu etwa 1 m/s, wohingegen westlich von Irland eine Zunahme in der Größenordnung von etwa 1-1.5 m/s zu finden ist. Die Entwicklung des Seegangs folgt im Wesentlichen der des Windes. Diese Muster weichen deutlich von den Ergebnissen anderer Arbeiten ab, in denen zumeist eine nordwärtige Verschiebung der Sturmaktivität erwartet wurde (z.B. Knippertz et al. 2000). Dieses verdeutlicht die relativ großen Unsicherheiten bei der Beschreibung möglicher zukünftiger Entwicklungen von Extremereignissen, selbst bei Annahme ähnlicher Szenarien hinsichtlich der Entwicklung atmosphärischer Treibhausgaskonzentrationen. Einen Überblick über die Gemeinsamkeiten und die Unterschiede der verschiedenen Klimamodelle hinsichtlich der Beschreibung möglicher Entwicklungen der extra-tropischen Zirkulation findet man z.B. in Rauthe et al. (2004).

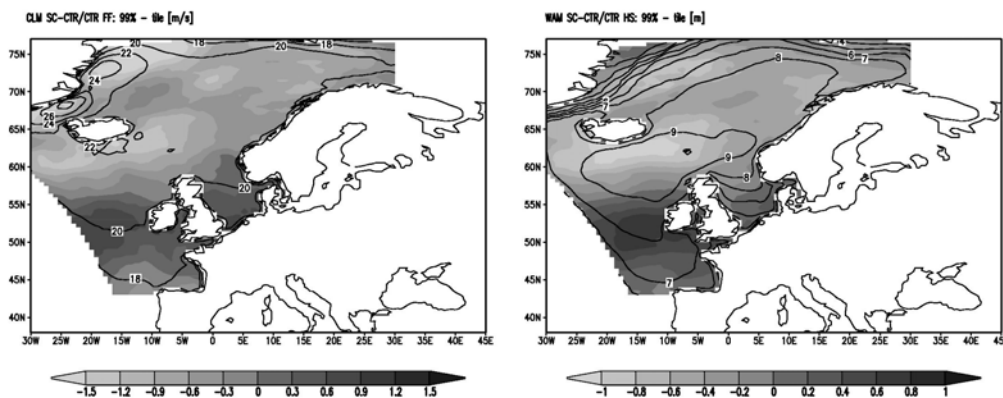


Abb. 4: Mittlere Änderung des jährlichen 99%-Perzentils (Grauwerte) der bodennahen Windgeschwindigkeit (links in m/s) und der signifikanten Wellenhöhe (rechts in m) zwischen einem Klimaszenario- (2071-2100) und einem Kontrolllauf (1961-1990). Als Isolinien sind jeweils die zugehörigen mittleren 99%-Perzentile des Kontrollexperimentes dargestellt. Die atmosphärischen Simulationen wurden mit dem Regionalmodell CLM unter Verwendung der Randwerte des globalen HadAM3 Modells innerhalb des EU-Projekts PRUDENCE durchgeführt (Rockel, pers. Mitteilung). Die Seegangssimulationen wurden mit Hilfe des WAM Modells und der Windfelder der CLM Experimente durchgeführt (Weisse und Stawarz, 2004).

Ungeachtet dieser Unsicherheiten geben die Szenarien jedoch Bilder möglicher plausibler und konsistenter Entwicklungen, die im Hinblick auf Entscheidungsfindungsprozesse im Küstenschutz hilfreich sein können. Woth (pers. Mitteilung) simulierte die Änderungen sturmbedingter Wasserstände unter Verwendung verschiedener regionaler Windfelder, die durch dynamisches Downscaling mit Hilfe unterschiedlicher regionaler Atmosphärenmodelle (angetrieben durch das gleiche globale Klimamodell) gewonnen wurden (Abb.5). Obwohl sich die Amplituden der Änderungen in Abhängigkeit der verwendeten Windfelder deutlich unterscheiden, zeigen die Simulationen prinzipielle Gemeinsamkeiten. Unabhängig vom verwendeten regionalen Atmosphärenmodell werden die größten Wasserstandsänderungen im Bereich der Deutschen Bucht erwartet. Hier treten die Änderungen in allen Simulationen aus dem Bereich des natürlichen Rauschens hervor, das mit Hilfe der oben diskutierten Rekonstruktion von Feser et al. (2001) abgeschätzt wurde.

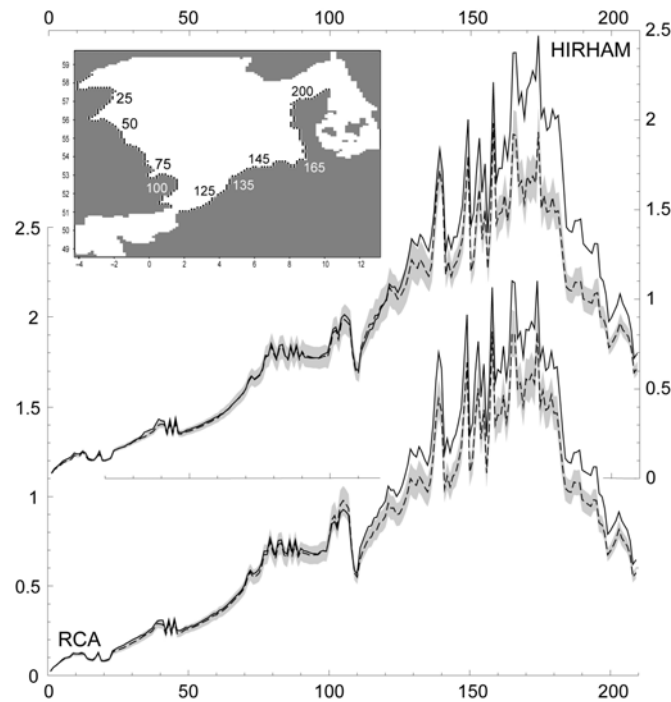


Abb. 5: Änderung der meteorologisch bedingten Extremwasserstände entlang der Nordseeküste. Dargestellt sind jeweils die mittleren jährlichen Werte der maximalen meteorologisch bedingten Anteile des Wasserstands (annual maximum surge) des Kontrollaufs (gestrichelt) und des Klimaszenarios (durchgezogen) entlang eines Schnittes von der englischen über die niederländische und die deutsche bis hin zur dänischen Küste. Der Verlauf des Schnittes ist in der Karte in der linken oberen Ecke dargestellt. Die Kurven zeigen die Ergebnisse des regionalen Ozeanmodells TRIM3D angetrieben von zwei verschiedenen regionalen Atmosphärenmodellen: HIRHAM (oben, rechte Skala in m) und RCA (unten, linke Skala in m). Beide Regionalmodelle wurden von den gleichen globalen Atmosphärendaten für heutige (1961-1990) und zukünftige (2071-2100) Bedingungen angetrieben. Die globalen Daten entstammen Simulationen mit dem britischen HadAM3 Modell. Grau dargestellt ist der Bereich der natürlichen Variationen (90% Konfidenzintervall), wie er aus einem TRIM3D Lauf mit Hilfe der von Feser et al. (2001) rekonstruierten Windfelder abgeschätzt wurde. (Woth, pers. Mitteilung). Die Arbeiten sind Teil des EU Projekts PRUDENCE.

4 Schlussbetrachtung

Klimaänderungen können im Küstenbereich, insbesondere durch die Auswirkungen langfristiger Änderungen des Sturm-, Sturmflut- und Seegangsklimas, eine besondere Herausforderung darstellen. Das Sturmklima im Bereich des Nordatlantiks und der Nordsee ist im Zeitbereich von einigen Jahren bis zu einigen Jahrzehnten beträchtlichen Schwankungen unterworfen. Gerade im Bereich von Jahrzehnten werden jedoch auch die Auswirkungen möglicher anthropogen bedingter Veränderungen erwartet. Für den Küstenschutz kommt somit den Abschätzungen der natürlichen, als auch möglicher anthropogen bedingter Änderungen eine wesentliche Bedeutung zu.

Während man für den Bereich globaler Mitteltemperaturen davon ausgehen kann, dass sich die Erdatmosphäre in den vergangenen Jahren stark erwärmt hat und das mit einiger Sicherheit auch in naher Zukunft weiter tun wird, gibt es für den Bereich der Extremereignisse, insbesondere der Stürme, noch weitgehende Unsicherheiten. Im dritten IPCC Zustandsbericht wird die Situation wie folgt beschrieben: „... There is no compelling evidence to indicate that the characteristics of tropical and extra-

tropical storms have changed. ... Owing to incomplete data and conflicting analyses, it is uncertain as to whether there have been any long-term and large scale increases in the intensity and frequency of extra-tropical cyclones in the Northern Hemisphere. ..." (Houghton et al. 2001, p. 33).

Das Sturmklima im Bereich des Nordatlantiks und der Nordsee ist beträchtlichen Schwankungen unterworfen. Es ist weiterhin ungeklärt, welchen Anteil natürliche und anthropogene Prozesse an diesen Schwankungen besitzen. Für den Küstenschutz bedeutet dies jedoch keine Entwarnung. Sowohl natürliche, als auch anthropogene Änderungen können zu unerwarteten Extremereignissen mit den entsprechenden Folgen führen. Regionale Schutzkonzepte müssen daher an neueste Entwicklungen angepasst und Fortschritte im Wissenstand entsprechend beachtet werden. Die Bewertung solcher Konzepte und Maßnahmen muss letztlich jedoch anhand von Risikoeinschätzungen, gesellschaftlichen Werten und politischen Überzeugungen erfolgen. Angesichts der bestehenden Unsicherheiten muss es weiterhin Ziel globaler Schutzmassnahmen sein, anthropogene Einflüsse auf das globale Klimasystem zu vermeiden oder zumindest zu verringern, da die Folgen nicht vorhersehbar sind, eine Forderung, die sich unmittelbar aus dem Nachhaltigkeitsprinzip ergibt.

5 Literatur

- Alexandersson, H., T. Schmith, K. Iden, and H. Tuomenvirta, 1998: Long-term variations of the storm climate over NW Europe. *Global Atmos. Oc. System*, 6, 97–120.
- Alexandersson, H., H. Tuomenvirta, T. Schmith, and K. Iden, 2000: Trends of storms in NW Europe derived from an updated pressure data set. *Climate Res.*, 14, 71–73.
- Barring, L. and H. von Storch, 2004: Northern European storminess since about 1800. Submitted.
- Feser, F., R. Weisse, and H. von Storch, 2001: Multi-decadal atmospheric modeling for Europe yields multi-purpose data. *Eos Transactions*, 82, pp. 305, 310.
- Jacob, D. and R. Podzun, 1997: Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 63, 119–129.
- Jones, P., E. Horton, C. Folland, M. Hulme, D. Parker, and T. Basnett, 1999: The use of indices to identify changes in climatic extremes. *Climatic Change*, 42, 131–149.
- Houghton, J., Y. Ding, D. Griggs, M. Noguer, P. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. Johnson, Eds., 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 881 pp.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, 437–471.
- Kistler, R., E. Kalnay, W. Collins, S. Saha, G. White, J. Wollen, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, M. Kanamitsu, V. Kousky, H. van den Dool, R. Jenne, and M. Fioriono, 2001: The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 82, 247–267.
- Knippertz, P., U. Ulbrich, and P. Speth, 2000: Changing cyclones and surface wind speeds over the North Atlantic and Europe in a transient GHG experiment. *Climate Res.*, 15:109-122.
- Rauthe, M., A. Hense, und H. Paeth, 2004: A model intercomparison study of climate-change signals in extratropical circulation. *Int. J. Climatol.*, 24, 643-662.
- Soares, C.G., R. Weisse, J.C. Carretero, and E. Alvarez, 2002: A 40 years hindcast of wind, sea level and waves in European waters. In *Proc. 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering 23-28 June 2002*. Norway, Oslo, 2002.

- Simmons, A. J., and J. K. Gibson, 2000: The ERA-40 Project Plan, ERA-40 Project Report Series No. 1, 63 pp., Eur. Cent. for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, UK.
- Schmidt, H. and H. von Storch, 1993: German Bight storms analysed. *Nature*, 365, 791.
- WASA, 1998: Changing waves and storms in the Northeast Atlantic? - *Bull. Amer. Met. Soc.* 79, 741-760.
- Weisse, R., F. Feser und H. Günther, 2003: Wind- und Seegangsklimatologie 1958-2001 für die südliche Nordsee basierend auf Modellrechnungen. *GKSS 2003/10* GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Max-Planck-Str. 1, D-21502 Geesthacht, Germany, 2003, 38pp.
- Weisse, R., H. von Storch and F. Feser, 2004: Northeast Atlantic and North Sea storminess as simulated by a regional climate model 1958-2001 and comparison with observations. *J. Climate*, im Druck.
- Weisse, R. and M. Stawarz, 2004: Long-term changes and potential future developments of the North Sea wave climate. To appear in *Proc. 8th Workshop of Wave Forecasting and Hindcasting*, 14-21 Nov. 2004, North Shore, Oahu, USA.
- Woodworth, P.L. and D.L. Blackman, 2002: Changes in extreme high waters at Liverpool since 1768. *Int. J. Climatol.*, 22:697-714.

Adresse

Dr. Ralf Weisse
Prof. Dr. Hans von Storch
GKSS Forschungszentrum
Institut für Küstenforschung
Max-Planck-Straße 1
21502 Geesthacht
Germany

E-mail: weisse@gkss.de
storch@gkss.de

Küstenrückgang als Funktion des Meeresspiegelanstiegs

Hans-Joachim Scheffer

Sellhorn Ingenieurgesellschaft mbH Hamburg

Summary

The variation of the relative sea level causes by definition vertical and horizontal shift of waterline at mean sea level. Generally the horizontal retreat of the coastline will be much larger than the product of sea level rise and beach slope. Despite some theoretical assumption of the ratio a more reliable assessment is possible if the long term development (horizontally and vertically) during Holocene can be described. Such a development has been studied in the foreshore of the west coast of Sri Lanka as part of planning and design process for coastal stabilisation measures. The location and levels of over-stepped beach rock reefs have been analysed. For the local conditions a ratio of 300 between shoreline retreat and sea level rise has been derived.

Zusammenfassung

Veränderungen des mittleren relativen Meeresspiegels bedeuten auch prinzipiell immer eine Verlagerung der Wasserlinie bei Mittelwasser vertikal und horizontal. In der Regel wird die horizontale Rückverlagerung der Küstenlinie an sandigen Küsten größer sein als das Produkt aus Anstieg und Strandneigung. Neben theoretischen Ansätze ist eine verlässliche Aussage zu dieser Beziehung möglich, wenn man holozänen Veränderungen (vertikal wie horizontal) beschreiben kann. Dies ist bei Küstenschutzplanungen an der Westküste Sri Lankas mit der Auswertung der Lage und der Höhe vorgelagerter Beach Rock Riffe durchgeführt worden. Für die lokalen Verhältnisse kann das Verhältnis zwischen Küstenrückgang und Meeresspiegelanstieg mit 300 bestimmt werden.

1 Einleitung

Die Süd West – und Westküste Sri Lankas ist in weiten Bereichen durch Küstenerosion gekennzeichnet. Durch ausschließliche passive Schutzbauwerke wie Deckwerke hat die lokale Küstenschutzbehörde CCD in den letzten Jahrzehnten versucht, lokal Schäden an Infrastruktureinrichtungen und Siedlungen zu begrenzen. In einem großen, mit einem Kredit der Asian Development Bank finanzierten Projekt soll die Küsten langfristig stabilisiert werden. Die planenden Ingenieure haben zur Ermittlung der geeigneten Maßnahmen zunächst die großräumige und langfristige Küstenentwicklung analysiert. Neben der Ermittlung der küstennahen Prozesse (Stichwort Küstenlängstransport), des Eintrages von Sedimenten in das Küstenregime durch die Flüsse und der volumetrischen Bestimmung der Erosionsmengen zur Bestimmung des aktuellen Sedimenthaushaltes wurden auch alle Informationen über die längerfristigen Veränderungen betrachtet. Dabei ist es von besonderer Bedeutung, die verschiedenen Ursachen des Rückganges der Küstenlinie nicht nur qualitativ zu beschreiben, sondern möglichst auch quantitativ zu bestimmen. Die Frage, welchen Anteil der rezente Meeresspiegelanstieg an den Rückgangsraten hat, ist dabei von großem Interesse.

1.1 Das Gleichgewichtskonzept

Weit akzeptiert ist das nach BRUUN genannte Gleichgewichtskonzept zur Bestimmung des Küstenrückganges als Folge des Meeresspiegelanstiegs. Es basierend auf der Annahme, dass sich an sandigen Küsten ein Gleichgewichtsprofil ausbildet. Dieses Konzept ist von DAEN (1986 und 2002) weiter diskutiert worden. Aber grundsätzliche Einwände gegen dieses Konzept konnten nicht ausgeräumt werden.

Das Konzept des Gleichgewichtsprofil basiert im Prinzip auf der Annahme des Erhaltes der Sedimentmassen im Strand- und Küstenvorfeldprofil. Das Konzept setzt weiter voraus, dass sich an sandigen Stränden ein Profil einstellt, das vor allem von den Eigenschaften des Strandsedimentes und nur sekundär von Seegangsverhältnissen bestimmt wird. Als Folge des Meeresspiegelanstiegs bleibt das Profil erhalten und wird landwärts und nach oben verschoben. Zur Erhaltung des Profils muss das Profil im seewärtigen Bereich erhöht werden, die dazu erforderlichen Sedimentmengen werden aus dem Strandbereich dorthin verlagert. Nach diesem Konzept ist der Küstenrückgang das lineare Produkt des Meeresspiegelanstiegs mit dem Verhältnis von Profillänge und Profilhöhe. Die grundsätzliche Schwäche dieses Ansatzes besteht in der Annahme der Existenz von Gleichgewichtsprofilen. In vielen Küstenbereichen unterliegen die bestimmenden Seegangsverhältnisse sehr starken saisonalen Veränderungen. Ebenso wird der Sedimenthaushalt häufig durch große Längstransportraten (auch Nettoraten) geprägt, auch wenn der betrachtete Küstenabschnitt selbst relativ stabil ist.

An vielen Küstenabschnitten an der Süd-West und Westküste Sri Lankas kann man saisonale Veränderungen der Strandbreite von bis zu 100 m feststellen. Während der SW Monsunzeit mit starken Windwellen und einer konstant hohen Dünung wird der Strand ausgeräumt. Er regeneriert sich aber in den Wintermonaten, wenn geringer Seegang und mäßige Dünung vorherrschen. Der langfristige Rückgang, der oftmals nur im Prozentbereich dieser saisonalen Veränderungen liegt, kann durch Vermessungen nur schwer bestimmt werden, ebenso schwierig ist es, ein stabiles Vorstrandprofil zu ermitteln.

Die konstant aus südlicher Richtung anlaufenden langen Dünungswellen bestimmen an der Westküste den in nördliche Richtungen resultierenden Küstenlängstransport. Gespeist wird der Sedimenttransport durch den Sedimenteintrag der großen Flüsse und in gewissem Umfang auch durch die Erosionsmengen aus der Süd-Westküste. Die Sedimentmengen, die durch die saisonalen Veränderungen des Strandprofils in Bewegung sind, sind in vielen Strandabschnitten geringer als der Nettolängstransport, aber weitaus größer als die Sedimentmengen, die zum Erhalt des Gleichgewichtsprofil als Folge des Meeresspiegelanstiegs nach dem BRUUN / DEAN Konzept zu erwarten sind.

An den Küsten Sri Lankas ist eine signifikante saisonale Schwankung des Meeresspiegel ermittelt worden (MAUNSELL et al., 2000), die in der Größenordnung von 20 cm liegt. Während der SW Monsunzeit in den Sommermonaten, wenn die Strände ausgeräumt werden, ist der Meeresspiegel geringer als im Winter, wenn die Strände breiter sind. Mit dem BRUUN / DEAN Konzept wurde unter Berücksichtigung der lokalen Verhältnisse bestimmt, dass der Küstenrückgang ca. 50 bis 100 mal größer als der Meeresspiegelanstieg ist. Basierend auf wiederholten Profilmessungen und Bilanzierungen des Sedimenthaushaltes konnten (BEHNSEN et. al, 1995) typische Profile bestimmt werden, die nicht der von DEAN in vielen Veröffentlichungen vorgestellten Form entsprechen. Es wurde die so genannte „closure depth“ ermittelt, die den Bereich des aktiven Profils angibt, damit konnte das Erosionsvolumen mit den Rückgangsraten bestimmt werden. Danach ergeben sich typische Profillängen von 200 bis 250 m mit Profiltiefen von 3,5 m unter Mittelwasser bei typischen Strandhöhen von 3 m. Danach wäre der Küstenrückgang jedoch nur 30 bis 40 mal so groß wie der Meeresspiegelanstieg, wenn er durch das Produkt aus Profillänge und Profilhöhe bestimmt würde.

1.2 Beach Rock in Sri Lanka

In Sri Lanka trifft man rund um die Insel mit ihrer ca. 1600 km Küstenlinie Beach Rock in allen Abschnitten an. Er liegt entweder unter den Dünen, bildet eine Art Fußvorlage vor dem Strand oder ist der Küste als Riff vorgelagert. Er bildet über viele km eine geradlinige, relativ dünne und schmale Formation, verläuft aber in Buchten ebenso bogenförmig. Er ist zumeist bis zu 1 m stark und bis zu 20 m breit. Beach Rock besteht aus zementierten Strandsedimenten und entsteht durch Verdunstung im heißen Strand bei absinkendem Tidewasserstand und dem Ausfällen von Kalzium Carbonat. Er entsteht im Bereich des Mittelwasser bzw. auch leicht darüber. Da der Tidehub in Sri Lanka sehr gering ist (mittlerer Tidehub ca. 0,5 m), kennzeichnet der Beach Rock die Strandlinie bei Mittelwasser. Abbildung 1 zeigt den Beach Rock nördlich von Colombo, wo er eine schützende Funktion für die Dünen bildet.

Da Beach Rock aus zementierten Strandsedimenten gebildet wird, können die Sedimenteigenschaften des Strandes und die lagenweise Anordnung gut erkannt werden und mit den aktuellen Strandsedimenten verglichen werden. Saisonal sind weite Strandabschnitte mit einer sehr dünnen Schicht schwarzer Schermetalle abgedeckt. Ein Querschnitt zeigt dann eine klare Schichtung. Diese ist ebenso im nahen Beach Rock zu erkennen.



Abb. 1: Beach Rock als natürliche Berme nördlich von Colombo

Beach Rock als quasi natürliche Berme vor den sandigen Stränden und Dünen bildet einen hervorragenden Schutz gegen Erosion, wie auch die Betrachtung der Abbildung 1 erahnen lässt. Die Wassertiefe kann jedoch direkt vor der Formation infolge von Kolken bis zu 2 m betragen und der plattenartige Beach Rock wird so an vielen Stellen unterhöhlt, so dass große Platten einbrechen. Bei höheren Wasserständen brechen die Wellen direkt auf dem Beach Rock mit landwärtiger Transmission von Wassermengen, die dann zumeist konzentriert in den Bereichen abgebrochener Platten zurückfließen. Dadurch werden Strandsedimente seewärts verfrachtet und ein Riff - Rinnensystem entsteht. Dieser

Prozess wird durch den ansteigenden Meeresspiegel verstärkt und der Beach Rock bildet schließlich eine Art vorgelagertes Riff. Diese Situation lässt sich besonders gut nördlich von Colombo im Bereich Pegasus Reef studieren. In Abbildung 2 ist der als Secondary Reef bezeichnete Beach Rock gut zu erkennen, dessen Kronenhöhe auf ca. Mean Sea Level liegt. Es wird als „secondary“ bezeichnet, weil ca. 1 km weiter seewärts ein weiteres, sehr durchgehend geschlossenes „offshore“ Riff mit einer Kronenhöhe von ca. -2,8 m MSL befindet. Dieses Riff wird von verschiedenen Autoren auch irrtümlich als Korallenriff bezeichnet. Insgesamt sind 5 Riffformationen in diesem Küstenabschnitt aufgenommen worden (COORAY & KATUPOTHA, 1991). Beide (offshore und secondary) Formationen sind relativ gut beschrieben, der Autor hat bei Taucheinsätzen selbst die Formationen aufgenommen. Es ist interessant, dass der seeseitige Bereich von großen gebrochenen Platten „gepflastert“ ist, das Riff im Kronenbereich aber ansonsten noch weitgehend eben, durchgehend und ungebrochen ist. Der Einfluss beider Riffsysteme auf die hydraulischen Küstenprozesse ist durch simultane Messungen des Seeganges vor der Küsten, zwischen den beiden Riffen und in der Rinne zwischen Secondary Reef und Strand sowie Strömungsmessungen (Euler und Lagrange Methode) erfasst worden. Einige Ergebnisse sind von GUNARATNA et al. (1999) veröffentlicht.



Abb. 2: Vorgelagertes Beach Rock Riff nördlich von Colombo

1.3 Riffformationen südlich von Colombo

Im Auftrag der United Nations Revolving Fund for Natural Resources Exploration (UNRFNRE) hat das Geological Survey of Canada die Sedimente südlich von Colombo zwischen Panadura und Bentota im Bereich der Wassertiefen von -10 bis -50 m untersucht (GSC, 1997). Es sollte ermittelt werden, ob es wirtschaftlich sinnvoll ist, die dort abgelagerten Sedimente mit hohen Schwermetallanteilen zu fördern. Seismische Untersuchungen und flächenhafte bathymetrische Messungen (mit Echolot und

Sidescan Boomer) wurden durchgeführt. Allerdings ist die Anzahl der entnommenen Bodenproben gering und Untersuchungen der oberen Schichten (z. B. mit Virbocoring) wurden nicht durchgeführt. In diesem Küstenabschnitt mündet der Kalu Ganga, der hinsichtlich Abflussmengen und Sedimenteintrag größte Fluss an der Westküste sowie der kleinere Fluss Bentara Ganga. Die gut 200 km lange Küste nördlich des Kalu Ganga ist geprägt von sehr langgestreckten, elliptisch geformten sandigen Buchten (mit einem mittleren Verhältnis Länge zu Tiefe von ca. 14 bei bis zu 60 km langen Abschnitten). Diese Küstenabschnitte sind erdgeschichtlich sehr jung und sind durch den Sedimenteintrag der Flüsse entstanden. Weiter nördlich befindet sich die Küsten in Transgression, dort entstehen neue Inseln und Landzungen, gespeist aus dem Küstenlängstransport.

Durch die seismischen Untersuchungen wurden die verfüllten Paläo- Flusstäler des Kalu Ganga und Bentara Ganga gut aufgenommen, die Abbildung 3 zeigt diese Formationen. In den Flusstälern findet man baggerfähige Sedimente mit hohem Schwermetallanteil, während die hell dargestellten Flächen durch nicht baggerbare verfestigte Bodensedimente geprägt werden. Erst im Küstenprofil zwischen der -10 m Tiefenlinie und dem Strand sind wieder lose Sedimente angetroffen worden. Weiter nördlich (im Bereich Panadura) wurden küstenparallele, riffartige Strukturen erfasst, wie in Abbildung 4 dargestellt. Diese wurden von den kanadischen Geologen interpretiert als „*relief barrier spits or beach features, possibly cemented and over-stepped during marine transgression*“. Es ist auch interessant, dass zwischen diesen Riffen der Meeresboden mit bis zu mehreren Metern starken, losen und grobsandigen Schichten bedeckt ist.

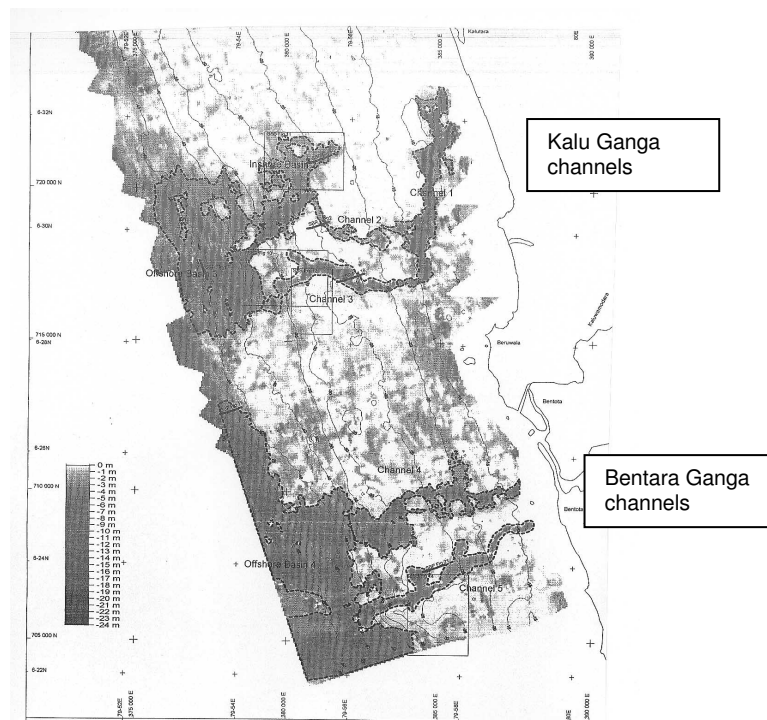


Abb. 3: Oberflächensedimente und Paläoflußtäler südlich von Panadura

Die Abbildung 5 ist dem kanadischen Bericht entnommen. Deutlich sind diese Riffe in ihrer Lage und Kronenhöhe identifizierbar. Der Schelfhang fällt weiter auf ca. -60 bis -70 m ab und bildet dann ein 20 km breites Plateau, bevor es dann sehr steil (ca. 5 - 8°) in Wassertiefen von mehr als 1000 m abfällt. Der Autor hat das Profil landseitig - basierend auf kürzlichen Messungen - ergänzt. Wenn man dieses Profil so interpretiert, dass diese Riffe aus Beach Rock bestehen und die Kronenhöhen der Riffe zum Zeitpunkt ihrer Entstehung den damaligen Meeresspiegel beschreiben, kann man den Küstenrückgang

mit dem Meeresspiegelanstieg korrelieren. Es wird auch deutlich, dass die Küstenrückgangsrate nicht konstant ist. Allerdings sind die wenigen Untersuchungen nicht ausreichend, um eine Korrelation zwischen der Meeresspiegelanstiegsrate und der Rückgangsrate zu ermitteln.



Abb. 4: Riffsystem bei Panadura im Süden Colombos

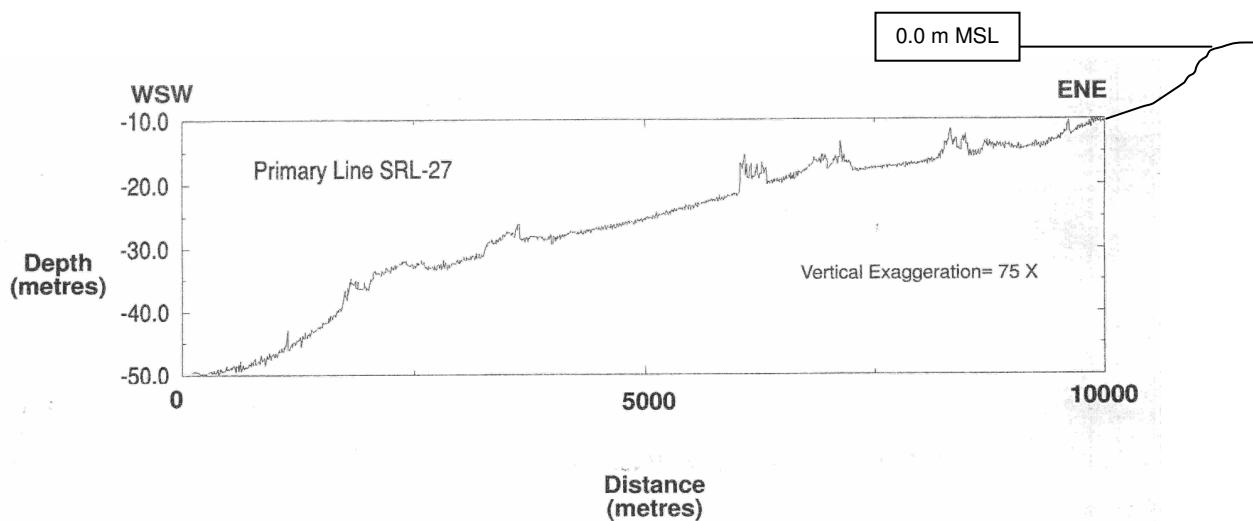


Abb. 5: Profil des Kontinentalschelfs bis - 50 m MSL

Die Auswertung der Riffsysteme nördlich und südlich von Colombo sind in Abbildung 6 dargestellt. Trotz großer Streuungen kann als Mittel ein Küstenrückgang von ca. 300 m pro m Meeresspiegelanstieg ermittelt werden (0,3 m pro mm) mit einer Streuung zwischen 200 und 500 m. Diese Rate ist weitaus größer als das Konzept des Gleichgewichtsprofils basierend auf den quasi Normprofile von DEAN oder unter Verwendung lokaler Vermessungen erwarten lässt.

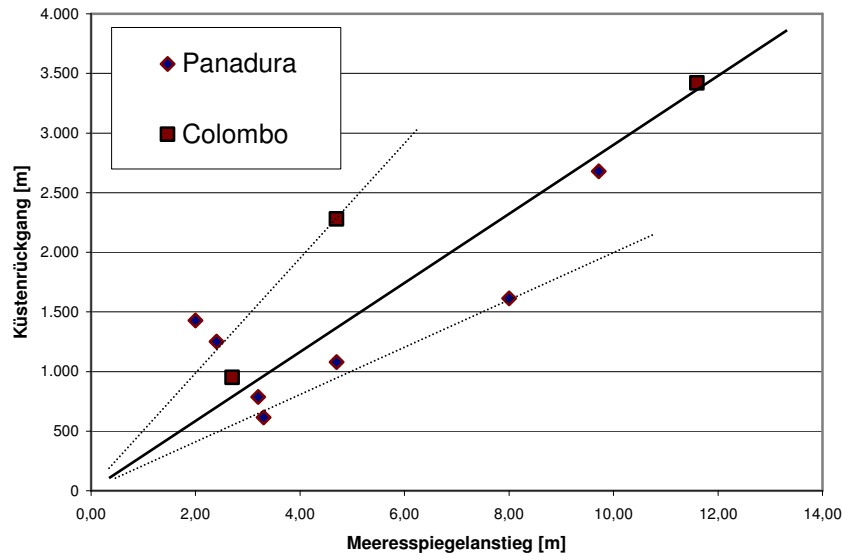


Abb. 6: Beziehung zwischen Küstenregression und Meeresspiegelanstieg an der Westküste Sri Lankas

2 Kontinentalprofil

Neben den Betrachtungen kleinräumiger Veränderungen kann bereits auch eine Betrachtung des Kontinentalprofils Hinweise auf die Größenordnung des Verhältnisses zwischen Küstenrückgang und Meeresspiegelanstieg und natürlich dann ebenso zwischen Küstenfortschritt und Meeresspiegelabsenkung geben. Inwieweit dieses auch für andere Küsten zutrifft, sei dahingestellt. In Abbildung 7 ist das Profil des Kontinentalschelfs bei Panadura grob dargestellt. Man kann 3 Plateaus beschreiben:

zunächst das Peneplain mit Höhen zwischen 100 und 200 m über Meeresspiegel,

den Küstenstreifen, der bis zu 10 km breit sein kann und nur leicht über dem Meeresspiegel liegt und durch eine Reihe von Lagunen bzw. Strandseen gekennzeichnet ist (auf Meeresspiegelniveau), ebenso werden mit Feinststoffen durchsetzte und zusammengepresste Korallenstöcke mehrere km landeinwärts abgebaut, und

den Kontinentalschelf mit 50 bis 70 m Wassertiefe.

Küstenprofil

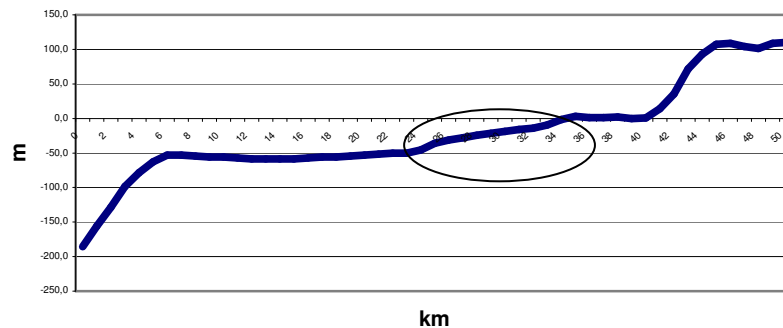


Abb. 7: Kontinentalprofile an der Westküste Sri Lankas mit Angabe Bereich Abbildung 5

Man kann annehmen, dass die Höhe des Küstenstreifens und die Höhenlage des Kontinentalschelfs als Resultat der quartären Meeresspiegelschwankungen entstanden sind, sie sind insofern ein guter Indikator des möglichen Lage der Küstenlinie bei unterschiedlichen Meeresspiegelhöhen. Die kleinen Formationen des Hanges mit all seinen individuellen Formen (wir z. B. Beach Rock Riffe) sind dann eingebettet in das großräumige Profil zwischen Peneplain und Kontinentalschelfplateau. Wenn man entsprechend die mittlere Neigung zwischen aktuellem Strand und ebenem Kontinentalschelfplateau betrachtet (siehe Abbildung 4), kommt man zu dem Schluss, dass die mittlere Neigung 1 : 250 beträgt. Dieser Wert liegt nahe an der ermittelten Korrelation basierend auf der Lage und Höhe der Beach Rock Riffe.

3 Küstenregression und Stabilisierungskonzepte

Durch den Vergleich der von den Briten zum Ende des 19. Jahrhunderts ermittelten Tideinformationen und der für Sri Lanka festgelegten Bezugshöhe MSL (Mean Sea Level), die damals sicherlich auch dem physikalischen mittleren Wasserspiegel entsprach, mit den ca. ein Jahrhundert später gemessenen Tidewasserständen kann der rezente Meeresspiegelanstieg an den Küsten Sri Lankas mit 1,05 bis 1,38 mm / Jahr angegeben werden (MAUNSELL et. al, 2000).

Der mittlere Küstenrückgang im Bereich der Süd-Westküsten südlich des Kalu Ganga wird von CCD mit im Mittel 0,3 m pro Jahr angegeben. Dieser Wert ist durch die Auswertung umfangreicher sekundärer Informationen ermittelt worden. Die Süd-Westküste ist durch Pocket Beaches mit langgestreckten Buchten zwischen Headlands charakterisiert. Dieser Wert nimmt nördlich der Mündung des Kalu Gangas signifikant bis zu 1 m pro Jahr zu. Die Küste nördlich der Flussmündung ist durch die Eintragung und Verfrachtung der Flusssedimente in jüngster geologischer Vergangenheit entstanden.

Durch die in den letzten Jahrzehnten signifikant zunehmende Entnahme von Sanden aus den Unterläufen der Flüsse (zu Bauzwecken) ist besonders der Sandeintrag in das Küstenregime drastisch reduziert worden. Zum Ausgleich der Sedimenthaushalte werden Strandsedimente in gleicher Größenordnung wie der Rückgang der Flusseintragsmengen erodiert. Es gibt lokal begrenzte Bereiche mit einer Rückgangsrate von bis zu 30 m pro Jahr. Eine Sediment-Bilanzierung der von den Flüssen eingetragenen Sedimente mit den in Küstenabschnitte durch den Längstransport eingetragenen Sedimenten und den Erosionsmengen mit einem Vergleich der berechneten Küstenlängstransportraten ist bei BEHNSEN et. al. (1995) und bei NIRAS et. alt. (2003) gegeben.

Daraus konnte geschlussfolgert werden, dass in den Küstenbereichen, deren Rückgang besonders durch die fehlenden Flusssedimente verursacht wird, ein Ausgleich des Sedimenthaushaltes durch Sandvorspülungen die geeignete Maßnahme darstellt, um die Küsten zu stabilisieren.

Im Bereich der Südwestküste werden geringere Sedimentmengen durch den Längstransport zu den unterschiedlichen Jahreszeiten verfrachtet und der Nettotransport ist in den größeren Abschnitten übers Jahr relativ gering. Ebenso tragen die Flüsse nur sehr geringe Sedimentmengen in den Küstenbereich ein. Der über lange Zeit beobachtete moderate Küstenrückgang von 0,3 m pro Jahr kann in diesem Bereich als Folge des Meeresspiegelanstiegs interpretiert werden. Es wurde daraus gefolgert, dass Strandvorspülungen nur begrenzt eine stabilisierende Wirkung haben werden, es aber sinnvoll ist, zwischen zu verstärkenden künstlichen Headlands die Strände zu verbreitern und dadurch Puffer gegen die Seegangskräfte zu schaffen.

Umfangreiche Baumaßnahmen an 7 Küstenabschnitten sind geplant worden und werden aktuell (2003 – 2005) durchgeführt. Ein in mehreren Abschnitten geplantes Konzept sieht die Schaffung künstlicher Headlands durch den Bau von Offshore -Wellenbrechern und die künstliche Schaffung von Tombolos durch Einspülen in tieferen Bereichen gebaggerter Sande vor. Weiterhin wird erstmalig in Sri Lanka auch Strandersatz (um den von KOHLHASE, 2004 vorgeschlagene Begriff zu nutzen, der in diesem

Projekt die Funktion der Baumaßnahme treffen beschreibt) im großen Stil durchgeführt, insgesamt werden 3,5 Million Kubikmeter Sand an die Küsten gespült.

4 Literatur

- BEHNSEN, F. / WICKRAMANAYAKA, I.M. / SCHEFFER, H-J.: Sediment Budget Analysis for the Coastal Reach from the Maha Oya Estuary to Lansigama at the West Coast of Sri Lanka. In: Proceedings of COPEDEC IV, Rio de Janeiro 1995.
- COORAY, P.G. / KATUPOTHA, J.: Geological evolution of the coastal zone of Sri Lanka. In: Proceedings Seminar on Causes of Coastal Erosion in Sri Lanka, CCD-GTZ Coast Conservation Project, Colombo 1991.
- DEAN, R.G.: Sediment budget principles and applications. In: Proceedings Short Course, 20th ICCE, Taipei, R.O.C.
- DEAN, R.G.: Beach Nourishment, Theory and Practice. Advanced Series on Ocean Engineering – Vol. 18, World Scientific 2002
- GEOLOGICAL SURVEY OF CANADA (ATLANTIC): Offshore Exploration for Heavy Minerals in Sri Lanka. UNRFNRE Project SRL / 88 / No1-1
- GUNARATNA, P.P. / JUSTESEN, P. / ABEYSIRIGUNAWARDENA, D.S. / SCHEFFER, H-J.: Application of Mathematical Modelling in Optimizing Layout of a Large Industrial Fishery Harbour. In: Proceedings 26th ICCE, Copenhagen 1999.
- KOHLHASE, S.: Zur Konzeption von technischen Maßnahmen zur Küstensicherung. In: Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft, 54. Band, 2004.
- MAUNSELL McIntyre / The CORNELL GROUP / SELLHORN INGENIEURGESELLSCHAFT / LANKA HYDRAULIC INSTITUTE / RESOURCES DEVELOPMENT CONSULTANTS: Interim Report Colombo Port South Harbour Development Project – Feasibility Study. Colombo 2000.
- NIRAS PORTCONSULT A/S / SELLHORN INGENIEURGESELLSCHAFT / LANKA HYDRAULIC INSTITUTE: Draft Detailed Design Report No. 1 and 2. Coastal Resources Management Project, Coastal Stabilisation Component, Colombo 2001 and 2003

Adresse

Dr. –Ing. Hans-Joachim Scheffer
Sellhorn Ingenieurgesellschaft mbH
Teilfeld 5
20459 Hamburg
Germany

E-mail: scheffer@sellhorn-hamburg.de

Mitteleuropäische Hochwasserentwicklung im Kontext atmosphärischer Zirkulationsschwankungen

Jucundus Jacobeit, Rüdiger Glaser, Matthias Nonnenmacher, Heiko Stangl

Summary

According to historical climate data Central Europe has repeatedly experienced distinct periods of significantly increased and decreased flood incidence on decadal time scales. Based on objectively reconstructed sea level pressure grids, links with atmospheric circulation dynamics could be identified: thus, during particular periods of the Little Ice Age, non-zonal circulation patterns became more important for flood events during winter. For spring and summer, long-term variations of within-type indices (referring to the relative vorticity and the amount of precipitation) are linked with the varying incidence of flood events. Thus, impacts far beyond the well-known NAO variations have to be taken into account on long-term time scales.

Zusammenfassung:

Nach historisch-klimatologischen Befunden hat es in Mitteleuropa auf multidekadischer Zeitskala wiederholt Perioden signifikant erhöhter bzw. erniedrigter Hochwasserhäufigkeit gegeben. Auf der Grundlage objektiv rekonstruierter Bodenluftdruckfelder ergeben sich dafür Verbindungen mit atmosphärischen Zirkulationsschwankungen: so ist während bestimmter Phasen der Kleinen Eiszeit die Bedeutung nicht-zonaler Zirkulationsmuster für Hochwasserereignisse im Winter erkennbar angestiegen. Im Frühjahr und Sommer stehen langfristige Variationen typinterner Parameter (relative Vorticity, Niederschlagsergiebigkeit) in Verbindung mit variierenden Hochwasserhäufigkeiten. Insgesamt sind bei langfristiger Betrachtung zahlreiche Einflussmomente jenseits der wohlbekannten NAO-Schwankungen zu berücksichtigen.

1 Einführung

Amtliche und standardisierte Meßreihen für meteorologische Größen oder Flusspegel reichen meist nicht länger als höchstens 200 Jahre in die Vergangenheit zurück. Dieser Zeitraum ist jedoch viel zu kurz, um Aussagen über langfristige Entwicklungen treffen zu können. Beispielsweise lässt sich aus der Zunahme des jährlichen Hochwasserabflusses am Pegel Köln seit 1891 (Mendel et al. 1997) nicht schlussfolgern, ob es sich dabei um einen neuartigen Trend handelt oder aber um eine Phase in der langfristigen Variabilität, die auch in weiter zurückliegenden Zeiträumen schon ähnlich aufgetreten ist. Das Fachgebiet der Historischen Klimatologie geht derartigen Fragestellungen durch eine Erweiterung der Datenbasis in die Vergangenheit nach. Als Grundlage dienen dabei die größtenteils schriftlichen Aufzeichnungen zeitgenössischer Beobachter. Zur Ergänzung und Verifizierung des Datenmaterials werden auch sog. Proxydaten (etwa aus Baumringen oder Sedimenten) herangezogen.

Hochwasserereignisse erregten zu allen Zeiten das Interesse der Bevölkerung und gaben Anlaß zur Verarbeitung und Verbreitung diesbezüglicher Informationen. In den historischen Quellen finden sich insbesondere Hinweise auf die Hochwasserfolgen sowie die sozialen und ökonomischen Auswirkungen. Alle Schaden bringenden Hochwässer setzten einen administrativen Apparat in Gang, dessen Entschlüsselung Informationen über die Art und Schwere und damit auch über die Intensität des Hochwassers gibt. Basierend auf diesen Angaben zur sozialen Dimension sowie zu den morphologischen Folgewirkungen von Hochwässern entwarfen Sturm et al. (2001) ein Schema zur Intensitätsklassifizierung derartiger Ereignisse, das kleine, regionale Hochwässer (Klasse 1), überdurchschnittli-

che oder überregionale Hochwässer (Klasse 2) sowie überdurchschnittliche, überregionale Hochwässer katastrophalen Ausmaßes (Klasse 3) unterscheidet.

Bei den resultierenden Hochwasserreihen ist zu berücksichtigen, dass sie stets sowohl natürliche Einflussfaktoren als auch anthropogene Eingriffe widerspiegeln. So führen z.B. Modifikationen im Siedlungswesen und im Katastrophenmanagement, Veränderungen im Flusseinzugsgebiet sowie Verlagerungen und Baumaßnahmen im Flusslauf zu regionalen Unterschieden im zeitlichen Verlauf der Hochwasserhäufigkeit (Beispiele hierzu in Jacobeit et al. 2004). Auf der anderen Seite steht die übergreifende klimatische Steuerung des Hochwassergeschehens, der hier dadurch Rechnung getragen werden soll, dass hochwasserreiche und hochwasserarme Zeitabschnitte betrachtet werden, wie sie sich für die letzten 500 Jahre auf der Basis von vier großen mitteleuropäischen Flusssystemen ergeben (Main sowie mittlere Flussabschnitte von Rhein, Elbe und Weser). Diese Reihen zeichnen sich sowohl durch eine qualitativ hochwertige Datenbelegung im dokumentarischen Zeitraum als auch durch möglichst weit ins 19. Jahrhundert zurückreichende Pegelaufzeichnungen aus. Regionale Unterschiede, wie sie in der Hochwasserhäufigkeit auch zwischen diesen Flussgebieten auftreten (Wanner et al. 2004), werden zugunsten der vorherrschenden Verhältnisse in Mitteleuropa hier also nicht berücksichtigt.

Sucht man nun nach Zusammenhängen zwischen Hochwasserhäufigkeit und Schwankungen der großskaligen atmosphärischen Zirkulation, lassen sich nordatlantisch-europäische Bodenluftdruckfelder heranziehen, die Luterbacher et al. (2002) mittels multivariater statistischer Methoden aus frühen Messreihen und archivarisches abgeleiteten Witterungsindizes für die letzten 500 Jahre approximativ rekonstruiert haben. Die Güte dieser Rekonstruktionen ist besonders hoch für den Winter und die Zeit seit der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts, lässt allerdings datenbedingt in den noch älteren Zeitabschnitten und den anderen Jahreszeiten etwas nach (Luterbacher et al. 2002). Gleichwohl können diese fünfhundertjährigen Druckfeldrekonstruktionen für zirkulationsdynamische Analysen herangezogen werden, wie sie zuvor fast nur seit Ende des 19. Jahrhunderts möglich gewesen sind.

Eingeschränkt sind die Analysemöglichkeiten allerdings durch die datenbedingt grobe zeitliche Auflösung (monatlich seit 1659, zuvor sogar nur saisonal). Daher können für den Gesamtzeitraum auch keine Untersuchungen synoptischer Störungssysteme angestellt werden, die zur unmittelbaren Auslösung von Hochwasserereignissen geführt haben. Vielmehr wird hier dem Konzept einer „Flood Hydroclimatology“ gefolgt, das von Hirschboeck (1988) formuliert worden ist. Demnach werden Hochwasserereignisse im Kontext längerfristig variierender Klimabedingungen und ihrer Zirkulationsverhältnisse betrachtet, wobei im Mittelpunkt Veränderungen auf übergeordneten Zeitskalen stehen, die die maßgeblichen Rahmenbedingungen für die Entstehung unmittelbar flutauslösender Prozesse konstituieren. Es wird also nicht auf die Einzelereignisse selbst, sondern auf den zirkulationsdynamischen Hintergrund abgehoben, der sie in ihrem Auftreten entweder begünstigt oder restringiert.

2 Mitteleuropäische Hochwasserentwicklung

Abb. 1 zeigt die mitteleuropäische Hochwasserhäufigkeit im Winter während der letzten 500 Jahre. Dabei sind aus Homogenitätsgründen die Hochwässer der untersten Klasse 1 nicht berücksichtigt. Für den Pegelmesszeitraum, in dem keine allgemein gültige Definition eines Hochwasserereignisses existiert, basiert die Zeitreihe auf signifikant überdurchschnittlichen

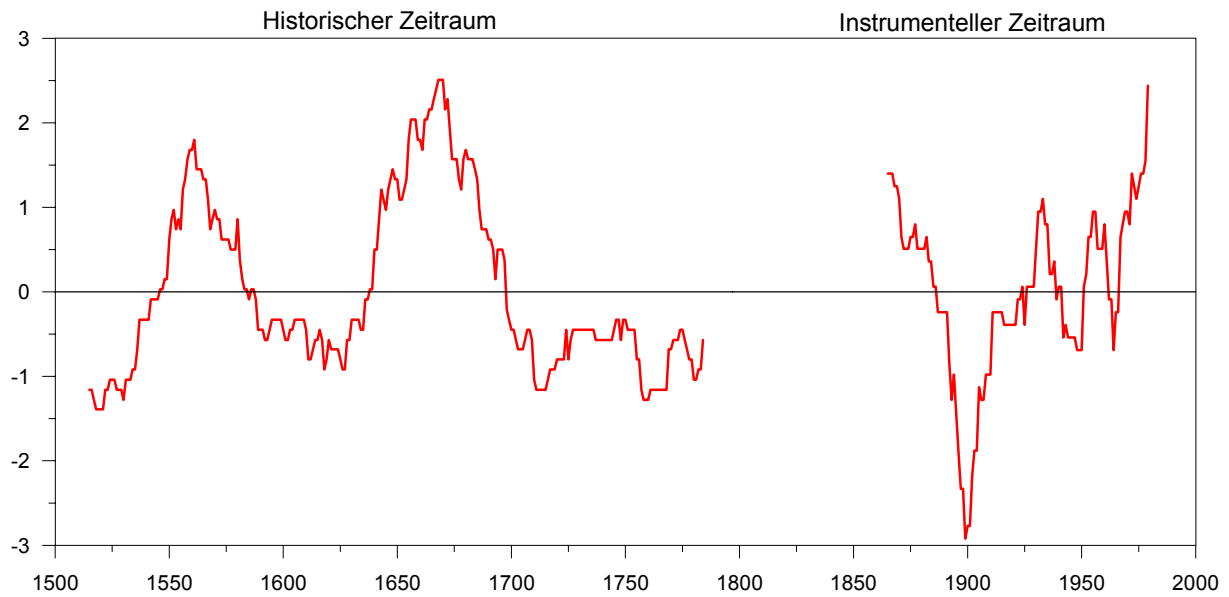


Abb. 1: Standardisierte gleitende 31-jährige winterliche Hochwasserhäufigkeiten in Mitteleuropa seit 1500 (nach Jacobeit et al. 2003b). Es liegen Daten aus vier Flussgebieten zugrunde (Main sowie mittlere Abschnitte von Rhein, Weser und Elbe). Die historische Periode beruht auf dokumentarischem Material (Glaser 2001), in der instrumentellen Periode sind Häufigkeiten signifikant überdurchschnittlicher monatlicher Maximalabflüsse dargestellt (Sturm et al. 2001).

	hochwasserreich	hochwasserarm
Winter:	1537 – 1577	1500 – 1536
	1628 – 1685	1696 – 1731
	1829 – 1883	1741 – 1783
	1916 – 1948	1786 – 1796
	1965 – ?	1884 – 1915
Frühjahr:	1534 – 1566	1611 – 1648
	1587 – 1610	1699 – 1743
	1670 – 1698	1769 – 1826
	1744 – 1768	1902 – 1939
	1827 – 1901	
Sommer:	1557 – 1600	1601 – 1654
	1655 – 1699	1700 – 1731
	1954 – 1981	1762 – 1799
		1887 – 1925

Tab. 1: Hochwasserreiche und hochwasserarme Zeitabschnitte in Mitteleuropa seit 1500 in den 4 Flussgebieten Main (Pegel Würzburg), mittlerer Rhein (Pegel Köln), Weser (Pegel Hannover-Münden) und mittlere Elbe (Pegel Dresden). Die Angaben beruhen im Zeitraum 1500-1800 auf der Datenbank HISKLID (Glaser 2001), anschließend auf Pegelmessreihen (Sturm et al. 2001).

monatlichen Durchflussmaxima (vgl. Sturm et al. 2001). Es zeigt sich eine klare Gliederung in Zeitabschnitte erhöhter bzw. erniedrigter Hochwasserhäufigkeit, sowohl in der historischen als auch in der instrumentellen Periode (gleiches gilt für die anderen Jahreszeiten). Zur weiterführenden Analyse werden hochwasserreiche bzw. hochwasserarme Phasen herangezogen, die als Zeitabschnitte definiert werden, in denen die gleitende 31-jährige Hochwasserhäufigkeit um mehr als eine Standardabweichung über bzw. unter dem 500-jährigen Mittelwert liegt. Tab. 1 spezifiziert diese hochwasserreichen und hochwasserarmen Phasen in Mitteleuropa getrennt für die Jahreszeiten Winter, Frühjahr und Sommer (Herbst entfällt als generell hochwasserarme Jahreszeit im größten Teil Mitteleuropas).

3 Atmosphärische Zirkulationsdynamik

Die zirkulationsdynamische Betrachtung richtet sich auf einen direkten Vergleich der unterschiedlichen Zeitabschnitte gesteigerter bzw. reduzierter Hochwasserhäufigkeit nach Tab. 1. Die Analysen basieren auf jahreszeitspezifischen grundlegenden Zirkulationsmustern, wie sie sich aus t-modalen Hauptkomponentenanalysen der rekonstruierten Bodenluftdruckfelder für den Gesamtzeitraum 1500-1999 ableiten lassen (vgl. Jacobeit et al. 2001). Die zeitliche Variabilität dieser Zirkulationsmuster wird in Anlehnung an Jacobeit et al. (2003a) über fünf verschiedene Parameter ausgedrückt:

- a) ein Index der Auftrittshäufigkeit (H), der jeweils als Summe der führenden Hauptkomponentenladungen über gleitende 30-jährige Zeitintervalle bestimmt wird (führend ist die Ladung eines Musters, wenn sie in einer bestimmten Zeiteinheit die größte unter den Ladungen aller Muster ist);
- b) ein Intensitäts-Index (I), der den Druckgradienten zwischen denusterspezifischen Aktionszentren approximiert (bei zonaler Westströmung also zwischen Azorenhoch und Islandtief);
- c) ein Vorticity-Index (V), der die zyklonale (positive) bzw. antizyklonale (negative) Abweichung der relativen Vorticity vom langzeitlichen Monatsmittel über Zentraleuropa ausdrückt;
- d) einusterspezifischer Niederschlags-Index (N), der den mittleren Niederschlag in Deutschland bei Vorherrschen des betreffenden Zirkulationsmusters wiedergibt;
- e) einusterspezifischer Temperatur-Index (T) analog zu N.

N und T beruhen auf $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ Gitterfeldern, die in ähnlicher Weise wie die Bodenluftdruckfelder zurück bis zum Jahr 1500 rekonstruiert worden sind (Luterbacher et al. 2002). Sämtliche Indizes werden in standardisierter Form verwendet und für hochwasserreiche und hochwasserarme Zeitabschnitte vergleichend gegenübergestellt.

Sommer:

Seine grundlegenden Zirkulationsmuster (Abb. 2) umfassen neben der zonalen Westlage (W) eine Hochdruckbrücke zwischen Azorenraum und Skandinavien (BR), eine Nordlage zwischen Atlantikhoch und westrussischem Tief (N) sowie eine Zentraltieflage im Bereich der Britischen Inseln (TB). Der Gesamtvarianzerklärungsanteil liegt bei rund 95%. Die spezifische Bedeutsamkeit für das langfristig variable Hochwassergeschehen in Mitteleuropa wird aus Abb. 3 ersichtlich, in der die zuvor genannten Zirkulationsparameter gemittelt über alle hochwasserreichen bzw. hochwasserarmen Phasen gegenübergestellt sind (S steht für signifikante Unterschiede). Keine Rolle für das sommerliche Hochwassergeschehen spielen die Nordlagen (N), die häufiger in hochwasserarmen Zeitabschnitten auftreten und dann sogar im

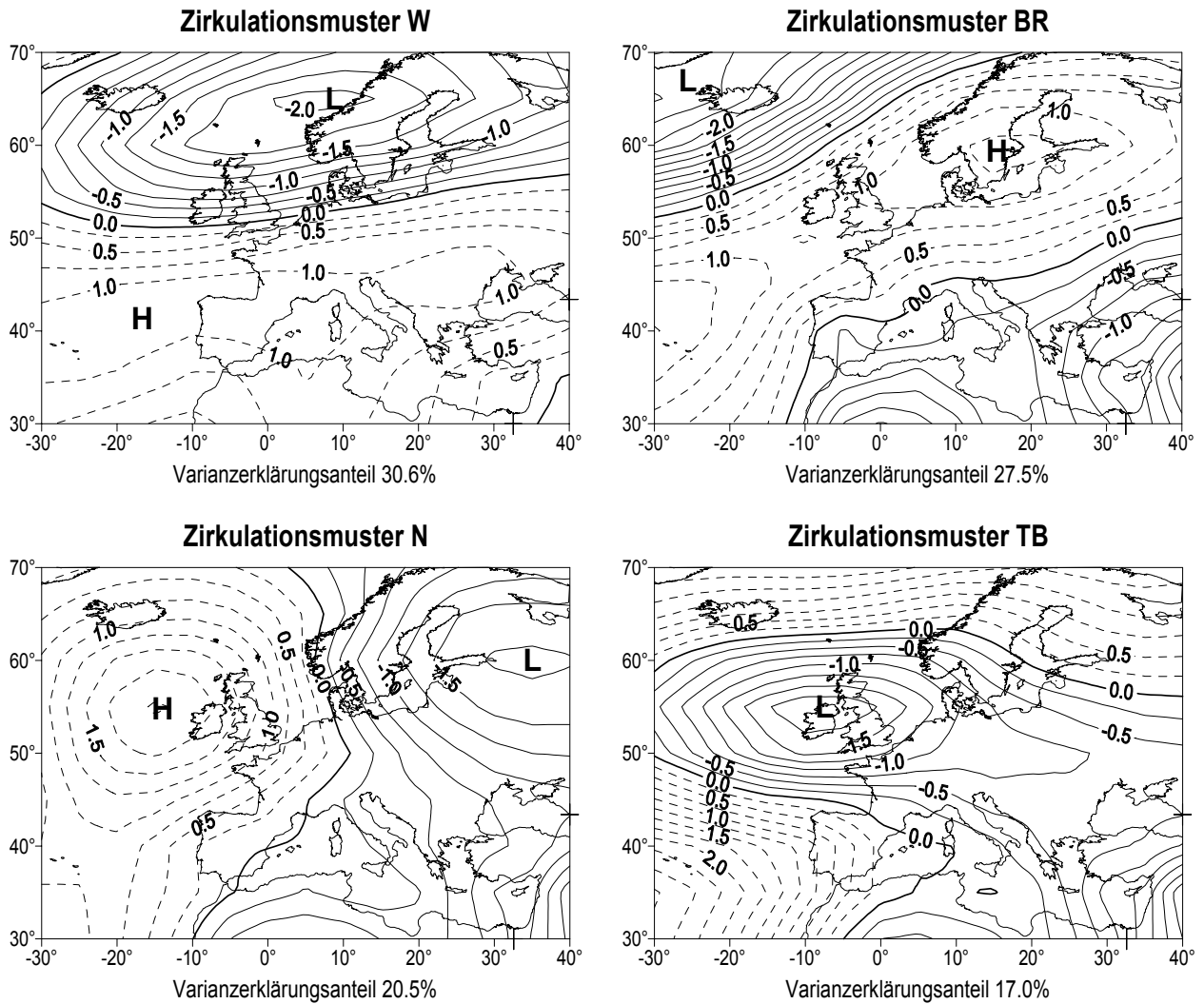
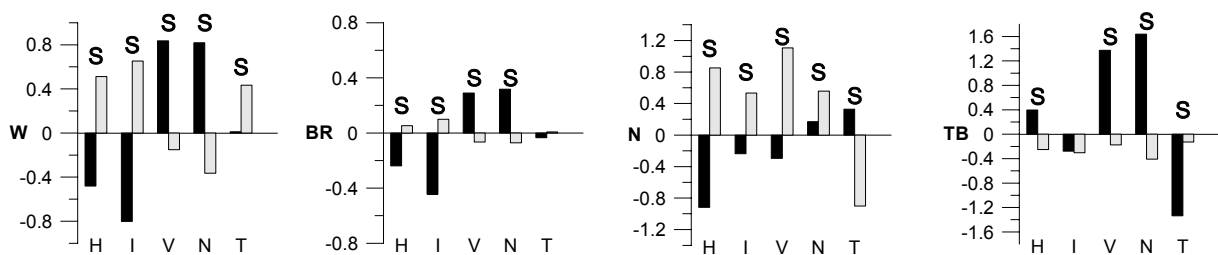


Abb. 2: Grundlegende Zirkulationsmuster aus den Bodenluftdruckfeldern Sommer 1500-1999 (nach Jacobeit et al. 2004)



Parameter (standardisiert): H: Häufigkeit, I: Intensität, V: Vorticity, N: Niederschlag, T: Temperatur
S signifikante Unterschiede zwischen hochwasserreichen und -armen Phasen (2-seitiger U-Test, Si=95%)

■ hochwasserreiche Phasen
 □ hochwasserarme Phasen

Abb. 3: Gemittelte Parameter für die Zirkulationsmuster aus Abb. 2 im Vergleich der hochwasserreichen und -armen Phasen, Sommer 1500-1999 (nach Jacobeit et al. 2004)

Mittel höhere Intensitäts-, Vorticity- und Niederschlagswerte zeigen als in den hochwasserreichen Perioden. Das einzige Zirkulationsmuster, das in diesen Zeitabschnitten signifikant häufiger auftritt, ist die Zentraltiefelage über Großbritannien (TB), die dabei im Mittel auch stärker zyklonal geprägt und

mit kühleren Temperaturen und höheren Niederschlägen in Mitteleuropa verbunden ist. Entsprechend Hirschboecks „Flood Hydroclimatology“ (1988) impliziert diese Auftritts- und Wirkungszunahme des TB-Musters auf dekadischer Zeitskala begünstigende Rahmenbedingungen für die Entwicklung hochwasserauslösender Störungssysteme, die in diesem Fall etwa in Gestalt wandernder Tiefdruckgebiete mit eingelagerten Starkniederschlagszonen vermehrt zur Ausbildung gelangen können.

Die verbleibenden Zirkulationsmuster (W, BR) treten zwar in hochwasserreichen Phasen seltener auf, zeigen dann aber signifikant erhöhte Vorticity- und Niederschlagswerte (Abb. 3). Die großräumig höheren Druckgradienten (I) in den hochwasserarmen Perioden lassen sich auf den stärkeren Hochdruckeinfluss in Mitteleuropa zurückführen (antizyklonale Westlagen mit zusammengedrückter Frontalzone weiter im Norden bzw. kräftige Hochdruckkeile mit stärkerem Druckgefälle zur Umgebung). Demgegenüber stehen Hochdruckbrücken, die über Mitteleuropa deutlich abgeschwächt oder unterbrochen sind: dies scheint in hochwasserreichen Phasen vermehrt vorzukommen und schließt als Extremfall auch Situationen wie im August 2002 ein, als bei hohem Druck über Skandinavien ein von den britischen Inseln zum nördlichen Mittelmeer gewandertes Tief anschließend auf klassischer Vb-Zugbahn zu

Frühjahr:

Die grundlegenden Zirkulationsmuster im Frühjahr (Abb. 4) zeigen verbreitet Ähnlichkeiten zu denjenigen des Sommers. Der deutlichste Unterschied wird beim nördlichen Hochdruckmuster erkennbar, das nun im Gesamterklärungsanteil auf die vierte Position absinkt und anstelle einer Hochdruckbrücke eher eine geschlossene Antizyklone über Fennoskandien (HF) wiedergibt. Ihr gehäuftes Auftreten in dezidiert antizyklonaler, niederschlagsarmer und kühler Ausprägung kennzeichnet die hochwasserarmen Zeitabschnitte (Abb. 5), während die entgegengesetzten Eigenschaften zwar seltener, dann aber in hochwasserreichen Perioden zu beobachten sind mit der Implikation potentieller Starkniederschlagsereignisse. Ähnliche Gegensätze zwischen hochwasserreichen und hochwasserarmen Perioden kennzeichnen das Auftreten der britischen Zentraltiefelage (TB).

Während die Nordlagen (N) erneut keine Rolle für das Hochwassergeschehen spielen (bevorzugt antizyklonal gerade in hochwasserreichen Phasen), ergeben sich für die zonale Westlage (W, im Frühjahr mit deutlicher Südwestkomponente) spezifische Unterschiede: zwar tritt sie auch in hochwasserreichen Phasen nur mit durchschnittlicher Häufigkeit auf, jedoch mit signifikant höheren Intensitäts-, Temperatur- und Niederschlagswerten als in hochwasserarmen Zeitabschnitten. Verstärken sich also die genannten Parameter für das Westmuster im Zuge längerfristiger Zirkulationsvariabilität für einige Dekaden (sei es im Kontext verschärfter Breitengegensätze, erhöhter Meeresoberflächentemperaturen, gestiegenen Dampfdrucks o.ä.), resultieren daraus verbesserte Rahmenbedingungen für die Entwicklung hochwasserauslösender Störungssysteme und jenseits bestimmter Schwellenwerte eine substantielle Zunahme in der Hochwasserhäufigkeit.

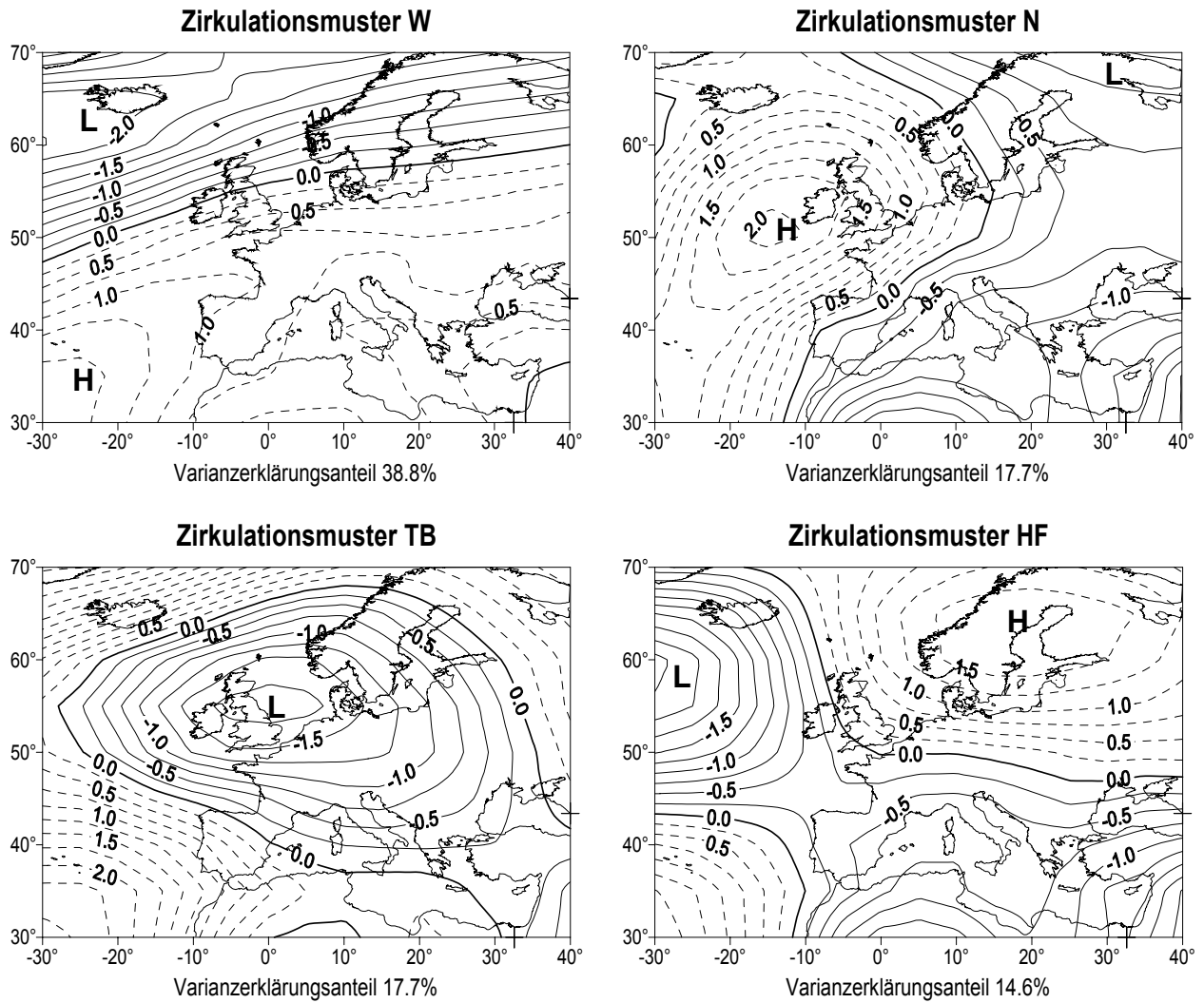


Abb. 4: Grundlegende Zirkulationsmuster aus den Bodenluftdruckfeldern Frühjahr 1500-1999 (nach Jacobeit et al. 2004)

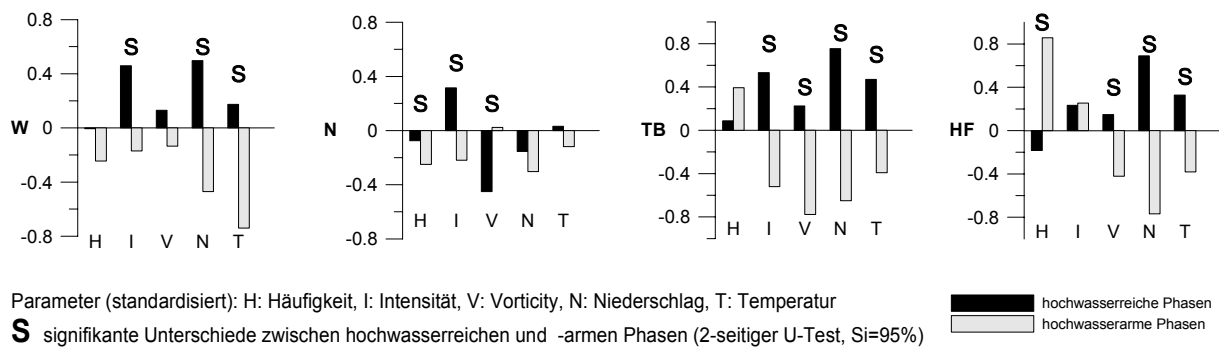


Abb. 5: Gemittelte Parameter für die Zirkulationsmuster aus Abb. 4 im Vergleich der hochwasserreichen und -armen Phasen, Frühjahr 1500-1999 (nach Jacobeit et al. 2004)

Winter:

Die grundlegenden Zirkulationsmuster im Winter (Abb. 6) umfassen neben der zonalen Westlage (W) und einem einkernigen Muster mit Zentrum über der Nordsee (L) auch Strömungskonfigurationen mit ausgeprägtem Russland-Hoch (RH) und kräftigem Atlantik-Tief. Die musterinterne Schwankungsbreite in der Lage der Druckzentren legt die Ausgliederung zweier Varianten nahe, die sich in Mitteleuropa höchst unterschiedlich auswirken: zum einen werden mit westlichen Strömungskomponenten (RHwest) maritime Luftmassen herangeführt, zum anderen gelangen mit östlichen Strömungskomponenten (RHost) kontinentale, strengwinterlich geprägte Luftmassen nach Mitteleuropa. Eine deutliche Unterscheidung hochwasserreicher und hochwasserarmer Perioden mittels dieser winterlichen Zirkulationsmuster gelingt allerdings nicht wie in den anderen Jahreszeiten, da einzelne dieser Zeitabschnitte zirkulationsdynamisch sehr unterschiedlich geprägt waren. So haben einerseits in jüngerer Zeit die zonalen Westlagen und eine betont positive Nordatlantische Oszillation (NAO) maßgebliche Bedeutung für das winterliche Hochwassergeschehen (Caspary 1995; Bendix 1997). Auf der anderen Seite waren bestimmte kleineiszeitliche Phasen mit negativer NAO auch von markant gesteigerter Hochwasserhäufigkeit gekennzeichnet. Es wird deshalb auf eine von mehreren Größen zurückgegriffen, mit denen Jacobeit et al. (2003b) die zeitlich variable Hochwasserbedeutsamkeit der winterlichen Zirkulationsmuster untersucht haben. Sie beschreibt den variablen Anteil, zu dem das Auftreten eines bestimmten Zirkulationsmusters von Hochwasserereignissen begleitet war (ausgedrückt als Quotient der Summen führender Ladungen dieses Musters, zum einen über die zugehörigen Hochwasserfälle, zum anderen über alleusterspezifischen Fälle). Abb. 7 zeigt diesen Index für die beiden hochwasserreichen Perioden um die Mitte des 16. und des 17. Jahrhunderts. Klar ersichtlich treten nicht bei der Westlage, sondern bei den RH-Varianten die höchstenusterspezifischen Anteile auf. Im 16. Jahrhundert setzte eine Zirkulationsumstellung auf ein meridionaleres Regime ein, allerdings noch bei größeren Wellenlängen, so dass kräftige Störungen vom zentralen Nordatlantik bis nach Mitteleuropa gelangen konnten (RHwest). Während der anschließenden kleineiszeitlichen Abkühlung reduzierten sich die Wellenlängen, so dass verstärkt die Variante RHost zu Wirksamkeit kam. Dies setzte der hochwasserreichen Periode des 16. Jahrhunderts ein Ende, bevor im Laufe des 17. Jahrhunderts die Hochwasserhäufigkeit mit verstärkter Eisakkumulation erneut anstieg (RHost repräsentiert also nicht die unmittelbare Auslösung eines Hochwasserereignisses, sondern ein dispositionsförderndes Regime). Der anschließende Rückgang in der Hochwasserhäufigkeit steht mit der zunehmenden Trockenheit des Late-Maunder-Minimums (1675-1715) in Zusammenhang (Wanner et al. 1995), bevor sich in der nach-kleineiszeitlichen Periode die beherrschende Rolle positiver NAO-Phasen für das Hochwassergeschehen durchsetzt.

4 Resümee und Ausblick

Die historisch belegbare Differenzierung in hochwasserreiche und hochwasserarme Zeitabschnitte lässt Zusammenhänge mit atmosphärischen Zirkulationsschwankungen erkennen. Dabei gelangen in hochwasserreichen Phasen der Kleinen Eiszeit auch winterliche Strömungskonfigurationen, die mit einem ausgeprägten Russland-Hoch verbunden sind, zu erhöhter Hochwasserbedeutsamkeit. Im Frühjahr und Sommer zeichnen sich längerfristige Variationen in zirkulationstyp-internen Eigenschaften (z.B. Abweichungen bei Vorticity und Niederschlagsergiebigkeit) als dynamischer Hintergrund für die variable Auftrittshäufigkeit von Hochwasserereignissen ab. Insgesamt reicht das Einflussfeld weit über Schwankungen der NAO hinaus.

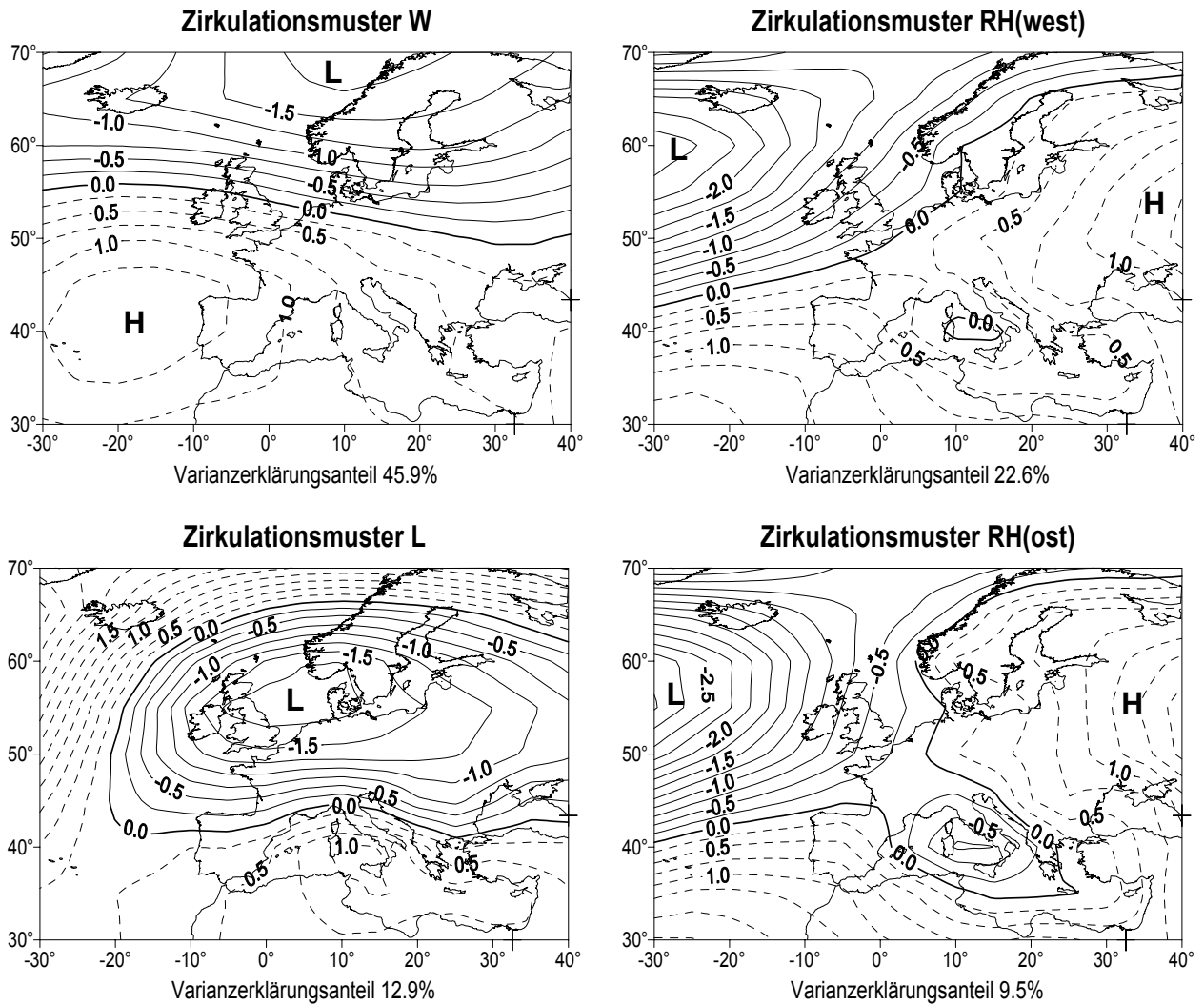


Abb. 6: Grundlegende Zirkulationsmuster aus den Bodenluftdruckfeldern Winter 1500-1999 (nach Jacobeit et al. 2004)

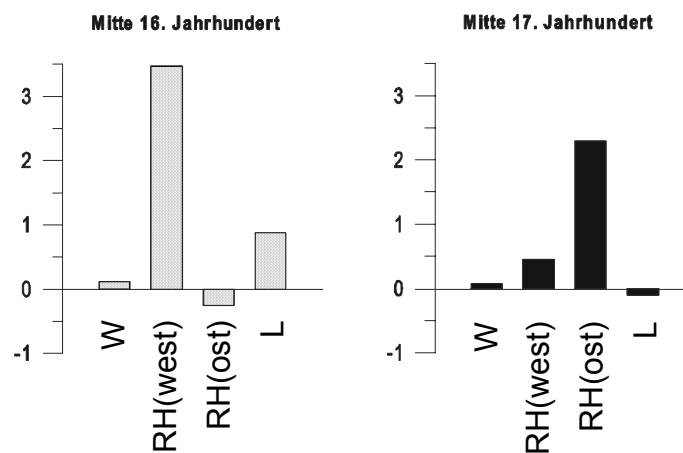


Abb. 7: Index zur Schätzung des Anteils hochwasserbegleiteter Auftrittsfälle an sämtlichen Auftrittsfällen der winterlichen Zirkulationsmuster aus Abb. 6 im Vergleich der hochwasserreichen Perioden um die Mitte des 16. und des 17. Jahrhunderts (nach Jacobeit et al. 2004)

Auch für den Küstenraum lassen sich Aussagen treffen: so hat Glaser (2001) aus Archivmaterial die Sturmfluthäufigkeiten an der deutschen Nordseeküste seit 1100 rekonstruiert (Abb. 8). Neben einem offensichtlichen Quelltrend (generell niedrigeres Niveau in den ersten 400 Jahren) treten auch hier längere Phasen unterschiedlicher Sturmfluthäufigkeit auf: erhöhte Werte ab Mitte des 16. und gegen Ende des 18. Jahrhunderts, niedrigere Werte um die Mitte des 18. und im späten 19. Jahrhundert. Interpretationen bieten sich beim rezenten Negativtrend (verbesserte Küstenschutzmaßnahmen) und beim Maximum des 16. Jahrhunderts an, das Anlehnungen an das entsprechende Hochwassermaximum zeigt (s.o. Diskussion Winter). Weitere Phasen unterschiedlicher Sturmfluthäufigkeit bleiben gesondert zu analysieren, wobei auch Vergleiche mit dem andersartig beeinflussten Ostseeraum aufschlussreich sein können.

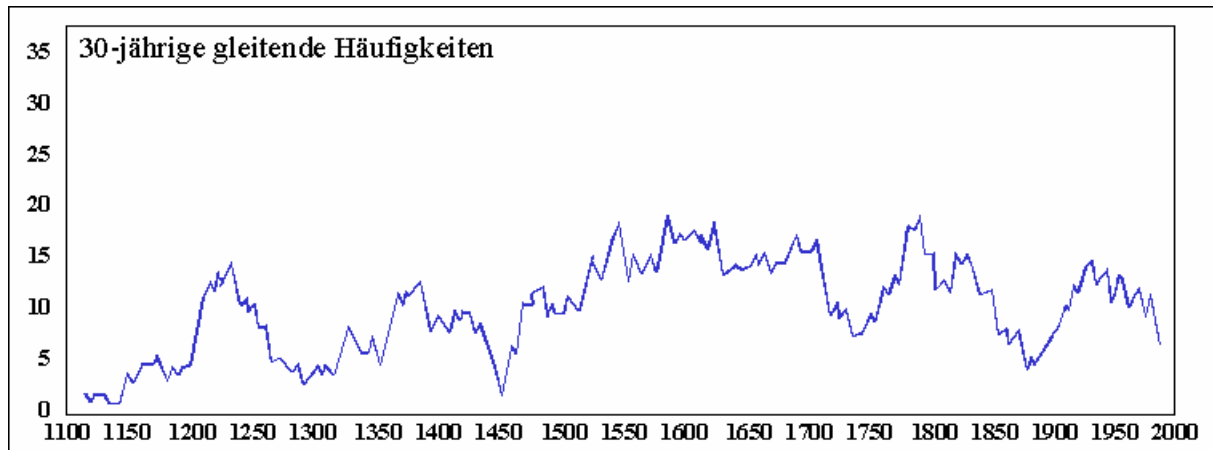


Abb. 8: 30-jährige gleitende Häufigkeiten von Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste 1100-2000 (nach Glaser 2001)

5 Literatur:

BENDIX, J.: Natürliche und anthropogene Einflüsse auf den Hochwasserabfluss des Rheins. Erdkunde 51 (1997), S. 292-308

CASPARY, H.J.: Recent winter floods in Germany caused by changes in the atmospheric circulation across Europe. Phys. Chem. Earth 20 (1995), S. 459-462

GLASER, R.: Klimageschichte Mitteleuropas: 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. Darmstadt 2001

HIRSCHBOECK, K.K.: Flood hydroclimatology. In: V.R. Baker, R.C. Kochel und P.C. Patton (Hrsg.): Flood Geomorphology. CHICHESTER, New York 1988, S. 27-49

JACOBET, J., P. JONES, T. DAVIES UND C. BECK: Circulation changes in Europe since the 1780s. In: P. Jones, A. Ogilvie, T. Davies und K. Briffa (Hrsg.): History and Climate: Memories of the Future? New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow 2001, 79-99

JACOBET, J., H. WANNER, J. LUTERBACHER, C. BECK, A. PHILIPP UND K. STURM: Atmospheric circulation variability in the North-Atlantic-European area since the mid-seventeenth century. Climate Dynamics 20 (2003a), S. 341-352

- JACOBET, J., R. GLASER, J. LUTERBACHER UND H. WANNER: Links between flood events in Central Europe since AD 1500 and large-scale atmospheric circulation modes. *Geophysical Research Letters* 30 (2003b), S. 1172-1175
- JACOBET, J., R. GLASER, M. NONNENMACHER UND H. STANGL: Hochwasserentwicklung in Mitteleuropa und Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation. *Geographische Rundschau* 56 (2004), S. 26-34.
- LUTERBACHER, J., E. XOPLAKI, D. DIETRICH, R. RICKLI, J. JACOBET, C. BECK, D. GYALISTRAS, C. SCHMUTZ und H. WANNER: Reconstruction of Sea Level Pressure fields over the Eastern North Atlantic and Europe back to 1500. *Climate Dynamics* 18 (2002), S. 545-561
- MENDEL, H.G., P. FISCHER UND A. HERMANN: Hochwasser: Gedanken über Ursachen und Vorsorge aus hydrologischer Sicht. Koblenz 1997
- PHILIPP, A. UND J. JACOBET: Das Hochwasserereignis in Mitteleuropa im August 2002 aus klimatologischer Perspektive. *Petermanns Geographische Mitteilungen* 147 (2003) H. 6, S. 50-52
- STURM, K., R. Glaser, J. JACOBET, M. DEUTSCH, R. BRAZDIL, C. PFISTER, J. LUTERBACHER UND H. WANNER: Hochwasser in Mitteleuropa seit 1500 und ihre Beziehung zur atmosphärischen Zirkulation. *Petermanns Geographische Mitteilungen* 145 (2001) H. 6, S. 14-23
- WANNER, H., C. PFISTER, R. BRÁZDIL, P. FRICH, K. FRYDENDAHL, T. JÓNSSON, J. KINGTON, S. ROSENØRN und E. *Wishman*: Wintertime European circulation patterns during the Late Maunder Minimum cooling period (1675-1704). *Theor. Appl. Climatol.* 51 (1995), S. 167-175
- WANNER, H., C. BECK, R. Brazdil, C. CASTY, M. DEUTSCH, R. GLASER, J. JACOBET, J. LUTERBACHER, C. PFISTER, S. POHL, K. STURM, P.C. WERNER & E. XOPLAKI: Dynamic and socioeconomic aspects of historical floods in Central Europe. *Erdkunde* 58 (2004), S. 1-16.

Adresse

Prof. Dr. Jucundus Jacobeit, Lehrstuhl für Physische Geographie, Universität Augsburg, Universitätsstraße 10, 86135 Augsburg;
Jucundus.Jacobeit@geo.uni-Augsburg.de

Prof. Dr. Rüdiger Glaser, Geographisches Institut der Universität Heidelberg, Im Neuenheimer Feld 348, 69120 Heidelberg;
ruediger.glaser@urz.uni-heidelberg.de

Dipl.-Geograph Matthias Nonnenmacher, Geographisches Institut der Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg;
matthias.nonnenmacher@mail.uni-wuerzburg.de

Dipl.-Geograph Heiko Stangl, Geographisches Institut der Universität Heidelberg, Im Neuenheimer Feld 348, 69120 Heidelberg;
heiko.stangl@urz.uni-heidelberg.de

Überprüfung der Hochwasserneutralität eines weiteren Ausbaus der Seehafenzufahrten nach Hamburg und Bremerhaven

Christoph Heinzelmann und Harro Heyer

Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen und Bundesanstalt für Wasserbau

Summary

The German states Hamburg and Bremen made a request by the German Federal Government for farther deepening of the fairways to their harbours in order to improve the quality of being competitive in the development of international transporting capacities for container shipping. Within the frame of substantial preliminary studies both projects have been investigated due to the rules of the "Bundesverkehrswegeplanung" (the planning of federal traffic ways) with respect to technical, nautical, economical and ecological aspects. A very important part of the studies is the proof that the maximum water levels of the highest storm surges are neutral with respect to the planned measures. Hydraulic investigations by the Federal Waterways and Research Institute (Bundesanstalt für Wasserbau) have shown that there is no influence on the very high storm water levels for both target variants during extreme storm surge events in combination with very high water discharges.

Zusammenfassung

Zur Verbesserung der Wettbewerbsbedingungen ihrer Häfen haben die Länder Hamburg und Bremen beim Bund eine weitere Anpassung ihrer Seehafenzufahrten nach Hamburg und Bremerhaven an die Entwicklung der internationalen Containerschifffahrt beantragt. Im Rahmen umfangreicher Voruntersuchungen wurden beide Vorhaben nach den Maßstäben der Bundesverkehrswegeplanung hinsichtlich ihrer technischen, nautischen, wirtschaftlichen und ökologischen Machbarkeit untersucht. Einen wichtigen Bestandteil der Voruntersuchungen bildete der Nachweis der Hochwasserneutralität beider Vorhaben. Die hydraulischen Untersuchungen der Bundesanstalt für Wasserbau haben ergeben, dass bei extremen Sturmflutereignissen in Kombination mit sehr großen Oberwasserzuflüssen die Hochwasserneutralität für die jeweilige Zielvariante sicher gestellt ist.

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund der stark außenhandelsorientierten deutschen Volkswirtschaft und der großen regionalen und gesamtwirtschaftlichen Bedeutung deutscher Seehäfen ist es Herausforderung und Aufgabe zugleich, den maritimen Standort Deutschland zu sichern und zu stärken. Seehäfen sind Schnittstellen des Land- und Seeverkehrs, sie sind zugleich logistische Dienstleistungszentren und Industriestandorte. Die Nationalen Maritimen Konferenzen, die in den Jahren 2000 bis 2003 bislang drei Mal stattgefunden haben, zielen auf die Stärkung der maritimen Wirtschaft, auf die engmaschige Vernetzung der gesamten maritimen Wertschöpfungskette. Die Aufgabe der Bundesregierung ist es beizutragen, dass die Länder ihre Seehäfen leistungsfähig halten und so die Entwicklungspotenziale sichern und ausbauen können.

Zu diesem Zweck wurde mit den Küstenländern bereits 1999 eine „Gemeinsame Plattform zur deutschen Seehafenpolitik“ beschlossen und diese 2001 durch einen Katalog mit konkreten hafenspoliti-

schen Maßnahmenvorschlägen ergänzt. Eingebettet in das Maritime Bündnis sind auch die Infrastrukturmaßnahmen des Bundes zur Anbindung der Seehäfen. Sie sind der wesentliche Inhalt des gemeinsamen hafropolitischen Maßnahmenkonzepts der Bundesregierung und der Küstenländer, denn das Rückgrat für die im harten internationalen Wettbewerb stehenden deutschen Seehäfen bilden die Anbindungen. Der gezielte Ausbau der land- und seeseitigen Zufahrten der Seehäfen sowie deren Verbindung mit den Wirtschaftszentren Deutschlands gehört zu den zentralen Feldern der deutschen Seehafen- und Verkehrspolitik und bildet zugleich einen Schwerpunkt in dem von der Bundesregierung am 2. Juli 2003 beschlossenen Bundesverkehrswegeplan (BVWP) [BMVBW 2003].

Die Seehafenzufahrten mit der größten wirtschaftlichen Bedeutung sind die Elbe bis Hamburg (Unter- und Außenelbe) sowie die Weser bis Bremerhaven (Außenweser). Seit der letzten Fahrrinnenanpassung, die in beiden Revieren in den wesentlichen Teilen 1999 abgeschlossen wurde, können Hamburg und Bremerhaven mit 12,80 m tief gehenden Containerschiffen tideunabhängig – d.h. jederzeit – angefahren und verlassen werden. Als Bemessungsschiff für diesen Anpassungsschritt diente das Containerschiff der 4. Generation (Panmax-Klasse) mit einem maximalen Konstruktionstiefgang von 13,50 m (Salzwasser) und einer Ladekapazität von ca. 4.000 TEU.

Der verkehrswirtschaftliche Erfolg dieser Anpassungsmaßnahmen ist bereits nach kurzer Zeit eingetreten. Besonders deutlich lässt sich dies an der Entwicklung des Containerumschlags in Hamburg und Bremerhaven ablesen, der – unterstützt durch die Infrastrukturmaßnahmen des Bundes – seit Jahren hohe Wachstumsraten aufweist [DÜCKER und OELLERICH 2003, PIORKOWSKI 2003]. Die Auswertung der Schiffsbewegungen nach Tiefgangsklassen zeigt, dass die Reedereien bereits unmittelbar nach Abschluss der Baggerungen die größeren Fahrrinntiefen angenommen haben. Dabei fällt auf, dass der weitaus größte Teil der Schiffsbewegungen tideunabhängig erfolgt [PLANCO 2003].

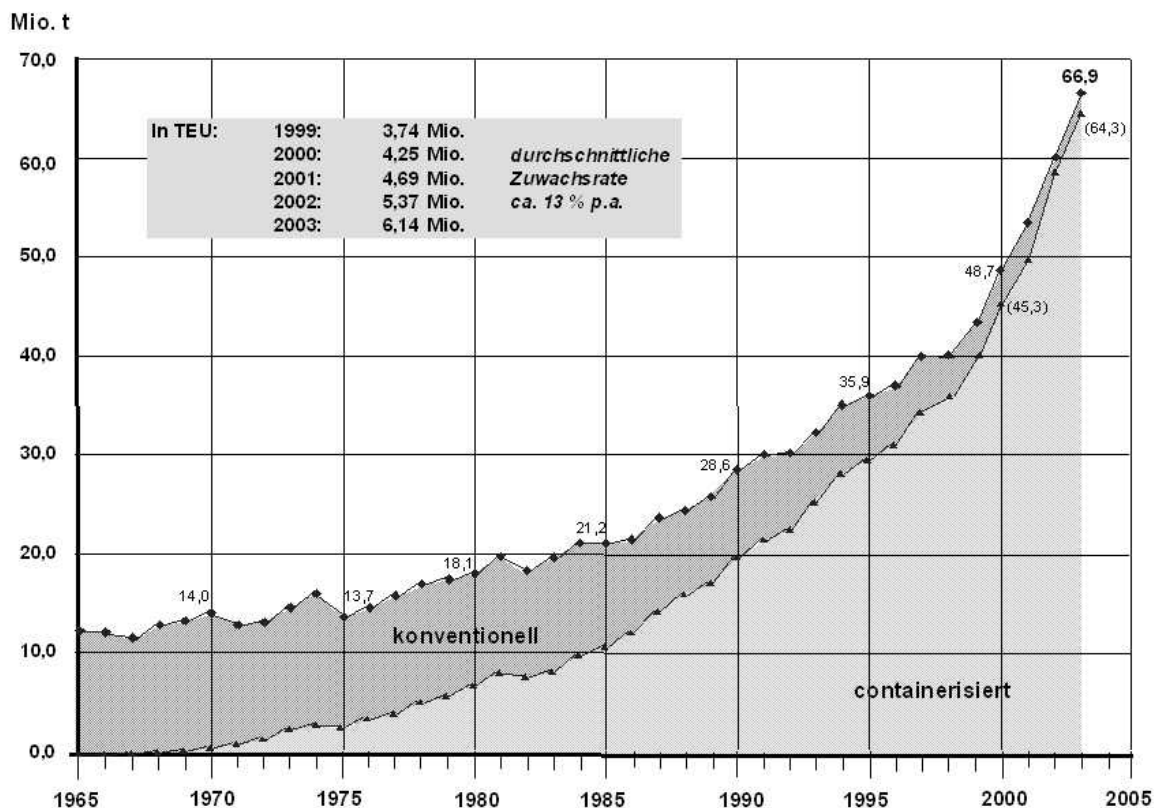


Abb. 1: Entwicklung des Stückgutumschlags am Beispiel des Hamburger Hafens (Wirtschaftsbehörde Strom- und Hafenbau).

Angesichts der anhaltend hohen Wachstumsraten beim Containerumschlag in Verbindung mit der Schiffsgrößenentwicklung im Containerverkehr haben die Freie und Hansestadt Hamburg und die Freie Hansestadt Bremen beim Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) eine weitere Anpassung der Unter- und Außenelbe bzw. der Außenweser beantragt. Ziel ist es, die bestehenden Fahrrinnenverhältnisse an die Erfordernisse der künftig weltweit verkehrenden Containerschiffe mit einer Stellplatzkapazität von mehr als 8.000 TEU und einem Konstruktionstiefgang von 14,50 m anzupassen. Es ist absehbar, dass Containerschiffe dieser Größenordnung insbesondere in der für Hamburg und Bremerhaven wichtigen Ostasienfahrt bereits in wenigen Jahren als Regelschiffe eingesetzt werden.

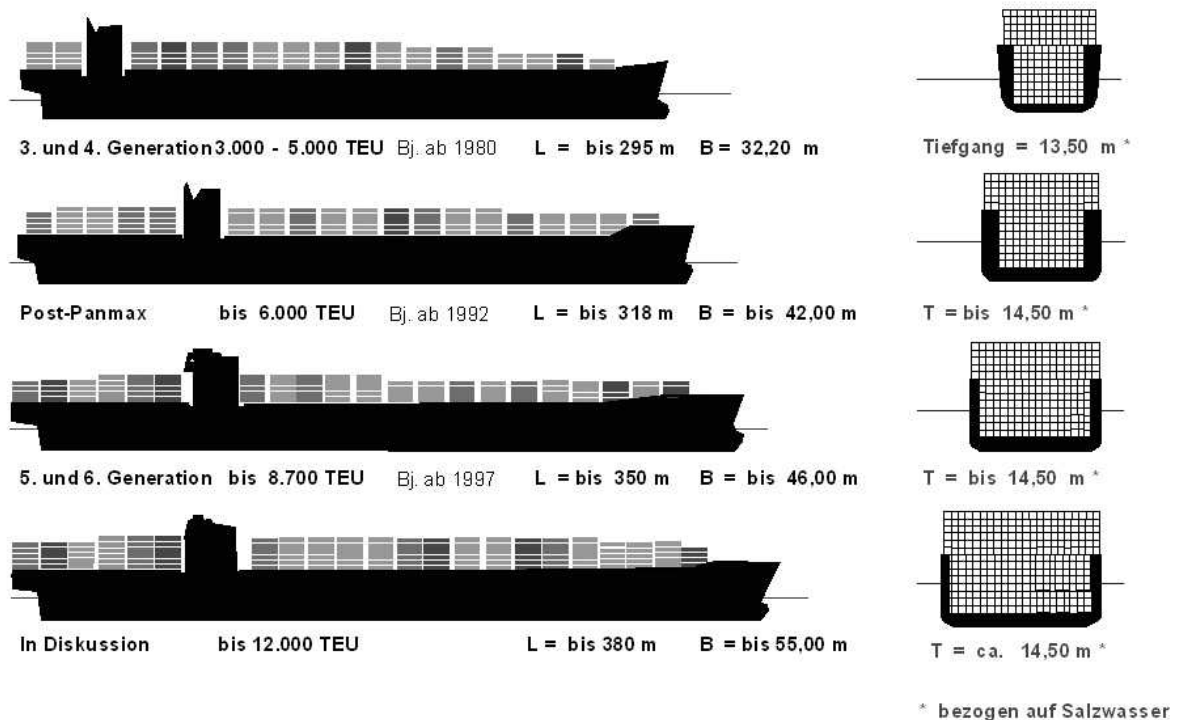


Abb. 2: Entwicklung der internationalen Containerschiffahrt (Wirtschaftsbehörde Strom- und Hafenbau).

Für beide erwogenen Vorhaben stand frühzeitig fest, dass es nicht möglich sein würde, die nach den Maßstäben der Bundesverkehrsplanung notwendigen umfangreichen Voruntersuchungen rechtzeitig vor der Verabschiedung des BVWP 2003 abzuschließen. Aus diesem Grund hat sich das BMVBW bereit erklärt, die Vorhaben auch außerhalb des engen Zeitrahmens des BVWP 2003 nach den gleichen Maßstäben zu prüfen und – positive Bewertungsergebnisse vorausgesetzt – zu beschließen und durchzuführen.

Nach den Maßstäben des BVWP 2003 umfasst die Voruntersuchung eines erwogenen Vorhabens – für alle Verkehrsträger – eine gesamtwirtschaftliche Bewertung der Rentabilität des Projekts (Nutzen-Kosten-Analyse) sowie eine Einschätzung der zu erwartenden Umweltauswirkungen (Umweltrisikoeinschätzung) [BMVBW 2002, HEINZELMANN 2003]. Für Wasserstraßenprojekte kommt hinzu, dass gemäß der Koalitionsvereinbarung zur 15. Legislaturperiode in Verbindung mit dem 5-Punkte-Programm der Bundesregierung vom 15. September 2002 die Hochwasserneutralität des geplanten Vorhabens in Bezug auf das vorhandene Schutzniveau nachzuweisen ist.

Nachfolgend werden zunächst für beide Vorhaben die jeweilige Vorzugsvariante vorgestellt sowie die Ergebnisse der Nutzen-Kosten-Analyse und der Umweltrisikoeinschätzung skizziert. Den Schwerpunkt der Ausführungen bilden anschließend die Untersuchungen der Bundesanstalt für Wasserbau zur Überprüfung der Hochwasserneutralität sowie ein Ausblick auf die geplanten hydrologischen Detailuntersuchungen.

2 Beschreibung der Vorzugsvarianten für Elbe und Weser

Als Bemessungsschiff liegt den Voruntersuchungen für Elbe und Weser ein Post-Panmax-Containerschiff mit folgenden Abmessungen zugrunde: Länge: 350 m, Breite: 46 m, Konstruktions-tiefgang: 14,50 m. Das verkehrliche Ausbauziel besteht darin, dass das Bemessungsschiff Hamburg und Bremerhaven in tideabhängiger Fahrt voll abgeladen erreichen und verlassen kann. Tideunabhängig sollen beide Reviere mit einem Tiefgang von 13,50 m befahren werden können. Als jeweiliger Bezugswasserstand wird ein Tideniedrigwasserstand angesetzt, der für 80 % aller Tiden überschritten wird. Bezogen auf das mittlere Tideniedrigwasser entspricht dies einem Mindertidenzuschlag von ca. 0,35 m.

Für beide erwogenen Vorhaben wurden zahlreiche Varianten entwickelt und nach technischen, nautischen, wirtschaftlichen und ökologischen Kriterien untersucht. Einzelheiten der Variantenuntersuchungen sowie die Auswahl der jeweiligen Zielvariante sind in [PG Unter- und Außenelbe 2004, PG Außenweser 2004] zu finden.

Abb. 3 zeigt die Zielvariante für die Anpassung der Unter- und Außenelbe im Längsschnitt. Der Ausbau erstreckt sich von der Außenelbe (Großer Vogelsand, km 748) bis in den Hamburger Hafen (Containerterminal Altenwerder, Süderelbe, km 619,5 bzw. mittlerer Freihafen, Norderelbe, km 624). Für die tideabhängige Abfahrt aus Hamburg ist ein 2-stündiges Tidfenster vorgesehen, das sich 1,5 Stunden nach Erreichen des Tideniedrigwassers am Pegel St. Pauli öffnet. Im Bereich zwischen der See und der Störkurve (km 680) bleibt die heute vorhandene Fahrrinnenbreite von 400 m unverändert bestehen. Von der Störkurve bis zur Lühekurve (km 644) soll die Breite von 300 m auf 320 m vergrößert werden, um auch in diesem Abschnitt die Begegnung zweier Bemessungsschiffe zu ermöglichen. Für die Begegnung tideabhängig einlaufender Massengutschiffe mit tideabhängig auslaufen Containerschiffen ist zwischen km 644 und km 636 eine 385 m breite Begegnungsstrecke vorgesehen.

Im Rahmen der Baggerungen fallen ca. 38 Mio. m³ Baggergut an, das überwiegend zu strombaulichen Zwecken eingesetzt werden soll, um die hydrologischen und ökologischen Ausbaufolgen zu minimieren. Im Einzelnen werden mit dem Strombaukonzept folgende Ziele verfolgt:

- Minimierung der ausbaubedingten Wasserstandsänderungen
- dauerhafte Reduzierung der Unterhaltungsbaggermengen
- Verbesserung der Ufersicherung an erosionsgefährdeten Böschungen
- Herstellung von ökologisch wertvollen Flachwasserbereichen.

Die Zielvariante für die Anpassung der Außenweser ist in Abb. 4 dargestellt. Die Ausbaustrecke reicht von km 120 bis zum Containerterminal Bremerhaven bei km 68. Zwischen km 120 und km 99 soll die heutige Fahrrinnenbreite von 300 m auf 400 m vergrößert werden. In der übrigen Ausbaustrecke bleiben die vorhandenen Breiten von 300 m bzw. 220 m unverändert bestehen. Die Menge an Baggergut beträgt ca. 9,2 Mio. m³, wovon ca. 3,5 Mio. m³ als Wirtschaftsgut (z.B. für Hafenbaumaßnahmen) verwendet werden soll. Das restliche Baggergut soll auf ökologisch geeigneten Klappstellen in der Außenweser untergebracht werden.

Bei der Überprüfung der Hochwasserneutralität der Außenweser-Anpassung ist zu berücksichtigen, dass gleichzeitig die Fahrrinne der Unterweser im Abschnitt Nordenham bis Brake um 0,90 m auf 12,80 m sowie im Abschnitt von Brake bis Bremen um 0,60 m auf 11,10 m vertieft werden soll.

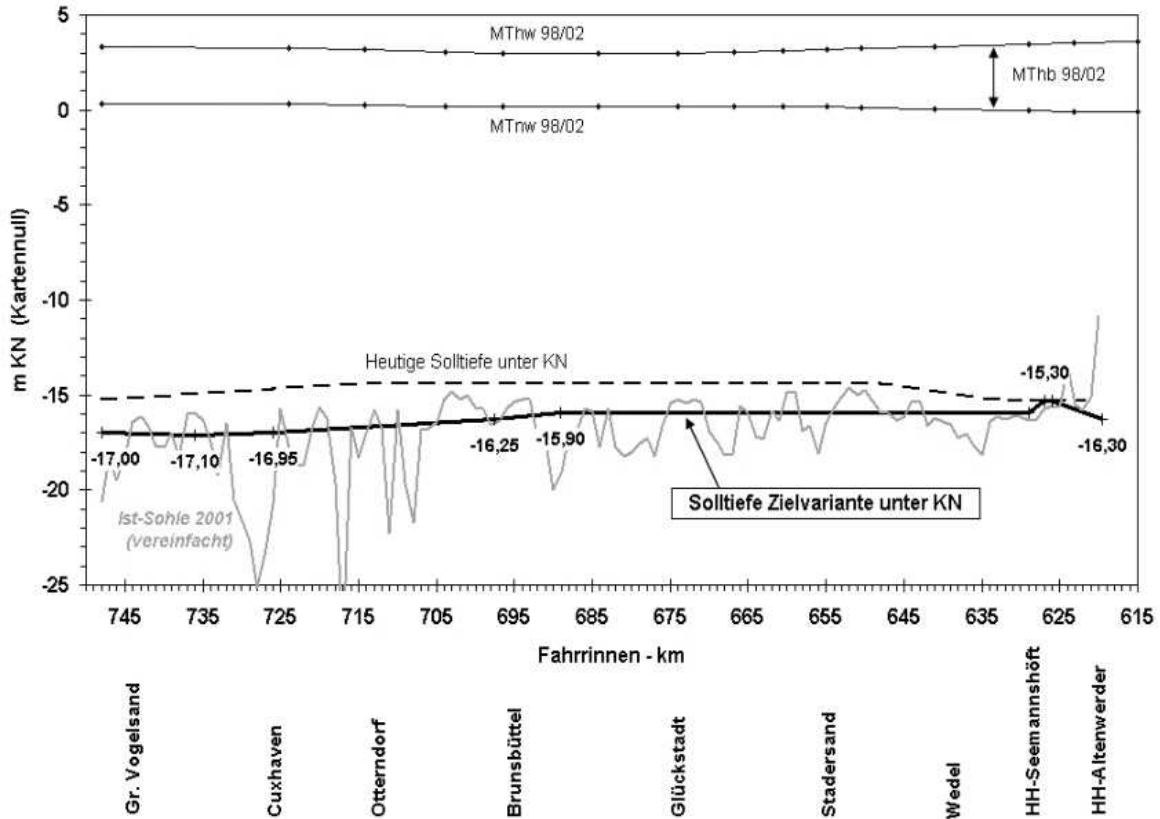


Abb. 3: Längsschnitt der Zielvariante für die Unter- und Außenelbe [PG Unter- und Außenelbe 2004].

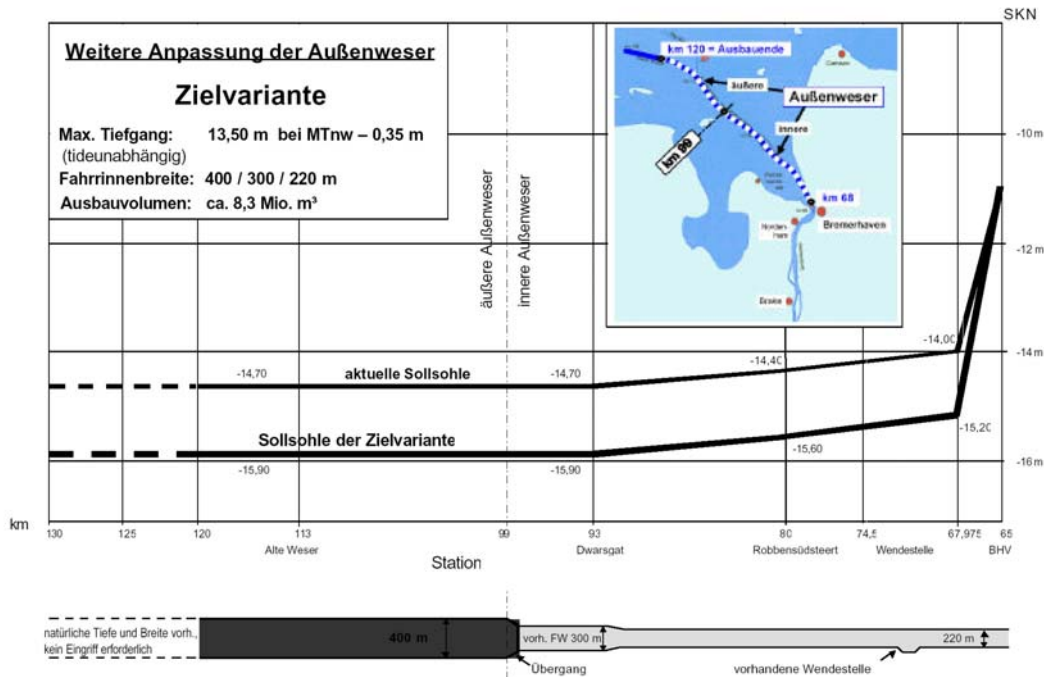


Abb. 4: Zielvariante für die Außenweser [PG Außenweser 2004].

3 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen und Umweltrisikoeinschätzungen

In den Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen für die Unter- und Außenelbe bzw. die Außenweser wurde unterstellt, dass das jeweils andere Vorhaben gleichzeitig realisiert wird. Für dieses Szenario weist die Zielvariante für die Elbe ein Nutzen-Kosten-Verhältnis (NKV) von 12,0 und die Zielvariante für die Weser ein Nutzen-Kosten-Verhältnis von 19,7 auf. Darüber hinaus wurde der Fall untersucht, dass neben den Fahrrinnenanpassungen an Elbe und Weser auch der Tiefwasserhafen in Wilhelmshaven (JadeWeserPort) realisiert wird. Auch in diesem Fall erweisen sich die Vorhaben an Elbe (NKV = 4,3) und Weser (NKV = 5,1) als hoch wirtschaftlich.

Auch die Umweltrisikoeinschätzungen haben für beide Vorhaben ein vergleichbares Bild ergeben. Das Umweltrisiko ergibt sich aus der Kombination von Raumbedeutung und Grad der ausbaubedingten Belastungen. In beiden Fällen wird die Raumbedeutung als überwiegend hoch und der Belastungsgrad als vornehmlich gering eingestuft. In der Kombination führt dies jeweils zu einem mittleren Umweltrisiko, so dass beide Vorhaben als ökologisch vertretbar eingestuft werden können.

4 Untersuchungen zur Hochwasserneutralität der Maßnahmen

Gemäß Koalitionsvereinbarung zur 15. Legislaturperiode (Abschnitt „Mobilität für das 21. Jahrhundert“) in Verbindung mit dem 5-Punkte-Programm der Flusskonferenz vom 15. September 2002 sind für Ausbauplanungen und in ihren Auswirkungen vergleichbaren Unterhaltungsmaßnahmen die Wirkungen auf den Hochwasserschutz hinsichtlich Scheitelhöhe und Ablaufverhalten zu testen. Bezogen auf die Tideflüsse, deren Landesschutzdeiche auf höchste Sturmflutwasserstände bemessen sind, ist - analog zum Hochwasser-Abfluss in Binnengewässern - ein der Küstendynamik entsprechendes Szenario zu bewerten. Für das bestehende Schutzniveau ist der durch die Maßnahme bedingte örtliche Anstieg der Sturmflutscheitel in Verbindung mit der Wirkung des Oberwassers auf die Höchstwasserstände zu untersuchen und die Hochwasserneutralität nachzuweisen.

4.1 Wirkung einer Fahrrinnenvertiefung auf die Sturmflutdynamik

Die Wirkung einer vertieften Fahrrinne auf die Sturmflutdynamik im Ästuar wird in der öffentlichen Diskussion oft unzutreffend dargestellt. Man geht fälschlicherweise davon aus, dass die vom Wind erzeugte Sturmflutwelle die Tidewelle so überlagert, dass eine zusätzliche ausbaubedingte Erhöhung des ohnehin schon durch den Ausbau erhöhten Tidehochwassers entsteht. Nach dieser nicht sachgerechten Vorstellung wäre damit die ausbauinduzierte Erhöhung der Sturmflutscheitelwasserstände größer als die Erhöhung des Tidehochwassers ohne Sturmfluteinfluss. Die Komplexität der physikalischen Zusammenhänge wird nachfolgend zusammenfassend erläutert.

Sturmfluten, die in der Nordsee entstehen, führen in der Deutschen Bucht zu einer Windstaukurve, die als Welle aufgefasst werden kann. Ihre Amplitude und ihr zeitlicher Verlauf ist abhängig von der Zugbahn und Zuggeschwindigkeit des Sturmtiefs, der Windgeschwindigkeiten über der Nordsee (insbesondere der Dauer hoher Windgeschwindigkeiten), der Windrichtung und der Topographie (Wassertiefe). Im Mündungsbereich der Ästuarie ist der zeitliche Verlauf des Wasserstandes abhängig von der Phasenverschiebung, mit der sich Tidewelle und Windstauwelle überlagern. Durch den Einfluss sporadisch auftretender Fernwellen kann der Sturmflutwasserstand in der Ästuararmündung ebenfalls beeinflusst werden. Die Variation der genannten Einflüsse führt in der Deutschen Bucht zu unterschiedlichen Sturmflutverläufen.

Im inneren Bereich des Ästuars wird die Dynamik der einlaufenden Wellen von der Ästuarometrie, dem zusätzlich im Ästuar entstehenden lokalen Windstau und einer möglicherweise auftretenden O-

berwasserwelle beeinflusst. Durch Vertiefung der Fahrrinne im Ästuar wird dessen Sturmflutcharakteristik durch sich überlagernde Teilwirkungen verändert:

1. Verminderter Anstieg der Höchstwasserstände durch abnehmende Wirkung der Sohlschubspannung infolge einer Fahrrinnenvertiefung

In den vertieften Abschnitten der Fahrrinne verringert sich die Wirkung der Sohlschubspannung auf den strömenden Wasserkörper. Dadurch kann die Strömung in der tiefen Rinne zunehmen (wodurch in den nicht vertieften Seitenbereichen die Strömung bereichsweise auch abnimmt). Durch die resultierende Zunahme des Flutstromvolumens steigt das Tidehochwasser. Die Wirkung der verminderten Sohlschubspannung ist zur Zeit der niedrigsten Wasserstände am größten, da das Vertiefungsmaß der Fahrrinne dann den größten Anteil an der momentanen Gesamtwassertiefe hat. Daher sinkt das Tnw ausbaubedingt dem Betrage nach stärker ab, als das Thw ansteigt. Wenn sehr hohe Wasserstände auftreten – insbesondere bei extremen Sturmfluten – verringert sich die Wirkung der Sohlschubspannung auf den gesamten Wasserkörper (Fahrrinne und Seitenbereiche) des Ästuars auch ohne Fahrrinnenvertiefung. Der Anteil, der durch die Fahrrinnenvertiefung zusätzlich abnehmenden Wirkung der Sohlschubspannung ist darum bei extremen Scheitelwasserständen geringer als bei normalen Tidewasserständen. Bei extremen Sturmflutverhältnissen ist die Wirkung des Fahrrinnenausbaus auf die Wasserstände daher geringer als bei normalen Tideverhältnissen. Da Sturmflutwassertiefen größer sind als Normaltide-Wassertiefen ist der prozentuale Anteil der Vertiefung bei Sturmfluten kleiner als bei Normaltide-Wassertiefen.

2. Abnahme des lokalen Windstaus im Ästuar durch Vertiefung der Fahrrinne

Durch die Schubspannung des Windes auf den Wasserkörper im Ästuar kann der Sturmflutscheitelwasserstand zusätzlich um mehrere Dezimeter angehoben werden. Dieser im Ästuar entstehende lokale Windstau ist aufgrund einer analytischen Lösung der Flachwassergleichungen proportional zur Differenz aus lokaler Windschub- und Sohlschubspannung sowie umgekehrt proportional zur Wassertiefe. Durch Vertiefung der Fahrrinne (Zunahme der Wassertiefe) wird somit die Wirkung des lokalen Windschubes auf den Sturmflutscheitelwasserstand über dem Ästuar abgemindert.

3. Zunahme der Abflussleistung für das Oberwasser durch Vertiefung der Fahrrinne

Hohe Zuflussmengen des Oberwassers erhöhen die Wasserstände insbesondere in den oberen Ästuarabschnitten, in denen wasserstandsbegrenzende Retentionsflächen heute nicht mehr ausreichend zur Verfügung stehen. Durch Vertiefung oder Verbreiterung der Fahrrinne kann aber die Abflussleistung für die Oberwassermenge verbessert werden, so dass es durch einen Ausbau zu einer geringfügigen Verminderung der Sturmflutscheitelwasserstände kommen kann.

Zusammenfassend ist festzustellen: Die Teilwirkung 1, die zum Anstieg des Scheitelwasserstandes in Sturmflutsituationen führt, ist geringer als bei normalen Tideverhältnissen. Die Teilwirkungen zu 2. und 3. mindern die Teilwirkung von 1. möglicherweise zusätzlich ab.

4.2 Bedeutung mathematischer Simulationsverfahren

Die zeitliche und räumliche Überlagerung der genannten Prozesse kann weder analytisch noch mit klassischen Ingenieurverfahren quantifiziert werden. Hierzu müssen mindestens zweidimensionale Modelle für das gesamte Ästuar eingesetzt werden, um die Dynamik von der oberen Sturmflutgrenze bis in den Übergang in die Deutsche Bucht zu simulieren. Im Rahmen der Simulation sind die zeitlich und räumlich veränderlichen Wasserstände an der seeseitigen Berandung, die zeitlich und räumlich veränderlichen Windfelder über dem Ästuar und ggf. zeitlich veränderliche Oberwasserzuflüsse zu berücksichtigen.

Die im Übergangsbereich zur Deutschen Bucht in das Ästuarmodell einzusteuernenden Wasserstände müssen mit einem übergeordneten Modell berechnet oder auch allein durch inverse Simulation bestimmt werden. Während das Elbeästuar für sich allein mathematisch simuliert und analysiert werden kann, ist dieses für das Weserästuar nicht möglich, da periodische verdriftende Wassermengen von ca. 60 Mio. m³ je Tideperiode bereits bei normalen Tideverhältnissen über den Wattrücken "Der Hohe Weg" von der Jade in die Außenweser gelangen können, um hier den Ebbestrom in der Außenweser zu intensivieren.

4.3 Untersuchungskonzeptionen für die Bearbeitung der Hochwassertestate

Für das Elbeästuar muss von der Bemessungssturmflut 2085A ausgegangen werden, die bereits im Jahre 1988 von einer Länderarbeitsgruppe festgelegt wurde. Diese ist definiert durch

- einen Wasserstandsverlauf am Pegel Cuxhaven, der vergleichbar ist zur extremen Sturmflut vom 3. Jan. 1976, jedoch mit einem um 0,5 m erhöhtem Windstau,
- einem Oberwasserzufluss von 2200 m³/s (entsprechend $\frac{2}{3}$ HHQ) und
- eine Windentwicklung über der Elbe, die vergleichbar ist zum 3. Jan. 1976, jedoch mit einer um 10 % erhöhten Windgeschwindigkeit.

Zusätzlich zu dieser Bemessungssturmflut wurden ergänzende Oberwasserszenarien als sogenannte Systemstudien simuliert. Hierfür wurden konstante Oberwasserzuflüsse von 3000 m³/s, 4000 m³/s, 5000 m³/s, 6000 m³/s vorgegeben.

Für die Außen- und Unterweser wurde noch keine Bemessungssturmflut festgelegt. Nach den Pegelaufzeichnungen führte die Sturmflut vom 17. Februar 1962 zum bisher höchsten Wasserstand (HHThw) am Pegel Bremerhaven. Der Höchstwasserstand der Sturmflut vom 3. Januar 1976 ist der zweithöchste dort beobachtete Wert; er lag nur 18 cm darunter. Hinsichtlich der Wasserstände in der Außenweser sind die beiden Sturmfluten also etwa gleichwertig. Da die benötigten zeitlich und räumlich hinreichend aufgelösten Windfelder für die Sturmflut vom Januar 1976 zur Verfügung stehen, wurden die Simulationen auf dieser Grundlage durchgeführt. Weiter stromauf hängen die Wasserstände zunehmend von der Oberwassermenge ab. Diese wurde wie bei den Elbeuntersuchungen systematisch variiert, um auch die Wirkung erhöhter Oberwassermengen analysieren zu können. Zunächst wurde 60 % des HHQ (= 2100 m³/s) berücksichtigt. Eine weitere Simulation wurde mit der verdoppelten Oberwassermenge von 4200 m³/s (dem Bemessungsabfluss für die Staustufe Bremen einschl. Überlaufschwelle) durchgeführt. Als Vergleichsgrundlage wurde auch eine Simulation ohne Oberwasserzufluss durchgeführt.

4.4 Untersuchungsergebnisse

Im Elbeästuar spielt der Oberwassereinfluss im Bereich des Medemgrundes bei km 715 kaum noch eine Rolle. Für alle simulierten Oberwassermengen treten Scheitelwasserstände über 7 m NN erst stromauf von km 655 im Bereich der Schwingemündung auf. Oberhalb des Hamburger Hafens hat die Oberwassermenge einen dominierenden Einfluss auf die Scheitelwasserstände.

Die Auswertung der Differenzen der Sturmflutscheitelwasserstände zwischen dem simulierten Referenzzustand und den simulierten Ausbauzuständen, (die als ausbaubedingte Änderungen interpretiert werden) sind für alle untersuchten Oberwasserszenarien zwischen Hamburg St. Pauli und Cuxhaven kleiner als 1 cm. Für einzelne Oberwasserszenarien werden die Scheitelwasserstände oberhalb von St. Pauli nach dem Ausbau infolge Zunahme der Abflussleistung bis zu 1 cm abnehmen. Für den noch von der Sturmflut beeinflussten Elbeabschnitt oberhalb von Geesthacht ergab sich aus der Analyse, dass die Sturmflutwasserstände auch ausbaubedingt um bis zu 1 cm abnehmen können. Für das Oberwasser der Bemessungssturmflut (2200 m³/s) ergibt sich unterhalb der Staustufe Geesthacht bei km 595 aber auch ein lokaler Anstieg von 2 cm und für das Szenario mit 6000 m³/s ein lokaler Anstieg

von 1 cm bei km 600 im Bereich der Ilmenaumündung. Diese einzelnen lokalen Zunahmen entstehen durch lokale Einschnürungen in den Gewässerquerschnitten bzw. durch ein verändertes Reflexionsverhalten im Ablauf der Sturmflutdynamik.

Auch die Dauer der Überschreitung hoher Wasserstände verändert sich durch den Ausbau des Elbeästuars nur geringfügig. Die Wasserstände größer NN + 7 m treten zwischen km 655 im Bereich der Schwingemündung und km 625 (in der Norderelbe) bis zu 15 Minuten länger auf. Hingegen treten die Wasserstände größer NN + 7 m stromauf von Hamburg St. Pauli bis zu 5 Minuten kürzer auf. Die Überschreitungsdauern der Wasserstände größer NN + 8 m verändern sich lediglich um ± 15 Minuten.

Das Ausbauvorhaben für die Unter- und Außenelbe ist als hochwasserneutral zu bezeichnen, weil die prognostizierten maximalen lokal auftretenden Änderungen der Scheitelwasserstände von 2 cm unterhalb der relevanten Größe für den Hochwasserschutz liegen.

Für die Anpassung der Fahrrinnen in der Außenweser und der Unterweser wurden zwei Varianten untersucht: die Außenweseranpassung in Verbindung mit der Unterweseranpassung sowie die alleinige Unterweseranpassung. Da die Anpassung der Unterweser bereits in den Bundesverkehrswegeplan aufgenommen wurde, muss diese bei einer Bewertung der Maßnahme an der Außenweser in den Untersuchungsrahmen einbezogen werden.

Im Hinblick auf die Wirkung des Oberwassers können im Weserästuar zunächst drei Bereiche unterscheiden werden: Unterhalb von Nordenham bei km 60 kann der Einfluss des Oberwasserzuflusses auf die Höchstwasserstände kaum noch festgestellt werden. Stromauf bis nach Bremen (km 0) steigt er immer weiter an. Im Stadtgebiet und oberhalb von Bremen hat die Oberwassermenge einen dominierenden Einfluss auf die Scheitelwasserstände.

Wenn die Außenweser gemeinsam mit der Unterweser ausgebaut wird, vermindert die Vertiefung der Fahrrinne in der Außenweser den lokalen Windstau unterhalb von Bremerhaven. Dadurch sinken die Sturmflutscheitelwasserstände in der Außenweser in der Tendenz ab, wodurch auch die Höchstwasserstände weiter stromauf abgemindert werden. Unter den Bedingungen der Sturmflut von 1976 ergeben sich bei hohem Oberwasserabfluss von 2100 m³/s ausbaubedingte Erhöhungen der Höchstwasserstände, die in weiten Bereichen unter ¼ cm liegen und örtlich in Bremen ½ cm erreichen. Bei extremem Oberwasserzufluss von 4200 m³/s wirkt sich der Ausbau großräumig wasserstandssenkend (bis zu ¼ cm) aus.

Falls die Unterweser allein ausgebaut wird, kann stromab km 43 (wo der Ausbaubereich unterhalb von Brake endet) keine ausbaubedingte Veränderung der Scheitelwasserstände festgestellt werden. Bei 2100 m³/s Oberwasserzufluss überwiegt stromauf von Brake der Anstieg der maximalen Scheitelwasserstände durch abnehmende Wirkung der Sohlschubspannung und führt zu einem ausbaubedingtem Anstieg der Höchstwasserstände von höchstens 1 cm. Beim verdoppeltem Oberwasserzufluss wirkt sich die Verbesserung der Abflussleistung stärker aus als der Anstieg der Scheitelwasserstände infolge verminderter Wirkung der Sohlschubspannung, so dass für sehr große Oberwasserzuflüsse kein Anstieg der Höchstwasserstände prognostiziert wird. Der Höchstwasserstand der Sturmflut tritt in der Unterweser ausbaubedingt um 1 bis 3 Minuten früher ein. Diese Laufzeitverkürzung ist praktisch unbedeutend für den Küstenschutz.

Da Prognosewerte unter einem Zentimeter nur von theoretischem Interesse sein können, ist generell festzustellen, dass bei alleinigem Ausbau der Unterweser die Ausbauwirkungen sogar etwas größer sind als in der kombinierten Ausbauwirkung; jedoch nicht größer als 1 cm. Die Ausbauvorhaben für die Unter- und Außenweser sind als hochwasserneutral zu bezeichnen, weil die prognostizierten maximalen lokal auftretenden Änderungen der Scheitelwasserstände von maximal 1 cm unterhalb der relevanten Größe für den Hochwasserschutz liegen. Dies gilt besonders bei sehr hohen Oberwasserzuflüssen.

4.5 Weiterer Untersuchungsbedarf

Die Bundesanstalt für Wasserbau hat die Methoden und Verfahren, mit denen die Ausbauwirkungen prognostiziert werden können, Schritt um Schritt weiter entwickelt. Mit den nun bestehenden Modellgrundlagen sollen weitere Erkenntnisse gewonnen werden. Eine oft diskutierte Frage ist, welchen Anteil zurückliegende Fahrwasservertiefungen auf die registrierten Anstiege der Höchstwasserstände haben. In diesem Zusammenhang wird auf ein Zitat aus einer WWF Studie vom Februar 2003 „Flussvertiefungen contra Hochwasserschutz - Auswirkungen der Flussvertiefungen auf die Höhe der Wasserstände in den Unterläufen von Elbe, Weser und Ems“ Bezug genommen: „Im Bereich des Hamburger Hafens an der Unterelbe haben sich in den Jahren von 1950 bis 1980 die Wasserstände der hohen Sturmfluten um 50 bis 60 cm erhöht. Dieser Anstieg ist zu 20% (15 cm) auf die Fahrwasservertiefungen, zu 66% auf die Eindeichungen und zu ca. 13% auf die Inbetriebnahme von Sperrwerken an den Nebenflüssen zurückzuführen“. Aus der fachlichen Sicht der Bundesanstalt für Wasserbau ist anzustreben, diese quantifizierten Anteile noch einmal mit neuen Methoden zu überprüfen, obwohl die hierfür notwendigen Vorarbeiten mit viel Aufwand verbunden sind.

5 Literatur

- BMVBW (2003): Bundesverkehrswegeplan 2003 - Grundlagen für die Zukunft der Mobilität in Deutschland.
- DÜCKER H.P., J. OELLERICH (2003): Die Elbe – Lebensader Norddeutschlands. Beitrag zum HTG-Kongress 2003.
- PIORKOWSKI I. (2003): Weitere Ausbau der Außenweser/Unterweser aus der Sicht des Bedarfsträgers. Beitrag zum HTG-Kongress 2003.
- PLANCOConsulting GmbH (2003): Nutzen-Kosten-Untersuchung zum Fahrrinnenausbau der Unter- und Außenelbe Schlussbericht, unveröffentlicht.
- BMVBW (2002): Grundzüge der gesamtwirtschaftlichen Bewertungsmethodik des Bundesverkehrswegeplans 2003.
- HEINZELMANN CH. (2003): Bewertung der Ausbaumöglichkeiten der Seehafenzufahrten nach Hamburg und Bremerhaven. HANSA 141, Nr. 1, S. 51-54.
- PG Voruntersuchung Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe (2004): Machbarkeitsstudie zur weiteren Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe.
- PG Voruntersuchung Fahrrinnenanpassung Außenweser (2004): Machbarkeitsstudie zur weiteren Fahrrinnenanpassung der Außenweser.

Adresse

BDir Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann
Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen
Robert-Schuman-Platz 1
53175 Bonn
Germany
LRDir Dr.-Ing. Harro Heyer
Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg
Wedeler Landstraße 157
22559 Hamburg
Germany
E-mail: christoph.heinzelmann@bmvbw.bund.de
harro.heyer@baw.de

Strandentwicklung und Küstenerosion im Osten Wangerooes

H. Zepp & M. Parakenings

Geographisches Institut der Ruhr-Universität Bochum

Summary

Wangerooe is the easternmost of the Friesian islands. These Islands are subject to natural long term changes both in position and in shape. In this contribution the recent morphological changes of the beach and the dunes are documented by means of measurements and aerial photo interpretation. Contrary to during previous storm floods the retreat of the dune cliff only occurred along a limited section of the coast. Nevertheless this erosion is in contrary to the dominant growth in width that the dune belt experienced during the last decades. Possible reason for the coastal erosion are discussed (change of wind directions, frequency of high tides, currents, coastal protection). We propose of combination of direct natural and indirect anthropogenic factors to have initiated the observed coastal erosion.

Zusammenfassung

Alle Ostfriesischen Inseln unterliegen seit ihrer Entstehung einer SE-gerichteten Verlagerung. Dieser säkuläre Prozess ist in Wangerooe durch historische Karten sowie durch das Freilegen ehemaliger Wattflächen unter dem Strand im Norden der Insel belegt. Der Mensch hat in das natürliche Geschehen durch Küstenschutzmaßnahmen (Deckwerke, Bühnen, Strandaufrhöhungen etc.) eingegriffen und vor allem die Westseiten der Inseln lagefixiert.

Am Strand und dem angrenzenden Dünengürtel im Osten Wangerooes sind seit wenigen Jahren verstärkte morphodynamische Veränderungen beobachtet worden, die sich vom Trend vorausgegangener Jahrzehnte mit positiver Sandbilanz unterscheiden. Der Beitrag dokumentiert die Rückverlagerung des Dünenkliffs und der vorgelagerten Strandpriele sowie die Stranderniedrigungen anhand eigener Beobachtungen, Messreihen und einer Luftbildserie. Zur Erklärung der Veränderungen werden verschiedene Hypothesen formuliert und überprüft (Windregime und Sturmfluten, Wasserstände, tideinduzierte Strömung, Riffanlandung, Küstenschutz).

Abschließend wird aus der Beurteilung der möglichen Ursachen eine neue Hypothese hergeleitet, in deren Mittelpunkt lokale Ursachen für die Auslösung einer Folge litoraler Prozesse stehen, die zu den jüngsten negativen Sandbilanzen geführt haben. Auf der Basis von Messungen im Frühjahr und Sommer 2004 wird die Wirksamkeit der seit 2003 eingeleiteten neuen Küstenschutzmaßnahmen vorläufig beurteilt.

1 Einleitung

Die Ostfriesischen Inseln unterliegen natürlicherweise seit ihrer Entstehung vor einigen tausend Jahren einer ESE-gerichteten Verlagerung. Insofern sollte die Abtragung von Dünen kaum Aufsehen erregen. Dennoch werden Veränderungen der Schutzdünen an der ohnehin durch ergänzende Maßnahmen festgelegten und gesicherten Küste sowohl von der Öffentlichkeit als auch von den Küstenschutzbehörden aufmerksam und zum Teil sorgenvoll registriert. Immer wieder werden Küstenlinienveränderungen der jüngeren Zeit dokumentiert und vor dem Hintergrund natürlicher Prozesse beurteilt. So berichtet Luck (1970) von Dünenabbrüchen im Westen Juists in der zweiten Hälfte der 1960er Jahre, und Hempel (1983, 1985, 1995) hat in einer Serie von Publikationen die Entwicklung des Wangerooer Ostens verfolgt. Nachdem sich der Ostrand des Strandes in den letzten 300 Jahren um rund 2300 m verlängert

te (Sindowski 1969, 36, nach Hempel 1995, 100), beobachtete Hempel (1983, 100) etwa ab 1960 das ausgeprägte Breitenwachstum des Dünengürtels im Osten Wangerooges. Ab 1978 seien an dessen Wattenmeerflanke lebhaft Abtragungsvorgänge zu verzeichnen gewesen, während an der Nordseite noch eine positive Sandbilanz bestand. Die Sandverluste an der Nordseite Wangerooges durch die Sturmfluten 1981 und 1994 sowie die daraus resultierende Rückverlegung des Dünenrandes hat Hempel (1995) dokumentiert. Die damaligen Sandverluste betrafen den Inselosten entlang des gesamten Strandes.



Abb. 1: Dünenkliff und erhaltener Teil der ehemaligen, im Jahr 2002 freigelegten Bühne T (Aufnahme: April 2003)

In diesem Bericht sollen die Abtragungsvorgänge seit 1998 im Osten der Insel anhand eigener Beobachtungen (Abb. 1), Messreihen und einer Luftbildserie dokumentiert werden. Zur Erklärung der Veränderungen werden verschiedene Hypothesen formuliert (Windregime und Sturmfluten, Wasserstände, tideinduzierte Strömung, Riffanlandung, Küstenschutz) und diskutiert. Da sich das Erscheinungsbild der Abtragungen von dem der Abtragungen während der Sturmfluten 1981 und 1994 unterscheidet, sollen Erklärungsansätze zur Diskussion gestellt werden.

2 Morphodynamische Prozesse und Faktoren

Morphologische Veränderungen am Strand und dem Außenrand des Dünengürtels vollziehen sich in der Überlagerung mehrerer sich gegenseitig beeinflussender Faktoren und Prozesse, zu denen auch anthropogene Eingriffe zählen. Mittelfristig sind Gezeiten und Wind die primären Einflussgrößen; Meeresspiegelanstiege, tektonische Bewegungen im Küstenraum und Klimawandel setzen langfristig wirksame Rahmen. Die Gezeitenwechsel sind die Ursache für die tideinduzierten Strömungen; mit den Gezeiten variiert auch der Bereich, in dem Wellen und Brandung auflaufen und so morphologisch

wirksam werden können. Küstenströmung entsteht durch schräg zur Küste wehende Winde, sie verläuft an den Ostfriesischen Inseln in der Regel von West nach Ost. Sie ist verantwortlich für den größten Teil des Sedimenttransportes (Davis 1978, 265) und damit auch für die gestreckte Form der Inseln (Seedorf & Meyer 1992, S. 122). Höher auflaufende Hochwässer können für die morphologischen Veränderungen insofern von Bedeutung sein, dass im tieferen Wasser mit höheren Wellen und damit verbunden einem höheren Wellenaufbau zu rechnen ist (Kramer 1989, 274). Auf Dauer erhöhte Tidestände lassen also die Uferlinie näher an den Dünenfuß rücken (Kramer 1989, 275). Sturmfluten üben als Extremwasserstände eine besonders verstärkte Brandungsenergie auf Strand und gegebenenfalls Dünen aus, während derer es innerhalb kurzer Zeit zu auffälligen morphologischen Veränderungen kommen kann. Allerdings meint Kramer (1986, S. 81 und 1989, S. 218), dass langfristig und großräumig betrachtet der Sandtransport und die damit verbundene Formveränderung bei normalen Wetterlagen und Gezeiten von weit größerer Bedeutung sei als bei einzelnen Extremereignissen.

Zur Sandnachlieferung an der Nordküste Wangerooes trägt der Riffbogen zwischen Spiekeroog und Wangeroog entscheidend bei. Zum Sandgewinn kommt es immer dann, wenn Vorstrandriffe unter Sturmbedingungen als Strandriffe anlanden (Streif 1990). Hierbei ist mit durchschnittlichen Geschwindigkeiten zwischen 350 m/a (WSA 1995, 3) und 405 m/a (Ehlers & Mensching 1983, 497) zu rechnen. Der größte Sedimenttransport und damit die stärksten morphologischen Veränderungen sind im Tidebereich und der anschließenden Zone bis zu 4 m unter SKN, dem Bereich der so genannten ‚oberen Sandwanderung‘ zu finden (WSA 1995,1).

Ein breiter Trockenstrand ist zusammen mit auflandigem Wind eine Voraussetzung für die Entstehung von Küstendünen. Eine negative Sandbilanz durch ausbleibende Anlandung von Strandriffen und nachfolgende Stranderniedrigung gefährdet mittelfristig den Dünenbestand. Durch Buschzäune und Helmpflanzungen fördert der Küstenschutz die Dünenentwicklung. Strandbuhnen besitzen die Aufgabe, dem küstenparallelen Sandtransport zu vermindern. Schließlich wird an Küsten mit negativer Sandbilanz Sand aufgespült oder Sand aufgefahren. Auf Wangeroog erfolgten diese Maßnahmen seit längerem, allerdings nicht aus dem Zwecke des Küstenschutzes, sondern zur Wiederherstellung eines erhöhten, hochwasserfreien Badestrandes (Zepp & Parakenings 2004).

3 Dokumentation der Abtragung

Spektakulär wurden die Dünenabbrüche nach den Sturmfluten des Winters 2001/2002, als die 1937 erbaute so genannte Buhne T freigelegt wurde (Abb. 1), die zuvor unter dem Dünensand verborgen war. Hierbei handelte es sich um den Rest einer bereits früher verfallenen Buhne. Die Überwege zum Fahrweg hinter den Dünen waren unpassierbar, stattdessen entstanden bis zu 12 m hohe Sandkliffs (<http://insel-wangeroog.de/deutsch/marktpl/news/neues2002/20020212wsa.htm> vom 26.02.2002; vgl. Wangerooger Inselbote, Ausgabe Nr. 2 Februar/März 2002). Um das noch erhaltene, jetzt freigelegte Ende der Buhne hatte sich ein im August 2002 175 cm tiefer Kolk gebildet. Der für den Herbst 2002 geplante Wiederaufbau der Buhne T musste wegen schlechten Wetters auf das Folgejahr verschoben werden. Das Ende des Bühnenrestes war vom Dünenabbruch 25 m entfernt. Diesen und weitere Bezugspunkte beobachteten wir in der Folgezeit weiter. Abbildung 2 dokumentiert die im Gelände aufgenommene Veränderung der Dünenlinie zwischen Februar 2002 und 2004. Hierzu wurde jeweils der kürzeste Abstand des Dünenfußes von ortsfesten Punkten gemessen. Demnach betrug die Rückverlagerung zwischen 15 und 25 m. Der Abstand zu den Sommerterminen war in der Regel geringer als bei vorausgegangenen Frühjahrsterminen, weil die frischen Abbruchflächen im Dünenkliff während der sturmflutfreien Sommermonate verstürzen und teilweise auch durch Küstenschutzarbeiten abgeschrägt werden. Ob möglicherweise bereits vor dem Winter 2001/2002 Küstenerosion stattgefunden hat, die weniger spektakulär und nicht mit der Freilegung alter Küstenschutzbauwerke verbunden waren, ließ

sich zunächst nicht klären. Die hier wiedergegebenen Daten erfassen nicht das Ausmaß der Rückverlegung im Winter 2001/2002, die immerhin so gravierend waren, dass auch im Bereich des Überwegs zur Kläranlage Abbrüche (R 3429000/H 5962700) aufgetreten waren. Nach einer Ruhephase zwischen 2002 und dem Sommer 2003 stellten wir hier zu Beginn des Jahres 2004 eine Erosion des Dünenfußes um 25 m fest.

Auf den Bruchschollen in der Umgebung der Buhne T waren im Jahr 2002 neben Strandhafer auch Kartoffelrosen und Gewöhnlicher Tüpfelfarn zu finden. Beide Pflanzenarten wachsen in der Regel im Bereich der Graudünen. Liegen sie am Strand, so muss man daraus schließen, dass es sich bei den abgebrochenen Dünen um ältere Dünen der Graudünengeneration gehandelt hat und somit die Küstenerosion hier bereits die Weißdünen aufgezehrt hatte.

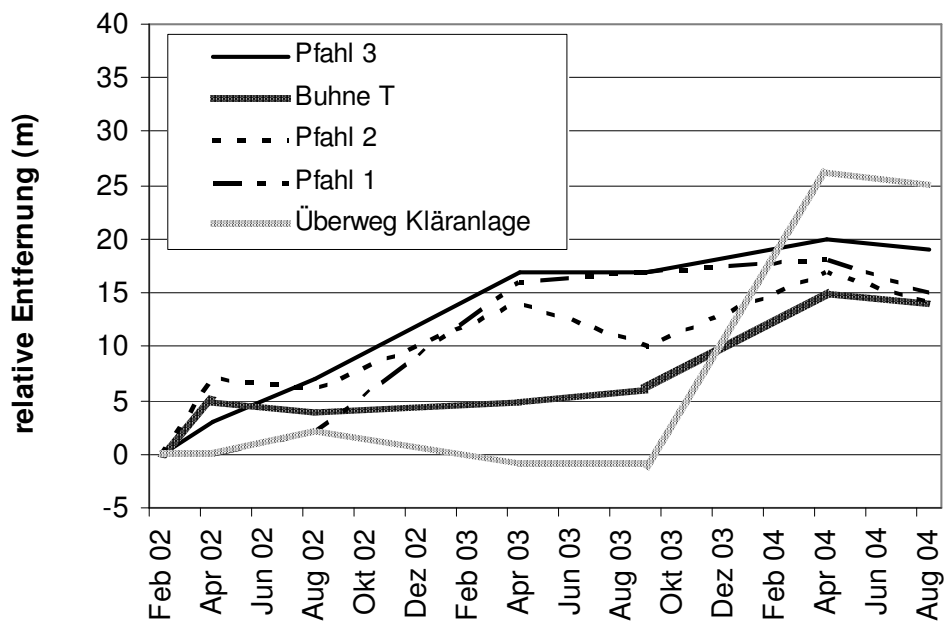


Abb. 2: Relative Entfernung des Dünenfußes von ausgewählten Festpunkten zwischen Februar 2002 und August 2004

In der Erinnerung der örtlichen Bevölkerung erschienen die Dünenabbrüche als relative junge Erscheinung, doch unsere Auswertung von Luftbildern aus dem Zeitraum 1971-2002 (Abb. 3) offenbarte positive und negative Variationen des Dünenfußes um 50 m im Bereich zwischen dem östlichen Ortsende und den Nordostdünen (R 3428700/H 5962800) sowie Variationen um 100 m im östlich anschließenden Abschnitt bis zum Übergang zu Café Neudeich in der Verlängerung des Kartenausschnitts. Im erstgenannten, westlichen Abschnitt war zwischen 1971 und 1983/85 ein Zuwachs festzustellen, danach eine kontinuierlich negative Entwicklung; im östlichen Abschnitt war bis zum Jahr 2002 ein kontinuierliches Anwachsen des Dünengürtels zu erkennen. Somit ist der Beginn der negativen Entwicklung im westlichen Abschnitt spätestens seit 1990 und im östlichen Abschnitt erst ab dem Winter 2003/04 anzusetzen. Die Abbrüche während der Sturmflut 1994, die nach den Kartierungen Hempels (1995) die gesamte Strandlinie betrafen, fügen sich im westlichen Abschnitt in diese mittelfristigen Tendenzen ein, im östlichen Abschnitt sind sie größenordnungsmäßig der mittelfristigen Tendenz zum Anwachsen des Dünengürtels untergeordnet. Die für den August 2004 eingetragene Abbruchkante der Dünen stellt bis in den mittleren Abschnitt der Nordostdünen die am weitesten in-

selwärts vorgeschobene Linie seit 1971 dar. Im Bereich des Café Neudeich sind noch die relativ jungen, äußeren Weißdünen erhalten.

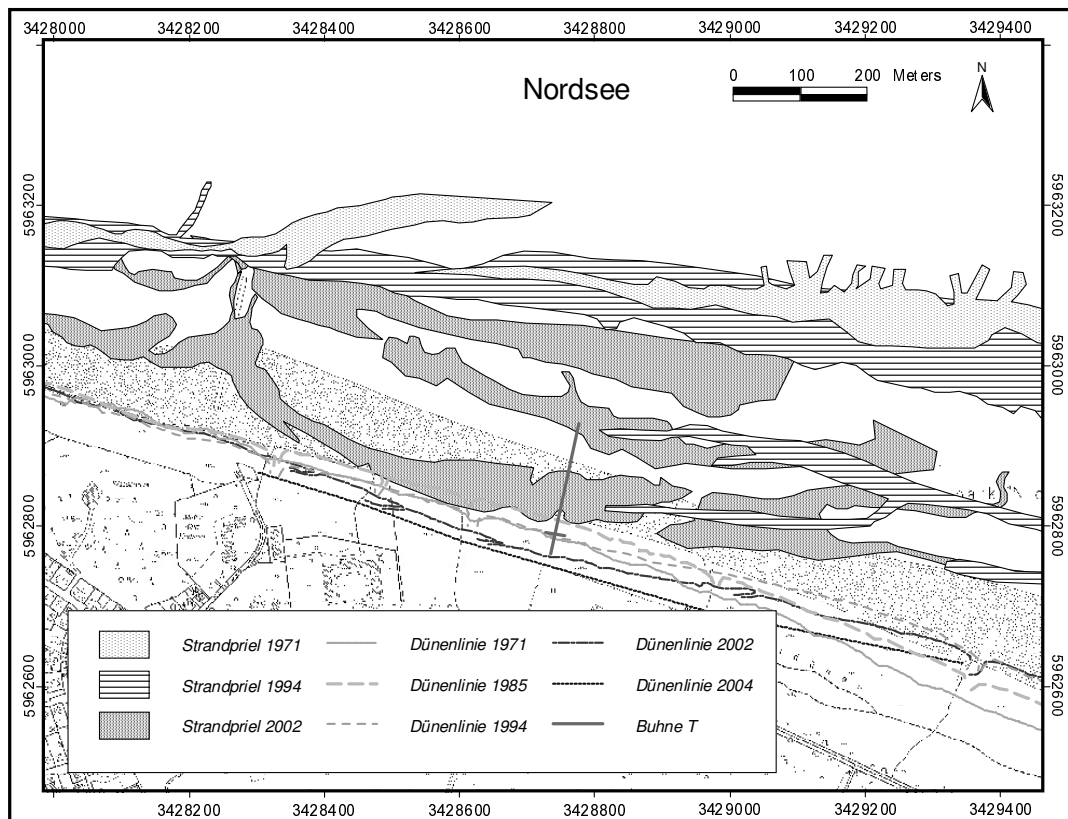


Abb. 3: Dünenlinien und Strandpriele 1971-2002, Lage des Dünenkliffs 2004

4 Ursachenforschung

Zur Erklärung der seit etwa dem Jahr 2000 verstärkten Küstenerosion wurden die folgenden, möglichen Ursachen überprüft:

- 1. Veränderung des Windregimes**
mit der Folge eines schwächeren äolischen Sandtransportes, eines Anstieg der Hochwasserlinie und einer Verstärkung der tideinduzierten Strömung
- 2. Anstieg der Wasserstände MThw und MTnw**
- 3. Zunahme der Extremwasserstände bei Sturmfluten**
- 4. Aussetzen des Sandnachschubs durch reduzierte Riffanlandung.**

Betrachtet man den Wind in den Jahren 1999 bis 2001 so ist festzustellen, dass im Vergleich zum Durchschnitt der Jahre 1960-1989 die Westwinde um mehr als 5% zugenommen haben, während die Häufigkeit der Nordwinde, von denen die größte morphologische Wirksamkeit zu erwarten wäre, abgenommen hat. Da es in den Jahren 1999, 2000 und 2001 hohe Sedimentverluste im Untersuchungsgebiet um die Buhne T gegeben hat, während sich die Dünenkette in den Jahre 1960 bis 1989 noch kontinuierlich aufgebaut hat, liegt die These nah, dass die Verschiebung der Windrichtungshäufigkeiten von Bedeutung sein kann. Doch dürfte der direkte äolische Einfluss gering sein, da in den letzten Jahren das Wasser bei Hochwasser bis nahe an den Dünenfuß herangereicht hat, der Strand also für die Sandausblasung nicht genügend abtrocknen konnte. Offensichtlich haben auch die verstärkten tideinduzierten Ostströmungen der Jahre 2000 und 2001 keine wesentliche Verbesserung der negati-

ven Sandbilanz gebracht. Wie und in welcher Weise sich die tideinduzierte Strömung letztendlich auf den Sedimenthaushalt an der Nordseite Wangerooes auswirkt, ist anhand der uns zugänglichen Daten (Strömungskarten der Deutschen Bucht 2000-2003) nicht eindeutig und sicher zu belegen.

Das WSA Wilhelmshaven berechnet für die Jahre 1890-1989 einen relativen säkulären Anstieg des MThw von 29,8 cm (WSA 1990, 38), was einem jährlichen Anstieg um 0,3 cm entspricht. Demgegenüber wird der Anstieg des Meeresspiegels mit nur 0,12 cm/a angenommen (Petersen 1996, 62). Seit dem Jahr 1993 hat sich auf Wangerooe am Pegel Nord sowohl das MThw als auch das MTnw anders entwickelt als man es aufgrund der 136 Messjahre am Pegel Wilhelmshaven erwarten würde. Zwar kommt es auch hier zu einem nicht linear verlaufenden Anstieg, doch die Anstiegshöhe ist viel größer. Aus der Trendlinie in Abb. 4 kann man einen durchschnittlichen Jahresanstieg von 1,1 cm ablesen, aus der Trendlinie in Abb. 5 einen Anstieg von 0,9 cm/a. Das Wasser steht also kontinuierlich höher am Strand. Aus dem Richtwert des Küstenbaus, dass sich die Inselstrandlinie bei einem Meter Meeresspiegelanstieg 300 m nach Süden verlegt, wäre eine durchschnittliche Verlagerung um ca. 3 Meter zu folgern.

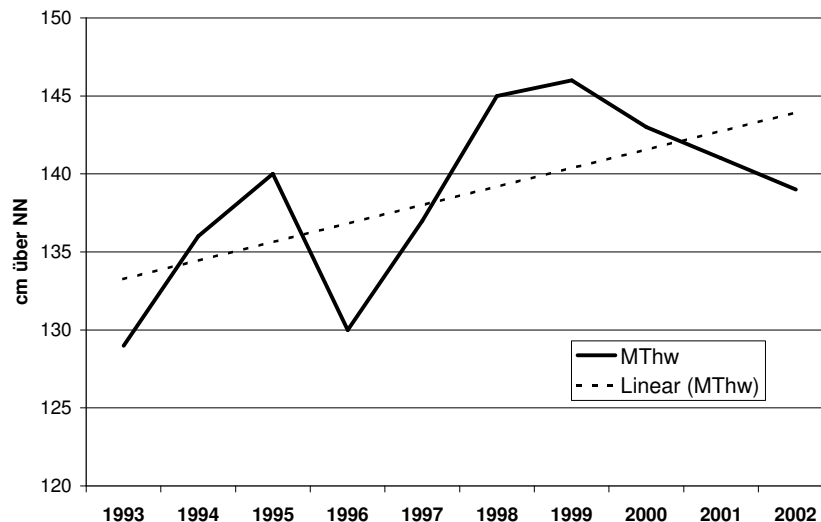


Abb. 4: MThw am Pegel Wangerooe Nord (1993-2002) (nach Daten des WSA 2003)

Die von Eitner (1993, 19) festgestellte Zunahme der Sturmfluthäufigkeit in der Deutschen Bucht kann zwar für den Pegel Wilhelmshaven (1940-1994) bestätigt werden, doch für Wangerooe ist dieser Trend in den Jahren 1993 bis 2002 nicht zu erkennen (Abb. 6). Im Gegenteil scheinen die Extremwasserstände sogar eher abzunehmen, so dass Sturmfluten und damit verbundene Extremwasserstände als alleinige Ursache für die fortgesetzten Materialverluste zunächst auszuschließen sind.

Die Versorgung des Nordstrandes durch die Anlandung von Riffen aus dem Riffbogen scheint entgegen den Vermutungen Hempels (1983) nicht abgerissen zu sein. Dies belegen eigene Beobachtungen am Hauptbadestrand aus den Jahren 2002-2004 und Luftbildauswertungen (Zepp & Parakenings 2004). Zur Sandversorgung können auch Sandaufhöhungen des Badestrandes (Abb. 7) beitragen, der dem Untersuchungsgebiet im Westen vorgelagert ist. Die hier seit 18 Jahren dokumentierten Aufhöhungen erfolgen zur Zeit alljährlich, um die Sandverluste durch die winterlichen Sturmfluten auszugleichen und den Badestrand um bis zu 2,5 m auf ein Niveau anzuheben, das höher als das natürliche Gleichgewichtsniveau liegt. Der Sand wird jeweils im Frühjahr einige Kilometer weiter östlich aus

dem Nassstrand ausgebaggert und mit Muldenkippern antransportiert. Mit der Strömung wird das durch die Brandung im Winter abgetragene Material wieder nach Osten verlagert, ohne dass das Untersuchungsgebiet um die Buhne T hiervon sichtbar profitieren würde. Ein großer Teil des abgetragenen Sandes wird weiter im Osten im Nassstrandbereich abgelagert; auffallend ist, dass jeweils im Spätsommer die Sandentnahmestellen durch den litoralen Sandtransport wieder ausgeglichen sind.

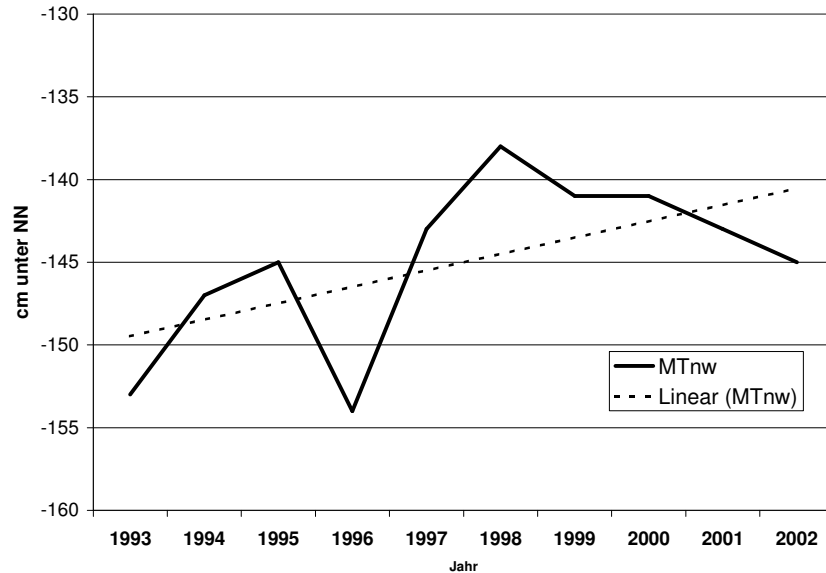


Abb. 5: MTnw am Pegel Wangerooge Nord (1993-2002) (nach Daten des WSA 2003)

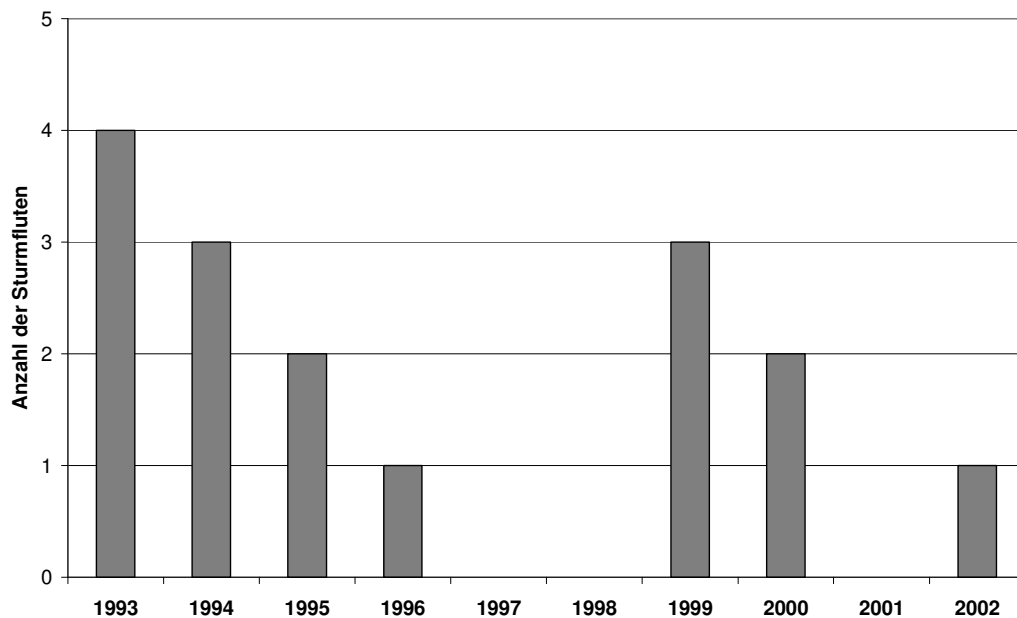


Abb. 6: Sturmflutwasserstände am Pegel Wangerooge Nord (1993-2002) (nach Daten des WSA 2003)

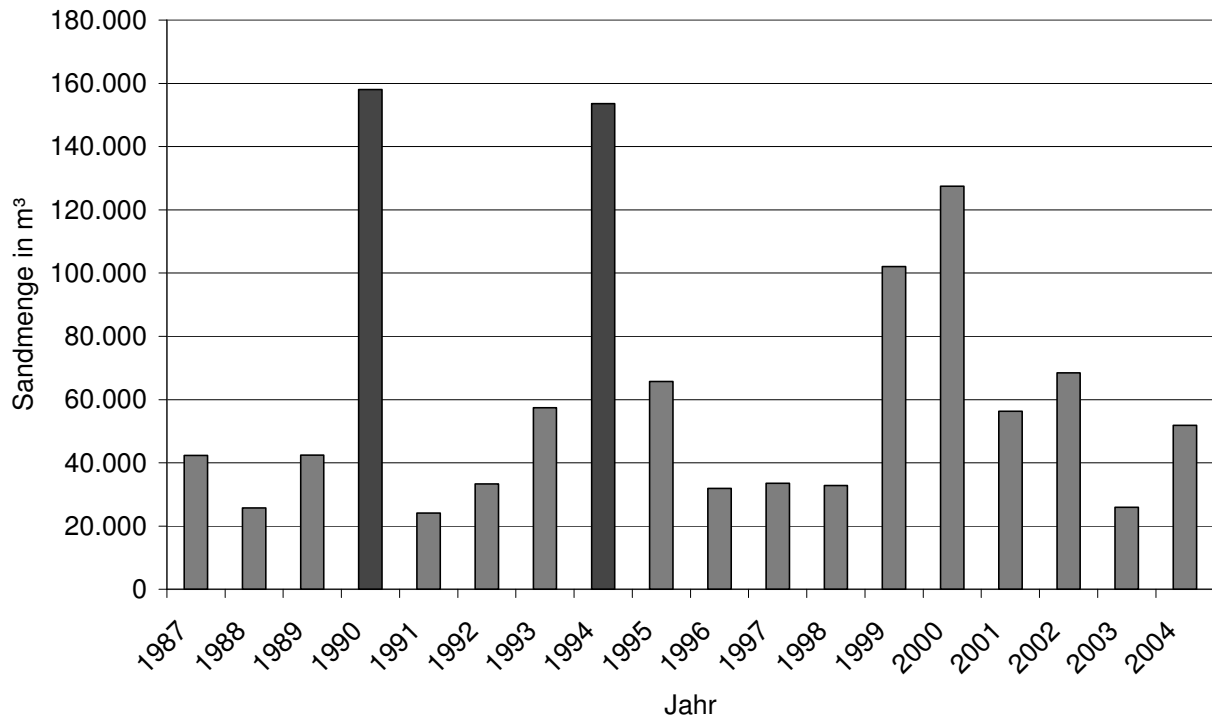


Abb. 7: Sandauffahrten und Sandaufspülung am Badestrand 1987-2004. Aufspülungen sind dunkel dargestellt. (Datenquelle: Gemeinde Wangerooge 2004)

5 Sturmfluten, Veränderung der Strandpriele, künstliche Sandauffahrten – Ein möglicher Schlüssel zum Verständnis

Die diskutierten Ursachen können die fortgesetzte Abtragung im Strand- und Dünenareal um die Buhne T nicht hinreichend erklären. Doch zusätzliche Beobachtungen geben Hinweise auf eine wahrscheinliche Prozesskette. Bereits Jahre vor den spektakulären Dünenabbrüchen entging aufmerksamen Spaziergängern am Strand nicht, dass östlich des Hundesstrandes, also im Vorfeld der Buhne T, ein Strandpriel derartig vertieft war, dass dort die unter den Strandsand bedeckten Wattsedimente zum Vorschein kamen und abgetragen wurden. Deshalb ist die Lage der Strandpriele in die Luftbildauswertung einbezogen worden (Abb. 3). Es ist eindeutig, dass die Strandpriele gegenüber den 1970er Jahren eine nach Süden verschobene Lage eingenommen haben. Diese Lageveränderung scheint 1994 eingeleitet worden zu sein, denn die für die Jahre 1994, 1998, 2000 und 2002 kartierten Strandpriele zwischen den Bühnen Q und R weisen eine nahezu deckungsgleiche Lage auf; für den Strand zwischen der Buhne R und T gilt das für die Jahre 1998, 2000 und 2002. Es liegt die Vermutung nahe, dass dieser Prozess durch die große Sturmflut vor der Sandaufspülung um Jahr 1994 verursacht worden ist. Die Jahre 1998 bis 2000 waren mit ihren hohen MThw und MTnw-Wasserständen zweifellos günstig für den Erhalt dieses dünenrandnahen Priels. Etwa gleichzeitig traten 1999 und 2000 drei bzw. zwei Sturmflutwasserstände auf, während derer die Dünen besonders gefährdet waren. Auch die hier nicht dargestellten Zeit-Weg-Linien des WSA (Strandprofile B3 und B2) aus diesem Strandabschnitt belegen Stranderniedrigungen bis maximal etwa 2 m seit November 1998. Der Bereich stärkster Abtragung pflanzt sich in auffälliger Weise nach Osten fort und erreicht in jüngster Zeit Strandabschnitte, die zuvor eine positive Sandbilanz und ein Breitenwachstum des Düngürtels aufwiesen. Es scheint hier demnach eine Kettenreaktion vorgelegen zu haben, die die weitere Rückverlegung des Dünenfußes aufrechterhalten hat.

Möglicherweise hat in diesem Zusammenspiel der überwiegend natürlichen Prozesse der anthropogene Eingriff eine zusätzliche Rolle gespielt: An einem geradlinigen Sandstrand entlang einer Gezeitenküste mit küstenparalleler Strömung, Sandanlandungen und Bühnen erzeugt der Flutstrom Strandriffe, die im Lee an einer Bühne angelagert sind. Über den Strandpriel zwischen Trockenstrand und Strandriff fließt ein Teil des durch den Wellenauflauf gegen das Ufer versetzten Wassers zunächst als strandparallele Unterströmung ab und vor der nächsten Bühne meerwärts durch eine Öffnung im Strandriff. Einen sichtbaren Ausdruck dieser Vorstellung bietet die Morphologie der Strandoberfläche. Wenn der seewärtige Rückstrom blockiert oder behindert ist, dann wird das Wasser über die nächste Bühne strömen und sich mit dem dort anfallenden Rückstrom verbinden und so eine Vertiefung des ufernächsten Priels bewirken. Hier soll die Frage aufgeworfen werden, ob der durch die künstlichen Strandaufhöhungen gesteigerte küstenparallele Sandtransport und damit der Aufbau eines Strandriffes östlich des Badestrandes eine Ursache für die Behinderung des Abflusses sein kann. Die Strandlinie Wangerooes knickt östlich des Badestrandes aus einer W-E- in eine WNW-ESE-Richtung ab. Für den nehrungsartigen Vorbau eines kräftigen Strandriffes, das gegebenenfalls durch den vom Badestrand abgetragenen Sand zusätzlich mit Sand versorgt wird, ist diese Stelle prädestiniert. Bei ungünstigen Konstellationen (Wasserstände, Sturmfluten) besäßen die künstlichen Strandaufhöhungen des Hauptbadestrandes die Wirkung, die Strandpriele zu verstärken und damit indirekt und zeitlich verzögert entsprechend der Wanderungsgeschwindigkeit des Sandes den fortgesetzten Abtrag zu fördern. Bei Sturmfluten kann wegen des Priels unmittelbar vor dem Dünenfuß die Brandung besonders hoch auflaufen, weil größere Wassertiefen auftreten.

Für diesen Erklärungsansatz spricht die Tatsache, dass die dokumentierten Dünenabbrüche im Gegensatz zu Veränderungen durch extreme Sturmfluten (z.B. 1994) nur lokal begrenzt auftraten. Andere Ursachen besitzen allein – wie oben dargestellt – keinen überzeugenden Erklärungswert und hätten Veränderungen an längeren Küstenabschnitten hervorrufen müssen. Deshalb war für den Dünenabbruch ursächlich eine Kombination Faktoren zu suchen, die lokal wirksam sind. Hierbei scheinen die künstlichen Sandauffahrten am Hauptbadestrand keineswegs Auslöser, sondern innerhalb weitgehend naturbestimmter Prozessabläufe lediglich ein begünstigender, indirekt und zeitverzögert wirkender Faktor zu sein. Zur Erhärtung dieses Erklärungsansatzes müsste bis in die jüngste Zeit eine lückenlose Auswertung aller verfügbaren Zeit-Weg-Linien und Luftbilder des gesamten Nordstrandes sowie aller verfügbaren Wasserstände des Pegels Wangerooe durchgeführt werden.

6 Ausblick

Der Wiederaufbau der Bühne Z zeigt zwischen 2003 und 2004 die vom WSA erhoffte Wirkung. Statt eines tiefen Priels ist im Anschluss an das Dünenkliff ein breiter Trockenstrand entstanden und der Dünenrand ist im letzten Jahr lagestabil geblieben. Allerdings scheint sich der Abschnitt mit der stärksten Abtragung nun nach Osten zu verlagern (vgl. Abb. 2 (Überweg Kläranlage) und 3). So sollte die zukünftige Entwicklung weiter aufmerksam beobachtet werden, auch wenn keine unmittelbare Bedrohungssituation erkennbar vorliegt.

7 Literatur

- DAVIS JR., R. A. (1978): Beach and Nearshore Zone. In: DAVIS JR., R. A. (Hrsg.): Coastal Sedimentary Environments. S. 237-444. New York, Heidelberg, Berlin,
- EHLERS, J. U. H. MENSCHING (1983): Erläuterungen zur Geomorphologischen Karte 1:25.000 der Bundesrepublik Deutschland GMK 25 Blatt 10 2213 Wangerooe. DFG Schwerpunktprogramm, Berlin

- EITNER, V. (1993): Sedimentdynamik im Strandbereich einer brandungsbeeinflussten, mesotidalen Barriere-Insel unter Berücksichtigung der Auswirkungen künstlicher Strandauffüllung (Norderney, südliche Nordsee). Dissertation Münster
- HEMPEL, L. (1983): Der Sandhaushalt als Hauptglied in der Geoökodynamik einer Ostfriesischen Insel – Abhängigkeit von natürlichen und anthropogenen Kräften. In: Geoökodynamik 4, S. 87-104.
- HEMPEL, L. (1985): Erläuterungen zur Geomorphologischen Karte 1:100.000 der Bundesrepublik Deutschland Blatt 4 C2310/C2314 Esens/Langen. GMK Schwerpunktprogramm, Berlin
- HEMPEL, L. (1995): Die Nordseeinsel Wangerooge 1994. Ein Geoökologisches Zeitdokument nach einer Sturmflut im Januar 1994. In: Geoökodynamik 16, S. 57-72. Bensheim
- KRAMER, J. (1989): Kein Deich – Kein Land - Kein Leben: Geschichte des Küstenschutzes an der Nordsee. Leer
- LUCK, G. (1970): Bemerkungen zu den Dünenabbrüchen im Westen der ostfriesischen Insel Juist. I: Neues Archiv für Niedersachsen 19, 181-186
- LUCK, G. (1975): Der Einfluß der Schutzwerke der Ostfriesischen Inseln auf die morphologischen Vorgänge im Bereich der Seegaten und ihrer Einzugsgebiete. Braunschweig
- PETERSEN, P. (1996): Meeresspiegelanstieg und Küstenschutz. In: Klimaänderung und Küste. (= Schriftenreihe der Schutzgemeinschaft Deutsche Nordseeküste e.V. 1) S. 61- 69. Varel
- SEEDORF, H. H. UND H.-H. MEYER (1992): Landeskunde Niedersachsen - Natur- und Kulturgeschichte eines Bundeslandes - Band 1: Historische Grundlagen und naturräumliche Ausstattung. Neumünster
- SINDOWSKI, H. (1973): Das ostfriesische Küstengebiet. Inseln, Wattern und Marschen. Sammlung Geologischer Führer 57, Berlin, Stuttgart
- STREIF, H. (1990): Das Ostfriesische Küstengebiet Nordsee, Inseln, Watten und Marschen. Sammlung Geologischer Führer 57, 2. Auflage. Berlin, Stuttgart
- WASSER- UND SCHIFFFAHRTSAMT WILHELMSHAVEN (WSA)(1990): Strombautaschenbuch
- WASSER- UND SCHIFFFAHRTSAMT WILHELMSHAVEN (WSA)(1995): Eine Sammlung gewässerkundlicher Daten aus der Jadebucht und angrenzenden Bereichen - Stand: Februar 1995
- WASSER- UND SCHIFFFAHRTSAMT WILHELMSHAVEN (WSA) (2003): Tidehoch- und Tide-niedrigwasserstände am Pegel Wangerooge Nord 1993-2002, unveröffentlicht
- ZEPP, H. & PARAKENINGS, M. (2004): Künstliche Strandaufhöhung und quasinatürliche Morphodynamik an der Nordseite der Insel Wangerooge. – Berichte z. deutschen Landeskunde (eingereicht)

Adresse

Prof. Dr. Harald Zepp
Dipl.-Geogr. Maren Parakenings
Geographisches Institut
Ruhr-Universität Bochum
44780 Bochum
Germany

E-mail: Harald.Zepp@rub.de
Maren.Parakenings@gmx.de

On the Sensitivity of Sediment System in the East Frisian Wadden Sea to Climate Change

Emil V. Stanev, Gerold Brink-Spalink, and Jörg-Olaf Wolff

ICBM, University of Oldenburg

Summary

The paper addresses the individual and collective contribution of tides, wind waves and sea-level rise to the dynamics of sediment in coastal areas. The results are obtained from simulations with the General Estuarine Transport Model (GETM) coupled with a sediment transport model. Several scenarios have been developed aiming at revealing possible trends resulting from realistic (observed or expected) changes in sea-level and magnitude of wind waves. It is demonstrated that these changes not only influence the concentration of sediment, which is very sensitive to the magnitude of the external forcing, but also the spatial and temporal variability patterns. Under a changing climate forcing the horizontal distribution of the integral effect of deposition and erosion changes considerably along with changes in the balance of export and import of sediment from the intertidal basins. We show that this trend does not follow simple rules already known from earlier studies, thus implicating the need to further apply 3D models in the research of the behaviour of sediment systems under climate change.

Zusammenfassung

Diese Arbeit behandelt den Einfluss von Tiden, Windwellen und dem Meeresspiegelanstieg auf die Dynamik von Sedimenten in Küstenbereichen. Die Ergebnisse werden erzeugt durch die Anwendung des „General Estuarine Transport Model“ (GETM), das mit einem Sedimenttransportmodell gekoppelt ist. Verschiedene Szenarien werden untersucht, um die möglichen Trends aufzuzeigen, die sich aus realistischen (beobachteten oder erwarteten) Veränderungen des Meeresspiegels, oder der Ausprägung von Windwellen ergeben. Es wird gezeigt, dass sich nicht nur die Konzentration des Sediments im Wasser verändert, die sehr sensitiv auf Veränderungen des externen Antriebs reagiert, sondern auch die räumlichen und zeitlichen Variabilitätsmuster. Unter einem variierten klimatischen Antrieb verändert sich die horizontale Verteilung der Differenz zwischen Ablagerung und Erosion erheblich, was mit einer Verschiebung des Import-Export-Verhältnisses von Sediment im Gezeitenbecken einhergeht. Wir zeigen, dass dieser Trend nicht den einfachen Regeln früherer Untersuchungen folgt und argumentieren für die weitere Anwendung von 3D-Modellen bei der Untersuchung von Sedimentsystemen unter klimatischen Veränderungen.

2 Introduction

The sediment systems in many near coastal areas are strongly coupled with the water dynamics, one illustration is the East Frisian Wadden Sea where physical processes control coastal erosion and shoreline change through sediment movement. Thus beaches, barrier islands, bottom profile and sediment types are adjusted to different forcings: astronomical (tides), atmospheric (wind and wave climate), open ocean (mean sea level, currents and thermohaline fields) and coastal (fresh water flux). Among the above mentioned forcing factors, signals originating in the atmosphere and the open ocean seem to be the most important ones that will be affected by global climate change.

The response of a coastal system is not easily measurable, and attributing different response types to a specific forcing is a problem. The situation is further complicated because changes in sediment sys-

tems are not uniform, as assumed in some simplistic models, thus local processes controlling the sediment supply may become dominating.

There is nowadays a wide consensus that prediction of further changes in coastal systems crucially depends on a thorough understanding of the physical processes acting in the system. We believe that there is a lack of understanding of these fundamental processes and will in the present paper focus on the sensitivity of one particular sediment system to illustrate the sensitivity to various forcings. Below we give a short introduction to the physical/coastal oceanography of the East Frisian Wadden Sea relevant to the issues addressed in this paper.

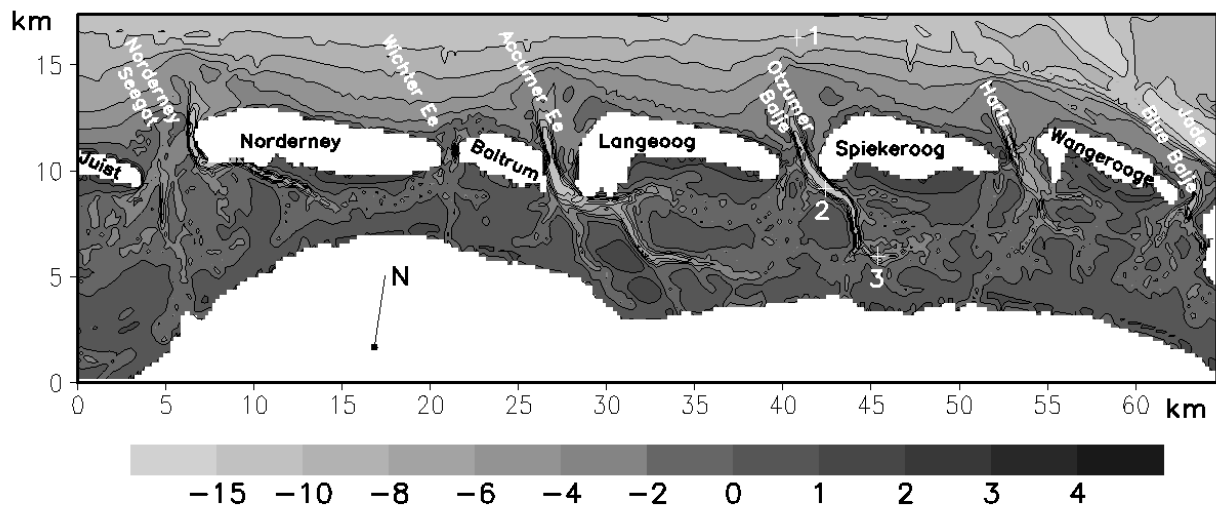


Fig. 1: Topography of East Frisian Wadden Sea. The isobars are represented as negative numbers (m) below the mean sea level. The arrow gives the direction to the North. Some results of the simulations are discussed for the locations numbered 1, 2 and 3 in the plot.

The East Frisian Wadden Sea consists of several tidal basins between barrier islands and the coast (Fig. 1). The water exchange during one tidal period between the North Sea and individual back barrier basins varies from $170 \times 10^6 \text{ m}^3$ to $40 \times 10^6 \text{ m}^3$. The circulation is dominated by westward transport during ebb and eastward transport during flood. The transport through the inlets is mainly controlled by the amplitude of the tidal oscillations, the along-shore circulation, as well as the circulation in the intertidal areas, are controlled by the spatial properties of the forcing signal.

The maximum ebb velocity is observed in the tidal channels shortly before the rate of sea-level fall reaches its maximum. However, the maximum flood velocity is delayed by ~ 2 hours with respect to the maximum rate of sea-level rise. This asymmetry is due to the hypsometric control of basins with time-variable horizontal area (Stanev et al., 2003a, hereafter SFW).

During most of the tidal period, the entire water column shows a high level of turbulence. Only during slack water (duration of ~ 1 hour) the velocity reduces drastically and the level of turbulence diminishes, which enables the deposition of sediment. Up to 7200 tones of mud and 4300 tons of sand are moved in and out of the tidal channel of Otzumer Balje (see Fig. 1 for the geographic names) over one tidal cycle (Santamarina Cuneo and Flemming 2000). The complicated correlation patterns between concentration of sand and suspended particulate mater (SPM) reveals their different response to water dynamics, thus triggering the sorting of sediment.

Changes in wave or storm patterns may occur under climate change (Schubert et al., 1998). A number of observations and climate change experiments for the 20th century suggest that the storm and wave

climate in the North Sea has undergone significant variations on time scales of decades (WASA Group, 1998). It is argued by Flemming (2002) that sea-level rise creates a sediment deficit in the tidal basins and a morphodynamic response. The reasoning is based on the fact that the coastal protection systems (dikes) would inhibit natural islands dynamics because the tidal signal can not propagate further inland. The expected increase of energy in the tidal basins would lead to an increased erosion. Without sufficient supply of sediment the tidal prism would increase and the islands displace closer to the coast (1 km for sea-level rise of 1 m, Flemming, 2002). One prove that the morphodynamics of East Frisian Wadden Sea is very sensitive to various forcing is that land reclamation since 1300 AD resulted in a progressive increase of the length of barrier islands while catchment areas decreased. The tidal flats in the North Frisian Wadden Sea almost disappeared between 1300 AD and present (Flemming and Davis, 1994).

2 The numerical model

2.1 The circulation model

The present work uses results of numerical simulations with the General Estuarine Transport Model (GETM, Burchard and Bolding, 2002) coupled with a sediment transport module. The first application of this model to the area of our study is described by Stanev et al. (2003b, hereafter SWBBF) and we refer to this paper for more details about the model presentation, its set-up and forcing, as well as for results of simulations and model validations against observations.

A particular feature of GETM is its ability to adequately treat the dynamics in deep inlets and channels as well as on the tidal flats, the latter falling dry during part of the tidal period. This is achieved by introducing a "drying corrector" which reduces the influence of some terms in the momentum equations in situations of very thin fluid coverage on the tidal flats. In the present simulations, areas where the water column is thinner than $D_{min}=2$ cm are considered dry. In the interval between $D_{crit}=10$ cm and D_{min} the model physics are gradually switched toward friction domination, i. e. by reducing the effects of horizontal advection and Coriolis acceleration. For a water coverage greater than 10 cm the full physics are included.

The horizontal matrix includes 324x88 grid-points in the zonal and meridional direction, respectively with steps of 200 m. In the vertical, the model uses terrain-following co-ordinates. The vertical discretization consists of 10 equidistant layers extending from the bottom to the sea surface.

The forcing at the open boundaries is taken from the simulations with the operational model of the German Bight provided by the German Weather Service. The vertical motion of the sea level at the open boundary and its slope provide the major driving force for the model (the technical details describing the forcing of our regional model are given in SWBBF).

2.2 Sediment transport model

The evolution of sediment concentration is described by a standard diffusion-advection equation which is on line coupled with the dynamical model (Stanev et al., paper submitted to JGR, hereafter SBW). The deposition and erosion rates D and E are accounted for through the boundary condition at the sea bed. The deposition rate is parameterised according to Einstein and Krone (1962), the erosion rate is computed using the formula of Partheniades (1965). The critical shear stress for erosion of mud is set constant to 0.2 Nm^{-2} . The critical shear stress for deposition is chosen to be equal to that for erosion. That means that either deposition or erosion occurs and no region of transition exists where none of the two processes are active.

The contribution of the wind waves to sediment dynamics is based on a simple model assuming that the turbulent kinetic energy associated with breaking wind waves is a function of the wave height and

water depth. According to Jonsson (1965) the bed shear stress can be described (like in steady flows) as proportional to the second power of the orbital velocity. Based on this concept Roberts et al. (2000) use the parameterisation

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w \frac{gH^2}{4h} \quad (1)$$

to study the impact of wave breaking on the equilibrium bottom profile. In Eq. (1) H and h are the wave height and water depth and f_w is the friction factor. We also assume that for $h < 2H$, $H = h/2$. This model suggests that erosion will be enhanced in the intermediate depth range where the depth is still large to allow high waves. Outside this range (deep ocean or very shallow depth) either the level of turbulence is low because of the large depth, or the wave height is small because of the small depth. This concept is illustrated in Fig. 2 where we present the bed shear stress as a function of h . The rest of the parameterizations are described in more detail by Brink-Spalink et al. (2003).

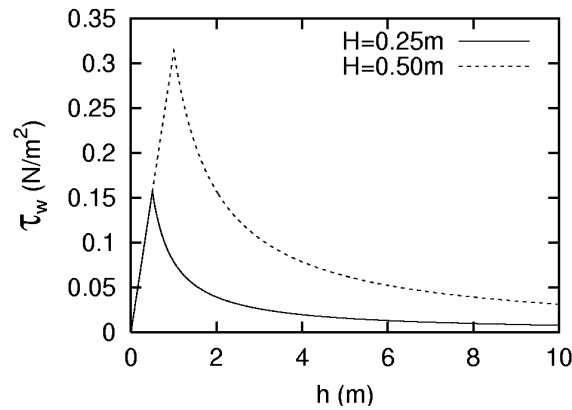


Fig. 2: The bed shear stress as a function of depth h (Eq. 1). $f_w = 10^{-3}$.

The sediment source at the bottom is taken to be inexhaustible for sand and mud everywhere. Effects of erosion or deposition on the bathymetry are not considered in our simulations. Lateral boundary conditions for SPM are taken to be zero for inflowing water. Outflowing water results in a sediment flux of $u_n c$ out of the model area, where u_n is the velocity normal to the boundary and c is the concentration.

2.3 Numerical experiments

In the following we discuss the results of several numerical experiments aiming to reveal the sensitivity of the sediment system to external forcing. This issue is relevant to the sensitivity of sediment dynamics to global and local climate change. We will further assume that the astronomical forcing (tidal oscillations) remain the same, but that the sea level or wave height change. We therefore carry out the following experiments. The first one is called Control Run (CR) and is forced only by tides at the open boundary of the model. This is essentially the same experiment, which is presented in the study of SBW and is carried out for the period October 16 to 18, 2000, which are representative for the general conditions during spring tide. In the second experiment we add to the model forcing wind waves with a height of 25 cm (W25). The third experiment (W50) is the same as the second one, but the height of wind waves is taken as 50 cm. In the fourth experiment we do not include wind waves, but instead assume a Sea Level Rise (SLR-experiment) of 1 m. In the last experiment (SLRW25) we include both effects: sea-level rise of 1 m and wind waves of 0.25 cm. When formulating the above experiments we take the same tidal forcing for all experiments. This assumption excludes the change in the North Sea

tidal system which might occur if sea level increases. This issue can become a subject of a separate study.

There is a number of parameterizations of the wave friction factor f_w (see the review of Bruun, 1978), most of which have not been tested over wide areas of the ocean bed. The major difficulty is to find the right "weighting" of different mechanisms contributing to the bed shear stress. The preliminary sensitivity experiments showed that sediment dynamics are strongly affected by the choice of the wave friction factor f_w . Because our main purpose in this paper is to reveal the sensitivity of the entire sediment system to wind waves we propose the following pragmatic approach based on the results of recent observations by Santamarina Cuneo and Flemming (2000). During calm weather conditions the concentration of mud in suspension was approximately the same (about 50-60mg/l) during peak ebb and peak flood. The concentrations of sand were much smaller. Under windy conditions (northerly winds and 1m waves) the flood maximum of mud concentrations became about twice the ebb maximum. Under moderate wind conditions the concentration of sand increased considerably, and the sand maximum (also during flood) exceeded the one of mud. The fact that the mud concentrations do not change much reveals that the erosion by breaking waves in the Southern North Sea is limited by the larger depths.

We carried out several sensitivity experiments in which we changed only f_w and found out that the sensitivity of simulated concentration in the tidal channels is close to the observed one for $f_w = 10^{-3}$. This number is in the ranges proposed in other studies and our pragmatic method for estimation of f_w can be regarded as an indirect method to obtain a bulk value of this parameter for the purposes of numerical experiments. We admit that these experiments are just sensitivity studies, and can not answer the question about what would be the long-term change in the sediment system in the East Frisian Wadden Sea if one or several forcing factors change. In the real case the response is accompanied by a redistribution of sediment on the bed and changing topography (in our study topography does not change).

3 The results

3.1 Physical response

Adding the effect of wave breaking does not substantially affect the transport patterns, but rather the ones of turbulence. However, dynamics becomes quite sensitive to sea-level rise, which is explained by the fact that higher water level would contribute to an increase of the tidal prism. More specifically, SLR of 1 m resulted in an increase of the tidal prism of Spiekeroog area from 127 to $188 \times 10^6 \text{ m}^3$. Because the dikes along the coast do not allow further propagation of the signal inland the surface area of tidal flats reduces thus, as a whole, the basin area of tidal basins becomes less dependent on the height of sea level. This results in a decrease in ebb-dominated asymmetries (SWBBF and SFW) and the flood maximum increases considerably. This effect is well pronounced in the tidal channels, the latter giving an integrated measure of the response of tidal flats to forcing from the open ocean.

The above effects are displayed in Fig. 3 demonstrating that: (1) it is the flood maximum in the tidal channels, which is higher in SLR, but not the ebb one, and (2) the steep transition between flood and ebb in CR is smoother in SLR. Both effects contribute to a transition of the sediment system from ebb dominance toward flood dominance.

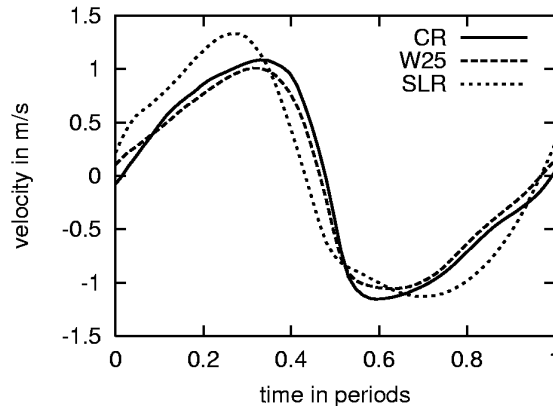


Fig. 3: Temporal evolution of velocity in the tidal channel “Otzumer Balje” in the middle of the water column (see Fig. 1 for the positions).

3.2 Sediment response

The response of the sediment system in the East Frisian Wadden Sea to tidal forcing has been analyzed in details by SBW and we refer to this study for more details about the results from experiment CR. Here we would like to mention that the temporal evolution of SPM north of the barrier islands (Fig. 4a) is shaped by advection of SPM in the tidal channels originating from the inlets and their catchment areas. The relative role of the TKE increases in tidal channels where the SPM shows two maxima associated with flood and ebb currents. During ebb phase the TKE is higher (not shown here). However, the time variability of SPM differs from the one of TKE, revealing that local models (without advection) would hardly resolve important temporal patterns (see also SBW). In the shallow extensions of the tidal channels (Fig. 4g) the maximum concentration of SPM is simulated during flood, revealing not only that the dynamics in the shallow area becomes flood dominated (SBBW) but also that there is a substantial difference between the sediment response to the tidal signal in the tidal flats and tidal inlets.

Adding 0.25 m wind waves to the model forcing (W25) results in a substantial increase of sediment concentration: about 1.25 times in the North Sea area, 1.35 times in the tidal channels and 1.24 times in the tidal flats. In order to enable a comparison between different experiments we show the results in Fig. 4 and Fig. 5 as anomalies from the mean (the mean value is also given). Only the results in CR are presented in Fig. 4 in concentration units. The vertical stratification of SPM is stronger in the case with wind waves. It is seen from the comparison between Fig. 4a and Fig. 4b that the sediment maximum (due to the supply of sediments from tidal flats) is stronger and more localized around the time of low water. While the general pattern of variability in the tidal channels does not drastically differ from CR to W25, there are some important qualitative changes: flood maximum is higher than the ebb one in W25, which is even more pronounced in W50.

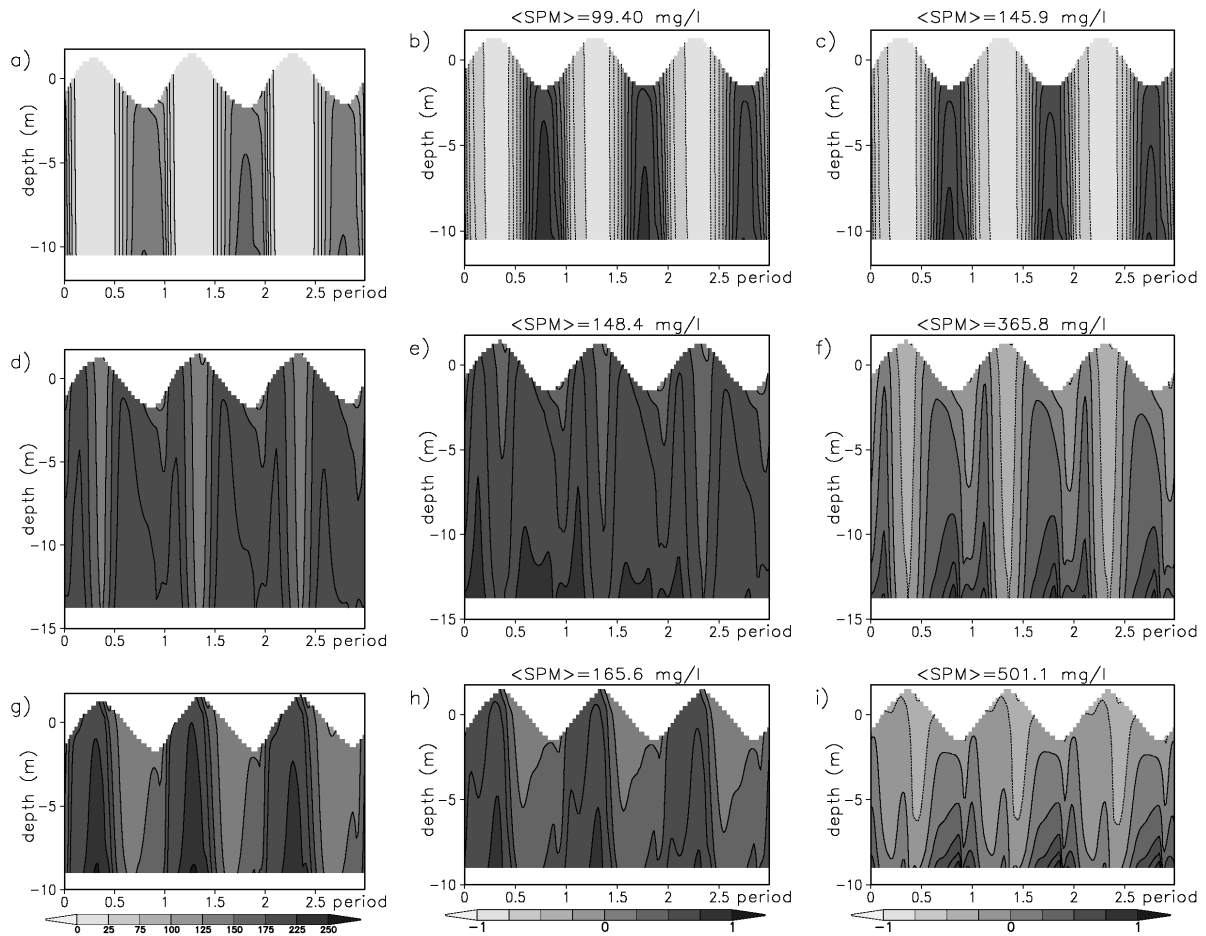


Fig. 4: SPM concentrations in front of the back barrier islands (a, b, c), tidal channels (d, e, f), and tidal basins (g, h, i). The first column (a, d, g) is from experiment CR, the second (b, e, h) is from W25, and the third (c, f, i) is from W50.

In W25 and W50 higher harmonics occur in the sediment concentrations on the tidal flats, which is more pronounced in W50. The low water maxima are separated by a local minimum of concentration appearing exactly at low water. These simulations are consistent with the theoretical considerations (Brink-Spalink et al., in preparation), the latter also revealing narrow peaks short before and just after the low water. The flood peak in Fig. 4g, h, which gives the absolute maximum of the concentration decreases relatively in W50 (Fig. 4i). Obviously, the wave height in W50 is sufficient to convert the sediment system in the tidal flats into a state dominated by wave breaking.

The sea-level rise in SLR tends to decrease the ebb dominated asymmetry. The sediment response demonstrates thus narrower peaks. In the tidal channels they are stronger during flood, which is opposite to the case in CR. The situation in the tidal flats does not change qualitatively compared to the one in CR. Noteworthy is that the contrast in time increases slightly in SLR.

The simulations in SLRW25 (Fig. 5c, f, i) reveal that the collective contribution of wind waves and sea-level rise represents approximately a sum of their individual contributions. Therefore we will not discuss the collective effects in detail. The only important result to mention here is that the sea-level rise tends to reduce the effect of the increased sediment concentrations due to erosion from wind waves by about 15 percent. The explanation is that the wave breaking in the deep water is less efficient (the water becomes deeper because dikes make it impossible for the tidal wave to reach very shallow depths on the land).

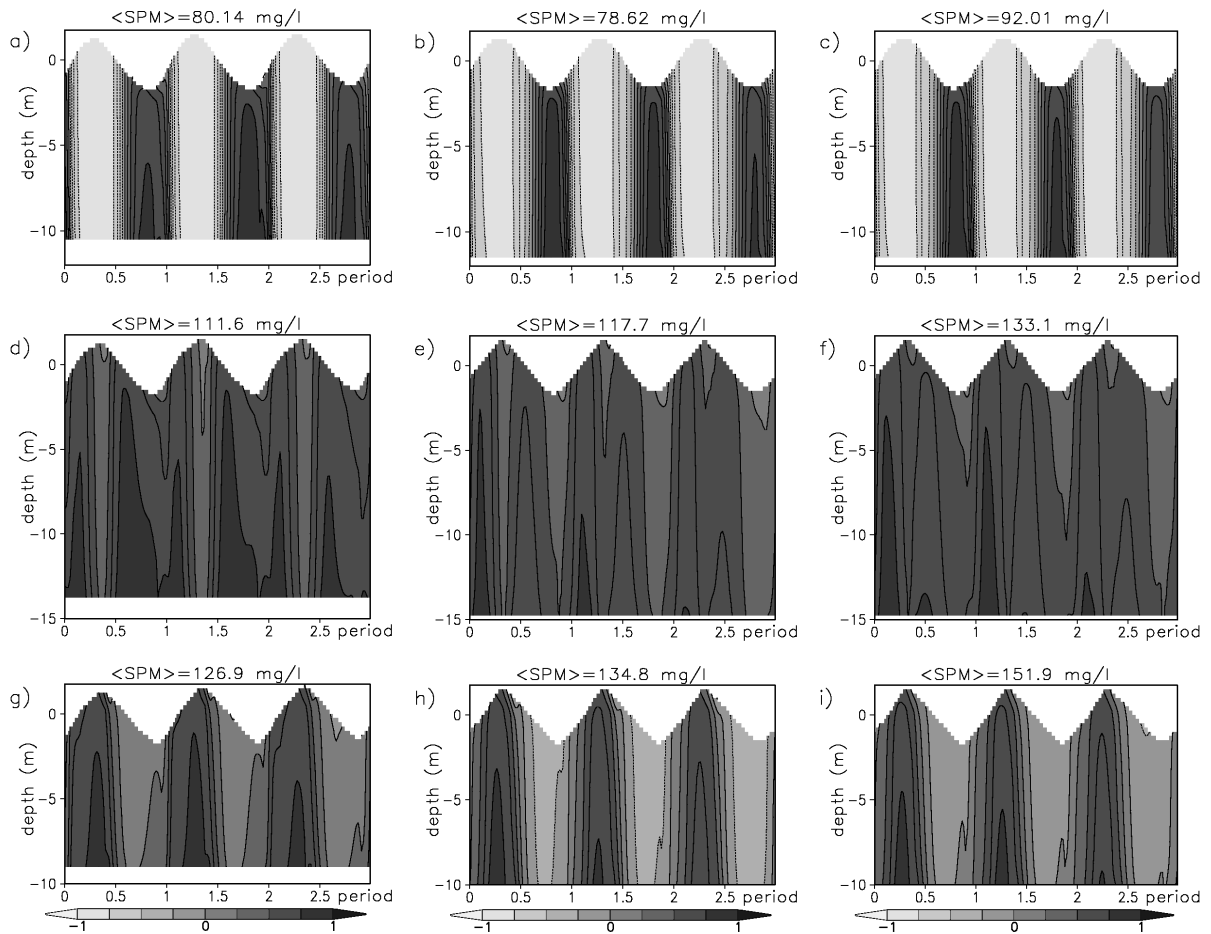


Fig. 5: SPM concentrations in front of the back barrier islands (a, b, c), tidal channels (d, e, f), and tidal basins (g, h, i). The first column (a, d, g) is from experiment CR, the second (b, e, h) is from SLR, and the third (c, f, i) is from SLRW25.

One expectation about the contribution of wind waves and sea-level rise to the sediment dynamics in the entire region of simulations is given by Fig. 6 (the left panel). The resulting sediment response can be seen in the right panel where we display differential plots between deposition and erosion in some of the simulations. The general conclusion is that in most of the inlets the sea level rise leads to an increase of erosion. However, this conclusion is not valid for the Norderney Seegat revealing that estimates about possible future changes based on simplified models could be wrong in some areas.

There are a number of speculations that sea level rise would increase the erosion of sediment from tidal basins. Our simulations demonstrate that this is only true in part of the tidal basins, and in particular in the extensions of inlets. However, the deposition of sediment is enhanced on the tidal flats and the reason for that is that the tidal asymmetries change as well as the bathymetry. Both effects could result in reshaping the morphodynamics and in some areas accumulation of sediment would be possible.

The conclusions about the role of the wind waves are also not trivial. From the bed shear stress shown in Fig. 6 (left panel) one could expect a trend of erosion of shallow areas and deposition in the deep ones. This expectation is valid for most of the tidal basins (the right panel). However, the pattern of deposition minus erosion (D-E) north of the barrier islands indicates that although bed stress due to wind waves is small everywhere north of the barrier islands the trends of deposition minus erosion are

characterized by specific spatial patterns. We remind that the direction of propagation of wind waves is not considered here and some differences between the present simulations and the trends in the real system due to increased wind waves could be expected.

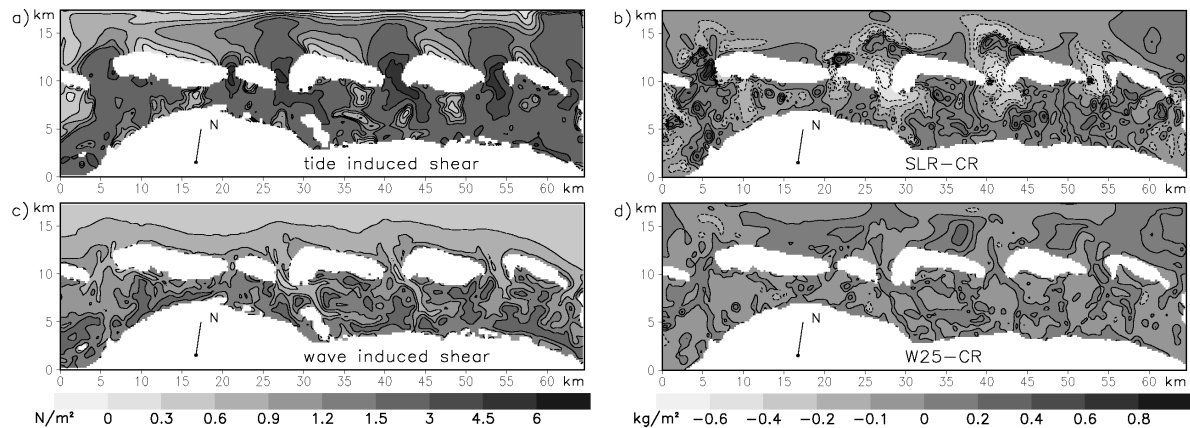


Fig. 6: Friction velocity due to tidal forcing (a) and forcing by wind waves (c). Difference between deposition minus erosion in SLR and CR (b) and W25 and CR (d).

Acknowledgements: We thank B. W. Flemming for the stimulating discussions.

4 References

- BRINK-SPALINK, G./ STANEV, E./ WOLFF J.-O.: A three-dimensional sediment transport model for the East Frisian Wadden Sea. In: A. Sanchez-Acrilla and A. Bateman (eds), RCEM 2003, Barcelona, 1-5 September 2003, Vol. I, 2003, 65-75.
- BRUUN, P.: Stability of tidal inlets. Theory and Engineering. Developments in Geotechnical Engineering 23, Elsevier, Amsterdam, 1978, 506 pp.
- EINSTEIN, H.A./ KRONE, R. B.: Experiments to determine modes of cohesive sediment transport in salt water. *J Geoph Res* 67, 1962, 1451-1461.
- FLEMMING, B. W.: Effects of climate and human interventions on the evolution of the Wadden Sea depositional system (Southern North Sea). In: WEFER, G./ BEHRE, K.-E./ JANSEN, E. (eds) Climate development and history of the North Atlantic realm. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002, 399-413.
- FLEMMING, B. W./ DAVIS, R.: Holocene evolution, morphodynamics and sedimentology of the Spiekeroog barrier island system (southern North Sea). *Senckenbergiana Maritima* 24, 1994, 117-155.
- JONSSON, I. G.: The friction factor for a current superimposed by waves. *Coastal Engr. and Hydraulic Lab. Rep. Nos. 10 and 11*, 1965.
- PARTHENIADES, E.: Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, 91(HY1), 1965.
- ROBERTS, W. R./ LE HIR, P./ WHITEHOUSE, R. J. S.: Investigation using simple mathematical models of the effect of tidal currents and waves on the profile shape of intertidal mudflats. *Cont Shelf Res* 20, 2000, 1079-1097.
- SANTAMARINA CUNEO, P./ FLEMMING, B.: Quantifying the concentration and flux of suspended particulate matter through a tidal inlet of the East Frisian Wadden Sea by acoustic Doppler current profiling. In: Flemming, B.W., Delafontaine, M.T., Liebezeit, G. (Eds.) *Muddy Coast Dy-*

namics and Resource Management, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands, 2000, pp 39-52.

SCHUBERT, M./ BLENDER, R./ FRAEDRICH, K./ LUNKEIT, F./ PERTWITZ, J.: North Atlantic cyclones in CO₂-induced warm climate simulations: frequency, intensity and tracks. *Climate Dynamics*, 14, 1998, 827-837.

STANEV, E. V./ FLÖSER, G./ WOLFF, J.-O.: Dynamical control on water exchanges between tidal basins and the open ocean. A Case Study for the East Frisian Wadden Sea. *Ocean Dynamics* 53, 2003a, 146-165.

STANEV, E. V./ WOLFF, J.-O./ BURCHARD, H./ BOLDING, K./ FLÖSER, G.: On the Circulation in the East Frisian Wadden Sea: Numerical modeling and data analysis. *Ocean Dynamics* 53, 2003b, 27-51.

The WASA Group: Changing Waves and Storms in the Northeast Atlantic?, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 79, May 1998.

Adresse

Prof. Dr. Emil Stanev (Univ. Sofia)
Gerold Brink-Spalink
Prof. Dr. Jörg-Olaf Wolff
Institut für Chemie und Biologie des Meeres
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Carl-von-Ossietzky-Straße 9-11
Postfach 2503
26111 Oldenburg
Germany

E-mail: e.Stanev@icbm.de, gerold.brink-spalink@icbm.de, wolff@icbm.de

Sturmwellenresonanz an einem Strandriff

Fritz Büsching

FH Bielefeld University of Applied Sciences

Summary

The formation of long shore bars in front of sandy beaches often is assumed to act as a shore protecting feature only. At Sylt Island/Germany, however, boundary conditions formed by a structured long shore bar, running roughly parallel to the shoreline, are found to be the reason for intense resonant absorption effects at storm surge conditions as well. Incoming waves interact with the water level deflections in the trough located between the bar and the beach in such a way that frequency components match a limited number of possible harmonics of the enclosed body of water. As there are significant energy densities to be found in the wave energy spectra at harmonic numbers 1 to 3 of the enclosed water body, this phenomenon is believed to be responsible for the tremendous coastal recessions at this island due to storm surge occurrences in the past.

The existence of resonant seiching modes is deduced from intense low frequency anomalous dispersion effects (ADE), which had been found in the 1970s .

Wave tank investigations also demonstrating the combined effect of resonance and anomalous dispersion are reported in detail. Based thereon the former field investigations, executed on Sylt Island, are analysed again. As a consequence of the kind of resonances found, extreme water level deflections are expected to occur not only at the beach face but also at the landward slope of the longshore bar. That is why a special type of protective structure, consisting of hollow concrete blocks, is suggested to be placed on top of the ridge.

Zusammenfassung

Die Formation von küstenparallelen Sandriffen wird oft ausschließlich als vorteilhaft hinsichtlich des Schutzes hinterliegender Küsten eingestuft. Vor Sylt werden jedoch derartige Randbedingungen zudem als Begründung für Resonanzen erkannt, die etwa in Analogie zur Resonanzabsorption stehen, - d.h., zu der Absorption einer Wellenstrahlung durch mikrophysikalische Systeme infolge von Resonanzerscheinungen in ihnen.

Als Resonator fungiert in diesem Falle das zwischen Sandriff und Strand befindliche Wasservolumen, das zur Ausführung unterschiedlicher Eigenschwingungen fähig ist.

Das bei Sturmfluten über das Riff kommende Wellenspektrum tritt mit den Wasserspiegelauslenkungen des partiell eingeschlossenen Wasservolumens derart in Wechselwirkung, dass eine Anzahl möglicher Eigenfrequenzen desselben getroffen wird.

Als Folge müssen an den Beckenrändern - markant am Strand und abgeschwächt am Riff - vergrößerte Wasserspiegelauslenkungen auftreten, die durch Ausbildung von schwerer Brandung zu dem bekannten verstärkten Küstenangriff führen.

Angesichts der vor Sylt gemessenen energiereichsten Brandungsspektren liegt nahe, die Rinne zwischen Riff und Strand als ausgeprägtes Resonanzgebiet anzusehen, in dem die Unterhaltung extremer Schwingbewegungen nur noch geringer äußerer Anregungsleistung bedarf.

In Modell und Natur gelingt der Nachweis der Resonanzen dadurch, dass diese – wie bei der Resonanzabsorption - jeweils mit dem Effekt anomaler Dispersion (ADE) verbunden sind.

1 Einleitung

Die Phasengeschwindigkeiten steiler und brechender Seichtwasserwellen erregten Ende der 1970er Jahre besonderes Interesse, nachdem der Verfasser das Phänomen eines markanten Effektes *anomaler* Dispersion (ADE) bei der Auswertung von Messungen von Sturmwellen an der Westküste der Insel Sylt gefunden hatte, vergl. z.B. Büsching (1978). Ein derartiges Verhalten widerspricht mit $d\epsilon/df > 0$ gänzlich der klassischen Dispersionsrelation für Schwerewellen. Andererseits ist eine *anomale Dispersion* aber u. a. bei *elektromagnetischen Wellen* durchaus als Begleiterscheinung des Resonanz-Phänomens wohlbekannt:

Beim Durchgang von elektromagnetischen Wellen durch jeden Stoff gibt es Gebiete anomaler Dispersion, die wegen der Schmalheit des sichtbaren Spektralgebietes, jedoch meist außerhalb desselben, d.h., im Infrarot (IR) bzw. Ultraviolett (UV) liegen.

Der bedeutsame Sachverhalt ist für Wasser und Luft qualitativ am besten mit dem Verhalten der komplexen Dielektrizitätszahl $\epsilon_r = \text{Re}[\epsilon] + i \cdot \text{Im}[\epsilon]$, die etwa dem Quadrat der Brechzahl n entspricht, darstellbar. In Abb. 01 sind Realteil und Imaginärteil der Dielektrizitätszahl über der Frequenz dargestellt.

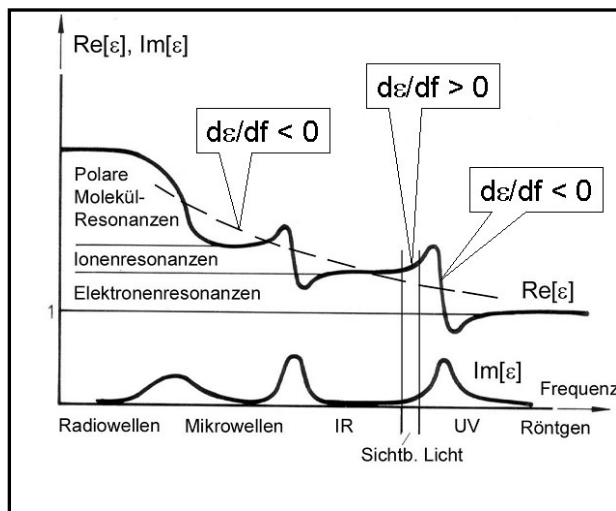


Abb. 1: Realteil und Imaginärteil der Dielektrizitätszahl ϵ für Durchgang elektromagnetischer Wellen etwa durch Wasser oder Luft als Funktionen der Frequenz.

Während der Realteil $\text{Re}[\epsilon]$ die Dispersion ($d\epsilon/df$) beschreibt, repräsentiert der Imaginärteil $\text{Im}[\epsilon]$ die Absorption. Bekanntermaßen stammt die Definition der normalen Dispersion (als normale Abfolge der Spektralfarben mit $dn/df > 0$ bzw. $d\epsilon/df > 0$) aus den Beobachtungen im relativ schmalen sichtbaren Bereich, vergl. Abb.01. Demgegenüber wird aber offenbar, dass die Dispersion *global* im Bereich zwischen langen Radiowellen und kurzwelligen Röntgenstrahlen tatsächlich *anomale* ($d\epsilon/df < 0$) ist, vergl. gestrichelte Linie. Besonders hinzuweisen ist jedoch auf die Resonanzstellen, die jeweils durch Maxima des Imaginärteiles und Oszillationen des Realteiles der Dielektrizitätszahl - also durch *starke anomale Dispersion* $d\epsilon/df < 0$ - gekennzeichnet sind. *Resonanz, Absorption und Anomale Dispersion* stellen demnach einen kombinierten Effekt dar.

Insbesondere treten starke Effekte anomaler Dispersion im IR-Bereich infolge von Ionenresonanzen und im UV-Bereich durch Elektronenresonanzen auf. Die Maxima der Absorption sind zugleich kennzeichnend für diejenigen Energien, die bei Resonanz aus der erregenden Welle von den jeweiligen Resonatoren (Ionen, Elektronen) übernommen werden.

Bei der Analyse von Wellenmessungen des Verfassers in Modell und Natur hat sich eine analoge Zuordnung solcher Phänomene auch für Schwerewellen herausgestellt. Dabei fungiert als Resonator in beiden Fällen jeweils ein abgrenzbares Wasservolumen, das zur Ausführung unterschiedlicher Eigenschwingungen (resonanter Beckenschwingungen) fähig ist.

Wegen des begrenzten Raumes können die Ergebnisse der betreffenden Analysen hier nur zusammenfassend dargestellt werden. Insbesondere wird hinsichtlich der Diskusion der erhaltenen Ergebnisse und möglicher Beeinflussung der Resonanz durch Bauwerke auf Veröffentlichungen des Verfassers in 2003 verwiesen.

2 Modelluntersuchungen im Wellenkanal der Fachhochschule Bielefeld

In den 1990er Jahren ist in einer Vielzahl von Modelluntersuchungen im Wellenkanal der FH Bielefeld die besondere hydraulische Wirksamkeit so genannter Hohldeckwerke (patentierte durchströmbarere Böschungsdeckwerke) im Modellmaßstabe 1:5 nachgewiesen worden. Hierfür wurde im Sinne einer vergleichenden Beurteilung eine Konfiguration mit *glatter* geneigter Vergleichs-Böschungsoberfläche als Referenzrandbedingung verwendet, wie etwa in Abb.02 für eine Böschungsneigung 1:m = 1:3 dargestellt.

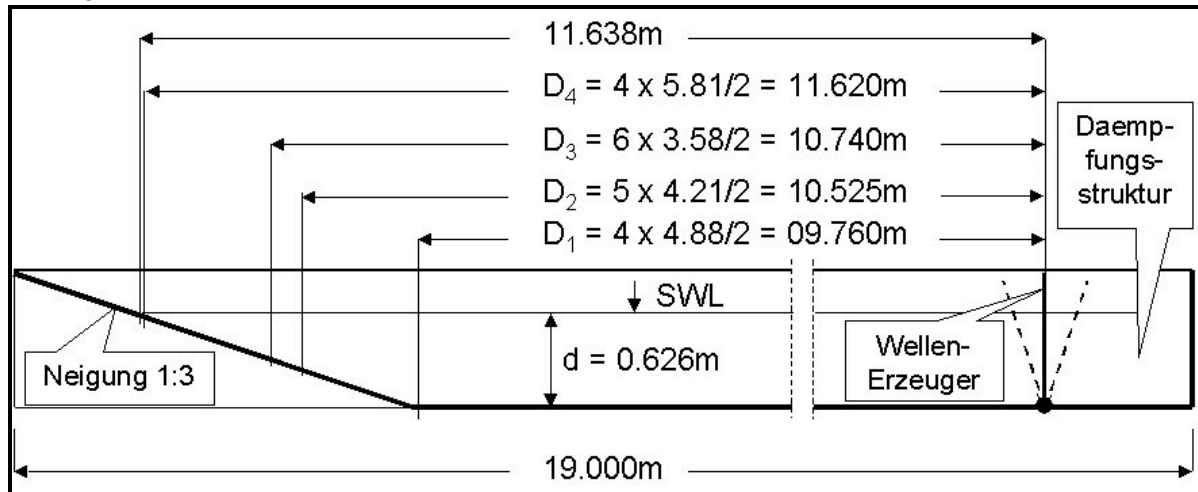


Abb. 2: Wellenkanal der FH Bielefeld schematisch und unmaßstäblich.
 (Unterschiedliche Böschungsentfernungen D_i bezüglich des Klappendrehlagers)

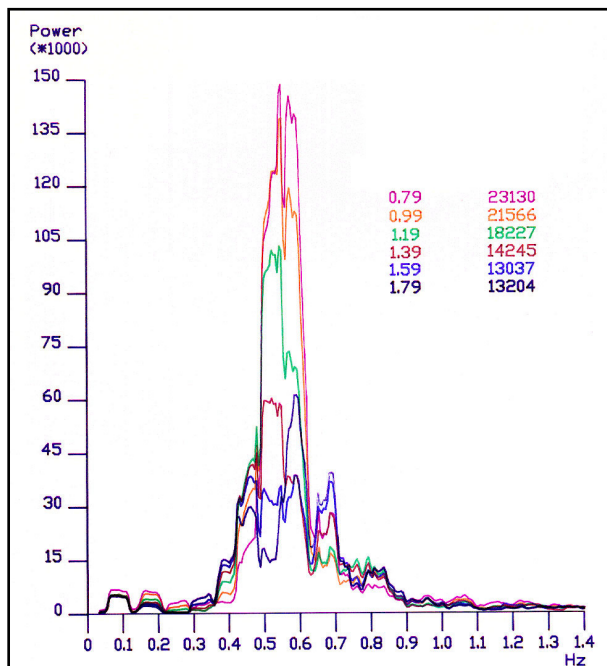


Abb. 3: Synchron vor der Böschung gemessene Energiedichte-Spektren der vertikalen Wasserspiegelauslenkungen.

In dieser Vergleichskonfiguration beziehen sich die in Rede stehenden Untersuchungen auf die Beobachtung hochenergetischer *Beckenschwingungen* (mit Wellenhöhen um etwa $H = 0,3\text{m}$), für deren gewünschtes Auftreten im Sinne hoher Böschungsbelastungen auf Maßnahmen zur Kompensation der Re-Reflexion von der Wellenklappe verzichtet worden war, - wohl wissend, damit von den Randbedingungen normal von See anlaufender Wellen abzuweichen.

Des Weiteren abweichend von üblichen Methoden für die Erfassung des frequenz-abhängigen Reflexionsphänomens waren hier an einer *Vielzahl* von *Messpositionen* (90 Stationen mit Abständen von jeweils 10cm) für die Synchronmessungen der Wasserspiegelauslenkungen im Wellenfeld seewärts der Böschung Pegel installiert. Deren zeitabhängige analoge Signale wurden zunächst der Fouriertransformation unterzogen, um u. a. für Aussagen bezüglich des Energiegehaltes definierter Frequenzbänder verwendet zu werden. Die gemessenen bzw. berechneten Energiedichte-Spektren repräsentieren dabei an jeder Pegelposition die überlagerten vertikalen

Wasserspiegelauslenkungen (Quadratwerte) der von der Wellenklappe kommenden, der von der Böschung reflektierten und der von der Wellenklappe wiederum re-reflektierten Wellen (composite energy spectra).

Abb. 03 enthält beispielhaft für den Bereich vom Böschungsfuß (Station 1,79m) bis etwa in die Zone maximaler Brecherinstabilität (Station 1,19m bis 0,79m) sechs derartige übereinander dargestellte Spektren der Wasserspiegelauslenkungen oberhalb der Böschung.

Als von der Klappenwellenmaschine erzeugtes Steuerspektrum (input spectrum) wurde dabei ein solches verwendet, das nach Umrechnung auf den Naturmaßstab denjenigen ähnelt, die vom Verfasser nahe der Brecherzone der Insel Sylt gemessen worden waren, vergl. Büsching (1975, 1976). Dementsprechend war der wesentliche Anteil der Energiedichte im Modellspektrum etwa im Frequenzbereich $0,48 \text{ Hz} \leq f \leq 0,62 \text{ Hz}$ konzentriert.

Die vom Spektrum jeweils eingeschlossene Fläche (IA = integrated spectrum area) ist der resultierenden Wellenenergie proportional.

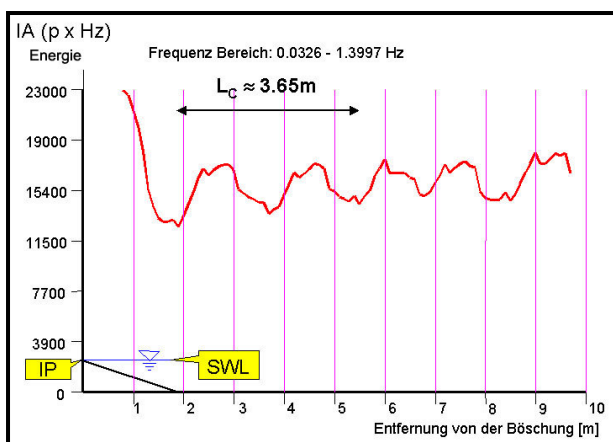


Abb. 4: Integralwerte der spektralen Energie im Gesamtfrequenzband $0,03 \leq f \leq 1,4 \text{ Hz}$ dokumentieren die Existenz einer partiellen Clapotis vor einer Böschung 1:m = 1:3.

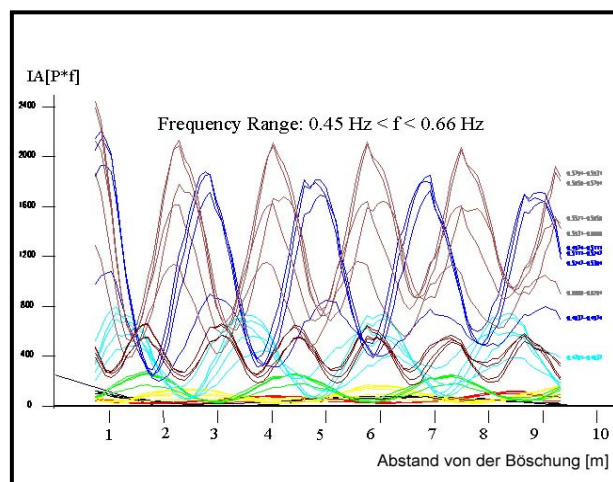


Abb. 5: Vielzahl von Energielinien für vergrößerte Frequenzintervalle im Frequenzbereich $0,45 \text{ Hz} \leq f \leq 0,66 \text{ Hz}$

Die folgenden drei Diagramme zeigen solche Energiewerte bezüglich unterschiedlicher Frequenzbänder - aufgetragen über der Pegelentfernung von der Böschung.

Als Bezugspunkt ist im unteren Teil der Abb.04 der Durchstoßpunkt des Ruhewasserspiegels (SLW) durch die Böschungsoberfläche mit IP bezeichnet. Im oberen Teil der Abb.04 ist durch die Abfolge von Energiemaxima und Energieminima für den insgesamt analysierten Frequenzbereich $0,0326 \text{ Hz} \leq f \leq 1,3997 \text{ Hz}$

deutlich die Existenz einer partiellen Clapotis belegt. Ihre Länge kann etwa als Distanz zwischen dem ersten und dem dritten Energieminimum zu ca. $L_c = 3,65 \text{ m}$ abgegriffen werden. Wenn diese experimentelle Funktion auch einige Abweichungen von einer theoretisch als glatt vermuteten Gestalt aufweist, wird nachfolgend doch deutlich werden, dass hieraus sehr wohl wichtige Schlussfolgerungen gezogen werden können, insbesondere wenn die Energie von Teilfrequenzbändern untersucht wird und das Signalrauschen unberücksichtigt bleibt. Aus Gründen mangelhafter zeichnerischer Wiedergabemöglichkeit ist hier auf eine der Abb.04 entsprechende Darstellung für alle Frequenzkomponenten separat (mit dem Frequenzpunktabstand $\Delta f = 0,00543 \text{ Hz}$) verzichtet worden.

Das dort vorzufindende Phänomen wird aber auch in Abb.05 noch hinreichend deutlich, wo Energielinien für vergrößerte Frequenzintervalle ($n \cdot \Delta f$) und einen eingegengten Frequenzbereich

0,45Hz ≤ f ≤ 0,66 Hz ermittelt worden sind.

Deutlich erkennbar ist hier, dass es Energielinien gibt, deren horizontale Extremwertabstände und Phasenwinkel mit denjenigen anderer Energielinien etwa annähernd übereinstimmen.

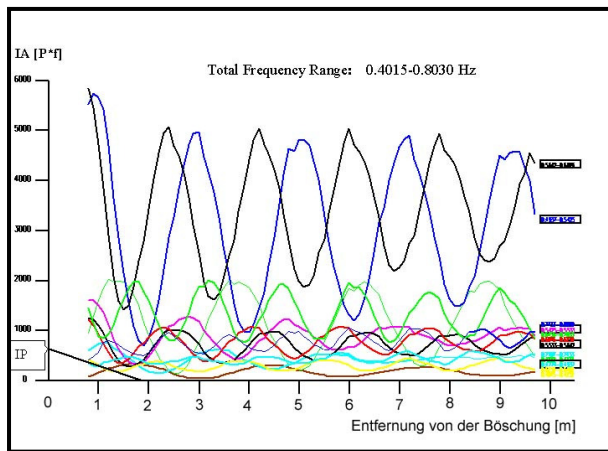


Abb. 6: 12 Energielinien abgrenzbarer partiell stehender Teilwellen (Partialwellen)

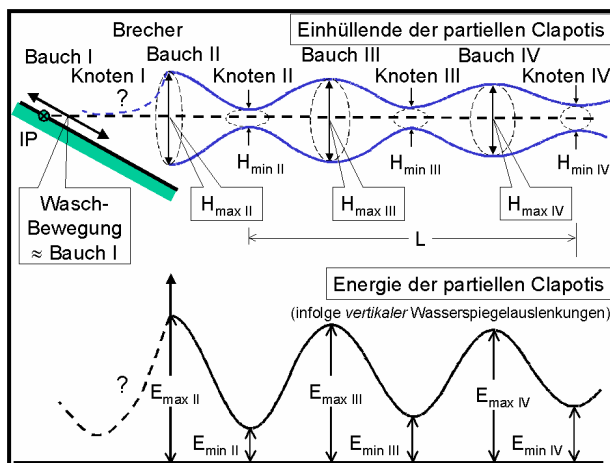


Abb. 7: Schematische Darstellung partiell stehender Wellen an einer Böschung;
 oben: Einhüllende der Wasserspiegelauslenkungen,
 unten: Energieverteilung (infolge vertikaler Wasserspiegelauslenkungen)

Hauptachsen mit der Entfernung von der Böschung anwachsen.

Hier ist jedoch die Tatsache von besonderer Bedeutung, dass die Frequenzkomponenten der Partialwellen wegen ihrer nahezu gleichen Längen in den betreffenden Teilfrequenzbändern dem Gesetz einer anomalen Dispersion unterliegen müssen, da die Phasengeschwindigkeit gemäß $c = L \cdot f$ bei konstanter Wassertiefe mit der Frequenz zunimmt ($dc/df > 0$).

Im oberen Teil der Abb.08 sind die aus den oben genannten 82 Energielinien bestimmten Längen über der Frequenz als $L(AD)(f)$ bezeichnet (AD = anomale Dispersion), während die gestrichelt eingetragene Funktion $L(ND)(f)$ die entsprechend der klassischen Dispersionsrelation für die Kanalwassertiefe $d = 0,626m$ (gemäß normaler Dispersion, ND ($dc/df < 0$)) berechneten theoretischen Werte angibt. Beide Funktionen können demnach auch als „Längenspektren“ bezeichnet werden.

Für den vorliegenden Fall sind die Messungen von Bleses u. Stühmeyer (1991) und die zugehörigen Berechnungen zur Datenreduzierung von Hagemeyer u. Kramer (1992) vorgenommen worden. Als Ergebnis konnten für den Frequenzbereich $0,4015Hz \leq f \leq 0,8030 Hz$ 82 diskrete Energielinien ermittelt werden, die bezüglich der Übereinstimmung ihrer Extremwertabstände und Phasenwinkel 12 abgrenzbaren Teilfrequenzbereichen zugeordnet werden konnten, vergl. Abb.06. Demnach kann die oben durch Abb.04 dokumentierte partielle Clapotis etwa auch als Resultierende aus der Überlagerung eines Satzes von 12 solcher gleichzeitig im Wellenkanal existierender partieller Clapotiswellen begriffen werden. Zur Unterscheidung der resultierenden partiellen Clapotis von ihren hier definierten Komponenten werden letztere im Folgenden kurz als „Partialwellen“ bezeichnet. Die generellen Eigenschaften partieller Clapotiswellen bzw. Partialwellen können etwa, wie in Abb.07 dargestellt, aus der gemessenen Energieverteilung über der Wellenlänge abgeleitet werden:

Die Teilchenbewegungen für die Phasen der Clapotis-Bäuche können demnach durch Ellipsen mit größerer vertikaler Hauptachse und für die Phasen der Knoten durch Ellipsen mit größeren horizontalen Hauptachsen genähert werden. Die sich allgemein mit der Entfernung von der Böschung verändernden Reflexionswirkungen spiegeln sich offenbar in der Verkürzung der genannten größeren Hauptachsen wieder, während die kleineren

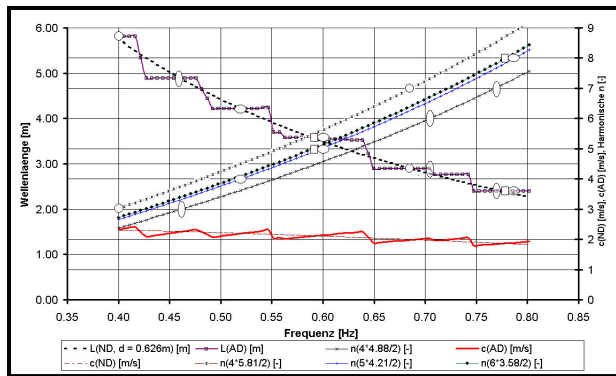


Abb. 8: Komponenten-Längen, Phasengeschwindigkeiten und Ordnungszahlen der Beckenschwingungen in Abhängigkeit von der Frequenz

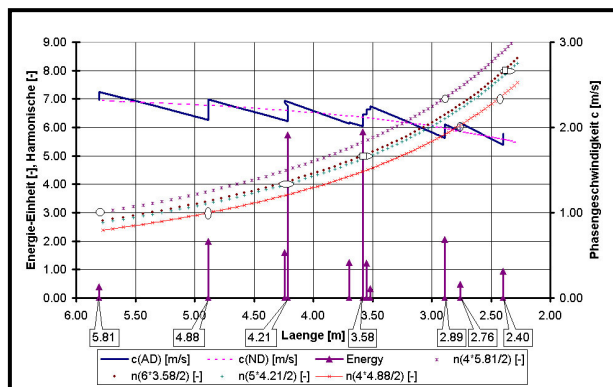


Abb. 9: Phasengeschwindigkeiten, Ordnungszahlen der Beckenschwingungen und Energiedichten in Abhängigkeit von der Wellenlänge.

Deutlich ist erkennbar, dass die Partialwellen im Wellenkanal als Oberschwingungen mit Ordnungszahlen $3 \leq n \leq 8$ aufgetreten sind. Dabei kann die Tatsache, dass mehrere (durch gleiche Signaturen gekennzeichnete) Harmonische offenbar mit derselben Grundfrequenz verknüpft sind, als weiteres Indiz dafür angesehen werden, dass es sich tatsächlich um Eigenschwingformen handelt, die infolge aufgetretener Resonanz besonders hervortreten.

Als eigentliche „Resonanzgebiete“ können dabei die Frequenzbereiche angesehen werden, in denen die Komponentenlängen annähernd gleich sind und demzufolge aus deren Überlagerung maximale Wasserspiegelauslenkungen resultieren. In diesen Bereichen ist die Dispersion mit $dc/df > 0$ eindeutig anomal, während in den dazwischen liegenden Bereichen jeweils die normale Dispersion mit $dc/df < 0$ stärker ausgeprägt ist, als diejenige, die entsprechend der klassischen Dispersionsrelation berechnet werden kann, vergl. $c(ND)(f)$.

Um auch den Zusammenhang der Dispersion mit den Energiewerten der Partialwellen herzustellen, sind in Abb.09 die Phasengeschwindigkeiten und Ordnungszahlen der Beckenschwingungen zusammen mit den Energiedichtewerten der Partialwellen über den Wellenlängen aufgetragen.

Die entsprechenden Darstellungen für die Phasengeschwindigkeiten $c(AD)(f)$ und $c(ND)(f)$ (Spektren der Phasengeschwindigkeiten) sind im unteren Teil der Abbildung dargestellt.

Da - wegen der näherungsweise abgestuften Struktur der Funktion $L(AD)(f)$ - nahe liegt, die genannten 12 Partialwellen als Eigenschwingformen der im Kanal enthaltenen Wassermasse anzusehen, wurde untersucht, wie weit die Randbedingungen der geneigten Böschung mit Oberschwingungen vereinbar sind. Die ermittelten Ordnungszahlen der sich überlagernden Beckenschwingungen sind ebenfalls Abb.08 zu entnehmen. Da für die hier vorliegenden Randbedingungen (der geneigten Böschung auf der einen Seite und der um den Gelenkpunkt schwingenden Wellenklappe auf der anderen Seite, zunächst keine bestimmte Entfernung D (repräsentative Kanallänge) angegeben werden kann, wurden hierfür die in der Grafik der Abb.02 bezeichneten Vielfachen der Halbwellenlängen der vier dominanten längsten Partialwellenlängen (5,81m; 4,88m; 4,21m und 3,58m) zusammen mit den theoretischen Phasengeschwindigkeiten $c(f)$ eingesetzt, vergl. auch Legende der Abb.08; Näheres vergl. Büsching (2003).

Es sind in der Grafik also vier verschiedene Funktionen $n_i(f)$ enthalten, für die jeweils die Entfernung D_i mit der Distanz des Klappengelenkpunktes von einem jeweils anderen Punkt auf der geneigten Böschung übereinstimmt.

(Zum besseren Vergleich mit der Darstellung über der Frequenzachse (Abb.08) ist hier die horizontale Längsachse seitenverkehrt dargestellt.)

Nach Transformation auf die Längsachse stellt sich demnach das Dispersionsverhalten in Abb.09 wie folgt dar:

Die Bereiche normaler Dispersion sind durch Differentialquotienten $dc/dL > 0$ zu identifizieren, wohingegen die o. a. „Resonanzgebiete“ in dieser Darstellung lediglich als *näherungsweise konstante* „Resonanzwellenlängen“ erscheinen, denen die Energiedichtewerte der Partialwellen zuzuordnen sind. Dementsprechend treten die Bereiche anomaler Dispersion in der Funktion $c(AD)(L)$ nicht mit $dc/dL < 0$ sondern gar mit dem Grenzwert $dc/dL \rightarrow -\infty$ als Sprünge in Erscheinung. Damit sind die Resonanzgebiete hier ebenso markant erkennbar, wie in Abb.01 für elektromagnetische Wellen.

3 Sturmwellenspektren an der Westseite der Insel Sylt

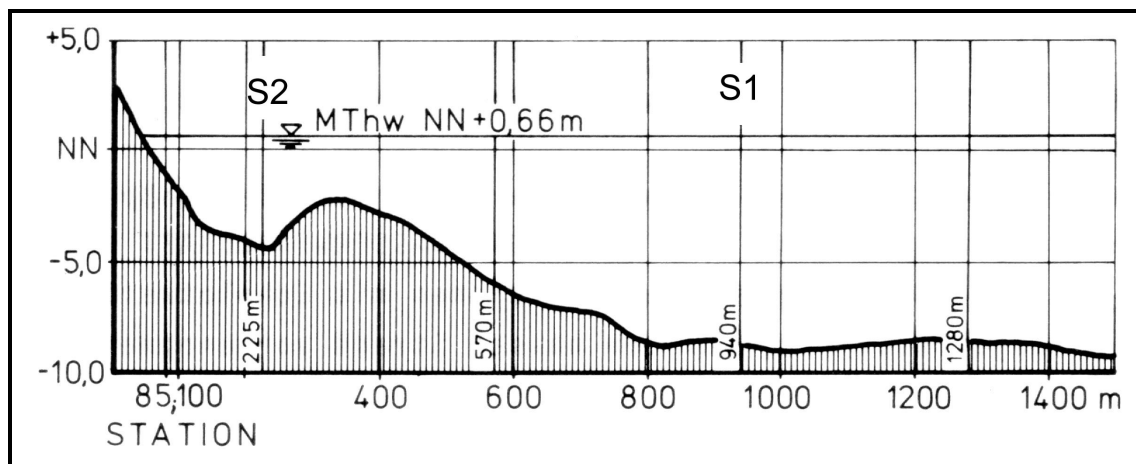


Abb. 10: Messprofil Westerland/Sylt, 1973. Küstennahe Wellenmessstationen S1 bei 940m und S2 bei 225m sowie Messstationen am Strand bei 100m und 85m.

Auf das Phänomen eines markanten Effektes anomaler Dispersion (ADE) war der Verfasser bereits in den 1970er Jahren gestoßen, und zwar im Zusammenhang mit der Analyse der im küstennormalen Messprofil der Abb.10 an den Positionen 100m und 85m synchron aufgenommenen Wasserspiegelauslenkungen $\eta_{100}(t)$ und $\eta_{85}(t)$. Im Wesentlichen war auf der Grundlage der Phaseninformation $\varphi_{xy}(f)$ der Übertragungsfunktion (zwischen den Pegelsignalen) seinerzeit das Spektrum der Phasengeschwindigkeit wie folgt definiert worden (Büsching, 1978)

$$c(f) = \frac{\overline{xy}}{\varphi_{xy}(f)/2 \cdot \pi \cdot f}$$

Hierin bedeuten \overline{xy} die Entfernung zwischen den Messstationen x und y im küstennormalen Messprofil und $\varphi_{xy}(f)$ die Phasendifferenz zwischen den Fourier - Komponenten der Frequenzen f_i an diesen Stationen.

Die erneute Befassung mit diesen Messungen ist dadurch veranlasst, dass die in Abb.10 dargestellte Rinne zwischen Sandriff und Strand ebenfalls als (partiell) geschlossene Beckenkonfiguration angesehen werden kann.

Da die oben bezüglich der Modelluntersuchungen dargestellten Erscheinungsformen anomaler Dispersion bei Beckenschwingungen auf die markanten Abweichungen im Wellenlängenspektrum zurückzuführen waren, wird nunmehr das *Wellenlängenspektrum* nachfolgend auch für die Naturuntersuchungen in den Mittelpunkt der aktuellen Betrachtung gestellt.

Dieses kann aus dem anomalen Phasengeschwindigkeitsspektrum ($dc/df > 0$) wie folgt hergeleitet werden:

$$c(f) = L \cdot f = \frac{\overline{xy}}{\varphi_{xy}(f)/2 \cdot \pi \cdot f}$$

$$L(f) = \frac{\overline{xy}}{\varphi_{xy}(f)/2 \cdot \pi}$$

Da ein Vergleich mit den Ergebnissen der Modelluntersuchungen nur zulässig ist, wenn hinreichend vergleichbare Randbedingungen existieren, wurden nur die 5 (von 16) Messperioden mit Wassertiefen $d \geq 3,6m$ für die betreffende Untersuchung ausgewählt. Insbesondere ist damit sichergestellt, dass auch bei den Naturmessungen die partielle Reflexion als dominierendes Phänomen gegenüber den Mechanismen des Wellenbrechens oder gar der Waschbewegung ausbrandender Wellen (Wellenauf- lauf – Wellenrücklauf) in den Spektren erfasst ist. Beispielhaft sind alle Spektralfunktionen der Messung Nr.04 vom 13.12.1973, 17.00 Uhr in den Abb.11, Abb.12 und Abb.13 vergleichend untereinander dargestellt.

Abb.11 enthält die beiden energiereichen Energiespektren mit maximalen Energiedichten bzw. signifikanten Wellenhöhen in Höhe von

$$\max E_{fp,100} = 3,57m^2 / Hz \quad \text{bzw.} \quad H_{S,100} = H_{mo,100} = 2,52m \quad \text{und}$$

$$\max E_{fp,085} = 3,30m^2 / Hz \quad \text{bzw.} \quad H_{S,085} = H_{mo,085} = 2,31m .$$

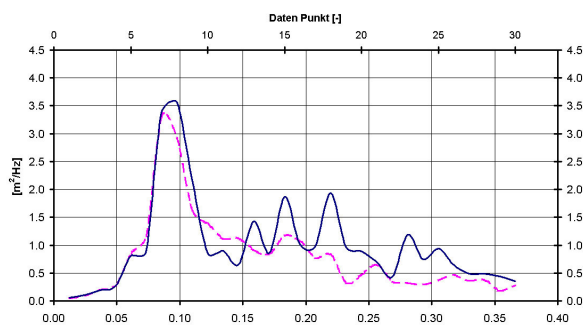


Abb. 11: Energiedichte-Spektren von Sturmwellen an den Stationen 100m und 85m im Messprofil der Abb.10.

Es ist hinreichend deutlich, dass die Energie von Station 100m bis Station 85m über den Bereich höherer Energiedichte abnimmt, und damit Resonanzen zumindest aus Ausbrandungsprozessen keine nennenswerte Rolle gespielt haben.

In Abb.12 sind jeweils sowohl die klassischen als auch die auf der Grundlage der Übertragungsfunktion (Phase) berechneten Spektren der Phasengeschwindigkeit $c(f)$ und der Wellenlänge $L(f)$ zusammen mit der Kohärenzfunktion $\gamma_{xy}^{-2}(f)$ (10-fache Werte) dargestellt.

In Anbetracht der in Böen mit $U > 30m/s$ zur Messzeit aufgetretenen Orkanwindstärken aus WSW Richtungen (Büsching, 1974) können die für den Frequenzbereich $0,03Hz \leq f \leq 0,2Hz$ angegebenen Kohärenzwerte durchaus als erstaunlich hoch eingestuft werden. Deshalb ist der Verfasser überzeugt, dass die in diesem Bereich besonders ausgeprägten Effekte anomaler Dispersion (der Funktion $c(AD)(f)$) nicht etwa allein als *nichtlineare Effekte* erklärt werden können.

Im Gegensatz zur klassischen Dispersionsrelation $c(ND)(f)$, die mit $dc/df \leq 0$ eine normale Dispersion beschreibt, ist diese *global* gerade deutlich durch *entgegen gesetztes Vorzeichen* gekennzeichnet.

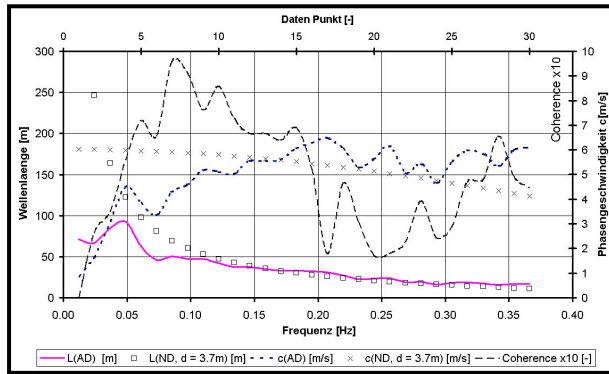


Abb. 12: Spektren der Phasengeschwindigkeit $c(f)$, der Längen $L(f)$ der Wellenkomponenten und der Kohärenz $\gamma_{xy}^{-2}(f)$

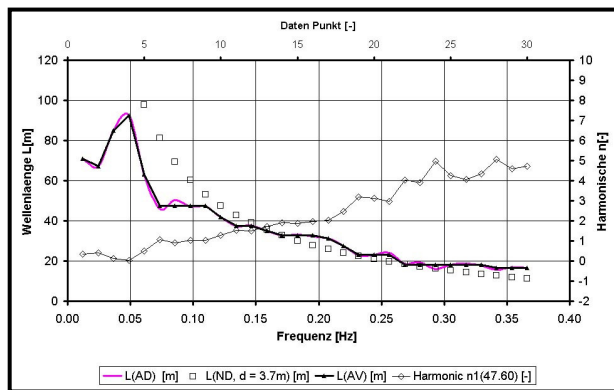


Abb. 13: Vergrößert dargestellte Spektren der Längen $L(f)$ zusammen mit Ordnungszahlen $n(f)$ der Beckenschwingungen.

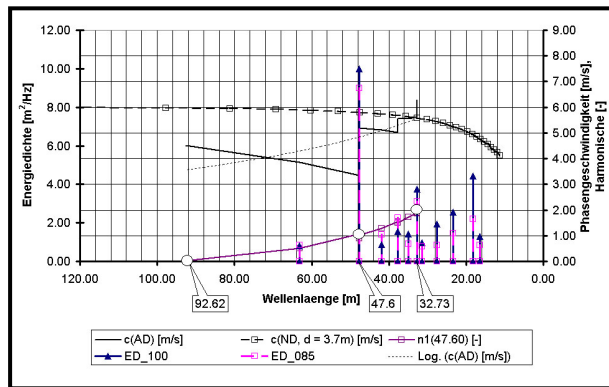


Abb. 14: Phasengeschwindigkeiten $c(ND)(L)$ und $c(AD)(L)$, Ordnungszahlen $n(L)$ der Beckenschwingungen sowie Linienspektren der Energiedichte $ED(L)$.

Hinsichtlich des gemäß klassischer Dispersionsrelation berechneten Wellenlängenspektrums $L(ND)(f)$ ist festzustellen, dass mit zunehmender Annäherung $f \rightarrow 0$ geradezu absurd große Wellenlängen erhalten werden. Demgegenüber liegen die betreffenden Werte des anomalen Wellenlängenspektrums $L(AD)(f)$ im Bereich der tatsächlichen Beobachtungen, vergl. FÜHRBÖTER (1974), BÜSCHING (1978, 1979).

Für eine weitergehende Analyse insbesondere der Funktion $L(AD)(f)$ sind in Abb.13 beide Wellenlängenspektren vergrößert dargestellt. Hier wird deutlich, dass die Oszillationen im Phasengeschwindigkeitsspektrum $c(AD)(f)$ tatsächlich auch zu einem näherungsweise stufigen Verlauf im zugehörigen Wellenlängenspektrum $L(AD)(f)$ führen. Zur Verdeutlichung dieser Erscheinung ist zusätzlich die Funktion $L(AV)(f)$ eingetragen, die über unterschiedliche Anzahlen benachbarter Frequenzpunkte gemittelte Komponentenlängen angibt. Somit wird also ein Ergebnis erhalten, das demjenigen der oben behandelten Modelluntersuchungen ähnelt. Dass es sich hierbei nicht um eine einmalige zufällige Erscheinung handelt, ist durch die erwähnten 4 weiteren gleichartigen Messungen belegt. Darüber hinaus ist das Phänomen auch in allen 11 übrigen Messungen (mit kleineren Wassertiefen und anderen Seegangintensitäten) erkennbar. Weiterhin ist in Abb.13 die Funktion $n1(f)$ eingetragen. Hierfür wurde der Mittelwert $L(AV) = 47,60\text{m}$ (etwa bei $f = 0,09\text{ Hz}$) als erste Harmonische im Bereich des spektralen Peaks vorausgesetzt. Der Verlauf der Kurve lässt dann auf die Existenz weiterer Oberschwingungen schließen, etwa die zweite Oberschwingung bei etwa $f = 0,18\text{ Hz}$ und die dritte Oberschwingung bei etwa $f = 0,24\text{ Hz}$. Da die Phasengeschwindigkeit von der Frequenz abhängt, ist klar, dass die Frequenzen der höheren Harmonischen nicht genau mit den ganz-zahligen Vielfachen der Grundfrequenz übereinstimmen.

Wenn auch die Kohärenz für den vierten Frequenzpunkt $f = 0,049\text{ Hz}$ nur bei etwa 0,6 liegt, besteht doch hinreichende Wahrscheinlichkeit,

dass auch die Grundschwingungsform mit einer Länge von etwa 93m, vergl. Maxima in Abb.12 und Abb.13, in der Rinne zwischen Sandriff und Strand präsent ist.

In Analogie zu Abb.08 (Untersuchungen im Wellenkanal) wurden auch die Spektren der Phasengeschwindigkeit $c(ND)(f)$ und $c(AD)(f)$ (Abb.12) in Spektren $c(ND)(L)$ bzw. $c(AD)(L)$ transformiert, vergl. Funktionen im oberen Teil von Abb.14. Für $c(AD)(L)$ wurde dabei nur der Frequenzbereich $0,05Hz \leq f \leq 0,18Hz$ berücksichtigt, in dem die Kohärenz im Mittel bei etwa $\overline{\gamma}_{xy}^{-2} = 0,8$ lag. Erwartungsgemäß treten auch hier im Spektrum $c(AD)(L)$ Sprünge mit $dc/dL \rightarrow -\infty$ (AD) auf, die die Präsenz von Oberschwingungen markieren. Deren Ordnungszahlen $n1(L)$ sind im unteren Teil der Abbildung dargestellt. Im Gegensatz zu den Modelluntersuchungen treten im Vergleich mit $c(ND, d=3,7m)$ aber nur unter- und oberhalb der ersten Harmonischen zuzuordnenden Resonanzstelle stärkere Neigungen $dc/dL > 0$ (ND) auf, während im Gesamttrend $dc/dL < 0$, d.h., anomale Dispersion herrscht. Wegen des eingeschränkten Frequenzbereiches ($\overline{\gamma}_{xy}^{-2} = 0,8$) sind hier nur die erste und die zweite Harmonische sowie die Grundschwingung durch eine Signatur gekennzeichnet.

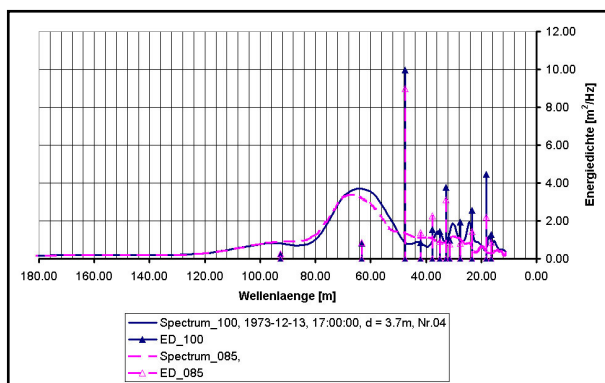


Abb. 15: Auf die Längenachse transformierte Energiedichte-Spektren sowie Linienspektren der Energiedichte $ED(L)$, berechnet auf der Grundlage des anomalen Längenspektrums $L(AD)(f)$.

Schließlich sind in Abb.14 und Abb.15 noch die Linienspektren der Energiedichte für diskrete Wellenlängen bezüglich der Messstationen 100m und 085m enthalten. Diese wurden dadurch gebildet, dass die Werte der Energiedichte für die Frequenzkomponenten mit (annähernd) gleicher Wellenlänge jeweils aufsummiert worden sind. Für die Messstation 100m ist der maximalen Energiedichte in Höhe von etwa $max-ED(L) = 10m^2/Hz$ demnach etwa eine Wellenlänge $L(AD) = 47,6m$ zuzuordnen. Im Gegensatz dazu ist im Frequenzspektrum etwa ein Wert von $maxEP(f) = 3,6m^2/Hz$ vorhanden, für den bei normaler Dispersion etwa eine zugehörige Wellenlänge von $LP(ND) = 63m$ berechnet werden kann, vergl. Abb.15.

4 Literatur

BÜSCHING, F.: Anomalous Dispersion of Surface Gravity Waves, Proc. 15th International Conference on Coastal Engineering, Honolulu, Hawaii USA, 1978 pp. 539-559.

BÜSCHING, F.: Storm Wave Resonance Controlled by Hollow Block Structures, COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka, 2003 paper no. 90, pp 1-20.

BÜSCHING, F.: Sturmwellen-Resonanz an der Westküste der Insel Sylt, Die Küste H. 67, S. 51–82, 2003.

Adresse

Prof. Dr.-Ing. Fritz Büsching
Dießelhorststr. 01
38116 Braunschweig
Tel. +49 531 2512004
Germany
E-mail: buesching@hollow-cubes.de

Hydro- und Morphodynamische Simulation unter Berücksichtigung ökologischer Modellkomponenten

Peter Milbradt und Tino Schonert

Institut für Bauinformatik (Universität Hannover)

Summary

In future, ecological considerations will play a major role in numerical simulations of coastal waters and rivers. On the one hand the hydrodynamic conditions represent an important effect to the growth of organisms, on the other hand the natural cover affects the hydro- and morphodynamic. Especially the sensitivity of the watersubsurface to erosion is primary influenced by the existence of animals and seaweeds.

In this article a discrete ecological model based on a cellular automaton, which simulates the growth of the seaweeds in coastal areas in relation to different hydrodynamic parameters and densities of algae and snails, is introduced. The hydrodynamic values are calculated with a stabilised finite element flow model. Possible transfer strategies, which allow a direct coupling between these different model paradigms, are presented. Main effects and possible influences to a changed hydro- and morphodynamic are shown on first academically studies.

Zusammenfassung

In Zukunft werden bei der numerischen Simulation von Gewässersystemen vermehrt ökologische Betrachtungen eine wesentliche Rolle spielen. Auf der einen Seite stellen die hydrodynamischen Gegebenheiten eine wesentliche Randbedingung für das Wachstum von Organismen dar, auf der anderen Seite beeinflusst der Bewuchs auch die Hydro- und Morphodynamik. Insbesondere die Anfälligkeit von Gewässeruntergründen gegenüber Erosionserscheinungen wird wesentlich durch das Vorhandensein von Lebewesen und Seegräsern beeinflusst.

Es wird ein diskretes ökologisches Modell auf der Grundlage eines Zellularen Automaten vorgestellt, welches in Abhängigkeit unterschiedlicher hydrodynamischer Zustandsvariablen und Populationsdichten von Mikroalgen und Watschnecken das Seegraswachstum im Küstennahbereich simuliert. Die genutzten hydrodynamischen Zustandsgrößen werden mit einem tiefenintegrierten Strömungsmodell auf der Basis stabilisierter Finiten Elemente berechnet. Mögliche Übertragungsstrategien, die eine direkte Kopplung dieser unterschiedlichen Modellparadigmen erlauben, werden im Beitrag vorgestellt. An ersten akademischen Modelluntersuchungen werden wesentliche Effekte aufgezeigt und mögliche Einflüsse auf eine veränderte Hydro- und Morphodynamik dargestellt.

1 Einleitung

Bei der Lösung von Ingenieurproblemen treten verstärkt ökologische Aspekte in den Vordergrund. Neben Naturbeobachtungen (Monitoring) werden heute immer stärker auch Simulationsmodelle zur Beantwortung ökologischer Fragestellungen herangezogen. Die Simulation der Entwicklung biotischer und abiotischer Zustandsgrößen von Gewässersystemen ermöglicht Abschätzungen und Aussagen bezüglich der Veränderung bestehender Systeme u.a. durch menschliche Eingriffe.

Während für die Beschreibung der nichtbiologischen Zustandsgrößen der Gewässer in der Vergangenheit eine Vielzahl von numerischen Simulationsmodellen entwickelt worden sind, lässt sich die Ent-

wicklung der in den Gewässern lebenden Organismen wesentlich schwieriger beschreiben. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass es sich um individuelle Lebewesen handelt, die teilweise in Nahrungsbeziehung zueinander stehen. Ökologische Systeme werden „klassisch“ meist durch kontinuierliche Modelle beschrieben. Typische Vertreter sind Wachstumsmodelle mit und ohne Rückkopplung. Die klassischen Gleichungen der biologischen Ökologie beschreiben das Wachstum einer Beutepopulation x und ihrer Räuber y über die kontinuierlichen Volterra-Lotka Gleichungen [Ri85]. Diese einfachen mathematischen Modelle führen schon zu ersten qualitativen und quantitativen Abschätzungen möglicher Populationsentwicklungen. Diese Klasse von Modellen auf der Basis gewöhnlicher Differential- bzw. Differenzgleichungen setzt stets die räumliche Homogenität der Systementwicklung voraus. Vernachlässigt werden die räumliche Verteilung der jeweiligen Populationen, ihrer Lebensgrundlagen und Feinde in ihrem Territorium. Die Erweiterung um solche Ortsabhängigkeiten kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. In Anlehnung an Strömungs-, Diffusions- und Konvektionsprobleme in der Physik wird der Versuch unternommen, ähnliche Formulierungen in der Ökosystemmodellierung zu verwenden [Fi95]. Die Formulierung partieller Differentialgleichungen zur Beschreibung der örtlichen und zeitlichen Entwicklung in Ökosystemen setzt ein umfassendes Verständnis der ablaufenden Prozesse voraus und die Möglichkeit, diese mathematisch zu formalisieren.

Für die Untersuchung und Beschreibung zeitlich und örtlich veränderlicher Entwicklungsprozesse haben sich in den letzten Jahren besonders Zellulare Automaten als geeignetes Simulationswerkzeug erwiesen.

2 Zellulare Automaten

Zellulare Automaten werden erfolgreich in unterschiedlichen Teilgebieten der Ökosystemforschung eingesetzt und weiter entwickelt [GS95],[CMM02]. Gründe hierfür sind ihr einfacher Aufbau als reines diskretes Modellparadigma, die Möglichkeit intuitiv Entwicklungsregeln festzulegen und nicht zuletzt die Möglichkeit, einzelne Individuen betrachten und beschreiben zu können. Ein Zellularer Automat ist ein vollkommen diskretes Berechnungsmodell, das sich durch die wiederholte Anwendung einfacher deterministischer Regeln entwickelt [GS95].

Ein Zellularer Automat kann beschrieben werden durch ein 4-Tupel (L, Z, N, δ) , bestehend aus

- einem regulären Gitter L
- einer endlichen Zustandsmenge Z
- einer Nachbarschaftsrelation $N \subseteq L^n$
- und einer Zustandsübergangsfunktion $\delta: Z^n \rightarrow Z$.

Das reguläre Gitter L , welches in gleich große und gleichartige Zellen aufgeteilt ist, repräsentiert das durch den Zellularen Automaten beschriebene Gebiet Ω . Die Gittergeometrie wird bestimmt durch die Dimension und die geometrische Grundform der einzelnen Zellen. Für die Diskretisierung eines zweidimensionalen Gebietes sind Dreiecke, Vierecke oder Sechsecke denkbar.

Jede Zelle des Zellularen Automaten befindet sich zu jedem Zeitpunkt in einem bestimmten Zustand $z \in Z$. Mögliche Zustände der Zellen sind durch die endliche Zustandsmenge Z festgelegt.

Die Nachbarschaftsrelation wird entscheidend von der zugrunde liegenden Zellstruktur bestimmt. Denn in Abhängigkeit der Form sind unterschiedliche Zellen zueinander benachbart. Grundsätzlich wird zwischen der *von-Neumann-Nachbarschaft* und der *Moore-Nachbarschaft* unterschieden.

In der von-Neumann-Nachbarschaft werden nur solche Zellen als benachbart betrachtet, die eine gemeinsame Kante besitzen. Werden zusätzlich die Zellen mit einem gemeinsamen Eckpunkt betrachtet, so handelt es sich um die Moore-Nachbarschaft.

Die Zustände der Zellen verändern sich in diskreten Zeitschritten entsprechend einer Zustandsübergangsfunktion $\delta: Z^n \rightarrow Z$, die in Form von Regeln angegeben wird. Die Entwicklung einer Zelle hängt nur von ihrem aktuellen Zustand und dem ihrer Nachbarzellen ab.

3 Ökosystem Seegraswiese

Seegraswiesen sind nicht nur Lebensraum vieler Tierarten, sondern stabilisieren aufgrund ihrer eng verflochtenen Wurzelsysteme das Sediment. Darüber hinaus ist der dichte Teppich von Blättern imstande den Strömungswiderstand zu erhöhen und somit Strömungen und Wellenbewegungen zu verringern [MLT94].



Abb. 1: Seegraspflanzen im Wattbereich der Nordsee

Betrachtet werden die beiden Gattungen *Zostera marina* (das große Seegras) und *Zostera noltii* (kleines Seegras), die früher in deutschen Küstengewässern weit verbreitet waren. Jedoch wurden die großen Seegrasbestände um 1930 von einer eingeschleppten Pilzkrankheit fast vollständig vernichtet. Hierdurch kam es in diesen Bereichen zu einem veränderten Erosionsverhalten. Während sich die Seegrasbestände an anderen Küsten wieder erholt haben, sind die Seegraswiesen im Wattenmeer nicht wieder entstanden. Ein vermehrtes Vorkommen ist nur noch im nordfriesischen Wattenmeer [MLT94] zu finden.

Als Ursache hierfür wird das Zusammenspiel mehrerer verschiedener Umweltfaktoren, wie z. B. veränderte Strömungsverhältnisse, erhöhte Trübung des Wassers und der zunehmende Bewuchs durch Mikroalgen auf den Seegrasblättern, infolge der gestiegenen Nährstoffkonzentrationen (*Eutrophierung*) im Wattenmeer, verantwortlich gemacht. Darum gilt einer besonderen Aufmerksamkeit der Modellierung des Wachstumsverhaltens des Seegrases im Wattenmeer der Nordsee in Abhängigkeit unterschiedlicher Einflussfaktoren sowie einer Interaktion mit hydro- und morphodynamischen Systemgrößen.

In speziellen Experimenten konnte aufgezeigt werden, dass besonders Wasserbewegungen, Algenbewuchs und Beweidung durch Watt-schnecken (*Hydrobia ulvae*) Auswirkungen auf die Entwicklung des Seegrases haben. Dort wo die Strömungsgeschwindigkeiten gering sind, weiden die nur millimetergroßen Watt-schnecken den Algenbewuchs auf den Seegrasblättern ab. Jedoch werden die Watt-schnecken leicht durch erhöhte Strömungsverhältnisse verdriftet und sind deshalb in Gebieten mit starkem Strömungseinfluss kaum zu finden. Infolge dessen werden dort die Mikroalgen auf den Seegrasblättern nicht mehr abgeweidet und bilden sich bei hohen Nährstoffkonzentrationen im Watt zu einem dichten Pelz, der die Seegräser überwuchert und schließlich das Wachstum hemmt. Die Stoff-

wechselaktivität aller Organismen hängt stark mit der Umgebungstemperatur zusammen. Wachstum und Vermehrung setzen milde Wassertemperaturen voraus.

Die in diesem Wortmodell beschriebenen Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Modellgrößen lassen sich als Wirkungsbeziehungen in einem sogenannten Wirkungsgraphen darstellen.

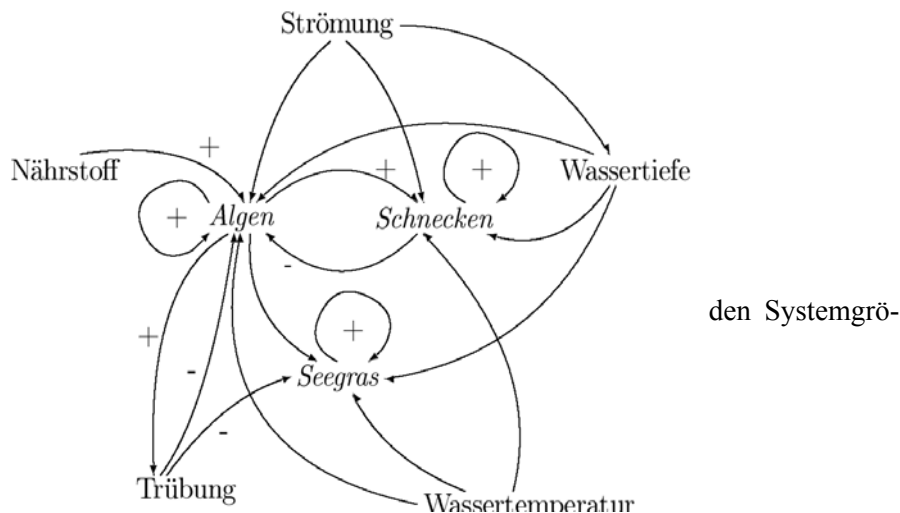


Abb. 2: Simulation von Algen-, Schnecken- und Seegraspopulationen unter Berücksichtigung des Strömungsfeldes in einem Betrachtungsgebiet

4 Seegrasmodell in Anlehnung eines Zellularen Automaten

4.1 Modellierung der Teilsysteme im Seegrasmodell

Für das Seegraswiesenmodell betrachten wir ein zweidimensionales Gebiet Ω , welches durch ein einfaches rechteckiges Zellgitter, bestehend aus $m \times n$ Zellen, beschrieben wird. Dabei stellt jede Zelle $c_{ij} \in L$ des Automaten einen kleinen Meeresausschnitt dar. Zur Darstellung der einzelnen Modellgrößen werden folgende Zustandsmengen eingeführt:

- G: der Bedeckungsgrad des Seegrases, welcher das Verhältnis der von den Blättern überdeckten Fläche zur Grundfläche darstellt und zwischen 0 und 1 variiert
- N: die Anzahl der Schnecken, deren Bevölkerungsgrad durch das Intervall $[0,1]$ ausgedrückt wird.
- A: Populationsgröße der Algen, ebenfalls im Bereich zwischen 0 und 1
- H: der Nährstoffeintrag, dessen Intensität durch 11 verschiedene Klassen von *sehr niedrig* (0) bis *sehr hoch* (10) ausgedrückt wird.
- Z: die Wassertiefe
- V: die aktuellen Strömungsverhältnisse (v_x, v_y, η)
- T: die Wassertemperatur, die im Modell Werte zwischen 0°C und 20°C annimmt
- B: die Wassertrübung, welche analog zum Nährstoffeintrag in unterschiedliche Klassen von *sehr klar* (0) bis hin zu *sehr trüb* (10) eingeteilt wird.
- D: der Zeitraum des Trockenfallens. Dieser Wert gibt an (in Sekunden), wie lange eine Zelle bereits trocken liegt.

Zwischen den genannten Zustandsvariablen ist eine Regelbasis zu definieren, um die Abhängigkeiten und Wachstumsprozesse beschreiben zu können. Das im Rahmen der Ökosystemforschung erworbene

Auf diese Weise ergibt sich ein komplexes Regelsystem. Die Regelanwendung erfolgt entsprechend des Erfüllungsgrades der Prämissen.

4.3 Entwicklung der Populationen

Durch Anwendung des beschriebenen Regelsystems werden die Raten bezüglich des Wachstums und Absterbens einer Population X bestimmt. Für jede Tier- bzw. Pflanzenart gibt es eine positive Rückkopplung über die Wachstumsrate α und eine negative über die Sterbe- bzw. Fressrate β . Die Entwicklungen der Populationsdichten für Algen, Schnecken und Seegras werden in jedem Zeitschritt t gemäß der allgemeinen Formel für logistisches Wachstum bestimmt:

$$X_{t+1} = \underbrace{\alpha \cdot \left(1 - \frac{X_t}{K}\right)}_{\text{Kapazitätsabhängige Wachstumsrate}} \cdot X_t - \overbrace{\beta \cdot X_t}^{\text{Verlustterm}}$$

Dabei wird die konstante Wachstumsrate α mit einem dichteabhängigen Faktor $(1 - X/K)$ multipliziert, wobei K die maximale Kapazität des bewohnten Gebiets angibt. X/K beschreibt die Gesamtminderung der Wachstumsrate α der aktuellen Population X , wodurch sich das so genannte logistische Verhalten ergibt.

Die allgemeine Formel wurde erweitert durch einen Verlustterm, welcher in Abhängigkeit von Sterberate und Populationsdichte den Verlust der Population in jedem Zeitschritt bestimmt. In diese Regel sind für jede Population typische Wachstums- und Verlustraten α, β einzusetzen.

4.4 Nachbarschaftsrelation und Randbedingungen

Als Nachbarschaft für das Wachstum der einzelnen Populationen wird die einfache Moore-Nachbarschaft verwendet. Da die Algen- und Schneckenbewegung vorrangig durch die Strömung beeinflusst wird, findet für die Wanderung die erweiterte Moore-Nachbarschaft Anwendung. Der Radius $r \in \mathbb{N}$ der Moorschen Nachbarschaft wird hinreichend groß gewählt, so dass die aktuellen Strömungsgeschwindigkeiten in den Regeln des Zellularen Automaten adäquat abgebildet werden können.

An den offen Gebietsrändern werden symmetrische Randbedingungen angenommen. Wandernde Populationsanteile werden entsprechend den vorliegenden Strömungsrichtungen aus dem Betrachtungsgebiet herausransportiert bzw. bei einlaufender Strömung hineingetragen. Um das Modell „lebendig“ zu halten, wird in jedem Zeitschritt zufällig in 0,1% der Zellen die Anzahl der Algen- bzw. Schnecken erhöht, die von „außen“ einwandern.

5 Kopplung mit Finite-Element-Modell

Im folgenden Abschnitt soll näher auf die direkte Kopplung des Zellularen Automaten mit einem Finite-Element-Strömungsmodell eingegangen und mögliche Übertragungsstrategien zwischen diesen verschiedenen Modellansätzen vorgestellt werden. Die prinzipiellen Unterschiede der Modellparadigmen des hydro-numerischen Modells auf der Basis kontinuierlicher Modellparameter und des diskreten Modells auf der Basis eines Zellularen Automaten zur Beschreibung der ökologischen Begebenheiten, machen das Koppeln solcher Modelle schwierig. Offensichtlich führt nur eine ganzheitliche Betrachtung und Modellierung der biotischen und abiotischen Prozesse zu vertrauenswürdigen Resultaten. Bei der Kopplung sind beide Richtungen zu berücksichtigen. Auf der einen Seite stellen die hydrodynamischen Größen eine wesentliche Randbedingung für das Wachstum von Organismen dar, auf der anderen Seite beeinflusst der Bewuchs und die Besiedelung durch Organismen auch die

Hydro- und Morphodynamik. Die drückt sich unter anderem in einer Veränderung der Turbulenz und der Strömungswiderstände sowie einer Beeinflussung der Anfälligkeit der Gewässersohle gegenüber Erosionserscheinungen aus.

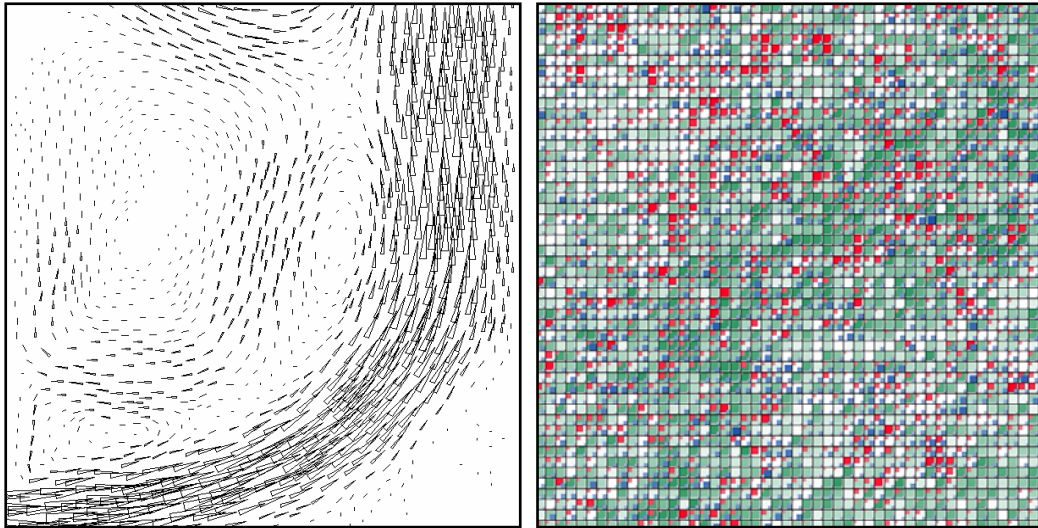


Abb. 4: Simulation von Algen-, Schnecken- und Seegrasspopulationen unter Berücksichtigung des Strömungsfeldes in einem Betrachtungsgebiet

Als Grundlage für die Berechnung der erforderlichen hydrodynamischen Zustandsgrößen wird ein tiefenintegriertes Strömungsmodell auf Basis stabilerter Finite Elemente verwendet [Mi95]. Bei der Finite Element Methode wird das Gebiet in viele kleine Elemente, in diesem Fall in Dreiecke, unterteilt. Die Bestimmung der Zustandsgrößen v_x, v_y, η, z erfolgt an den Knoten des Netzes.

5.2 Kopplung stetiger Simulationsergebnisse mit Zellularen Automaten

Die Verwendung der unterschiedlichen Modellkonzepte erfordert zum einen eine Interpretation der stetigen Systemgrößen, so dass sie in den Regeln des ZA verarbeitet werden können. Andererseits müssen die diskreten Zustandsgrößen zur Berücksichtigung im hydrodynamischen Modell in stetige Parameter überführt werden. Ausgehend vom FE-Netz wird im Pre-Processing Schritt zunächst anhand der Gesamtgröße des zu betrachtenden Gebietes die Zellgröße bestimmt und jeder Zelle des Gitters ein Referenzelement zugeordnet. Dazu werden beide Netzstrukturen übereinander gelegt und einer Zelle jeweils das Element zugewiesen, welches den Mittelpunkt dieser Zelle enthält. In jedem Zeitschritt kann nun auf die hydrodynamischen Größen aus der FE-Rechnung zugegriffen werden, die das Verhalten dieser Zelle beschreiben. Auf diese Weise lässt sich das gesamte Finite-Element-Netz auf die reguläre Gitterstruktur des Zellularen Automaten abbilden.

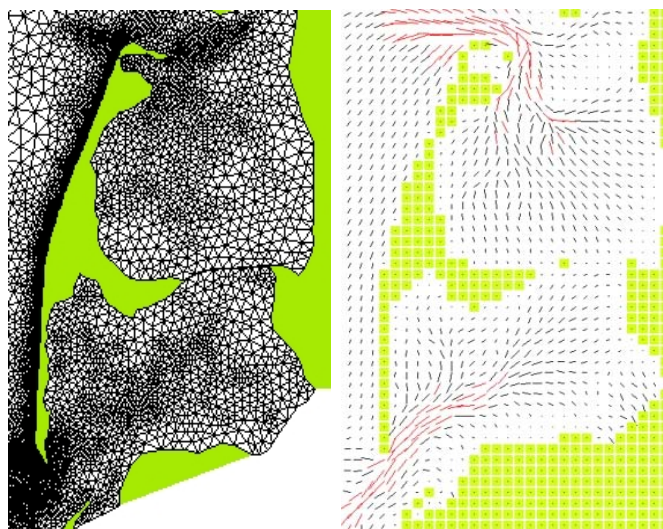


Abb. 5: Abbildung des Finite-Element-Netzes auf ein reguläres rechteckiges Gitter

Auf der Grundlage dieser Strömungswerte erfolgt die Regelanwendung und Berechnung der Zustandsvariablen des Zellularen Automaten für den nächsten Zeitschritt.

5.3 Rückkopplung diskreter ökologischer Systemgrößen im Strömungsmodell

Durchströmte Tier- oder Pflanzenbestände bilden einen nicht zu vernachlässigbaren Faktor der lokalen Hydro- und Morphodynamik. In Vegetationsgebieten wirkt die Bewuchsdichte als zusätzliche Rauheit und als Strömungswiderstand. Seegrass ist ein sehr flexibles Material mit einer geringen Biegesteifigkeit. Nach [PD03] ergibt sich der Gesamtströmungswiderstand F_p der Seegraspflanze als Summe der zwei Kraftkomponenten F_D und F_s . Dabei bezeichnet F_D die senkrecht zur Pflanze wirkende Druckkraft (sog. Formwiderstand) und F_s die auf der Blattoberfläche wirkende Reibungskraft. Beide Kräfte resultieren aus der relativen Bewegung des Wasserkörpers um die Pflanze und sind strömungsabhängig.

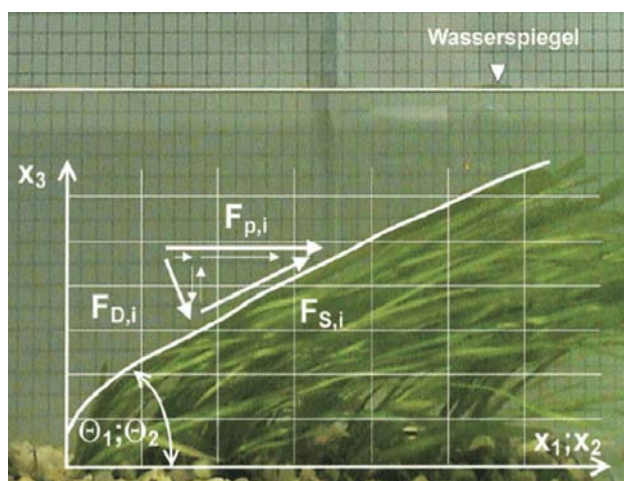


Abb. 6: Widerstandskräfte des Seegrases (aus [PD03])

Mit der Änderung des Seegrassbewuchses im Zellularen Automaten sind im Verlauf der Simulation die Reibungskoeffizienten im Strömungsmodell anzupassen. Es wird der Ansatz verfolgt, in Abhängigkeit

des Dichtegrades des Seegrases in einer Zelle des Zellularen Automaten den Reibungsbeiwert k_{sr} für jeden Knoten des FE-Netzes zu bestimmen. Dabei referenziert jeder Knoten diejenige Zelle des rechteckigen Gitternetzes in der er liegt. Eine Erweiterung dieses Ansatzes zur Bestimmung des Reibungswertes durch Berücksichtigung sämtlicher Zellen, die in der Voronoi-Region des Knoten liegen, mit anschließender Abstandsinterpolation zwischen Knoten und Zellschwerpunkten führt zu einer Verbesserung der Bestimmung des Reibungsbeiwertes.

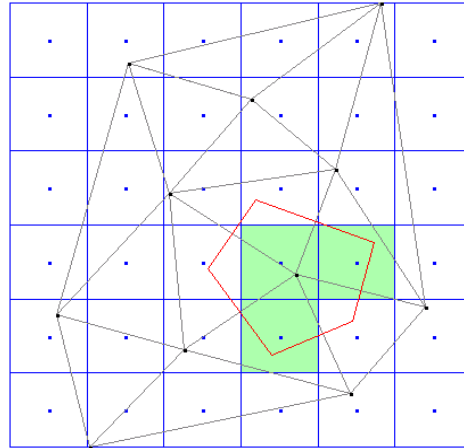


Abb. 7: Zur Bestimmung des Reibungswertes haben alle Zellen Einfluss, deren Mittelpunkt in der Voronoi-Region des Knotens liegen.

Die sich ergebenden Reibungsbeiwerte k_{sr} werden im Strömungsmodell unter Verwendung des klassischen Stricklergesetzes

$$\frac{1}{\varphi(\eta+h)} T_x^B = \frac{g}{(\eta+h)^{\frac{3}{4}} k_{sr}^2} U_x \cdot \|\tilde{U}\| \cdot \|\nabla U\|$$

$$\frac{1}{\varphi(\eta+h)} T_y^B = \frac{g}{(\eta+h)^{\frac{3}{4}} k_{sr}^2} U_y \cdot \|\tilde{U}\| \cdot \|\nabla U\|$$

berücksichtigt.

Eine weitere Verbesserung dieses Ansatzes wird durch die Berücksichtigung der Strömungsintensität auf die Neigung der Seegrassblätter erreicht.

6 Simulationsergebnisse

Die Umsetzung des Modells und anschließende Tests an einem akademischen Beispiel ermöglichen erste quantitative Untersuchungen des gekoppelten Strömungs- und Seegrassmodells und Aussagen über mögliche Entwicklungstendenzen des Seegrases. Für die Simulationen wurde das Gebiet um Sylt gewählt, da es aus hydrodynamischer Sicht gut untersucht ist und eines der wenigen Gebiete mit Seegrassaufkommen darstellt.

Der betrachtete Simulationszeitraum mit einer zunächst zufälligen Verteilung von Seegrass, Schnecken und Algen im gesamten Untersuchungsgebiet betrug zwei Jahre. Die Simulationsläufe geben das typische Entwicklungsverhalten des Seegrases in einem solchen Untersuchungsgebiet wieder. Während in den Zellen mit hohen Wassertiefen und starkem Strömungseinfluss eine deutliche Seegrassreduktion zu verzeichnen ist, konnte sich das Seegrass in Gebieten mit niedrigeren Wasserständen und schwächerer

Strömung gut entwickeln. Insbesondere das komplexe Zusammenspiel zwischen Algen, Schnecken und Strömungsverhältnissen kann durch das Modell wiedergegeben werden. So zeigt sich, dass in Gebieten mit überwiegend sehr starken Strömungsgeschwindigkeiten kaum Schnecken vorzufinden sind und daher auch der dort befindliche Algenbewuchs nicht abgeweidet wurde.

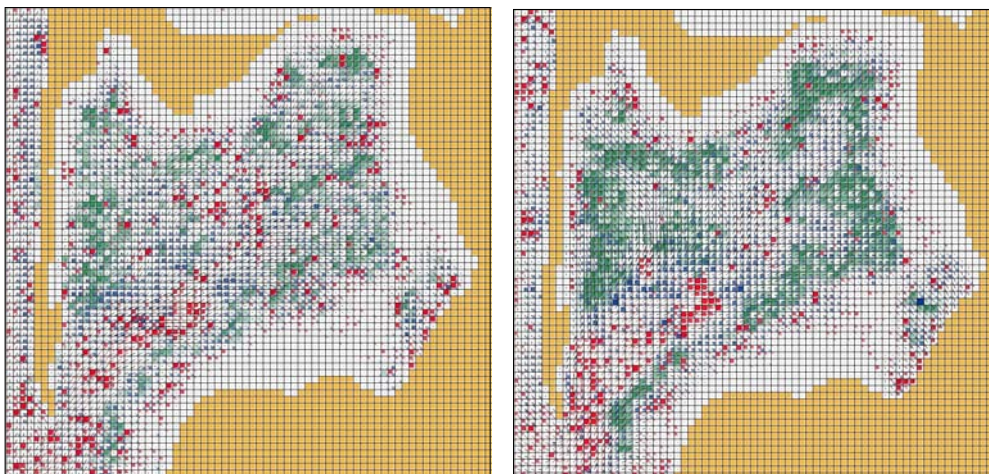


Abb. 8: Simulationsergebnisse nach 12 bzw. 18 Monaten

Die Veränderung im Bewuchs des Untersuchungsgebietes führt zu einer Veränderung der hydrodynamischen Verhältnisse. In der Abbildung 8 sind die Bereiche dargestellt, in denen es auf Grund erhöhter Seegrasdichten zu Veränderungen in den Reibungsbeiwerten des hydrodynamischen Modells kommt.

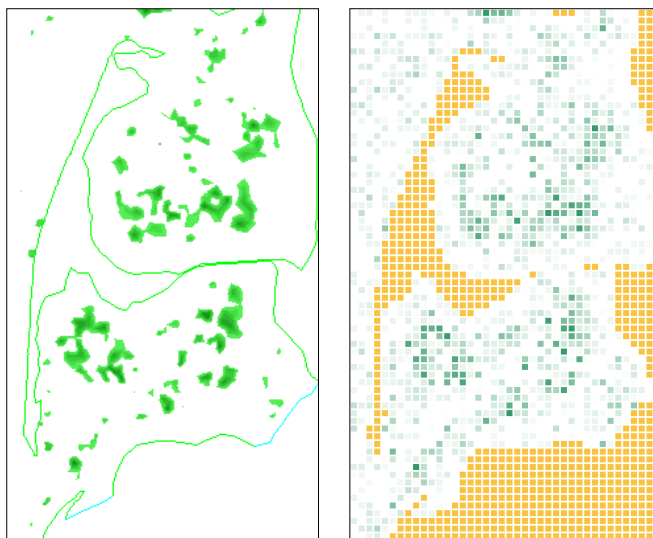


Abb. 9 Gebiete mit veränderlichen Reibungsbeiwerten aufgrund der Rückkopplung zur Seegrasdichte

7 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein diskretes Ökosystemmodell auf Basis eines Zellularen Automaten vorgestellt, welches das Seegraswachstum im Küstenbereich der Nordsee beschreibt. Dabei werden verschiedene Einflussgrößen, wie Algen-, Schneckenanzahl, Wassertemperatur, Strömungsverhältnisse usw. berücksichtigt.

Die direkte Kopplung zwischen dem Seegrasmodell auf Basis eines ZA und einem Finite-Elemente-Strömungsmodell stellt eine besondere Herausforderung dar. Erste Modelluntersuchungen zeigen für

das Untersuchungsgebiet Sylt plausible Ergebnisse. Erste Übertragungsstrategien der stetigen Simulationsergebnisse zur Verarbeitung in den diskreten Regeln des Zellularen Automaten sowie die Rückkopplung der diskreten Größen auf das stetige Modell wurden vorgestellt.

Die Abbildung des Finite-Element-Netzes auf ein reguläres rechteckiges Gitter bewirkt eine relativ grobe Diskretisierung des betrachteten Gebietes, wobei bereichsweise Verfeinerungen verloren gehen. Adaptive Verfeinerungen und hierarchische Gittergeometrien in Zellularen Automaten ermöglichen bereichsweise Gebietsverfeinerungen. Damit ist es möglich, grob aufgelöste und unwichtige Bereiche durch größere Zellen abzudecken, während fein aufgelöste und interessante Stellen durch kleinere Zellen beschrieben werden können. Dies erfordert jedoch eine Anpassung der Regeln des ZA. Durch die Berücksichtigung mehrerer Referenzelemente kann eine bessere Abbildung der hydrodynamischen Größen auf das Gitternetz und umgekehrt erwartet werden.

Weitere Einflussfaktoren, wie Nährstoffzufuhr und Sonnenlicht, führen zur Verbesserung des ökologischen Modells auf der einen Seite, sowie die Rückkopplung der Populationsdichten und abgeleitete Kenngrößen auf das hydro- und morphodynamische Modell zu einer besseren Abbildung der natürlichen Prozesse auf der anderen Seite.

8 Literatur

- Q. CHEN, A.E. MYNETT und W.A. MINNS: Application of cellular automata to modelling competitive growth of two underwater species *C. aspera* and *P. Pectinatus* in Lake Veluwe. Ecological Modelling, 2002.
- P. A. FISHWICK: Simulation model design and execution: building digital worlds, Prentice-Hall Inc., 1995.
- M. GERHARDT, H. SCHUSTER: Das digitale Universum – Zelluläre Automaten als Modelle der Natur. Vieweg-Verlag, 1995.
- H.U. MEYER, F. LÜDKE TWENHÖVEN, K. KOCK: Lebensraum Wattenmeer. Quelle & Meyer Verlag Wiesbaden, 1994.
- P. MILBRADT: Zur mathematischen Modellierung großräumiger Wellen- und Strömungsvorgänge. Dissertation am Institut für Bauinformatik, 1995.
- E. PASCHE, N. DEUßFELD: Hydro- und Morphodynamik in Seegraswiesen. HANSA International Maritime Journal (05/2003), pages 67-73, 2003.
- O. RICHTER: Simulation des Verhaltens ökologischer Systeme – Mathematische Methoden und Modelle. VCH Weinheim, 1985.

Adresse

Dr.-Ing. habil. Peter Milbradt
Dipl.-Inform.(FH) Tino Schonert
Universität Hannover
Institut für Bauinformatik
Callinstraße 34
30167 Hamburg
Germany

E-mail: milbradt@bauinf.uni-hannover.de
schonert@bauinf.uni-hannover.de

Bestimmung und Management des Überflutungsrisikos - das neue europäische Forschungsprojekt FLOODsite-

Andreas Kortenhaus und Hocine Oumeraci

Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig

Summary

Risk analysis and risk management of coastal floods can significantly contribute to safety and quality of life of people living in all flood prone areas. This has been demonstrated not only to all inhabitants by the events during the major Elbe flooding in 2002. The new European Integrated Project (IP) **FLOODsite** is concerned with all questions regarding the flooding processes, methods and procedures both to determine and manage floods and related risks in coastal areas, rivers and estuaries. Overall, 36 partner institutions from 13 European countries and from the East are involved in **FLOODsite**. The total EU funded budget comprises 9.68 Mio. Euro for a duration of 5 years. The project itself is split into 7 Themes (Risk analysis, Risk management, Integration, Pilot Sites, Training, Networking and Coordination).

This paper introduces the project and discusses its major objectives, the methodology and its challenges. Furthermore, the relevant research and applications in **FLOODsite** for the German part are discussed.

Zusammenfassung

Risikoanalyse und Risikomanagement von Überflutungen im Küstenbereich können wesentlich zur Sicherheit und Lebensqualität der Betroffenen in potenziellen Überflutungsgebieten beitragen. Dies haben insbesondere die Ereignisse des Elbe-Hochwassers im Jahre 2002 nicht nur allen Betroffenen deutlich vor Augen geführt. Das neue europäische Integrierte Forschungsprojekt (IP) **FLOODsite** beschäftigt sich mit allen Fragen der Überflutungsvorgänge, mit Verfahren und Methoden sowohl zur Bestimmung als auch zum Management von Überflutungen im Küstenbereich, sowie in Ästuaren und Flussgebieten. Insgesamt sind 36 Partner aus insgesamt 13 europäischen Ländern und Staaten des Ostblocks an **FLOODsite** beteiligt. Der finanzielle Gesamtrahmen des Projekts umfasst 9,68 Mio. Euro über eine Laufzeit von fünf Jahren und ist in insgesamt 7 Themengebiete (Risikobestimmung, -management, Integration, Anwendungsgebiete, Training, Netzwerke und Koordination) aufgeteilt.

Dieser Beitrag beinhaltet neben der Vorstellung des Projekts, seiner Inhalte, der Vorgehensweisen und seiner Herausforderungen vor allem die für die deutsche Seite relevante Forschung und Umsetzung der in **FLOODsite** angestrebten Verfahren.

1 Einleitung

1.1 Ein europäischer Maßstab

Hochwässer in Flüssen, Ästuaren und in Küstengebieten bedeuten eine Bedrohung von mehreren Millionen Europäern und bleibt eine zentrale Bedrohung durch Naturgefahren innerhalb Europas, die zu bedeutenden ökonomischen und sozialen Auswirkungen führen kann.

Die Sturmflut im Jahre 1953 im Bereich der Nordsee verursachte beispielsweise bis zu 2500 Tote in England, den Niederlanden, Belgien und Deutschland. Im Zusammenhang mit Hochwässern im Flussbereich sind vor allem die so genannten ‚Flash Floods‘ (Sturzfluten) zu nennen wie z.B. 1992 bei Vaison-la-Romaine (Abb. 1) oder die Schlammfluten bei Sarno (1997).



Abb. 1: Flash floods (Sturzflut) bei Vaison-la-Romaine (1992)

Über die Hälfte aller Einwohner in den Niederlanden wohnen unterhalb des Meeresspiegels, in England wohnen ca. 10% aller Einwohner in Gebieten, die Hochwasserrisiken durch Flüsse, Ästuar oder das Meer ausgesetzt sind und in Ungarn lebt ein Viertel der Bevölkerung in den Überflutungsgebieten der Donau und seiner Nebenflüsse. In England ist die nationale ökonomische Bedeutung von Flutschutz- und Küstenschutzbauwerken bereits für Teilgebiete nachgewiesen worden, wobei der dadurch vermeidbare mittlere jährliche Kostenaufwand mit 4 Milliarden Euro angegeben wird. Dabei kann der Gesamtwert aller potenziell betroffenen Anlagen im Fluss- und Küstenbereich nach Burgess et al. (2000) mit 300 Milliarden Euro abgeschätzt werden. In den Niederlanden schwanken derartige Schätzungen zwischen 300 und 800 Milliarden Euro.

In Österreich erreichten die Hochwasserschäden 2002 den Betrag von 163 Millionen Euro und die Schäden durch die Oderhochwässer in Polen und Tschechien 1997 wurden auf ca. 4,5 Milliarden Euro geschätzt. Gleichzeitig mussten dort 200.000 Menschen evakuiert werden und es waren 100 Tote zu beklagen.

In Holland hat die Sturmflut 1953 die Verletzbarkeit des Landes vor Augen geführt. Neben mehr als 1800 Toten, 67 Deichbrüchen und einem Schaden von damals ca. 50 Millionen Gulden hat dies dazu geführt, dass der gesamte Küstenschutz vorangetrieben wurde. In Deutschland sind die Sturmfluten von 1962 und 1976 noch in guter Erinnerung, bei denen vor allem in Hamburg 1962 mehr als 300 Menschenleben, 30.000 Evakuierungen, 60 Deichbrüche, große Überflutungen und Gesamtschäden bei etwa 800 Millionen DM zu beklagen waren (Abb. 2).

Die Zahlen zeigen die Bedeutung von Überflutungen in einer europäischen Dimension, so dass das nationale und europäische Interesse verständlich wird, diese Bedrohung zu verstehen und zu managen.



Abb. 2: Überflutungen im Hamburger Stadtteil Wilhelmsburg während der Sturmflut 1962

1.2 Europäische Hochwasser-Forschung

Die europäische Kommission (Directorate General of Research) finanziert Forschung aus dem Bereich der Wissenschaft und des Hochwassermanagements seit den 80iger Jahren im Rahmen von mehreren Rahmenprogrammen („Framework Programmes“). Das letzte dieser Rahmenprogramme, FP6, startete mit einem Aufruf im Dezember 2002. Die Anzahl und der Umfang der Projekte hat sich im Laufe der vergangenen Dekade deutlich vergrößert, was teilweise auf die Notwendigkeit zurückzuführen ist, den steigenden Bedarf der europäischen Bevölkerung nach Schutz vor Hochwässern zu gewährleisten. Diese Forschung ist meistens im Rahmen breiterer Untersuchungen zum Verständnis von Naturgefahren und hydrogeologischer Risiken angesiedelt worden (siehe Anlage 1 und 2 für eine Übersicht bisheriger EU-Projekte). Nach Samuels et al. (2004) beläuft sich der Gesamtwert (EU-Beitrag) aller ca. 100 Projekte seit 1980 auf ca. 90 Millionen Euro. Darüber hinaus hat die EU seit dem 5. Rahmenprogramm das Konzept der Projektcluster eingeführt, in dem zwischen einzelnen Projekte, die auf verschiedenen Aspekten zum gleichen Thema Forschung betreiben, Bezüge hergestellt werden. Einer dieser Cluster, ACTIF, beschäftigt sich mit Hochwasservorhersagen (<http://www.actif-ec.net>).

2 Übersicht über FLOODsite

Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über die bisherigen Entwicklungen im Projekt, die Ziele des Projekts sowie die der einzelnen Themen und die Struktur gegeben werden.

2.1 Entwicklung des Projekts

Die Entstehung des Projekts hat sich insgesamt über ca. 2 Jahre hingezogen, wobei der Startschuss der Aufruf der EU zu einem „Expression of interest“ durch die Kommission im März 2002 lag. Die Ergebnisse hierzu wurden im September 2002 veröffentlicht. Nach dem Aufruf zur Einreichung von Projektvorschlägen im Dezember 2002 wurde das Kernteam des späteren Projekts zwischen Dezember 2002 und April 2003 gebildet und der Projektvorschlag erarbeitet. Bis zum Juli 2003 erfolgte die Evaluierung des Projekts sowie die erfolgreiche Bewertung. Vertragsverhandlungen zogen sich dann bis zum März 2004 hin, für den 1. März 2004 ist der offizielle Starttermin des Projekts angesetzt worden.

2.2 Zielsetzung und Arbeitsprogramm

Das Hauptziel des **FLOODsite** Projekts ist die Erstellung eines integrierten Rahmenplans für ein Hochwassermanagement sowohl für operationelle (kurzfristige) als auch strategische (langfristige) Zeithorizonte. Dabei wird von Hochwässern sowohl im Flussbereich, in Ästuaren als auch im Küstenbereich ausgegangen. Im Einzelnen bedeutet dies die folgenden Ziele:

- + eine integrierte europäische Methodik für die Analyse von Hochwasserrisiken
- + ein einheitliches Vorgehen für die Erfassung der Naturgefahren, die sozio-ökonomische Vulnerabilität und die natürlichen, ökologischen sowie menschlichen Werte
- + eine einheitliche Herangehensweise für die Ursachen der Überflutung in den Bereichen „Fluss“, „Ästuar“ und „Küste“
- + ein Rahmenplan für ein integriertes Management von Hochwasserrisiken
 - nachhaltige Maßnahmen vor der Überflutung (Vorhaltung von Infrastruktur, Notfallplanung, Minderung der Vulnerabilität)
 - Hochwassermanagement (Frühwarnung, Evakuierungen, und Notfallmaßnahmen)
 - Hochwassernachsorge (Analyse, Regeneration)
- + eine Integration und eine Fortsetzung von anderen europäischen und nationalen Forschungsprogrammen

Das **FLOODsite** Projekt ist dabei in 7 „Themes“ eingeteilt (Abb. 3), die die Forschungsaktivitäten, die Integration, Trainingsaktivitäten, Netzwerke und Projektmanagement umfassen. Innerhalb dieser „Themes“ gibt es 35 „Tasks“ mit spezifischen Teilaufgaben.

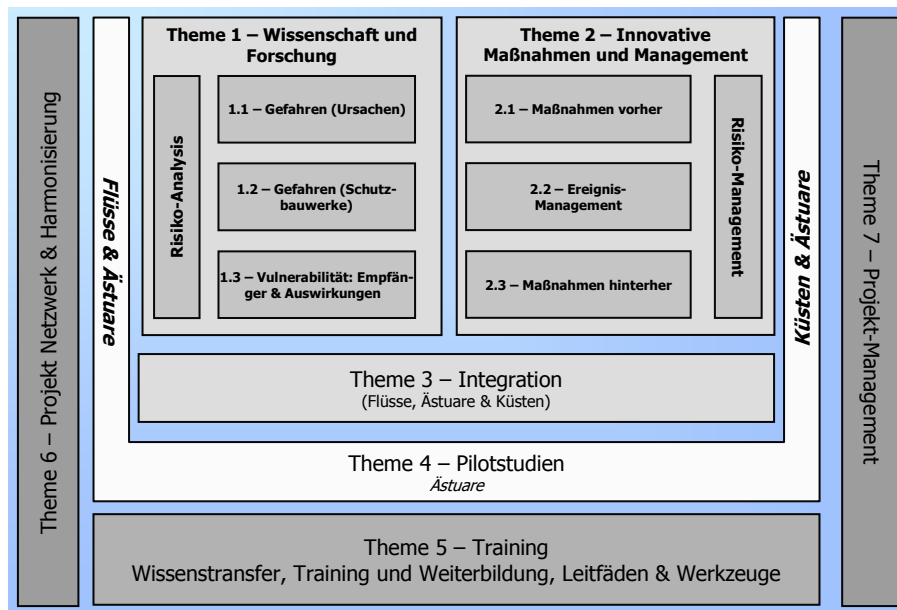


Abb. 3: Struktur und Organisation des **FLOODsite** Projekts

Die Zielsetzung der einzelnen „Themes“ und „Sub-Themes“ lauten wie folgt:

Theme 1 – Risikoanalyse: wissenschaftliche Grundlagen

- 1.1 Verbesserung des Verständnisses der primären Ursachen des Hochwasserrisikos (Wellen, Sturmfluten, Abflüsse etc.) durch zielgerichtete Erforschung der wesentlichen Fragestellungen und Prozesse, die wesentlich zu den Unsicherheiten bei Management-Entscheidungen beitragen.

Dies ist unter anderem die kombinierte Auftrittswahrscheinlichkeit von Ereignissen wie z.B. Wasserstand und Wellen sowie die bessere Beschreibung von Extremereignissen.

- 1.2 Verbesserung des Verständnisses, der Modellierung und der Methoden für die Analyse der Wirksamkeit des gesamten Flutschutzsystems und seiner Teilkomponenten, einschließlich natürlicher und künstlicher Schutzsysteme (z.B. Deiche, Ufermauern, Böschungen, Dünen) sowie der Flutwellenausbreitung.
- 1.3 Verständnis der Vulnerabilität und Sensibilität der „Empfänger“ des Risikos sowie Harmonisierung der Methoden zur Abschätzung der gesellschaftlichen Auswirkungen von Überflutungen sowie der verursachten Schäden

Theme 2 – Risikomanagement: innovative Maßnahmen und nachhaltiges Risikomanagement

- 2.1 Bewertung von Maßnahmen im Rahmen des Hochwasserrisiko-Managements und Werkzeuge *nach dem Ereignis* sowie Entwicklung von Strategien und ihrer Bewertung *vor einer Überflutung* unter der Berücksichtigung von vielfältigen physikalischen und gesellschaftlichen Randbedingungen
- 2.2 Verbesserung von Maßnahmen des Hochwasserrisikos, die *während des Ereignisses* eingesetzt werden, durch verbesserte Technologien zur Frühwarnung in Einzugsgebieten für Sturzfluten (Flash floods) und durch Maßnahmen für die Notfall-Evakuierung

Theme 3 – Rahmenplan für technologische Integration

- 3.1 Integration des wissenschaftlichen, technologischen und verfahrenstechnischen Fortschritts zur Unterstützung von langfristigen Management-Entscheidungen
- 3.2 Integration des wissenschaftlichen, technologischen und verfahrenstechnischen Fortschritts zur Unterstützung von Management-Entscheidungen während des Überflutungsvorgangs
- 3.3 Entwicklung eines Rahmenplans für die Identifizierung und Quantifizierung des Einflusses von Unsicherheiten auf den Prozess des Risikomanagements

Theme 4 – Pilotstudien

- 4.1 Bereitstellung von realen Untersuchungsgebieten mit realen und spezifischen Problemen, auf die die Werkzeuge, Techniken und Entscheidungsunterstützungssysteme angewendet und weiterentwickelt werden können
- 4.2 Bereitstellung von Feedback in Wissenschaft und Forschung durch die Entscheidungsträger und Verantwortlichen der Untersuchungsgebiete
- 4.3 Sicherstellung, dass die Ergebnisse des **FLOODsite** Projekts von realem Nutzen und anwendbar sind

Theme 5 – Trainingsaktivitäten (Wissenstransfer, Aus- und Weiterbildung, Werkzeuge)

- 5.1 Bereitstellung einer Reihe von Leitfäden auf der Grundlage der neuesten Forschungsergebnisse
- 5.2 Vermittlung und Unterstützung des Wissenstransfers an Entscheidungsträger und Verantwortliche in hochwassergefährdeten Gebieten
- 5.3 Bereitstellung von öffentlich zugänglichen (internet-basierten) Werkzeugen für die Ausbildung

Theme 6 – Projekt-Netzwerk, Harmonisierung und Monitoring

- 6.1 Verknüpfung zu Forschungsaktivitäten außerhalb des Projekts und politischen Entwicklungen
- 6.2 Interne Übereinstimmung innerhalb des **FLOODsite** Konsortiums (z.B. durch die Entwicklung einer gemeinsamen Sprache des Risikos bzw. des Hochwassermanagements)
- 6.3 Integration externer Begutachtung und Stellungnahmen in die Projektaktivitäten

Theme 7 – Projekt-Management

- 7.1 Sicherstellung eines effektiven Managements des Projekts, einschließlich administrativer und finanzieller Aspekte, Kommunikation mit der EU-Kommission, Ergebnisverwertung, etc.

2.3 Pilotstudien

FLOODsite verwendet insgesamt 10 reale potenzielle Überflutungsgebiete, die aus den Bereichen „Fluss“ – „Ästuar“ – „Küste“ – „Sturzfluten“ kommen. Diese Gebiete sind in Abb. 4 zusammen mit den in **FLOODsite** beteiligten Ländern dargestellt.

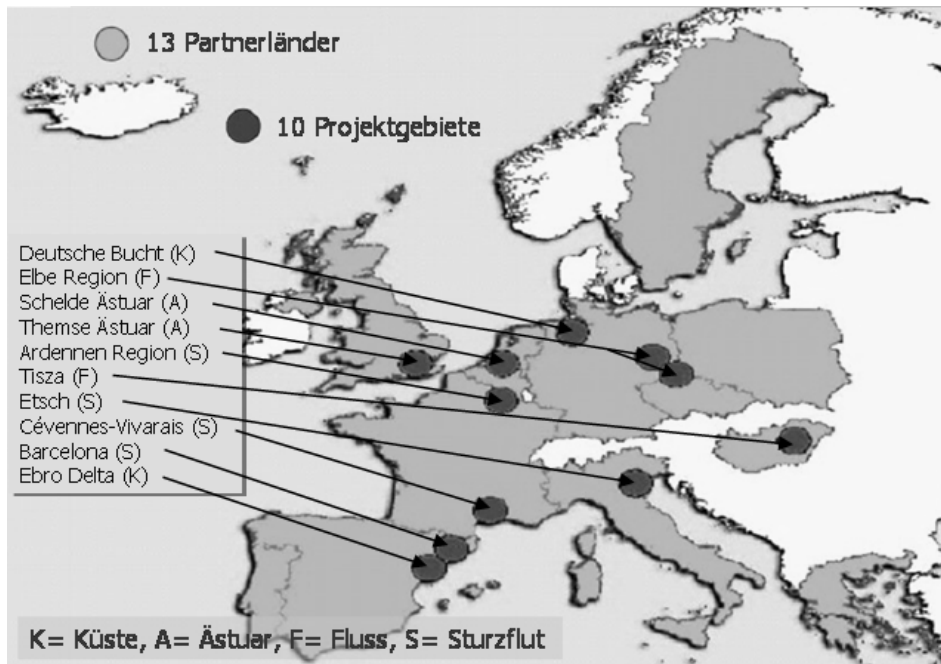


Abb. 4: Partner und Projektgebiete im **FLOODsite** Projekt

Von nationalem Interesse sind hier insbesondere die beiden Projektgebiete an der Deutschen Bucht (St. Peter-Ording, Küstenbereich) sowie verschiedene Gebiete entlang der Elbe (Flussbereich), die insbesondere wegen des Elbehochwassers im Jahr 2002 für **FLOODsite** von großer Bedeutung sind. Demzufolge ist auch die Beteiligung deutscher Partner im Projekt unter anderem anhand dieser Projektgebiete ausgerichtet (s. Kapitel 3).

2.4 Ergebnisse

Das Projekt strebt insgesamt über 20 Projekt-Ergebnisse (Deliverables) an, wobei eine Vielzahl von Zwischenergebnissen und Berichten darin enthalten sind. Diese Ergebnisse können nicht im Einzelnen genannt werden, umfassen aber etwa die folgenden Gebiete:

- + Fortschrittsberichte zu Wissenschaft und Forschung
- + Entwicklung von Software-Tools
- + Bereitstellung von Leitfäden und Handbüchern
- + Erziehung und Trainingsmaterial für unterschiedliche Zwecke

Detailliertere Informationen hierzu und zum gesamten Projekt sind auch der Internet-Seite von **FLOODsite** unter <http://www.floodsite.net> zu entnehmen. Hier kann auch ein Newsletter beantragt werden, der weitere Updates und Informationen in regelmäßigen Abständen zur Verfügung stellt.

2.5 Konsortium

Das Konsortium in **FLOODsite** besteht aus insgesamt 36 Partnern aus 13 Ländern in Europa. Ein Projekt dieser Größenordnung erfordert besondere Herausforderungen an das Projekt-Management. Daher wurde in **FLOODsite** auf eine erprobte Management-Struktur zurückgegriffen, die sich bereits im IRMA-SPONGE Projekt (<http://www.irma-sponge.org>) zum Hochwassermanagement bei Rhein und Maas bewährt hat. Das Projekt wurde durch das Niederländische Center für Fluss-Studien (Netherlands Centre for River Studies, NCR) koordiniert. Das Management von **FLOODsite** umfasst ein „Management-Team“ aus den Leitern der einzelnen „Themes“, einer Projektgruppe und zwei Beratungskomitees, die sowohl die wissenschaftliche Seite als auch die Anwendung innerhalb der Pilotstudien begutachten.

3 Einbindung nationaler Forschungsaktivitäten

Wie in Abschnitt 2.3 bereits erwähnt sind von deutscher Seite zwei Projektgebiete in **FLOODsite** eingebracht worden. Im Zusammenhang damit ist eine Vielzahl von Instituten an **FLOODsite** beteiligt, die die notwendigen Informationen für die Projektgebiete bereitstellen, neue Methoden und Verfahren anwenden, aber auch aktiv an der Forschung innerhalb des Projekts beteiligt sind. Diese Institute sind im Einzelnen:

- + Dresden Flood Research Center (FRC) (<http://www.dresden-frc.de/>)
- + Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. (IÖR) (<http://www.ioer.de/>)
- + Technische Universität Dresden, Kompetenzzentrum Wasser (TUD) (<http://www.tu-dresden.de/>)
- + UFZ Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH (<http://www.ufz.de/>)
- + Universität Potsdam, Institut für Geoökologie (<http://www.uni-potsdam.de/u/Geoökologie/index.htm>)
- + Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (<http://www.pik-potsdam.de/>)
- + Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilungen „Hydromechanik und Küsteningenieurwesen“ und „Hydrologie und Wasserwirtschaft“ (LWI) (<http://www.lwi.tu-bs.de/>)
- + Christian-Albrecht-Universität Kiel, Geographisches Institut, Arbeitsgruppe Küstengeographie und Klimafolgenforschung (CAU) (<http://www.kuestengeographie.de/>)

Im Bereich der Küstenforschung sind die beiden letztgenannten Institute beteiligt. Während das LWI sowohl die Leitung des „Theme 1“ (Risikoanalyse) übernommen hat und in verschiedenen „Tasks“ im Bereich von Theme 1 und Theme 4 eingebunden ist, koordiniert CAU die Pilotstudie der „Deutschen Bucht“ und ist hier ebenfalls maßgeblich an der Forschung beteiligt.

Die deutsche Beteiligung basiert dabei auf einer Reihe von abgeschlossenen bzw. noch laufenden Forschungsprojekten und Veröffentlichungen, so dass die Beteiligung im Rahmen von **FLOODsite** auch als Fortführung der nationalen Projekte verstanden werden kann. Diese auf nationaler Seite durchgeführten Projekte sind:

- + Wertermittlung für schleswig-holsteinische Küstenzonen (Forschungsprojekt - 3 Jahre, 1995-1998; gefördert durch MLR Schleswig-Holstein), siehe z.B. Klug & Hamann (1998)
- + Mikroskalige Evaluierung der Risiken in überflutungsgefährdeten Küstenniederungen (MERK) (Forschungsprojekt - 3 Jahre, 2000-2002, gefördert durch BMBF und MLR Schleswig-Holstein), siehe z.B. Reese et al. (2001)

- + COMRISK - Common Strategies to Reduce the Risk of Storm Floods in Coastal Lowlands (Forschungsprojekt – Innenministerium Schleswig-Holstein - Projekt wird 2005 abgeschlossen), siehe z.B. Hofstede & Hamann (2004)
- + Probabilistische Bemessungsmethoden für Seedeiche (PRODEICH - Forschungsprojekt – 3 Jahre, 1999-2001, gefördert durch BMBF und KFKI), siehe z.B. Kortenhaus & Oumeraci (2002)

FLOODsite bietet eine hervorragende Möglichkeit grundlegender Partnerschaften im Bereich der Forschung und Zusammenarbeit innerhalb Europas, um dem Problem der Hochwasserrisiken zu begegnen und einheitliche Methoden zu entwickeln, die dann in der Praxis umgesetzt werden. Die führenden europäischen Institute sind an **FLOODsite** beteiligt und stellen sowohl die Umsetzung der Projektziele als auch die Integration nationaler Interessen auf europäischer Ebene sicher. Trotzdem werden auch in **FLOODsite** nicht alle nationalen Aspekte der im Rahmen von Risikoanalyse und –management notwendigen Forschung bearbeitet werden können. Daher müssen in Zusammenarbeit mit den beteiligten Instituten und Interessenvertretern vor allem im Bereich der deutschen Projektgebiete die noch fehlenden Aspekte für die nationale Forschung erarbeitet und umgesetzt werden.

4 Literatur

- BURGESS, K.; SAMUELS, P.G.; Chatterton, J.B.; Penning-Rowsell, E.C.; Deakin, R. (2000): Assessment of economic value of national assets at risk. *Proceedings of the DEFRA Conference of River and Coastal Engineers*, Keele Conference Park, U.K.
- HOFSTEDE, J.; HAMANN, M. (2004): COMRISK - gemeinsame Strategien zur Reduzierung des Sturmflutrisikos in Küstenniederungen. *HANSA, Zentralorgan für Schifffahrt, Schiffbau, Hafen*, Jg. 141, pp. 71-72.
- KLUG, H.; HAMANN, M. (1998): Wertermittlung für die potentiell sturmflutgefährdeten Gebiete an den Küsten Schleswig-Holsteins. *FTZ Westküste*, Gutachten im Auftrag des MLR, Büsum, Germany, 44 S., Anlagen.
- KORTENHAUS, A.; OUMERACI, H. (2002): Probabilistische Bemessungsmethoden für Seedeiche. *Berichte Leichtweiß-Institut für Wasserbau*, Technische Universität Braunschweig, Nr. 877, Braunschweig, Germany, 205 S., 6 Anlagen.
- REESE, S.; MARKAU, H.-J.; STERR, H. (2001): Mikroskalige Evaluation der Risiken in überflutungsgefährdeten Küstenniederungen (MERK). Abschlussbericht. Bericht Forschungs- und Technologiezentrum Westküste, Büsum, Germany, 156 S.
- SAMUELS, P.G.; MORRIS, M.; SAYERS, P. (2004): FLOODsite - integrating European research on flood risk management. *Proceedings of the DEFRA Conference of River and Coastal Engineers*.

Adresse

Dr.-Ing. Andreas Kortenhaus
Prof. Dr.-Ing. Hocine Oumeraci
Leichtweiß-Institut für Wasserbau
Beethovenstr. 51a
D-38106 Braunschweig

E-Mail: a.kortenhaus@tu-bs.de

Anlage 1 Forschungsprojekte der EU zu Hochwassergefahren im Bereich Flüsse

FP	Project Title	Programme
FP2	Floods Across Europe (EUROflood)	EPOCH
FP2	Weather radar and storm and flood hazard	EPOCH
FP2	A comprehensive forecasting system for flood risk mitigation and control - AFORISM	EPOCH
FP3	Genesis and Impact of Tsunamis on the European Coasts - GITEC	ENV 1C
FP3	Climate Change and Extreme Events: Altered Risk, Socio-Economic Impacts and Policy Responses	ENV 1C
FP3	Flooding risks in mountain areas (FRIMAR)	ENV 1C
FP3	Storms, Floods and radar Hydrology	ENV 1C
FP3	Relative sea-level changes and extreme flooding events around European coasts	ENV 1C
FP4	Applied research on a transferable methodology, devoted to flood awareness and mitigation, helping the decision and negotiation processes, adapted to a changing environment, and respecting the water resources - FLOODAWARE	ENV 2C
FP4	Flash-flood risk assessment under the impact of land use changes and river engineering works – FRA-MEWORK	ENV 2C
FP4	Flood risk reduction by space borne recognition of indicators of excess runoff generating areas – FLOODGEN	ENV 2C
FP4	Debris flow management and risk assessment in the Alpine region – DEBRISFLOWRISK	ENV 2C
FP4	Flash-flood risk assessment under the impact of land use changes and river engineering works	ENV 2C
FP4	Forecasting floods in urban areas downstream of steep catchments- TELFLOOD	ENV 2C
FP4	Satellite and combined satellite-radar techniques in meteorological forecasting for flood events – MEFFE	ENV 2C
FP4	River basin modelling, management and flood mitigation - RIBAMOD	ENV 2C
FP4	European river flood occurrence and total risk assessment system - EUROTAS	ENV 2C
FP4	Heavy precipitation in the Alpine Region - HERA	ENV 2C
FP4	Runoff and atmospheric processes for flood hazard forecasting and control	ENV 2C
FP4	The European multi-hazard risk assessment project - TEMRAP	ENV 2C
FP4	Concerted action on Dam-Break modelling - CADAM	ENV 2C
FP4	The development of active on-line hydrological and meteorological models to minimise impact of flooding - HYDROMET	ENV 2C
FP4	Distributed Environmental Disaster Information and Control System - DEDICS	TELEMATICS 2C
FP4	Telematics-assisted handling of flood emergencies in urban areas - TELEFLEUR	TELEMATICS 2C
FP4	Risk of inundation – planning and response interactive user system - RIPARIUS	TELEMATICS 2C
FP4	Rapid Damage Assessment Telematic Tool - RADATT	TELEMATICS 2C
FP4	Scaling behaviour in models of river networks and landscape evolution	TMR
FP4	Dynamics of sediments and water in alpine catchments - processes and prediction	TMR
IC	The European multi-hazard risk assessment project	INTAS
FP5	Torrent hazard control in the European Alps. Practical tools and methodologies for hazard assessment and risk mitigation - THARMIT	EESD
FP5	Realistic evaluation of temporal interactions of natural hazards - RETINA	EESD
FP5	Advanced study course in river basin modelling for flood risk mitigation (ASC-RBM)	EESD
FP5	Mitigation of climate-induced natural hazards - MITCH	EESD
FP5	An European flood forecasting system - EEFS	EESD
FP5	Friendly Operational Risk Management through Interoperable Decision Aid Based on Local Environment - FORMIDABLE	IST
FP5	Cluster Initiative for Flood and Fire emergencies - CLIFF	IST
FP5	Operational Solutions For The Management Of Inundation Risks In The Information Society – OSIRIS	IST
FP5	Investigation of Extreme Flood Processes (IMPACT)	EESD
FP5	Critical assessment of Available Radar Precipitation Estimation Techniques and Development of Innovative Approaches for Environmental Management (CARPE DIEM)	EESD
FP5	European satellite rainfall analysis and monitoring at the geo-stationary scale (EURAINSAT)	EESD
FP5	Microwave Attenuation as a New Tool for Improving Stormwater Supervision Administration (MAN-TISSA)	EESD
FP5	Multi-sensor precipitation measurements integration, calibration and flood forecasting (MUSIC)	EESD
FP5	Near real-time flood forecasting, warning and management system based upon satellite radar images, hydrological and hydraulic models and in-situ data. (FLOODMAN)	EESD
FP5	Real Time Flood Decision Support System Integrating Hydrological, Meteorological and Radar Technologies (FLOODRELIEF)	EESD
FP5	Achieving Technological Innovation in Flood Forecasting (ACTIF)	EESD

Anlage 2 Forschungsprojekte der EU zu Ästuaren und an der Küste

	Programme / Action	Acronym	Title
FP2	MAST	G6M	Coastal Morphodynamics
FP2	MAST	G6S	Coastal Structures
FP3	MAST	MCS	Monolithic Coastal Structures
FP3	MAST	NOURTEC	Beach nourishment
FP3	MAST	Berm breakwater	Berm breakwater research
FP3	MAST	G8M	Coastal Morphodynamics
FP4	MAST	PACE	Long term Coastal Evolution
FP4	MAST	RMBFM	Breakwater failure modes
FP4	MAST	COSINUS	Cohesive sediments
FP4	MAST	INTRMUD	Inter-tidal Mudflats
FP4	MAST	F-ECTS	Tidal ecosystems
FP4	MAST	COAST3D	Coastal Morphology
FP4	MAST	SCARCOST	Scour around coastal structures
FP4	MAST	SEDMOC	Coastal sediment modelling
FP4	MAST	SASME	Surf zone mechanics
FP4	MAST	SAFE	Soft beach nourishment
FP4	MAST	FANS	Fluxes across narrow shelves
FP4	MAST	EUROWAVES	Tool for assessing the wave climate at coastal and shallow water locations in Europe
FP4	Environment and Climate	DESIMA	Coastal decision support
FP4	Environment and Climate	MEDDELT	Impact of Climatic Change on Northwestern Mediterranean Deltas
FP4	AVID	Telematics	Hydrographic data integration
FP4	MMARIE	Telematics	Modelling Marine Ecosystems
FP4	THETIS	Telematics	Coastal Information retrieval
FP5	EESD	PROVERBS	Probabilistic design tools for vertical breakwaters
FP5	EESD	PRESTO	Precision Weather Forecasting System for Multimodal Transport
FP5	EESD	HUMOR	Human Induced Coastal Morphodynamics
FP5	EESD	LIMAS	Liquefaction at Marine Structures
FP5	EESD	SAND PIT	Sand Transport and Morphology of offshore Sand mining Pits
FP5	EESD	SPHERE	
FP5	EESD	CLASH	Crest level assessment of coastal structures
FP5	INCO	ECOSUD	Estuarine and Coastal Areas. Basis and Tools for a More Suitable Development
FP5	IST	OSIRIS	Operational solutions for the management of inundation risks in the information society
FP5	IST –	RISK FORCE	Common protocol for the natural risk management in Europe and implementation as part of a future GMES structure
DG	Environment	EUROSION	European Initiative for sustainable coastal erosion management
FR5	EESD	WAVEMOD	Probabilistic Methodology for Coastal Site Investigation Based on Stochastic Modelling of Waves and Current
FP5	EESD	ECAWOM	European Coupled Atmospheric-Wave-Ocean Model
FP5	IST	CROSSGRID	Grid components for interactive computer and data intensive applications
FP5	EESD	MAXWAVE	The EU project MAXWAVE, started in 2000, is focussing on causes of ship accidents which in many cases are believed to be due to 'rogue waves'
FP5	EESD	HIPOCAST	Hindcast of dynamic processes of the ocean and coastal areas of Europe

Touristische Effekte von Windkraftanlagen in der Küstenzone

Wolfgang Günther und Bente Zahl

Institut für Tourismus- und Bäderforschung in Nordeuropa GmbH (*N.I.T.*)

Summary

The use of locations within and at the seaside for the establishment of wind power farms is discussed controversially in all coastal areas in Germany. Opponents often come up with ecological objections as well as with feared impacts on tourism. Quite often it is assumed that wind energy plants derange the landscape considerably and therefore have a negative effect on the travellers' choice for (or against) a holiday destination. On the other hand, it is also possible that the use of wind energy has no measurable - or even positive - effects on tourism demand. Eventually, wind power technology develops rather fast and in each region different set-ups have to be beard in mind.

The complexity of possible impacts of wind power on tourism leads to the assumption that theoretical approaches only will not be sufficient to determine the actual tourist effects of wind power engines. The Institute for Tourism and Recreational Research in Northern Europe (*N.I.T.*) developed a multi-methodological approach and implemented it in Schleswig-Holstein. The survey consists of four steps complementing one another: a statistical analysis, a population survey, a guest survey and group discussions with potential guests. The integration of all parts delivers sophisticated and valid results on tourist effects of on- and off-shore wind power engines.

Zusammenfassung

Die Nutzung von Standorten im und am Meer für die Errichtung von Windparks wird in den deutschen Küstenlandschaften kontrovers diskutiert. Von Gegnern werden dabei neben ökologischen Bedenken häufig auch Auswirkungen auf den Tourismus zur Sprache gebracht. Oft wird angenommen, dass Windkraftanlagen die Landschaft so sehr stören, dass die Urlaubszielentscheidung beeinträchtigt wird. Es ist aber auch nicht auszuschließen, dass die Windkraftnutzung keinerlei messbare - oder sogar positive - Effekte auf die touristische Nachfrage hat. Hinzu kommt, dass sich die Windkrafttechnik schnell fortentwickelt und dass in jeder Region unterschiedliche Rahmenbedingungen berücksichtigt werden müssen.

Die Vielschichtigkeit der Wirkungsmöglichkeiten von Windkraftanlagen auf den Tourismus führt dazu, dass theoretische Überlegungen allein nicht ausreichen, um eine Antwort auf die Frage nach den tatsächlichen touristischen Effekten von Windkraftanlagen zu geben. Um diesbezüglich Klarheit zu erhalten, hat das *N.I.T.* einen mehrdimensionalen Untersuchungsansatz entwickelt und in Schleswig-Holstein in der Praxis eingesetzt. Er gliedert sich in vier einander ergänzende Arbeitsteile: Eine statistische Analyse, eine Bevölkerungsbefragung, eine Gästebefragung und Gruppendiskussionen. Die Integration dieser vier Arbeitsteile liefert Ergebnisse, die differenziertere und belastbare Aussagen zu den touristischen Effekten von Windkraftanlagen zu Land und zu See ermöglichen.

1 Einleitung

In windkraftintensiven Kreisen trägt die Windkraft schon heute nennenswert zur regionalen Wertschöpfung bei. Dabei steigt sowohl die Anzahl der Anlagen als auch ihre durchschnittliche Leistungstärke und Größe kontinuierlich an. Neben den üblichen Anlagen an Land werden in den letzten Jah-

ren zusätzlich auch Aufstellungsorte im Meer vorgeschlagen (so genannte Off-Shore-Windparks). Damit wächst auch die zukünftige Bedeutung der Küsten als Windkraftanlagen-Standort.

Gleichzeitig gehören die Küsten zu den bedeutendsten Urlaubsregionen. 6,6 Mio. Deutsche haben im vergangenen Jahr in den Küstenregionen der nördlichen Bundesländer Urlaub gemacht. Einige dieser Urlauber waren sogar mehrfach im Jahr an der Küste zu Gast. So gingen im Jahr 2003 immerhin 8% der insgesamt 66 Mio. Urlaubsreisen der Deutschen (= 5,3 Mio. Urlaubsreisen) an die deutsche Nord- oder Ostsee. Außerdem interessierten sich im Januar 2004 ganze 37% der deutschen Wohnbevölkerung ab 14 Jahren für einen Urlaub an den deutschen Küsten. In den nächsten drei Jahren werden demnach 23,7 Mio. Deutsche „ziemlich sicher“ oder „wahrscheinlich“ ihren Urlaub an der heimischen Küste verbringen. Das größte Interesse besteht dabei an der Ostseeküste (Mecklenburg-Vorpommern 20%, Schleswig-Holstein 19%), aber auch die Nordseeküste verfügt über ein großes Potenzial an Interessenten (Schleswig-Holstein 19%, Niedersachsen 14%) (F.U.R; RA 2004).

Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen stellen sich Verantwortliche auf Seiten der Windkraftbetreiber, in der Landes- und Kommunalplanung und im Tourismus gleichermaßen die Frage nach den Auswirkungen der Windkraftnutzung auf den Tourismus. Die öffentliche Diskussion zu dieser Frage ist vielfältig. Am häufigsten werden Störungen des Landschaftseindruckes als Nachteil der Windkraftanlagen beschrieben, die die Urlaubszufriedenheit beeinträchtigen könnten. Für geringe Distanzen werden zusätzlich akustische (Lärm) oder optische Störungen (Lichtreflexe) genannt. Dabei wird oft angenommen, dass diese Störungen mit zunehmender Zahl von Windkraftanlagen wachsen. Grundsätzlich ist nicht auszuschließen, dass es eine Art „kritischen Grenzwert“ gibt, d.h. bis zu einer gewissen Zahl (oder Dichte) von Windkraftanlagen sind die Effekte auf die touristische Nachfrage kaum bedeutsam, werden aber jenseits dieser kritischen Grenze sprunghaft deutlich.

Andererseits ist aber auch nicht auszuschließen, dass die Windkraftnutzung keine messbaren Effekte auf die touristische Nachfrage hat. Selbst positive Effekte sind durchaus denkbar. Weiter ist zu bedenken, dass die Effekte in unterschiedlichen Nachfragegruppen unterschiedlich sein können; in diesem Fall würde sich die Struktur der Gäste ändern.

Die Vielschichtigkeit der Wirkungsmöglichkeiten von Windkraftanlagen auf den Tourismus macht deutlich, dass für die Beantwortung der Frage nach den touristischen Effekten von Windkraftanlagen eine Abwägung theoretischer Überlegungen allein nicht ausreicht. Aktuelle differenzierte Befragungen der Gäste selbst sind unabdingbar, um ein genaues Bild der Auswirkungen von Windkraftanlagen auf die touristische Nachfrage zu erhalten.

2 Mehrdimensionaler Untersuchungsansatz

Um die Wünsche und Bedürfnisse der bisherigen und der potenziellen Gäste besser kennen zu lernen, hat das *N.I.T.* einen vierstufigen Untersuchungsplan erarbeitet. Die einzelnen Arbeitsschritte bauen aufeinander auf und ergänzen sich in ihren Aussagen. Durch die Kombination der Ergebnisse aus den vier Teilen können Erkenntnislücken aus den Einzelschritten geschlossen und zu einem umfassenden Gesamtbild verbunden werden. Die Untersuchungsschritte sind im Einzelnen:

1. Statistische Analyse ausgewählter Orte
2. Repräsentative Bevölkerungsbefragung
3. Gästebefragung in Urlaubsorten
4. Gruppendiskussionen

2.1 Statistische Analyse ausgewählter Orte

Die statistische Analyse untersucht den Einfluss der Windkraftnutzung auf die touristische Entwicklung anhand von „harten“ Daten über das Gästeaufkommen aus Landesstatistiken und Bestandsdaten über Windkraftanlagen und sucht nach Korrelationen. Im Gegensatz zu den „weichen“ Daten aus der Marktforschung sind diese Auswertungen jederzeit wiederholbar und geben damit „gerichts-feste“ Fakten wieder.

2.2 Bevölkerungsbefragung

Zunächst werden Reisende gefragt, unabhängig davon, ob sie in der betroffenen Region Urlaub gemacht haben (um auch solche Personen zu erfassen, die z.B. wegen der Windkraftanlagen nicht in der Region Urlaub machen). Sie können z.B. Auskunft geben, was aus ihrer Sicht gegen die Region als Urlaubsziel spricht und wie sie die Urlaubs-Relevanz von Windkraftanlagen einschätzen. Wichtig ist hierfür aber auch ein Vergleich mit möglichen anderen Störungen des Landschaftsbildes.

Um Aufschluss darüber zu erhalten, ob Windkraftanlagen von den Befragten im Urlaub als Störung empfunden werden und ob bestimmte Personengruppen empfindlicher auf sie reagieren als andere, wird deshalb eine repräsentative Bevölkerungsbefragung durchgeführt. Im Fragenprogramm sind folgende Themen enthalten:

1. Interesse an einem Urlaub in der betroffenen Region
2. Gründe für nachlassendes Interesse an einem Urlaub in dieser Region
3. Sympathieeinschätzung von ausgewählten Reisezielen
4. Erfahrung mit Reisezielen
5. Mögliche ästhetische Beeinträchtigung von Urlaubslandschaften

2.3 Gästebefragung in Urlaubsorten

Teilen Urlauber vor Ort die in der Bevölkerungsbefragung identifizierten Ansichten über Windkraftanlagen? Unterscheiden sich die Ansichten der Gäste in Abhängigkeit vom Urlaubsort, also je nachdem ob in diesem Ort Windkraftanlagen vorhanden sind oder nicht? Diese Fragen werden in Untersuchungsschritt 3 geprüft. Zur Ermittlung der Einstellungen, Bewertungen und Absichten der Gäste wird eine standardisierte Befragung an mehreren Urlaubsorten durchgeführt. Inhaltlich decken die Fragen neben einem Standardteil rein touristischer Fragen (verkürzte Version des Fragebogens zur Gästebefragung in Schleswig-Holstein 1998) folgende Themen ab:

- Bereitschaft für einen erneuten Urlaub in der Gemeinde,
- Gründe für eine Abwanderungsabsicht (bei denjenigen, die nicht wiederkommen wollen),
- Mögliche Gründe für eine Abwanderung (bei denjenigen, die eigentlich gerne wiederkommen wollen),
- Bewertung der örtlichen Windkraftanlagen im Vergleich zu anderen markanten Landschaftsmerkmalen,
- Relevanz der Windkraftanlagen für den aktuellen Urlaub (ebenfalls im Vergleich zu anderen Ortsmerkmalen),
- Bewertung verschiedener Windkraftanlagen-Zukunfts-Szenarien.

2.4 Gruppendiskussionen

Welche Sichtweisen sich ergeben, wenn man mit potenziellen Urlaubern explizit über Windkraftanlagen diskutiert, zeigen die im vierten Untersuchungsschritt geführten Gruppendiskussionen. Unabhängig von diesen bewussten Äußerungen und Ansichten werden zusätzlich emotionale Wirkungen von Windkraftanlagen in verschiedenen Urlaubsszenarien anhand von manipuliertem Bildmaterial gemessen.

Da es in verschiedenen Regionen bisher keine Off-Shore-Windkraftanlagen gibt, beurteilten die Befragten diese Windkraftform in den vorangegangenen Arbeitsschritten nur auf Grundlage ihrer individuellen unterschiedlichen Vorstellung von derartigen Anlagen. Dies schränkt die Vergleichbarkeit der Ergebnisse ein. In der Gruppendiskussion ist es dagegen möglich, über das gezeigte Bildmaterial sicher zu stellen, dass alle Testpersonen das gleiche Bild vor Augen haben. Auch in dieser Hinsicht liefert der vierte Arbeitsschritt wertvolle Ergänzungen zu den Arbeitsteilen 1-3. Schließlich erlaubt die persönliche Diskussion das Eingehen auf Einzelfragen, die bisher nicht in den Befragungen zur Sprache kamen.

3 Fallstudie

Am Beispiel von Schleswig-Holstein soll nun gezeigt werden, welche touristischen Effekte Windkraftanlagen in der Küstenzone haben können. Das Institut für Tourismus- und Bäderforschung in Nordeuropa GmbH (*N.I.T.*) untersuchte diese Fragestellung im Zeitraum von August 1999 bis zum September 2000. Auftraggeber der Studie war der Tourismusverband Schleswig-Holstein gemeinsam mit den Gemeinden Kellenhusen und Grömitz, der Industrie- und Handelskammer zu Lübeck, dem Bundesverband Windenergie, der Schleswig-Holsteinischen Offshore-Windpark Verwaltungs-GmbH (SHOW VG), der Energiestiftung des Landes Schleswig-Holstein und dem Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus Schleswig-Holstein.

3.1 Problemstellung

Ausgangspunkt für die Beauftragung dieser Studie war der Wunsch, mehr Klarheit und belastbare Informationen über touristische Effekte von Windkraftanlagen in Schleswig-Holstein zu erhalten. Eine besondere Aktualität hatte dabei das Thema der Off-Shore-Windkraftanlagen. Nachfolgend eine Auswahl der Fragen, die mit Hilfe der Studie beantwortet werden sollten:

- Welche Störungen werden in welchem Maße von den Gästen wahrgenommen?
- Haben Landschaftsbildveränderungen Einfluss auf die touristische Nachfrage, das touristische Angebot und zukünftige Verhaltensweisen der Gäste?
- Unterscheiden sich die Urteile von Touristen und Anwohnern gegenüber Landschaftsbildveränderungen?
- Unterscheiden sich unterschiedliche Gästegruppen in ihrem Urteil?
- Werden Einzelanlagen, Gruppenanlagen und Off-Shore-Anlagen sowie ihre jeweiligen Standorte unterschiedlich bewertet?
- Welches Image haben Windkraftanlagen?
- Bietet die Windnutzung Chancen für das touristische Marketing?

3.2 Zentrale Ergebnisse

Störwirkung von Windkraftanlagen

- Spontan findet nur ein sehr kleiner Personenkreis Windkraftanlagen (WKA) störend, explizit befragt, erhalten sie im Vergleich zu anderen Landschaftsbildveränderungen eine mittlere Störwirkung zugeschrieben.
- Urlaubslandschaften mit Windkraftanlagen wirken emotional negativer als Urlaubslandschaften ohne bauliche Landschaftsbildveränderungen.
- Bestimmte Personengruppen bezeichnen Windkraftanlagen häufiger als störend, und zwar: Urlauber, die sich ansonsten wenig durch Landschaftsbildveränderungen gestört fühlen, Stammurlauber, Personen mit ablehnender Haltung gegenüber Windkraft bzw. Befürwortung von herkömmlicher Energielieferung, Personen im mittleren oder hohen Alter, hoher Schulbildung und solche aus Großstädten.
- Einzelne Anlagen stören am wenigsten, gefolgt von Off-Shore-Anlagen. Gruppenanlagen stören am meisten.

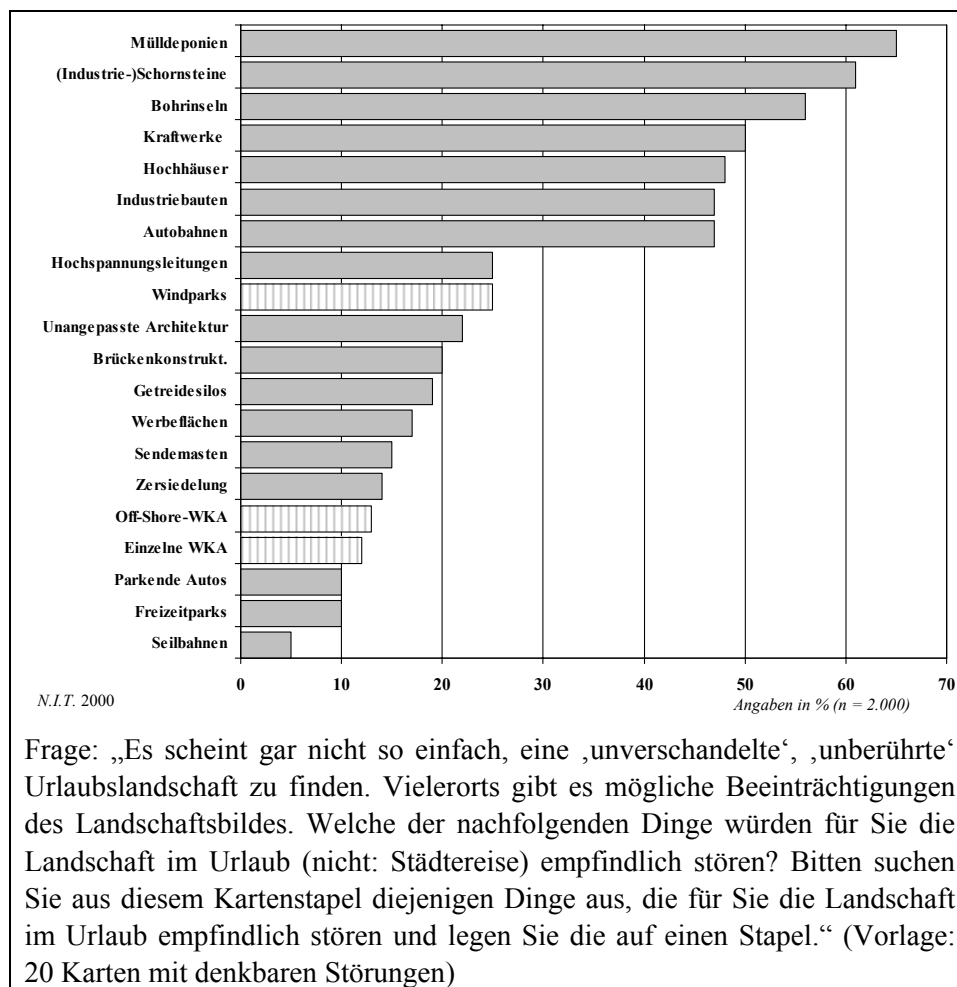


Abb. 1: Rangfolge störender Landschaftsmerkmale (Bevölkerungsbefragung)

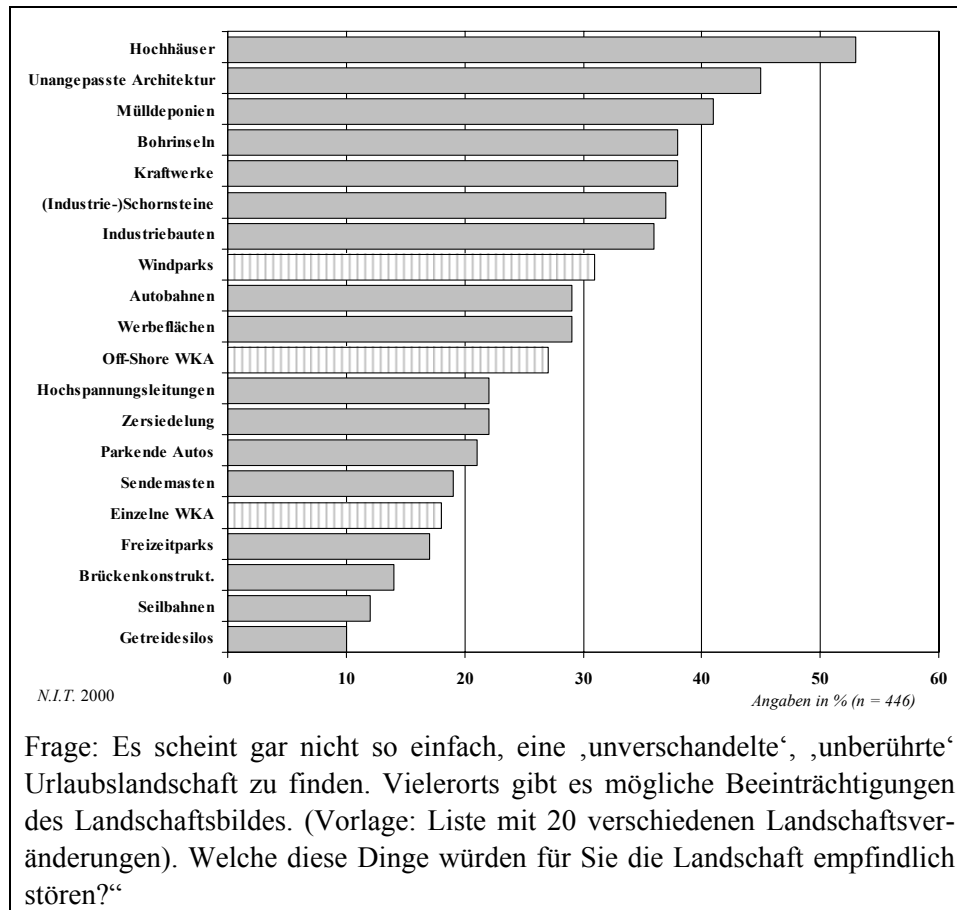


Abb. 2: Rangfolge störender Landschaftsmerkmale (Gästepbefragung)

Fernbleiben aus Urlaubsorten aufgrund von Windkraftanlagen

- Windkraftanlagen sind für einen sehr geringen Teil der Befragten ein Grund dafür, den Urlaub zukünftig in anderen Orten verbringen zu wollen.
- Im Vergleich zu anderen Landschaftsbildveränderungen werden Windkraftanlagen mittelhäufig als möglicher Grund zum Fernbleiben vom Urlaubsort genannt.
- Am ehesten aufgrund von Windkraft vom Urlaubsort wegbleiben würden: Urlauber, die sich ansonsten wenig durch Landschaftsbildveränderungen gestört fühlen, Stammurlauber, Personen mit ablehnender Einstellung oder Befürwortung von herkömmlicher Energiegewinnung, Personen mittleren und hohen Alters, Personen mit hohem Einkommen und solche aus Großstädten.
- Gruppenanlagen stellen am ehesten einen Grund zum Fernbleiben vom Urlaubsort dar, gefolgt von Off-Shore-Anlagen. Einzelne Anlagen fallen kaum ins Gewicht.
- Windkraft-kritische Personen wollen genauso wie die Durchschnittsurlauber zum großen Teil wieder Urlaub im selben Urlaubsort machen, auch wenn in dessen Umfeld Windkraftanlagen installiert sind.
- Die Übernachtungs- und Bettenanzahl in Urlaubsorten zeigt sich unbeeinflusst vom Vorhandensein von Windkraftanlagen.
- Ein Grenzwert für eine bestimmte Dichte von Windkraftanlagen, ab dem touristische Auswirkungen von Windkraftanlagen erkennbar sind, konnte nicht festgestellt werden.
- Veränderungen der touristischen Angebots- oder Gästestruktur sind nicht erkennbar.

Standorte von Windkraftanlagen

- Einzelne Windkraftanlagen werden sowohl weitab als auch in der Nähe des Urlaubsortes relativ gut toleriert. Ein ausreichender Abstand zu Unterkunft, Strand, Rad- und Wanderwegen sollte aber gegeben sein.
- Gruppen von Windkraftanlagen sind verhältnismäßig unkritisch, wenn sie weitab des Urlaubsortes stehen.
- Windkraftanlagen am Urlaubsort werden eher toleriert als in der Nähe des Wohnortes.

Image von Windkraftanlagen

- Positive Komponenten sind die assoziierte Fortschrittlichkeit und Umweltfreundlichkeit. Windenergie wird als sympathische Energieform empfunden.
- Als negative Komponenten dominieren die Zerstörung des Landschaftsbilds, Lärmbelastung und die Schädigung des jeweiligen Ökosystems.

Ausbau von Windkraftanlagen

- Der weitere Ausbau von Windkraftanlagen wird überwiegend befürwortet; insbesondere wenn eine gewisse öffentliche Lenkung der Standorte gewährleistet wird und Windkraftanlagen nicht in beliebiger Dichte überall im Land installiert werden („Wildwuchs“).
- Ein Hauptargument in der Befürwortung basiert darauf, dass jeder einzelne einen hohen Energiebedarf hat. Wer auf einen gewissen Lebensstandard nicht verzichten will, muss auch den Bau von Kraftwerken akzeptieren, so die Meinung der Gruppendiskussionsteilnehmer.

3.3 Fazit der Fallstudie

Die Nutzung von Standorten im Meer für die Errichtung von leistungsstarken Windparks wurde und wird für die Küsten Schleswig-Holsteins kontrovers diskutiert. Neben ökologischen Bedenken werden dabei auch negative Auswirkungen auf den Tourismus für denkbar gehalten. Es war daher ein besonderes Anliegen der Auftraggeber, auch für den Off-Shore-Bereich Informationen zu touristischen Effekten von Windkraftanlagen zu erhalten.

Die Ergebnisse der Studie belegen eindeutig, dass sich Befürchtungen, die Präsenz von Windkraftanlagen führe zu empfindlichen Beeinträchtigungen für die Tourismuswirtschaft, zurzeit nicht bestätigen lassen. Wohl werden Windkraftanlagen von den Gästen wahrgenommen, als Veränderung des Landschaftsbildes bemerkt und z.T. als störend kritisiert; eine Veränderung des Reiseverhaltens und damit eine wirtschaftliche Bedeutung für den Tourismus ist aufgrund der Begegnung mit Windkraftanlagen im Urlaub zum Untersuchungszeitpunkt jedoch nicht erkennbar gewesen. Eine unmittelbare Gefahr für den Tourismus durch Windkraftanlagen gab es zu dieser Zeit nicht.

Auch ein weiterer Ausbau der Windkraft wurde von den Gästen nicht grundsätzlich abgelehnt, von der Mehrheit der Befragten sogar begrüßt. Die Akzeptanz für zusätzliche Anlagen wird vor allem von folgenden Faktoren beeinflusst:

- Nähe der Anlage zum Urlaubsgeschehen (keine Aufstellung in direkter Nachbarschaft, z.B. von Ferienwohnungen und Stränden).
- Aufstellungsform und Dichte der Anlagen (lieber drei Einzelanlagen als drei Windparks pro Flächeneinheit, jedoch auch kein Wildwuchs von Einzelaufstellungen; nicht an jedem Haus eine Anlage dann lieber als Gruppe).

- Einstellung zur Windkraft (je positiver das Image der Windkraft, desto höher ist auch die Akzeptanz bei den Urlaubsgästen).

Grenzwerte für die genannten Faktoren lassen sich auf Grundlage der Untersuchung allerdings nicht benennen. Der Vergleich von Standorten mit unterschiedlicher Dichte von Windkraftanlagen ergab keine Anhaltspunkte dafür, dass in einem der Orte bereits ein kritischer Wert erreicht worden wäre. Dies bedeutet jedoch nicht, dass es keinen solchen Grenzwert gibt. Zudem wird ein denkbarer Grenzwert nicht statisch sein, sondern wird sich z.B. mit der Einstellung der Gäste zur Windkraft über die Zeit in die eine wie in die andere Richtung verändern können.

Der kritische Grenzwert hängt von der Ausprägung zweier Dimensionen ab, die sich wechselseitig beeinflussen:

- Die negative emotionale Wirkung von Windkraftanlagen als Landschaftsbestandteil.
- Die überwiegend positive kognitive Bewertung der Windenergienutzung.

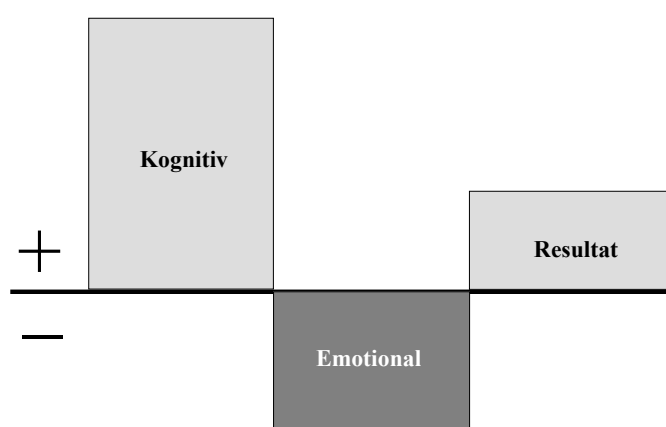


Abb. 3: Wechselwirkung der Dimensionen

Gerade für die emotionale Seite spielt das Verhalten der Gastgeber eine nicht zu unterschätzende Rolle. Engagierte Proteste gegen befürchtete Störungen durch Windkraftanlagen können ggf. als eine Art selbsterfüllende Prophezeiung über die Beeinflussung der Gästeeinstellung zur Windkraft deren Toleranz gegenüber den Windmühlen verringern und damit den Grenzwert senken. Eine offensive, positive Haltung gegenüber der Windkraft im Urlaubsort, z.B. begleitet durch touristisches Marketing mit der „Attraktion Windpark“, dürfte dagegen die Wahrnehmung von Windkraftanlagen bei den Gästen eher positiv beeinflussen und möglicherweise sogar einen werblichen Vorteil gegenüber anderen Standorten mit sich bringen.

Im Rahmen der Studie wurde die Wirkung von Windkraftanlagen auf Urlaubsgäste zudem mit der Wirkung anderer anthropogener Landschaftsbestandteile ins Verhältnis gesetzt. Es zeigt sich, dass Windkraftanlagen trotz ihrer optischen Auffälligkeit relativ selten als störend empfunden werden, während Landschaftsbildveränderungen mit schlechterem Image (wie Mülldeponien, Kraftwerke, Hochhäuser oder Autobahnen) deutlich häufiger als negative Beeinträchtigung wahrgenommen werden.

Für den Sonderbereich Off-Shore schließlich konnte eine Abhängigkeit zwischen der Gästetoleranz gegenüber Windkraftanlagen und dem Abstand der Anlagen zu touristisch genutzten Stränden beobachtet werden. Die in der Gruppendiskussion simulierte Entfernung von 15 Kilometern scheint für

den dabei angenommenen Anlagentyp mit einer Nabenhöhe von 80 Metern unkritisch. Eine grundsätzliche Ablehnung von Windmühlen auf See war bei den Befragten in keinem der Untersuchungsteile festzustellen. Die Akzeptanz von Off-Shore-Anlagen war im Vergleich zu Gruppen von Anlagen an Land sogar eher größer. Sie wurden als geringerer Eingriff in die Landschaft empfunden.

Für künftige Planungen empfiehlt sich aufgrund der Vielschichtigkeit des Themas ein insgesamt behutsames Vorgehen im Ausbau der Windkraft. Es gibt touristische Effekte durch Windkraftanlagen, die, wenn sie auch bislang keine wirtschaftliche Bedeutung erreicht haben, zusammen mit anderen ökologischen, ökonomischen und sozialen Fragen abgewogen werden wollen.

4 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der in Schleswig-Holstein durchgeführten Studie bestätigen die Notwendigkeit des umfassenden Untersuchungsansatzes. Die Studie liefert detaillierte Auskünfte über Vorlieben und Abneigungen unterschiedlicher Gästegruppen und kann so als Entscheidungshilfe vor Ort Unterstützung leisten. Es kann davon ausgegangen werden, dass mit der gleichen Methode auch anderen Regionen wertvolle Informationen zur Verfügung gestellt werden könnten. Für die Beantwortung der Frage nach den touristischen Effekten von Windkraftanlagen ist der mehrdimensionale Ansatz demnach hervorragend geeignet.

5 Literatur:

FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT URLAUB UND REISEN E.V. (F.U.R) (2004): Reiseanalyse 2004

Adresse

Dipl.-Biol. Wolfgang Günther
Bente Zahl (M.A.)
Institut für Tourismus- und Bäderforschung in Nordeuropa GmbH (N.I.T.)
Wrangelstraße 16
24105 Kiel
Germany

E-mail: info@nit-kiel.de

Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten

Jürgen Jensen und Christoph Mudersbach

Forschungsstelle Wasserwirtschaft und Umwelt (fwu) an der Universität Siegen

Summary

Topic of this study is a statistical investigation of long-term time series of regular observations of water levels - Mean Tidal Low Water (MLW), Mean Tidal High Water (MHW), Mean Tidal Range (MTR) and Mean Water Levels (MW) - of 12 tidal gauges in the German North Sea (MLW, MHW, MTR and MW) and 4 gauges at the German Baltic (MW) since the beginning until 2001. Additionally to the analyses of the mean annual water levels of the gauging stations along the German North Sea and Baltic coastlines standardized mean time series of the Islands and Coastlines in the North Sea and one standardized time series of the Baltic were calculated. For these time series several adaptation functions were examined so that a forecast until 2020 could be estimated. In between 1955 and 1960 significant changes in the standardized mean time series can be observed. From this time on an increase of the MHW and a smaller decrease or stagnation of MLW can be stated. This resulted in an extraordinary increase of MTR at the coastline of almost 10 % since 1955. MW shows a relative constant increase at German North Sea coastlines, which is confirmed in the Baltic. The observed changes are not only influenced by local anthropogenic measures along the coastlines, but also by variations of the global mean sea level or world wide climatic changes.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Untersuchung ist eine statistische Analyse der langjährigen Wasserstandszeitreihen der Jahreshauptzahlen - mittleres Tideniedrigwasser (MTnw), mittleres Tidehochwasser (MThw), mittlerer Tidehub (MThb) und mittleres Tidemittelwasser (MTmw) - von 12 Nordsee- (MTnw, MThw, MThb und MTmw) und 4 Ostseepegeln (MW) bis zum Jahr 2001 durchgeführt worden. Neben den durchgeführten Auswertungen für die einzelnen Zeitreihen der Nord- und Ostseepegel wurden auch mittlere normierte Wasserstandszeitreihen für die Insel- und Küstenpegel der Nordsee und eine mittlere normierte Wasserstandszeitreihe der Ostsee ermittelt. Für diese Zeitreihen sind verschiedene Anpassungsfunktionen berechnet worden, mit deren Hilfe auch Abschätzungen bis zum Jahr 2020 vorgenommen werden können. Die Ergebnisse zeigen, dass sich zwischen 1955 und 1960 signifikante Änderungen des Tideverhaltens in der Deutschen Bucht eingestellt haben. Ab diesem Zeitpunkt steigen die Tidehochwasser signifikant an und die Tideniedrigwasser weisen einen leicht fallenden bzw. stationären Trend auf. Dies führt zu einem außerordentlich starken Anstieg des Tidehubes, d.h. eine Zunahme des Tidehubes um knapp 10 % an den Küstenpegeln der Nordsee seit etwa 1955. Beim Mittelwasser ist an der Nordseeküste ein relativ konstanter Anstieg zu erkennen, der in den Zeitreihen der Ostseepegel bestätigt wird. Die aufgeführten Veränderungen sind nicht allein auf lokale Baumaßnahmen an den Küsten zu begründen, sondern weisen auf globale Entwicklungen hin.

1 Einleitung

Die ersten Ergebnisse und Präsentationen zur Wasserstandsentwicklung an der deutschen Nordseeküste auf der Basis von Zeitreihen bis zum Jahr 1983 von FÜHRBÖTER und JENSEN im Jahr 1984 mit Säkularrends der mittleren Tidehochwasser (MThw) von 25 bis 64 cm/100 Jahre wurden von der Fach-

welt äußerst kontrovers diskutiert und stießen damals überwiegend auf Ablehnung (JENSEN 1984, FÜHRBÖTER und JENSEN 1985). Heute sind Säkularrends in einer Größenordnung von 50 cm/100 Jahre für das MThw an der deutschen Nordseeküste weitestgehend akzeptiert und in entsprechenden Regelwerken für Aufgaben im Küsteningenieurwesen berücksichtigt (s. auch IPCC 2001, JENSEN UND FRANK 2003). Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Aktualisierung der Untersuchungen zur Wasserstandsentwicklung an den deutschen Küsten bis zum Jahr 2001 auf der Grundlage langfristiger Pegelaufzeichnungen. Diese sog. eustatischen Veränderungen des globalen Meeresspiegels sind dabei von Veränderungen der Trennlinie Meer-Land zu unterscheiden, die durch tektonische Bewegungen aus geologischen Prozessen entstehen. Die tektonischen Effekte sind allerdings an der deutschen Nord- und Ostseeküste von untergeordneter Bedeutung.

Die eustatischen Änderungen des Meeresspiegels (sog. säkulare Änderungen) sind Folgen von globalen Klimaänderungen, die im wesentlichen noch Folgeerscheinungen der letzten Eiszeit sind. Besondere Bedeutung hat dabei die aktuelle Diskussion, in welchem Maße diese natürlichen Entwicklungen bereits von anthropogenen Einflüssen (Treibhauseffekt) überlagert werden. Die Schwankungen der Meeresspiegellagen sind dabei nicht über die jeweilige Beobachtungslänge stationär; diese zeitlichen Veränderungen der mittleren Tidewasserstände MTnw, MThw und des mittleren Tidehubes MThb in der Nordsee und der mittleren Wasserstände MW in der Ostsee sind Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen.

Nachdem die Relativbewegung zwischen Land- und Wasserniveau von SCHÜTTE (1908) richtig erkannt, aber als neuzeitliche Senkungserscheinung interpretiert wurde (s. auch RIETSCHEL 1933), wurde von LÜDERS (1936) erstmalig ein Anstieg der Wasserspiegellage der Nordsee festgestellt. Der eustatische bzw. säkulare Meeresspiegelanstieg wurde für den Bereich der Nordsee bzw. an einzelnen Pegeln u. a. von GAYE (1951), HUNDT (1955), ROHDE (1968) und LIESE (1979) behandelt. In JENSEN (1984) und FÜHRBÖTER und JENSEN (1985) findet sich eine Auswertung der Arbeiten zur Wasserstandsentwicklung an der deutschen Nordseeküste sowie zu weltweiten Wasserstandsänderungen, weiterhin finden sich hier die Anforderungen an die Datensätze und die methodischen Ansätze (s. auch JENSEN 1985, JENSEN ET. AL 1992, JENSEN UND MUDERSBACH 2002); in JENSEN (1998) und JENSEN UND MUDERSBACH (2004) sind entsprechende Untersuchungen für die deutsche Ostseeküste aufgeführt. Weitere aktuelle Untersuchungen zum Mean Sea Level (MSL) finden sich in IPCC (2001) und HUPFER ET AL. (2003).

2 Pegeldaten

Für die Auswertung der mittleren Tidewasserstände sind nur solche Pegel geeignet,

- die ausreichend lange Zeitreihen aufweisen,
- die qualitativ hochwertige Daten in den einzelnen Zeitreihen aufweisen und
- von denen angenommen werden kann, dass an den Pegelorten die Wasserstände nicht wesentlich durch Baumaßnahmen (Baggerungen, Eindämmungen usw.) oder durch das Oberwasser (bei Tideästuarien) gestört wurden.

Nach diesen Gesichtspunkten wurden 12 Pegel an der deutschen Nordseeküste ausgesucht, von denen sechs auf Inseln gelegen sind (Borkum, Norderney, Wittdün, Helgoland, Leuchtturm „Alte Weser“ und List auf Sylt), vier an den Mündungen großer Tideflüsse (Emden, Wilhelmshaven, Bremerhaven und Cuxhaven) und zwei an kleinen Hafentorten an der Festlandküste (Husum und Dagebüll). An der deutschen Ostseeküste wurden nach den entsprechenden Kriterien an der Festlandküste die Pegel Travemünde, Wismar und Warnemünde sowie auf der Insel Rügen der Pegel Sassnitz ausgewählt. In Abb. 1 ist die Lage der Pegel dargestellt.

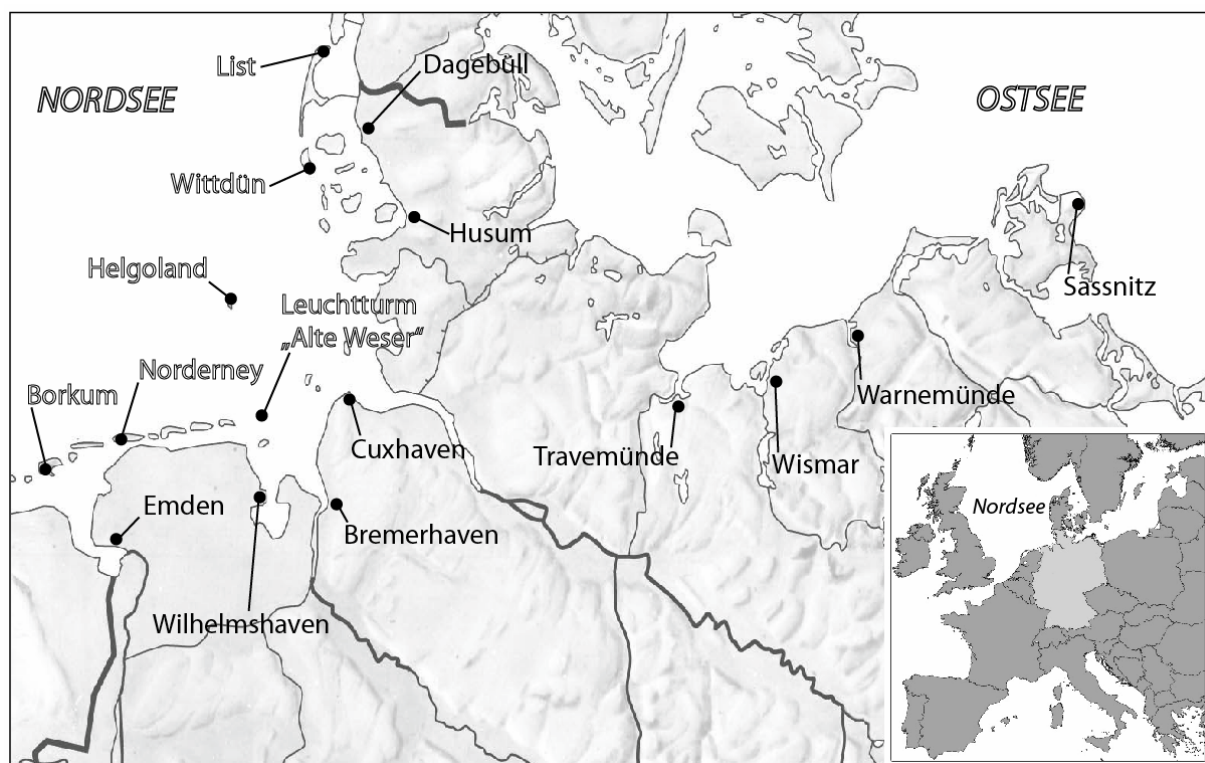


Abb. 1: Lage der verwendeten Pegel an der deutschen Nord- und Ostseeküste

Von diesen Pegeln wurden die Zeitreihen des jeweiligen hydrologischen Jahres (vom 1. November des Vorjahres bis zum 31. Oktober) des MTnw und MThw, der mittlere Tidehub und das berechnete mittlere Tidemittelwasser an der Nordseeküste verwendet. An der Ostseeküste wurden die Zeitreihen der mittleren Wasserstände (MW) auf der Grundlage der 12:00 Uhr Messungen, ebenfalls jeweils für das hydrologische Jahr, herangezogen.

Die Tidewasserstände an der Nordseeküste sind auf NN bezogen. Die Höhenlage der Pegelnullpunkte (PN) der Ostseepiegel ist im Bezugssystem Höhen-Null (HN) festgelegt und beträgt $PN = HN - 514$ cm. Bei der Umrechnung der Pegeldata in das Normal-Null-System (NN) müssen örtliche Systemdifferenzen zwischen dem Höhen-Null- und Normal-Null-System berücksichtigt werden (STIGGE 1989).

3 Datenaufbereitung und Auswerteverfahren

In den beobachteten Wasserstandszeitreihen der einzelnen Pegel sind z.T. Einflüsse aus lokale Besonderheiten und Diskontinuitäten zu berücksichtigen, die auf Baumaßnahmen oder Maßnahmen wie Umsetzen des Pegels, Umstellung von Latten- auf Schreibpegel oder durch Neueinmessungen der Nullpunkte des Pegels hervorgerufen werden. Solche Änderungen können auch allmählich erfolgen, z.B. durch Setzungen. Hier bietet aber die synoptische Betrachtung von 12 Pegeln in der Nordsee bzw. 4 voneinander unabhängigen Pegeln in der Ostsee die wertvolle Möglichkeit, solche Störungen an bestimmten Pegeln aus den Vergleichen erkennen zu können. Dies gilt übrigens auch für Veränderungen der Wasserstände durch örtliche Baumaßnahmen. In den folgenden Auswertungen werden daher die einzelnen Pegelzeitreihen in mittlere normierte Zeitreihen zusammengefasst und mit verschiedenen Funktionen beschrieben

3.1 Berechnung des mittleren Tidemittelwassers (MTmw)

Das Tidemittelwasser ist definiert als der Wasserstand der waagerechten Schwerelinie einer Tidekurve. Für das MTmw sind international die Begriffe Mean Water Level (MWL) oder Mean Sea Level (MSL) gebräuchlich. Die MTmw bzw. MSL-Zeitreihen an der Nordsee liegen nicht vor und müssen zunächst berechnet werden. Das MTmw kann mit Hilfe des ortsgebundenen k-Wertes, der die Abweichung des MTmw zum Tidehalbwasser angibt, abgeschätzt werden. Der k-Wert wird berechnet, indem für einen Pegel die einzelnen Tmw durch einen Flächenausgleich zwischen zwei benachbarten Tnw und einem dazwischen liegenden Thw bestimmt werden.

Die MTmw-Zeitreihen der Nordseepegel ergeben sich danach zu: $MTmw = MThw - k \cdot MThb$

Für die vorliegende Untersuchung wurde jeweils aus den einzelnen k-Werten ein arithmetischer mittlerer k-Wert für die Küstenpegel und die Inselpegel gebildet. Diese Mittelung ist hinreichend genau, da die einzelnen k-Werte nur geringfügig voneinander abweichen. Die zu Grunde gelegten k-Werte basieren auf Untersuchungen von Zeitreihen bis etwa 1985, jedoch ist die Annahme eines konstanten k-Wertes bis zum Jahr 2001 auf Grund der geringen zu erwartenden Änderungen ausreichend. Die MTmw-Zeitreihen weisen im Vergleich zu den MThw- und MTnw-Zeitreihen eine geringere Genauigkeit auf. Der k-Wert eines Pegels ist allerdings nicht zeitunabhängig; für die vorliegenden Untersuchungen beträgt der k-Wert der Inselpegel 0,47 und der der Küstenpegel 0,46.

3.2 Berechnung der normierten mittleren Pegel

Für die Analysen werden die einzelnen Pegel zu Gruppen zusammengefasst und für jede Gruppe ein mittlerer Pegel ermittelt. Die normierte mittlere Pegelzeitreihe ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der auf den jeweiligen Mittelwert der Zeitreihe normierten Werte (s. auch FÜHRBÖTER 1986).

Formel (z.B. MThw):

$$MThw_i(\text{norm.}) = \frac{\sum_{j=1}^n MThw_{ij} - MMThw_j}{n}$$

mit:

i: Jahre

n: Anzahl der Pegel

Mit diesem Verfahren werden für die Nordsee 2 normierte (synthetische) mittlere Pegel erzeugt:

- normierter Inselpegel Nordsee (jeweils MThw, MTnw, MThb, MTmw)
- normierter Küstenpegel Nordsee (jeweils MThw, MTnw, MThb, MTmw)

3.3 Smoothing

Für die normierten Zeitreihen wird zunächst ein gleitender Durchschnitt gebildet, der die vorhandene Zeitreihe glättet; dadurch sind zeitliche Entwicklungen der Zeitreihe leichter zu erkennen. Bei der Berechnung eines gleitenden Durchschnitts wird jeder Datenpunkt durch das arithmetische Mittel der benachbarten Datenpunkte innerhalb eines gewählten Zeitfensters ersetzt. Dieses Verfahren ist gleichwertig zur Anwendung eines Tiefpassfilters. Die berechneten Datenpunkte werden bestimmt nach:

$$y_s(i) = \frac{1}{2N+1} (y(i+N) + y(i+N-1) + \dots + y(i-N))$$

Dabei ist N die Anzahl der benachbarten Punkte auf jeder Seite, so dass 2N+1 der gewählte Zeitabschnitt ist. Zur Berücksichtigung der Nodaltide (T = 18,613 Jahre) wurde für das Zeitfenster eine Län-

ge von 19 Jahren gewählt; damit ist $N = 9$. Die oben angegebene Formel setzt voraus, dass es jeweils 9 benachbarte Datenpunkte auf beiden Seiten gibt. Dies ist jedoch bei den ersten 9 und letzten 9 Werten einer Zeitreihe nicht gegeben. In diesem Fall wird der geglättete Wert nur aus der Anzahl der vorhandenen Werte bestimmt. Damit sind der erste und letzte geglättete Wert identisch mit den vorhandenen Werten.

3.4 Linearer Trend

Zur Beschreibung eines säkularen Meeresspiegelanstieges wird in der Regel eine lineare Ausgleichsfunktion an die Zeitreihe angepasst. Der säkulare Trend beschreibt die mittlere Steigung der linearen Anpassungsfunktion, bezogen auf eine Zeitspanne von 100 Jahren. Der Vorteil einer linearen Funktion liegt in der einfachen Form der Ausgleichsgeraden, jedoch lassen sich Zeitabschnitte innerhalb einer Zeitreihe mit unterschiedlich starkem Anstiegs- oder Senkungsverhalten nicht gut beschreiben. Zu diesem Zweck kann die Zeitreihe in verschiedene Teilabschnitte unterteilt werden, für die jeweils eine Ausgleichsfunktion bestimmt wird. Die Entscheidung, welche Zeitreihenabschnitte untersucht werden, ist eine subjektive Entscheidung des Bearbeiters, die sich im wesentlichen auf zwei Merkmale stützt. Zum einen wird eine visuelle Überprüfung der Zeitreihe vorgenommen, bei der markante Punkte gesucht werden, an denen sich das Steigungsverhalten ändert. Dazu ist das zuvor berechnete gleitende Mittel eine nützliche Hilfestellung. Zum anderen ist darauf zu achten, dass eine Zeitspanne betrachtet wird, die ein Vielfaches der Periode der astronomischen Nodaltide ($T = 18,61$ Jahre) ist. Die Nodaltide ist die einzige Tide mit einer Periode ≥ 1 , die einen nachweisbaren Einfluss auf das Tidegeschehen hat (JENSEN ET AL. 1992).

Um eine lineare Ausgleichsfunktion an die Zeitreihe bestmöglich anzupassen, wird die Methode der kleinsten Abstandsquadrate verwendet. Eine lineare Ausgleichsfunktion ist definiert als eine Gleichung, deren Koeffizienten linear sind:

$$y = p_1 x + p_2$$

In der vorliegenden Untersuchung wurden jeweils zwei lineare Ausgleichsfunktionen für eine Zeitreihe berechnet. Die visuelle Überprüfung der Zeitreihen ergibt, dass sich in der Zeitspanne von ca. 1950 bis 1970 eine Änderung des Tideverhaltens eingestellt hat. Mit der zusätzlichen Maßgabe, dass die untersuchten Zeitabschnitte ein Vielfaches der Nodaltide sein sollen, ergibt sich damit ein zu untersuchender Zeitabschnitt von 1965 bis 2001 (Zeitspanne: 37 Jahre $\approx 2 \cdot 18,613$ Jahre). Die zweite Trendfunktion wird für die gesamte Zeitreihe bestimmt.

Bei der Analyse von Zeitreihen mit unterschiedlichen Längen gilt zu beachten, dass die lineare Trendfunktion der normierten mittleren Pegelzeitreihe nicht zwangsläufig identisch mit dem arithmetischen Mittel der Einzelrends sein muss. Die Frage nach der „Richtigkeit“ des Ergebnisses ist nicht eindeutig zu beantworten, da die Bildung eines einfachen arithmetischen Mittels von Einzelrends, basierend auf stark unterschiedlich langen Zeitreihen, deutliche Aussageunsicherheiten hat. Die Trendangaben für die Analysen von 1965 bis 2001 sind demgegenüber uneindeutig, da für alle Pegel innerhalb dieser Zeitspanne Daten vorliegen und somit das arithmetische Mittel der Einzelrends dem Trend der normierten mittleren Zeitreihe für diese Zeitspanne entspricht.

4 Ergebnisse der Zeitreihenuntersuchungen

In Abb. 2 bis 9 und in Tabelle 1 sind die normierten mittleren Zeitreihen der MThw-, MTnw-, MThb- und MTmw-Zeitreihen der Insel- und Küstenpegel der Nordsee dargestellt und in Tabelle 1 sind die Säkularrends der einzelnen Pegel aufgeführt. In Abb. 10 und in Tabelle 2 sind die entsprechenden Ergebnisse für die Ostsee aufgeführt.

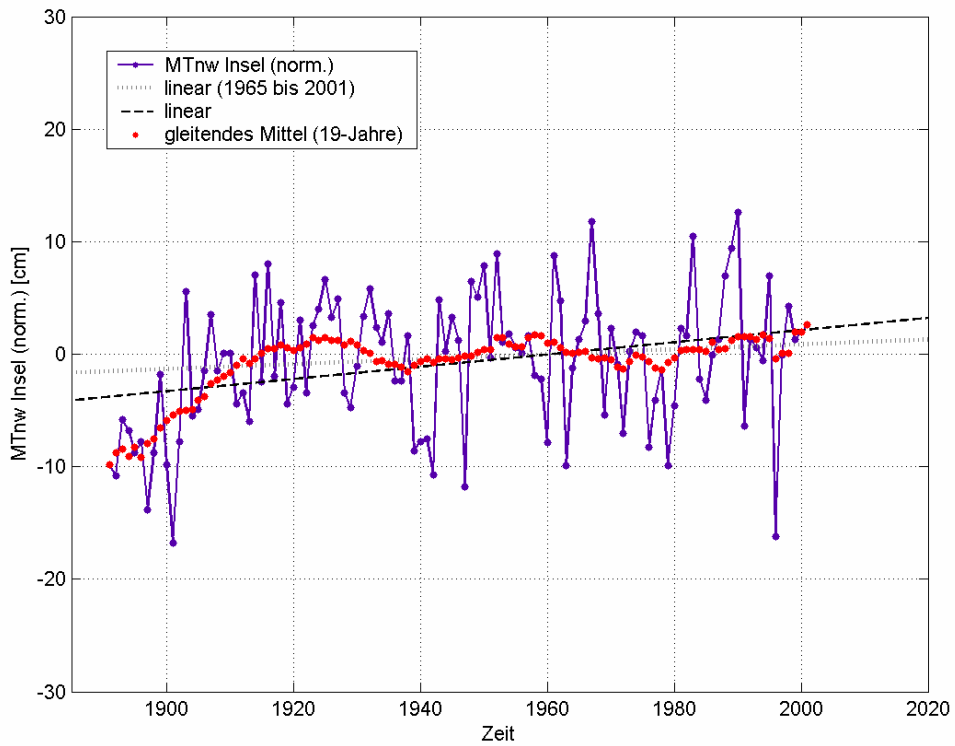


Abb. 2: Normierte mittlere MTnw-Zeitreihe (Inselpegel-Nordsee) mit Ausgleichsfunktionen

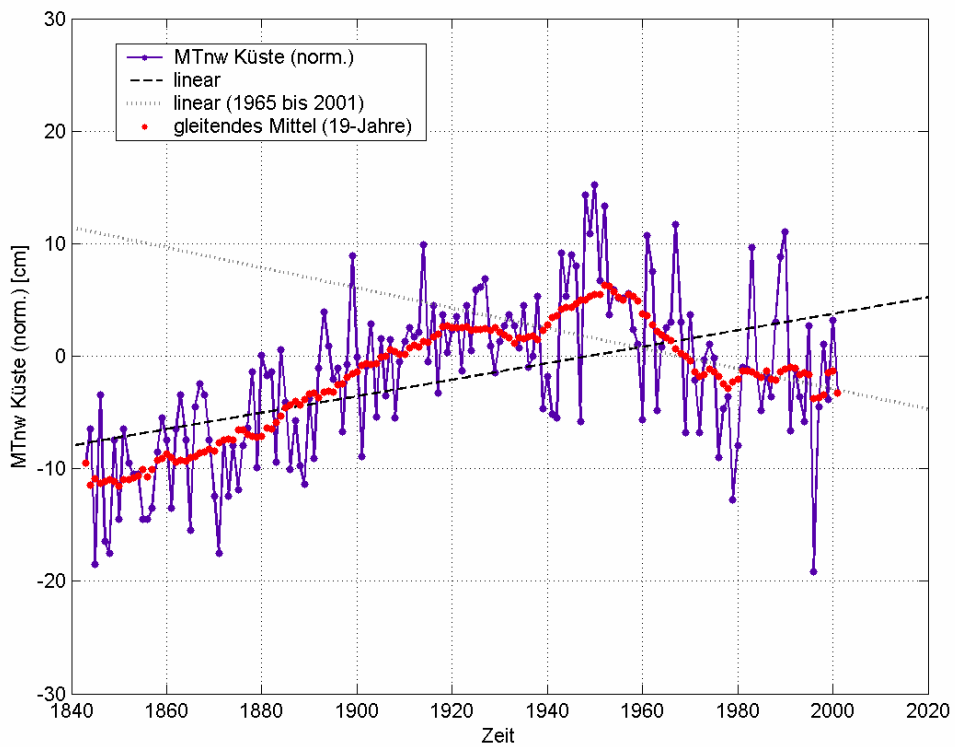


Abb. 3: Normierte mittlere MTnw-Zeitreihe (Küstenpegel-Nordsee) mit Ausgleichsfunktionen

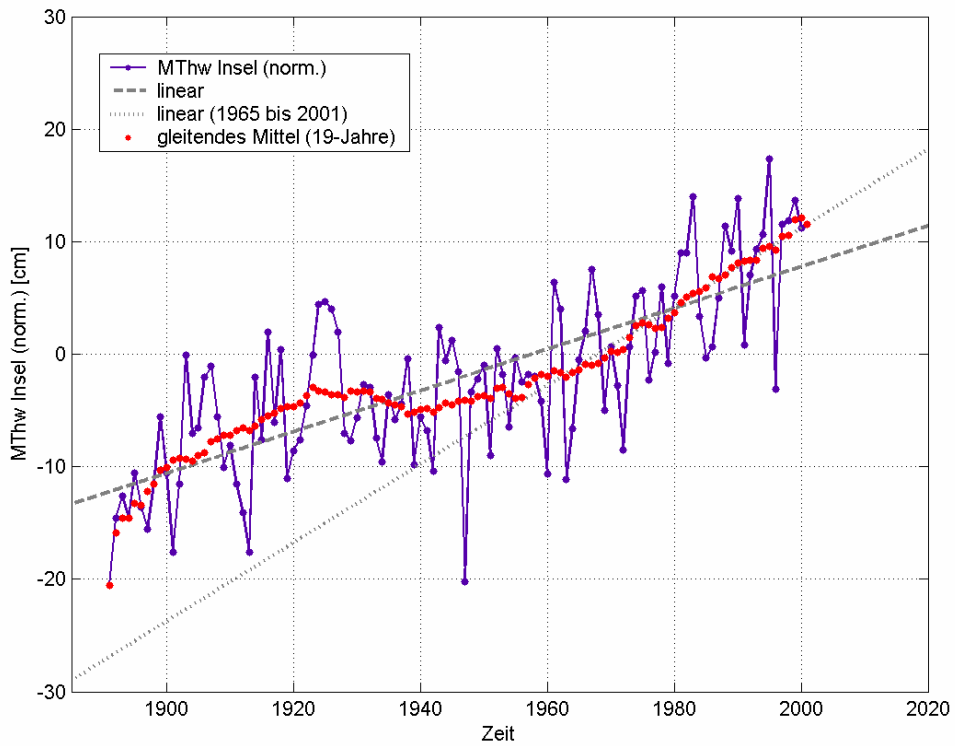


Abb. 4: Normierte mittlere MThw-Zeitreihe (Inselpegel-Nordsse) mit Ausgleichsfunktionen

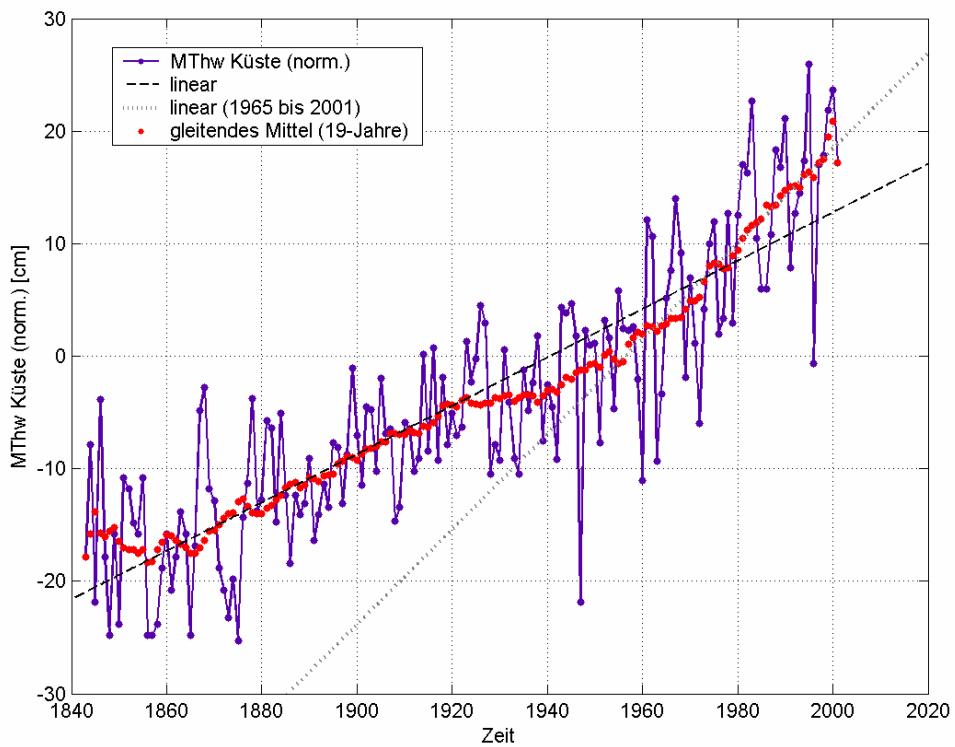


Abb. 5: Normierte mittlere MThw-Zeitreihe (Küstenpegel-Nordsee) mit Ausgleichsfunktionen

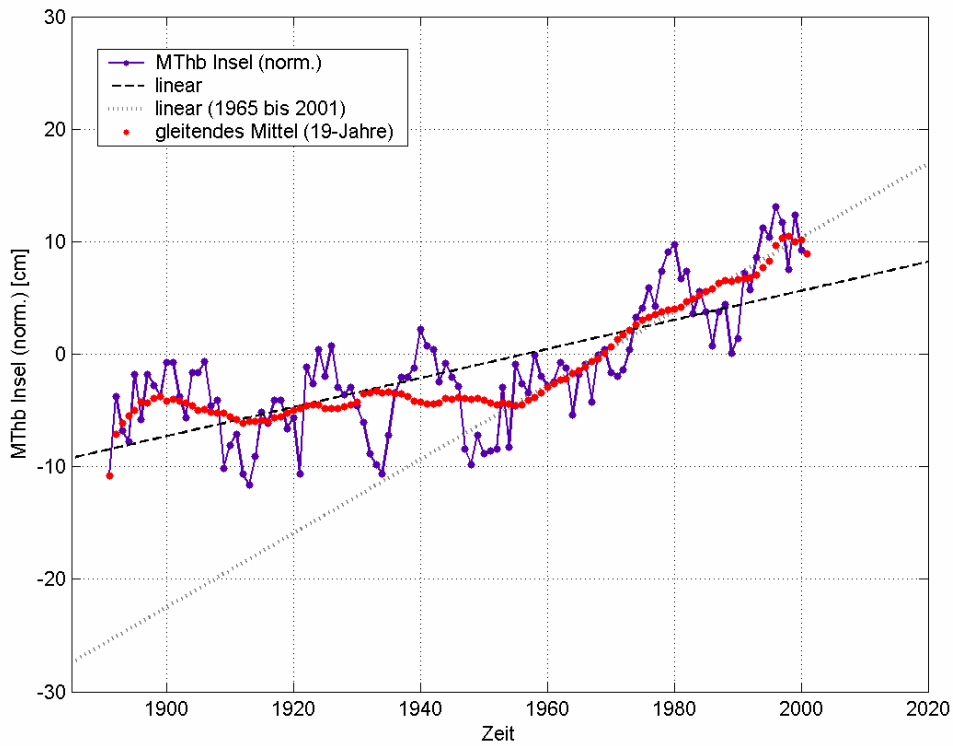


Abb. 6: normierte mittlere MThb-Zeitreihe (Inselpegel-Nordsee) mit Ausgleichsfunktionen

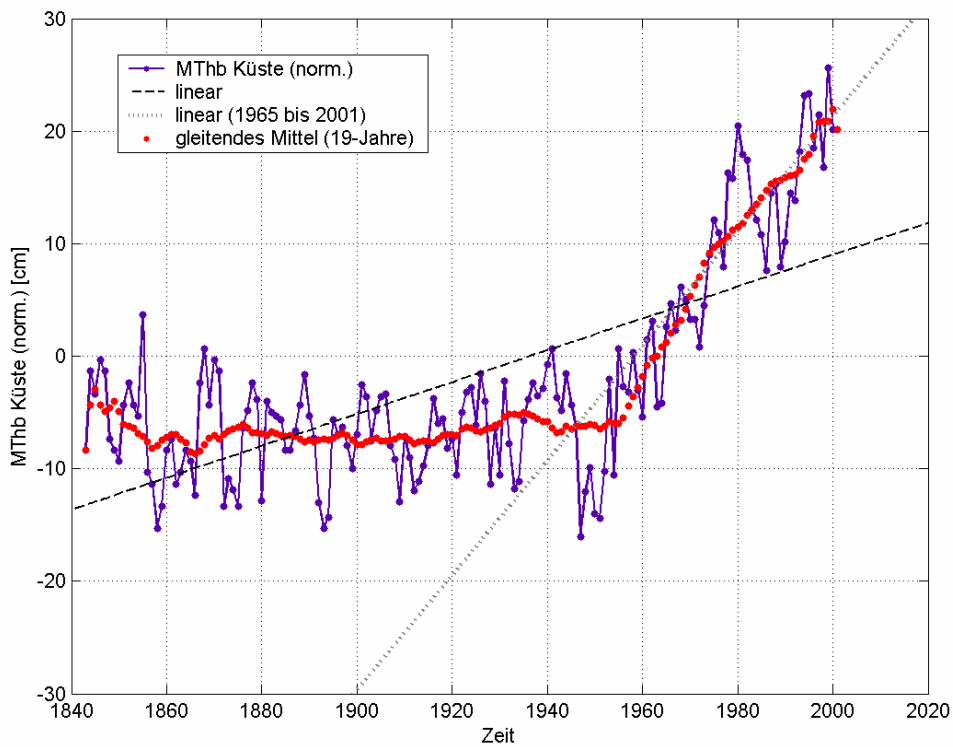


Abb. 7: Normierte mittlere MThb-Zeitreihe (Küstenpegel-Nordsee) mit Ausgleichsfunktionen

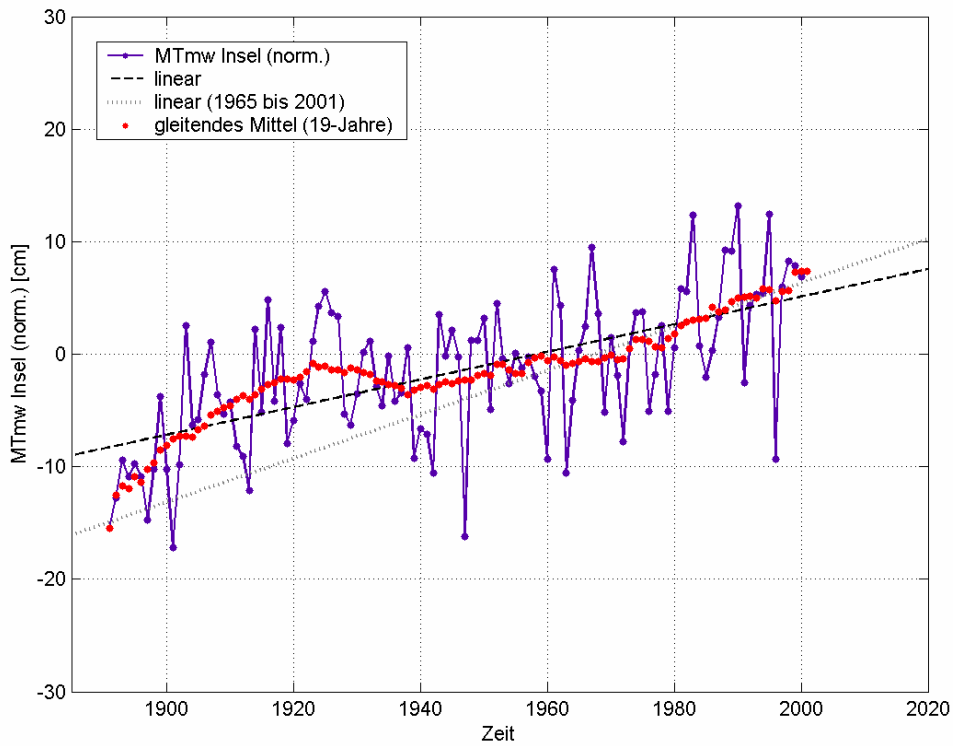


Abb. 8: Normierte mittlere MTmw-Zeitreihe (Inselpegel-Nordsee) mit Ausgleichsfunktionen

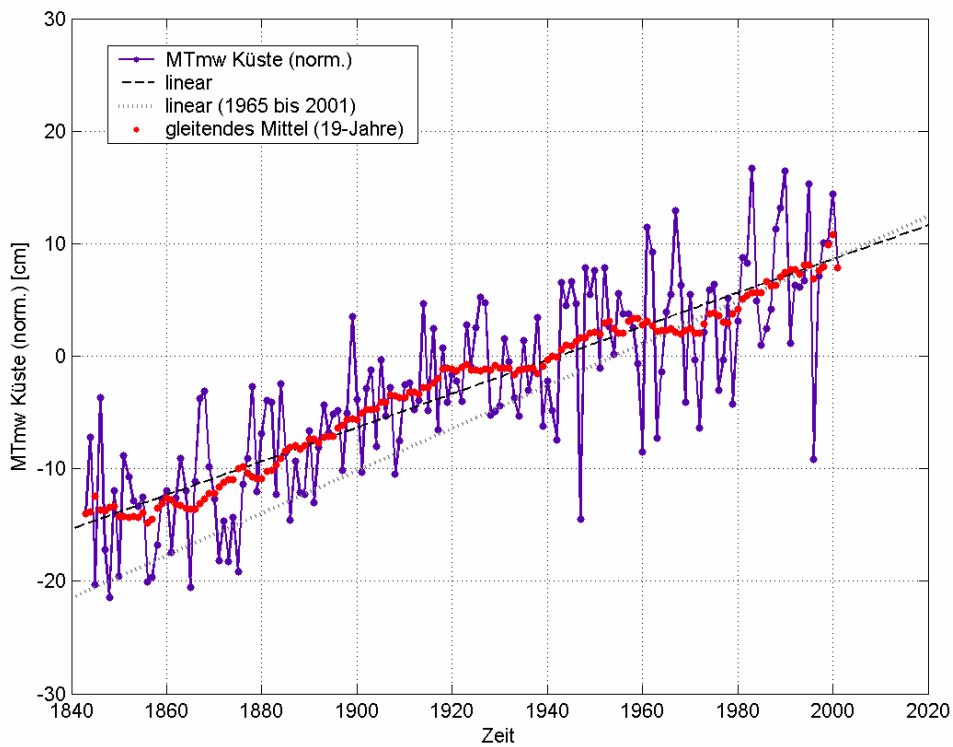


Abb. 9: Normierte mittlere MTmw-Zeitreihe (Küstenpegel-Nordsee) mit Ausgleichsfunktionen

Tab. 1: Säkulare Trends s_T für die Einzelzeitreihen und normierten mittleren Zeitreihen der Pegel an der Nordseeküste

	Pegelstation	Zeitreihe	$s_{T,gesamt}$ [cm/100 Jahre]	mittl. quadr. Fehler	$s_{T,1965-2001}$ [cm/100 Jahre]	mittl. quadr. Fehler
MTnw						
Inselpegel	Borkum	1934 - 2001	9,8	5,81	3,2	5,77
	Norderney	1891 - 2001	13,8	5,13	4,1	5,10
	LT Alte Weser	1903 - 2001	-6,6	6,63	9,4	5,36
	Helgoland	1925 - 2001	-1,4	6,09	-10,6	7,40
	Wittdün	1952 - 2001	-7,0	7,52	-3,1	7,89
	List	1931 - 2001	-5,6	7,13	10,0	7,19
	MTnw-Insel (norm.)	1891 - 2001	5,4	5,71	2,2	6,02
Küstenpegel	Emden	1901 - 2001	1,1	6,17	-25,4	5,72
	Wilhelmshaven	1873 - 2001	5,2	5,61	2,2	5,84
	Bremerhaven	1881 - 2001	-16,1	6,39	-36,0	6,23
	Cuxhaven	1843 - 2001	16,0	6,34	7,3	7,04
	Husum	1906 - 2001	-0,5	6,44	9,3	7,02
	Dagebüll	1936 - 2001	-32,1	8,64	-11,1	8,24
	MTnw-Küste (norm.)	1843 - 2001	7,3	6,20	-9,0	6,28
MThw						
Inselpegel	Borkum	1934 - 2001	31,9	4,62	35,5	4,49
	Norderney	1891 - 2001	26,0	5,06	32,5	4,79
	LT Alte Weser	1903 - 2001	12,3	7,73	34,6	5,25
	Helgoland	1925 - 2001	18,4	6,05	23,7	6,49
	Wittdün	1952 - 2001	43,3	5,75	41,4	5,88
	List	1931 - 2001	28,9	5,84	41,8	5,70
	MThw-Insel (norm.)	1891 - 2001	18,3	5,47	34,9	4,95
Küstenpegel	Emden	1901 - 2001	21,5	5,94	41,3	5,94
	Wilhelmshaven	1873 - 2001	28,7	6,28	42,7	6,28
	Bremerhaven	1881 - 2001	25,0	6,71	34,0	6,71
	Cuxhaven	1843 - 2001	25,8	6,63	31,6	6,63
	Husum	1906 - 2001	33,7	7,22	51,2	7,22
	Dagebüll	1936 - 2001	47,1	6,28	52,9	6,28
	MThw-Küste (norm.)	1843 - 2001	21,5	6,21	42,3	6,31
MThb						
Inselpegel	Borkum	1934 - 2001	22,1	3,39	32,3	3,13
	Norderney	1891 - 2001	12,2	4,35	28,4	3,82
	LT Alte Weser	1903 - 2001	18,9	4,41	25,2	3,47
	Helgoland	1925 - 2001	19,8	3,50	34,3	3,02
	Wittdün	1952 - 2001	50,7	3,42	45,0	3,67
	List	1931 - 2001	34,5	3,38	31,8	2,47
	MThb-Insel (norm.)	1891 - 2001	12,9	4,07	32,8	3,04
Küstenpegel	Emden	1901 - 2001	20,4	6,66	66,8	4,31
	Wilhelmshaven	1873 - 2001	23,4	6,10	39,7	4,34
	Bremerhaven	1881 - 2001	41,0	7,29	69,1	6,54
	Cuxhaven	1843 - 2001	9,8	6,33	24,3	6,42
	Husum	1906 - 2001	34,2	5,34	41,9	3,61
	Dagebüll	1936 - 2001	79,1	5,09	64,0	3,32
	MThb-Küste (norm.)	1843 - 2001	14,1	6,93	51,0	4,03
MTmw						
Inselpegel	Borkum	1934 - 2001	21,5	4,93	20,4	4,89
	Norderney	1891 - 2001	20,3	4,61	19,2	4,56
	LT Alte Weser	1903 - 2001	3,4	6,89	22,7	5,01
	Helgoland	1925 - 2001	9,0	5,81	7,6	6,77
	Wittdün	1952 - 2001	19,6	6,36	20,3	6,58
	List	1931 - 2001	12,5	6,25	26,8	6,33
	MTmw-Insel (norm.)	1891 - 2001	12,3	5,20	19,5	5,26
Küstenpegel	Emden	1901 - 2001	12,1	5,16	10,6	5,43
	Wilhelmshaven	1873 - 2001	17,9	4,99	24,5	5,70
	Bremerhaven	1881 - 2001	6,1	5,38	2,1	5,62
	Cuxhaven	1843 - 2001	21,3	5,35	20,4	6,03
	Husum	1906 - 2001	18,0	6,06	31,9	6,90
	Dagebüll	1936 - 2001	10,7	7,07	23,4	7,06
	MTmw-Küste (norm.)	1843 - 2001	15,0	5,15	18,8	5,97

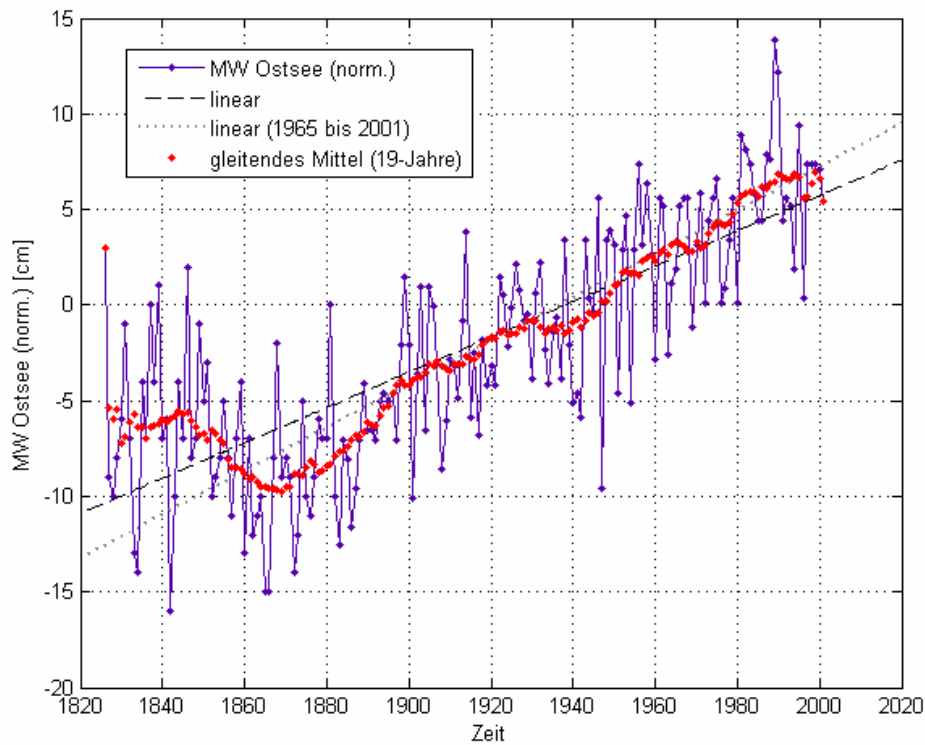


Abb. 10: Normierte mittlere MW-Zeitreihe (Ostsee) mit Ausgleichsfunktionen

Tab. 2: Säkulare Trends s_T für die Einzelzeitreihen und normierten mittleren Zeitreihen der Pegel an der Ostseeküste

	Pegelstation	Zeitreihe	$s_{T,gesamt}$ [cm/100 Jahre]	mittl. quadr. Fehler	$s_{T,1965-2001}$ [cm/100 Jahre]	mittl. quadr. Fehler
MW						
Ostsee	Travemünde	1826 - 2001	12,9	4,17	9,5	2,81
	Wismar	1910 - 2001	15,1	3,38	16,3	3,14
	Warnemünde	1883 - 2001	13,8	3,61	14,6	3,43
	Sassnitz	1931 - 2001	5,7	4,34	5,0	3,81
	MW (norm.)	1826 - 2001	9,2	3,99	11,4	3,11

Die Ostsee kann mit dem geringen Tideanteil wie ein stark gedämpfter Pegel der Nordsee bzw. des Atlantiks angesehen werden. Auf Abb. 11 ist die normierte mittlere MW-Zeitreihe Ostsee im Vergleich zur normierten mittleren MTmw-Zeitreihe des Inselpegels Nordsee mit den Teilzeitreihen 1891 bis 1964, 1946 bis 1964 und 1965 bis 2001 dargestellt. Bei diesen Zeitreihen fällt auf, dass die normierten mittleren MTmw des Inselpegels Nordsee mit dem entsprechenden MW der Ostsee zwar erwartungsgemäß ein gleichsinniges Anstiegsverhalten zeigen, aber zeitliche Veränderungen aufweisen. Weiterhin ist festzustellen, dass die MW der Ostsee langsamer ansteigen als das MTmw des Inselpegels der Nordsee.

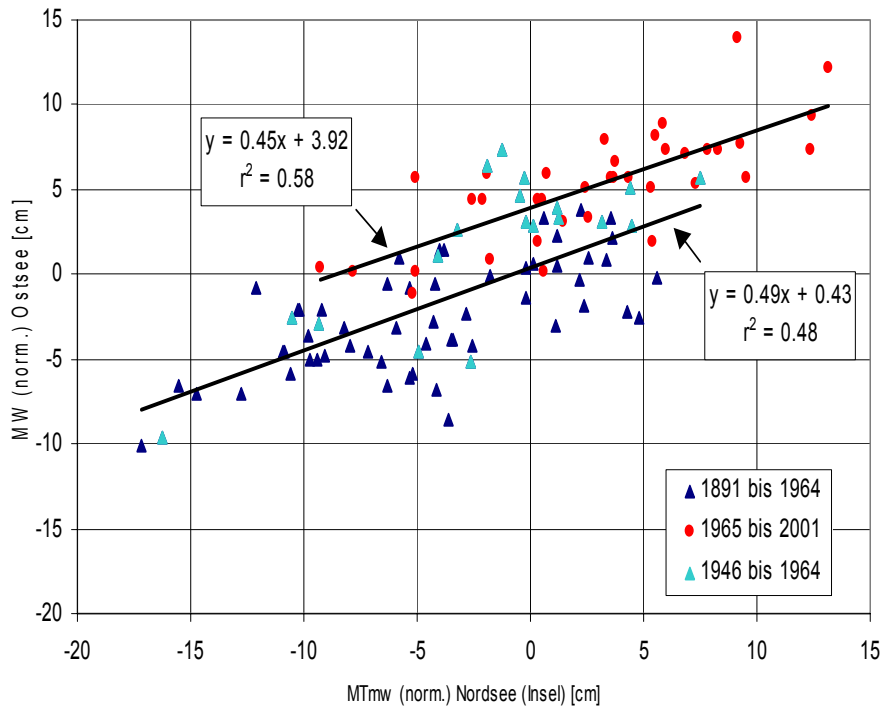


Abb. 11: Vergleich der mittleren normierten Zeitreihen des MW Ostsee und des MTmw der Inselpegel Nordsee

5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die aktuellen Analysen der Wasserstandszeitreihen bestätigen die Untersuchungen von JENSEN (1984) sowie FÜHRBÖTER und JENSEN (1985); in der Zeit von 1955 bis 1960 haben sich erhebliche Veränderungen im Tideverhalten der Nordsee eingestellt. Die Tidehochwasser steigen ab dieser Zeit signifikant stärker an; die Tideniedrigwasser verhalten sich in gegenläufiger Weise, d.h. der positive Trend wird schwächer bzw. kehrt sich teilweise in einen negativen Trend um. Der Tidehub in der Nordsee steigt an den Küsten- und Inselpegeln seit Ende der 50'er Jahre dramatisch an. Das Mittelwasser zeigt demgegenüber seit 1840 in der Nordsee wie auch in der Ostsee seit Beginn der Wasserstandsaufzeichnungen kaum Veränderungen.

Nach IPCC (2001) wird der Meeresspiegel bis zum Jahr 2100 zwischen 10 und 50 cm (mittlere Schätzung) steigen werden. Die vorliegenden Untersuchungen bestätigen diese Ergebnisse für die deutsche Nord- und Ostseeküste und geben darüber hinaus für einzelne Pegelstandorte detaillierte Ergebnisse an. Derzeit erscheinen Abschätzungen bis zum Jahr 2020 auf der Grundlage der vorliegenden Wasserstandsuntersuchungen möglich; bis 2020 ist mit einem Anstieg des MThw an der Nordsee von etwa 0,5 bis 1 dm und an der Ostsee mit einem Anstieg des MW von wenigen Zentimetern zu rechnen.

Wesentlich schwieriger als das Verhalten der Tidehoch- ist das der Tideniedrigwasser zu erklären, womit unmittelbar auch das des Tidehubes zusammenhängt. Astronomische Gründe scheiden hier aus. Ebenso wenig sind großräumige morphologische oder tektonische Veränderungen bekannt, die derartige Folgen haben könnten. Da die Pegel überwiegend an Rinnen oder Strömen in ausgedehnten Wattengebieten liegen und außerdem konstruktiv oft so beschaffen sind, dass sie die tiefsten Niedrigwasser nicht registrieren können, dürften die tatsächlichen Tideniedrigwasser in den umgebenden Seegebieten eher noch niedriger als nach den untersuchten Zeitreihen sein. Deshalb machen sich örtliche morphologische Besonderheiten an den Pegeln eher bei den Registrierungen der Tideniedrig- als bei

denen der Tidehochwasser bemerkbar. Im allgemeinen weist ein Jahr mit einem höheren MThw auch ein höheres MTnw entsprechend den vorherrschenden meteorologischen Bedingungen auf. Es sollte daher angenommen werden, dass der mittlere Tidehub als die Differenz von MThw und MTnw frei von den jährlichen Schwankungen ist. Weiterhin sollte erwartet werden, dass der Tidehub weitgehend konstant bleibt. Die Zeitreihen für den Tidehub zeigen aber eine deutlich zunehmende Tendenz. An den Küstenpegeln ergibt sich in Bezug auf den Mittelwert des MThb bis 1955 (309 cm) eine Zunahme um etwa 9 %. An den Inselpegeln beträgt die Zunahme, bezogen auf den Mittelwert des MThb bis 1955 (227 cm), etwa 6 %. Als Ursachen für die dramatische Zunahme des Tidehubs in der Nordsee können folgende Thesen abgeleitet werden:

- die Tidewelle verhält sich wie eine stehenden Welle, bei der durch die Erhöhung der Eingangswelle (= Anstieg des Meeresspiegels) die Reflexion verstärkt wird; damit könnte auch eine Verschiebung der Zentren der Amphidromien (Drehtiden) begründet werden
- eine Veränderung der Tidedynamik in der Nordsee kann auch durch eine Reduzierung der relativen Rauheit durch einen Anstieg des Meeresspiegels begründet werden.

Diese Systemänderungen in der Nordsee sind mit Sorge zu betrachten, da die Folgen nicht im Detail vorhersagbar sind; die Wasserstände müssen weiterhin genau beobachtet und analysiert werden. Das Beispiel der Deutschen Bucht zeigt, dass das Tidemittelwasser oder MSL nicht immer die geeignete Größe ist, mit der Veränderungen erkannt werden können.

Durch die festgestellten Veränderungen in den Wasserstandszeitreihen an der deutschen Nord- und Ostseeküste sind verschiedene Konsequenzen zu beachten (s. auch FÜHRBÖTER UND JENSEN 1985):

- durch die Erhöhung des MThw entstehen auf Watten und Außensänden größere Wassertiefen, worauf das Wellenklima sehr empfindlich reagiert; größere Wellenhöhen und damit höhere Orbitalgeschwindigkeiten und Brandungsenergien sind die unmittelbare Folge, die zu großflächigen Erosionen führen können
- durch die erhöhten Tidehübe treten größere Strömungsgeschwindigkeiten auf, die Ausräumungen der Tiderinnen, verstärkte Erosionen an den Inselsockeln, Strandausräumungen und in Zusammenhang mit Sturmfluten zu Dünen- und Kliffabbrüchen führen können

Ob sich in diesen Veränderungen der Tidedynamik in der Nordsee bereits eine globale Klimaänderung bemerkbar macht, kann nicht abschließend festgestellt werden. Allerdings ist ein verändertes Verhalten der Tide in der Nordsee ab etwa 1960 zu konstatieren, was in Verbindung mit anderen meteorologischen Indikatoren für globale Änderungen spricht.

6 Literatur

- FÜHRBÖTER, A.: Veränderungen des Säkularanstieges an der deutschen Nordseeküste, Wasser + Boden, Heft 9, 1986.
- FÜHRBÖTER, A. und JENSEN, J.: Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. Die Küste, Heft 42, 1985.
- GAYE, J.: Wasserstandsänderungen in der Ostsee und der Nordsee in den letzten 100 Jahren. Die Wasserwirtschaft, Sonderheft: Vorträge der Gewässerkundlichen Tagung 1951 in Hamburg, 1951.
- HUNDT, C.: Maßgebende Sturmfluthöhen für das Deichbestick der schleswig-holsteinischen Westküste. Die Küste, Jg. 3, Doppelheft 1/2, 1955.
- HUPFER, P., HARFF, J., STERR, H. und STIGGE, H.-J.: Die Wasserstände an der Ostseeküste, Sonderheft, Die Küste, Heft 66, Boysen & Co., 2003

- IPCC (Intergovernmental Panel in Climate Change): Climate Change, The IPCC Scientific Assessment, Report Prepared for IPCC by Working Group 1, WMO, UNEP, University Press of Cambridge, 2001
- JENSEN, J.: Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. Mitteilungen Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig, Heft 83, 1984.
- JENSEN, J.: Über instationäre Entwicklungen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste. Mitteilungen Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig, Heft 88, 1985.
- JENSEN, J., MÜGGE, H.-E. und SCHÖNFELD, W.: Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht. Die Küste, Heft 53, 1992.
- JENSEN, J.: Recent Changes of the Water Levels in the Baltic Sea. Proceedings of The Second International Conference on Climate and Water, Espoo, Finland, 1998.
- JENSEN, J. und MUDERSBACH, CH.: "Long-Term Changes of the Water Levels along the German North Sea Coastline", in: Littoral 2002, 6th International Symposium in Porto, 22-26 September 2002, Bd. 2, Eurocoast, Porto 2002
- JENSEN, J. und FRANK, T.: „Grundlagen der Bemessung von See- und Flussdeichen an den deutschen Küsten“, in: Sicherung von Dämmen und Deichen, universi, Universitätsverlag Siegen, 2003
- JENSEN, J. und MUDERSBACH, Ch.: "Analyses of recent Variations in Water Level Time-Series at the Southern Baltic Sea Coastline", Baltcoast 2004-Conference Proceedings, Coastline Reports 2, Warnemünde, 2004
- LIESE, R.: Veränderungen von Tidehochwasser, Tideniedrigwasser und Tidehub seit 1946. Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz der Nieders. Wasserwirtschaftsverw., Jahresbericht 1978, 1979.
- LÜDERS, K.: Über das Ansteigen der Wasserstände an der deutschen Nordseeküste. Zentralbl. d. Bauverw., H. 50, 1936.
- RIETSCHEL, E.: Neuere Untersuchungen zur Frage der Küstensenkung. Dt. Wasserwirtschaft, H. 5, Berlin, 1933.
- ROHDE, H.: Wasserstandsänderung und Sturmfluthäufigkeit an der Elbmündung. Die Küste, H. 16, 1968.
- SCHÜTTE, H.: Neuzeitliche Senkungserscheinungen an unserer Nordseeküste. Jb. Oldenburg, Ver. Altertumskunde Landesgesch. 16, Oldenburg, 1908.
- STIGGE, H.-J.: Nullpunktkorrektur für alle DDR-Küstenpegel (Mitteilung der Wasserwirtschaftsdi- rektion Küste), Beitr. Meereskd., 60, Berlin, 1989

Adresse

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen
Dipl.-Ing. Christoph Mudersbach
Universität Siegen
Forschungsstelle Wasserwirtschaft und Umwelt (fwu)
Abteilung Wasserbau & Hydromechanik
57068 Siegen
Germany
E-mail: jensen@fb10.uni-siegen.de
mudersbach@fb10.uni-siegen.de

Küstenschutz in Hamburg

Nichtlineare Wechselwirkung der Tide auf Änderungen des Meeresspiegels im Übergangsbereich Küste/Ästuar am Beispiel der Elbe

Dr.-Ing. Andreas D. Plüß

Bundesanstalt für Wasserbau - Dienststelle Hamburg-

Summary

The rise of the Mean Sea Level enlarges the geometry of the North Sea basin due to the flooding of the wadden areas in the Netherlands, Germany and Denmark. Especially in the shallow near coast areas, changes of the MSL result in a significant modulation of the shallow water constituents. These coupled non-linear effects can be proved in the German Bight and up to the estuaries by analysing the differences in the harmonic constants of the tide. In the mouth of the estuaries the tidal currents will be raised up due to more flooding of intertidal flats. This changes the whole tidal dynamics of the entire estuary. In application to the Elbe estuary this results in a significant rise of the tidal high water and the tidal range upstream to the harbour of Hamburg.

By the help of a hydrodynamic-numeric model of the North Sea, including the German Bight and the estuaries, changes in the partial tides and the tidal characteristic numbers can be evaluated. The above mentioned effects can be described in detail by refining the model in the domain of the Elbe estuary. The interaction between coastal zone and estuary can be nature-like reproduced by this integrated extensive modelling approach.

Zusammenfassung

Der Anstieg des Meeresspiegels vergrößert die Beckengeometrie der Nordsee insbesondere durch das Überfluten der Watten in den Niederlanden, Deutschland und Dänemark. Insbesondere im flachen Küstenvorfeld führen Wasserspiegeländerungen zu einer signifikanten Modulation der Seichtwassertiden. Dieses nichtlineare Zusammenwirken auf die Tidedynamik läßt sich in der Deutschen Bucht und bis in die Ästuarmündungen hinein durch die Analyse der Änderungen der astronomischen Konstanten nachweisen. In den Mündungsbereichen der Ästuarverstärken sich die Tideröhrungen (Tidevolumen) durch das zusätzliche Überfluten der Flachwasserbereiche, wodurch sich die Tidedynamik im gesamten Ästuar verändert. Für die Elbe bedeutet dieses eine signifikante Erhöhung der Tidehochwasserstände und Tidehübe bis hinauf nach Hamburg.

Mit Hilfe eines großräumigen hydrodynamisch-numerischen Modells der Nordsee einschließlich der Deutschen Bucht mit angeschlossenen Ästuaren werden die Veränderungen in den Partiaaltiden und den Tidekennwerten bestimmt. Durch eine starke Modellverfeinerung der gesamten Tideelbe werden hier die o. g. Effekte detailliert beschrieben. Durch den weitgefassten Modellierungsansatz werden die Interaktionen zwischen Ästuar und Küstenzone ganzheitlich naturähnlich nachgebildet. Diese Kenntnisse liefern einen wichtigen Beitrag zum Küstenschutz.

1 Einleitung

Änderungen des Klimas bewirken eine Verschiebung des mittleren Meeresspiegels. Inwieweit sich damit die **Tideverhältnisse** in der Deutschen Bucht und speziell im Elbeästuar verändern, soll im Nachfolgenden beleuchtet werden. Je nach Gebiet und Wirkzusammenhang lassen sich folgende grundlegende Mechanismen trennen:

1. Beckengeometrie:

Durch die Erhöhung des Wasserspiegels werden Wattflächen überströmt, die bisher trocken waren. Daraus ergibt sich eine Veränderung der Geometrie des Nordseebeckens insbesondere im Bereich der Deutschen Bucht, da hier ausgedehnte Wattflächen vorhanden sind. Mit dem Zurückweichen des Festlandssockels verschiebt sich die Lage der amphidromischen Punkte der Partialtiden (siehe nachstehende Prinzipskizze). Für die wichtigste Partialtide in der Deutschen Bucht der M2 bedeutet dieses eine Verlagerung des zentralen amphidromischen Punktes in der südöstlichen Nordsee nach Nordosten.

2. Reibung:

Die flach geneigten Wattplatten im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht führen durch die hier verstärkte Bodenreibung zu einer Verformung der Tidewelle. Es entstehen sog. Seichtwasertiden, deren wichtigsten die Obertiden zur M2: M4 und M6 sind. Diese Obertiden besitzen mehrere, und in ihrer Lage veränderte, amphidromische Punkte gegenüber der M2. Die Veränderungen dieser Tiden beruhen also im Wesentlichen auf der Vergrößerung der Wattflächen und der damit verstärkten Reibungswirkung in Küstennähe.

3. Ästuardynamik:

Durch den Anstieg des mittleren Wasserspiegels ist im Mündungsbereich, besonders bei großen Öffnungsweiten mit Wattplatten, ein deutlich größerer Fließquerschnitt vorhanden. Die vergrößerten Öffnungsweiten wirken zusammen mit den o. g. Modulationen der Partialtiden. Diese stehen in nichtlinearer Wechselwirkung zu einander. So ist in weiten Ästuarbereichen mit signifikanten Änderungen zu rechnen, da deutlich mehr Tideenergie stromauf propagiert. Hier wird dieser Effekt für das Elbeästuar dargestellt.

4. Buchten:

Einen Sonderfall stellen die Buchten ohne nennenswerten Oberwassereinfluss dar (z. B. Jade). Hier wird die verstärkte Dynamik der Tidewelle durch die höher überfluteten Ufer (Rand) stärker reflektiert und damit umgeformt. Dieser Effekt ist ohne eine Modellsimulation nicht einfach prognostizierbar, zumal die Umformungen der Tidewelle von der Form der Bucht, der Tiefenverteilung der Wattflächen und der Küstenlinie abhängig sind.

2 Lösungsansatz

2.1 Modellbildung

Die Auswirkungen eines Anstiegs des Meeresspiegels (**Mean Sea Level, MSL**) betreffen neben der Beckengeometrie auch die Flachwasser- und Ästuargebiete sowie die Buchten. Da sich diese Effekte überlagern und gegenseitig beeinflussen (nichtlineare Wechselwirkung) wurde hier für die Berechnung der Tidedynamik ein gekoppeltes Modell verwendet. Dieses beinhaltet neben der gesamten Nordsee die Deutsche Bucht mit verfeinerter Topographiauflösung des Küstensaumes, der Inseln und der Ästuar-mündungen. Das Ems- und Jade-Weserästuar sind annähernd volumentreu angebunden. Die gesamte Tideelbe von Geesthacht bis Cuxhaven ist durch eine hohe Knotendichte nachgebildet und beinhaltet alle Hamburger Hafenbecken, die Nebenelben und sämtliche Inseln. Eine Modellbildung von der freien Nordsee bis zur Tidegrenze der Ästuarie gelingt allerdings nur unter Verwendung unstrukturierter (Dreiecks-)elemente (PLÜB 2003).

Durch diese integrale Modellierung werde alle relevanten groß- und kleinräumigen Tideprozesse in ihrer Interaktion berücksichtigt. Eine Aufspaltung in separate Teilgebiete mit der dann notwendigen Spezifikation von Randwerten entfällt somit. Simuliert wird hier der Zeitraum vom 01.05.2002-00:00 bis zum 19.05.2002-22:00 einschließlich der orts- und zeitvariablen Windwirkung (keine Starkwindlagen) durch Nutzung des Vorhersagewindes des Deutschen Wetterdienstes.

Die Auswirkungen einer Veränderung des Meeresspiegels werden hier nicht auf Prognosewerte (z. B. IPCC) des Anstiegs ausgerichtet, sondern es wird die Sensitivität der Tide auf verschiedene Anstiegshorizonte bestimmt. So werden nacheinander Erhöhungen des MSL von 20, 40, 60, 80 und 100cm berechnet.

2.2 Auswertung

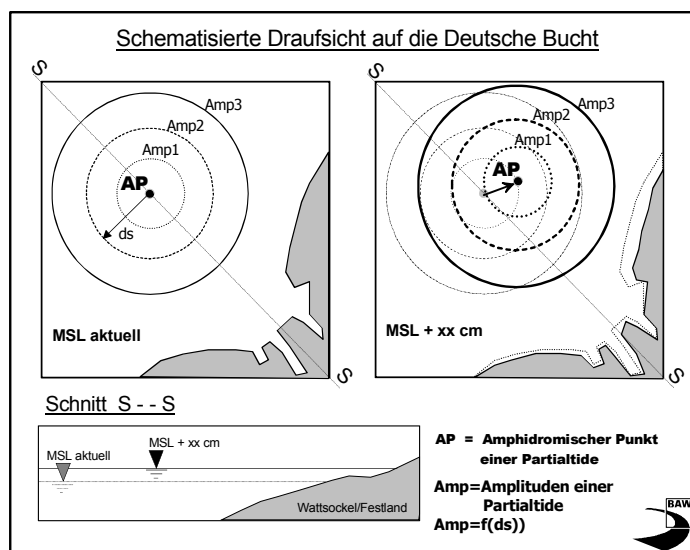
Die ersten vier Tage (1.-5.5.2002) der Simulation werden als Einschwingdauer betrachtet und deshalb nicht für die Auswertung herangezogen. Die nachfolgenden flächen- und linienhaften Auswertungen beinhalten eine Integration der Analysegrößen bzw. der Differenzen über den gesamten Auswertzeitraum von mehr als 14 Tagen (Index: mittel).

Partialtiden: Zur Veranschaulichung der Systematik der großräumigen Veränderungen in der Deutsche Bucht (Beckengeometrie und Flachwasser) werden hier die wichtigsten Partialtiden M2 sowie deren Obertiden M4 und M6 analysiert (GÖNNERT et al 2004) und als Differenz zwischen dem IST-Zustand und dem Fall MSL +100cm dargestellt.

Tidekennwerte: Neben der Partialtidenanalyse werden die Veränderungen in den Tidekennwerten T_{hw} , T_{nw} und T_{hb} flächenhaft in der Deutschen Bucht wiedergegeben und bewertet. Entlang der Elbe vom Hafen Hamburg bis Cuxhaven (Fahrwasserachse) über Scharhör in einem Bogen bis Helgoland werden die Änderungen bezüglich der berechneten MSL-Horizonte auf einem Längsschnitt ausgewertet.

Strömungen: Die Veränderung der Tidedynamik, insbesondere das erhöhte Tidevolumen, wird durch Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten veranschaulicht. Für den Mündungsbereich der Elbe werden die Änderungen der mittleren Flut- und Ebbströmungen flächenhaft ausgewertet, wobei den ausgedehnten Wattflächen ein besondere Bedeutung zukommt.

3 Partialtiden



Die Amplituden der M2 weisen im Küstenbereich der Deutschen Bucht Werte von 1,75m (Wilhelmshaven), 1,52m (Bremerhaven) sowie 1,42m (Cuxhaven) auf. Infolge eines MSL-Anstieges werden ausgedehnten Wattbereiche vermehrt überflutet. Dadurch vergrößert sich die Ausdehnung der Nordsee im Bereich der Deutschen Bucht. Eine Veränderung der Beckengeometrie wirkt sich besonders auf die Hauptmodpartialtide M2 aus: die Lage des amphidromischen Punktes (AP) verschiebt sich und bewirkt so Änderungen in den Amplituden (Amp). Siehe hierzu auch nebenstehende Prinzipskizze.

Auf der Abbildung 1 wird die Änderung der Amplituden der M2-Partialtide durch Erhöhung des MSL um 100 cm gezeigt. Im Gebiet um Helgoland beträgt die Erhöhung nur rd. 1 cm. Bis zum Jadebusen, der Weser- und Elbmündung steigen die Amplitudenverstärkungen auf rd. 5 cm an.

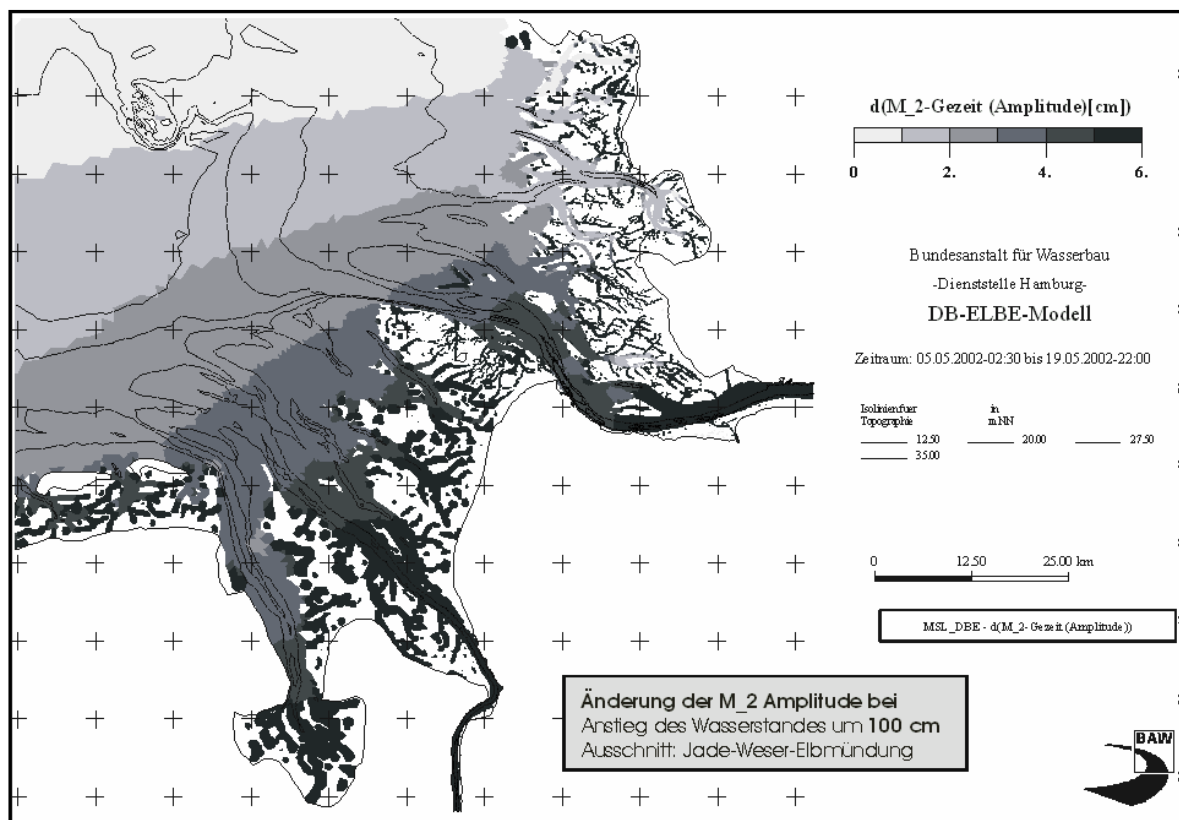


Abb.1 Änderung der M2-Partialtide durch Anstieg des MSL um 100cm

Ein anderes Verhalten weisen die Amplitudenänderungen der Seichtwassertide M4 auf (vergleiche Abb. 2). Die M4, als erste Oberschwingung der M2, erfährt zwischen Helgoland und Spiekeroog keine signifikante Veränderung. Ab Wangerooge verringern sich die Amplituden bis in den Jadebusen um rd. 5cm; gleiches gilt für die Außenweser. Im Gegensatz dazu erhöht sich die M4-Amplitude, nach einer Verringerung um 3cm bei Neuwerk, bis Glückstadt leicht um rd. 1cm.

Die Änderungen der M6, als 2. Oberschwingung zur M2, sind ebenfalls im Seegebiet um Helgoland vernachlässigbar. Nach einem leichten Anstieg um rd. 0,5cm auf einem Bogen zwischen Wangerooge und Eiderstedt verringern sich die Amplitudenänderungen in der Jade und Wesermündung um mehr als 1,5 cm. Die Elbmündung weist hingegen Erhöhungen von mehr als 1 cm auf.

Die Änderungen der Partialtiden M2, M4 und M6 sind im Umfeld der Insel Helgoland gering. Bis zur Innenjade und Jadebusen steigen die Änderungen der M2 stetig an. Die Änderungen der M4/M6-Partialtiden fallen hingegen deutlich ab (M4 mehr als 5cm, M6 mehr als 1 cm). Für die Außenweser stellt sich ein ähnlicher Verlauf der Änderungen dar, wobei hier die Verringerung der M4 bereits in Bremerhaven rückläufig ist. In der Elbmündung verstärken sich sowohl die Amplituden der M2 als auch der M6-Partialtide. Nach einer Verringerung zwischen Helgoland und Cuxhaven verstärken sich die Änderungen der M4-Partialtide weiter Elbaufwärts. Insofern stellt sich im Elbmündungsgebiet bei den astronomischen Tiden ein unterschiedliches Verhalten der Änderungen gegenüber der Weser und Jade ein.

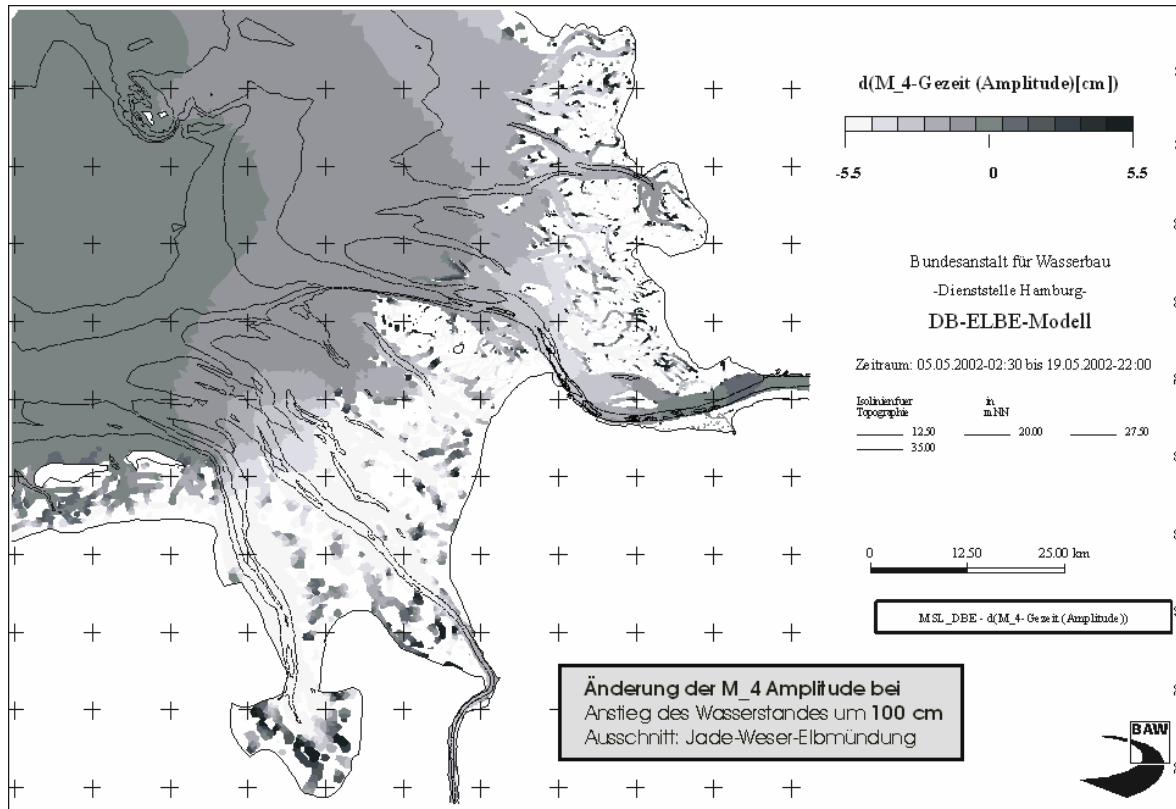


Abb.2: Änderung der M4-Partialtide durch Anstieg des MSL um 100cm

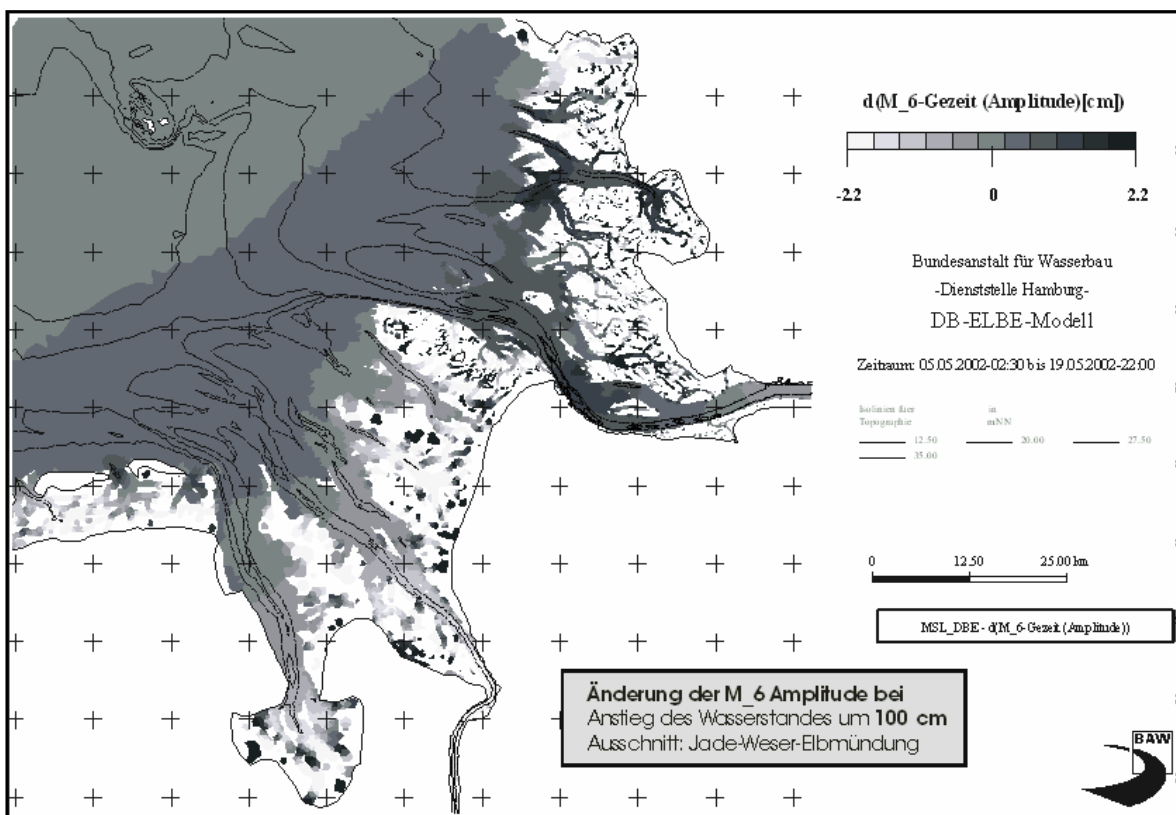


Abb.3: Änderung der M6-Partialtide durch Anstieg des MSL um 100cm

4 Tidekennwerte

Die Veränderung der Amplituden der Partialtiden wurde in ihrem grundlegenden Verhalten unter Kapitel 3 dargelegt. Inwieweit sich jedoch die Phasenlagen (M2, M4 und M6) verändern zeigt sich nachfolgend durch die Analyse der Änderungen der mittleren Tidekennwerte. Diese beinhalten sowohl die Amplitudenschwankungen als auch die Phasenverschiebungen aller Partialtiden. Die Erhöhung des mittleren Tidehochwassers (Thw) werden auf Abbildung 4 dokumentiert. Wie schon durch die Partialtidenanalyse belegt sind die Veränderungen im Bereich Helgoland mit rd. 2cm sehr gering. Entlang der Innenjade steigen sie bis zum Jadebusen auf mehr als 18 cm an. Die Erhöhung in der Außenweser (10 cm) schwächt sich bis Bremerhaven leicht auf rd. 8 cm ab. Ein anderes Verhalten weist die Elbmündung auf. Von Helgoland bis Cuxhaven erfolgt ein gleichmäßiger Anstieg auf 14 cm zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel.

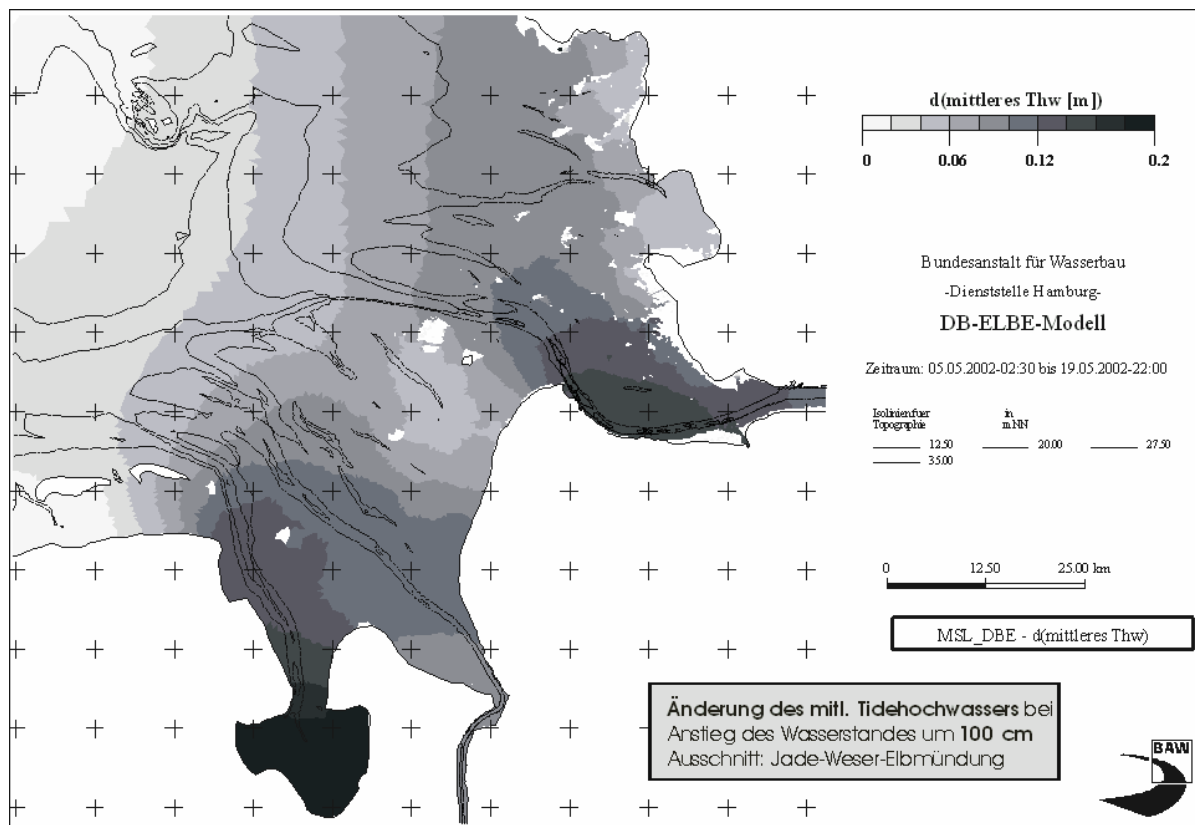


Abb. 4: Änderung des mittleren Tidehochwassers durch Anstieg des MSL um 100cm

Auswertungen für die Änderungen der Tideniedriwasserstände ergeben für Helgoland ebenfalls nur geringe Schwankungen von weniger als ± 1 cm (vergleiche Abbildung 5). Wie schon beim Tidehochwasser reichen die Änderungen bis zum Jadebusen, und weisen einen Anstieg von mehr als 6 cm auf. Für die Weser- und Elbemündung ist gleichermaßen mit einer Verringerung des Tnw von 5-6 cm zu rechnen. Die z. T. unterschiedlichen Entwicklungen von Thw und Tnw werden durch die Analyse des Thb auf Abbildung 6 zusammengefasst. Um Helgoland erhöht sich der Tidehub nur geringfügig um rd. 2cm. Bis zur Innenjade steigt er auf rd. 8cm an und fällt dann bis zum Jadebusen auf 4-6 cm ab (Buchteneffekt). Die Außenweser weist einen stetigen Anstieg des Thb auf rd. 10-12 cm auf. Im Unterschied zu Jade und Weser steigen im Elbmündungsgebiet die Änderungen der Tidehöhe deutlich stärker (auf bis zu 20 cm bei Otterndorf) an.

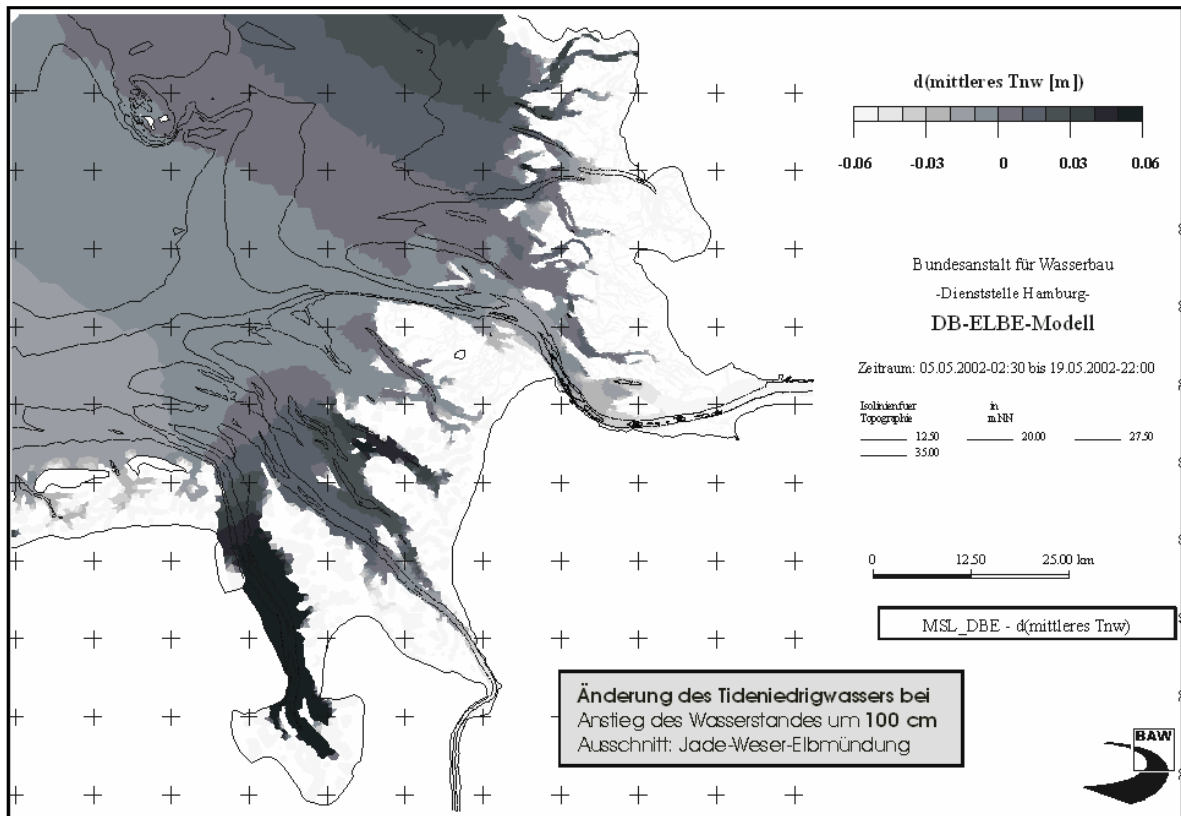


Abb. 5: Änderung des mittleren Tideniedrigwassers durch Anstieg des MSL um 100cm

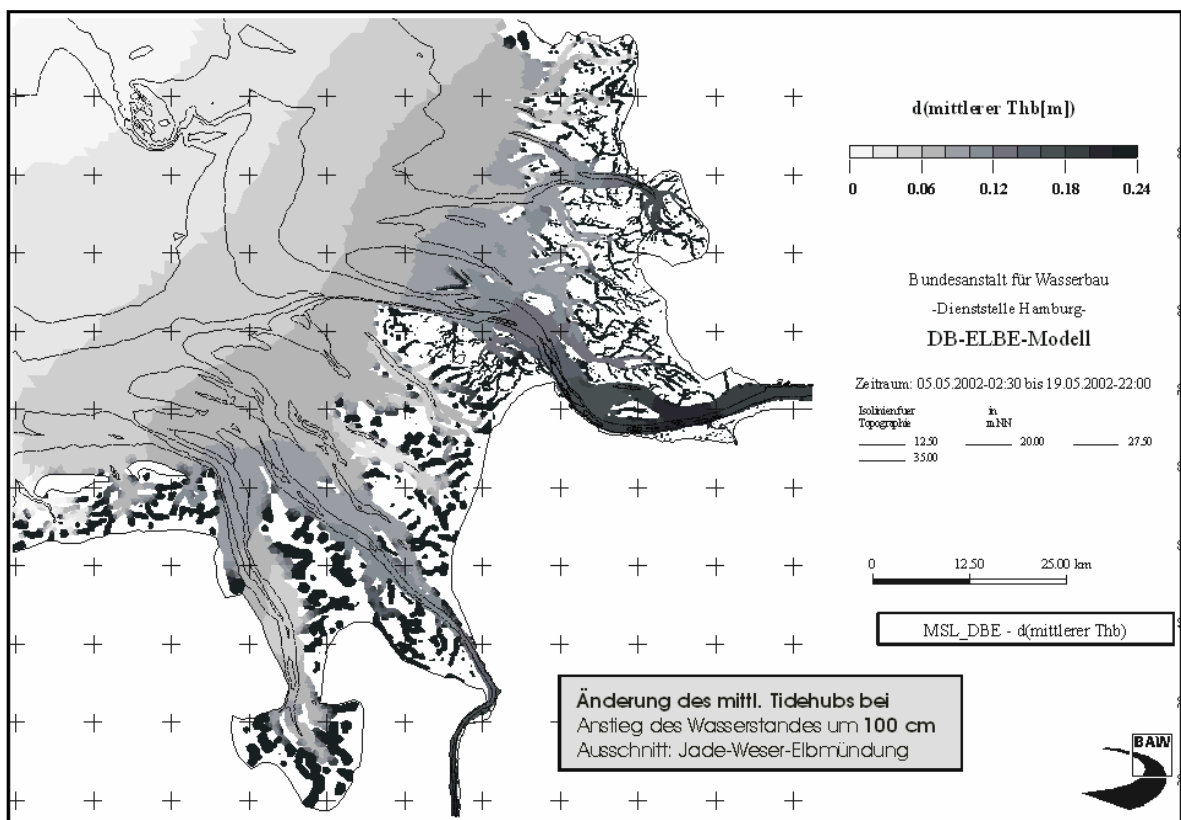


Abb. 6: Änderung des mittleren Tidehubes durch Anstieg des MSL um 100cm

Die Änderungen der Tidekennwerte entlang der Elbe sind starken Variationen unterworfen. Auf einem Längsschnittes entlang der Fahrwasserachse der Elbe vom Hafen Hamburg über Neuwerk in einem Bogen bis nach Helgoland werden die Änderungen von Thw, Tnw und Thb für die berechneten Szenarien MSL +20, +40, +60, +80 und +100 cm aufgetragen.

Erst ab MSL +80cm sind vor Helgoland nennenswerte Änderungen der Tidekennwerte zu erwarten. Wie schon bei den flächenhaften Auswertungen erkennbar wurde steigen im Bereich zwischen Cuxhaven und Otterndorf die Änderungen der Tidehochwasserstände stark an (siehe Abbildung 7). Zwischen dem Osteriff und Blankenese verringern sich die Erhöhungen deutlich, um danach wieder stark anzusteigen. Die Änderungen der Tideniedrigwasserstände sind seewärts Scharhörn gering. Ab Cuxhaven verringern sich die Tideniedrigwasserstände deutlich, wobei sich mit zunehmendem Anstieg des MSL der Abfall deutlich verstärkt (vergleiche Abbildung 8). Bis zu einem Anstieg des MSL um +80 cm ist kein Anstieg des Tidehubes in Helgoland zu erwarten; erst darüber hinaus (MSL +100cm) steigt der Tidehub um mehr als 2 cm. Wie auf der Abbildung 9 erkennbar ist, verstärken sich die Änderungen des Tidehub zur Elbmündung hin (Otterndorf) auf ein relatives Maximum. Nach einem Abfall bis etwa Brokdorf verstärken sich die Erhöhungen der Tidehübe und übertreffen etwa ab Blankenese die Werte von Otterndorf.

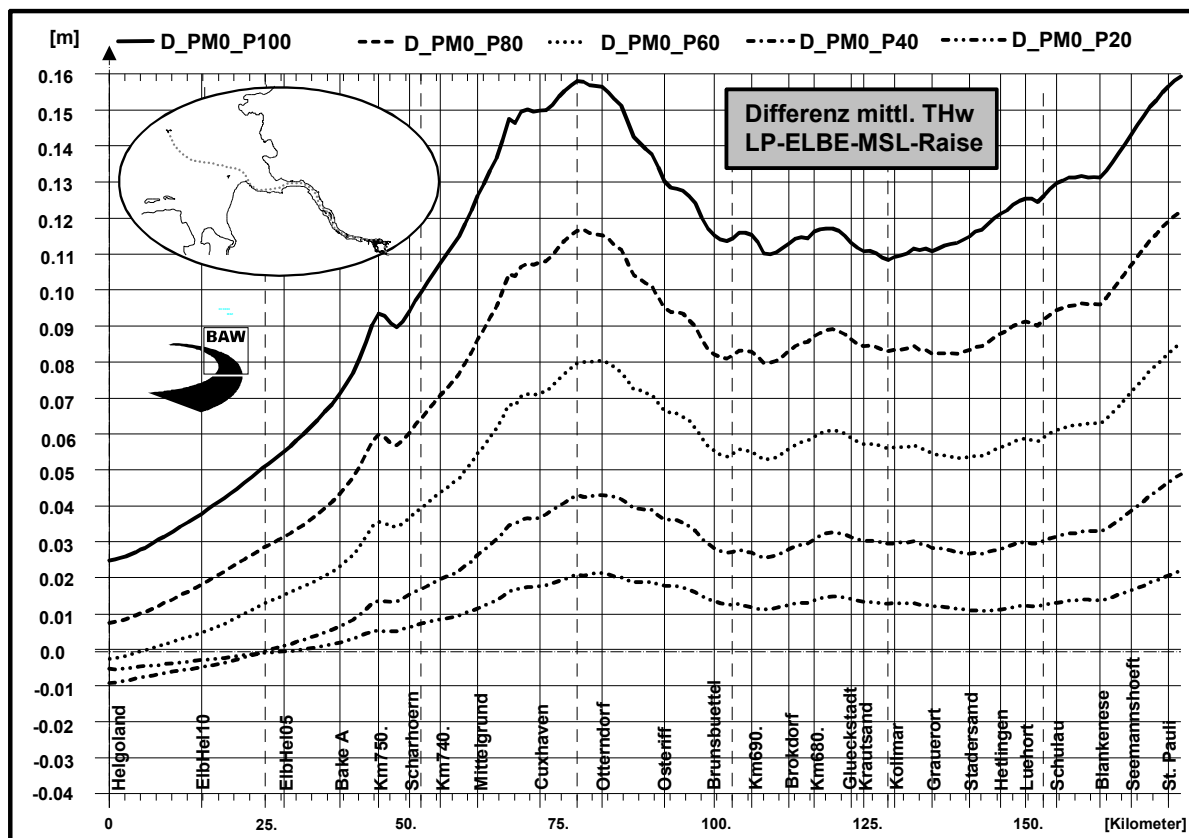


Abb. 7: Anstieg des Thw zw. Hamburg/Helgoland bei Anstieg des MSL von 20 bis 100cm

5 Strömungen

Im Mündungsgebiet der Elbe befinden sich ausgedehnte Wattplatten (Vogel-, Gelb-, Haken-, Medemsand, Nordergründe und Neufelder Watt). Diese werden durch einen Anstieg des mittleren Meeresspiegels verstärkt in weiten Bereichen überflutet. So kommt es zu einer Verstärkung der Flut- und Ebbwassermenge im gesamten Elbeästuars. Neben den o. g. Auswirkungen auf die Tidewasserstände

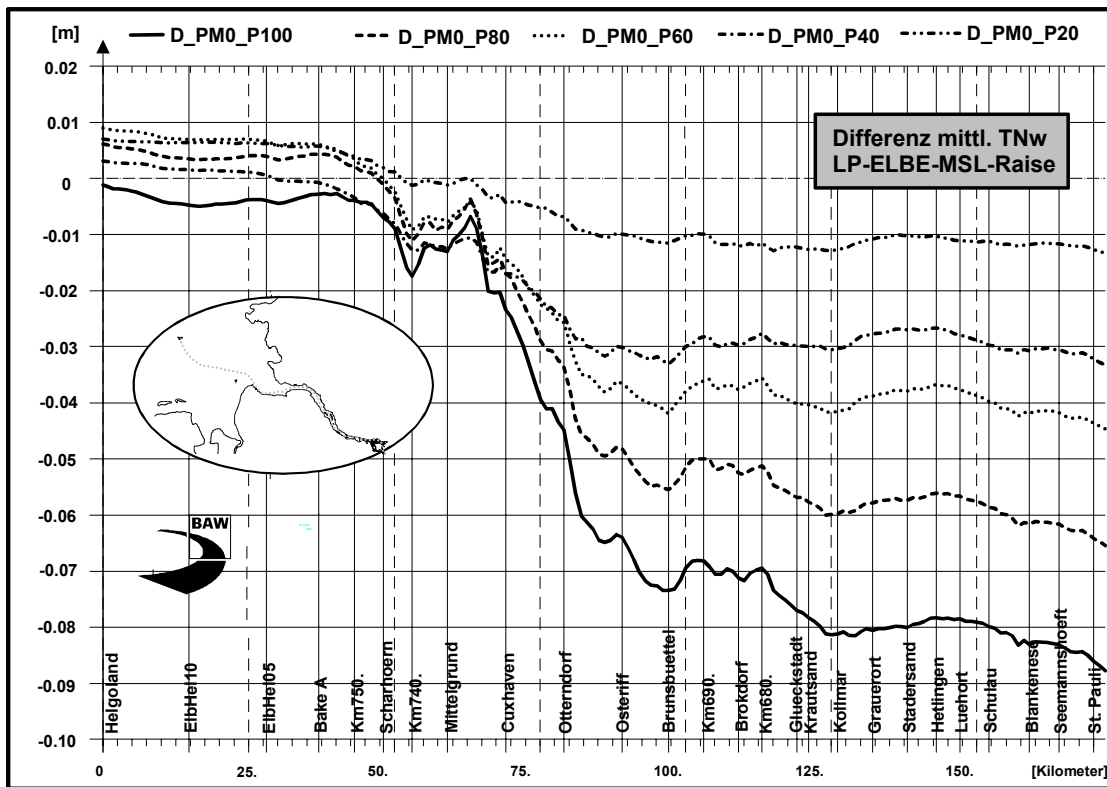


Abb. 8: Abfall des Tnw zw. Hamburg/Helgoland bei Anstieg des MSL von 20 bis 100cm

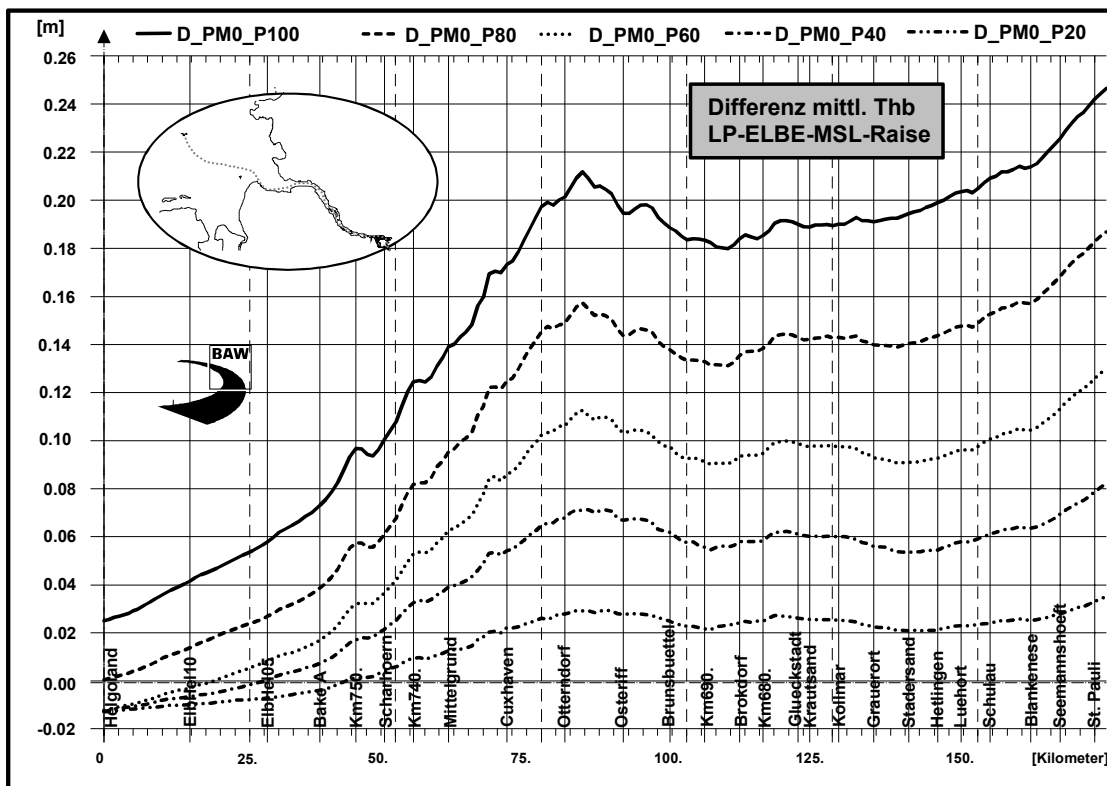


Abb. 9: Anstieg des Thb zw. Hamburg/Helgoland bei Anstieg des MSL von 20 bis 100cm

bedeutet die Intensivierung der Tidedynamik einen Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten. Insbesondere auf den o.g. Wattplatten verstärkt sich die Tidedrömung, bei Flut und bei Ebbe, um bis zu 20-25 cm/s. Im Fahrwasser sind die Veränderungen im Mündungsbereich zwischen Cuxhaven und Ostermündung gering. Die Medemrinne wird durch das seitliche Überströmen der Sände entlastet, was hier zu einer leichten Reduzierung der Geschwindigkeiten führt (vergleiche Abbildung 10).

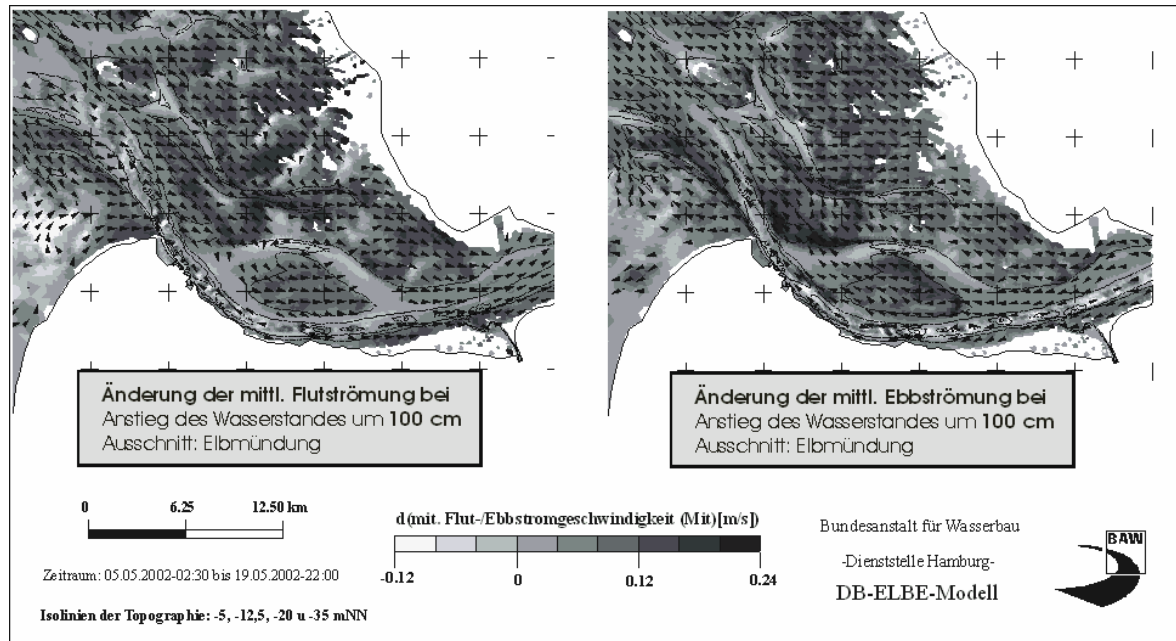


Abb. 10: Änderung der Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten bei Anstieg des MSL um 100 cm

6 Literatur

- FLATHER, R., WILLIAMS, J.: Climate Change Effects on Storm Surges: Methodologies and Results
In: Climate scenarios for water-related and coastal impact, Beersma, J., Agnew, M., Viner, D. and Hulme, M. (eds), ECLAT-2 workshop, report No. 3, KNMI, the Netherlands, 10-12, may 2000, CRU, Norwich, UK, pp. 66-78.
- GÖNNERT, G., ISERT, K., GIESE, H., PLÜß, A. .: Charakterisierung der Tidekurve. In: Die Küste, Heft 68, 2004.
- PLÜß, A. D.: Das Nordseemodell der BAW zur Simulation der Tide in der Deutschen Bucht. In: Die Küste, Heft 67, 2003, S: 83-127.
- STENGEL, T.: Änderungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht und Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs. In: Inst. f. Strömungsmechanik und Elektron. Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover, Heft 38, 1994.

Adresse

Dr.-Ing. Andreas D. Plüß
Bundesanstalt für Wasserbau -Dienststelle Hamburg-
Wedeler Landstraße 157
22559 Hamburg
Germany
E-mail: pluess@hamburg.baw.de

Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Hydrodynamik im Jade-Weser-Gebiet

Iris Grabemann, Hans-Jürgen Grabemann, Dieter P. Eppel

Institut für Küstenforschung, GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH

Summary

Climate change together with a rise in mean sea level will change the hydrodynamical and morphological conditions in the coastal area and can increase the impact on today's coastal defences. For a climate scenario with a mean sea level rise of 0,55 m and an increase of the tidal range of 0,25 m (derived from IPCC projections) the impact on water level, water exchange and flooding of the tidal flats was estimated for the Jade-Weser-area using a circulation model. In the climate scenario the rise in water levels at the seaward boundaries of the solution domain propagates with mean deviations of some centimetres into the Jade-Weser area; the changes are smaller in case of the status quo-topography than in case of a modified topography (higher tidal flats, deeper channels). The inundation of the tidal flats is on average 10 % (status quo-topography) and 3 % (modified topography) longer. Today's supralittoral will become smaller and waves can run up closer to the coast. Possible coastal defence measures to locally reduce the impact on the dikes can be artificial storm surge barriers and polders; the effects of such measures on the water levels during storms are investigated.

Zusammenfassung

Die heutigen Küstenschutzsysteme werden durch einen Meeresspiegelanstieg als Folge einer Klimaänderung und den damit verbundenen hydrodynamischen und morphologischen Veränderungen im Küstenvorfeld veränderten Belastungen ausgesetzt sein. Aus den IPCC Prognosen wurde ein Klimaszenario abgeleitet, das einen mittleren Meeresspiegelanstieg von 55 cm und eine Tidenhubänderung von 25 cm beinhaltet, und seine Auswirkungen auf Wasserstand, Wasseraustausch und Überflutung der Wattflächen wurden für das Jade-Weser-Gebiet mit Hilfe eines Zirkulationsmodells abgeschätzt. Im Klimaszenario setzt sich eine Wasserstandsänderung, die am seeseitigen Rand des Untersuchungs-(Modell-)gebietes vorgegeben wird, im Mittel mit Änderungen von wenigen Zentimetern im Inneren des Gebietes fort; diese Änderungen sind unter Zugrundelegung der Status quo-Topographie etwas kleiner als bei einer modifizierten Topographie (höhere Watten, tiefere Rinnen). Die Wattgebiete werden im Mittel um 10 % (Status quo-Topographie) bzw. 3 % (modifizierte Topographie) länger überflutet. Das heutige Supralittoral wird kleiner, so daß der Seegang höher auflaufen kann. Als mögliche Küstenschutzanpassungsmaßnahmen zur lokalen Reduzierung der Deichbelastung wurden hypothetische Sturmflutsperrwerke in Jade und Weserästuar und Sturmflutentlastungspolder im inneren Weserästuar in ihren Auswirkungen auf den Sturmflutwasserstand untersucht.

1 Einleitung

Küstenschutzaktivitäten an der Nordseeküste lassen sich bis ins Mittelalter zurückverfolgen. Wachsende und neue Niederlassungen sowie eine intensive Landwirtschaft und industrielle und touristische Nutzung begründeten eine hochentwickelte Küstenschutztechnologie. In Niedersachsen umfaßt die sturmflutgefährdete und durch Küstenschutzanlagen geschützte Küstenmarsch 13,6 % (6500 km²) der Fläche. Dort und auf den Inseln leben ca. 1 Mio. Menschen (Peters, 1999). In Schleswig-Holstein sind

ca. 22 % (3500 km²) der Fläche an West- und Ostküste durch entsprechende Anlagen geschützt. Dort leben ca. 150000 Menschen (Probst, 1999). Durch einen Meeresspiegelanstieg als Folge einer Klimaänderung (IPCC, 2001) und den damit verbundenen hydrodynamischen und morphologischen Veränderungen im Küstenvorfeld werden die heutigen Küstenschutzsysteme veränderten Belastungen ausgesetzt sein.

Für ein angenommenes Klimaänderungsszenario wurden die hydrodynamischen Auswirkungen im Jade-Weser-Gebiet (Abb. 1 links) auf der Basis numerischer Simulationen untersucht. Dieser Küstenabschnitt zeichnet sich durch große offene Wattflächen, Rückseitenwatten, Inseln, Sände, Wattrinnen und die tiefen Schifffahrtsrinnen in Jade und Weser aus. Da Küstenschutzmaßnahmen wiederum die Hydrodynamik beeinflussen können, wurden auch Auswirkungen von hypothetischen Sturmflutsperrwerken und Sturmflutentlastungspoldern abgeschätzt. Diese Untersuchungen waren Teil der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten interdisziplinären Verbundprojekte "Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste" (KRIM, <http://www.krim.uni-bremen.de>, Schuchardt und Schirmer 2003) und "Klimawandel und Unterweserregion" (KLIMU, u.a. Schuchardt und Schirmer 2004).

Im folgenden werden die Auswirkungen des Klimaszenarios auf die Wasserstände und auf die Überflutung der Watten dargestellt. Auf die Veränderungen der Strömungen, des Seegangs und der daraus resultierenden Veränderungen der Bodenschubspannungen einschließlich möglicher morphologischer Auswirkungen wird hier nicht eingegangen. Morphologische Aspekte werden nur insoweit diskutiert, als neben den Auswirkungen für die heutige Topographie auch diejenigen für eine modifizierte Topographie (erhöhten Wattflächen, vertieften Rinnen) untersucht werden. Die ausgewählten Küstenschutzmaßnahmen werden auf ihre Auswirkungen auf die Sturmflutwasserstände im Klimaszenario untersucht; ihre Kosten, die Akzeptanz der Maßnahmen in der Öffentlichkeit und mögliche ökologische Folgen werden hier nicht betrachtet.

2 Methodik

Wasserstände und Strömungen wurden mit einem genesteten Modellsystem, das auf dem dreidimensionalen Zirkulationsmodell TRIM (Casulli und Stelling 1998) aufbaut, simuliert. Um Skaleninkonsistenzen zwischen Antriebsdaten (Auflösung: etwa 1 Seemeile, s.u.) und dem Gitter des Jade-Weser-Gebietes (100 m) zu vermeiden, werden die Simulationen auf vier genesteten Gittern (800 m → 400 m → 200 m → 100 m) durchgeführt. Das Weserästuar zwischen Bremen und Brake, das nur einen kleinen Teil des Jade-Weser-Gebietes ausmacht und für das die Auswirkungen einer Klimaänderung bereits untersucht worden sind (u.a. Grabemann et al., 2001, 2004), wurde ausgespart. Die Topographien für die vier Modellgitter wurden aus Peilungen der entsprechenden Wasserbehörden abgeleitet, wobei die Topographie für das feinste Gitter vom Franzius Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen übernommen wurde.

Um die hydrodynamische Variabilität abzubilden, wurden verschiedene Wettersituationen simuliert: schwache bis mäßige Winde (zwei Spring-Nipp-Zyklen im September 1999) und starke ablandige und auflandige Winde (jeweils mehrere Tage im Februar, Oktober und Dezember 1999).

Zur Bewertung der Auswirkungen des angenommenen Klimaszenarios auf die Hydrodynamik im Jade-Weser-Gebiet wurden die Differenzen zwischen Simulationen für den Status quo und denjenigen für das Klimaszenario analysiert.

Für die Simulationen des Status quo wurden Modelldaten aus den operationellen Gezeiten- und Wettervorhersagemodellen (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und Deutscher Wetterdienst (DWD)) an den seeseitigen Modellrändern des 800 m * 800 m-Gitters und an der Wasseroberfläche als Antriebsdaten eingesetzt. Des Weiteren wurden tägliche Werte der Oberwasser-

abflüsse von Elbe und Weser (Deutsche Gewässerkundliche Jahrbücher, Elbegebiet Teil 3 und Weser- und Emsgebiet) etwa bei Brunsbüttel und Brake vorgegeben.

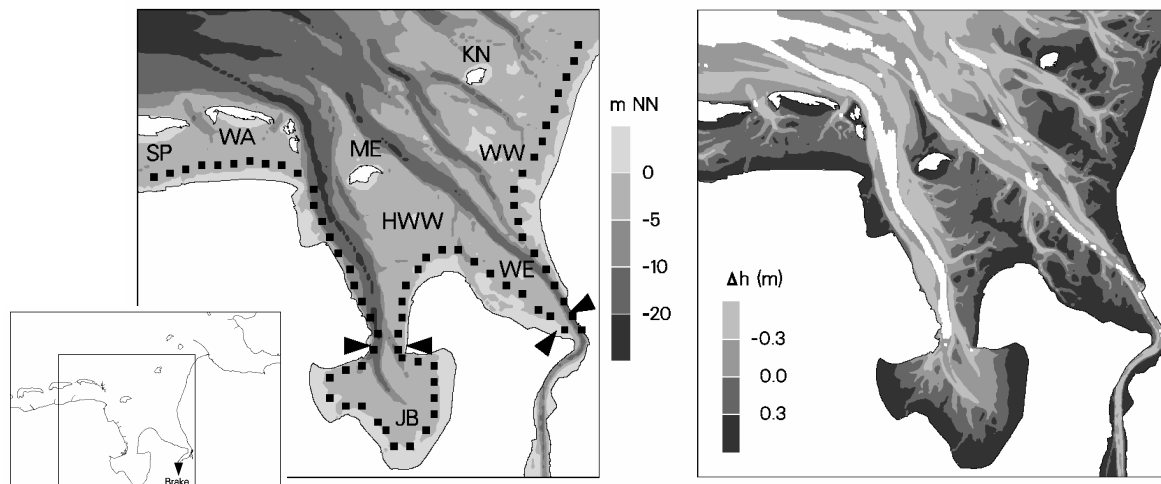


Abb. 1: Links: Status quo-Topographie des Jade-Weser-Gebietes (100 m * 100 m-Gitter). Die schwarzen Quadrate entlang der Küstenlinie geben die Orte wieder, für die in den Abbildungen 2 rechts bzw. 5 links Wasserstandsunterschiede bzw. Wasserstände dargestellt sind. Die Pfeile deuten die Positionen der beiden hypothetischen Sturmflutsperrwerke an. SP: Spiekeroog, WA: Wangerooge, ME: Alte Mellum, KN: Großer Knechtsand, HWW: Hohe-Weg-Watt, WW: Wurster Watt, JB: Jadebusen, WE: Weserästuar. Die kleine Karte zeigt die Küstenlinie des größten Gitters. Rechts: Differenz (Δh) zwischen der Status quo und der modifizierten Topographie.

Die Qualität der Status quo-Simulationen wurde durch Vergleich der modellierten Wasserstände mit Pegelständen abgeschätzt. Im Mittel sind die modellierten Hochwasser um 0,1 m und die modellierten Niedrigwasser um 0,2 m höher als die gemessenen; für einzelne Tiden können diese Abweichungen in der Größenordnung von 0,5 m liegen. Diese Abweichungen können u.a. durch Diskrepanzen zwischen der Modelltopographie und der "realen" Topographie zur Zeit der Messungen hervorgerufen werden. Sie können auch durch Abweichungen zwischen den als Antriebsdaten genutzten Modelldaten aus den operationellen Modellen und den "realen" Wasserständen entstehen. Bei Bremerhaven können die Wasserstände durch die Vernachlässigung der Weser zwischen Bremen und Brake leicht fehlerhaft beeinflusst sein.

Bei den Simulationen für das Klimaszenario wurden ein Anstieg des Meeresspiegels von 0,55 m und eine Änderung des Tidenhubs von 0,25 m den Status quo-Antriebsdaten überlagert (Anstieg des Hochwassers + 0,55 m + 0,1 m, Anstieg des Niedrigwassers + 0,55 m - 0,15 m). Bei den simulierten Sturmfluten wurde außerdem eine Erhöhung der Windstärke von 7 % angenommen. Dieses "kräftige" Klimaszenario wurde aus Prognosen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2001) für 2050 abgeleitet (<http://www.krim.uni-bremen.de>).

Die Simulationen für das Klimaszenario wurden sowohl mit der heutigen (Status quo-)Topographie als auch mit einer modifizierten Topographie durchgeführt. Beim Einsatz der Status quo-Topographie wird davon ausgegangen, daß das Watt bei einem Meeresspiegelanstieg nicht mitwächst. In Anlehnung an Überlegungen von u.a. Ferk (1995) und Hofstede (1999), nach denen das Watt bei einem moderat beschleunigten Meeresspiegelanstieg mitwachsen könnte - wobei die Differenz zwischen der Höhe der Watten und dem mittleren Hochwasser aber größer sein würde als heute - und sich die Rinnen vertiefen könnten, wurde die Status quo-Topographie modifiziert (Abb. 1 rechts). Dabei wurde

angenommen, daß der Materialgewinn auf den Watten etwa gleich dem Materialverlust in den Rinnen ist.

Mögliche Küstenschutzmaßnahmen als Folge eines Meeresspiegelanstiegs sind neben einer Erhöhung der Deiche u.a. Sturmflutsperrwerke und Sturmflutentlastungspolder. Um deren Auswirkungen auf die Hydrodynamik zu untersuchen, wurden Simulationen mit hypothetischen Sturmflutsperrwerken in der Jade bei Wilhelmshaven und im Weserästuar bei Bremerhaven und Simulationen mit drei hypothetischen Sturmflutentlastungspoldern entlang des inneren Weserästuars jeweils mit der Status quo-Topographie durchgeführt. Für die Simulationen mit den Poldern wurde ein querschnittsgemitteltes Transportmodell des inneren Weserästuars (Müller et al. 1992) zwischen dem Wehr in Bremen und Robbensüdsteert (etwa 10 km stromab von Bremerhaven) genutzt. In diesem Fall wurde auch die Luneplate südlich von Bremerhaven ausgedeicht. Für den Überlauf des Wassers in die Polder wurde jeweils eine Schwellenhöhe von etwa 3,2 m über NN und eine Öffnungsbreite von etwa 300 bzw. 500 m angenommen. Für die Luneplate wurde eine Höhe von 1,5 m über NN für das Überströmen und für ihre mittlere Höhe vorgegeben. Bei Robbensüdsteert wurde im Klimaszenario der Wasserstand des dortigen Pegels um 0,7 m gegenüber dem Status quo erhöht (von Lieberman et al. 2004).

3 Auswirkungen des Klimaszenarios

3.1 Wasserstände

Im Klimaszenario nehmen die Wasserstände wie im Status quo in Richtung Süden und Osten zu (Abb. 2 links). Dabei können die Hochwasser bei starken ablandigen Winden an den südlichen und östlichen Küsten niedriger sein als bei schwachen bis mäßigen Winden (im Oktober 1999 um etwa 1,5 m). Bei Stürmen aus nordwestlichen Richtungen nehmen die Wasserstände an den südlichen und östlichen Küsten durch den Windstau dagegen zu (bei der Sturmflut im Februar 1999 im Jadebusen beispielsweise um etwa 2 m).

Im Klimaszenario mit Status quo-Topographie setzen sich die an den Modellrändern angenommen Erhöhungen des Hochwassers von 0,65 m und die des Niedrigwassers von 0,4 m mit Abweichungen von wenigen Zentimetern in das Jade-Weser-Gebiet fort (Abb. 2 links). Diese Abweichungen variieren örtlich von Tide zu Tide und sind sowohl bei schwachen bis mittleren Winden als auch bei den untersuchten Starkwindereignissen in Küstennähe in der Größenordnung von $\pm 0,08$ m (Abb. 2 rechts).

Wird im Klimaszenario zusätzlich die Windstärke um 7 % erhöht, so nimmt der Windstau an den südlichen und östlichen Küsten zu; für die Sturmflut im Februar 1999 kommt es dort zu einer zusätzlichen Erhöhung des Hochwassers um bis zu 0,05 m im Vergleich zum Klimaszenario ohne Erhöhung der Windstärke (vgl. Abb. 5 links).

Im Klimaszenario mit modifizierter Topographie erhöhen sich die Hochwasserstände im Vergleich zum Klimaszenario mit Status quo-Topographie im Mittel um wenige weitere Zentimeter in Richtung Süden und Osten (Abb. 2 links und rechts), während die Niedrigwasser etwas absinken.

Für den Tidenhub schwankt die Differenz zwischen Status quo und Klimaszenario mit Status quo-Topographie um die vorgegebene Änderung von 0,25 m. Im Jadebusen ist die Diferenz am größten; dort beträgt sie im Mittel knapp 0,3 m. Im Klimaszenario mit modifizierter Topographie nimmt die Differenz zum Status quo weiter zu; im Jadebusen und äußeren Weserästuar liegt sie im Mittel bei 0,35 m.

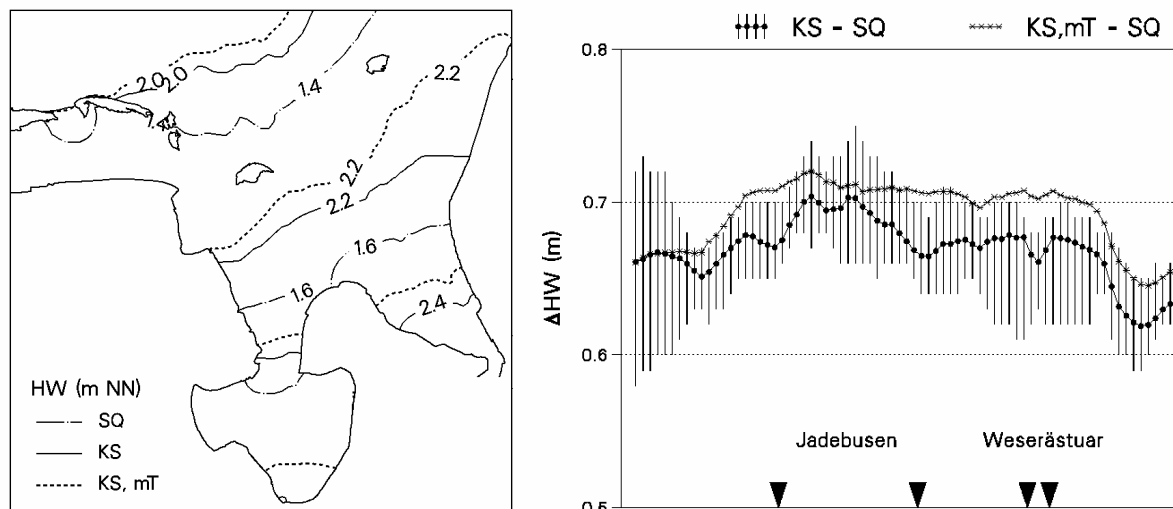


Abb. 2: Links: Räumliche Verteilungen der simulierten Hochwasser (HW) für eine mittlere Tide im Status quo (SQ) und im Klimaszenario mit Status quo (KS) bzw. mit modifizierter Topographie (KS, mT). Rechts: Mittlere Differenzen des Hochwassers (ΔHW , Mittelwerte über 14 Tage im September und 5 Tage im Februar 1999) zwischen Klimaszenario und Status quo für die in Abbildung 1 dargestellten küstennahen Orte. Im Fall der Differenzen zwischen Klimaszenario mit Status quo-Topographie und Status quo sind auch jeweils die maximalen und minimalen Differenzen durch schmale Balken dargestellt.

3.2 Überflutete Flächen und Wasservolumina

Eine Erhöhung der Wasserstände und des Tidenhubs im Jade-Weser-Gebiet geht einher mit einer veränderten Überflutung der Wattflächen – sowohl in Höhe als auch Dauer – und mit einem veränderten Austausch von Wasservolumina. Über den großräumigen Wattflächen mit Höhen zwischen -2 m und 2 m NN kann eine kleine Änderung in den Wasserständen zu einer großen Änderung im Anteil der überfluteten Flächen und in der Dauer ihrer Überflutung führen. Die im folgenden aufgeführten Angaben zu Flächenanteilen und Wasservolumina sind daher sehr sensitiv gegenüber kleinen Diskrepanzen in den Wasserständen und Abweichungen zwischen der Modelltopographie und der "realen" Topographie und können daher nur als semi-quantitative Abschätzungen angesehen werden.

Im Status quo sind etwa 68 % der Wattflächen im Jade-Weser-Gebiet bei schwachen bis mittleren Winden während der Hälfte der betrachteten Tidezyklen im September 1999 überflutet. Die deichnahen Flächen werden nur bei hohen Springtiden oder bei Stürmen überflutet.

Im Klimaszenario mit Status quo-Topographie werden etwa 77 % der Wattflächen während der Hälfte der Zeit überflutet. Für den größten Teil der im Status quo überfluteten Wattflächen verlängert sich die Dauer der Überflutung um etwa 10 % (Abb. 3 links). Die bei mittleren Verhältnissen temporär überfluteten Wattbereiche dehnen sich weiter in Richtung Deichvorland aus.

Im Klimaszenario mit modifizierter Topographie werden etwa 69 % der Wattflächen während der Hälfte der Zeit überflutet. Dieser Flächenanteil ist nur geringfügig größer als im Status quo. Die Dauer der Überflutung für den größten Teil der bereits im Status quo überfluteten Wattflächen verlängert sich um 2 bis 4 % (Abb. 3 rechts).

Veränderungen im Austausch von Wasservolumina werden beispielhaft durch die Tideprismen für die Wateinzugsgebiete der Harle (zwischen Spiekeroog und Wangerooge), der Blauen Balje (zwischen Wangerooge und Minsener Oog) und der Robinsbalje (südlich des Großen Knechtsandes) dargestellt.

Im Status quo betragen die Tideprismen dieser drei Einzugsgebiete etwa 146, 89 und 257 Mio. m³. Diese Zahlen sind etwas größer als die von Ferk (1995) angegebenen, möglicherweise begründet durch etwas unterschiedliche Topographien und Wasserstände.

Im Klimaszenario mit Status quo-Topographie nehmen die Prismen der drei Einzugsgebiete aufgrund der Erhöhung der Hoch- und Niedrigwasser und der Vergrößerung des Tidenhubs um etwa 26 % zu. Im Klimaszenario mit modifizierter Topographie nehmen die Prismen dagegen nur um etwa 17 % gegenüber den Prismen im Status quo zu.

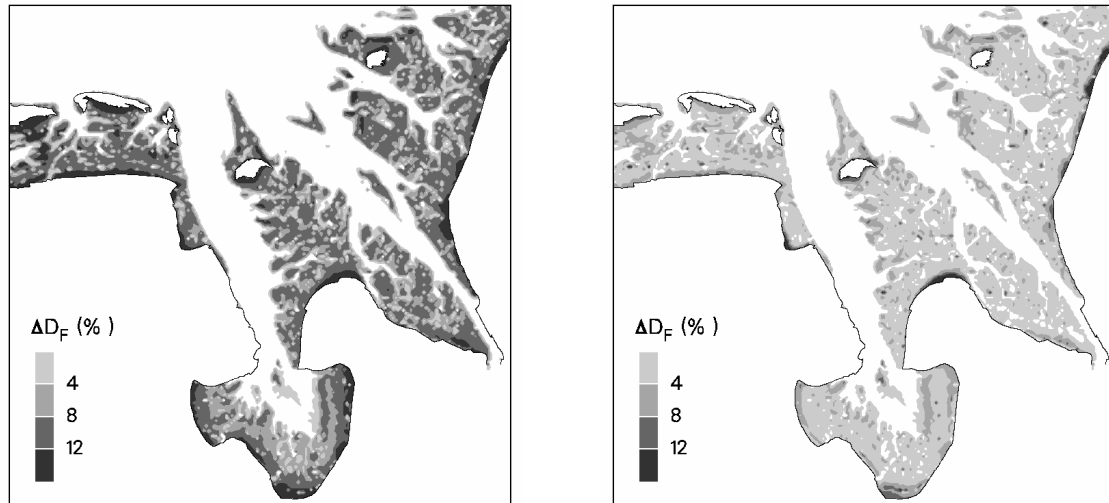


Abb. 3: Räumliche Verteilung der Differenz (ΔD_F) der Überflutungsdauer zwischen Status quo und Klimaszenario mit Status quo- (links) und modifizierter Topographie (rechts) in % der Gesamtzeit von 28 Tidezyklen im September 1999 bei schwachen bis mittleren Winden.

4 Auswirkungen von Küstenschutzmaßnahmen im Klimaszenario

4.1 Sturmflutsperrwerke

Eine Möglichkeit zur lokalen Reduzierung der vermehrten Belastung der Küstenschutzsysteme durch die erhöhten Wasserstände im Klimaszenario sind Sturmflutsperrwerke in Jadebusen und Weserästuar. Die Auswirkungen von Sperrwerken in Jade und Weserästuar, deren Positionen vom Franzius Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen vorgeschlagen wurden, wurden für die Sturmflut im Februar 1999 simuliert. Diese Simulation zeigt, daß bei Schließung der Sperrwerke um Niedrigwasser die nachfolgend eintretenden Hochwasser in der Jade, im äußeren Weserästuar und an der Wurster Küste deutlich höher auflaufen als bei der Simulation ohne Sperrwerke (Abb. 4 links). Das Wasser, das seewärts des Sperrwerkes im Jadebusen gestoppt wird, fließt über das Hohe-Weg-Watt in Richtung Außenweser. Zusammen mit dem Wasser, das am Sperrwerk im Weserästuar gestoppt wird, erhöht es die Wasserstände insbesondere im äußeren Weserästuar und an der angrenzenden östlichen Küste. Durch den Rückstau des Wassers kommt es auch an der Küste des Wangerlands zu einer leichten Erhöhung der Wasserstände. Im Jadebusen und im inneren Weserästuar bleiben die Hochwasser unter 1 m NN, wobei sie im Weserästuar stromauf des Sperrwerkes nach seiner Schließung aufgrund des abfließenden Oberwassers geringfügig ansteigen.

4.2 Sturmflutentlastungspolder

Eine weitere Möglichkeit zur lokalen Reduzierung der vermehrten Belastung der Küstenschutzsysteme durch die erhöhten Wasserstände im Klimaszenario sind Sturmflutentlastungspolder im Weserästuar. Die Wirksamkeit von drei Sturmflutentlastungspoldern, deren Flächen (insgesamt etwa 5800 ha) in Anlehnung an Vorschläge der BUND-Arbeitsgruppe "Unterweser" (BUND 1996) ausgewählt wurden, sowie der ausgedeichten Luneplate südlich von Bremerhaven (etwa 1100 ha) wurde für die Sturmflut im Januar 1994 näherungsweise abgeschätzt (von Lieberman et al. 2004). Diese Sturmflut fiel mit hohen Oberwasserabflüssen der Weser ($> 1000 \text{ m}^3/\text{s}$) zusammen, so daß im Bremer Bereich das Hochwasser im Status quo über 5 m NN anstieg. Bei Anschluß der Polder an die Unterweser und zusätzlicher Ausdeichung der Luneplate sinken die Hochwasserstände südlich von Bremerhaven bis Bremen ab (Abb. 4 rechts). Bei Brake beträgt das Absinken im Klimaszenario etwa 0,35 m, im Bremer Bereich etwa 0,7 m.

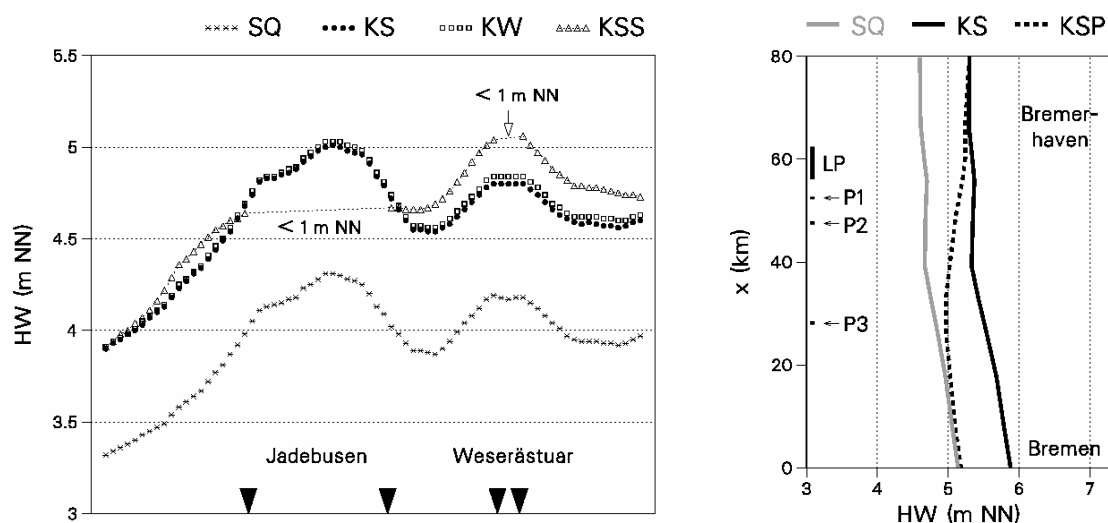


Abb. 4: Links: Hochwasser (HW) für die Sturmflut im Februar 1999 im Status quo (SQ) und im Klimaszenario ohne (KS) bzw. mit Sturmflutsperrwerken (KSS) für die in Abbildung 1 angegebenen küstennahen Orte. KW: Klimaszenario mit Status quo-Topographie und Erhöhung der Windstärke um 7 %. Rechts: Hochwasser (HW) im Weserästuar zwischen Robbensüdsteert (km 80) und Bremen (km 0) für die Sturmflut im Januar 1994 im Status quo (SQ) und Klimaszenario ohne (KS) bzw. mit Poldern (KSP). LP: Position der Luneplate, P1, P2, P3: Positionen der Polderöffnungen (vgl. Abbildung 12.1 in von Lieberman et al. 2004).

5 Diskussion

Im Klimaszenario erhöhen sich die Hochwasser und damit die Belastung der Küstenschutzsysteme und das Risiko ihres Versagens im Jadebusen geringfügig stärker als an den anderen Küsten im Jade-Weser-Gebiet. Im Klimaszenario mit modifizierter Topographie ist das Risikopotential etwas höher als im Klimaszenario mit Status quo-Topographie. Auch die Häufigkeit des Vorkommens von Wasserständen, bei denen das Wasser den Deich erreicht und ihn damit belasten kann, nimmt deutlich zu (Abb. 5). Für ausgewählte Küstenabschnitte wurde das Risiko des Versagens von Küstenschutzsystemen im Verbundprojekt KRIM im Franzius Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen untersucht. Bei einem Meeresspiegelanstieg von 0,55 m würde beispielsweise im Wangerland die heutige

Versagenswahrscheinlichkeit der Deiche von etwa 1/2500 auf etwa 1/500 zunehmen (Elsner et al. 2004). Um im Klimaszenario das heutige Risiko des Versagens von Küstenschutzsystemen nicht zu erhöhen, wären Maßnahmen wie Deicherhöhung, Sturmflutsperrwerke, etc. notwendig.

Sturmflutsperrwerke im Jadebusen und in der Wesermündung würden die Belastung der Küstenschutzsysteme bei Stürmen im Jadebusen mit einer Deichlänge von etwa 50 km und im inneren Weserästuar flußauf von Bremerhaven mit einer Deichlänge von etwa 120 km vermindern. Als Folge der Schließung der Sperrwerke bei Sturmfluten würden sich die Hochwasser besonders im äußeren Weserästuar und an der Wurster Küste erhöhen. Die vermehrte Belastung dieser Küsten würde dort zusätzliche Küstenschutzmaßnahmen erfordern. Sturmflutentlastungspolder in der Unterweser würden die Hochwasserstände bei Sturmfluten nach flußauf deutlich senken. Eine gezielte und schnelle Entleerung müßte jedoch z.B. durch Deichsiele und Schöpfwerke gewährleistet sein, sonst würden sie bei einer folgenden erhöhten Flut ihre Wirkung verlieren. Kosten, ökologische Auswirkungen und die Frage der Akzeptanz von Mündungssperrwerken und Sturmflutentlastungspoldern werden u.a. in von Lieberman et al. (2004) angesprochen.

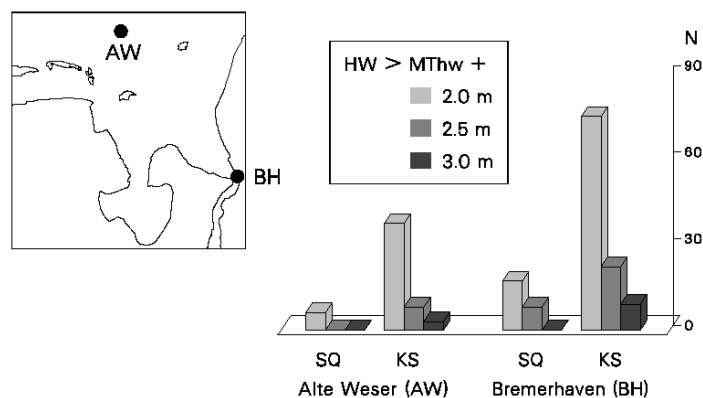


Abb. 5: Überschreitungshäufigkeit (N) des MThw + 2 m, MThw + 2,5 m und MThw + 3 m bei Alte Weser und Bremerhaven für den Status quo (SQ) und das Klimaszenario (KS). Die in den letzten 50 Jahren gemessenen höchsten Hochwasser waren MThw + 2,7 m bei Alte Weser und MThw + 3,6 m bei Bremerhaven. Für den Status quo wurden die gemessenen Hochwasser an den Pegeln in den Jahren 1988 bis 1999 genutzt (Deutsche Gewässerkundliche Jahrbücher, Küstengebiet der Nordsee und Weser- und Emsgebiet). Für das Klimaszenario wurden die Häufigkeiten unter der Annahme, daß die gleichen Tiden wie in den Jahren 1988 bis 1999 vorkommen, die Hochwasser aber entsprechend der Simulationsergebnisse im Mittel höher sind, ermittelt.

Ein Anstieg des mittleren Meeresspiegels kann sich nicht nur durch erhöhte Sturmflutwasserstände auf den Küstenschutz auswirken. Im Klimaszenario hat die Fläche der temporär überfluteten Wattflächen gegenüber dem Status quo um etwa 7 % abgenommen; ihre Überflutungsdauer ist bei modifizierter Topographie jedoch weniger verlängert als bei Status quo-Topographie. Des Weiteren dehnt sich der Bereich der periodisch überfluteten Wattflächen weiter Richtung Küste aus. Diese Änderungen in der Überflutung der Wattflächen können zu Veränderung in der Zonierung der Biotope und zu einer morphologischen Destabilisierung der Deichvorländer führen. Die ökologische Relevanz derartiger Änderungen und ihre Bedeutung für den Küstenschutz wird in Wittig et al. (2004) diskutiert.

Das angenommene Klimaszenario impliziert nicht nur eine Erhöhung der Wasserstände und Änderungen in der Höhe und Dauer der Überflutung der Wattflächen, sondern auch Änderungen der Strömungen und des Seegangs und daraus resultierend Änderungen der Bodenschubspannungen. Diese

Änderungen und ihre Auswirkungen wurden im Verbundprojekt KRIM ebenfalls untersucht, werden hier aber nur kurz angeschnitten.

Die Bedeutung der Außensände, Wattflächen und Vorländer im Wattenmeer für den Küstenschutz liegt in ihrer seegangs- und strömungsdämpfenden Wirkung, wodurch die hydrodynamische Belastung der Landesschutzdeiche reduziert wird. Der von der Nordsee einlaufende Seegang verliert einen Teil seiner Energie und erreicht die Deiche mit reduzierter Wellenhöhe. Im Klimaszenario ist das Wattenmeer durch seine höhere und länger andauernde Überflutung intensiver veränderten Bodenschubspannungen ausgesetzt, so daß dort morphologische Änderungen zu erwarten sind. Aufgrund der höheren Wasserstände über dem Watt kann der Seegang im Klimaszenario weiter Richtung Küste durchgreifen und höherer Seegang kann sowohl das Sediment im Watt destabilisieren als auch zu vermehrtem Wellenauflauf an den Deichen führen. Durch vermehrtes Auftreten höherer Wasserstände (Abb. 5) können diese Situationen zunehmen.

Die Größe des Tideprismas eines Wateinzugsgebietes im Verhältnis zum Seegatquerschnitt ist für seine morphologische Stabilität von Bedeutung (u.a. Ferk, 1995; Hofstede, 1999). Die Tideprismen der drei untersuchten Wateinzugsgebiete nehmen im Klimaszenario mit modifizierter Topographie weniger zu und ihre Seegatquerschnitte sind größer als im Klimaszenario mit unveränderter Topographie. Wird angenommen, daß die Wateinzugsgebiete im Status quo morphologisch stabil sind, wären sie im Klimaszenario mit modifizierter Topographie morphologisch stabiler als im Klimaszenario mit Status quo-Topographie.

DANKSAGUNG: Die Autoren danken dem Deutschen Wetterdienst, dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, der Bundesanstalt für Wasserbau und dem Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven für die Überlassung zahlreicher Datensätze. Hilfreiche Diskussionen wurden mit H. Kapitza und W. Puls geführt. Diese Untersuchung wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert (Förderkennzeichen 01LD0022).

6 Literatur

- BUND: Das Weserästuar im Spannungsfeld zwischen Natur und Küstenschutz. In: Bremer Beiträge für Naturkunde und Naturschutz, Heft 2, 1996, S. 1-96.
- CASULLI, V./STELLING, G. S.: Numerical simulation of 3D quasi-hydrostatic, free surface flows. In: J. Hydraulic Engineering, Vol. 124, 1998, S. 678-686.
- ELSNER, A./MAI, S./ZIMMERMANN, C.: Risikoanalyse – ein Element des Küstenzonenmanagements. In: SCHERNEWSKI, G./DOLCH, T.: Geographie der Meere und Küsten, Coastline Reports, Heft 1, 2004, S. 137-148.
- FERK, U.: Folgen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs für die Wattgebiete der niedersächsischen Nordseeküste. In: Die Küste, Heft 57, 1995, S. 135-156.
- GRABEMANN; H.-J./GRABEMANN, I./HERBERS, D./MÜLLER, A.: Effects of a specific climate scenario on the hydrography and transport of conservative substances in the Weser estuary, Germany: a case study. In: Climate Research, Vol. 18, 2001, S. 77-87.
- GRABEMANN; H.-J./GRABEMANN, I./MÜLLER, A.: Die Auswirkungen eines Klimawandels auf Hydrographie und Gewässergüte der Unterweser. In: SCHUCHARDT, B./SCHIRMER, M.: Klimawandel und Küste – Die Zukunft der Unterweserregion, Springer, 2004, S. 59-78.
- HOFSTEDE, J.: Das Wattenmeer – Struktur, Funktion und künftige Stabilität. In: Jahrbuch der Marburger Geographischen Gesellschaft e.V., 1999, S. 246-253.

- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC): Climate change 2001 - The scientific basis. Cambridge University Press, UK, 2001, 944 Seiten.
- MÜLLER, A./GRABEMANN, I./KUNZE, B.: Water quality modelling: prediction of the transport of water constituents in the Weser estuary (Germany). In: SPAULDING, M. L./BEDFORD, K./BLUMBERG, A./CHENG, R./SWANSON, C.: Estuarine and coastal modelling. American Society of Civil Engineers, 1992, S. 405-417.
- PETERS, K.-H.: Der Küstenschutz als Voraussetzung für die Besiedlung der Küstenmarschen. In: Umweltatlas Wattenmeer, Band 2: Wattenmeer zwischen Elb- und Emsmündung, Ulmer, 1999, S. 122-123.
- PROBST, B.: Küstenschutz – früher und heute. In: Umweltatlas Wattenmeer, Band 1: Nordfriesisches und Dithmarscher Wattenmeer, Ulmer, 1998, S. 152-153.
- SCHUCHARDT, B./SCHIRMER, M.: Die Fallstudie "Klimaänderung und Unterweserregion" (KLIMU): Konzept, Struktur und interdisziplinärer Forschungsprozess. In: SCHUCHARDT, B./SCHIRMER, M.: Klimawandel und Küste – Die Zukunft der Unterweserregion, Springer, 2004, S. 3-22.
- SCHUCHARDT, B./SCHIRMER, M.: Ansatz und Ziel des interdisziplinären Forschungsvorhabens "Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste" (KRIM). In: DASCHKEIT, A./STERR, H.: Aktuelle Ergebnisse der Küstenforschung. 20. AMK-Tagung, Berichte Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Universität Kiel, Heft 28, Büsum, 2003, S. 31-42.
- VON LIEBERMAN, N./GRABEMANN, I./MÜLLER, A./OSTERKAMP, S.: Vergleichende Abschätzung von Effektivität und Nebenwirkungen verschiedener Reaktionsvarianten des Küstenschutzes an der Unterweser gegenüber einer Klimaänderung. In: SCHUCHARDT, B./SCHIRMER, M.: Klimawandel und Küste – Die Zukunft der Unterweserregion, Springer, 2004, 243-254.
- WITTIG, S./KRAFT, D./MEYERDIRKS, J./SCHIRMER, M.: Risikobewertung ökologischer Systeme an der deutschen Nordseeküste im Klimawandel. In: SCHERNEWSKI, G./DOLCH, T.: Geographie der Meere und Küsten, Coastline Reports, Heft 1, 2004, S. 127-136.

Adresse

Dr. Iris Grabemann
Dr. Hans-Jürgen Grabemann
Dr. Dieter P. Eppel
Institut für Küstenforschung
GKSS Forschungszentrum
Postfach 1160
21494 Geesthacht
Germany

E-mail: iris.grabemann@gkss.de
hans-juergen.grabemann@gkss.de
dieter.eppel@gkss.de

Einfluss sehr hoher Abflüsse auf die Wasserstände in der Tideelbe

Dr. Elisabeth Rudolph

Bundesanstalt für Wasserbau - Dienststelle Hamburg

Summary

Water levels along the Elbe Estuary are not only caused by wind and tide of the North Sea but also by the fresh water discharge from the river Elbe. A sensitivity study is used to understand the influence of the fresh water discharge on water levels along the Elbe Estuary. The use of numerical models allows to examine even extreme discharge events, that have never been observed. They are combined with tides and storm surges in order to analyse the effect on water levels. Along the Elbe estuary areas can be identified where the water levels are sensitive to changes in fresh water discharge.

Zusammenfassung

Die Wasserstände in der Tideelbe werden sowohl durch die Gezeitendynamik und den Wind über der Nordsee als auch durch den Oberwasserzufluss aus der Oberen und Mittleren Elbe bestimmt. In einer Sensitivitätsstudie wird die Bedeutung des Oberwasserzuflusses für die Wasserstände entlang der Tideelbe untersucht. Der Einsatz numerischer Modelle ermöglicht es, extreme, noch nie beobachtete Oberwasserereignisse zu untersuchen, sie mit mittleren Tiden und Sturmfluten zu kombinieren und ihren Einfluss auf das Hochwasser zu analysieren. Für die Tideelbe können Bereiche identifiziert werden, in denen die Wasserstände durch Variationen im Oberwasser unterschiedlich stark beeinflusst werden.

1 Einleitung

Die beobachtete Erwärmung der Atmosphäre geht einher mit einer Zunahme des Wasserdampfgehaltes der Troposphäre. Diese Veränderung des Klimasystems äußert sich in einem intensivierten Wasserkreislauf und in stärkeren Niederschlagsereignissen. In den mittleren und hohen Breiten der nördlichen Hemisphäre wird zusätzlich eine Zunahme der Niederschlagsmenge beobachtet (IPCC, 2001). Extreme Niederschlagsereignisse in den Einzugsgebieten der in die Nordsee mündenden Flüsse können zu extremen Oberwasserereignissen in den Flussmündungsgebieten, wie z.B. der Tideelbe, führen. Für den Küstenschutz ist es somit von Interesse, den Einfluss extremer, noch nicht beobachteter Oberwasserereignisse auf die Wasserstände entlang der Tideelbe zu untersuchen.

Der Einsatz hydrodynamisch – numerischer Modelle ermöglicht, sowohl historische Situationen als auch bisher nicht beobachtete extrem hohe Oberwasserszenarien in der Tideelbe zu untersuchen. Diese Vorgehensweise erlaubt, den Einfluss des Oberwassers auf das Hochwasser zu analysieren. Die Bedeutung des Oberwasserzuflusses auf die Höhe der Hochwasserstände entlang der Tideelbe wird für drei Situationen mit unterschiedlich hohen Wasserständen untersucht: mittlere Tiden, Sommerfluten und Sturmfluten.

2 Das Elbeästuar und sein Einzugsgebiet

Die Elbe ist mit einer Länge von 1100 km und einem Einzugsgebiet von 150 000 km² nach Donau, Rhein und Weichsel der viertgrößte Fluss Mittel- und Westeuropas. Sie fließt von der Elbequelle im Riesengebirge durch das böhmische Becken und das Elbsandsteingebirge in das Norddeutsche Tiefland und mündet bei Cuxhaven in die Nordsee. Zum Einzugsgebiet der Elbe gehören Mittelgebirge wie Teile des Böhmerwaldes, das Erzgebirge, das Fichtelgebirge oder der Harz, und Tiefebene wie das Böhmisches Becken sowie das Mittel- und Norddeutsche Tiefland. Einen detaillierten hydrologisch – geographischen Überblick gibt z.B. die Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE, 2001). Das Abflussregime der Elbe ist durch einen hohen Abfluss im Winterhalbjahr (November bis April: MQ = 850 m³/s) und durch geringen Abfluss im Sommer (Mai bis Oktober: MQ = 565 m³/s) gekennzeichnet. Über 60% des mittleren Jahresabflusses fließen im Winterhalbjahr ab. Jedoch können extreme Niederschlagsereignisse im Sommerhalbjahr über dem Elbeeinzugsgebiet abweichend von der langjährigen Statistik zu hohen Oberwasserabflüssen auch im Sommer führen. Im August 2002 benötigte die durch die extremen Niederschläge vom 11.8. bis 13.8.2002 über Böhmen, dem Erzgebirge und dem Harz entstandene Oberwasserwelle ca. 5 Tage, um die ca. 500 km von Dresden bis Geesthacht (IKSE, 2004) zurückzulegen.

Das Elbeästuar, d.h. das tidebeeinflusste Flussmündungsgebiet, reicht von der Elbmündung bei Cuxhaven (Elbe km 725) ca. 140 km stromauf bis zur Tidegrenze am Wehr Geesthacht (Elbe km 586). Das Elbeästuar verengt sich von 15 km Breite bei Cuxhaven auf 3 km bei Brunsbüttel (Elbe km 695) und auf 300 m bei Geesthacht. Im Mündungsbereich ist die Elbe mehr als 20 m tief. Zwischen der Mündung und Hamburg ist das Elbeästuar gleichzeitig die Seeschiffahrtsstraße zum Hafen Hamburg. Die Fahrrinntiefe der Elbe ist in diesem Bereich an die nautischen Anforderungen angepasst und hat heute eine Tiefe von NN-16 m. Stromauf von Hamburg St.Pauli (Elbe km 625) nimmt die Tiefe deutlich ab und erreicht am Wehr Geesthacht NN-5 m. Abbildung 1 gibt einen schematischen Überblick des Elbeästuares.

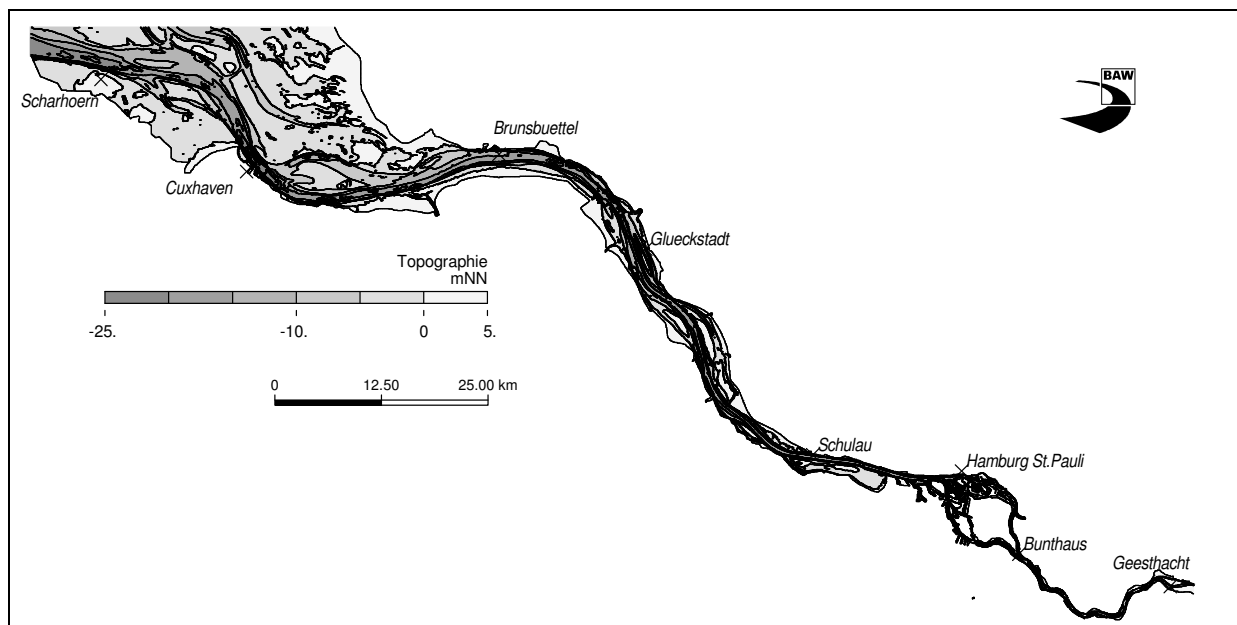


Abb. 1: Topographie des Elbeästuares von der Mündung bei Cuxhaven bis zur Tidegrenze am Wehr Geesthacht.

Die Wasserstände im Elbeästuar werden sowohl durch die Gezeitendynamik der Nordsee und dem Wind über Nordsee und Deutscher Bucht als auch durch den Oberwasserzufluss aus der Oberen und Mittleren Elbe bestimmt. Tabelle 1 gibt einen Überblick über charakteristische Oberwasserereignisse am Abflusspegel Neu Darchau (Elbe km 536).

HQ ₁₀₀ Neu Darchau	4000 m ³ /s
HHQ Neu Darchau (April 1940)	3620 m ³ /s
MNQ Neu Darchau	280 m ³ /s
MQ Neu Darchau	720 m ³ /s
Sturmflut 3.1.1976	500 m ³ /s
Bemessungssturmflut 2085A	2200 m ³ /s
Sommerflut 21.8.1990	200 m ³ /s
Elbehochwasser 2002:	
HQ Neu Darchau 22.8.2002	3425 m ³ /s
HQ Dresden 17.8.2002	4700 m ³ /s

Tab. 1: Oberwasserereignisse der Elbe bei Neu Darchau (Elbe km 536) bzw. Dresden (Elbe km 55) (DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH, 1998).

3 Untersuchungskonzept

Die Bedeutung des Oberwasserzuflusses für die Höhe der Hochwasserstände entlang des Elbeästuares wird für drei unterschiedliche Situationen untersucht:

1. *Astronomische Tide*: nur durch die Astronomie beeinflusste Tide, hier Spring - Zeitraum;
2. *Sommerflut*: Sturmflut außerhalb der Sturmflutsaison (September bis April), hier 21. August 1990;
3. *Bemessungssturmflut*: Synthetische Sturmflut, die den Bemessungswasserstand erreicht, hier Bemessungssturmflut 2085A (LÄNDERARBEITSGRUPPE, 1988).

Der Einsatz hydrodynamisch – numerischer (HN-) Modelle ermöglicht es, Systemstudien durchzuführen. Die drei genannten Situationen werden mit extremen Oberwasserszenarien kombiniert, um den Einfluss des Oberwassers auf die Wasserstände entlang der Unterelbe zu analysieren. Als extreme Oberwasserereignisse werden 2000 m³/s, 3000 m³/s, 4000 m³/s, 5000 m³/s sowie 6000 m³/s betrachtet. Abflüsse größer als 2150 m³/s bei Sturmfluten und 3620 m³/s bei mittleren Tiden wurden in der Elbe bisher nicht (zuverlässig) beobachtet (DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH, 1998).

Für die hier vorgestellten Untersuchungen wird das 2-dimensionale mathematische Verfahren TRIM-2D (CASULLI, 1990 bzw. BAW, 1998) verwendet. Die Modelltopographie gibt den Zustand des Jahres 2002 wieder. Bei Sturmfluten und Oberwasserereignissen größer 1100 m³/s wird das Wehr Geesthacht gelegt. Das Modellgebiet reicht deshalb über das Wehr Geesthacht hinaus bis Bleckede (Elbe km 550). Zur Modellierung von Wasserstand und Strömung während der Bemessungssturmflut benötigt das HN-Modell zur Bestimmung des Impulseintrages aus der Atmosphäre Informationen zu Windrichtung und Windgeschwindigkeit über dem Ästuar. Dieser räumlich und zeitlich hochaufgelöste lokale Wind ergibt sich aus der großräumigen Wetterlage und wird kleinräumig durch die Topographie und die Oberflächenrauigkeit des Geländes modifiziert. Die zur Modellierung der Be-

messungssturmflut benötigten Windfelder wurden vom DWD GF Seeschifffahrt mit MKW (SCHMIDT und PÄTSCH, 1992) berechnet.

4 Fallstudie „Astronomische Tide“

Die Bedeutung des Oberwasserzuflusses auf die Höhe der Wasserstände bei mittleren Tiden entlang der Tideelbe wird durch eine Systemuntersuchung ermittelt. Beispielhaft wird die astronomische Tide des 28.1.1994 ohne Wind modelliert und der Oberwasserzufluss variiert. Abbildung 2 zeigt den Wasserstandsverlauf am 28.1. bei Elbe km 630 (Hamburg Neuer Elbtunnel) für die fünf genannten Oberwasserszenarien, sowie für das mittlere niedrigste Oberwasser $MNQ = 280 \text{ m}^3/\text{s}$. Man erkennt deutlich, dass mit zunehmendem Oberwasser sowohl das Tideniedrigwasser (Tnw) als auch das Tidehochwasser (Thw) ansteigt. Auch die Eintrittszeiten von Tnw und Thw verändern sich in Abhängigkeit vom Oberwasser. Mit zunehmendem Oberwasserabfluss verkürzt sich die Flutphase und die Ebbe verlängert sich. Abbildung 3 zeigt die über den Querschnitt bei Elbe km 630 integrierten Durchflüsse für den gleichen Zeitraum. Während der Ebbe werden über diesen Querschnitt für ca. 5 Stunden zwischen $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ (MNQ) und $9000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q6000) transportiert. Während der Flut sind die integrierten Durchflüsse deutlich geringer. Für das Oberwasserszenario MNQ erreichen sie kurzfristig über $8000 \text{ m}^3/\text{s}$, während sie für das Szenario Q6000 lediglich $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ erreichen. Der große Oberwasserabfluss verringert zum einen die stromaufgerichteten Flutstromgeschwindigkeiten deutlich, verstärkt aber auch den Ebbstrom.

Das Ergebnis der Analyse von Hochwasser (HW) und Niedrigwasser (NW) entlang der Tideelbe ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Einfluss des Oberwassers ist im Bereich zwischen Wehr Geesthacht und Hamburg St.Pauli deutlich zu erkennen. In St.Pauli (Elbe km 623N) erkennt man eine Zunahme des HW um 10 cm pro $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ Oberwasserzunahme. Bei Zollenspieker (Elbe km 600) beträgt die entsprechende Zunahme des HW 55 cm . Der Vergleich mit dem Bemessungswasserstand (Abb.7) zeigt, dass selbst für diese extremen Oberwasserszenarien das HW stets unter dem Scheitelwasserstand der Bemessungssturmflut bleibt. Für das Oberwasserszenario MNQ beträgt der Tidehub bei Cuxhaven ca. $3,50 \text{ m}$ und bei Zollenspieker $2,50 \text{ m}$. Für die extremen Oberwasserszenarien nimmt der Tidehub zwischen St.Pauli und Geesthacht deutlich ab und beträgt bei Geesthacht für Q6000 nur noch 20 cm . Zwischen St.Pauli und Brunsbüttel (Elbe km 695) nimmt der Einfluss des Oberwassers auf die Wasserstände deutlich ab. Stromab des Seehafens Hamburg ist die Elbe deutlich breiter und tiefer als stromauf. Im breiten und tiefen Mündungsbereich des Elbe stromab von Brunsbüttel ist der Einfluss des Oberwassers auf die Wasserstände nicht nachweisbar.

Die Analyse der querschnittsintegrierten Durchflüsse entlang des Elbeästuares verdeutlicht die Bedeutung der Oberwassermenge im Verhältnis zum tidebedingten Durchfluss. Abbildung 5 zeigt für die astronomische Tide des 28.1.1994 die querschnittsintegrierten Durchflüsse für das Oberwasserszenario MNQ ($280 \text{ m}^3/\text{s}$). Bereits im Hamburger Hafen (Elbe km 630) werden tidebedingt über mehrere Stunden hinweg Durchflüsse größer als $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht. Im Mündungsbereich bei Cuxhaven (Elbe km 730) erreichen die tidebedingten Durchflüsse $40000 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $60000 \text{ m}^3/\text{s}$. Demgegenüber spielt ein zusätzlicher Oberwasserzufluss von $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ bis $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ eine untergeordnete Rolle.

5 Fallstudie „Sommerflut 1990“

Eine Tide in der Elbe wird als Sturmflut definiert, falls der Windstau in Cuxhaven $\geq 2 \text{ m}$ oder das $HThw \geq MThw + 1,50 \text{ m}$ beträgt (GÖNNERT und SIEFERT, 1998). Am 21.8.1990 wurde in Cuxhaven ein Wasserstand von $NN + 3,01 \text{ m}$ und in Hamburg St.Pauli $NN + 4,17 \text{ m}$ erreicht. Der maximale Windstau in Cuxhaven betrug $2,75 \text{ m}$. Tabelle 2 gibt einen Überblick über charakteristische Wasserstände in Cuxhaven, Hamburg und Zollenspieker.

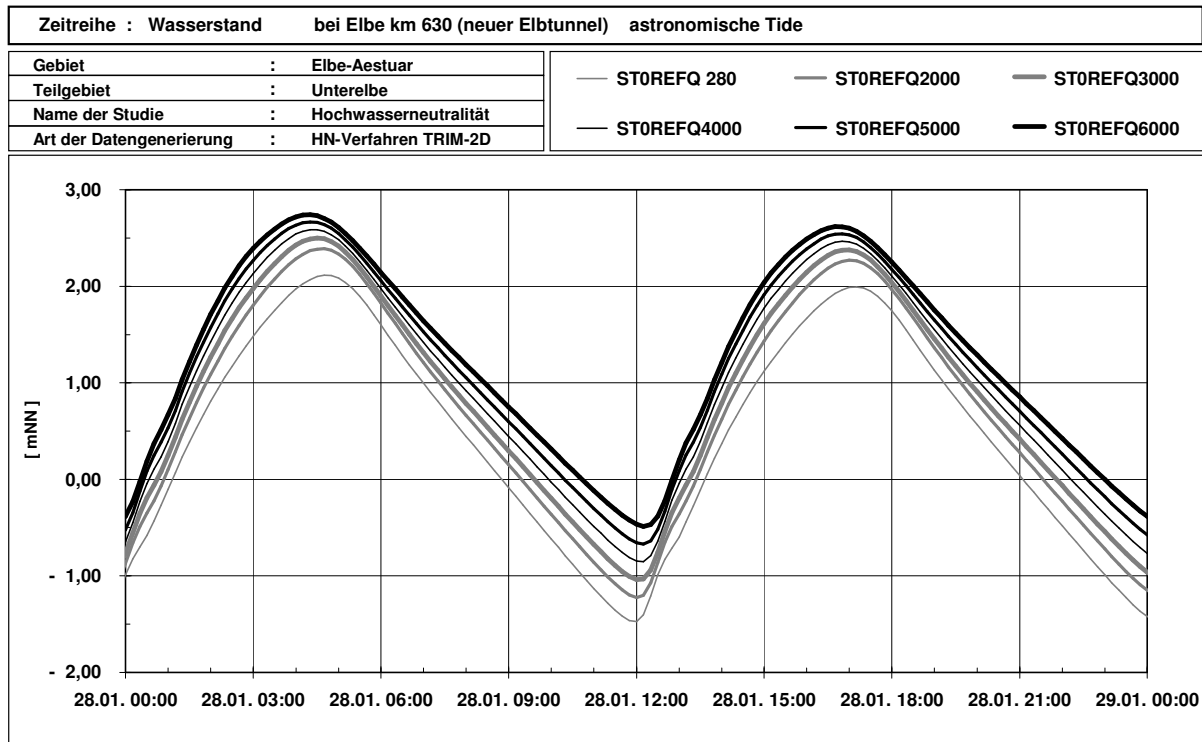


Abb. 2: Wasserstandsentwicklung für die astronomische Tide des 28.1.1994 bei Elbe km 630 (Hamburg Neuer Elbtunnel) für MNQ ($280 \text{ m}^3/\text{s}$) sowie die extremen Oberwasserabflüsse $2000 \text{ m}^3/\text{s}$, $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, $4000 \text{ m}^3/\text{s}$, $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ und $6000 \text{ m}^3/\text{s}$.

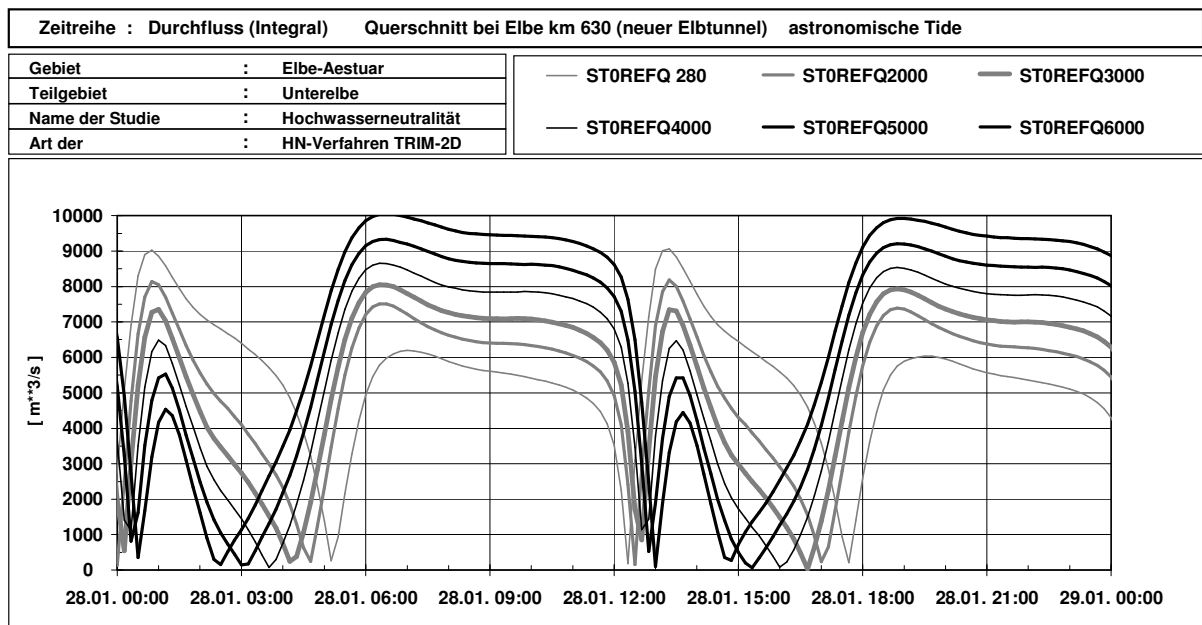


Abb. 3: Querschnittsintegrierter Durchfluss für die astronomische Tide des 28.1.1994 bei Elbe km 630 (Hamburg Neuer Elbtunnel) für MNQ ($280 \text{ m}^3/\text{s}$) sowie die extremen Oberwasserabflüsse $2000 \text{ m}^3/\text{s}$, $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, $4000 \text{ m}^3/\text{s}$, $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ und $6000 \text{ m}^3/\text{s}$.

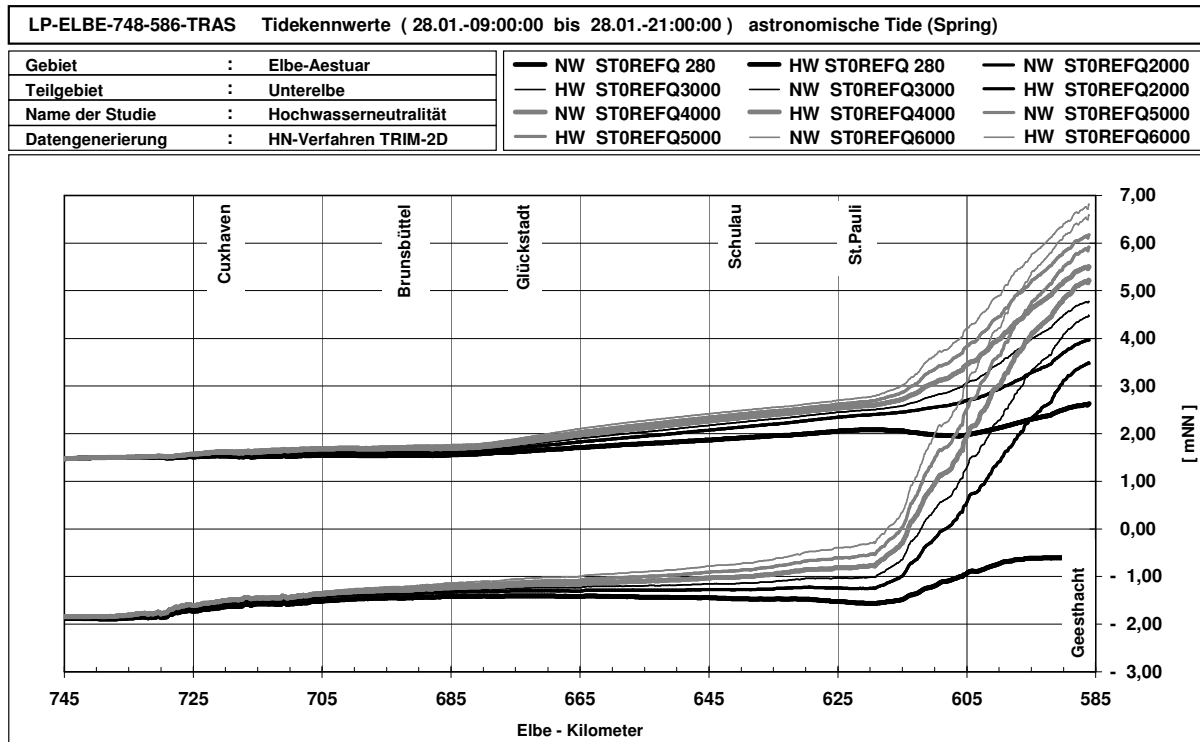


Abb. 4: Hochwasser und Niedrigwasser entlang der Tideelbe für die astronomische Tide mit MNQ (280 m³/s) sowie den extremen Oberwasserabflüssen 2000 m³/s, 3000 m³/s, 4000 m³/s, 5000 m³/s und 6000 m³/s.

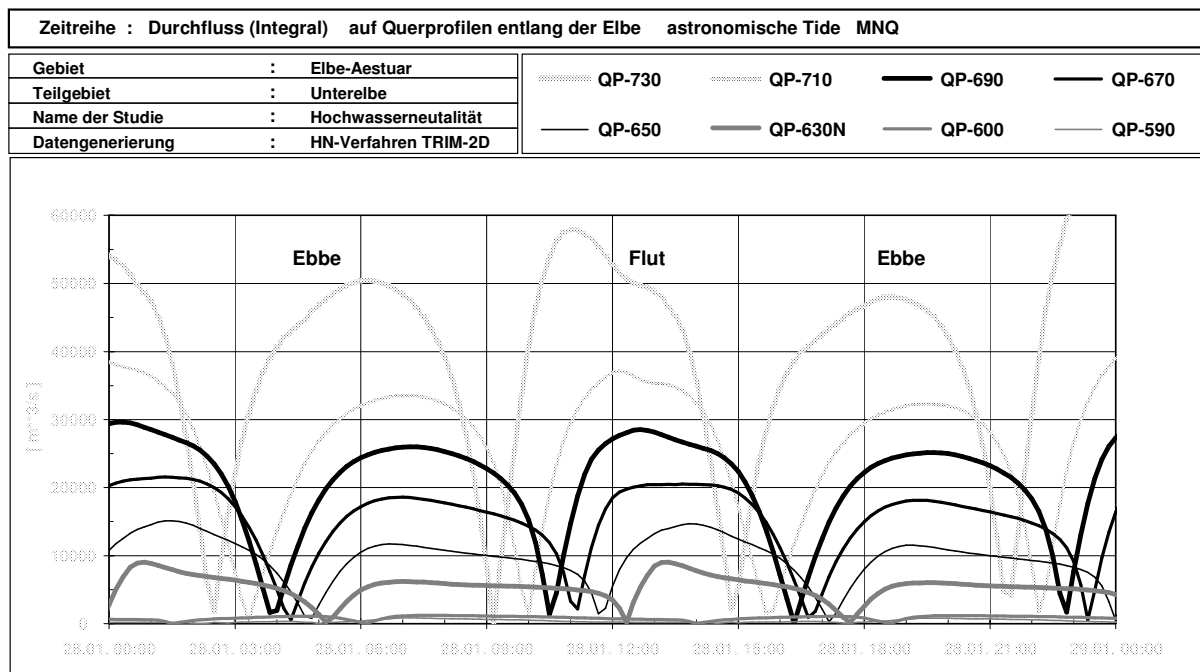


Abb. 5: Durchfluss für die astronomische Tide des 28.1.1994 entlang des Elbeästuares für acht Querschnitte von Elbe km 590 (Altengamme) bis Elbe km 730 (Cuxhaven) für das Oberwasserszenario MNQ = 280 m³/s.

	Cuxhaven	Hamburg St.Pauli	Zollenspieker
MThw	NN + 1,50 m	NN + 2,10 m	NN + 2,40 m
MTnw	NN – 1,45 m	NN – 1,50 m	NN – 0,20 m
03.01.1976	NN + 5,10 m	NN + 6,45 m	NN + 6,35 m
21.08.1990	NN + 3,01 m	NN + 4,17 m	NN + 4,35 m
Bemessungssturmflut 2085A	NN + 5,65 m	NN + 7,30 m	NN + 7,70 m
HHThw	NN + 5,10 m	NN + 6,45 m	NN + 6,35 m

Tab. 2: Charakteristische Wasserstände der Tideelbe für die Orte Cuxhaven, Hamburg St.Pauli und Zollenspieker (DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH, 1998).

Im August 1990 betrug der Oberwasserzufluss in die Elbe $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Wind erreichte im Elbmündungsgebiet auf Scharhörn 25 m/s . Auch für dieses Ereignis wird der Einfluss extremer Oberwasserabflüsse auf das Hochwasser entlang der Tideelbe untersucht. Man erkennt in Abbildung 6 den größten Einfluss des Oberwassers im Bereich zwischen Hamburg und Geesthacht. Bei Zollenspieker steigt der Sturmflutscheitelwasserstand um ca. 30 cm pro $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. Stromab von Hamburg wird der Oberwassereinfluss deutlich geringer und ist im Mündungsbereich stromab von Brunsbüttel kaum sichtbar. Auch für dieses Szenario zeigt die Analyse der querschnittsintegrierten Durchflüsse, dass erst stromauf von Hamburg tide- und oberwasserbedingte Durchflüsse die gleiche Größenordnung erreichen. In diesem Bereich werden auch für eine Sommerflut bei extremen, jedoch noch nie beobachteten Abflüssen ($> 5000 \text{ m}^3/\text{s}$) Wasserstände in der Größenordnung des Bemessungswasserstandes erreicht.

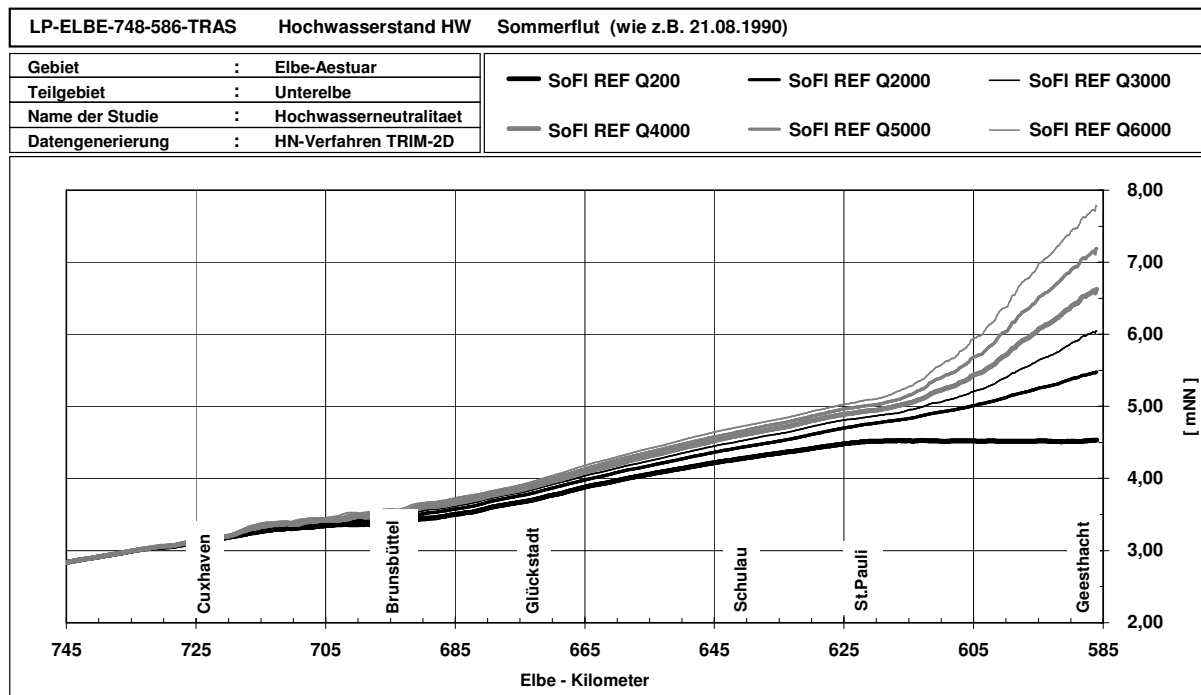


Abb. 6: Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Tideelbe für die Sommerflut mit MNQ ($280 \text{ m}^3/\text{s}$) sowie den extremen Oberwasserabflüssen $2000 \text{ m}^3/\text{s}$, $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, $4000 \text{ m}^3/\text{s}$, $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ und $6000 \text{ m}^3/\text{s}$.

6 Fallstudie „Bemessungssturmflut 2085 A“

Die Bemessungssturmflut 2085 A wurde 1985 von einer LÄNDERARBEITSGRUPPE (1988) erarbeitet. Die maßgebende Sturmflut wird aus der Addition der mittleren Tidekurve und einer extremen Windstaukurve gebildet. Für diese synthetische Bemessungssturmflut ist die Wasserstandsentwicklung für Cuxhaven sowie die Windentwicklung über dem Elbeästuar definiert. Als Oberwasserzufluss sind für die Bemessungssturmflut $2200 \text{ m}^3/\text{s}$ festgelegt. Dies entspricht dem aufgerundeten höchsten zuverlässig bei einer Sturmflut gemessenen Wert oder auch $2/3$ HHQ. Lässt man die Bemessungssturmflut in das Elbeästuar einlaufen, so erhält man entlang der Tideelbe aus den Hochwasserständen die Bemessungswasserstände, aus denen wiederum die Deichhöhen bestimmt werden. Die HW der Bemessungssturmflut liegen bei Cuxhaven um 55 cm und in Hamburg um 85 cm höher als die je gemessenen Wasserstände (siehe auch Tabelle 2). Es ist festgelegt, dass im Abstand von 10 Jahren sowohl das Verfahren selbst als auch dessen Grundlage anhand neuer Daten und Erkenntnisse überprüft werden muss. Aufgrund des Ergebnisses der Überprüfung im Jahre 1996 sah die Arbeitsgruppe keine Veranlassung die Sturmflutide, das Oberwasser oder das Windszenario der Bemessungssturmflut 2085 A zu verändern (SIEFERT, 1998).

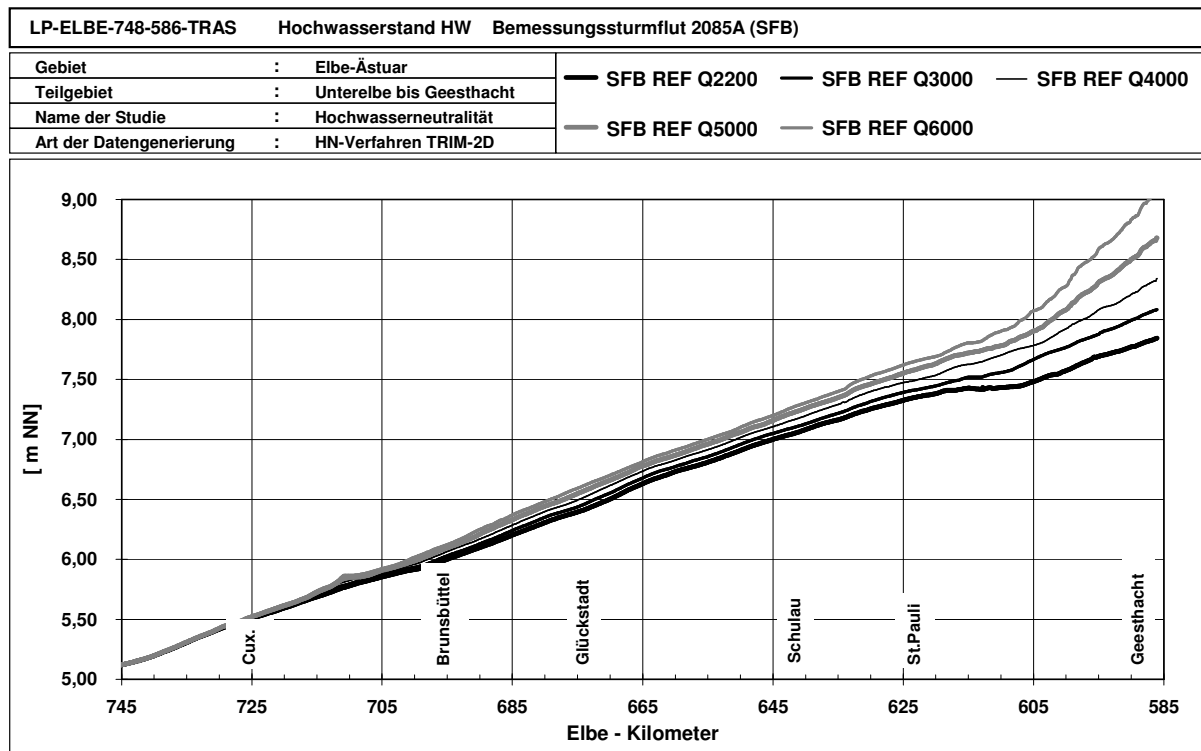


Abb. 7: Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Tideelbe für die Bemessungssturmflut 2085A ($2200 \text{ m}^3/\text{s}$) sowie die mit extremen Oberwasserabflüssen $2000 \text{ m}^3/\text{s}$, $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, $4000 \text{ m}^3/\text{s}$, $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ und $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ kombinierte Bemessungssturmflut.

In einer Systemstudie wird der Einfluss extrem hoher Abflüsse auf die Sturmflutscheitelwasserstände der Bemessungssturmflut untersucht. Der Oberwasserzufluss wird auf $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, $4000 \text{ m}^3/\text{s}$, $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ und $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ erhöht. Abbildung 7 zeigt die Sturmflutscheitelwasserstände sowohl für die Bemessungssturmflut als auch für die vier genannten extremen Oberwasservariationen. Wie für die astronomische Tide und die Sommerflut ist auch hier der Einfluss des Oberwassers auf die Wasserstände stromauf von Hamburg St.Pauli am größten. Bei dieser extrem hohen Sturmflut ergibt sich eine Zunahme des Scheitelwasserstandes von 10 cm pro $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ in St.Pauli und um 20 cm pro $1000 \text{ m}^3/\text{s}$

in Zollenspieker. Auch die LÄNDERARBEITSGRUPPE (1988) gibt einen Einfluss des Oberwassers auf die Wasserstände in dieser Größenordnung an: St.Pauli 1 dm pro 1000 m³/s und Zollenspieker 1 bis 2,5 dm pro 1000 m³/s.

Während der Bemessungssturmflut werden tidebedingt im Mündungsbereich Durchflüsse größer als 80000 m³/s berechnet. Im Bereich von Hamburg werden mehr als 8000 m³/s erreicht. Bei den sturmflutbedingten sehr großen Werten ist der Anteil des Oberwasserzuflusses im Verhältnis kleiner als bei astronomischen Tiden. Für das gleichzeitige Zusammentreffen einer extrem hohen Sturmflut mit einem extrem hohen Oberwasserereignis werden stromauf von Hamburg Wasserstände von bis zu 1 m über dem Bemessungswasserstand erreicht

7 Zusammenfassung

Der Einsatz von HN-Modellen ermöglicht es, systematische Variationen des Oberwasserzuflusses sowohl bei mittleren Verhältnissen als auch bei Sturmfluten in Ästuarien durchzuführen und die Veränderungen im Wasserstand dem Einfluss des variierten Parameters (hier Oberwasserzufluss) zuzuordnen.

Die Ergebnisse der Systemstudie zeigen, dass HW und NW bei mittleren Tiden zwischen Geesthacht und Hamburg im Dezimeterbereich erhöht werden. Stromab von Hamburg wird die Elbe breiter und tiefer. Hier liegt der Einfluss des Oberwassers auf HW und NW lediglich im Zentimeterbereich.

Auch für die beiden untersuchten Sturmflutszenarien ergibt sich der größte Einfluss des Oberwassers auf die Sturmflutscheitelwasserstände stromauf von Hamburg (siehe Tabelle 3). Hier können extreme, bisher noch nicht beobachtete Oberwasserereignisse auch bei relativ niedrigen Sturmfluten Wasserstände in der Größenordnung des Bemessungswasserstandes erreichen. In diesem Bereich müssen für den Hochwasserschutz sowohl Veränderungen im Sturmflutgeschehen der Nordsee als auch im Oberwasserabfluss, z.B. bedingt durch veränderten Niederschlag im Elbeeinzugsgebiet, beobachtet werden. Gegebenenfalls müssen diese Veränderungen bei der Definition der Bemessungssturmflut berücksichtigt werden. Stromab von Hamburg erhöht sich bei extremen Oberwasserereignissen der Wasserstand lediglich im Zentimeterbereich. Sobald das Ästuar seinen engen Flusscharakter bei Brunsbüttel verliert, ist der Einfluss auf die Scheitelwasserstände vernachlässigbar klein.

	Hamburg StPauli	Bunthaus	Zollenspieker
Astronomische Tide	10 cm/1000 m ³ /s	30 cm/1000 m ³ /s	55 cm/1000 m ³ /s
Sommerflut	10 cm/1000 m ³ /s	17 cm/1000 m ³ /s	30 cm/1000 m ³ /s
Bemessungssturmflut	10 cm/1000 m ³ /s	15 cm/1000 m ³ /s	20 cm/1000 m ³ /s

Tab. 3: Zunahme des Hochwasserstandes pro 1000 m³/s Oberwasserzunahme für die Orte Hamburg St.Pauli (Elbe km 623N), Bunthaus (Elbe km 609) und Zollenspieker (Elbe km 600).

Die Tideelbe läßt sich für die drei untersuchten Situationen hinsichtlich des Einflusses des Oberwasserereignisses auf die Scheitelwasserstände in drei Bereiche gliedern:

- Mündungsbereich stromab von Brunsbüttel: kein Einfluß des Oberwassers auf die Wasserstände
- Brunsbüttel bis Hamburg: Einfluss des Oberwassers auf die Wasserstände im Zentimeterbereich
- Hamburg bis Geesthacht: Einfluss des Oberwassers auf die Wasserstände im Dezimeterbereich

Die Kenntnis dieser unterschiedlich vom Oberwasserzufluss beeinflussten Bereiche der Tideelbe erleichtert es, den Küstenschutz an die spezifischen Problem des Elbeästuares anzupassen.

8 Literatur

- BAW: HN-Verfahren TRIM-2D — Validierungsdokument. Interner Bericht der Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, 1998.
- BAW: Untersuchung regionaler Windwirkungen, hydrodynamischer Systemzustände und Oberwassereinflüsse auf das Sturmflutgeschehen in Tideästuarien. Bericht der Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, 2000.
- CASULLI, V.: Semi implicit finite difference method for the two dimensional shallow water equations. *Journal of Computational Physics* 86, 1990, p. 56-74
- DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH: Elbegebiet Teil III - Untere Elbe ab der Havelmündung. Freie und Hansestadt Hamburg, Strom- und Hafenanbau, 1998.
- GÖNNERT, G./SIEFERT, W.: Sturmflutatlant Cuxhaven. Freie und Hansestadt Hamburg, Strom- und Hafenanbau, Studie Nr. 91, 1998.
- IKSE: Bestandsaufnahme des vorhandenen Hochwasserschutzniveaus im Einzugsgebiet der Elbe. Bericht der Internationalen Kommission zum Schutz der Elbe, 2001.
- IKSE: Dokumentation des Hochwassers vom August 2002 im Einzugsgebiet der Elbe. Bericht der Internationalen Kommission zum Schutz der Elbe, 2004.
- IPCC: Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2001, 398 pp.
- LÄNDERARBEITSGRUPPE.: Bemessungswasserstände entlang der Elbe, Bericht der Länderarbeitsgruppe. In: *Die Küste*, Heft 47, 1988, S. 31-50.
- SCHMIDT, H./PÄTSCH, J.: Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen. In: *Die Küste*, Heft 54, 1992, S. 131-142.
- SIEFERT, W.: Bemessungswasserstände 2085A entlang der Elbe. Ergebnisse einer Überprüfung durch die Länderarbeitsgruppe nach 10 Jahren. In: *Die Küste*, Heft 60, 1998, S: 228-255.

Adresse

Dr. Elisabeth Rudolph
Bundesanstalt für Wasserbau - Dienststelle Hamburg
Wedeler Landstrasse 157
22559 Hamburg
Germany

E-mail: elisabeth.rudolph@baw.de

Simulation von extremen Sturmflutwetterlagen in der Nordsee und deren statistische Analyse

Jürgen Jensen¹, Christoph Mudersbach¹ und Christian Koziar²

¹Forschungsstelle Wasserwirtschaft und Umwelt (fwu) an der Universität Siegen

²Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach

Summary

The knowledge about the height and recurrence interval of extreme storm surges is very important for many tasks in coastal engineering. "Classical" statistical methods are not very suitable for this target. In the KFKI-research project MUSE not only new statistical methods are developed, but also storm surge weather situation and related water levels are modelled. Thereby you get additional information about storm surges with very small probabilities, which can improve the statistical analyses.

Zusammenfassung

Für Aufgaben im Küsteningenieurwesen ist die Kenntnis über die Höhe und Eintrittswahrscheinlichkeit von extremen Sturmfluten sehr wichtig. „Klassische“ statistische Verfahren sind für diese Fragestellungen nur weniger gut geeignet. In dem KFKI-Forschungsvorhaben MUSE werden daher nicht nur neue statistische Ansätze entwickelt, sondern auch Wettersituationen simuliert, die zu extremen Sturmfluten führen können. Aus diesen Daten werden anschließend zugehörige Wasserstände bzw. Windstauwerte berechnet. Dadurch werden zusätzliche Informationen über die Höhe und Eintrittswahrscheinlichkeit von sehr seltenen Sturmfluten bereitgestellt, die in die statistische Analyse einfließen und diese verbessern.

1 Einleitung

Sturmfluten an Küsten sind Naturereignisse, die in unregelmäßigen Abständen mit unterschiedlicher Intensität auftreten können. Die drei größten Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste in diesem Jahrhundert traten in den Jahren 1962, 1976 und 1999 auf, wobei die Sturmflut von 1976 mit einem Sturmflutscheitelwasserstand von NN+510 cm am Pegel Cuxhaven in der Elbmündung die höchste war. Demgegenüber hat jedoch die Sturmflut von 1962 in Hamburg die weitaus größeren Schäden und sogar viele Menschenleben gefordert, obwohl der Sturmflutscheitelwasserstand am Pegel Cuxhaven mit NN+495 cm niedriger ausfiel, als im Jahr 1976. Aufgrund der wichtigen wirtschaftlichen Bedeutung von Handelszentren an Küsten, werden diese Gebiete oft sehr intensiv genutzt. Die intensive Nutzung solcher Regionen ist für die Gesellschaft ebenso wirtschaftlich bedeutungsvoll, wie auch gefährlich im Falle einer schweren Sturmflut. Aufgrund der Tatsache, dass Sturmfluten in unregelmäßigen Abständen auftreten und mitunter auch Jahrzehnte zwischen zwei größeren Ereignissen vergehen können, entsteht in der Bevölkerung oft ein subjektives Sicherheitsgefühl, bei dem die tatsächlichen Risiken an einem Küstenstandort nicht mehr wahrgenommen werden.

Der Sturmflut- bzw. Hochwasserschutz hat in solchen Gebieten eine existenzielle Bedeutung. Bei allen Hochwasserschutzmaßnahmen muss deutlich gemacht werden, dass das Wort „Schutz“ irreführend sein kann, da es keinen 100%-igen Schutz geben kann. Bei allen Betrachtungen und Maßnahmen bleibt ein Restrisiko, welches es zu quantifizieren und entsprechend der Nutzung des Gebietes zu minimieren gilt.

Zur Quantifizierung dieses Risikos ist die Kenntnis von Überschreitungswahrscheinlichkeiten von Sturmfluten von entscheidender Bedeutung. Die Verfahren zur Bestimmung dieser Wahrscheinlichkeiten stammen aus dem Bereich der mathematischen Statistik und Stochastik. Mit Hilfe dieser Verfahren kann aus den vorhandenen Zeitreihen auf die Überschreitungswahrscheinlichkeit von Sturmfluten geschlossen werden. Diese Verfahren haben jedoch Grenzen, so lässt sich z.B. ein Wasserstand mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{U}} = 0,001$ nicht ohne weitere Informationen aus einer Zeitreihe von 100 Jahren statistisch sicher schätzen.

Die verwendeten mathematischen und hydrologischen Verteilungsfunktionen haben im Bereich der sehr seltenen Ereignisse keine Stützstellen mehr und somit kommt es je nach verwendeter Funktion zu erheblichen Streuungen und damit höchst unsicheren Aussagen über die Höhe sehr seltener Sturmfluten. Eine Verbesserung kann erreicht werden, wenn neben den rein mathematischen Ansätzen physikalisch begründete Informationen oder Annahmen im Bereich diese seltenen Ereignisse zur Verfügung stehen würden.

Eine solche Vorgehensweise wird auch in DVWK (1999) empfohlen: „[...] Eine andere Lösungsmöglichkeit bestände darin, Verteilungsfunktionen zu verwenden, denen physikalische Annahmen zugrunde liegen. Die aktuellen Forschungen in diesem Bereich sind vielversprechend, aber derzeit noch nicht anwendungsreif.[...]“

Um diese Fragen näher zu untersuchen und Aussagen über sehr seltene Sturmfluten ($P_{\bar{U}} < 0,001$) ableiten zu können, wurde 2002 das dreijährige Forschungsvorhaben „Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten (MUSE)“ genehmigt. Das Forschungsvorhaben wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (bmbf) finanziert und durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) fachlich begleitet.

2 Ziel und Organisation des Forschungsvorhabens MUSE

Das Forschungsvorhaben MUSE ist ein Kooperationsprojekt zwischen der Forschungsstelle Wasserwirtschaft und Umwelt (fwu) an der Universität Siegen, dem Deutschen Wetterdienst (DWD, Offenbach) und dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH, Hamburg). Das Untersuchungsgebiet ist die Nordsee und speziell die Deutsche Bucht.

Zur Erreichung des Ziels wurde eine Aufgabenteilung der Kooperationspartner vorgenommen, die sich im wesentlichen wie folgt gliedert:

Deutscher Wetterdienst (DWD)

Der DWD berechnet mit numerischen Vorhersagemodellen physikalisch mögliche Wetter- bzw. Windsituationen, die zu außergewöhnlichen Sturmfluten führen können. Hier ist wichtig zu beachten, dass alle Berechnungsergebnisse physikalisch konsistent sind, d.h. es sind keine speziell konstruierten Wettersituationen, sondern es sind Wettersituationen, die auf realistischen Wetterausgangssituationen basieren und von den herkömmlichen Vorhersagemodellen berechnet werden und somit, wenn auch mit geringer Wahrscheinlichkeit, tatsächlich eintreten können.

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

Die vom DWD berechneten Wetter- und Windsituationen werden zum BSH transferiert, wo dann resultierende Wasserstände und Windstauwerte an verschiedenen Küstenstandorten berechnet werden. Auch hier werden physikalisch konsistente numerische 2D- und 3D-Wassertandsvorhersagemodelle verwendet, die im operationellen Sturmflutvorhersagebetrieb zum Einsatz kommen. Ein besonderer Arbeitsschwerpunkt des BSH liegt in der Auswahl und Entwicklung eines geeigneten Windschubspannungsansatzes für die teilweise sehr hohen Windgeschwindigkeiten.

Forschungsstelle Wasserwirtschaft und Umwelt (fwu)

Die fwu übernimmt die statistische Auswertung und Einordnung der berechneten Werte und erarbeitete Verfahren, mit denen eine Verknüpfung der modellierten Daten mit den beobachteten Daten erreicht werden kann, um damit die statistische Einordnung von sehr seltenen Sturmfluten verbessern zu können.

In der vorliegenden Veröffentlichung werden die Arbeitsbereiche des DWD und der fwu eingehender beschrieben. Zu den Arbeiten des BSH ist in diesem Tagungsband ein eigener Beitrag enthalten mit dem Titel: „Modellstudien zu Extremsturmfluten in der Nordsee“ von BORK UND MÜLLER-NAVARRA (2004).

3 Auswahl und Simulation von Sturmflutwetterlagen (DWD)

Bereits Anfang der achtziger Jahre hat es Ansätze gegeben, mit deterministischen Verfahren Extremsturmfluten zu berechnen. Dazu wurden von einem Synoptiker des DWD extreme Wetterlagen von Hand aus verschiedenen Sturmsituationen konstruiert und für die Berechnung von maximalen Wasserständen mit einem 2-dimensionalen Wasserstandsmodell herangezogen (HEWER 1980).

Ausgelöst durch das Sturmtief Anatol im Dezember 1999 sind Fragen nach möglichen noch höheren Sturmfluten als in den Jahren 1976 und 1962 laut geworden. Das Orkantief Anatol stellt den stärksten Sturm des 20. Jahrhunderts in Süddänemark dar und Untersuchungen zeigen, dass bei südlicherer Zugbahn und leicht modifiziertem zeitlichem Ablauf in der Deutschen Bucht Stauerhöhung von 75 cm (Gönnert et al. 2000) bis zu 2 m (DICK UND MÜLLER-NAVARRA 2000) auftreten könnten.

Diese Studien sind jedoch in einem Punkt kritikfähig: Die zeitliche Entwicklung so konstruierter Wetterlagen kann aus Anfangsverteilungen dynamisch nicht nachvollzogen werden. Die Wetterlagen sind somit zwar denkbar, jedoch nicht physikalisch konsistent; die Studien sind daher anzweifelbar. Außerdem erlauben die bisherigen Arbeiten keinerlei Aussagen zur Wahrscheinlichkeit derartiger Szenarien; sie sind daher für Aufgaben des Küsteningenieurwesens nicht unmittelbar anwendbar.

Hier nun geht das Projekt „MUSE“ einen Schritt weiter, indem es die deutlich weitergehenden Möglichkeiten moderner atmosphärischer Simulationsmodelle konsequent nutzt. So ist es derzeit möglich, für jeden beobachteten Zeitpunkt eine ganze Reihe physikalisch möglicher Wetterlagen zu erzeugen. Dies kommt zum einen dadurch zustande, dass für jedes Zieldatum mehrere Vorhersagen mit unterschiedlichen Startterminen und Vorhersagelängen gerechnet werden können. Zum anderen lassen sich auch direkt durch kleine Veränderungen an den Anfangsdaten eines Vorhersagemodells, welche die möglichen Variationen des Startzustandes innerhalb der Analysengenauigkeit widerspiegeln, weitere meteorologisch sinnvolle Wetterlagen für einen bestimmten Zielzeitpunkt konstruieren.

Die Berechnung der zeitlichen Entwicklung einer atmosphärischen Strömung, ausgehend von einer aus Beobachtungen abgeleiteten Anfangsbedingung, ergibt die deterministische Vorhersage. Es kann nun die Eintrittswahrscheinlichkeit einer solchen Vorhersage abgeschätzt werden, indem man zusätzli-

che Simulationen mit veränderten Anfangs- und Randbedingungen durchführt, die durch zufällige Variationen der ungestörten Anfangs- und Randbedingungen innerhalb des Unsicherheitsbereichs entstehen. Unter gewissen Bedingungen verstärken dann die Instabilitäten der atmosphärischen Strömung diese Anfangs- und Randvariationen. Wettervorhersagen werden dadurch zu Szenariobeschreibungen für den zukünftigen Zustand der Atmosphäre, die einen wahrscheinlichsten Weg und mögliche, u.U. extreme Abweichungen skizzieren.

Am Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersagen (EZMW) wurde 1992 ein System eingeführt, das diese Technik in ein praktisch nutzbares Verfahren umsetzt: Das Ensemble Prediction Systems (EPS). Damit können für jeden Starttermin zusätzlich zur deterministischen Vorhersage noch 50 Vorhersagen mit niedrigerer Auflösung gerechnet werden (EZMW 2002). Ursprünglich wurde dieses System entwickelt, um alternative Entwicklungsmöglichkeiten eines bestimmten Atmosphärenzustandes aufzuzeigen und darüber eine Aussage über die Unsicherheiten der deterministischen Modellvorhersage abzuleiten. Im Projekt „MUSE“ wird es jedoch verwendet, um das Spektrum an physikalisch konsistenten Extrem-Sturmflutwetterlagen zu erweitern.

Um extreme Sturmfluten zu konstruieren, ist eine aus EPS und LM (Lokal-Modell des Deutschen Wetterdienstes) bestehende Modellkette ein sehr erfolgversprechender Ansatz. Beim EPS kommt zusätzlich zu dem trivialen Spread-Mechanismus der unterschiedlichen Startzeitpunkte und Vorhersagelängen noch hinzu, dass eine EPS-Vorhersage aus 50 einzelnen Modellvorhersagen mit veränderten Anfangs- und Randbedingungen besteht. Wird z.B. das EPS zweimal täglich mit 10 Tagen Vorhersagezeit und 50 Mitgliedern gestartet, wie es am EZMW routinemäßig gemacht wird, ergeben sich für jeden Zielzeitpunkt 1000 Vorhersagen!

Für das Projekt sind primär diejenigen EPS-Member interessant, die einen stärkeren und/oder länger anhaltenden Windschub von Nordseewasser in die Deutsche Bucht hinein bewirken, als er tatsächlich aufgetreten ist. Um dies objektiv und ohne eine nachgeschaltete Simulation mit einem Ozeanmodell beurteilen zu können, wurde die aus Windstärke und Windrichtung zusammengesetzte Größe „Effektivwind“ eingeführt. Er ist definiert als Anteil des 10m-Horizontalwindes, der aus Richtung 295° kommt. Diese spezielle Windrichtung wurde in empirischen Studien als der Wert identifiziert, bei der die Windschubspannung in die Deutsche Bucht hinein kulminiert. Im Flächenmittel über die Deutsche Bucht kann der Effektivwind demzufolge als Maß dafür dienen, wie stark sich durch den Windschub Nordseewasser in der Deutschen Bucht aufstaut. Somit kann er als erste Orientierung für das Sturmflutpotenzial einer bestimmten Wetterlage herangezogen werden.

Um nun mit Hilfe des EPS zu untersuchen, welche alternativen Entwicklungsmöglichkeiten für das zu einer bestimmten Sturmflut gehörende Sturmtief bestanden haben, wurde nach folgender Vorgehensweise verfahren:

1. Zeitfenster für EPS-Starttermine festlegen
2. EPS-Experiment durchführen
3. Identifizierung der extremsten EPS-Member
4. direkte Nutzung dieser ausgewählten EPS-Member für Wasserstands- bzw. Windstaumodellierung und/oder
5. Nutzung dieser ausgewählten EPS-Member für Randsteuerung des LM und GME

Die Zeitfenster für die Starttermine des EPS wurden so gewählt, dass die Modellsimulationen Zeitpunkte überdecken, an denen in der Realität an der Deutschen Nordseeküste Sturmfluten beobachtet wurden (vgl. Tabelle 1). Die Einbettung des hochauflösenden regionalen Modells LM in das EPS ist notwendig, weil das EPS auf einem globalen Modell basiert, dessen räumliche Auflösung für das Projekt nicht fein genug wäre.

Tab. 1: Grundkonfiguration der EPS-Experimente

Sturmflutmaximum	Startzeitraum	Startintervall	Member insges.
16.02.1962, 22:40	11.02.1962, 12:00 - 15.02.1962, 12:00	12 h	9 × 50
03.01.1976, 14:20	30.12.1975, 12:00 - 03.01.1976, 00:00	12 h	8 × 50
03.12.1999, 20:18	29.11.1999, 00:00 - 03.12.1999, 18:00	6 h	20 × 50
23.02.1967, 23:20	20.02.1967, 00:00 - 23.02.1967, 18:00	6 h	16 × 50
28.01.1994, 13:08	24.01.1994, 18:00 - 28.01.1994, 12:00	6 h	16 × 50
27.02.1990, 01:42	23.02.1990, 00:00 - 28.02.1990, 00:00	6 h	21 × 50
27.02.1990, 14:17			
28.02.1990, 02:30			

Als Beispiel sei hier die Sturmflut vom 03.12.1999 angeführt. Für den linken Teil von Abb. 1 wurden die Flächenmittel des Effektivwindes über die Deutsche Bucht für sämtliche EPS-Member des zugehörigen Experiments als Häufigkeitsverteilung im Bereich von -40 bis +40 m/s und für das Zeitfenster 29.11. bis 13.12.1999 als 3d-Grafik dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Effektivwinde der einzelnen EPS-Member nicht kontinuierlich über den Wertebereich verteilt sind, sondern sich meist in einem engen Teilbereich konzentrieren. Außerdem verändert sich das Effektivwindespektrum mit der Zeit. Daraus kann abgeleitet werden, dass für Zeiträume, in denen in der Natur sturmflutkritische Wetterbedingungen vorherrschen, das EPS tendenziell mehr Member mit hohem Effektivwind liefert, als in unkritischen Zeiträumen, was im Nachhinein die Auswahl der Simulationszeitfenster rechtfertigt.

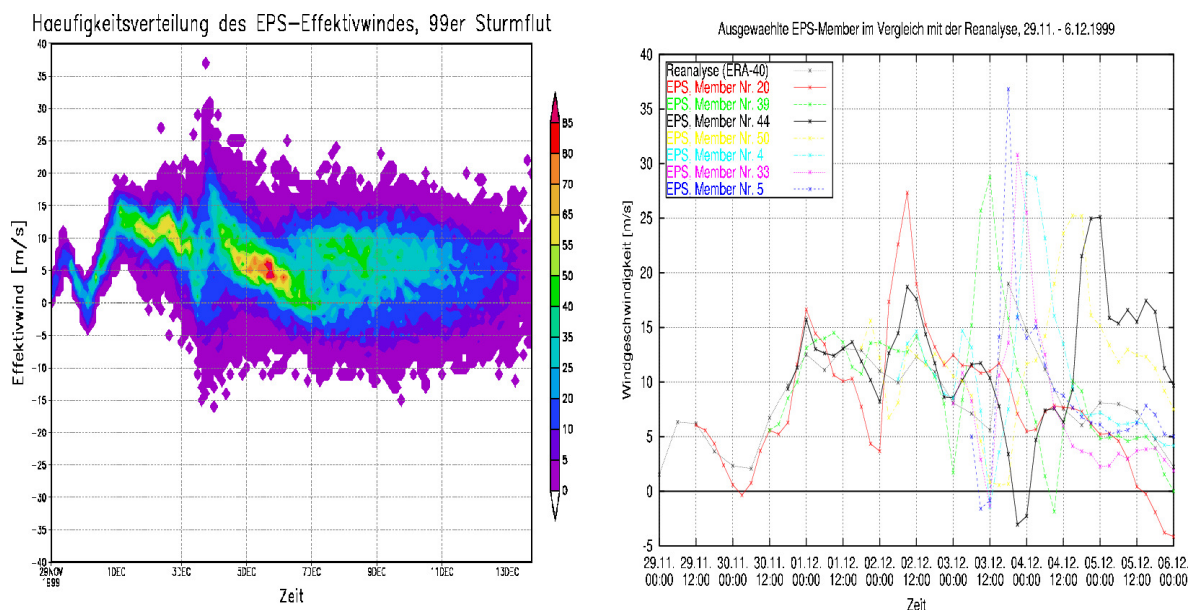


Abb. 1: Häufigkeitsverteilung und ausgewählte EPS-Member des Effektivwindes für das Experiment zur Sturmflut vom 03.12.1999

Im rechten Teil von Abb. 1 wurde die zeitliche Entwicklung des mittleren Effektivwinds für einzelne extreme Member gesondert dargestellt. Zum Vergleich wurde zusätzlich der aus Beobachtungen abgeleitete Effektivwind (sog. „Reanalyse“) dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Unterschiede im erreichten Maximum zwischen Simulation und Beobachtung in diesem Fall bis zu 17 m/s betragen.

Eine Übersicht über die Ergebnisse aller durchgeführten Modellexperimente gibt Tabelle 2, in der für jede der 6 bearbeiteten Sturmfluten der über die Dt. Bucht gemittelte maximale Effektivwind für den extremsten EPS-Member eingetragen wurde - zum einen für die aus Beobachtungen abgeleiteten Modellanalysen und zum anderen für die Modellergebnisse selbst. Daran wird deutlich, dass Sturmflutwetterlagen im Modell u.U. viel extremer ablaufen können, als es in der Realität der Fall war.

Tab. 2: Vergleich von modelliertem und beobachtetem Effektivwind (Flächenmittel über die Deutsche Bucht)

Sturmflut	max. Effektivwind - Beobachtung -	max. Effektivwind - Modellsimulation -
16.02.1962	20,1 m/s	28,9 m/s
03.01.1976	21,6 m/s	32,3 m/s
03.12.1999	19,0 m/s	35,5 m/s
23.02.1967	19,8 m/s	28,8 m/s
28.01.1994	16,8 m/s	27,5 m/s
27.02.1990	18,0 m/s	34,4 m/s

Mit diesen Ergebnissen wurden am Pegel Cuxhaven Wasserstände bis 7,30 m NN modelliert, was ca. 2 m über dem bisherigen beobachteten Maximalwert liegt (BORK UND MÜLLER NAVARRA 2004).

4 Statistische Analyse von sehr seltenen Sturmfluten (fwu)

Die statistische Einordnung von extremen Wasserständen mit sehr kleinen Eintrittswahrscheinlichkeiten ($<10^{-3}$) ist durch eine statistische Analyse der beobachteten Daten nicht sicher abzuschätzen. Aus einer Beobachtungsreihe von ca. 100 Jahren kann nach statistischen Grundsätzen nur auf die 2- bis 3-fache Länge dieser Zeitreihe extrapoliert werden.

Durch das KFKI-Projekt MUSE sollen zusätzliche Informationen im Bereich von sehr seltenen Extremereignissen erarbeitet werden, die eine deutlich größere Extrapolationszeitspanne ermöglichen. Dazu eignen sich Simulationen von physikalisch konsistenten Sturmflutwetterlagen und die Modellierung von zugehörigen Windstauwerten bzw. Wasserständen; diese zusätzlichen Informationen können in die statistisch-probabilistische Datenanalyse einfließen und verbessern.

Dabei ist zu beachten, dass es mehrere Möglichkeiten gibt, diese zusätzlichen Informationen in die statistische Analyse einzubeziehen. Mit den zu erwartenden Ergebnissen wird die Diskussion der statistischen Einordnung von extremen Sturmfluten auf Grundlage unterschiedlicher Ansätze auf eine deutlich breitere Basis gestellt; dabei erheben einzelne Ansätze nicht den Anspruch auf „Richtigkeit“.

Das Problem der statistischen Einordnung von extremen Wasserständen ergibt sich immer dann, wenn ein Ereignis auftritt, welches deutlich größer ist, als die zuvor beobachteten Ereignisse oder auf ein Ereignis mit einer sehr kleinen Eintrittswahrscheinlichkeit extrapoliert werden soll (JENSEN UND FRANK 2002, JENSEN ET AL. 2003). Durch das Auftreten eines Extremwertes ändern sich oft die Ergebnisse der statistischen Einordnung erheblich. Dieser Effekt konnte im Jahr 2002 beim Elbehochwasser festgestellt werden, woraufhin die statistischen Verfahren teilweise gänzlich in Frage gestellt wurden. Diese Unsicherheit bei der Einordnung solch extremer Werte führt auch an der Ostsee zu der Tatsache, dass für Aufgaben im Küsteningenieurwesen meistens auf eine weitergehende statistische Analyse verzichtet wird und das Hochwasserereignis von 1872 maßgebend ist, welches „augenscheinlich“ nicht in die beobachtete Zeitreihe passt (Abb. 2).

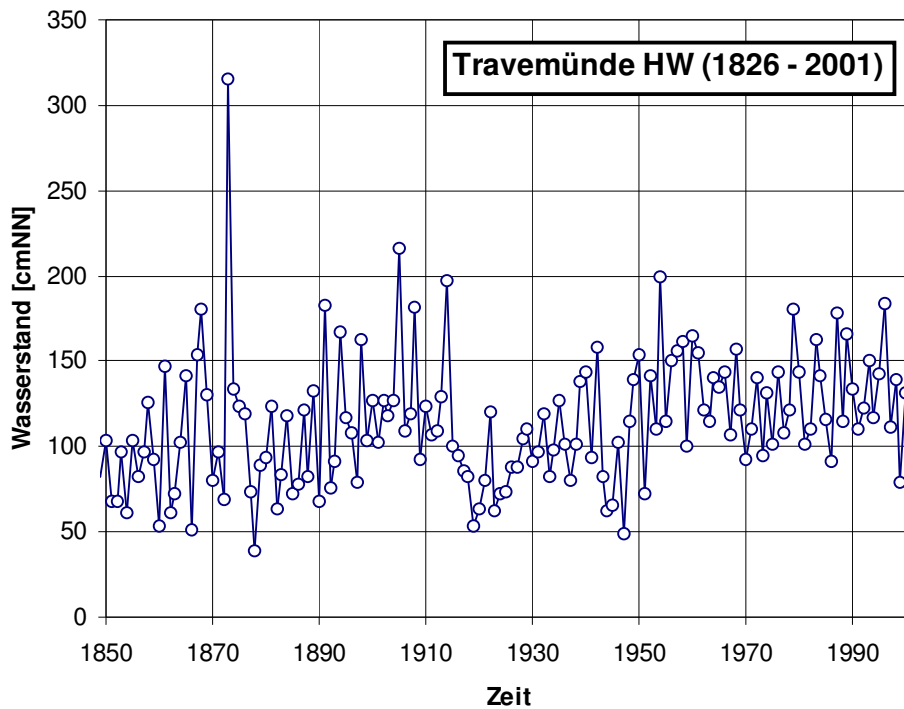


Abb. 2: HThw-Zeitreihe des Pegels Travemünde

Bei der Untersuchung dieses Sachverhaltes stellen sich zunächst folgende Fragen: Sind außerordentliche Extremereignisse (z.B. Travemünde 1872 oder Elbe 2002) Ausreißer oder gehören sie zur natürlichen Variabilität einer Zeitreihe? Gibt es einen höchsten Wasserstand, der physikalisch begründet werden kann?

Es erscheint zunächst plausibel, dass es einen theoretisch höchstmöglichen Wasserstand gibt, der damit eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{U}} = 0$ besitzt, ohne die Größenordnung dieses Wasserstandes festzulegen.

Das im Forschungsvorhaben MUSE entwickelte statistische Auswerteverfahren ProMUSE basiert auf der dreiparametrischen Allgemeinen Extremwertverteilung (GUMBEL-Typ III, GUMBEL 1958). Der enthaltene Krümmungsparameter (3. Parameter) der Verteilungsfunktion wird jedoch nicht wie üblich aus den Daten direkt abgeleitet, sondern kann durch die Vorgabe eines Grenzwertes beeinflusst werden. Als Grenzwert ist hier der Wert definiert, an den sich die Verteilungsfunktion asymptotisch annähert und daher die Überschreitungswahrscheinlichkeit $P_{\bar{U}} = 0$ hat. Für die Festlegung dieses Grenzwertes sind die modellierten Daten des BSH wichtige Informationen, wobei zu beachten ist, dass der höchste modellierte Wert des BSH nicht mit dieser Obergrenze gleichgesetzt werden kann, da es keinen Beweis dafür gibt, dass dieser Wert nicht doch übertroffen werden könnte.

Um darüber hinaus weitergehende Informationen zu erhalten, werden umfangreiche Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Damit werden ausgehend von den ermittelten Parametern der Verteilungsfunktion viele synthetische Zeitreihen simuliert, um Aussagen über die Variabilität der Zeitreihen zu erhalten (ROSENHAUER, MEISWINKEL UND BARG 2003).

Im folgenden sind am Beispiel des Pegels Cuxhaven einige Auswertungen dargestellt. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die hier aufgeführten Ergebnisse vorläufige Zwischenergebnisse sind.

In Abb. 3 ist die HThw-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven von 1849 bis 2001 dargestellt. Ein erster wesentlicher Arbeitsschritt bei der statistischen Analyse der Datenreihe ist die Trendbereinigung dieser Daten. Diese Trendbereinigung wird durch die Ermittlung eines 19-jährigen gleitenden Mittels vorge-

nommen und die Daten werden auf das Jahr 2000 homogenisiert. Dieses Verfahren bietet im Vergleich zu einer Trendbereinigung mit einer linearen Funktion den Vorteil, dass Änderungen im zeitlichen Verhalten der Zeitreihe besser nachgebildet werden (JENSEN UND MUDERSBACH 2004).

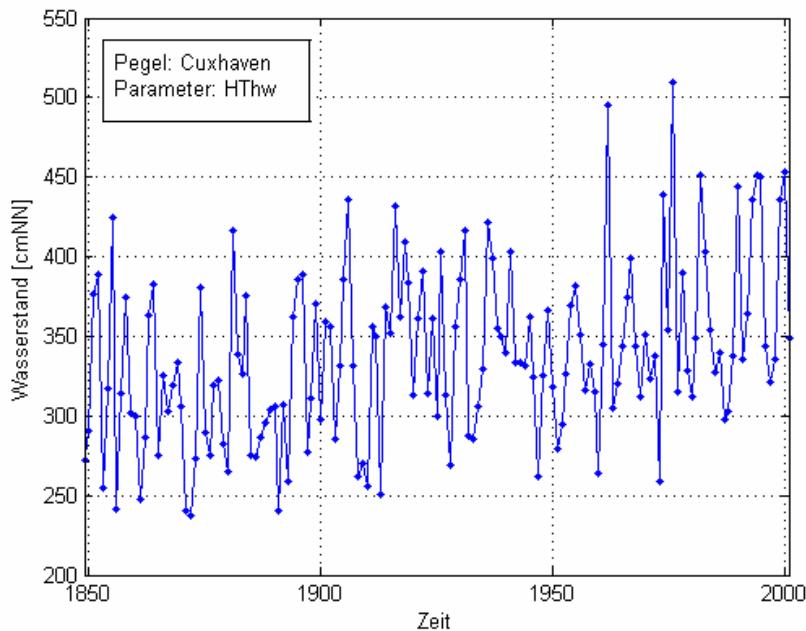


Abb. 3: HThw-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven

Für die weitere statistische Auswertung sind die modellierten Daten des BSH von Bedeutung. Für den Pegel Cuxhaven ergeben die bisherigen Untersuchungen einen möglichen maximalen Wasserstand von 730 cmNN, der etwa 2 m über dem gemessenen Höchstwert liegt.

Wie oben beschrieben, muss bei Beginn der statistischen Auswertungen eine Obergrenze definiert werden, an die sich die Verteilungsfunktion asymptotisch nähert. Bei der Wahl dieser Obergrenze ist als erstes die Frage von Bedeutung, in wie weit die Ergebnisse von der Wahl dieses Wertes abhängen. Dazu sind umfangreiche Sensitivitätsanalysen durchgeführt worden, deren Ergebnisse zeigen, dass bei einer Variation dieses Grenzwertes von 800 cmNN auf 1000 cmNN, die zugehörigen Wasserstände mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{U}} = 0,001$ sich um ca. 15 cm und mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{U}} = 0,0001$ um ca. 25 cm erhöhen (JENSEN, MUDERSBACH, KOZIAR UND BORK 2004).

Diese Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss der Obergrenze auf die zugehörigen Wasserstände nur gering ist. Die Wahl des zu definierenden Grenzwertes muss also nicht sehr detailliert erfolgen, sondern sollte sich lediglich in der richtigen Größenordnung bewegen. Für die nachstehenden Auswertungen wurde dieser Grenzwert auf 900 cmNN festgelegt.

In Abb. 4 sind die Ergebnisse der Auswertungen dargestellt, wobei zu Vergleichszwecken neben der ProMUSE-Verteilung (durchgezogene Linie) zwei Allgemeine Extremwertverteilungen nach „klassischer“ Methode mit unterschiedlichen Schätzmethoden aufgetragen sind (gestrichelte Linien). Die ProMUSE-Verteilung liegt etwas über den beiden anderen Funktionen, jedoch ist eine prinzipiell gute Übereinstimmung der Ergebnisse festzustellen.

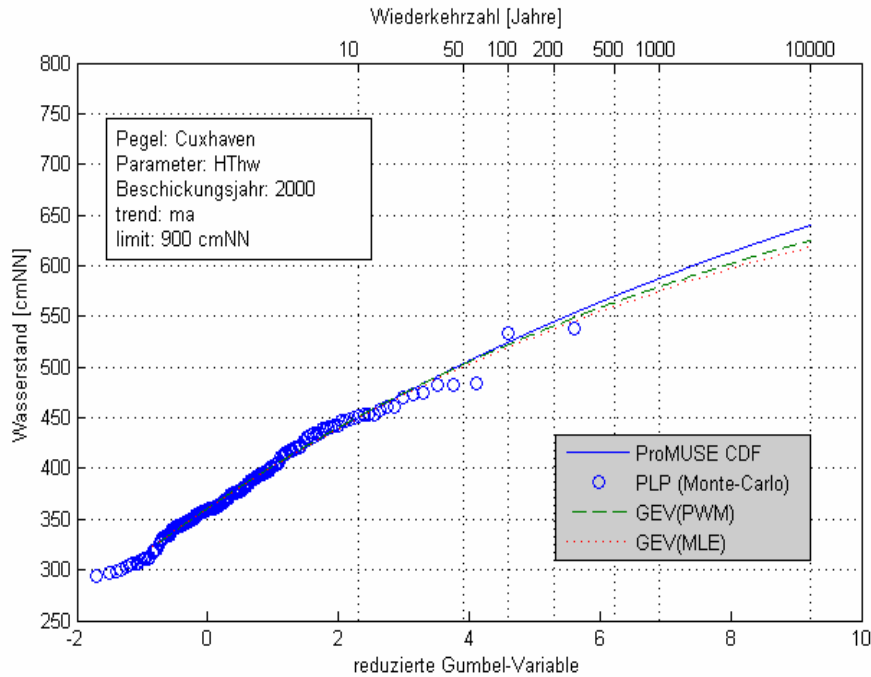


Abb. 4: Statistische Auswertung des HThw Original-Datensatzes des Pegels Cuxhaven

Ein wesentlicher Nachteil bei der statistischen Analyse mit klassischen hydrologischen Verteilungsfunktionen liegt darin, dass das Hinzufügen nur eines Extremwertes die statistischen Ergebnisse erheblich beeinflussen kann. Um die Frage zu beantworten, ob auch das entwickelte Verfahren ProMUSE diese Eigenschaft besitzt, ist der vom BSH modellierte Wasserstand von 730 cmNN an die HThw-Zeitreihe angefügt worden. In Abb. 5 sind die Ergebnisse dieser Auswertung dargestellt. Bei der statistischen Analyse werden den Daten zunächst empirische Wahrscheinlichkeiten zugeordnet. Diese Wahrscheinlichkeiten sind Schätzungen aus einer Stichprobe und können nur gering beeinflusst werden. Es ist zu erkennen, dass die beiden „klassischen“ Verteilungsfunktionen (gestrichelte Linien) ihren Funktionsverlauf signifikant ändern und deutlich andere Werte liefern, als in der ersten Auswertung. Die ProMUSE-Funktion liefert für das 10.000-jährliche Ereignis einen ca. 20 cm erhöhten Wasserstand, reagiert jedoch nicht annähernd so stark auf die Modifikation der Zeitreihe, wie die anderen Verteilungsfunktionen.

Eine weitere Frage besteht darin, ob es auch aus statistischer Sicht möglich ist, dass ein derart extremer Wasserstand von über 7 m erreicht werden kann. Um diese Frage zu beantworten, können Monte-Carlo-Simulationen verwendet werden, mit deren Hilfe eine Vielzahl von Zeitreihen, angepasst auf die Struktur der beobachteten Daten, simuliert werden können. Eine dieser simulierten Zeitreihen ist in Abb. 6 dargestellt. Aus diesen Analysen geht hervor, dass es auch aus statistischer Sicht möglich ist, dass ein sehr hoher Extremwert als „Einzelwert“ in einer Zeitreihe auftreten kann und damit die natürliche Variabilität einer Zeitreihe oft größer ist, als durch Anschauung der beobachteten Daten vermutet werden kann.

Die vorgestellten Verfahren und Ergebnisse zur statistischen Einordnung von extremen Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten müssen noch weiterentwickelt und verifiziert werden.

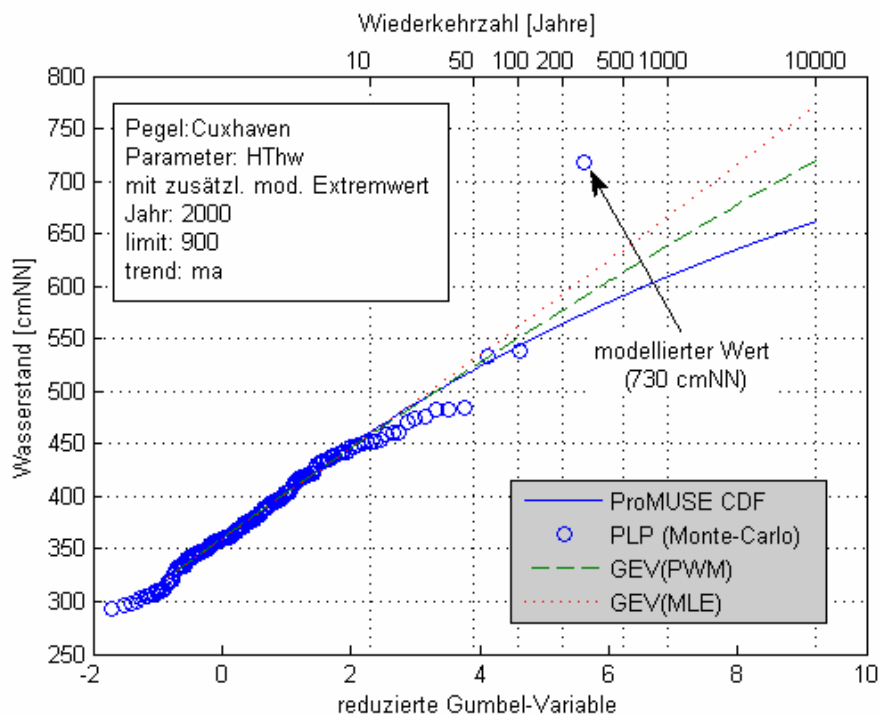


Abb. 5: Statistische Auswertung des modifizierten HThw Datensatzes des Pegels Cuxhaven

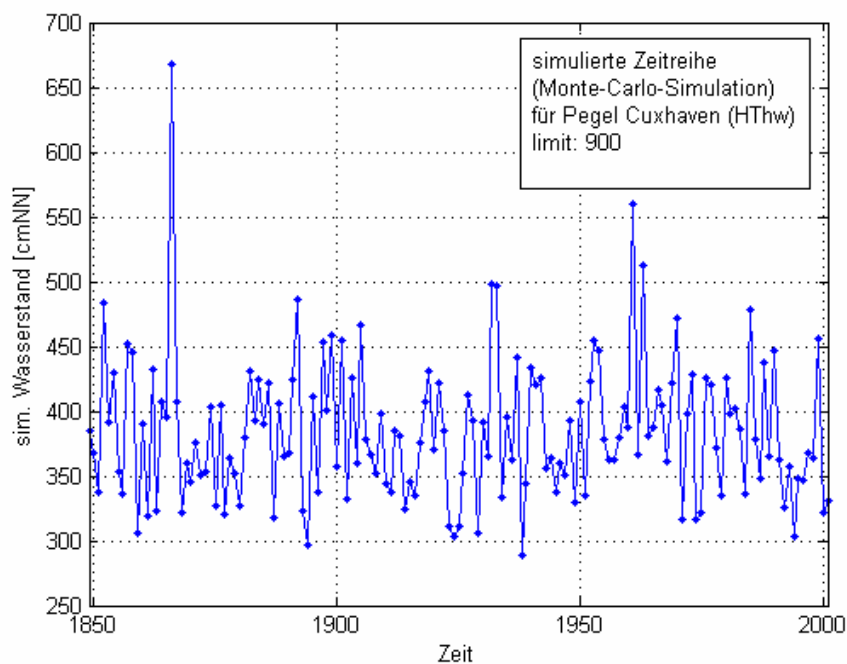


Abb. 6: simulierte HThw-Zeitreihe Pegels Cuxhaven durch Monte-Carlo-Simulation

5 Literatur

- BORK, I. UND MÜLLER-NAVARRA, S.: Modellstudien zu extremen Sturmfluten, Workshop Klimaänderung & Küstenschutz, Hamburg, 2004
- DICK, S. UND MÜLLER-NAVARRA, S. H., Vortrag. Sturmflut-Workshop der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 2000
- DVWK: Hochwasserabflüsse, DVWK-Schriften, Heft 124, Bonn, 1999
- EZMW *The Ensemble Prediction System*. Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage, 2002, www.ecmwf.int/products/forecasts/guide/The_Ensemble_Prediction_System_EPS.html
- GÖNNERT, G. UND MÜLLER-NAVARRA, S.: Simulation der Sturmflut vom 3.12.1999 unter Veränderung der Zugbahn Anatol. Fachbericht der Wirtschaftsbehörde, Strom- und Hafenbau, Hamburg, 2000
- GUMBEL, E.J.: *Statistics of Extremes*. Columbia University Press, New York, 1958
- HEWER, R.: Untersuchungen zur Entwicklung von Extremsturmfluten an der deutschen Nordseeküste auf der Basis hydrodynamisch-numerischer Modelle. Diplomarbeit, Universität Hamburg, 1980
- JENSEN, J. UND MUDERSBACH, CH.: Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten, Workshop Klimaänderung & Küstenschutz, Hamburg, 2004
- JENSEN, J., MUDERSBACH, CH., KOZIAR, CH. UND BORK, I.: Modelling of extreme storm surge weather situations in the North Sea and its statistical analysis, Littoral 2004-Conference, Aberdeen (UK), 2004
- JENSEN, J. UND FRANK, T.: Überlegungen zur Abschätzung von Sturmflutwasserständen mit sehr kleinen Überschreitungswahrscheinlichkeiten. Universität Siegen, fww-Reihe, Heft 11, Siegen, 2002
- JENSEN, J., FRANK, T., ZIMMERMANN, C., MAI, S., ROSENHAUER, W., MEISWINKEL, R. UND BARG, G.: Neue Verfahren zur Abschätzung von seltenen Sturmflutwasserständen, Hansa-Verlag, Hamburg, 2003
- ROSENHAUER, W., MEISWINKEL, R. UND BARG, G.: Übertragung probabilistischer Erdbebenmethoden auf Tidehochwasserstände. Jahrestagung Kerntechnik Berlin, 2003

Adressen

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen
Dipl.-Ing. Christoph Mudersbach
Forschungsstelle Wasserwirtschaft und Umwelt (fww)
an der Universität Siegen
Paul-Bonatz-Str. 9-11
57076 Siegen
Germany

E-mail: jensen@fb10.uni-siegen.de
mudersbach@fb10.uni-siegen.de

Dipl.-Met. Christian Koziar
Deutscher Wetterdienst (DWD)
Kaiserleistr. 42
63067 Offenbach
Germany

E-mail: christian.koziar@dwd.de

Modellstudien zu Extremsturmfluten in der Nordsee

Sylvin Müller-Navarra und Ingrid Bork

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie,

Summary

Growing coastal conurbation is posing problems in principle regarding coastal protection. What maximum storm surge levels are possible? Because of the brevity of the observation period, the ensemble of heavy storm surges is very small, so that statistical methods alone are not sufficient in coastal protection. Deterministic simulation techniques enable storm cyclones and storm surges to be generated which are physically possible but have not been observed so far. In a joint project of Siegen University's Department of Hydraulic and Environmental Research, the German Weather Service, and the Federal Maritime and Hydrographic Agency, supported by the Federal Ministry of Education and Research, a model system that has been proven in daily routine forecasting at the Federal Maritime and Hydrographic Agency is applied to results of the German Weather Service's model simulating the extreme weather patterns associated with storm surges.

Zusammenfassung

Expandierende Ballungsräume am Meer werfen Küstenschutzprobleme prinzipieller Art auf. Wie hoch können Sturmfluten sein? Wegen des kurzen Beobachtungszeitraums ist das Kollektiv der schwersten Sturmfluten sehr klein, so dass statistische Betrachtungen allein im Küstenschutz nicht ausreichen. Deterministische Simulationstechniken erlauben es, noch nicht eingetretene Sturmzyklonen und Sturmfluten zu generieren, die physikalisch mögliche Zustände der Nordsee darstellen. Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Gemeinschaftsprojekts der Forschungsstelle Wasserwirtschaft und Umwelt der Universität Siegen, des Deutschen Wetterdienstes und des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie wird eine im Vorhersagebetrieb des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie bewährte Modellkette auf die beim Deutschen Wetterdienst simulierten extremen Sturmflutwetterlagen angewandt.

1 Einleitung

Das Projekt MUSE (Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten) hat es sich zur Aufgabe gemacht, das Kollektiv hoher Sturmfluten der Nordsee mit neuen Verfahren der Forschungsstelle Wasserwirtschaft und Umwelt (fwu) der Universität Siegen statistisch zu bewerten (Jensen et al. 2003) und durch realistische, aber noch nicht eingetretene Sturmfluten zu ergänzen. Dazu werden beim Deutschen Wetterdienst (DWD) Analysen von Sturmflutwetterlagen des Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersagen (ECMWF) im Rahmen der allgemeinen Genauigkeit von Wetteranalysen variiert. Auf dieser Grundlage wird pro Analyse ein Ensemble neuer Wettervorhersagen entsprechend dem „Ensemble Prediction System“ (EPS) des ECMWF erstellt.

Am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) steht dann eine Modellkette zur Wasserstandsberechnung zur Verfügung. Ihr Kern ist ein dreidimensionales, baroklines Modell (BSHmod) mit einer horizontalen Auflösung von etwa 2 km in der Deutschen Bucht und etwa 10 km in der Nord-

see und der Ostsee (Dick et al. 2001). Daneben steht zur schnellen Wasserstandsvorhersage ein zweidimensionales, barotropes Modell (*Staumod*) mit einer Auflösung von etwa 10 km für die Nordsee und die westliche Ostsee bereit (Janssen 1996). Randwerte für beide Modelle liefert ein zweidimensionales, barotropes Modell mit einer Auflösung von etwa 40 km des Nordostatlantik, das zur Erfassung von Fernwellen dient.

Diese Modellkette hat sich im operationellen Betrieb bewährt. Im mehrjährigen Mittel wurden die Hochwasser (HW) in Cuxhaven mit *BSHcm* auf $\pm 0,19$ m (RMSE) genau vorhergesagt, mit *Staumod* auf $\pm 0,14$ m. Letzteres schnitt besser ab, da es wegen der geringeren Rechenzeit öfter als einmal pro Tag eingesetzt werden kann und damit der Vorhersagezeitraum näher an der Analyse liegt. Eine gesonderte Statistik zur Trefferquote bei Sturmflutvorhersagen liegt nicht vor. Sie hängt hauptsächlich von der Güte der Wettervorhersagen ab. Berechnungen mit auf Re-Analysen beruhenden Windvorhersagen ergaben für 1962 bzw. 1999 Abweichungen im maximalen Wasserstand in Cuxhaven von $-0,15$ m bzw. $+0,30$ m für *BSHcm* und $-0,20$ m bzw. $+0,12$ m für *Staumod*. Daher scheint es gerechtfertigt, mit diesen Modellen extreme Sturmfluten im Sinne von MUSE zu simulieren.

Zur Abschätzung extremer Sturmfluten liegen bereits einige Arbeiten vor. Prügel (1942) leitete aus Luftdruckbeobachtungen einen extremen geostrophischen Wind ab und ermittelte daraus empirisch eine Obergrenze für den Windstau in Cuxhaven von 4,60 m. Koopmann (1962) gibt maximale Erfahrungswerte für die einzelnen Komponenten des Wasserstands an, vermeidet aber zu Recht ihre Superposition. Hewer (1980) benutzte wie Prügel konstruierte meteorologische Felder, aber schon ein numerisches Modell, um Wasserstand und Windstau exemplarisch für die Sturmflutbedingungen 1962 und 1976 abzuschätzen (6,20 m bzw. 5,60 m). Ein in der Wasserstandsvorhersage des BSH zusätzlich verwendetes empirisches Verfahren zur Windstauberechnung lässt wegen der benutzten Datenbasis lediglich eine Extrapolation bis zu Windstärken von etwa 27 m s^{-1} zu (Müller-Navarra und Giese 1999). Ebenfalls empirisch über die Korrelation von Parametern der Windstaukurven von 1900 – 1997 ermittelte Gönnert (1999) einen Grenzwert für den Windstau von 4,50 m. Das Vorgehen im Projekt MUSE bedeutet in eine deutliche Verbesserung gegenüber diesen Verfahren.

2 Zwei Beispiele extremer Sturmfluten

Extreme Wetterlagen wurden in unmittelbarer zeitlicher Nähe von tatsächlich eingetretenen Sturmflutwetterlagen gesucht und gefunden. Die resultierenden EPS - Wetterlagen erstrecken sich im Mittel nur über 96 Stunden. Daher wurden die zeitnahen sechsstündigen Wetteranalysen des ECMWF genutzt, um sinnvolle Anfangsbedingungen für die Wasserstandsvorhersage zu konstruieren.

Kriterium für die Auswahl der Wetterlagen aus den jeweils 50 Mitgliedern (Member) eines Ensembles von Wetterlagen ist ein Effektivwind über 22 m s^{-1} . Aus statistischen Untersuchungen (Müller-Navarra und Giese 1999) ist bekannt, dass WNW-Winde (295°) die größte Wasserstandserhöhung in Cuxhaven verursachen. Der Effektivwind ist die Projektion des über die Deutsche Bucht gemittelten Winds auf diese stauwirksame Windrichtung.

Ursprünglich sollten die Simulationen mit dem ECMWF Modell (IFS) nur als Randwerte für das lokale DWD Modell (LM) dienen. Da sich jedoch deutliche Unterschiede in den Berechnungen beider Modelle ergaben, ohne dass ein Ergebnis verworfen werden konnte, wurden der Wasserstand jeweils für beide Wetterlagen simuliert, sofern sie den geforderten Effektivwind erreichten. So ergaben sich insgesamt 59 Wasserstandsvorhersagen. Hier werden die Simulationen vorgestellt, die sich für die ausgewählten Member zu den Sturmfluten 1962 und 1999 ergaben.

Sturmflut	EPS-Member	Windstau HW („skew surge“) [m]		Höchster Wasserstand [m über NN]	
		IFS	IFS + LM	IFS	IFS + LM
1962	08	4,18	3,34	5,55	4,80
1962	26	4,53	3,63	5,99 (6,10)	5,09
1962	30	3,64	3,26	5,01	4,63
1962	37	3,25	3,33	4,71	4,80
1962	50	3,34	3,36	4,80	4,82
1999	02	2,99	3,17	4,69	4,87
1999	05	5,89	4,22	7,30 (7,27)	5,63
1999	20	3,62	2,78	5,41	4,57
1999	39	3,96	3,55	5,35	4,95
1999	44	2,99	-	4,48	-
1999	50	2,15	-	3,56	-

Tab. 1: Windstau („skew surge“) und maximaler Wasserstand in Cuxhaven. Simulationen mit Stau-mod, in Klammern Simulation mit BSHcmod.

Hewer (1980) unterscheidet zwei Sturmfluttypen, den Stautyp und den Zirkulartyp. 1962 war, abgesehen von 1825, die einzige Sturmflut vom Stautyp im Kollektiv der Extremsturmfluten. Die anderen untersuchten Sturmfluten 1967, 1976, 1990, 1994 und 1999 waren vom Zirkulartyp. Der Zirkulartyp wird von kleinräumigen, schnell ziehenden Sturmtiefs erzeugt, die sich sogar beim Zug über die Nordsee vertiefen können. Sie können dann kurzfristig sehr hohe Wasserstände hervorrufen. Der höchste in Cuxhaven beobachtete Wasserstand gehört zu einer derartigen Sturmflut (1976). Der absolut höchste Wasserstand dieser Untersuchung wurde für ein Member des Ensembles Sturmflut 1999 erreicht. Das deckt sich mit vorläufigen Modelluntersuchungen am BSH zum Orkantief „Anatol“, die im Rahmen der Nachbereitung der Wasserstandvorhersage Anstoß zum Projekt MUSE gaben.

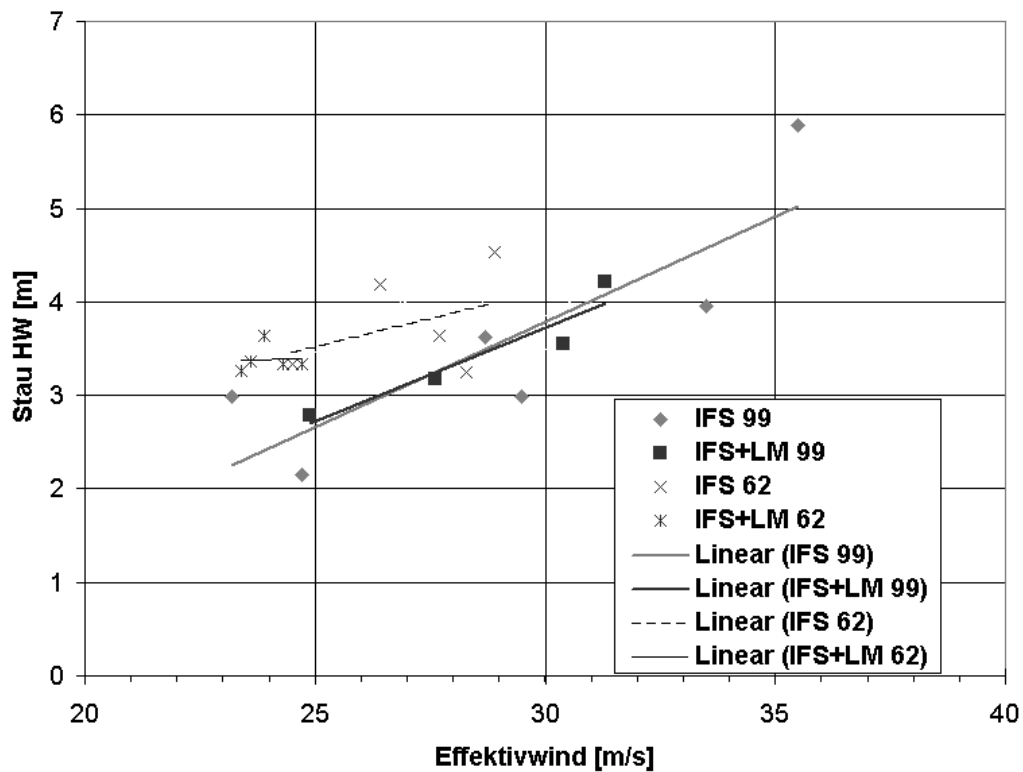


Abb. 1: Stau bei HW in Cuxhaven als Funktion des maximalen Effektivwinds

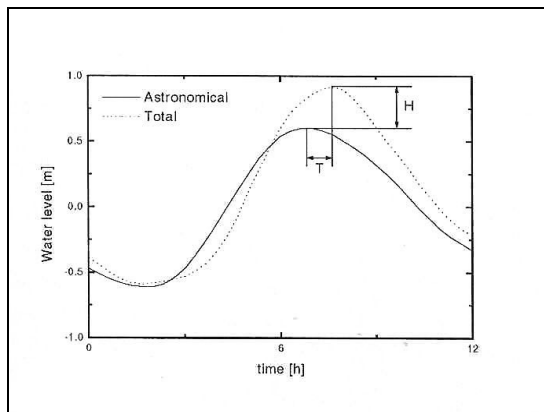


Abb. 2: Definition „skew surge“ (de Vries 1995)

Hinsichtlich zukünftiger Vorhersagen stellt sich die Frage nach der Aussagefähigkeit des Effektivwinds. In Abbildung 1 ist der Stau bei HW, die sogenannte „skew surge“ (Abb. 2) gegen den maximalen Effektivwind aufgetragen. Bei Sturmfluten können zwischen astronomisch vorausberechneter Gezeit und eingetretenem Wasserstand Phasenunterschiede von mehr als einer Stunde auftreten. Wird nun der Stau kontinuierlich als Differenz zwischen astronomischem und eingetretenem Wasserstand berechnet, beinhaltet der Stau noch periodische Anteile und nimmt dadurch beträchtliche Werte an.

Die Interpretation eines so definierten Staus ist schwierig. Im Vorhersagebetrieb wird die Differenz aus Extremwert im Wasserstand und den zeitlich nächsten Extremwert der astronomischen Gezeit, die „skew surge“, als sinnvollerer Maß für den extremen Wasserstand angesehen (de Vries 1995). Tabelle 1 und Abbildung 1 berücksichtigen nur die HW-Werte. Der Stau bezogen auf Niedrigwasser (NW) ist für einzelne Member höher, geht aber nicht über den maximalen Wert des Staus bezogen auf HW von 5,89 m (Tab. 1) hinaus.

Abbildung 1 zeigt zum einen, dass 1962 eine wesentlich stabilere Wetterlage war, zum anderen, dass die IFS Simulationen eine größere Bandbreite im maximalen Effektivwind und im maximalen Windstau aufweisen. Es ist jedoch kein eindeutiger funktionaler Zusammenhang zwischen maximalem Effektivwind und maximalem Windstau zu erkennen.

Die tatsächlichen maximalen Windgeschwindigkeiten liegen deutlich über dem Effektivwind: $35,7 \text{ m s}^{-1}$ für EPS26-1962 und $41,8 \text{ m s}^{-1}$ für EPS05-1999. Der Windstau wird stark durch die Bahn des Sturmtiefs bestimmt. Sowohl 1962 als auch 1999 wurde vermutet, dass ein südlichere Zugbahn des Sturmtiefs noch höhere Wasserstände zur Folge gehabt hätte. Allerdings ist 1962 bei keiner Variation der Wetterlage das Sturmtief wesentlich weiter südlich verlaufen. Jedoch 1999 liegen für EPS05 die maximalen Windgeschwindigkeiten anders als im tatsächlich eingetretenen Fall direkt über der Deutschen Bucht.

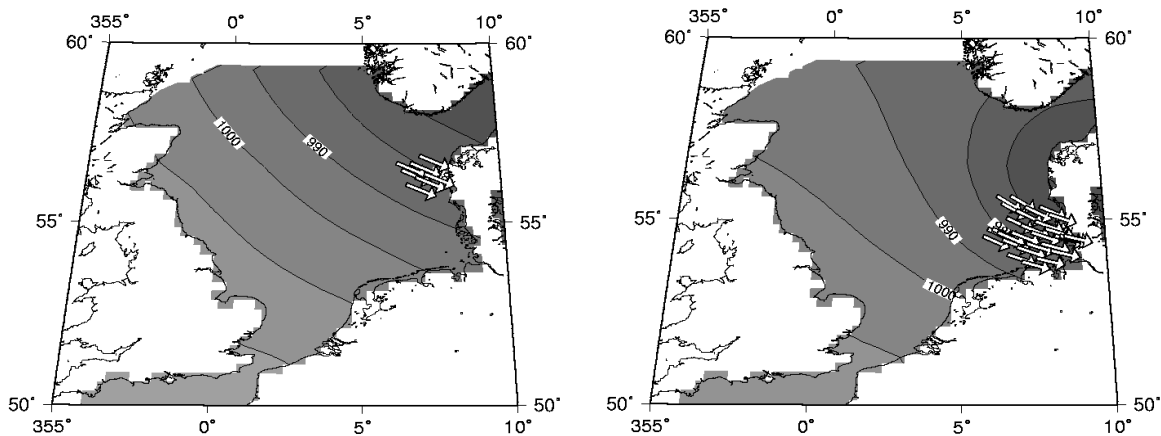


Abb. 3: Luftdruckverteilung und Windvektoren mit $|\mathbf{v}| > 35 \text{ m s}^{-1}$ zum Zeitpunkt maximaler Windgeschwindigkeiten (12.2.1962 um 20 Uhr UTC) über der Nordsee für EPS26-1962. Windpfeile für jeden 10. Wasserpunkt.

Abb. 4: Luftdruckverteilung und Windvektoren mit $|\mathbf{v}| > 35 \text{ m s}^{-1}$ zum Zeitpunkt maximaler Windgeschwindigkeiten (2.12.1999 um 17 Uhr UTC) über der Nordsee für EPS05-1999. Windpfeile für jeden 10. Wasserpunkt.

Entsprechend der Wetterlagen unterscheidet sich auch der Verlauf der Wasserstandskurven deutlich.

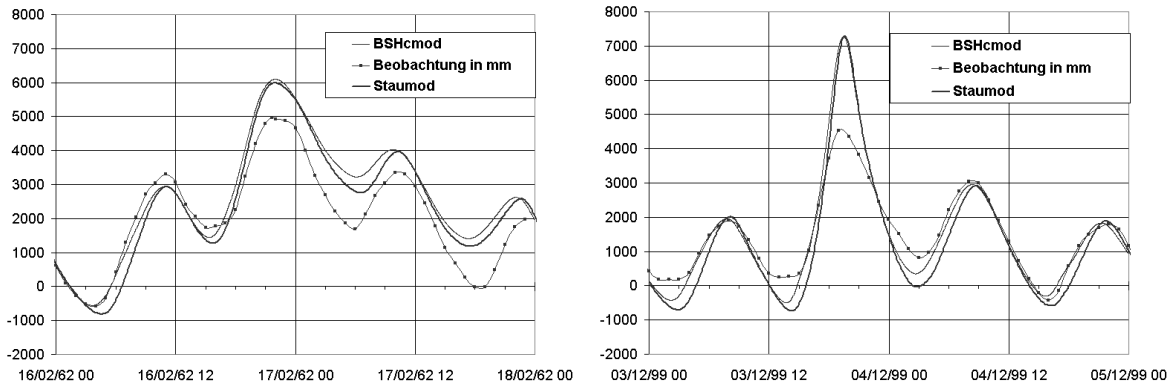


Abb. 5: Wasserstandsverlauf in Cuxhaven für EPS 26-1962 (*Staumod* und *BSHcmod*).

Abb. 6: Wasserstandsverlauf in Cuxhaven für EPS 05-1999 (*Staumod* und *BSHcmod*).

Typisch für eine Zirkularsturmflut (Abb. 6) steigt der Wasserstand innerhalb sehr viel kürzerer Zeit sehr viel höher an als bei der Stausturmflut (Abb. 5). Als Referenz sind in diesen Abbildungen auch der damals tatsächlich eingetretene Verlauf der Sturmflut angegeben.

Die Sichtung der Sturmflutwetterlagen erfolgte mit dem zweidimensionalen Staumodell. Fälle mit einem maximalen Wasserstand größer als 6 m oder einer „skew surge“ größer als 4,5 m in Cuxhaven werden mit dem feiner auflösenden dreidimensionalen Modell nachgerechnet. Die entsprechenden Kurven sind in Abb. 5 und 6 zu finden. Sie liegen leicht über den mit dem zweidimensional berechneten Werten. Dafür ist primär die besser aufgelöste Topographie im Küstenmodell verantwortlich. Für dieses Gebiet geben Abb. 7 und 8 die räumliche Verteilung der „skew surge“ (der Gezeitenanteil ist herausgerechnet).

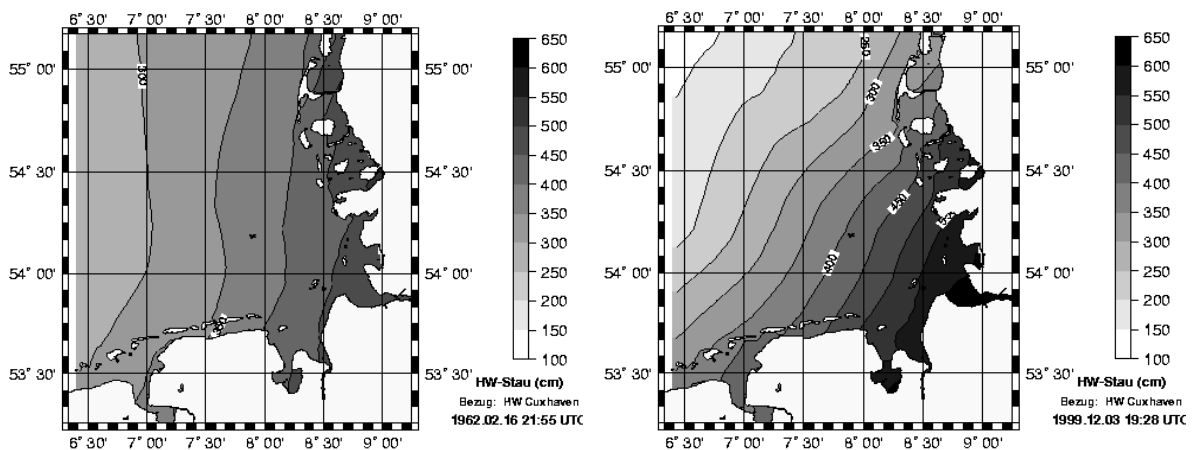


Abb. 7: „skew surge“ EPS26-1962 (*BSHcmod*). Abb. 8: „skew surge“ EPS05-1999 (*BSHcmod*).

Für 1962 liegen Wasserstand und Windstau auch für den Extremfall EPS 26-1962 im Rahmen der Bemessungsstandards (Siefert 1998). Die maximalen Werte für 1999 sind beträchtlich und eine Diskussion der Vorsagequalität der Modelle für derart extreme Bedingungen ist angesagt.

3 Einfluss unterschiedlicher Windschubkoeffizienten

Voraussetzung für jede Abschätzung der Auswirkung extremer Windverhältnisse auf den Wasserstand an der Küste ist eine verlässliche Reproduktion schon eingetretener Stürme (z. B. 1962 und 1999) und ihrer Auswirkungen. Ein entscheidender Faktor für eine solche Reproduktion ist das Verständnis des Impulsaustauschs zwischen Atmosphäre und Ozean. Im meteorologischen Modell hängt die Güte des 10-m-Windes von der Bodenschichtmodellierung ab, im ozeanischen Modell reagiert der Wasserstand sensibel auf die Parametrisierung der Windschubspannung.

Im operationellen Betrieb wird in allen Modellen des BSH ein klassischer quadratischer Ansatz für die Windschubspannung benutzt, $\tau = C_D \rho_L |U_{10}| U_{10}$. Dabei ist der dimensionslose Windschubkoeffizient nur eine Funktion von $|U_{10}|$. Hinsichtlich dieser Klasse von Ansätzen besteht weitgehende Einigkeit darüber, dass C_D für mittlere Windgeschwindigkeiten eine lineare Funktion von $|U_{10}|$ mit positiver Steigung ist (Abb. 9, links). Für die Nordsee hat sich der Ansatz von Smith und Banke (1975) bewährt (z. B. Janssen 1996). Üblich für die Nordsee ist auch der Ansatz von Wu (1982). Bei etwa gleicher Steigung liefert er deutlich höhere Werte für C_D .

Entscheidend für die Sturmflutmodellierung sind jedoch die Unterschiede im weiteren Verlauf solcher Funktionen bei hohen Windgeschwindigkeiten. Während Wu (1982) einen Gültigkeitsbereich für seinen Ansatz bis 52 m s^{-1} angibt, haben andere Autoren Vorbehalt gegen eine einfache Extrapolation und benutzen einen konstanten Wert (z.B. Onvlee 1993). Powell et al. (2003) haben sogar eine Abnahme für C_D bei Windgeschwindigkeiten größer als 33 m s^{-1} gemessen. Ihre Daten werden zur Ergänzung derjenigen von Smith und Banke (1975) benutzt.

Da die maximale Windgeschwindigkeit sowohl bei den Reproduktionen als auch bei den künstlichen Windfeldern nicht wesentlich über 40 m s^{-1} liegt, kommt dieses Vorgehen für den ausgewählten Datensatz (10 – 150 m) einem etwa konstanten Wert für Windgeschwindigkeiten über 22 m s^{-1} gleich.

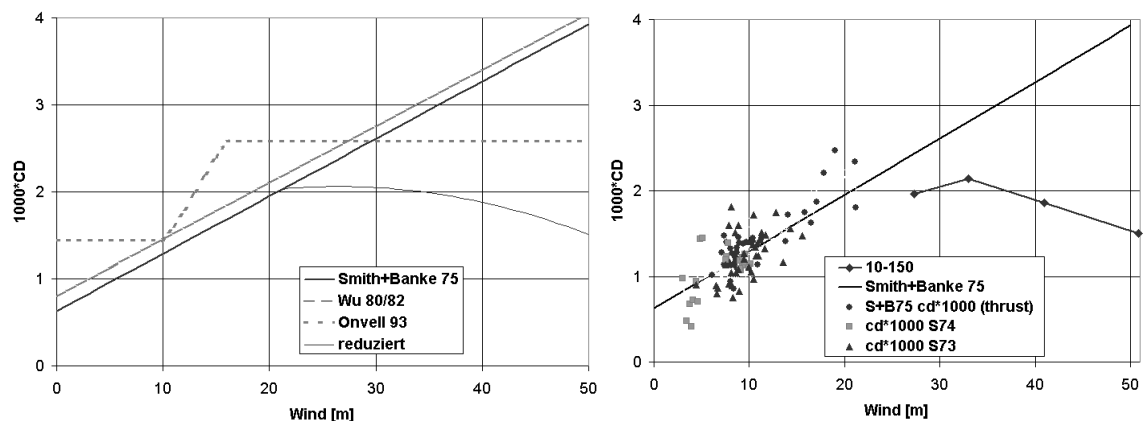


Abb. 9: Unterschiedliche Ansätze und Datengrundlage für reduzierten Windschubspannungskoeffizienten

Um zu einer Entscheidung zu kommen, welcher Ansatz für den Windschubkoeffizienten in dieser Studie am geeignetsten ist, wurden folgende Ansätze zur Reproduktion der Sturmflut 1999 benutzt. Die Sturmflut 1962 ist für diesen Test nicht so interessant, da die tatsächlichen Windgeschwindigkeiten maximal nur $29,1 \text{ m s}^{-1}$ erreichten (Modellwindgeschwindigkeiten im Nordseebereich).

Smith und Banke 1975..... $0,63 + 0,066 |U_{10}|$.

Wu 1982.....	0,80 + 0,065 U ₁₀ .	
Onvll 1993.....	0,14	für U ₁₀ < 10,2 m s ⁻¹ und
	-0,60 + 0,20 U ₁₀	für 10,2 m s ⁻¹ ≤ U ₁₀ ≤ 15,9 m s ⁻¹ ,
	2,58	für U ₁₀ > 15,9 m s ⁻¹ .
Reduziert.....	0,63 + 0,066 U ₁₀	für U ₁₀ ≤ 21,52 m s ⁻¹ und
	1,36 + 0,053 U ₁₀ - 0,001 U ₁₀ ²	für U ₁₀ > 21,52 m s ⁻¹ .

Anders als zunächst vermutet, ergibt die einfache Extrapolation des Ansatzes von Smith und Banke (1975) den kleinsten relativen Fehler im Windstau bei HW und im maximalen Wasserstand, verglichen mit den Beobachtungen (aufgelistet bei Müller-Navarra et al. 2003). Danach folgen die Werte nach Wu (1982) für den maximalen Wasserstand und die nach Onvlee (1993) für den Windstau bei HW. Die Werte mit dem reduzierten C_D sind durchweg zu niedrig (Tab. 2)

	Windstau bei HW					Maximaler Wasserstand				
	beob.	S+B 75	Onv 93	Wu 82	Red	beob.	S+B 75	Onv 93	Wu 82	Red
Helgoland	2,26	2,29	2,36	2,40	1,95	2,91	3,07	3,14	3,18	2,73
Borkum	2,03	1,74	1,84	1,82	1,54	2,95	2,66	2,76	2,75	2,46
Wilhelms.	3,07	3,10	3,18	3,24	2,65	4,54	4,58	4,66	4,72	4,13
Cuxhaven	3,31	3,28	3,35	3,43	2,79	4,55	4,67	4,76	4,84	4,20
Büsum	3,19	3,36	3,55	3,52	2,94	4,55	4,61	4,80	4,77	4,20
Husum	3,97	3,98	3,99	4,18	3,26	5,42	4,96	4,96	5,16	4,24
Esbjerg	3,03	2,56	2,21	2,47	1,67	3,83	3,12	2,99	3,24	2,48
Mittl. abs. Fehler		14,7	23,4	24,9	58,0		26,3	28,7	32,9	61,6
Mittl. rel. Fehler		0,055	0,082	0,085	0,197		0,067	0,082	0,073	0,149

Tab. 2: Beobachteter und mit unterschiedlichen Windschubkoeffizienten berechnete Windstau bzw. Sturmflutscheitel (NN) und deren mittl. Fehler

4 Diskussion

Bedeutet dieses Ergebnis, dass die mit dem Ansatz von Smith und Banke (1975) errechneten extremen Wasserstände als im Sinne dieser Studie realistisch anzusehen sind? Hier kommt die Parametrisierung auf meteorologischer Seite ins Spiel. Überwiegend haben die IFS-Winde höhere Wasserstände ergeben als die IFS+LM-Winde. Daher wurde in gleicher Weise wie für die EPS Member eine Vorabrechnung auf Basis der Re-Analyse vom 2.12.99, 0:00 Uhr erstellt und entsprechend für 1962. Die Wasserstände lagen in beiden Fällen unter der GME+LM Werten. Man kann daraus also nicht schließen, dass das IFS Modell die Winde tendenziell überschätzt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der in MUSE ermittelten extremen Wasserstände fügen sich in die bisherigen Abschätzungen ein, die Werte sind jedoch physikalisch ausreichend begründet, da mit im Vorhersagebetrieb bewährten Modellen ermittelt.

Jahr	Art	Meteorologie	Modell	Autor/Quelle	Maximaler Wasserstand
1825	Beobachtung (korr.)			Koopmann 1962	4,66
1962	Beobachtung			BSH	4,96
1967	Beobachtung			BSH	4,01
1976	Beobachtung			BSH	5,10
1990	Beobachtung			BSH	4,46
1994	Beobachtung			BSH	4,95
1995	Beobachtung			BSH	4,70
1999	Beobachtung			BSH	4,57
"1962"	Superposition			Koopmann 1962	(7,80)
"1962"	Modell	konstruiert		Hewer 1980	7,50
"1976"	Modell	konstruiert		Hewer 1980	6,80
1962	Modell - Hindcast	GME/LM	Staumod		4,76
1962	Modell - Hindcast	GME/LM	BSHcmod		4,81
1999	Modell - Hindcast	GME/LM	Staumod		4,67
1999	Modell - Hindcast	GME/LM	BSHcmod		4,85
1962	Modell	IFS – EPS26	BSHcmod		6,10
1962	Modell	IFS – EPS26	Staumod		5,99
1967	Modell	IFS – EPS39	Staumod		5,43
1976	Modell	IFS – EPS09	Staumod		6,73
1990	Modell	IFS – EPS30	Staumod		6,38
1994	Modell	IFS – EPS23	Staumod		6,18
1999	Modell	IFS – EPS05	BSHcmod		7,27
1999	Modell	IFS – EPS05	Staumod		7,30

Tab. 3: Maximale MUSE-Wasserstände im Vergleich zu Beobachtungen und anderen Abschätzungen.

Es wurden 16 Modellszenarien mit Wasserständen gefunden, die höher ausfielen als die 1976 eingetreten. Mit diesen Daten konnte die Basis der Extremwertstatistik erweitert (s. Jensen et al., im gleichen Band) und deren Extrapolation entscheidend verbessert werden.

Nur mit dem höher aufgelösten *BSHcmod* lassen sich die Ergebnisse lokal differenzieren. Daher werden im folgenden nur die beiden Modellläufe IFS-EPS26-1962 und IFS-EPS05-1999 diskutiert (Tab. 3). Der höchste Wasserstand bei Cuxhaven von 7,27 m resultiert aus einer Variation der realen Wetterlage des „Anatol“-Orkans im Dezember 1999, der in Südjütland bis dato nicht gekannte Verwüstungen hervorrief. In Wilhelmshaven werden 7,31 m erreicht, in Büsum 7,19 m und in Husum 7,10 m. Die simulierten Wasserstände aus der variierten Sturmflut 1962 sind: Cuxhaven 6,10 m, Wilhelmshaven 5,99 m, Husum 6,40 m und Büsum 6,09 m.

Es ist wahrscheinlich, dass nicht Sturmfluten vom Stautyp, sondern Sturmfluten vom Zirkulartyp, also Orkane, die sich noch auf der Nordsee vertiefen, zu höchsten Wasserständen führen. Dieses ist insofern beunruhigend, da die Kurzfristvorhersage derartiger Szenarien – nicht zuletzt wegen fehlender Messstationen in der zentralen Nordsee – problematisch bleibt. Die rasanten Fortschritte bei der Modellierung der Atmosphäre und zukünftige Gitternetzverfeinerungen gleichen diesen Mangel teilweise aus.

Eine mögliche weitere Verbesserung ließe sich durch Verwendung gekoppelter Wasserstands-/Seegangmodelle erzielen, die zusätzlich noch Informationen zur Seegangsbelastung der Küstenschutzanlagen liefern. Ein derartiges Verfahren wird zur Zeit am BSH entwickelt und kann in naher Zukunft in weiteren Projektstudien angewandt werden.

6 Literatur

- DICK, S./ KLEINE, E./ Müller-NAVARRA, S. H./ KLEIN, H., KOMO, H.: The operational circulation model of BSH (BSHmod) Model description and validation. Berichte des BSH Nr. 29/2001, 48 S.
- GÖNNERT, G.: Windstauanalysen in der Nordsee. Strom- und Hafengebäude Hamburg, 1999, 194 S.
- HEWER, R.: Untersuchungen zur Entwicklung von Extremsturmfluten an der deutschen Nordseeküste auf der Basis hydrodynamisch-numerischer Modelle. Diplomarbeit Univ. Hamburg, 1980, 132 S.
- JANSSEN, F.: Auswirkungen unterschiedlicher Windschubspannungsansätze auf die Qualität von Wasserstandsvorhersagen mit einem numerischen Nordseemodell. Wasserstandsvorhersagen mit einem numerischen Nordseemodell. Diplomarbeit Univ. Hamburg, 1996, 120 S.
- JENSEN, J./ FRANK, T./ ZIMMERMANN, C./ MAI, S./ ROSENBAUER, W./ MEISWINKEL, R./ BARG, G.: Neue Verfahren zur Abschätzung von seltenen Sturmflutwasserständen. HANSA 11, 1-12, 2003.
- KOOPMANN, G.: Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 in ozeanographischer Sicht. Die Küste, Jahrgang 10/1962, Heft 2, 55-68.
- MÜLLER-NAVARRA S.H./ GIESE, H.: Improvements of an Empirical Model to Forecast Wind Surge in the German Bight. Dt. hydrogr. Z. 51, 1999, 385 - 405.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H./ LANGE, W./ DICK, S./ SOETJE, K. C.: Über die Verfahren der Wasserstands- und Sturmflutvorhersage: Hydrodynamisch-numerische Modelle der Nord- und Ostsee und empirisch-statistisches Verfahren für die Deutsche Bucht. Promet 29, 2003. 117-124.
- ONVLEE, J. R. N.: The performance of drag relations in the WAQUA storm surge model. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, Technical report TR-149, De Bilt, 1993, 24 S.
- POWELL, M. D./ VICKERY, P. J./ REINHOLD, T. A.: Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. Nature, 422, 279-283, 2003.
- PRÜGEL, H.: Die Sturmflutschäden an der schleswig - holsteinischen Westküste in ihrer meteorologischen und morphologischen Abhängigkeit. Geographisches Institut der Universität Kiel, Band XI, Heft 3, 1942. 94 S.
- SIEFERT, W.: Bemessungswasserstände 2085 entlang der Elbe. Ergebnisse einer Überprüfung durch die Länderarbeitsgruppe nach 10 Jahren (1995/96). Die Küste, Heft 60, 227-255, 1998.
- SMITH, S. D./ BANKE E. G.: Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. Quart. J. R. Met. Soc. 101, 665-673, 1975.
- DE VRIES, J. W.: Verification of the WAQUA/CSM-16 model for the winters 1992/1993 and 1993/1994. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Inst., Technical report TR-176, De Bilt 1995

Wu, J.: Wind-Stress Coefficient Over Sea Surface From Breeze to Hurricane. Journal of Geophysical Research, Vol. 87, No. C12, 9704-9706, 1982

Adresse

Sylvin Müller-Navarra
Ingrid Bork
Bernhard-Nocht-Straße 78,
20359 Hamburg
Germany

E-mail: mueller-navarra@bsh.de

Analyse des Langzeitwellenklimas vor Sylt als Grundlage für Maßnahmen im Küstenschutz

Hans-Henning Dette und Hocine Oumeraci

Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig

Summary

For the planning of repeated beach nourishments along the west coast of Sylt according to the guideline of protection, which was introduced in 1985, assumptions on the future storm surge frequency had to be made. It was assumed that the characteristics of storm surges, which were analyzed for the period 1950 till 1984 (35 years) would last on for the same period of 35 years till year 2020 (prediction period). In 2002, after 17 years, a comparison between assumed and actual conditions can be made. The resultant yearly energy flux into the surf zone, which can be considered as indicator for the prevailing incoming waves did not change significantly since 1985, the flux varies still in the order of magnitudes, observed since 1950. The residence times of higher water levels during storm surges, however, increased remarkably within the period of assumption. Starting from 7 hours per year from 1900 till 1960 the residence time doubled (14 hours) from 1960 till 1980. Afterwards a further increase by 70% towards 24 hours till 2000 occurred. The maximum was reached in 1990 with 70 hours. The assumed number of 14 storm surges for the prediction period of 35 years (1985 – 2020) was reached almost with 13 storm surges after only 17 years till 2001. All parameters indicate that the storm surge frequency since 1950 over 1985 did not only continue but even increased.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die Annahmen zur Sturmflutentwicklung (bis 2020) für die Planungen der Sandvorspülungen vor Sylt nach Inkrafttreten des Fachplanes Küstenschutz Sylt im Jahre 1985 den eingetretenen Zuständen bis 2001 gegenübergestellt. Der resultierende jährliche Energiefluß in die Brandungszone von Sylt als Indikator für den Seegang hat sich über 1985 hinaus nicht auffällig verändert, er bewegt sich dem Betrage nach in der Bandbreite der jährliche Werte seit 1950. Die Verweilzeiten erhöhter Wasserstände bei Sturmfluten sind hingegen seit 1980 stark angestiegen. Ausgehend von einer mittleren jährlichen Verweilzeit von rd. 7 Stunden im Zeitraum 1900 – 1960 verdoppelte sich dieser Wert im Zeitraum 1960 – 1980 auf 14 Stunden. Im Prognosezeitraum (1980 – 2000) folgte dann eine nochmalige Zunahme um 70% auf 24 Stunden. Im Jahre 1990 wurde der bisherige Maximalwert von 70 Stunden erreicht. Auch die Anzahl von 14 Sturmfluten als Prognose wurde mit 13 Sturmfluten bereits nach 17 Jahren anstelle von 35 Jahren erreicht. Diese Indikatoren deuten an, daß die Sturmfluthäufigkeit über die Annahmen hinaus nochmals zugenommen hat.

1 Einleitung

Die höchsten Sturmfluten im 20. Jahrhundert traten in den Jahren 1976 und 1981 auf und verursachten an den Dünen Kliffs an der Westküste von Sylt entsprechend starke, für den Beobachter sichtbare Abbrüche. Das führte dazu, daß zunehmend von den Gemeinden auf Sylt, von der breiten Öffentlichkeit und von Politikern aller Parteien in Nordfriesland gefordert wurde, mit geeigneten Küstenschutzmaßnahmen gegen die anhaltenden Ausräumungen von Dünen und Kliffs vorzugehen. Im Jahre 1985

wurde daraufhin vom Amt für Land- und Wasserwirtschaft (ALW) Husum mit dem „Fachplan Küstenschutz Sylt“ eine Gesamtkonzeption für die künftigen Küstenschutzmaßnahmen an der Westküste erstellt. Darin wird der Schutz durch Sandvorspülungen bevorzugt, mit denen die jährlichen Verluste an der Westküste längerfristig durch Vorspülmengen in gleicher Größenordnung ausgeglichen werden sollen. Hierzu war aus Vermessungsdaten der Westküste seit 1870 ermittelt worden, daß sich das Abbruchgeschehen als Folge verstärkter Sturmfluthäufigkeit im Zeitraum von 1950 bis 1984 gegenüber dem vorausgegangenen Zeitraum von 1870 bis 1950 nahezu auf im Mittel 1,5m/Jahr verdoppelt hat. Dies entspricht einem Verlust von etwa 1,4 Mio. m³/Jahr (einschl. Hörnum-Odde), der den künftigen Planungen für die Sandvorspülungen zugrunde gelegt wurde.

Es bestand Einvernehmen, dass eine Extrapolation der vorgenannten Abbruchraten als Grundlage für die künftigen Aufspülmengen nur unter hypothetischen Annahmen zur künftigen Sturmflutentwicklung vorgenommen werden konnte. Im Jahre 1985 waren keine Anzeichen dafür vorhanden, dass die erhöhte Sturmflutintensität der letzten 35 Jahre (1950 – 1985) nachlassen würde, eher konnte sogar das Gegenteil vermutet werden. Es wurde daher für die künftige Planung der Sandaufspülungen die sinnvolle Annahme getroffen, daß sich das Sturmflutgeschehen der nächsten 35 Jahre (bis 2020) in gleichem Ausmaß fortsetzen würde. Dazu wurde im Fachplan angemerkt, daß die tatsächliche Sturmflutentwicklung alle 10 Jahre zu überprüfen und gegebenenfalls zu aktualisieren sei. Zu diesem Zweck wurde im Jahr 1986 ein Naturmeßprogramm zur kontinuierlichen Erfassung des Seeganges und der Wasserstände im Küstenvorfeld von Sylt begonnen, um verlässliche Meßdaten für Bewertungen zu erhalten.

2 Zielsetzung

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist es, am Beispiel der Insel Sylt auf der Grundlage von unterschiedlichen Meßdaten (Seegang und Wasserstände) über unterschiedlich lange Zeiträume und deren Korrelation das Langzeitwellenklima im Seegebiet vor Sylt (1950 – 2000) zu analysieren, um u.a. die Frage zu untersuchen, ob seit 1950 signifikante Veränderungen bzw. Trendentwicklungen hinsichtlich der Sturmfluthäufigkeiten eingetreten sind. Dies betrifft sowohl die Höhen der eingetretenen Sturmflutscheitelwasserstände als auch die Verweilzeiten erhöhter Wasserstände, die zu Dünen- und Kliffabbrüchen führen. Für die Aufgaben im Fachplan „Küstenschutz Sylt“, der 1985 in Kraft gesetzt wurde, konnte im Jahre 2002 für die ersten 17 Jahre (bis 2001) danach die tatsächliche Sturmflutentwicklung den damaligen hypothetischen Annahmen gegenübergestellt werden. Auf dieser Grundlage lassen sich die bisherigen Aufwendungen zum Schutz der Westküste Sylts in Höhe von mehr als 125 Mio. Euro für ein Aufspülvolumen von über 30 Mio. m³ Sand, der bislang aus dem Küstenvorfeld von Sylt entnommen wurde, mit den eingetretenen Zuständen verknüpfen. Dadurch können laufende Planungen aktualisiert werden.

3 Datengrundlage und Analyse

Die Studie basiert auf folgenden Meßdaten, die am Leichtweiss-Institut analysiert wurden:

1. Kontinuierliche **Seegangsdaten** von einer Richtungswellenmeßboje, die rd. 6,5km vor der Küste von Sylt in 15m Wassertiefe ausgelegt ist. Verfügbare Daten über den Zeitraum von 15 Jahren von 1986 bis 2000 (ca. 13.000 Einzelwerte) Meßzyklus: 4 Stunden bei normalen Bedingungen, 1 Stunde bei Sturmfluten. Datenquelle: ALR Husum
2. Stündliche **Windmessungen** der Station List seit 1950. (Datenquelle:ALR Husum) sowie aus historischen Quellen Winddaten zu Sturmfluten vor 1950
3. Tide- und Sturmflutwasserstände am Pegel List (Datenquelle:ALR Husum)

4. Verweilzeiten aller Sturmfluten (Datenquelle:ALR Husum) mit Scheitelwasserständen über 700cmPN – 5m NN (MThw +1,2m).

Gleichzeitige Wellen- und Windmessungen über den mittelfristigen Zeitraum von 1986 bis 2000 bildeten die Grundlage für die Untersuchung von Korrelationen zwischen Seegangs- und Windparametern unter Zugrundelegung einer Phasenverschiebung von 3 Stunden zwischen beiden Parametern. Die Untersuchungen ergaben Korrelationskoeffizienten von $r = 0,91$ bis $r = 0,95$ (Dette, 2001), die Ergebnisse werden für Ingenieuranwendungen als zufriedenstellend angesehen. Mit den vorhandenen stündlichen Winddaten (Windgeschwindigkeit und Richtung) wurde danach über Korrelation für den längerfristigen Zeitraum von 50 Jahren (1950 – 2000) eine synthetische Datenbank von stündlichen Seegangparametern (signifikante Wellenhöhe und mittlere Wellenanlaufrichtung) generiert.

Am Beispiel der mittleren jährlichen Wellenanlaufrichtungen im Zeitraum 1986 – 2001 zeigt Abb. 1 die Ergebnisse der Untersuchungen für unterschiedliche Datenkollektive: alle Meßdaten (mit Datenlücken), alle Meßdaten und Lücken aufgefüllt mit synthetischen Daten (teilsynthetischer Datensatz), sowie vollsynthetische Daten. Die Abweichungen zwischen den Datensätzen erreichen die Größenordnung von $\pm 1^\circ$, die z.B. für Betrachtung zur Richtung des resultierenden jährlichen Energieflusses in die Brandungszone als Haupteinflußparameter für den Küstenlängstransport (vgl. z.B. Dette, 2004) als unbedeutend eingestuft werden kann. Der zeitliche Verlauf der mittleren Anlaufrichtung des Seeganges deutet trendmäßig an, daß sich diese von 285° in Richtung 275° verschiebt. Eine Änderung in dieser Größenordnung wäre beachtlich und würde bei Anhalten dieses Trends in den Folgejahren, z.B. den Küstenlängstransport an der Westküste Sylts beeinflussen. Dies bezieht sich insbesondere auf den Küstenlängstranport, der nach Norden und Süden zu den Inselenden gerichtet ist. Eine derartige Trendentwicklung ist hinsichtlich künftiger Küstenschutzplanungen aufmerksam zu verfolgen.

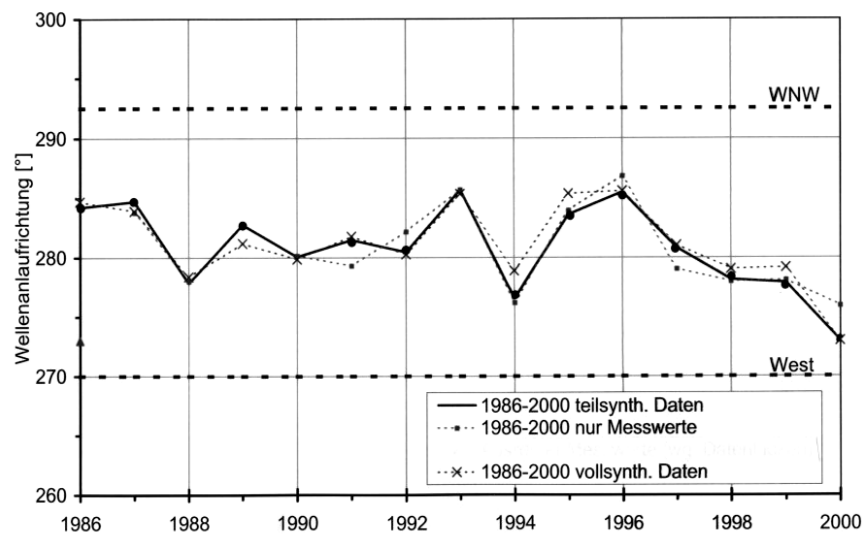


Abb. 1: Resultierende jährliche Anlaufrichtung des Seeganges vor Sylt aufgrund verschiedener Datensätze (Meß- und Korrelationszeitraum 1986 – 2000)

Über die Datenbank für den Seegang hinaus konnte den im Zeitraum von 1900 bis 1950 aufgezeichneten Sturmflutverläufen (Wasserstände), die zugehörigen Wellenparameter (synthetisch) zugeordnet werden. Hierzu wurde auf Winddaten aus historischen Quellen zurückgegriffen.

4 Anwendung der Korrelationen auf Sturmfluten

Die Sturmflut vom 25./26. Januar 1990 ist ein geeignetes Beispiel, um die Vertrauenswürdigkeit des „hindcasting“ mit synthetischen Daten zur Ergänzung von Wasserstandsreihen (z.B. Sturmfluten) zu veranschaulichen. Auf diese Weise können die Wasserstandsverläufe aus früheren Zeiträumen ohne entsprechende Meßdaten um die Seegangsinformation Zeiträumen ohne ergänzt werden. Nach dem Ausfall der Wellenmeßboje vor Sylt, noch vor Eintritt des Sturmflutscheitelwasserstandes am 26. Januar, wurde die danach fehlende Seegangsinformation durch synthetische Daten ergänzt. Der Ablauf der Sturmflut mit stündlichen Angaben zu Wasserstand, Wellenhöhe H_{m0} , Wellenperioden T_p und T_m sowie zur Wellenanlaufichtung) ist auf Abb.2 mit der zusätzlichen Kennzeichnung von Meß-

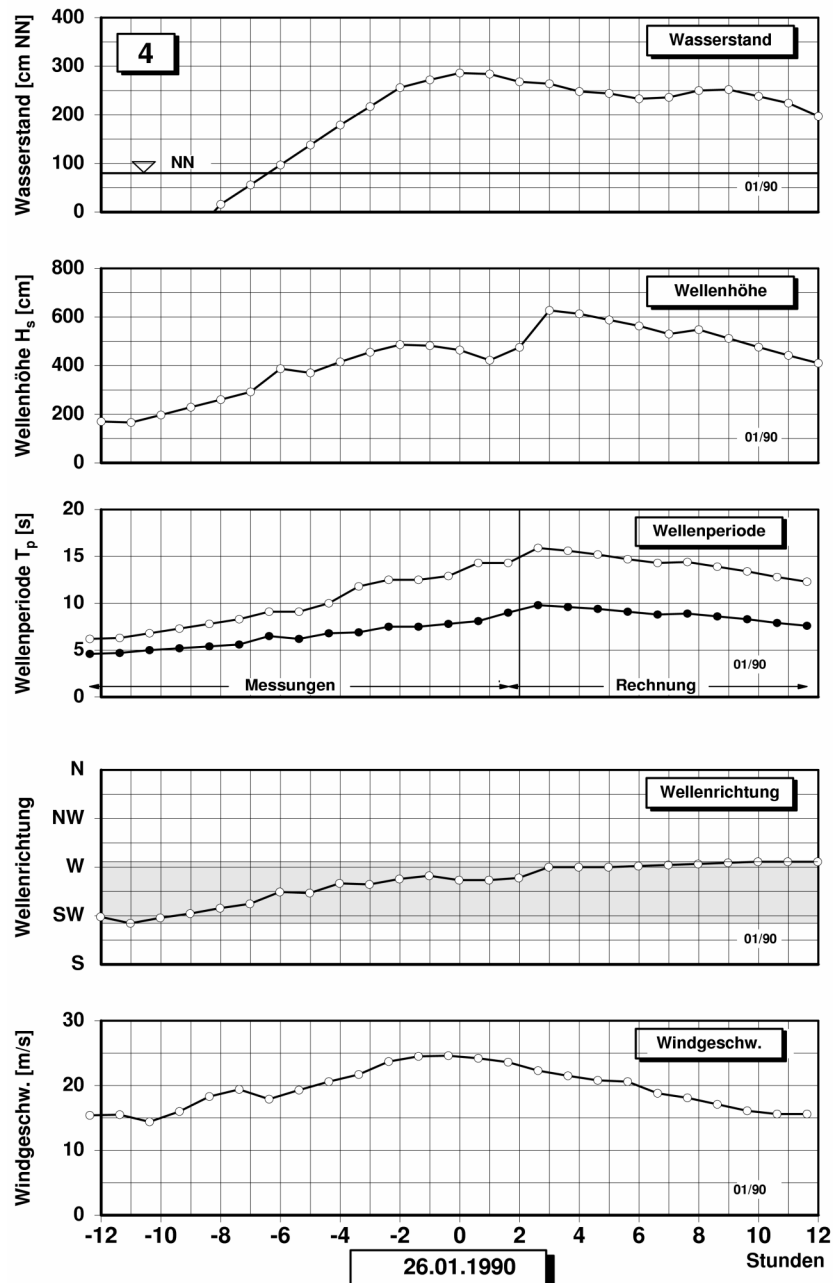


Abb. 2: Verlauf der Sturmflut vom 25./26. Januar 1990 (24 Stunden): Wasserstand am Pegel List und zugehörige Wellenkennwerte (Meß- und Korrelationswerte nach Ausfall der Messungen)

und Korrelationszeitraum (synthetische Daten) dargestellt. Auch die Gegenüberstellung von Meß- und synthetischen Daten (Wellenhöhe H_{m0} und Wellenanlaufichtung) über den Zeitraum eines Monats, hier Januar 1990 bis zum Ausfall der Meßboje (Abb. 3) zeigt, daß die angewandte Korrelationsmethode für Ingenieuranwendungen ausreichende Übereinstimmungen liefert. Aufgrund dieser Darstellungen wird den im Folgenden herangezogenen synthetischen Seegangsdaten die entsprechende Aussagekraft zugeordnet.

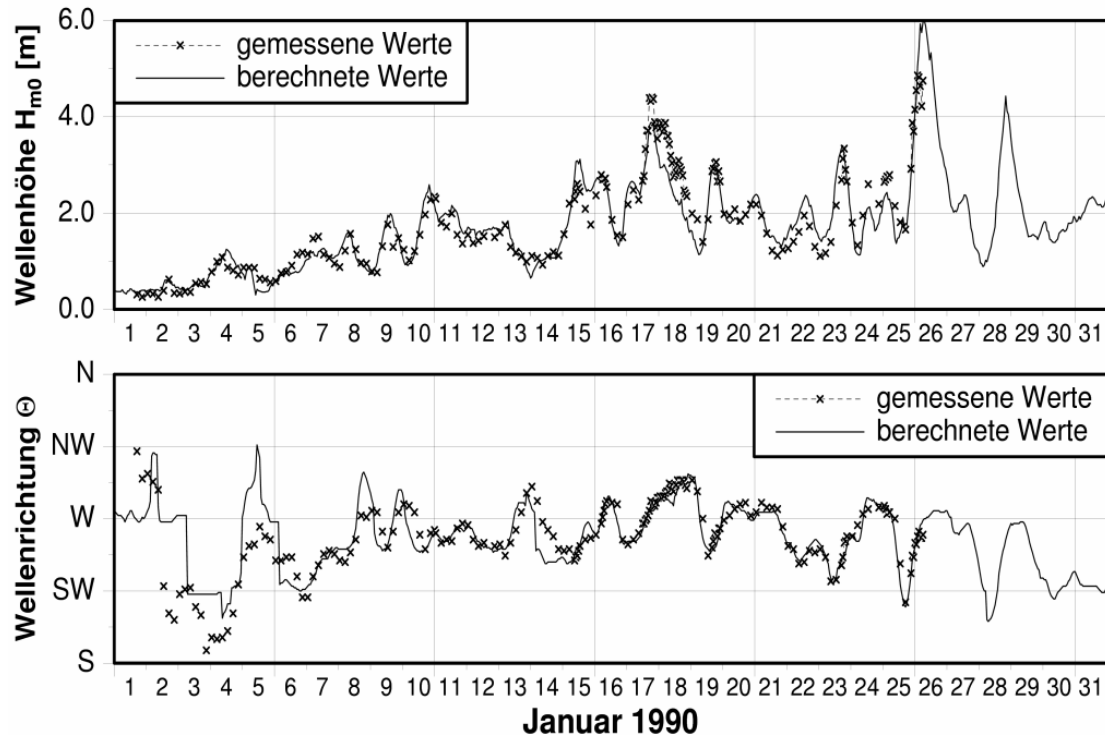


Abb. 3: Gegenüberstellung der Zeitreihen (Kennwerte) des Seeganges vor Sylt im Monat Januar 1990

5 Häufigkeit und Verweilzeiten von Sturmfluten im 20. Jahrhundert

Für die Betrachtung von küstenmorphologischen Vorgängen ist nicht allein die Höhe der Sturmfluten sondern auch deren Häufigkeit von großer Bedeutung. Als Maß für die Häufigkeit von Sturmfluten, z.B. innerhalb eines Jahres, können die Verweilzeiten der Wasserstände der aufgetretenen Sturmfluten oberhalb eines Schwellenwertes, bei denen mit Dünenabbrüchen zu rechnen ist, angesehen werden (vgl. z.B. Dette und Führböter, 1992).

Alle Sturmfluten, die im 20. Jahrhundert (1900 – 2000) den Schwellenwert von NN +2,0m (MThw +1,2m) am Pegel List überschritten haben, sind in Abb. 4 aufgetragen. Die höchste Sturmflut ist am 24. November 1981 mit einem Scheitelwasserstand von 405cmNN (MThw +3,25m) aufgetreten, gefolgt von der am 3. Januar 1976 (394cmNN). Um die Frage einer Zunahme der Sturmfluten (Höhe und Anzahl/Jahr), z.B. nach 1985, zu beantworten, wird hier der Horizont von MThw +2,0m (280cmNN) gewählt. Dieser Schwellenwert wurde im Zeitraum 1900 – 1950 von 6 Sturmfluten und im Zeitraum 1950 – 1984 von 14 Sturmfluten überschritten. Im Prognosezeitraum für den Küstenschutz Sylt (bis 2020) sind über den Zeitraum von „nur“ 17 Jahren (1985 – 2001) bereits 13 Sturmfluten zu verzeichnen, so daß eine nochmalige Steigerung (bis 2020) der Sturmfluthäufigkeit (Anzahl) gegenüber der Annahme im Jahre 1985 zu erwarten sein wird. Der bisher höchste Scheitelwasserstand wurde hingegen nach 1985 nicht mehr übertroffen.

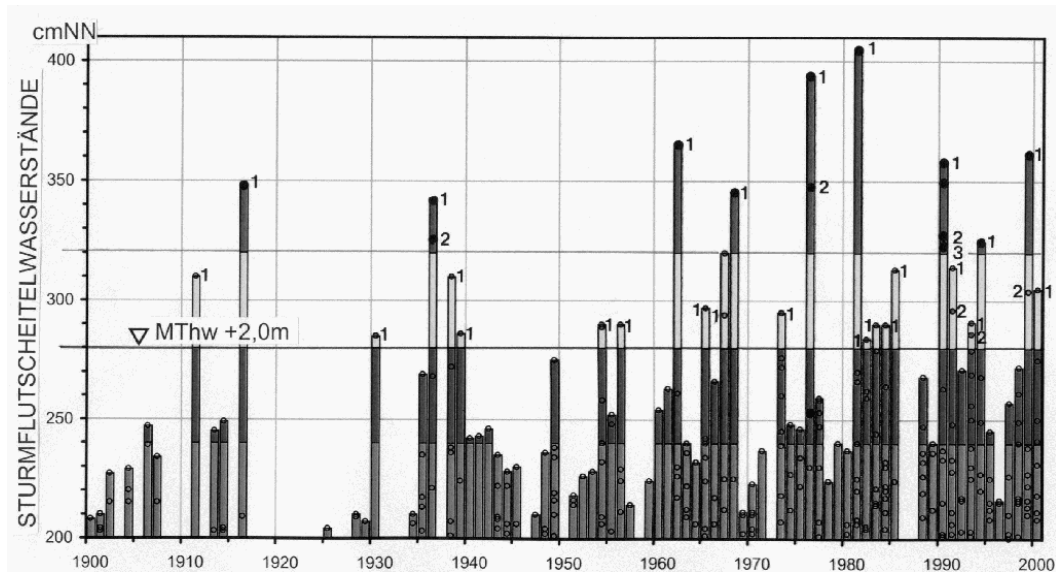


Abb. 4: Jährliche Anzahl von Sturmfluten über MThw +1,2m am Pegel List von 1900 – 2000 mit Kennzeichnung der Sturmfluten über MThw +2,0m (Daten: ALR Husum)

Die jährlichen Verweilzeiten am Pegel List im Zeitraum 1900 bis 2001 veranschaulicht Abb.5. Wenn hierzu als Indikatorhorizont für die Frage von Veränderungen der Schwellenwert von 25 Stunden gewählt wird, zeigt sich, daß dieser in den ersten 50 Jahren des Jahrhunderts nur im Jahre 1936 (30 Stunden) überschritten wurde, im nachfolgenden Zeitraum von 1950 bis 1984 (35 Jahre) bereits innerhalb von 8 Jahren und bei Halbzeit des Prognosezeitraumes (1985 bis 2001) bereits innerhalb von 6 Jahren. Die höchste Verweilzeit erreichte im Jahre 1990 den Wert von 70 Stunden, gefolgt von den Sturmfluten im Jahre 1976. mit 50 Stunden.

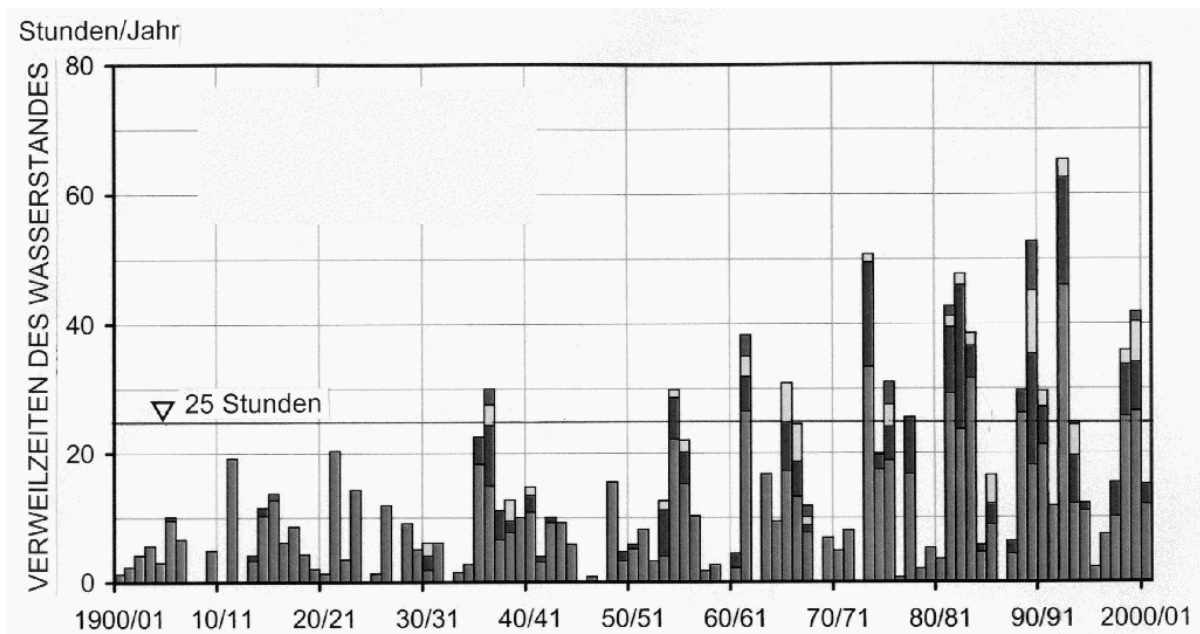


Abb. 5: Jährliche Verweilzeiten von Sturmflutwasserständen über MThw +1,2m am Pegel List von 1900 – 2000 mit Kennzeichnung des Indikatorhorizontes von 25 Stunden im Jahr

Aus den Ergebnissen läßt sich für die erste Hälfte des Prognosezeitraumes für die Planungen im Rahmen des Fachplanes Küstenschutz Sylt folgern, daß sich die seit 1950 beobachtete Zunahme der Sturmfluten (Anzahl und Verweilzeiten) über das 1985 hinaus nicht nur in gleichem Umfang fortgesetzt hat sondern eine weitere Steigerung zu erwarten sein wird.

Diese Entwicklungen veranschaulichen die beachtlichen Erhöhungen der mittleren jährlichen Verweilzeiten für charakteristische Zeiträume von 1900 -2000 auf Abb. 6. In der ersten Hälfte des Jahrhunderts bis 1960 erreichte der Mittelwert 7,3 Stunden/Jahr. Danach erfolgte eine Zunahme auf 14,5 Stunden/ Jahr im Zeitraum von 1960 bis 1980, gefolgt von einer nochmaligen Steigerung auf 24,5 Stunden/Jahr bis zum Ende des Jahrhunderts.

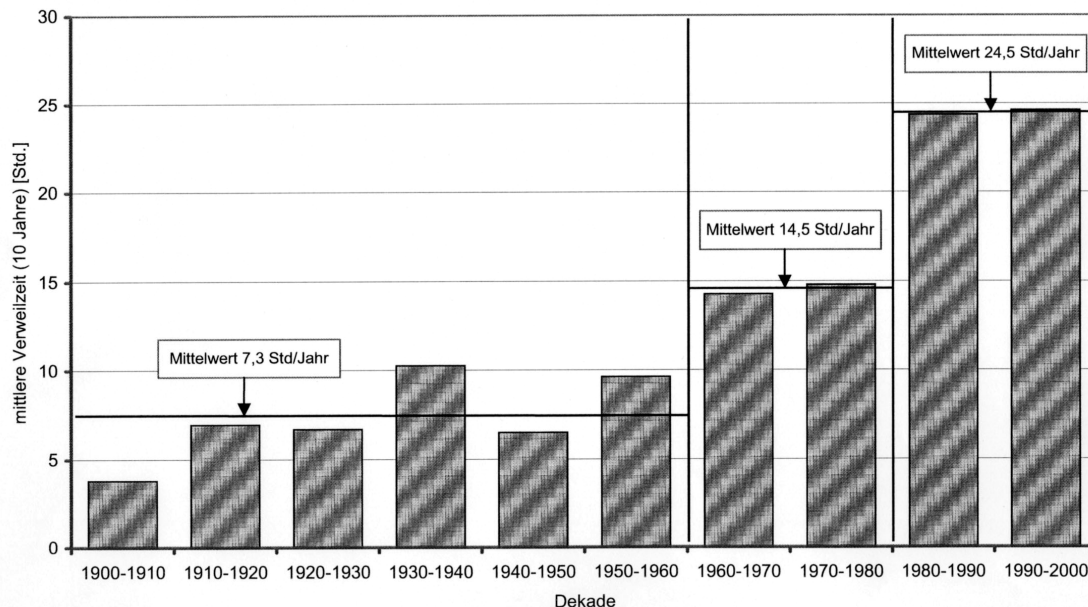


Abb. 6: Mittlere jährliche Verweilzeiten des Wasserstandes über MThw +1,2m am Pegel List über charakteristische Zeiträume im 20. Jahrhundert

6 Seegangserzeugter Energiefluß an der Westküste Sylts

Erhöhte Wasserstände sind an der Westküste Sylts stets auch mit hohen Wellenenergien verbunden. Bei derartigen Verhältnissen herrscht überwiegend der Küstenquertransport vor, durch den Sand aus dem hohen Strand in die Strandbrandungszone umgelagert wird. Der dort für normale Wetterlagen überschüssige Sand wird anschließend durch den alltäglich vorherrschenden Küstenlängstransport zu den Inselenden verfrachtet.

Die Energie, die durch den Seegang an die Küste gelangt, kann durch den Energiefluß als eine Vektorgröße, d.h. durch die Verknüpfung von Größenordnung und Anlaufrichtung beschrieben werden (Führböter und Dette, 1992). Der mittlere jährliche resultierende Energiefluß wurde für den Zeitraum von 1950 bis 2000 nach Größe und Anlaufrichtung aus den stündlichen synthetischen Daten ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, daß der jährliche Energiefluß (Abb.7) betragsmäßig normalerweise in der Größenordnung von 30 000 bis 40 000 kWh/lfd. m schwankt, lediglich die Jahre 1967 (Adolf Bermphol Orkan), 1981 (höchste Sturmflut des J.) und 1990 (höchste Anzahl von Sturmfluten eines Winters) überschreiten als „Ausreißer“ nennenswert den Schwellenwert von 40 000 kWh. Es läßt sich hieraus ableiten, daß sich über den Zeitraum der letzten 50 Jahre der Energiefluß trendmäßig nicht verändert hat.

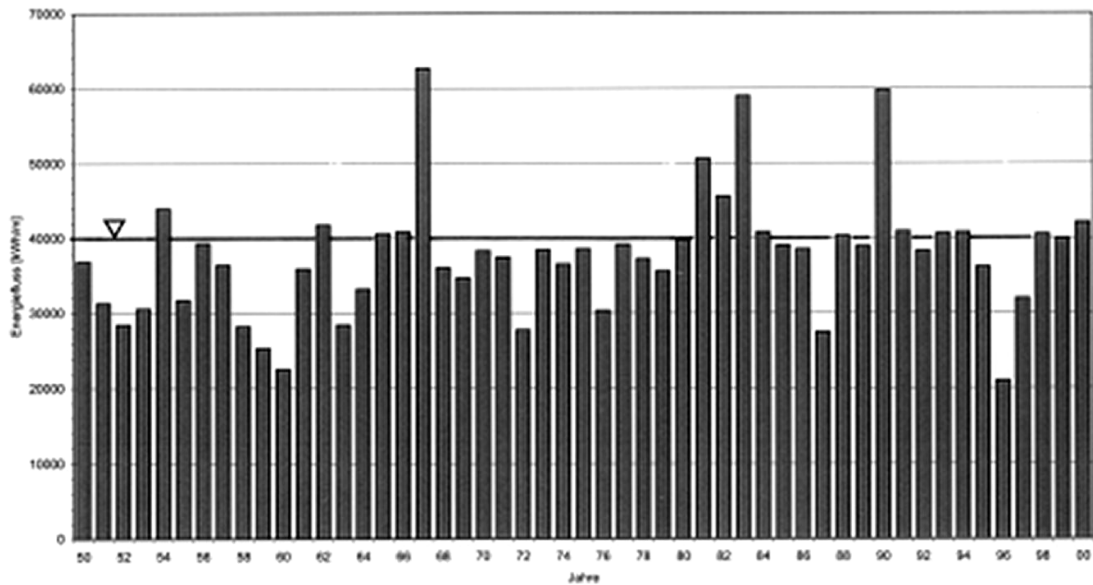


Abb. 7: Resultierender jährlicher Energiefluß (Betrag) in die Brandungszone vor Sylt (hier: Südhälfte) von 1950 – 2000 (Lokation der Meßboje)

Die mittleren jährlichen Wellenanlafrichtungen wurden bereits für den Zeitraum 1986 bis 2000 (Abb. 1) hinsichtlich einer möglichen Trendentwicklung erörtert. Abb. 8 zeigt diese Zeitreihe erweitert um den Zeitraum von 1950 bis 1985. Aus dieser Auftragung ist ersichtlich, daß diese kurze Zeitreihe zu einer Fehlinterpretation geführt hätte. Mit Ausnahme des Jahres 2000 fügen sich die unterschiedlichen Wellenanlafrichtungen (1986 – 2000) in die längerfristige Schwankungsbreite der mittleren Wellenanlafrichtungen (275° bis 289°) ein. Die Entwicklung der Anlafrichtung sollte aufgrund des herausfallenden Wertes für 2000 künftig gezielt untersucht werden.

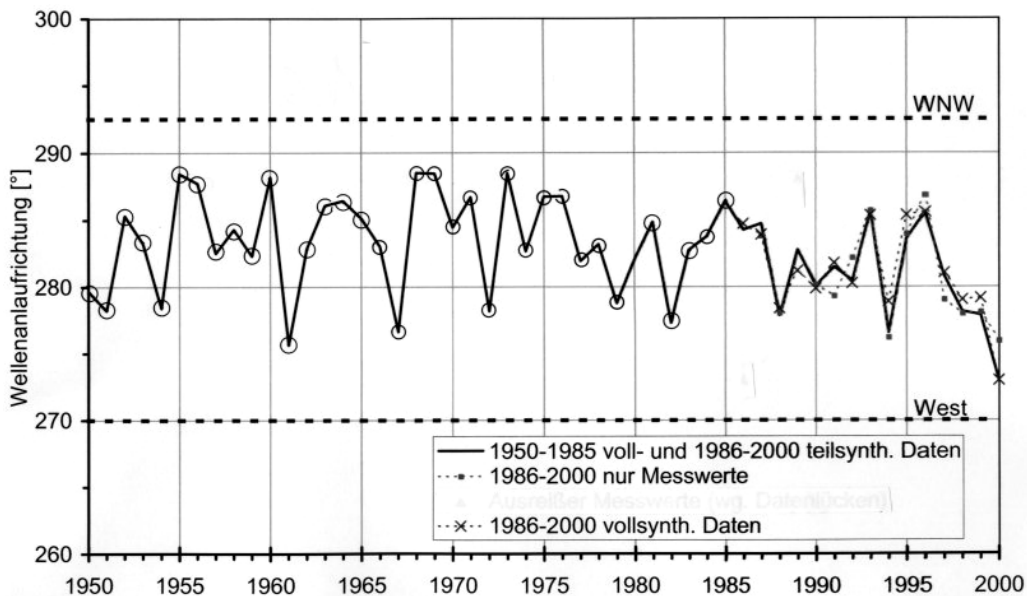


Abb. 8: Resultierende jährliche Anlafrichtung des Seeganges vor Sylt („hindcasting“) im Zeitraum 1950 – 2000

7 Literatur

- DETTE,H.H.: Nearshore Directional Wave Measurements For Regional Coastal Management. Proceedings of the Fourth International Symposium WAVES 2001, ASCE, Vol. I, San Francisco, 2001, pgs. 600-609
- DETTE,H.H.: Sedimenttransport und morphologische Änderungen an der deutschen Nordseeküste. Jahrb. der Hafenbautechnischen Gesellschaft, 54. Band, Hamburg, 2004, S. 69-84
- FÜHRBÖTER,A./DETTE,H.H.: Strandvorspülungen an der Westküste von Sylt. Die Küste, Heft 53, Heide/Holstein, 1992, S. 51-169

Adresse

Dr.-Ing. Hans-Henning Dette
Prof. Dr.-Ing. Hocine Oumeraci
Leichtweiß-Institut für Wasserbau
Beethovenstr. 51a
D-38106 Braunschweig

E-Mail: h.dette@tu-bs.de

Bemessung von Seedeichen

- Gegenwart, Zukunft und Herausforderungen –

Holger Schüttrumpf^{1.)}, Andreas Kortenhaus^{2.)} und Hocine Oumeraci^{2.)}

^{1.)} Bundesanstalt für Wasserbau; ^{2.)} Leichtweiß-Institut für Wasserbau

Summary

The present design of seadikes is based on deterministic methods and is described in an update of the German recommendations for coastal structures (EAK, 2002). Progress was made concerning an accurate description of the wave parameters at the dike toe (numerical wave models) and concerning the description of the hydrodynamic processes at the dike, while an exact description of the individual failure mechanisms is still missing.

Future design methods require the description of the uncertainties of input parameters and models used as well as the consideration of all factors influencing stresses and resistance for all individual failure mechanisms (e.g. overtopping rates and critical overtopping rates, overtopping velocities and geotechnical stability). These steps are required for a probabilistic design approach, which is more and more used in coastal engineering world wide and which is an important part of risk analysis and risk management.

Zusammenfassung

Die gegenwärtige Bemessung von Seedeichen basiert ausschließlich auf deterministischen Methoden und ist in den aktuellen Empfehlungen der EAK 2002 zusammengefasst. Hierbei zeigt sich, dass Fortschritte vor allem in der genaueren Beschreibung der Seegangparameter am Deichfuß (numerische Seegangsmodelle) und der hydrodynamischen Vorgänge am Deich erzielt worden sind, während eine direkte Beschreibung der Versagensmechanismen noch nicht erfolgt bzw. derzeit nicht möglich ist.

Die aktuelle Forschung zeigt, dass zukünftige Verfahren sowohl die Unsicherheiten der Eingangsparameter und der verwendeten Modelle berücksichtigen müssen als auch eine Gegenüberstellung der angreifenden und widerstehenden Kräfte für die verschiedenen Versagensmechanismen erfolgen wird (z.B. vorhandene und zulässige Wellenüberlaufhöhen, Geschwindigkeit des überlaufenden Wassers und bodenmechanische Stabilität). Diese ersten beiden Schritte können den Weg zu einer probabilistischen Herangehensweise bei der Deichbemessung vorbereiten, die weltweit im Küsteningenieurwesen verstärkt Anwendung findet und einen wesentlichen Bestandteil einer Risikoanalyse und eines Risikomanagements darstellt.

1 Einführung

See- und Ästuardeiche schützen seit Jahrhunderten die Norddeutschen Küsten- und Ästuargebiete vor den Sturmfluten der Nord- und Ostsee. Die Entwicklungsgeschichte der Deiche wurde bis heute einerseits durch die Anpassung der Deichgeometrie an die eingetretenen Sturmfluten und die daraus resultierenden Schäden geprägt, andererseits sind Deiche Folgebauten der Landgewinnung fruchtbarer Marschflächen. Heutzutage hat die Hauptdeichlinie in Deutschland eine Länge von ca. 1400 km bei Deichhöhen bis zu 9,10 mNN.

Als Folge der Katastrophensturmfluten in den Niederlanden und in Deutschland in den Jahren 1953, 1962 und 1976 wurde die ursprünglich auf Erfahrungswerten basierende Bemessung von Seedeichen auf eine deterministische Bemessung umgestellt. Grundlage für die deterministische Bemessung sind die Festlegungen in den entsprechenden Gesetzen der Bundesländer:

***Niedersachsen:** Die Höhe der Hauptdeiche ist nach dem zu erwartenden höchsten Tidehochwasser (maßgebender Sturmflutwasserstand) ... zu bestimmen. Hierbei ist der örtliche Wellenauflauf zu berücksichtigen (Niedersächsisches Deichgesetz §4).*

***Schleswig-Holstein:** Die oberste Küstenschutzbehörde bestimmt abschnittsweise die Sollabmessungen (Bestick) (1) für Landesschutzdeiche, entsprechend dem maßgebenden Wasserstand, der maßgebenden Wellenauflaufhöhe und einem Sicherheitsmaß (Landeswassergesetz Schleswig-Holstein §65 (2)).*

Durch diese Gesetze fiel dem Wellenauflauf neben dem maßgebenden Sturmflutwasserstand eine wichtige Rolle bei der Seedeichbemessung zu. Es verwundert somit nicht, dass sich zahlreiche experimentelle Untersuchungen und Naturmessungen mit der Ermittlung der Wellenauflaufhöhe beschäftigten (z.B. Führböter, 1991; Niemeyer et al., 1995). Ziel dieser Untersuchungen war es, die Wellenauflaufhöhe festzulegen, die nur noch von 2% bzw. 3% aller auf den Deich zulaufenden Wellen überschritten wird. Aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren auf die Deichbemessung waren nicht nur die Parameter Wellenhöhe, Wellenperiode und Deichneigung Gegenstand intensiver Untersuchungen, sondern auch der Einfluss der Böschungsrauhheit (Schulz, 1992), der Wellenangriffsrichtung (Möller et al., 2001) und des Bermeneinflusses (Ohle et al., 2003). Zeitgleich wurden in den Niederlanden ähnliche Untersuchungen zum Wellenauflauf durchgeführt, die z.B. von Van der Meer et al. (1998) bzw. Van Gent (2002) umfassend beschrieben wurden. Aufgrund der Festlegung einer Wellenauflaufhöhe mit einer 2% bzw. 3% Überlaufwahrscheinlichkeit als Bemessungswert wurden bereits 1981 von Tautenhain erste Untersuchungen zum Wellenüberlauf mit dem Ziel der Ermittlung einer mittleren Wellenüberlauftrate durchgeführt. Weitere Untersuchungen zum Wellenüberlauf an Seedeichen wurden später überwiegend durch Van der Meer (1998) für niederländische Seedeiche mit etwas steilerer Außenböschung als in Deutschland veröffentlicht. In den EAK (2002) wurden die relevanten Untersuchungen zu Wellenauflaufhöhen und Wellenüberlauftraten als Grundlage für eine deterministische Bemessung von Seedeichen zusammengestellt.

In den letzten Jahren hat ein Umdenken bei den Forschungsschwerpunkten zum Thema Deichbemessung begonnen. Angesichts der Unsicherheiten bei der Vorhersage der regionalen Folgen von Klimaänderungen sowie aufgrund der Stochastik der vielfältigen Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen wird es bei allem Fortschritt auch in der Zukunft keine sicheren Prognosen und keine absolute Sicherheit gegen Sturmfluten geben. Auch wenn es gelingt, die für die Bemessung relevanten extremen Sturmflutwasserstände besser zu erfassen, so wird es niemals auszuschließen sein, dass diese Bemessungsereignisse innerhalb der Lebensdauer des Bauwerkes überschritten werden. Damit ist die Frage nach der höchsten Sturmflut und ausreichender Kronenhöhe nicht mehr so relevant gegenüber der Frage nach dem Bau von Schutzwerken, die gegen Wellenbelastung bruchstabil sind. Das heißt, die Gewährleistung einer schadlosen Abführung des auf- und überlaufenden Wassers wird zur prioritären Aufgabe bei der Planung neuer und der Sicherung bestehender Seedeiche. Um jedoch die Erosionsgefährdung und Infiltrationsgefährdung der Deichböschungen durch Wellenauflauf und Wellenüberlauf abschätzen und Gegenmaßnahmen planen und optimieren zu können, reicht die Kenntnis der mittleren Wellenüberlauftraten und von Wellenauflaufhöhen mit vorgegebener Überschreitungswahrscheinlichkeit, wie sie durch die bisherigen Berechnungsansätze in den EAK (2002) bestimmt werden, nicht aus. Vielmehr sind weitere Strömungsgrößen wie die Geschwindigkeiten und die Schichtdicken des Auf- und Überlaufschwalls erforderlich, um die maßgebenden Versagensformen und -mechanismen beschreiben und prognostizieren zu können.

Daher sollte eine zukünftige Bemessung einerseits versagensorientiert sein, d.h. die maßgebenden Versagensformen und -mechanismen und die wirkenden hydrodynamischen und bodenmechanischen Prozesse berücksichtigen, andererseits muss eine zukünftige Bemessung die Unsicherheiten der Eingangsparameter und Modelle berücksichtigen, was z.B. durch eine probabilistische Bemessung gewährleistet werden kann. Erste Grundlagen für eine probabilistische Bemessung auf der Grundlage der Versagensmechanismen und der wirkenden hydrodynamischen und bodenmechanischen Prozesse werden im Folgenden dargestellt.

2 Versagensformen und -mechanismen von Seedeichen

Die Beschreibung der Versagensmechanismen sowie der Morphologie von Deichschäden stellt eine wesentliche Grundlage für die Wirkung der hydraulischen Prozesse des Wellenaufbaus und Wellenüberlaufs auf Deichaußenböschung, Deichkrone und Deichbinnenböschung sowie der Interaktion mit dem Boden dar. Nur wenn die Versagensmechanismen und die damit verbundenen Prozesse bekannt sind, können Grenzzustandsgleichungen aus Belastung und Widerstand ermittelt und aufgestellt werden. Daher sollen im folgenden die wesentlichen Einflussfaktoren auf Belastung und Widerstand und die daraus resultierenden Versagensformen beschrieben werden.

Ursache von Deichschäden ist die Wirkung verschiedener Deichbelastungen einzeln bzw. in zeitlicher oder räumlicher Wechselwirkung mit dem Deich (Abb. 1). Zu einem Schaden kommt es, wenn der Widerstand des Deiches geringer als die Belastung ist. Der Widerstand hängt in diesem Zusammenhang von verschiedenen Einflussfaktoren ab, die in Abb. 1 zusammengestellt sind. Ort und Zeitpunkt der Initiation eines Deichschadens werden weiterhin durch (a) lokale Schwachstellen im Deich und (b) einen vorgeschwächten Deich begünstigt. Beide Aspekte sind insbesondere in Hinblick auf eine probabilistische Bemessung zu berücksichtigen, da die Wahrscheinlichkeit eines Versagens deutlich erhöht wird.

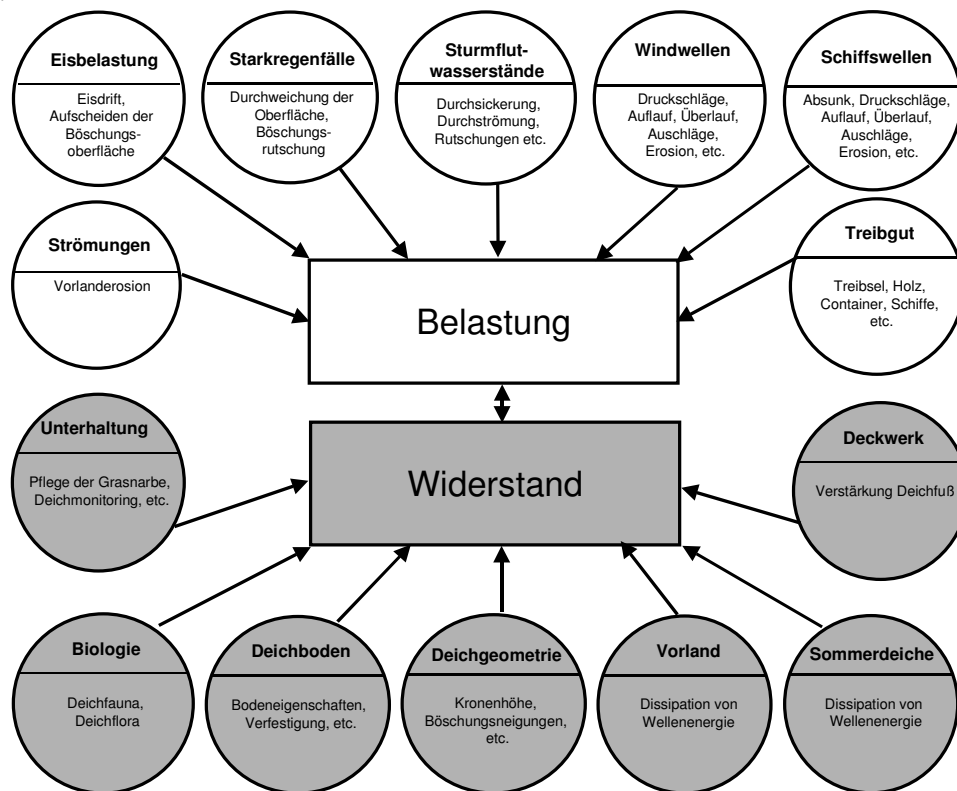


Abb. 1: Einflussfaktoren auf die Belastung und Belastbarkeit von See- und Ästuardeichen

Die meisten Deichschäden bzw. Deichbrüche im Zusammenhang mit den Sturmfluten von 1953, 1962 und 1976 sind infolge Wellenauflauf- bzw. Wellenüberlaufbelastung an vorgeschwächten Deichen aufgetreten (Schütterumpf u. Oumeraci, 2002). Daher stellen Versagensformen als Folge von Windwellen den Schwerpunkt von Deichschäden dar. Vorschädigungen infolge von Starkregenfällen, Treibeis, Treibgut, etc. begünstigen die Initiation eines Deichschaden und waren in der Vergangenheit ebenfalls in Verbindung mit Sturmfluten für Deichschäden und Deichbrüche verantwortlich. Daher finden sich in der Vergangenheit z.B. viele Eisfluten (z.B. 1625, 1718, 1757, 1789, 1940, 1947) (Petersen u. Rhode, 1991), die zwar niedrige Sturmflutscheitelhöhen hatten, aber auf einen durch Eis vorgeschädigten Deich trafen.

Versagensformen infolge Wellenbelastung werden unterschieden in Schäden an der Deichaußenböschung, an der Deichkrone und Deichbinnenböschung sowie in Deichbrüche. Letztere können sowohl infolge einer Schädigung der Deichaußenböschung als auch der Deichbinnenböschung auftreten. Initiiert werden Deichschäden durch die Wellenbelastung des auf- und überlaufenden Wassers, das zu einer Erosion und Infiltration der Deichböschung führt. Beide Vorgänge schwächen die Deichböschung, so dass weitere morphologische Prozesse stattfinden können. Bei gut durchwurzelt Böschungen ist der Einfluss der Erosion jedoch niedriger als der Einfluss der Infiltration, während bei neuen Seedeichen ohne Grasbewuchs die Erosion zu einer starken Bildung von Erosionsrinnen führt, wie Modellversuche im Großen Wellenkanal (Hannover) gezeigt haben (Möller et al., 2002). Erosion und Infiltration führen zu den Versagensformen, die in Abb. 2 am Beispiel der Deichbinnenböschung illustriert sind.

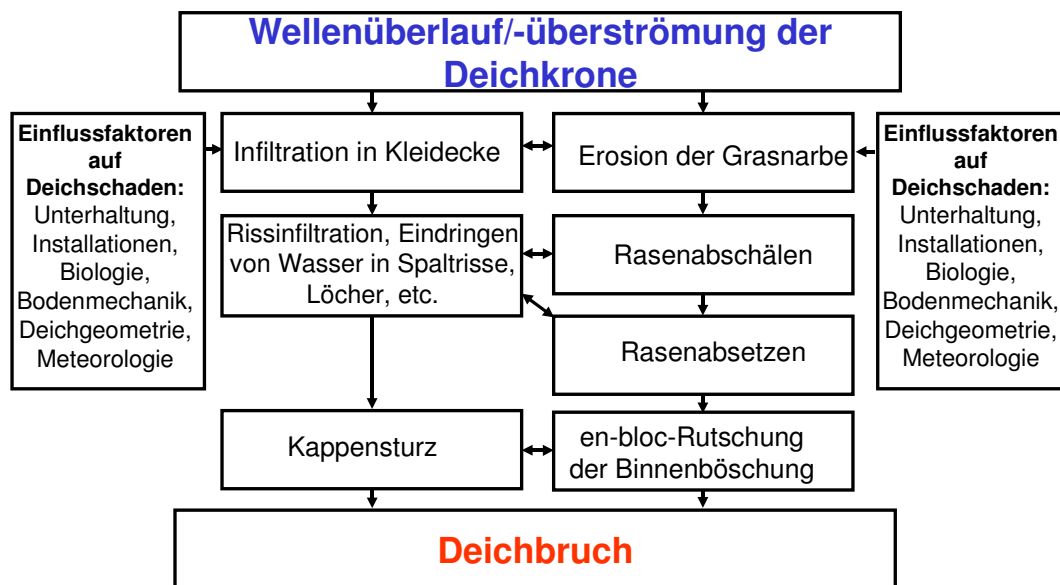


Abb. 2: Versagensformen auf der Deichbinnenböschung infolge Wellenüberlauf

Damit stellt die Beschreibung der Erosions- und Infiltrationsprozesse an und in der Kleiabdeckung eine zentrale Aufgabe für eine versagens- und prozessorientierte Bemessung dar. Hierfür sind einerseits die hydrodynamischen Randbedingungen infolge der Wellenauflauf- und Wellenüberlaufströmung zu ermitteln und andererseits die Prozesse in Deichabdeckung und Deichkern zu beschreiben.

3 Wellenauflauf- und Wellenüberlaufströmung an Seedeichen

Grundlage für eine versagens- und prozessorientierte Bemessung von Seedeichen ist die Kenntnis der hydraulischen und bodenmechanischen Prozesse sowie deren Wechselwirkungen. Im Folgenden soll

die Wellenauflauf- und Wellenüberlaufströmung als Randbedingung für die Erosion und Infiltration des auf- und überlaufenden Wassers in die Deichabdeckung auf der Grundlage der experimentellen und theoretischen Untersuchungen von Schüttrumpf (2001) beschrieben werden.

Eine auf einen Deich zulaufende Welle bricht auf der Deichaußenböschung als Schwall-, Sturz- oder Reflexionsbrecher. Die gebrochene Welle erzeugt einen instationären Auflaufschwall, der auf der Deichaußenböschung aufläuft. Der Auflaufschwall nimmt mit zunehmender Wellenauflaufhöhe bis auf Null zur maximalen Wellenauflaufhöhe ab. Der Auflaufschwall belastet die Deichaußenböschung zwischen Auftreffpunkt der brechenden Welle und maximaler Wellenauflaufhöhe. Diese Belastung kann durch die instationären Schichtdicken und Strömungsgeschwindigkeiten des Auflaufschwalls beschrieben werden. Ansätze zur Ermittlung dieser instationären Schichtdicken und Strömungsgeschwindigkeiten sind in Abb. 5 für Schwall-, Sturz- und Reflexionsbrecher zu finden.

Ist die Kronenhöhe niedriger als die maximale Wellenauflaufhöhe, so kommt es zum Wellenüberlauf und Wasser läuft über die Deichkrone auf die Deichbinnenböschung. Der Auflaufschwall trennt sich in zwei Strömungsfelder. Das Wasser, das beim Wellenauflauf diesen Punkt überschreitet, fließt überwiegend als Wellenüberlauf auf Deichkrone und Deichbinnenböschung ab. Das im Wellenauflauf verbleibende Wasser fließt als Wellenablauf zurück. Visuell kann auch beobachtet werden, dass eine geringe Wassermenge von der Deichkrone zurück auf die Deichaußenböschung fließt. Auf der Deichkrone nehmen die Schichtdicken und Überlaufgeschwindigkeiten vom seeseitigen zum landseitigen Ende der Deichkrone ab. Die Abnahme der Schichtdicke hängt mit der Deformation des Überlaufschwalls auf der Deichkrone zusammen. Während am seeseitigen Ende der Deichkrone ein Teil des Wassers wieder auf der Deichaußenböschung abläuft, fließt der verbleibende Teil als Wellenüberlauf über die Deichkrone. Die Schichtdicke der Überlaufzunge wird auf der Deichkrone immer dünner, da es sich um keine stationäre Strömung handelt, sondern um ein begrenztes Wasservolumen, das über die Deichkrone läuft und sich dabei auseinanderzieht. Eine Analogie zur Dammbrechwelle verdeutlicht diesen Vorgang. Auch die Stärke der Front der Dammbrechwelle nimmt mit zunehmender Entfernung zur Bruchstelle ab. Daher ist die Schichtdicke am seeseitigen Ende der Deichkrone höher als am landseitigen Ende der Deichkrone. Die Überlaufgeschwindigkeiten nehmen auf der Deichkrone infolge Sohlsreibung ab. Einflussfaktoren auf die Evolution der Schichtdicken und Überlaufgeschwindigkeiten auf der Deichkrone sind somit die Breite der Deichkrone und die Rauheit der Deichkrone. Eine theoretische Herleitung der Überlaufgeschwindigkeiten und Schichtdicken auf der Deichkrone und deren experimentelle Verifikation sind bei Schüttrumpf (2001) bzw. in Abb. 5 dargestellt.

Am landseitigen Ende der Deichkrone läuft der Überlaufschwall auf die Deichbinnenböschung. Auf der Deichbinnenböschung wird die Überlaufströmung durch die Gravitation beschleunigt. Der Beschleunigung der Überlaufströmung wirkt die Bodenreibung entgegen, so dass Überlaufgeschwindigkeiten und Schichtdicken sich asymptotisch Grenzwerten nähern. Aufgrund des Erhaltungssatzes der Masse nehmen die Überlaufgeschwindigkeiten auf der Deichbinnenböschung zu und die Schichtdicken mit zunehmender Entfernung von der Deichkrone ab. Ein weiterer Einflussfaktor auf die Überlaufströmung auf der Deichbinnenböschung ist die Neigung der Deichbinnenböschung. In Abb. 3 ist dargestellt, dass die Überlaufgeschwindigkeiten auf der Deichbinnenböschung mit zunehmender Neigung zu- und die Schichtdicken mit zunehmender Neigung abnehmen. Dies bedeutet weiterhin, dass die Infiltration am oberen Ende der Deichbinnenböschung größer als am unteren Ende der Deichbinnenböschung ist, während die Erosion mit zunehmender Entfernung von der Deichkrone zunimmt. Dies steht in guter Übereinstimmung mit den Schadensanalysen, die eine Initiation des Deichversagens am oberen Ende der Deichbinnenböschung als Rasenabsetzen zeigen. Theoretisch wurde die Überlaufströmung auf der Deichbinnenböschung durch Schüttrumpf (2001) hergeleitet sowie experimentell verifiziert und durch Van Gent (2002) experimentell bestätigt.

Der Einfluss des Parameter Neigung der Binnenböschung (1:m) auf die Geschwindigkeiten und Schichtdicken des Wellenüberlaufs sind in Abb. 3 beispielhaft dargestellt. Sind die Wellenparameter

am Deichfuß sowie die Deichgeometrie bekannt, so können die Parameter des Auf- und Überlaufschwells auf Deichaußenböschung, Deichkrone und Deichbinnenböschung vollständig berechnet werden.

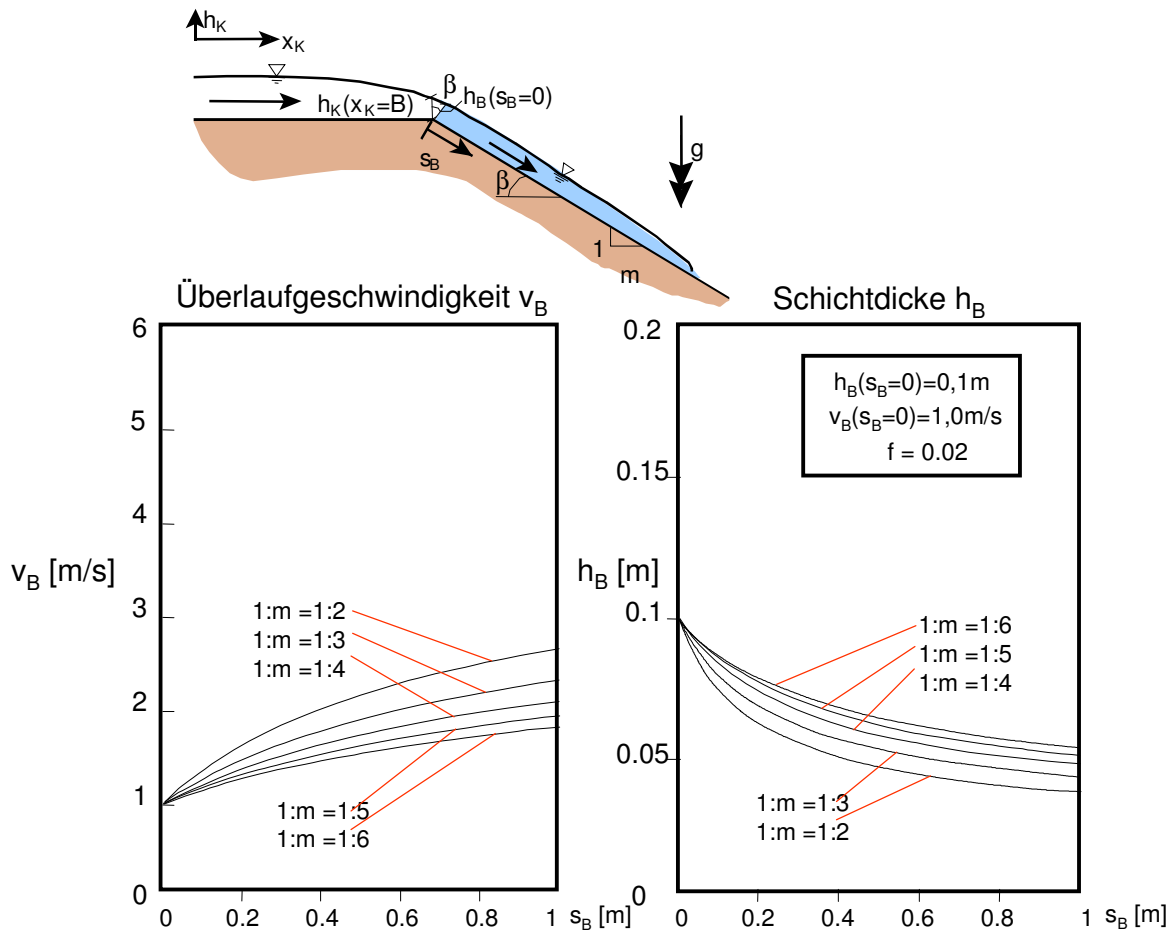


Abb. 3: Ermittlung der Schichtdicken und Überlaufgeschwindigkeiten auf der Deichbinnenböschung (Schütterpf, 2001)

4 Probabilistische Bemessung von Seedeichen

Wie bereits in den vorherigen Abschnitten dargelegt, berücksichtigt die herkömmliche Bemessungsphilosophie weder die verschiedenen Versagensformen und Versagensmechanismen, noch die Unsicherheiten in den Eingangsparametern und deterministischen Modellen. Daher ist z.B. eine probabilistische Bemessung von Seedeichen mit dem Ziel der Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit eines Deichquerschnitts und des gesamten Schutzsystems erforderlich, um einerseits die Schwächen der herkömmlichen Bemessungsphilosophie zu vermeiden und andererseits auch die Grundlagen für eine Risikoanalyse von Seedeichen zu schaffen (Abb. 4). Grundlage für eine derartige probabilistische Bemessung von Seedeichen ist einerseits die Erfassung der zahlreichen Versagensmechanismen in der Form von Grenzzustandsgleichungen, deren Wechselwirkungen auf der Grundlage einer Fehlerbaumanalyse sowie die Berücksichtigung der Unsicherheiten der Eingangsparameter und Modelle. Kortenhaus (2003) weist am Beispiel von Seedeichen die Anwendbarkeit einer probabilistischen Bemessung auf Seedeiche nach. Dazu erfasst Kortenhaus (2003) auf der Grundlage einer Schrifttumsanalyse insgesamt 25 Versagensmechanismen durch vorhandene bzw. neu entwickelte Grenzzustandsgleichungen.

gen. Die Analyse der Versagensmechanismen macht deutlich, dass (i) die zeitliche und räumliche Abfolge und Wechselwirkung der verschiedenen Versagensmechanismen noch unzureichend erfasst und (ii) zahlreiche Versagensmechanismen noch unzureichend durch Grenzzustandsgleichungen beschrieben sind, da Verifikationen (Modellversuche, Naturmessungen) fehlen. Für alle 25 Grenzzustandsgleichungen und 87 Eingangsparameter wurden die Unsicherheiten ermittelt. Die Ermittlung der Unsicherheiten auf der Grundlage einer Schrifftumsanalyse hat z.T. widersprüchliche bzw. fehlende Informationen gezeigt. Daher waren Abschätzungen der Unsicherheiten durch Angabe von Standardabweichungen erforderlich. Unter Verwendung der ermittelten Grenzzustandsgleichungen und Unsicherheiten wurden dann probabilistische Berechnungen (Level II/III) durchgeführt, um die Versagenswahrscheinlichkeit aller 25 Versagensmechanismen zu beschreiben. Diese Untersuchungen zeigen, dass für die untersuchten Beispieldeiche die Versagenswahrscheinlichkeiten von Versagensmechanismen auf der Deichaußenböschung hoch im Verhältnis zu Versagenswahrscheinlichkeiten auf der Deichinnenböschung sind. Dies steht scheinbar im Widerspruch zu den Schadensanalysen in Abschnitt 2, kann aber vor allem durch die geringe Überlaufwahrscheinlichkeit der verwendeten Beispieldeiche erklärt werden.

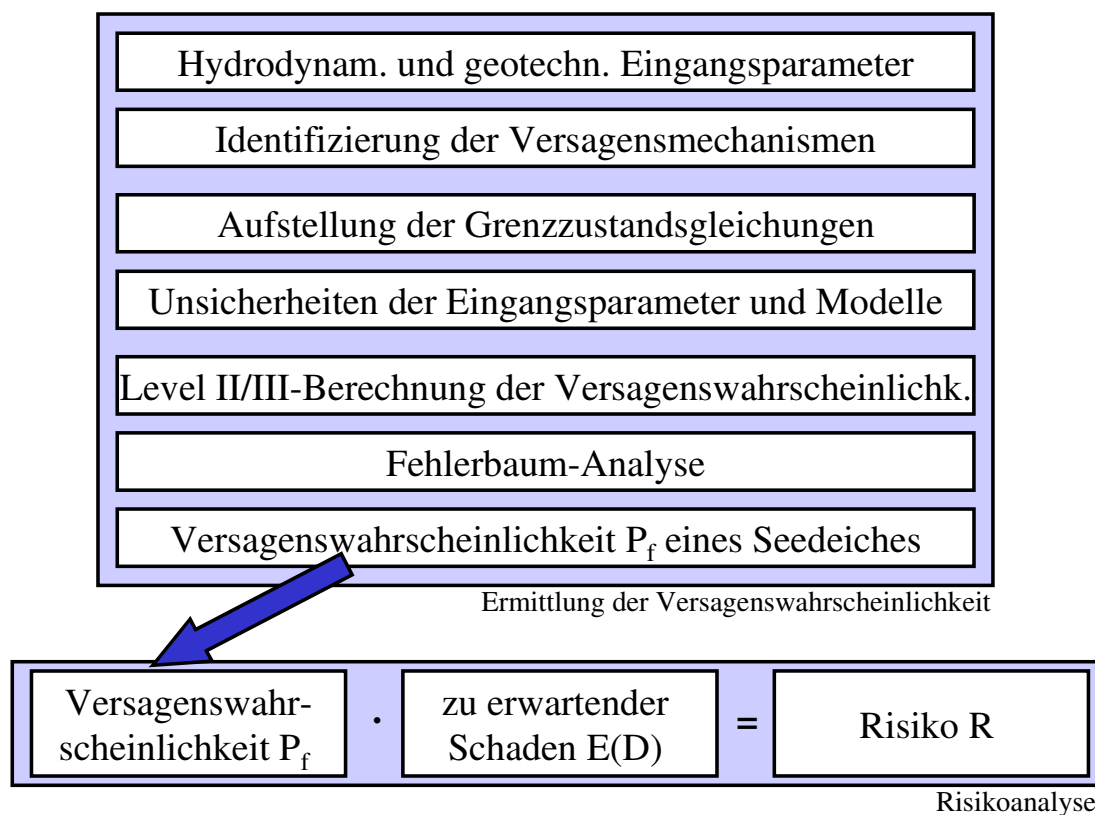


Abb. 4: Vorgehensweise bei der probabilistischen Bemessung als Grundlage für eine Risikoanalyse

Die Versagenswahrscheinlichkeit eines Deichquerschnitts kann nur auf der Grundlage einer Fehlerbaumanalyse ermittelt werden, um zeitliche Abfolgen sowie Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Versagensmechanismen zu berücksichtigen. Auf diese Weise kann dann die Versagenswahrscheinlichkeit des „Top“-Ereignisses (Überflutung) ermittelt werden. Fehlerbaumanalysen ermöglichen weiterhin, den Einfluss einzelner Einflussfaktoren auf die Versagenswahrscheinlichkeit eines Deichquerschnitts zu ermitteln.

Fallstudien unter Verwendung der Beispieldeiche zeigen das Einsparpotential einer probabilistischen Bemessung (Kortenhaus, 2003). Unter der Annahme einer Versagenswahrscheinlichkeit, die der de-

terministischen Bemessung zugeordnet werden kann und die für die probabilistische Bemessung als Zielversagenswahrscheinlichkeit angesetzt wird, ergibt sich für den Beispieldeich unter bestimmten Bedingungen eine mögliche Reduktion der Kronenhöhe im Bereich einiger Dezimeter.

Wesentliche Vorteile einer probabilistischen Bemessung gegenüber einer deterministischen Bemessung sind somit:

- die Erfassung von Unsicherheiten aller eingehenden Parameter und der verwendeten Modelle sowie ihre explizite Berücksichtigung bei der Bemessung,
- die Berücksichtigung aller Versagensmechanismen in ihrer zeitlichen Abfolge und Wechselwirkung,
- die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeiten einzelner Versagensmechanismen, des Deichquerschnitts sowie des Hochwasserschutzsystems,
- Schaffung der Grundlagen für eine Risikoanalyse im Küstenbereich.

Daraus ergeben sich die folgenden praktischen Vorteile:

- die Identifikation von Schwachstellen im Deichquerschnitt bzw. im Hochwasserschutzsystem,
- ggf. Einsparpotentiale gegenüber einer herkömmlichen deterministischen Bemessung.

5 Herausforderungen an zukünftige Forschungsaktivitäten

Ziel einer versagens- und prozessorientierten Bemessung muss es sein, die in Abb. 1 beschriebenen Einflussfaktoren auf die Belastung und Belastbarkeit von Seedeichen in ihrem räumlichen und zeitlichen Aufeinandertreffen sowie in ihren Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Dies ist auf Grundlage der in der EAK (2002) zusammengestellten deterministischen Bemessungsphilosophie unter Verwendung von Wellenauflaufhöhen und Wellenüberlaufzeiten nicht möglich. Vielmehr sind einerseits die deterministischen Grundlagen zur Beschreibung der Versagensmechanismen und Versagensformen zu schaffen, die dann die Grundlage für eine probabilistische Bemessung darstellen, auf deren Grundlage die Wechselwirkungen sowie das zeitliche und räumliche Aufeinandertreffen verschiedener Belastungen berücksichtigt werden können.

Der zweite in der Zukunft zu berücksichtigende Schritt ist die Erfassung der Unsicherheiten der Eingangsparameter und der Modellunsicherheiten. Dies muss zunächst für die in der EAK (2002) dargestellten deterministischen Bemessungsmethoden erfolgen und in einem weiteren Schritt auf alle Versagensmechanismen für Seedeiche angewendet werden. Hierzu müssen Werkzeuge entwickelt und getestet werden, die eine Berechnung und Bewertung der Ergebnisse unter Berücksichtigung der bestehenden Unsicherheiten erlauben. Die kürzlich im Rahmen der EAK - Ausschusssitzung einberufene Arbeitsgruppe „Unsicherheit und Bemessung“ erarbeitet z.Zt. derartige Vorschläge.

Die Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Seedeiche haben gezeigt, dass eine Bemessung unter Berücksichtigung von Unsicherheiten machbar sein wird. Die gleichen Grundlagen müssen allerdings auch für andere Bauwerke (Dünen, Schleusen, Siele, Sperrwerke, Sonderkonstruktionen, etc.) bzw. Kombinationen (Sommerdeiche, Vorländer, 2. Deichlinie) geschaffen werden, bei denen derartige Fortschritte bisher noch nicht erzielt werden konnten.

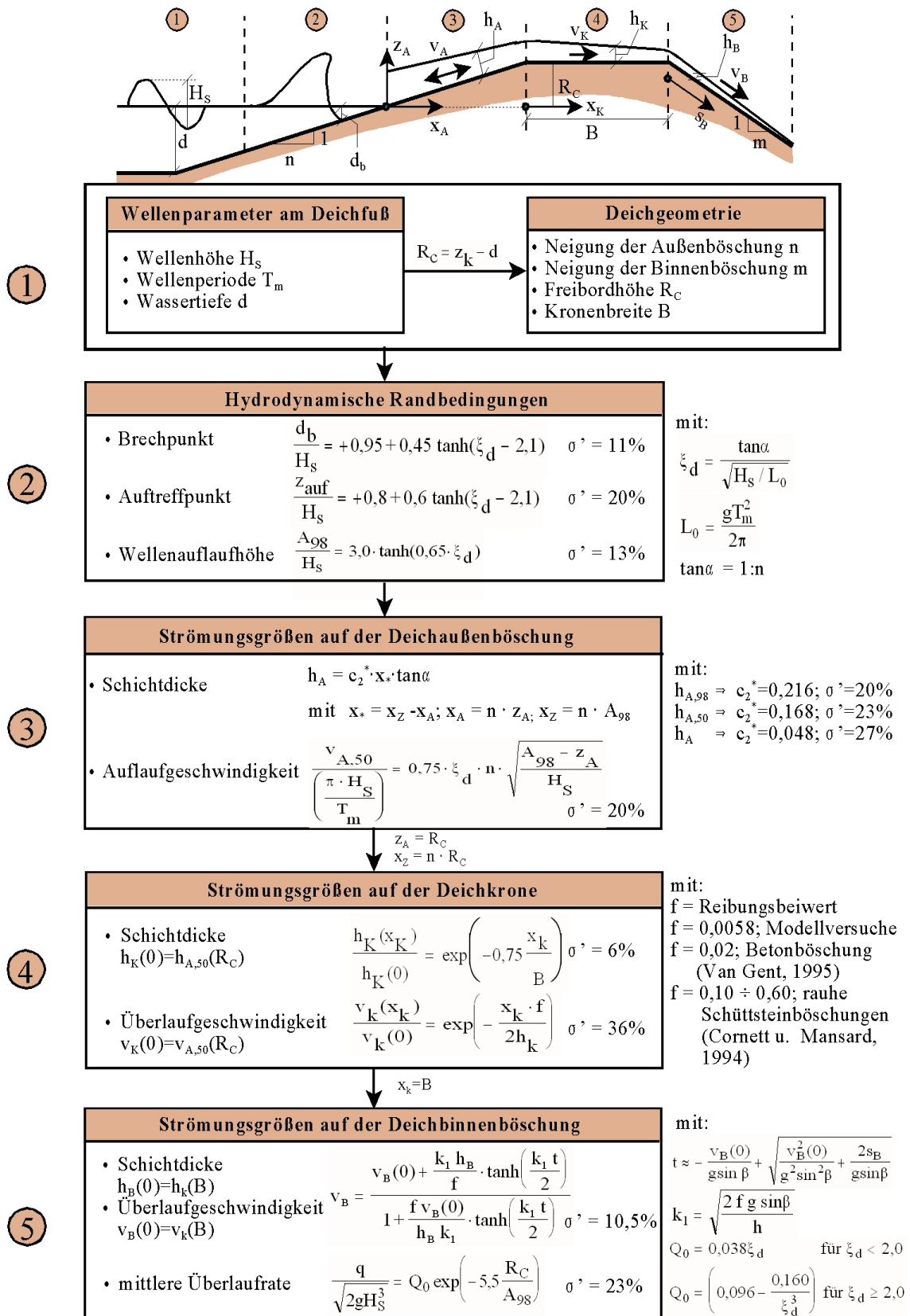


Abb. 5: Ermittlung der Parameter des Überlaufschwells (Schütterpf, 2001)

6 Literatur

- EAK, 2002: Empfehlungen A 2002 – Äußere Belastung als Grundlage für Planung von Küstenschutzwerken. Die Küste H. 63
- FÜHRBÖTER, A. (1991) Wellenbelastung von Deich- und Deckwerksböschungen. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft. Bd. 46. S. 225-282
- KORTENHAUS, A., 2003: Probabilistische Bemessungsmethoden für Seedeiche. Promotion am Leichtweiss-Institut für Wasserbau, 154 S., <http://opus.tu-bs.de/opus/volltexte/2004/525/>
- MÖLLER, J.; OHLE, N.; Schüttrumpf, H.; Daemrich, K.F.; Oumeraci, H.; Zimmermann, C.: Schräger Wellenauflauf an Seedeichen, Tagungsband des 3. FZK-Kolloquiums (29.3.2001), Hannover, 2001
- MÖLLER, J.; WEIßMANN, R.; SCHÜTTRUMPF, H.; KUDELLA, M.; OUMERACI, H.; RICHWIEN, W.; GRÜNE, J. 2002. Interaction of Wave Overtopping and Clay Properties for Sea Dikes. Proceedings 28th Int. Conf. On Coastal Engineering. Cardiff
- NIEMEYER, H.D.; GÄRTNER, J.; KAISER, R.; PETERS, K.H.; SCHNEIDER, O. (1995) The estimation of Design Wave Run-up on Sea Dykes in consideration of overtopping security by using Benchmarks of Flotsam. Proceedings COPEDEC. Rio de Janeiro. S. 1192-1203
- OHLE, N.; DAEMRICH, K.F.; ZIMMERMANN, C.; MÖLLER, J.; SCHÜTTRUMPF, H.; OUMERACI, H.; (2003) Schräger Wellenauflauf an Seedeichen. Mitteilungen des Franzius-Instituts. H. 89, S. 105-154
- PETERSEN, M. U. ROHDE, H. (1991) Sturmflut - Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe. Karl Wachholtz Verlag. 3. Aufl.
- SCHULZ, K.-P., 1992: Maßstabeffekte beim Wellenauflauf auf glatten und rauhen Böschungen. Mitteilungen des Leichtweiss-Instituts. H. 120, S. 135-244
- SCHÜTTRUMPF, H., 2001: Wellenüberlaufströmung bei Seedeichen – Experimentelle und Theoretische Untersuchungen. Promotion. Mitteil. des Leichtweiss-Instituts für Wasserbau H. 149 <http://www.biblio.tu-bs.de/ediss/data/20010703a/20010703a.html>
- SCHÜTTRUMPF, H. UND OUMERACI, H., 2002: Deichschäden. Mitteilungen des Leichtweiss-Instituts für Wasserbau. H. 149
- TAUTENHAIN, E. (1981) Der Wellenüberlauf an Seedeichen unter Berücksichtigung des Wellenaufbaus. Mitt. des Franzius-Instituts, H. 53, S.1-245
- VAN DER MEER, J.W., TÖNJES, P. U. DE WAAL, J.P. (1998) A code for dike height design and examination. Proceedings Int. Conf. on Coastlines, Structures and Breakwaters. (Ed. N.W.H. Allsop) Thomas Telford, London
- VAN GENT, M.R.A., 2002. Wave Overtopping Events at Dikes. Proceedings 28th Int. Conf. on Coastal Engineering. Cardiff, S. 2203-2215

Adressen

Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf

Bundesanstalt für Wasserbau

Wedeler Landstr. 157

22559 Hamburg; Germany

E-mail: schuettrumpf@hamburg.baw.de

Dr.-Ing. Andreas Kortenhaus

Prof. Dr.-Ing. Hocine Oumeraci

Leichtweiß-Institut für Wasserbau

Beethovenstr. 51a

38106 Braunschweig; Germany

E-Mail: A.Kortenhaus@tu-bs.de

E-Mail: H.Oumeraci@tu-bs.de

Policies and strategies for coastal risk management

Jacobus Hofstede und Marinka Kiezebrink

Schleswig-Holstein State Ministry of the Interior und Directorate-General for Public Works and Water Management, National Institute for Coastal and Marine Management / RIKZ

Summary

Interreg IIIB project "COMRISK" aims at improved risk management related to coastal flooding through a transfer and evaluation of knowledge and methods. As part of this project an evaluation study of policies and strategies in the countries bordering the southern North Sea is carried out. This paper presents preliminary results of this study.

The study starts with the definition of a comprehensive analytical framework as a tool to properly assess the policies and strategies. Using this framework, an inventory is made of different levels (strategic, institutional, instrumental and operational) of coastal risk management in present policies of the 5 countries in the North Sea region. This inventory forms the basis for an assessment of the present policies in terms of legal, social, technical, financial, socio-economic, ecological and managerial aspects.

Policy largely depends on context elements such as the history of flooding, the cultural, socio-economic setting, institutional setting, and public awareness. Within each country specific context there is however a certain degree of policy freedom. This implies that countries can learn from each other. The observed differences between the countries offer opportunities and challenges to exchange experiences and information or even to adopt part of each others policies, strategies, measures or instruments within the country specific context. The participants in the study already benefited from it by sharing information, experiences and by contributing to several discussions. Further learning or even adopting each other's instruments or achieving common strategies could be done by, for example, the establishment of a partnership which stimulates knowledge exchange. The current North Sea Coastal Managers Group could perform this activity. Another opportunity could be to partner on specific strategies and measures. Defining common strategies and policies does not necessarily have to lead to harmonisation. Although future harmonisation of policies and strategies should not be avoided when desirable and feasible, policy makers have to focus on further mutual understanding and mutual learning

Zusammenfassung

Ziel des INTERREG IIIB Projektes „COMRISK“ ist ein verbessertes Risikomanagement von Sturmfluten durch einen Austausch und eine Bewertung von Erfahrungen und Methoden. Als Teil des Projektes wird eine Bewertungsstudie von Politiken und Strategien des Küstenschutzes in den Nordsee-Anrainerstaaten durchgeführt. Erste Ergebnisse werden nachfolgend präsentiert.

Erster Schritt ist die Erstellung eines umfassenden analytischen Rahmens als Grundlage für die Ermittlung der Politiken und Strategien. Mit dem Rahmen werden die verschiedenen Elemente des Risikomanagements (strategisch, institutionell, instrumentell und operational) in den fünf Anrainerstaaten inventarisiert. Dies formt die Basis für die Bewertung der heutigen Politiken auf legale, soziale, technische, finanzielle, wirtschaftliche, ökologische und Managementaspekte.

Eine Politik wird zum größten Teil durch den Kontext bedingt, zum Beispiel durch die Geschichte der Überflutungen, den kulturellen, sozio-ökonomischen und institutionellen Rahmen sowie durch das Risikobewusstsein in der Bevölkerung. Innerhalb des landesspezifischen Kontextes existiert jedoch ein gewisser Spielraum für die gewählten Politiken. In der Konsequenz können die Staaten von einander lernen. Die festgestellten Unterschiede zwischen den Staaten bieten Möglichkeiten und Herausforderungen, Erfahrungen und Informationen auszutauschen oder sogar Teile der Politiken, Strategien und Instrumente innerhalb des eigenen Kontextes zu übernehmen. Die Teilnehmer

an der Studie haben bereits vom Informations- und Erfahrungsaustausch sowie durch die Teilnahme an den Diskussionen profitiert. Ein weiteres Lernen voneinander oder die Übernahme von Instrumente bzw. die Entwicklung von gemeinsamen Strategien könnte zum Beispiel durch die Gründung einer Partnerschaft gefördert werden. Die bereits existierende „North Sea Coastal Managers Group“ könnte dies umsetzen. Eine andere Möglichkeit wäre die Bildung von Partnerschaften für bestimmte Strategien oder Maßnahmen. Die gemeinsame Definition von Strategien und Politiken muss nicht zwangsweise zu einer Harmonisierung führen. Obwohl künftige Harmonisierung von Politiken und Strategien - wenn erwünscht und machbar - nicht vermieden werden sollte, sollten sich politische Entscheidungsträger auf gegenseitiges Verständnis und Lernen fokussieren.

1 Introduction

40.000 square kilometres in the southern North Sea Region is potentially affected by flooding (figure 1). In this area 16 million people live and work. Governments are involved in managing this risk. Both their actions and their goals have differences as well as similarities.

In 1996 national and regional coastal defence authorities in the UK, Belgium, the Netherlands, Germany and Denmark initiated a high level network of co-operation, the North Sea Coastal Management Group. It was realised that, in order to achieve a transfer of knowledge and a balanced approach, a more comprehensive transnational co-operation about risk management throughout the North Sea Region is indispensable. On the basis of these considerations, the idea of “COMRISK” was born.



Fig. 1: Flood prone areas in the southern North Sea area

The COMRISK project

The COMRISK project is co-financed by the European Union under its INTERREG IIIB programme for the NSR. The project aims at an improved risk management related to coastal flooding through a transfer and evaluation of knowledge and methods.

Specific objectives of the project are:

- to bring together coastal defence experts from administration, science and private business from different countries/regions around the North Sea and beyond,
- to exchange experience and studies of good practice on risk management amongst the project partners,
- to evaluate and (further) develop innovative integrated risk management strategies (considering national regulations and responsibilities),
- to initiate and support transnational co-operation on integrated coastal defence management,
- to increase the awareness of the risk of coastal flooding in the affected population in the North Sea region.

The project is divided into two main parts: the umbrella project and the subprojects (figure 2). The umbrella project focuses on exchange of experience and on the co-ordination and integration of the subprojects. The Pilot and evaluation studies contribute to the above mentioned objectives. Each sub-project (SP) has a general objective.

- SP1 Policies and strategies: improved national policies and strategies for coastal risk management

- SP2 Strategic planning: improved risk assessment and strategic planning tools for coastal risk management
- SP3 Perception and participation: methods to improve public perception of and participation in coastal risk management
- SP4 Performance: improved approaches and indicators to establish the performance of risk management measures
- SP5 Boundary conditions: improved approaches to establish the hydraulic boundary conditions for technical measures
- SP6-9 Pilot studies Flanders, Ribe, Lincolnshire and Langeoog: risk assessment for different coastal flood units

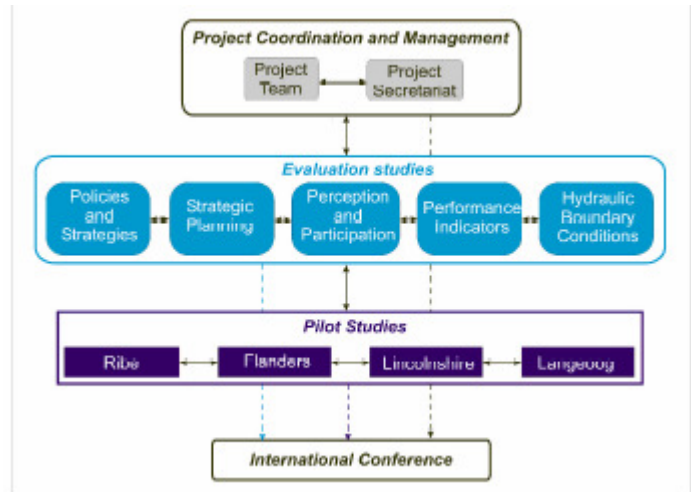


Fig. 2: Outline of the COMRISK project

This paper will deal with preliminary results of SP1, "Policies and strategies for coastal risk management". The final results of the project as a whole and of the individual subprojects will be presented at the final conference to be held 18-20 April 2005 in Kiel, Germany.

COMRISK subproject 1

On behalf of the Dutch National Institute for Coastal and Marine Management / RIKZ, a consortium of KPMG Strategy Economics, Atos KPMG Consulting and TU Delft has carried out SP1. The following specific objectives have been formulated for SP1:

- To provide a comprehensive analytical framework as a tool to properly assess the policies and strategies.
- An inventory of different levels (strategic, institutional, instrumental and operational) of coastal risk management in present national policies of the 5 countries in the North Sea region, involved in the COMRISK project.
- An assessment of the present national policies in terms of legal, social, technical, financial, socio-economic, ecological and managerial aspects (including the ICZM-principles for sustainability).

2 Methodology

In SP1, the strategies and policies of the countries involved have been inventoried and assessed. For a proper assessment of policies and strategies, a sound methodology is needed. In the project, a methodology has been worked out in the form of an analytical framework for looking at coastal flood risk management policies.

A distinction in the framework between the *context* and *policy* has been made. In the context elements are present that are important to the governments of the regions. The government has to manage within this context and cannot directly influence this. Choices are made in the elements of the *policy*, including the setting of goals (a strategic element).

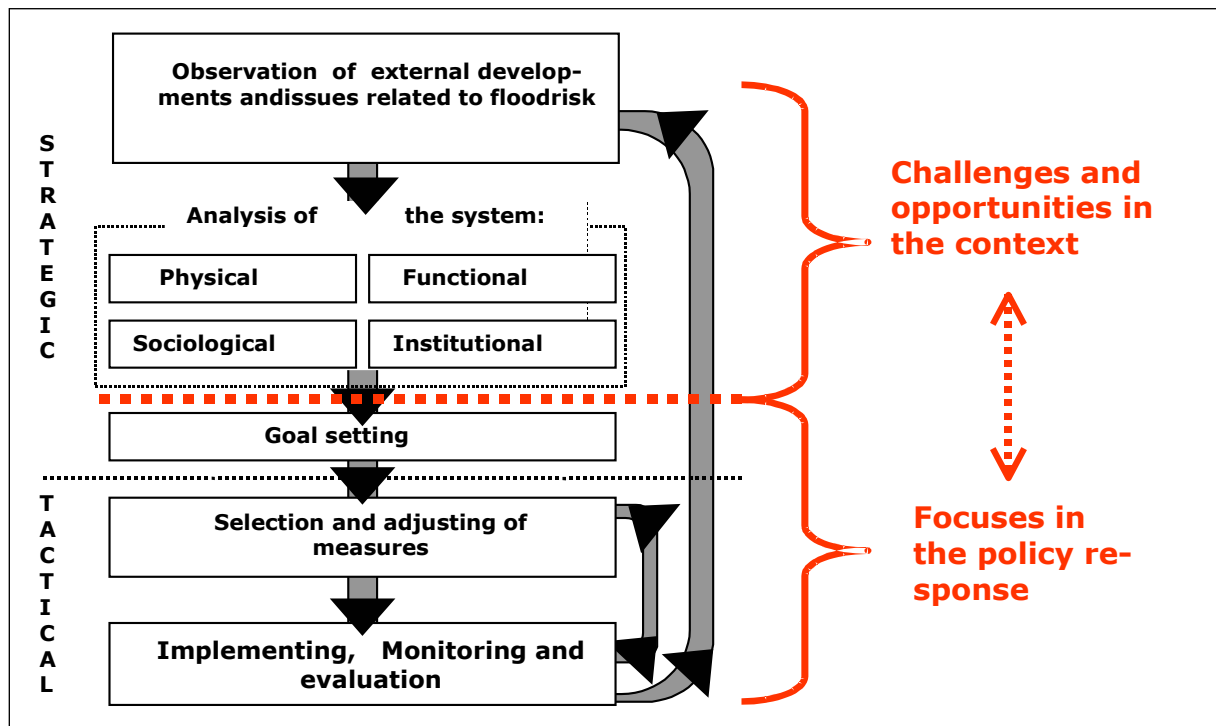


Fig. 3: Analytical framework subproject 1

Assessing the context: challenges

In assessing the context, the subproject team analysed which challenges policy-makers face. Challenges can be threats to be confronted or avoided, but also opportunities to be explored and possibly exploited.

Assessing the policy: focus points

Depending on its socio-economic and socio-cultural setting, the form in which coastal risk management is implemented will probably be very different. For this reason we have refrained from taking one country as 'best practice' or to speak of *the* optimal coastal risk management process, as it will differ from country to country, to fit its own context.

We can however indicate what the focus points are within a policy. For this purpose the ICZM-criteria as formulated by the European Commission (EU ICZM) have been used. These principles offer various ways of good coastal zone management.

Assessing the policy: adapting the ICZM principles

The EU-ICZM principles however have been formulated at quite a high, abstract level. Furthermore they relate to both the institutional structure and to the policy of coastal management. The ICZM principles have been made more concrete.

Assessment within the analytic framework

The results of the assessments are shown at the end of each chapter. The challenges and focuses have been indicated with dots. A big dot indicates a major challenge/focus and a smaller dot for challenges that are significant challenges/focus. Two remarks need to be made in this respect:

- Although the subproject team has made every effort in carefully identifying the challenges, there always remains room for discussion in the details.
- One can argue for both concentration and a broad, comprehensive approach in policy. More and bigger dots do not necessarily equal better policy.

3 Policy Context

External developments

the three identified significant external developments are shown in table 2. All countries regard climate change and the corresponding sea level rising as major challenge. Ecological regulation is a complicating factor to policy-making, but in most cases not regarded to be a major challenge to the existing policy. Development pressure is a major issue for the Netherlands and England.

	England	Flanders	Netherlands	Niedersachsen	Hamburg	Schlesw. Holstein	Denmark
Relative sea level rise	●	●	●	●	●	●	●
Ecological regulation	○	○	○	○	○	○	○
Pressure for development	●	○	●		○		

● Major challenge ○ Challenge

Tab. 1: Challenges from external developments

Coastal system: physics

Regarding the physical system, the sea which may flood or break through the shoreline possibly leading to the flooding of the hinterland, we can conclude the following. The German coastline offers the least natural protection. The Dutch physical context is both in absolute and relative terms the most challenging, though it has some protective dunes.

	England	Flanders	Netherlands	Niedersachsen	Hamburg	Schlesw. Holstein	Denmark
Large amount of flood-prone area	○	○	●	○	○	○	
Deep flood-prone areas	○	○	●	○	○	○	
Natural coastline offers little protection	○		○	●	-	●	○

● Major challenge ○ Challenge

Tab. 2: Physical opportunities and threats

The functions of the coast and flood-prone interior

Which economic and other functions are present in the respective areas? Where are the conflicts? In the Netherlands major cities are situated entirely in flood-prone areas. Hamburg and London are partly situated in potentially flood-prone areas. Almost all policymakers are confronted with sensitive natural habitats at their coast, which brings along limitations and conditions to coastal defences.

	England	Flanders	Nether-lands	Nieder-sachsen	Hamburg	Schlesw. Holstein	Denmark
Major cities threatened	○	○	●		○		
Designated nature areas	○	○	○	○	○	○	○

● Major challenge ○ Challenge

Tab. 3: Challenges from the socio-economic functions

Societal perceptions and attitudes towards flooding

The common challenge policy-makers experience in England, Flanders, the Netherlands and to a lesser extent Niedersachsen, is to raise the sense of urgency among their citizens to make them either support governmental action or take action themselves. In Schleswig-Holstein, citizens are also noted not to be aware of the risk, but this has not lead to practical difficulties in implementing policy. Hamburg and Denmark in general feel that the demand and support for action is about right.

	England	Flanders	Nether-lands	Nieder-sachsen	Hamb-urg	Schlesw. Holstein	Denmark
Low sense of urgency citizens	○	●	●	○		*	

● Major challenge ○ Challenge * Limited relation, but not regarded as a problem

Tab. 4: Challenges from societal perceptions

Institutional context

Limited capacity is a common challenge for policy makers in all countries. The challenges regarding integration of policy fields and levels, is more ambiguous. To some policy fields the links are not strong, but often the primary policy-makers do not consider this as a major problem. The vertical integration in England has improved according to all interviewees, however at the local level a 'national policy vacuum' is experienced.

	England	Flanders	Nether-lands	Nieder-sachsen	Hamburg	Schlesw. Holstein	Denmark
Limited staff capacity		●					
Limited budget	●	○	○	○	○	○	○
Limited relation to disaster man policy		○	*				
Limited relation to spatial plan-ning policy		○	○				
Limited vertical integration	**		○				

● Major challenge ○ Challenge

* Limited relation, but not regarded as a problem ** According to the local level, there is a policy vacuum

Tab. 5: Challenges from the institutional context

4 Policies and strategies

Risk judgement and goal setting

England and the Netherlands have a multi-generation time horizon in common. Both countries have explored the long-term demands for coastal protection. The other countries generally have limited themselves to study how – in the long run - the current level of protection could be maintained.

England has a strong focus on calculating costs and benefits; for every project a benefit/cost ratio is calculated. In the Netherlands and Denmark current standards have been set decades ago with much consideration to costs and benefits and are currently being updated.

Hamburg and Niedersachsen (in the Weser-Ems region) have done some quantification of damage potentials. However, as now the dike design regulation does not distinguish between protection levels, this aspect cannot be directly incorporated in decision-making. Schleswig-Holstein has incorporated this type of information in setting priorities in implementation.

The way the ecological carrying capacity is taken into account is quite similar, as EU law regulates matters such as the Environmental Impact Assessments and the protection of habitats.

	England	Flanders	Nether-lands	Nieder-sachsen	Hamburg	Schlesw. Holstein	Denmark
Taking into account the needs of many generations	●		●				
Economical costs and benefits taken into account	●		○	○	○	○	○
Ecological carrying capacity taken into account	●	○	○	○	○	○	○

● Much focus ○ Focus

Tab. 6: Focus points in goal-setting

Selection of measures

The potential focus points for measures have been derived from the ICZM criteria. In some respects they also relate to the organisation of flood risk management.

The allowance of dynamics of the coast is very much connected to erosion policy, which is outside the scope of this study. England allows largely for dynamics, including the setting back of dike lines. In Flanders, the Netherlands, Niedersachsen (for the Islands) and Denmark some dynamics are allowed, though in general the now protected areas will remain protected. In Germany only in exceptional cases, a retreat policy for the main land might be followed.

The Niedersachsen high level policy is most strictly prescribing, the local policy-making is limited. The Schleswig-Holstein high level policy-maker has left freedom to the water boards with regard to the secondary dikes. Hamburg is itself an almost local authority and also leaves freedom to industry areas to arrange its own protection.

Denmark places much emphasis on the initiative and freedom of the counties and boards. In the Netherlands and Flanders standards are set at the central level. However local tailorwork is receiving more and more attention. Alternatives to reach the safety standard are discussed with local communities and municipalities.

As pointed out, England, Denmark and to some lesser extent Hamburg use a variety of measures to achieve their goals. Flanders, the Netherlands and the other German states concentrate mostly on coastal defence.

The Netherlands, though focused on coastal defence, is also more and more searching for multiple ways to arrange their coastal defence.

	England	Flanders	Nether-lands	Nieder-sachsen	Hamburg	Schlesw. Holstein	Denmark
Allowing dynamics	●	○	○				○
Allowance of local tailor-made solutions	●	●	●		○		●
Variety of measures	●				○		●
Variety of methods to achieve measures	●		○		○		●

● Much focus ○ Focus

Tab. 7: Focus points in measures

Implementing, monitoring and evaluation

All countries try to improve their actions by learning about their performance. However, only few countries are reconsidering their general set of measures or have done so recently.

	England	Flanders	Nether-lands	Nieder-sachsen	Hambur-g	Schlesw. Holstein	Denmark
Performance monitoring of measures	○	●	●	●	●	●	●
Reconsideration at strategic level	●	○	○				

● Much focus ○ Focus

Tab. 8: Focus points regarding monitoring and evaluation

5 Conclusions

The relation between context and policy has been extensively discussed with the interviewees and the members of the COMRISK project team. Although the relation between context and policy is hard to quantify, one can conclude that policy largely depends on context elements such as the history of flooding, the cultural, socio-economic setting, institutional setting, public awareness, et cetera. At the same time this does not necessarily mean that policy cannot be influenced or changed.

This brings us to the conclusion that within each country specific context policy makers have a certain degree of policy freedom. This degree of freedom depends on several factors such as the available mandate or authority, the current political agenda, the need for change, budget, public support, etc.

This also implies that countries can learn from each other. We have assessed several differences between the countries. We have for instance seen that England and Denmark have more variety in measures than the Netherlands, Germany and Flanders. This offers opportunities and challenges to exchange experiences and information or adopt part of each other policies, strategies, measures or instruments within the country specific context.

Elements that seem especially interesting in this respect include: public awareness in relation to responsibility of acting (government versus 'self acting' of individuals), insurance versus compensation, evacuation and crisis management.

6 Recommendations

The objective of COMRISK is improving coastal flood risk management through a transfer and evaluation of knowledge and methods as well as pilot studies. This subproject has provided a comprehensive analytic framework as a tool to assess policies and strategies for the five countries. The analytic framework has proven to be an adequate tool for gaining insight in the coastal risk management in the North Sea region. It is used to assess the present national policies in terms of legal, social, technical, financial, socio-economic, ecological and managerial aspects. The framework can also benefit future policy analysis.

This COMRISK subproject contributed in assessing and comparing current policies and strategies. We are convinced that the countries already benefited from this study by sharing information, experiences and by contributing to several discussions. Nevertheless, several authorities and key players have expressed their desire to learn more from each other and possibly adopt each other's instruments or even achieve common strategies. Although one could argue that serious difficulties will be involved in establishing common strategies for coastal flood risk management, we conclude that defining common policies and strategies is a major challenge and opportunity for improved coastal flood risk management. It could be done by means of for example:

- Establishment of a partnership which stimulates knowledge exchange between the countries regarding the topics mentioned above. The current North Sea Coastal Managers Group could perform this activity.
- Where deemed desirable, strategy development by partnering on specific strategies and measures. This holds especially for the following themes: public awareness in relation to responsibility of acting (government versus 'self acting' of individuals), insurance versus compensation, evacuation and crisis management.

Defining common strategies and policies does not necessarily have to lead to harmonisation. Although future harmonisation of policies and strategies should not be avoided when desirable and feasible, we believe that policy makers have to focus on further mutual understanding and mutual learning.

7 Documentation

DELFT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY/ ATOS KPMG CONSULTING/ KPMG BUSINESS
ADVISORY SERVICES: COMRISK Evaluation of policies and strategies for coastal risk management, Amstelveen, 2004.

WWW.COMRISK.org

Addresses

Jacobus Hofstede
Schleswig-Holstein State Ministry of the Interior
PoBox 7125
D – 24171 KIEL
Germany
E-mail: jacobus.hofstede@im.landsh.de

Marinka Kiezebrink
Directorate-General for Public Works and
Water Management,
National Institute for Coastal and Marine
Management / RIKZ
Pobox 20907
2500 EX DEN HAAG
The Netherlands
E-mail:
m.f.kiezebrink@rikz.rws.minvenw.nl

Inselchutz in Niedersachsen

Dipl.-Ing. Frank Thorenz

Baudirektor beim Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz

Zusammenfassung und Ausblick

Der Sturmflutschutz auf den Ostfriesischen Inseln wird durch einen Ring von überwiegend wattseitig orientierten Hauptdeichen und seeseitig liegenden Schutzdünen als gesetzlich definierten Küstenschutzelementen gewährleistet. Schutzdünen haben zusätzlich die Funktion, den Bestand der Inseln zu sichern. Das technische Konzept zur Erhaltung der Funktionalität der Schutzdünen ist dabei abhängig von der jeweiligen Sedimentversorgung des Strandes und den bereichsspezifische formulierten Schutzziele. In durch massive Bauwerke geschützten Bereichen – dieses sind überwiegend die Ortslagen auf den Inseln - wird die vorhandene Küstenschutzlinie erhalten und die Bauwerke den jeweiligen Belastungen angepasst. In Dünenbereichen kommen unterschiedliche Konzepte zur Ausführung, die ein größeres Maß an Flexibilität ermöglichen. Diese reichen von einer Sicherung der vorhandenen Küstenlinie durch die künstliche Zufuhr von Sediment bis hin zu einem Zulassen der Erosion unter Sicherstellung der Sturmflutschutzfunktion durch Verstärkung der Schutzdünen.

Die Entwicklung von mittel- bis langfristigen Konzepten für die Sicherstellung des Küstenschutzes zunächst für Inselbereiche, in denen eine langfristig negative Sedimentbilanz vorherrscht, bildet einen Schwerpunkt der konzeptionellen Planungen. Für langfristige Inselchutzplanungen werden die Auswirkungen von zu erwartenden Klimaveränderungen von Bedeutung sein [2] [7]. Hierfür stellt die Erfassung morphologischer, hydrologischer und sedimentologischer Größen und die Analyse von deren Veränderungen eine wichtige Basis für die Schaffung von Planungsgrundlagen dar. Die dauerhafte Freihaltung von für Küstenschutzzwecke ausgewiesenen und zukünftig notwendigen Flächen von Bebauung und sonstigen nur schwer revidierbaren Nutzungen sowie der Verbleib solcher Flächen in Landeseigentum besitzt vor dem Hintergrund, auch zukünftig eine notwendige räumliche Flexibilität für die Umsetzung von Küstenschutzplanungen sicherzustellen, eine besondere Bedeutung.

Der Investitionsbedarf für die Erhöhung und Verstärkung der Küstenschutzanlagen auf den Ostfriesischen Inseln gemäß den Vorgaben des Niedersächsischen Küstenschutzprogramms (Stand 01.01.2004) beträgt noch ca. 154 Mio. €.

Eine intensive Abstimmung der Anforderungen des Küstenschutzes mit den Zielsetzungen des Naturschutzes im Nationalpark „Niedersächsisches Wattenmeer“ und der touristischen Nutzung der Inseln wird, wie auch ein schonender Umgang mit Ressourcen, wegen der Kleinräumigkeit der Inseln auch in Zukunft von großer Bedeutung im Sinne eines integrierten Managements sein. Durch die Umsetzung von problemorientierten Kommunikationskonzepten kann eine hohe Akzeptanz bei den Betroffenen für die Umsetzung von Küstenschutzmaßnahmen erzielt werden.

1 Einleitung

Der Niedersächsischen Festlandsküste sind zwischen Ems- und Jademündung die Ostfriesischen Inseln vorgelagert. Vorgänger der heutigen Inseln haben sich im Zuge des nacheiszeitlichen Meeresspiegelanstieges als sandige Barriereinseln gebildet und waren seitdem ständigen Veränderungen unterworfen. Das Alter der Inseln kann sicher auf etwa 2000 Jahre bestimmt werden [8]. Die Inseln sind durch Seegaten getrennt, über welche während jeder Tide große Wassermengen in die südlich der Inseln gelegenen Wattbereiche ein- und ausströmen.

Die Inseln, Seegaten und Watten stellen ein hochdynamisches System dar, welches komplexen klein- und großräumigen hydromorphologischen Prozessen unterworfen ist. Vorstrand- und Stranderosionen führten in den vergangenen Jahrhunderten zu Dünenabbrüchen, Dünendurchbrüchen und dem voll-

ständigen Verschwinden von Inseln. Die damaligen technischen Möglichkeiten und Kenntnisse reichten nicht aus, um bedrohte Siedlungsbereiche ausreichend zu schützen. Ortschaften mussten deshalb zum Teil mehrfach verlegt oder aufgegeben werden. Beginnend mit der Gründung des ersten Seeheilbades an der deutschen Nordseeküste auf Norderney im Jahre 1797 hat sich auf allen Ostfriesischen Inseln der Tourismus bis in die Gegenwart als ein wesentlicher Wirtschaftsfaktor entwickelt. Heute ist die Insel Norderney neben Cuxhaven der meistfrequentierte Ferienort an der niedersächsischen Küste. Zur Sicherung der geschaffenen Werte vor Sturmfluten und Küstenerosion wurden beginnend in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts die Westköpfe aller Inseln mit Ausnahme von Juist und Langeoog durch massive wasserbauliche Anlagen festgelegt und nachfolgend erweitert.

Maßnahmen des Inselschutzes werden zu einem großem Teil in einem Naturraum umgesetzt, der einen besonderen naturschutzfachlichen Wert aufweist sowie durch europäische und nationale Rechtsvorschriften geschützt ist [6]. Zudem sind im Zeitraum vom Frühjahr bis Herbst, wenn Küstenschutzmaßnahmen umgesetzt werden, Zielkonflikte mit den Anforderungen des Tourismus vorhanden.

2 Gesetzliche Grundlagen

Belange des Küsten- und Hochwasserschutzes werden in Niedersachsen durch ein eigenständiges Fachgesetz, das Niedersächsische Deichgesetz (NDG) [5], geregelt. Dieses enthält Legaldefinitionen für Küstenschutzanlagen, deren Bestimmung und legt Zielsetzungen des Küstenschutzes fest. Als wesentliche Elemente des Küstenschutzes auf den Ostfriesischen Inseln sind gemäß dem NDG zu nennen:

- Hauptdeiche (§ 2(1)NDG) sind Deiche, die dem Schutz eines Gebietes vor Sturmflut zu dienen bestimmt sind,
- Schutzdünen (§ 2(4)NDG) sind Dünen, die dem Schutz eines Gebietes vor Sturmflut dienen oder den Bestand einer Insel sichern,
- Deichvorländer (§ 21 NDG) dienen dem Schutz des Hauptdeiches
- Bühnen, Deckwerke und Lahnungen dienen als Sicherungs- bzw. Schutzwerke (§§ 4 u. 5 NDG) der Hauptdeiche, Schutzdünen und Deichvorländer.

Ziel des Inselschutzes ist es, Siedlungsräume vor Sturmfluten zu schützen und den Bestand der Inseln zu sichern [1]. An der Nordseite der Ostfriesischen Inseln finden sich natürliche Randdünenketten mit Breite von ca. 200 bis 400 m. Diese sind als Schutzdünen flächenhaft gewidmet. Weiter im Inselinneren sind in der Regel keine geschlossenen Dünenzüge vorhanden. Für die niedrig liegenden Wattseiten der Inseln stellen Hauptdeiche den Sturmflutschutz sicher. Dünen und Hauptdeiche bilden geschlossene Ringe um die zu schützenden Bereiche (Bild 1). Für die Gewährleistung des Bestandes der Inseln sind einzelne Dünenzüge außerhalb dieses Rings zusätzlich als Schutzdünen gewidmet. In Sturmfluten bilden die Ostfriesischen Inseln ein natürliches Barriersystem gegen den aus dem Küstenvorfeld einlaufenden Seegang. Durch die Platen, Vorstrände und Inseln wird ein erheblicher Teil der Seegangenergie abgebaut und die Seegangsbelastung der Festlandsküste verringert.

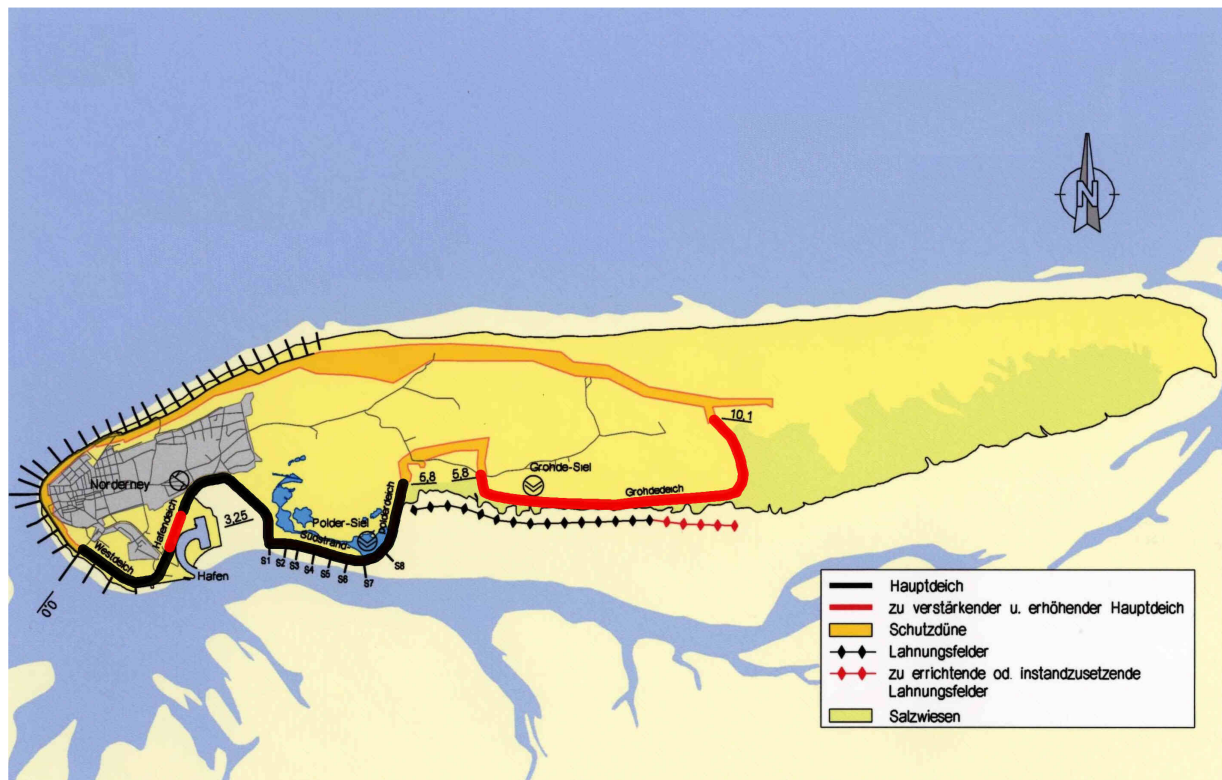


Abb. 1: Ring aus Küstenschutzanlagen am Beispiel der Insel Norderney

Im östlichen Teil vieler Inseln sind keine Küstenschutzanlagen vorhanden. Hier besitzen die natur-schutzfachlichen Zielsetzungen der natürlichen Dynamik für den Nationalpark „Niedersächsisches Wattenmeer“ Priorität [6].

Küstenschutz auf den Ostfriesischen Inseln ist eine Aufgabe des Landes Niedersachsen und wird durch den Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz als unmittelbar dem Niedersächsischen Umweltministerium nachgeordnete Landesoberbehörde wahrgenommen. Ausnahmen hiervon bilden die Bestandssicherung von Borkum und Wangerooge zum Schutz der Fahrwässer von Ems und Jade, die auf Grundlage des § 8(5) des Wasserstraßengesetzes (WaStrG) [10] in der Zuständigkeit des Bundes liegen. Tabelle 1 enthält einen Überblick über die auf den Ostfriesischen Inseln vorhandenen Küstenschutzanlagen.

Insel	Schutzdünen [km]*	Deckwerke und Strandmauern [km]	Seebuhnen [Stck]	Hauptdeiche [km]	Lahnungen [lfd km Küstenlinie]
Borkum	18,2 *	6,5**	35**	4,9	
Juist	18,4	1,4	7	5,4	3,0
Norderney	12,1	4,7	32	10,0	2,9
Baltrum	7,3	1,8	14	1,6	
Langeoog	20,3	-	-	5,6	5,0
Spiekeroog	10,5	1,8	14	1,6	
Wangerooge	11,4*	5,7**	23**	5,9	2,7

* einschließlich der zugehörigen Sicherungswerke auf Borkum teilweise von der WSV erhalten

** Deckwerke und Buhnen, die von der WSV des Bundes auf Grundlage von § 8 (5) WaStrG erhalten werden

Tab. 1: Küstenschutzanlagen auf den Ostfriesischen Inseln

3 Sicherstellung des Sturmflutschutzes in Schutzdünenbereichen

Dünenbereiche und die vorgelagerten Strände sind durch hochdynamische hydrologische und morphologische Verhältnisse geprägt. Die Wahl von technischen Konzepten für die Sicherstellung der Funktionalität von Schutzdünen als Küstenschutzelement muss deshalb auf diese Anforderungen abgestimmt sein. Ein prägendes Element stellt der litorale Sedimenttransport, welcher eine dominierende west-östliche Komponente aufweist, dar. An den Seegaten wird dieser durch die mit jeder Tide ein- und ausströmenden Wassermassen beeinflusst, wodurch die hochdynamischen Ebbdeltas der Seegaten, ein System aus hochliegenden Sandplaten, induziert werden (Bild 2). Die Anlandung von Sandplaten stellt einen diskontinuierlichen Prozess dar, welcher einer starken zeitlichen und örtlichen Variabilität unterliegt und deshalb zu stark schwankender Sedimentversorgung führt. Westlich der Anlandungsbereiche der Sandplaten des Ebbdeltas herrscht an den Inselstränden häufig eine negative Sedimentbilanz vor, welche eine Erosion der Vorstrand- und Strandbereiche und daraus resultierend einen Abbruch der Randdünen während Sturmfluten verursacht. Diese Bereiche sind heute überwiegend durch Deckwerke und Bühnen gesichert. Östlich des Anlandungsbereiches bedingt die Sedimentzufuhr oft eine insgesamt ausgeglichene oder positive Sedimentbilanz, welche zu breiten und hohen Stränden sowie stabilen oder wachsenden Dünen führt. Zudem kann die großräumige Verlagerung von Rinnen langfristige Erosionen hervorrufen, wenn sich diese Rinnen einer Insel stark annähern. Technische Schutzkonzepte für Schutzdünen und die vorgelagerten Strände müssen sich deshalb an den Sedimentbilanzen und der Entwicklungstendenz dieser Bereiche orientieren.



Abb. 2: Ebbdelta des Seegats Wicher Ee mit dem Deckwerke und Bühnen befestigtem Westkopfs Baltrums

Insel	Jahr	Ein- baumenge [m ³]	Einbaustrecke [m]
Borkum	1994	52.000	250
	1996	20.000	150
Juist	1985	110.000	300
	1994	193.000	800
	2000	130.000	450
	2004	ca. 130.000	470
Langeoog	1998-2000	220.000	1000
Wangerooge	1994	123.000	900
	2004	ca. 40.000	550

Tab. 2: Dünenverstärkungen auf den Ostfriesischen Inseln seit 1985

3.1 Langfristig negative Sedimentbilanz

3.1.1 Durch massive Bauwerke geschützte Bereiche

Bereits im Jahr 1857/58 wurde auf Norderney begonnen, langfristig auftretenden Erosionen der Randedünen und der Strände an der Westseite der Insel durch den Bau von massiven Schutzbauwerken wie Deckwerken und Bühnen zu begegnen. Die ursächlichen hydromorphologischen Prozesse und die Wechselwirkungen von Bauwerken mit diesen waren damals noch weitgehend unbekannt. An den Westköpfen aller Inseln mit Ausnahme von Langeoog und Juist sind bis Ende des 19. Jahrhunderts schwere Inselschutzanlagen errichtet worden. Diese sind in der Folgezeit auf Grund fortschreitender Erosion und Sturmflutschäden kontinuierlich in Küstenlängs- und Querrichtung erweitert und verändert worden [4]. Sie stellen heute den Sturmflutschutz für die inselseitig meist unmittelbar angrenzenden intensiv genutzten Siedlungsbereiche dar. Ziel ist es, die Anlagen zu erhalten und ggf. neuesten technischen Erkenntnissen anzupassen. Hierfür steht teilweise nur ein sehr beschränkter Raum seeseitig der vorhandenen Bebauung zur Verfügung. Dieser ist als Küstenschutzanlage gewidmet und darf nur zu Zwecken des Küstenschutzes genutzt werden. Andere Nutzungen unterliegen den strengen Genehmigungsvorbehalten des NDG. Die abschnittsweise sehr beengten Platzverhältnisse am Westkopf der Insel Norderney erfordern zur Verstärkung des Deckwerkes aufwendige Sonderkonstruktionen [9]. Dieses unterstreicht die Notwendigkeit einer Vorhaltung von Planungsräumen für zukünftige Küstenschutzmaßnahmen.

Ergänzend werden am Westkopf der Insel Norderney Strandaufspülungen zur Sicherung der Bauwerke durchgeführt, wenn ein Mindeststrandvolumen unterschritten wird. Insgesamt sind seit 1951 10 Strandaufspülungen mit einem Gesamtvolumen von 4,7 Mio. m³ umgesetzt worden. Die jährliche Sedimentverlustrate beträgt für diesen Bereich im Mittel ca. 100.000 m³.

3.1.2 Bereiche ohne massive Bauwerke

In langfristig erodierenden Schutzdünenbereichen wird differenziert, ob mit der Erosion eine Gefährdung der Küstenschutzziele verbunden ist oder nicht. Ist es erforderlich, die vorhandene Küstenlinie zu sichern, erfolgt dieses durch Strand- oder Vorstrandauffüllungen, welche das Sedimentdefizit ausgleichen. In Einzelfällen können auch massive Konstruktionen ggf. auch in Kombination mit Strandauffüllungen eine geeignete Lösung darstellen. Unter funktionalen Gesichtspunkten bedürfen deren langfristige Auswirkungen auf den Sedimenttransport allerdings einer intensiven Prüfung.

Ein Rückgang der Küstenlinie durch Erosion kann in begrenztem Umfang dann zugelassen werden, wenn das Schutzziel durch die verbleibenden Schutzdünen weiterhin gewährleistet wird. Oft ist eine Verstärkung der vorhandenen Dünenkette oder der Aufbau einer neuen rückwärtigen Schutzlinie durch Schließen von Dünenlücken innerhalb der Schutzdünen notwendig. Hierzu wird aus Strandbereichen mit positiver Sedimentbilanz flächenhaft Sand entnommen, welcher im Trockenverfahren zu

einer naturnah und landschaftsgerecht geformten Düne aufgebaut wird. Gegen äolische Abtragung erfolgt zunächst eine initiale Abdeckung mit einer dünnen Heulage und anschließend eine sukzessive Bepflanzung mit Strandhafer. Bei sorgfältiger Auswahl der Entnahmeorte in Bereichen mit positiver Sedimentbilanz sind wegen der vergleichsweise geringen Entnahmemengen keine nachhaltigen negativen Effekte auf Strände und Dünen zu erwarten. Diese Maßnahmen stellen eine vergleichsweise kostengünstige Alternative zur Sicherstellung der Küstenschutzziele dar. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die in den letzten 15 Jahren durchgeführten Dünenverstärkungsmaßnahmen. Bild 3 zeigt das Beispiel einer Dünenverstärkung auf der Insel Langeoog.



Abb. 3: Binnenseitige Verstärkung der Randdüne am Nordstrand der Insel Langeoog

3.2 Wechselnde Sedimentbilanz

Strandbereiche, in denen die Platen eines Ebbdeltas die in Transportrichtung liegende Insel erreichen, sind zwischen Platananlandungen oft durch Phasen ohne ausreichende Sedimentzufuhr gekennzeichnet. Diese können starke Stranderosionen und damit verbundene Dünenabbrüche während Sturmfluten bedingen. Im Falle einer ausreichend breiten Schutzdüne und nur geringer Abbrüche werden diese zugelassen und der seeseitige Dünenfuß durch Sandfangmaßnahmen neu aufgebaut (Bild 4). Ist die Substanz der Schutzdüne wesentlich beeinträchtigt, werden Strand- bzw. Vorstrandauffüllungen durchgeführt, durch welche neben einer Erhöhung des Strandes auch in Einzelfällen eine Beschleunigung der Platananlandung erreicht werden kann. Auf Langeoog mussten seit 1971 die Strände im Westen der Insel zum Schutz des Ortes und des Trinkwassereinzugsgebiets sechsmal mit insgesamt rd. 2,9 Mio. m³ Sand aufgefüllt werden.



Abb. 4: Wiederaufbau des Dünenfußes durch Buschsandfangzäune

3.3 Ausgeglichene Sedimentbilanz

In Strandbereichen mit ausgeglichener Sedimentbilanz werden Sandfangzäune am Dünenfuß gesetzt, um diesen nach Sturmfluten wieder aufzubauen und einen Verschleißkörper für den Sturmflutfall zu schaffen. Der akkumulierte Sand wird durch Initialbepflanzung mit Strandhafer stabilisiert und sorgt für eine weitere natürliche Akkumulation. Wenn ein ausreichender Sandkörper am Dünenfuß vorhanden ist, verstärkt überwehter und an der Rückseite der Düne abgelagerter Sand deren Substanz.

3.4 Positive Sedimentbilanz

Strandbereiche mit langfristig positiver Sedimentbilanz erfordern im Regelfall keine Sandfangmaßnahmen am Dünenfuß, da ein hoher und breiter Strand vorhanden ist und sich eine natürliche Dünenentwicklung einstellt. Durch Sturmfluten treten am Dünenfuß meist keine Erosionen auf.

3.5 Ingenieurbiologische Maßnahmen und Dünenschutz

Die Bestandserhaltung des Dünenkörpers der Schutzdünen ist insbesondere wegen der auf den Ostfriesischen Inseln vergleichsweise geringen Dünenbreiten von meist nur wenigen hundert Metern von großer Bedeutung. Schäden an der Dünenvegetation führen zu äolischem Sandtransport zunächst durch kleinräumige Windrisse, die sich schnell zu großen Ausbläsern ausweiten und die Funktionalität der Schutzdünen massiv beeinträchtigen können. Ursachen sind oft Trampelpfade oder Wildtierbefall. Durch eine systematische Bepflanzung mit Strandhafer und das gezielte Setzen von Buschzäunen werden solche Bereiche stabilisiert. Der Strandhafer wird meist an natürlichen Standorten gewonnen und für größeren Bedarf auf Norderney auch kultiviert.

Maßnahmen des präventiven Dünenschutzes bestehen in der gezielten Information und Lenkung der zahlreichen Inselgäste. Beschilderungen, befestigte, markierte Wege und einzelne mit Aussichtsplattenformate ausgestattete Dünen sowie die gezielte Überwachung und Information vor Ort sind wichtige Bausteine dieses Konzeptes. In Kooperation zwischen Küstenschutz- und Naturschutzverwaltung und den Inselgemeinden wird so bei den Inselgästen Verständnis für die Belange des Dünenschutzes und des Nationalparks "Niedersächsisches Wattenmeer" erzeugt.

4 Schutz der Wattseiten

In Folge der Februarsturmflut 1962, in welcher Siedlungsgebiete auf nahezu allen Inseln überflutet wurden, begann die Erhöhung und Verstärkung der Hauptdeiche auf den Inseln. Von den ca. 35 km Hauptdeichen auf den Ostfriesischen Inseln sind heute noch ca. 11 km zu verstärken. Die Gewinnung von Kleiboden für die Deichdecke ist auf den Inseln nicht möglich. Im Zuge eines gezielten, langfristigen Managements wird gebaggerter Schlick aus der Fahrwasser- und Hafenunterhaltung auf den Inseln zwischengelagert und aufbereitet, um diesen ressourcenschonend für den Deichbau einsetzen zu können. Zusätzlich benötigter Klei wird vom Festland auf die Inseln transportiert. Die mögliche Verwendung von sandigem Baggertgut für den Deichkern aus der Fahrwasserunterhaltung wird intensiv mit den beteiligten Bundes- und Landesbehörden sowie Reedereien abgestimmt, um die Entnahmen aus dem Wattenmeer zu minimieren.

Die Inseldeiche sind auf 5 km Länge als scharliegender Deich und 30 km als Vorlanddeich ausgebaut. Zur Sicherung der Vorländer gegen Erosion werden derzeit auf ca. 13,6 lfd. km Küstenlänge Lahnungssysteme erhalten. Ein Ausbau des Lahnungssystems ist notwendig, um die meist künstlich gewonnenen schmalen Deichvorländer zu sichern.

5 Begleituntersuchungen

Als ein hochdynamisches System sind die Ostfriesischen Inseln, die Seegaten und deren Watteinzugsgebiete dauernden Veränderungen unterworfen, die direkte Rückwirkungen auf die Funktionalität der Küstenschutzanlagen und damit die Gewährleistung der Schutzziele haben können. Ebenso ist die Wechselwirkung von Bauwerken mit deren Umfeld von großer Bedeutung. Einer zielgerichteten Erfassung und Auswertung von morphologischen und hydrologischen Messgrößen mit Hilfe von spezifizierten Messprogrammen kommt deshalb eine besondere Bedeutung zu, um Prozesse beurteilen und prognostizieren zu können. Wesentliche Instrumente hierfür sind

- die terrestrische Vermessung der Strände, Dünen- und Vorländer in Referenzprofilen sowie ergänzend eine flächendeckende Erfassung von besonders dynamischen Strand- und Dünenbereichen, Watt- und Vorlandflächen über flugzeuggestützte Laser-Scanner Verfahren,
- eine Erfassung der Bathymetrie durch regelmäßige Peilungen in enger Abstimmung zwischen den zuständigen Bundes- und Landesverwaltungen,
- Luftbildbefliegungen zur Analyse der Veränderung der hochdynamischen Ebbdeltas,
- die Erfassung von hydrologischen Messgrößen auch als Grundlage für den Sturmflutwarn-dienst.

Diese Messungen bilden die notwendige Basis für eine Überprüfung der Funktionalität von Küstenschutzanlagen sowie die Umsetzung wirtschaftlicher und nachhaltiger Küstenschutzmaßnahmen und zukünftiger Planungen.

6 Literatur:

- [1] BEZIRKSREGIERUNG WESER-EMS (1997): Generalplan Küstenschutz für den Regierungsbezirk Weser-Ems. Oldenburg.
- [2] CPSL (2001): Trilateral working group Coastal Protection and Sea Level Rise. Final Report. Wadden Sea Eco System No. 13.
- [3] EG: Empfehlung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Umsetzung einer Strategie für ein integriertes Management der Küsten in Europa (2002): Amtsblatt der EG L1 48/24.
- [4] ERCHINGER, H. F.; THORENZ, F.(1999): Schutz der Ostfriesischen Inseln. In: Kramer, J. et al.: 1000 Jahre Leben mit dem Wasser in Niedersachsen Band II, Leer.
- [5] NDG: Niedersächsisches Deichgesetz vom 23.04.2004, Nds. GVBl. S. 83.
- [6] NLPG: Gesetz zur Neufassung des Gesetzes über den Nationalpark „Niedersächsisches Wattenmeer“ 11.07.2001, Nds.GVBl. S. 443.
- [7] IPCC (2001): Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2001. Summary for Policymakers. Shanghai.
- [8] STREIF, H. (1990): Das Ostfriesische Küstengebiet. Sammlung Geologischer Führer 57. Berlin, Stuttgart.
- [9] THORENZ, F. (2001): Sanierung und Erweiterung des historischen Deckwerks auf der Insel Norderney. Tagungsband des 3 Kolloquiums des Forschungszentrums Küste. Hannover.
- [10] WaStrG: Wasserstraßengesetz vom 23.08.1990. BGBl S. 1818.

Adresse

Dipl.-Ing. Frank Thorenz
Baudirektor beim Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz – Betriebsstelle Norden
Jahnstraße 1
26506 Norden
E-Mail: frank.thorenz@ewetel.net

Dynamisches Deichsicherheitssystem in Schleswig-Holstein

Bernd Probst

Innenministerium Schleswig-Holstein , Kiel

Summary

In the federal state of Schleswig-Holstein a new Dike Safety System was developed and implemented, which significantly improves the safety management of the sea dikes. Essential features are: a safety criterion which is expressing the actual safety in one value considering attacking forces and the layout of the dike, and further the splitting of the dike safety management into the procedures safety check and design. With the periodic safety check critical changes –even climatic changes- can be detected in time. With the normative criterion wave overtopping new possibilities of designing a dike are offered.

Zusammenfassung

In Schleswig-Holstein wurde mit dem Dynamischen Deichsicherheitssystem ein neues Instrument entwickelt und eingeführt, mit dem das Sicherheitsmanagement der Deiche deutlich verbessert wurde. Wesentliche Merkmale sind: die Wahl eines Sicherheitskriteriums, welches mit einem Wert die jeweilige Sicherheit unter Berücksichtigung von angreifenden Kräften und Deichgeometrie angibt, sowie die Aufteilung des Deichsicherheitsmanagements in die Vorgänge Sicherheitsüberwachung und Bemessung. Durch die regelmäßige Überprüfung des aktuellen Sicherheitsstatus können kritische Veränderungen –auch durch Klimafolgen- rechtzeitig erkannt werden. Mit der Wahl des Wellenüberlaufs als maßgebendes Sicherheitskriterium ergeben sich neue Möglichkeiten der Profilgestaltung bei der Deichbemessung.

1 Einleitung

In Schleswig-Holstein liegen 3.800 km² bzw. 25% der Landfläche weniger als 5 m (Westküste) bzw. 3 m (Ostküste) über dem Meeresspiegel und könnten daher bei extremen Sturmhochwassern potentiell überflutet werden. Um Überschwemmungen zu verhindern, wird insbesondere in den Marschen an der Westküste seit fast 1.000 Jahren mit dem Anfang des Deichbaus intensiv Küstenschutz betrieben. Durch diese Anstrengungen sind heute die schleswig-holsteinischen Marschen mit Deichen vor Sturmfluten geschützt. Sozioökonomische Nutzungen wie Besiedlung, Landwirtschaft oder industrielle Produktion in diesen Küstenniederungen wurden erst durch den Küstenschutz ermöglicht und können langfristig nur hinter sicheren Deichen stattfinden.

2 Was sind sichere Deiche?

Während die ersten Deiche vor fast 1000 Jahren nur Sommerhochwasser von landwirtschaftlichen Flächen abhalten sollten, sind sie heute dafür bestimmt, riesige Sachwerte und Menschen zuverlässig vor Überflutungen durch Sturmfluten zu schützen. Noch bis vor etwa 50 Jahren wollte man Deiche

gegen die „denkbar höchste Flut“ bauen. Heute weiß man, dass dies nicht möglich ist. Die heutigen Deiche bieten eine sehr hohe, aber keine absolute Sicherheit.

Die Sicherheit einer Küstenschutzanlage wird charakterisiert durch verschiedene Parameter:

- Angabe der Eintrittswahrscheinlichkeit eines abzuwehrenden Wasserstandes und der dabei zu erwartenden Welleneinwirkungen
- Beschreibung des Profils (Höhe, Neigungen)
- Wahl der Konstruktion und des Materials

Aufgabe der Ingenieure ist es, die zu erwartenden Belastungsparameter zu ermitteln und unter Berücksichtigung von Deichprofil, Deichmaterial und Deichkonstruktion den Grad der Deichsicherheit anzugeben. Dies sind objektiv messbare und bewertbare Parameter. Dennoch reichen sie für Sicherheitsdiskussionen oft nicht aus, da das Gefühl der Sicherheit eine Frage der Wahrnehmung, also subjektiv ist. Daher lässt sich mit wissenschaftlich-technischen Methoden keine erforderliche Sicherheit bestimmen. Das erforderliche Maß der Sicherheit oder das hinzunehmende Risiko muss vielmehr in einem gesellschaftlichen Meinungsbildungsprozess unter Beteiligung der Betroffenen ermittelt werden. In Schleswig-Holstein sind die Grundsätze von Deichsicherheit und Bemessung sowie der Sicherheitsstandard der Landesschutzdeiche im jeweiligen Generalplan Küstenschutz dargestellt. Die langjährige Entwicklung des Sicherheitsstandards wurde allgemein akzeptiert. Der Generalplan Küstenschutz 2001 ist im Entwurfsstadium einem breiten Beteiligungsverfahren (Partizipation) unterzogen worden. So ist er im hochrangigen Küstenschutzbeirat und in 5 Regionalkonferenzen diskutiert worden.

3 Sicherheitsstandard

Entsprechend dem Wandel der Erkenntnisse hat sich auch die Bemessung der Deiche entwickelt. Das alte, lang geübte Verfahren – 50 cm Zuschlag auf die höchste bekannte Sturmfluthöhe – ist inzwischen durch verschiedene differenzierte Verfahren, mit denen Prognosen erstellt werden können, abgelöst worden.

Ausführungen zum Sicherheitsstandard finden sich im bisherigen Landeswassergesetz Schleswig-Holstein § 64 und 65: „Landesschutzdeiche sind Deiche in der ersten Deichlinie im Einflussbereich der Nord- und Ostsee, die dazu dienen, ein Gebiet vor allen Sturmfluten zu schützen“. Auch diese Formulierung beinhaltet keine absolute, sondern eine im Rahmen des Machbaren (wirtschaftlich und technisch) höchstmögliche Sicherheit. Ein definierter Sicherheitsstandard ist daraus nicht abzuleiten.

Mit dem ersten Generalplan Küstenschutz von 1963 ist in Schleswig-Holstein ein differenziertes Bemessungsverfahren eingeführt worden. Die Sollabmessung von Landesschutzdeichen setzen sich zusammen aus:

- dem maßgebenden Sturmflutwasserstand (Bemessungswasserstand),
- der maßgebenden Wellenaufbauhöhe und
- einem Sicherheitsmaß.

3.1 Maßgebender Sturmflutwasserstand

Der maßgebende Sturmflutwasserstand hatte drei Bedingungen zu genügen:

- er sollte eine Eintrittswahrscheinlichkeit von $n = 0,01$ (einmal in 100 Jahren), bezogen auf das Jahr 2000 haben (statistisches Verfahren),

- er sollte nicht niedriger sein, als der auf heute bezogene Wasserstand der bisher höchsten Sturmflut (Vergleichswertverfahren), und
- er sollte nicht niedriger sein als die Summe des größten beobachteten Windstaus über Thw und des möglichen höchsten Springtidehochwassers (Einzelwertverfahren).

Es sind also drei Werte ermittelt worden, aus denen im Rahmen von Plausibilitätsbetrachtungen der „maßgebende Sturmflutwasserstand“ als Bemessungswasserstand bestimmt wurde. Dieses Prinzip galt grundsätzlich sowohl für die Nordsee- als auch für die Ostseeküste. Die Ergebnisse waren allerdings unterschiedlich. Für die Nordseeküste ergab das statistische Verfahren die ungünstigsten Werte. Für die Ostseeküste wurde der Sturmflutwasserstand von 1872 - zuzüglich des seit dem eingetretenen Meeresspiegelanstieges gewählt. Der künftig zu erwartende Meeresspiegelanstieg wurde addiert und das Ergebnis als Bemessungswasserstand festgelegt.

3.2 maßgebende Wellenaufbauhöhe

Die maßgebende Wellenaufbauhöhe wurde an der Westküste aus Treibselmessungen an den alten, unverstärkten Deichen mit steileren Böschungen ermittelt und ohne weitere Korrektur bei den neuen, flacheren Profilen angewendet. Dies ergab Werte, die im Allgemeinen auf der sicheren Seite liegen. Für die Ostseeküste lagen nur wenige Seegangsmessungen vor. Aus diesen Daten sowie in Teilbereichen aus Seegangsvorhersageverfahren und Modellversuchen wurden die maßgebenden Wellenaufbauhöhen ermittelt.

3.3 Sicherheitsmaß

In die Bemessungswerte wurde ein Zuschlag von 0,5 m als Sicherheitsmaß aufgenommen. Dieser Zuschlag wurde 1963 als „Sicherheits- und Sackmaß“ eingeführt, das dem Ausgleich von Gefahren dient, „welche aus dem Untergrund, dem Zusammendrücken des Deichkörpers selber und aus Vorgängen im Zusammenhang mit der Küstensenkung bzw. der säkularen Wasserstandshebung drohen.“

4 Bemessung

Die Bestickhöhe als Sollhöhe ergab sich durch Addition des maßgebenden Sturmflutwasserstands (Bemessungswasserstand), der maßgebenden Wellenaufbauhöhe und des Sicherheitsmaßes. Da die Wellenaufbauhöhe von den Böschungsneigungen abhängt, bezog sich die „maßgebende Wellenaufbauhöhe“ auf ein im Generalplan Küstenschutz beschriebenes Standardprofil (Beispiel Abb.1). Als Bemessung ist daher die Bestickhöhe in Verbindung mit dem Standardprofil anzusehen.

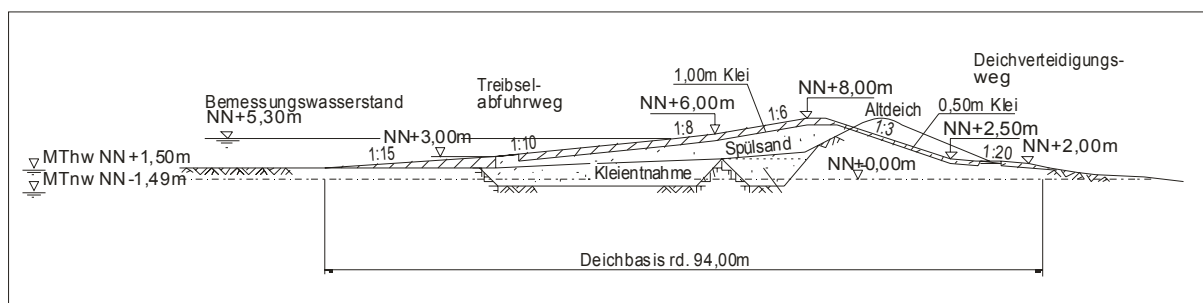


Abb.1: Beispiel eines Standardprofils (Generalplan Küstenschutz 1986)

Nach den Sturmfluten von 1976 und 1981 wurde die Bestickhöhe beibehalten. Die Böschungen des Standardprofils wurden jedoch abgeflacht. Außerdem wurden die zu erwartenden Setzungen für jeden Verstärkungsabschnitt individuell ermittelt und als Setzungsüberhöhung eingebaut. Dennoch wurde

das Sicherheitsmaß von 0,5 m erhalten. Daraus ergab sich der im Generalplan Küstenschutz von 1986 festgelegte Sicherheitsstandard.

5 Dynamisches Deichsicherheitssystem

5.1 Bewertung des bisherigen Verfahrens

Das oben beschriebene Verfahren hat sich bewährt und war allgemein anerkannt. Dennoch haben sich im Lauf der Zeit einige Schwachpunkte offenbart:

- a. Variationen der Böschungsneigungen können sinnvoll oder erforderlich sein, wenn z.B. ein breiteres Profil aus erdstatischen oder ein schmaleres Profil wegen begrenzter Baubreite oder zur Eingriffsminimierung gewählt werden muss. In diesen Fällen bietet es sich an, die Kronenhöhe entsprechend anzupassen. Da die Bestickhöhe nur in Verbindung mit dem Standardprofil galt, konnte der direkte Zusammenhang zwischen Böschungsneigungen und Wellenauflauf jedoch nicht für Variationen des Profils genutzt werden.
- b. Da es nur die im Generalplan Küstenschutz festgelegte Sollhöhe gab, konnte die Veränderung der aktuellen Deichsicherheit durch Meeresspiegelanstieg und Deichsetzungen nicht festgestellt werden.
- c. Auswirkungen eines vom angenommenen Verlauf abweichenden Meeresspiegelanstiegs z.B. durch Klimafolgen können nicht berücksichtigt werden.

5.2 Entwicklung eines neuen Verfahrens

Für den Generalplan Küstenschutz 2001 ist mit dem nachfolgend beschriebenen dynamischen Deichsicherheitssystem ein neues flexibleres Verfahren entwickelt worden. Es verbessert nicht nur die Bewertung und Bemessung von Deichen, sondern passt die hydrologischen Grundlagen der zwischenzeitlichen Entwicklung an. Da der bisherige Sicherheitsstandard sich bewährt hat und bei der betroffenen Bevölkerung voll akzeptiert ist, wird er prinzipiell beibehalten.

Die Grundideen sind:

- Wahl eines Sicherheitskriteriums, welches mit einem Wert die jeweilige Sicherheit unter Berücksichtigung von angreifenden Kräften und Deichgeometrie angibt.
- Aufteilung des Deichsicherheitsmanagements in die Vorgänge Sicherheitsüberwachung und Bemessung

5.2.1 Sicherheitskriterium

Ein Deich hat die Aufgabe, Wasser am Eindringen in die geschützte Fläche zu hindern. Er kann in folgenden Fällen versagen:

- der Deichkörper wird durch Strömungs- und Wellenkräfte zerstört. Dieser Schadensursache wird durch konstruktive Maßnahmen wie Wahl von Material und Böschungsneigungen sowie durch die Qualität von Bau und Unterhaltung begegnet („physikalische Sicherheit“).
- Die Sturmfluthöhe übersteigt die Deichkrone so stark, dass überströmendes Wasser den Deich von Innenböschung und Krone zerstört. Dieses Versagenskriterium wird durch das Bestick, d.h. Höhe und Querschnittsgestaltung bestimmt („Besticksicherheit“). Ein gewisser Wellenüberlauf gefährdet den Deich nicht. Daher ist hier die Festlegung eines zulässigen Wertes erforderlich.

Der Wellenüberlauf wird bestimmt durch die angreifenden Komponenten Wasserstand und Wellenhöhe und die abwehrenden Komponenten Böschungsneigungen, deren Höhenlage und Deichkronenhöhe. Mit den verfügbaren Methoden ist es möglich, den Wellenüberlauf sowohl als Istwert für vorhandene Deiche als auch als Sollwert für geplante Deiche zu ermitteln und mit dem zulässigen Wert zu vergleichen. Damit ist der Wellenüberlauf ein geeignetes Sicherheitskriterium, welches mit einem Wert die jeweilige Sicherheit unter Berücksichtigung von angreifenden Kräften und Deichgeometrie angibt.

5.2.2 Sicherheitsüberwachung

Regelmäßig, in etwa 10- bis 15-jährlichem Rhythmus, wird der Sicherheitsstatus der vorhandenen Deiche überprüft, indem der Istwert des Wellenüberlaufes bzw. des Wellenauflaufes bei einer dem Sicherheitsstandard entsprechenden Sturmflut ermittelt wird. Für die gewässerkundliche Überprüfung des Sicherheitsstatus wird zunächst möglichst an jedem zu überprüfenden Deichabschnitt für das jeweilige Überprüfungsjahr (2010, 2020, etc.) ein so genannter **Referenzwasserstand** ermittelt. Das ist derjenige Wasserstand, der bei einer Sturmflut eintritt, die bei dem festgelegten und allgemein anerkannten Sicherheitsstandard zu erwarten ist. Zusätzlich ist der entsprechende Wellenauflauf- bzw. -überlauf zu bestimmen.

5.2.2.1 Referenzwasserstand

Für die *Westküste* ist dies unter Berücksichtigung der drei unter 3.1 genannten und nach wie vor gültigen Bedingungen der Wasserstand mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von $n = 0,01$ bezogen auf das Überprüfungsjahr, für die Ostseeküste der Sturmflutwasserstand von 1872 zuzüglich des Meeresspiegelanstieges bis zum Überprüfungsjahr. Ein künftiger Meeresspiegelanstieg wird nicht berücksichtigt, da nur der aktuelle Zustand zu bewerten ist.

Als Überprüfungsjahr wurde das Jahr 2010 festgelegt, da dieses das Jahr der nächsten Überprüfung ist. Bezogen auf dieses Jahr wurden für neun Pegel Referenzwasserstände ermittelt. Da nur der aktuelle Zustand, aber keine Prognose, erforderlich ist, wurde der statistische Wert mit $n = 0,01$ aus HThw-Zeitreihen der letzten 50 Jahre (1950 - 1999) ermittelt. Eine solche Stichprobe ist für wesentlich mehr Pegelorte verfügbar als längere Zeitreihen. Da eine Extrapolation in die Zukunft nur für jeweils 10 Jahre (Termin der nächsten Überprüfung) erforderlich ist, reicht eine 50-jährige Stichprobe aus. Die Tatsache, dass diese Reihe durch die Zunahme der Sturmfluten in den letzten Jahrzehnten gekennzeichnet ist, gibt dem Wert zusätzliche Sicherheit. Für die Elbe wurden die von einer Arbeitsgemeinschaft der Elbanliegerländer ermittelten Werte für die Bestimmung des Referenzwasserstandes 2010 verwendet. Die ermittelten Referenzwasserstände liegen etwa 0,2 bis 0,4 m über den bisherigen der Bemessung zugrunde gelegten „maßgebenden Sturmflutwasserständen“.

Die an der *Ostseeküste* seltener auflaufenden Sturmfluten mit sehr hohen Wasserständen erschweren die Bestimmung von Eintrittswahrscheinlichkeiten für Extremwasserstände.

Eine Eintrittswahrscheinlichkeit lässt sich für diese Ereignisse mit statistischen Methoden zwar formal berechnen, jedoch weichen die bekannten Extremsturmfluten erheblich vom übrigen Datenkollektiv ab und passen damit nicht in das Kollektiv der übrigen Werte. Dieser Umstand mindert die Verwertbarkeit der statistischen Methode für Extremwerte erheblich und lässt das Ergebnis als fragwürdig erscheinen. Der Wasserstand mit der statistisch ermittelten Eintrittswahrscheinlichkeit von einmal in 100 Jahren liegt je nach Örtlichkeit etwa 0,8 bis 1,0 m unter dem Sturmflutwasserstand von 1872.

Daher wird unter Berücksichtigung der drei unter 3.1 genannten Bedingungen für den Bereich der Ostsee die höchste beobachtete Sturmflut von 1872 für die Ermittlung des Referenzwasserstandes benutzt. Wegen der geringen Anzahl zuverlässiger Pegel aus dieser Zeit sind einige Werte für die

Landesschutzdeiche durch Vergleichsrechnungen und Interpolationen gewonnen worden. Für die Ermittlung des Referenzwasserstandes 2010 sind die 1872 beobachteten Scheitelwasserstände noch um das Maß des säkularen Wasserstandsanstiegs zu erhöhen. Neuere Trendanalysen bestätigen die Ergebnisse etwas älterer Untersuchungen, wonach der Meeresspiegel an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste seit 1872 im Mittel um etwa 15 cm pro Jahrhundert angestiegen ist. Damit wird der Referenzwasserstand aus den Scheitelwasserständen der Sturmflut von 1872 und einer säkularen Meeresspiegelhebung von 21 cm für die Zeit von 1872 bis 2010 bestimmt.

5.2.2.2 Wellenauflauf- bzw. -überlauf

Zur Überprüfung des Sicherheitsstatus der Deiche ist für den Referenzwasserstand der Wellenauflauf- bzw. -überlauf zu bestimmen. An der Westküste stehen als Ausgangsdaten Wellen- und Wellenaufmessungen sowie zahlreiche Treibselmessungen zur Verfügung. Für die Ermittlung der maßgebenden Seegangparameter (Wellenhöhe, -periode) entlang der Deichlinien existieren verschiedene Verfahren.

Für den Generalplan wurde zunächst ein verwaltungseigenes Verfahren verwendet, bei dem aus Wellenauflauf- und Treibselmessungen die Seegangparameter am Deichfuß ermittelt wurden. Diese wurden dann auf die gesamte Deichstrecke extrapoliert. Wie sich später herausstellte, hat dieses Verfahren einige Schwächen, weil die Treibselmessungen nicht genügend zuverlässig sind und die Extrapolation auf längere Strecken problematisch ist. Daher wird daneben ein numerisches Modell (SWAN) für die Ermittlung der Seegangparameter benutzt, dessen Ergebnisse mit gemessenen Werten validiert werden. Hierfür sind allerdings nicht genügend Naturwerte vorhanden, so dass auch diese Methode nur eingeschränkt praxisreif ist.

Der Wellenauflauf wird auf der Grundlage des international gebräuchlichen Berechnungsansatzes nach HUNT ermittelt. Der Wellenüberlauf wird auf der Basis des Verfahrens nach VAN DER MEER berechnet. Auch hier sind bei der Wahl der Beiwerte zwei Wege beschritten worden. Zum einen ist ein verwaltungseigenes Verfahren angewandt worden, bei dem eigene Beiwerte definiert wurden. U.a. wurde die Deichgeometrie nur oberhalb des Ruhewasserspiegels angesetzt. Die Berechnung erfolgte mit Hilfe des Programms MATHCAD.

Alternativ wird das in der EAK 2002 beschriebene Verfahren verwendet, welches zum Teil andere Beiwerte und als Deichgeometrie den Böschungsbereich von $1,5 \cdot H_s$ oberhalb und unterhalb des Ruhewasserspiegels benutzt.

Es stellte sich heraus, dass die Ergebnisse an einigen Positionen stark voneinander abwichen, ohne

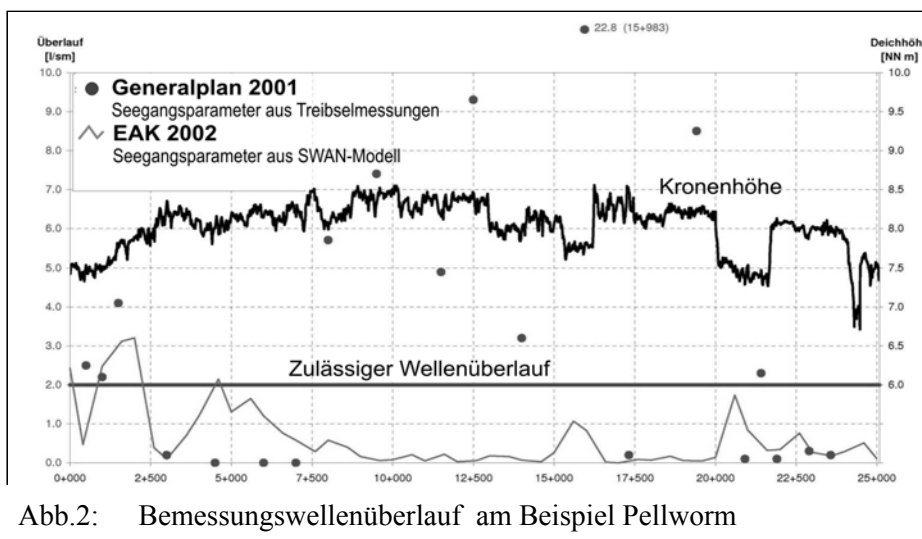


Abb.2: Bemessungswellenüberlauf am Beispiel Pellworm

das eine plausible Erklärung gefunden wurde. In Abb. 2 ist der nach beiden Methoden ermittelte Bemessungswellenüberlauf für den Referenzwasserstand am Beispiel der Insel Pellworm dargestellt. Hier ist die Wissenschaft gefordert, die Erkenntnisse und Methoden zu verbessern.

5.2.2.3 Durchführung der Überprüfung

Aus dem Referenzwasserstand und der zugehörigen Wellenaufbauhöhe ergibt sich für das individuelle Deichprofil die Referenzhöhe für das jeweilige Überprüfungsjahr. Falls die vorhandene Deichhöhe geringer ist als die ermittelte Referenzhöhe, findet beim Eintreten der maßgeblichen Sturmflut ein Wellenüberlauf über die Deichkrone statt (Abb. 3).

Nach derzeitigem Kenntnisstand kann ein Deich mit einer 1:3 geneigten, begrünten Innenböschung einer Überlaufmenge von 2 Liter pro Sekunde und laufendem Meter ohne Schäden widerstehen. Dieser Wert wird vorläufig als obere Grenze für einen zulässigen Überlauf festgelegt. Neue Erkennt-

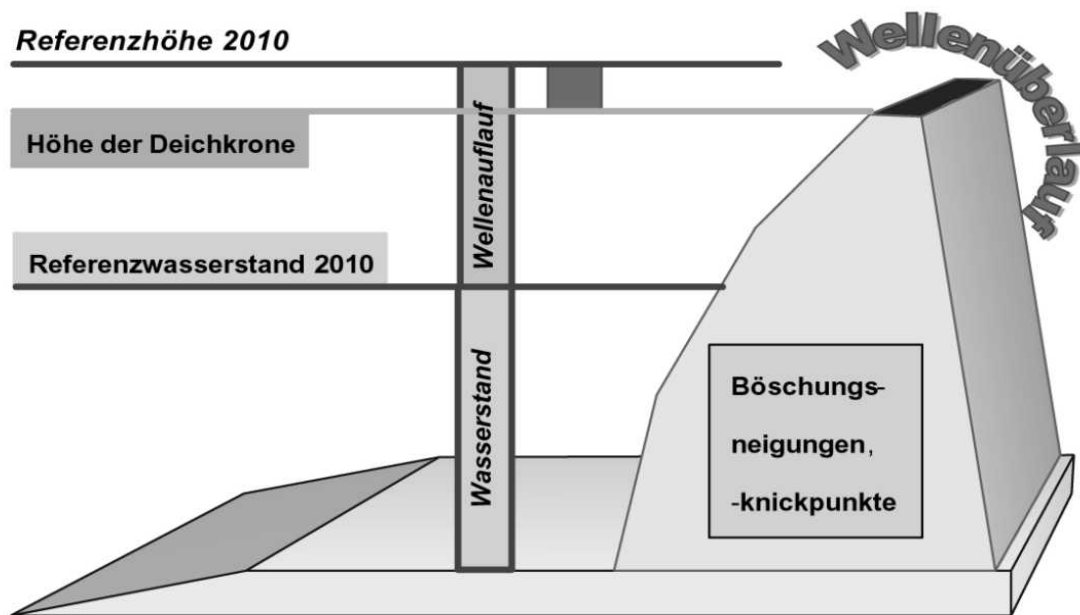


Abb. 3

nisse zur Deichstabilität können eine Korrektur dieses Wertes bedingen. Solange der Wellenauflauf die Deichkrone nicht erreicht oder der Wellenüberlauf unter 2 Liter pro Sekunde und laufendem Meter bleibt, gilt der Deich in Bezug auf sein Bestick als sicher.

An der Ostseeküste sind gemessene Seegangswerte nur an wenigen Stellen vorhanden. Verwertbare Messungen zum Wellenauflauf für den Ostseeküstenbereich liegen nicht vor. Damit lassen sich nur theoretische bzw. geschätzte Maße für den Wellenauflauf zur Sicherheitsüberprüfung und Bemessung heranziehen. Im Interesse der Kontinuität wurden nach entsprechender Bewertung die Werte des bisherigen Generalplans Küstenschutz übernommen. An einigen Stellen konnten wegen der geschützten Lage reduzierte Werte angesetzt werden. Wegen der unsicheren Kenntnisse wurden für die Sicherheitsüberprüfung nicht die zulässigen Wellenüberlaufwerte, sondern eine „Referenzhöhe 2010“ verwendet. Diese setzt sich zusammen aus:

- dem Sturmflutwasserstand von 1872,
- der Wasserspiegelhebung für die Zeitspanne von 1872 bis 2010 und
- dem erwarteten Wellenauflauf.

Die Deichkronenhöhe der Landesschutzdeiche wurde mit der Referenzhöhe 2010 verglichen.

Für die Ostseeküste sollen entsprechende Grundlagen im Rahmen eines demnächst anlaufenden KFKI-Projektes geschaffen werden.

5.2.3 Bemessung

Die Deiche, die dem jeweiligen Sicherheitsstandard nicht entsprechen, müssen verstärkt werden. Um den Gefährungsgrad verschiedener Deichabschnitte miteinander vergleichen zu können, werden sie in eine Prioritätenliste für Deichverstärkungen aufgenommen. Bei der Festlegung dieser Liste werden auch weitere technische Kriterien wie Material und Unterhaltungszustand sowie sozioökonomische Angaben wie Einwohnerzahl, Flächengröße und Sachwerte des geschützten Gebietes berücksichtigt.

Für die Deichabschnitte, die mit der Priorität 1 versehen werden, d.h. die vordringlich verstärkt werden müssen, werden Sollabmessungen für die notwendige Deichverstärkung festgelegt.

5.2.3.1 Bemessungswasserstand

Der Bemessungswasserstand wird auf das Baujahr + 100 bezogen. Bei seiner Berechnung sollen unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer des Bauwerks möglichst lange Zeitreihen von nahe gelegenen Pegeln verwendet werden. Ansonsten wird dieser Wasserstand auf die gleiche Weise ermittelt wie der Referenzwasserstand.

Für den Küstenschutz sind die künftigen Entwicklungen des Meeresspiegels und der Sturmtätigkeit, auch im Hinblick auf die lange Nutzungsdauer vieler Küstenschutzanlagen, von größter Bedeutung. Das „Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC“ hat als weltweit anerkanntes Fachgremium zum Thema Klimaänderungen im Jahre 2001 seinen dritten Bericht über den künftigen Klimawandel vorgelegt. In diesem wird davon ausgegangen, dass der globale Meeresspiegel von 1990 bis zum Jahre 2100 in Abhängigkeit des künftigen menschlichen Handelns zwischen 0,09 und 0,88 m ansteigen wird. Daher enthalten die ermittelten Sturmflutwasserstände einen Zuschlag von 0,5 m für künftige Meeresspiegeländerungen. Bei den für die Bemessung gewählten langen Zeitreihen ist der sich ergebende Wasserstand mit $n=0,01$ etwas niedriger als bei den kürzeren Zeitreihen des Referenzwasserstandes. Im Resultat liegt der damit festgelegte Bemessungswasserstand durchgängig 0,3 m höher als der Referenzwasserstand 2010, und 0,3 bis 0,65 m höher als die im alten Generalplan festgelegten maßgebenden Sturmflutwasserstände.

5.2.3.2 Wellenauflauf, Wellenüberlauf

Bei der überwiegend angewandten und bewährten Konstruktion der Innenböschung mit einer Neigung von 1:3 als begrünte Kleiböschung wird ein Wellenüberlauf von 2 Liter pro Sekunde und laufendem Meter zugelassen. Die Berechnung erfolgt wie unter 5.2.2.2 und 5.2.2.3 beschrieben.

5.2.3.3 Durchführung der Bemessung

Die erforderliche Deichhöhe für die Verstärkung ergibt sich aus dem Bemessungswasserstand und dem zugehörigen Wellenauflauf bzw. der Höhe mit einem definierten Wellenüberlauf für das gewählte Profil (Abb. 4).

Bisher war das Standardprofil anzuwenden. Zur Anpassung an unterschiedliche Bemessungshöhen wurde lediglich die Kronenhöhe angepasst (siehe Kap.4). Mit dem neuen Verfahren können Profilgestaltung und Höhe für die jeweiligen Verhältnisse optimiert werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, bei einer entsprechenden konstruktiven Gestaltung (Befestigung) des Profils höhere Überlaufwerte zuzulassen und so die Variationsmöglichkeiten der Profilgestaltung zu vergrößern.

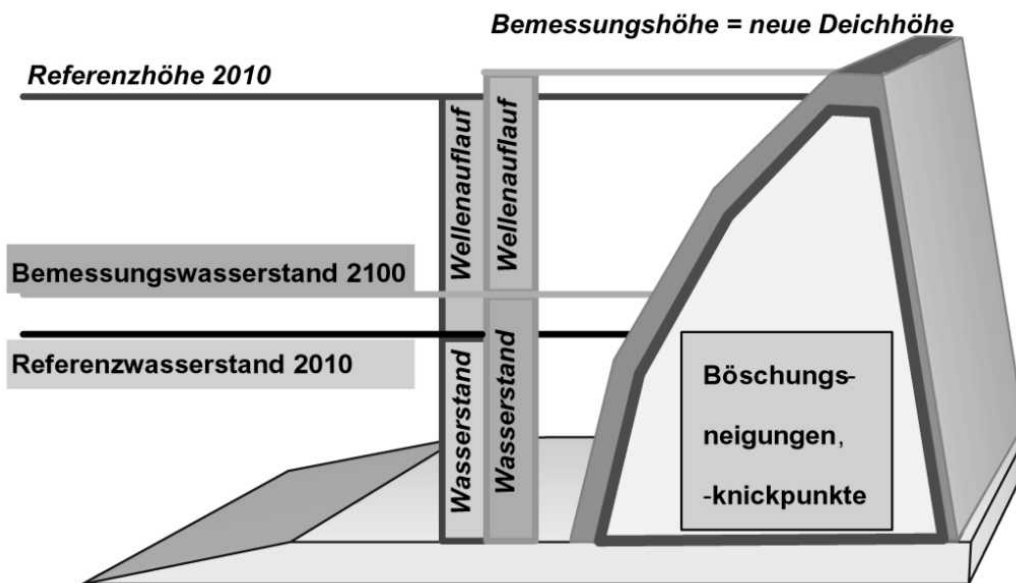


Abb. 4

6 Bewertung

Mit dem neuen Überprüfungsverfahren wird eine stets aktuelle und umfassende Übersicht über den Sicherheitsstatus der Deiche gewährleistet. Neue Erkenntnisse, auch hinsichtlich hydrologischer Werte und Methoden können zeitnah einfließen. Durch die Kenntnis des jeweils aktuellen Sicherheitsstatus im Abstand von 10 Jahren können kritische Verminderungen der Deichsicherheit – auch als Folge von Klimaveränderungen- rechtzeitig erkannt werden.

Im Unterschied zum bisherigen Verfahren sind Wasserstand und Wellenauflauf miteinander verknüpft. Daher können mit dem angewendeten Berechnungsverfahren in der jeweiligen Maßnahmenplanung auch Sollabmessungen für ein vom Regelquerschnitt abweichendes Profil (z.B. Böschungsneigungen, Knickpunkte) berechnet und umgesetzt werden. Hierdurch wird unter Beibehaltung des Sicherheitsstandards ein den örtlichen Verhältnissen angepasstes Herangehen ermöglicht.

Adresse

Bernd Probst
Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung
Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein
Postfach 7129, 24171 Kiel
bernd.probst@im.landsh.de

Timmendorfer Strand und Scharbeutz: zwei Ostseegemeinden schützen sich vor Klimaänderungen

Jacobus Hofstede

Innenministerium des Landes Schleswig-Holstein

Summary

Timmendorfer Strand and Scharbeutz are two renowned coastal holiday resorts situated in the Lübeck Bight along the Baltic Sea coast of the German Federal State of Schleswig-Holstein. With about 1.3 million overnight stays per year, local economy depends strongly on tourist activities. At the same time, almost 6,000 inhabitants live in coastal flood-prone areas and are endangered by extreme storm surges. The main flood defence is the natural beach-ridge with heights of about 2.5 to 4.0 m above German ordnance level (GOL). It is not certain that this flood defence could withstand a "once in a hundred year storm surge" with water levels of 2.1 m above GOL. When sea level rises 50 cm (as predicted for the year 2100) this high water level would be reached every 10 years. The municipalities are responsible for flood defence. Coastal defence authorities have, in the past, pointed out the hazard and proposed technical solutions. Being a sea wall on the beach, this solution was met with great scepticism by local community (strongly depending on the beach as the main tourist attraction). To overcome this deadlock situation, in the year 1999, municipalities and coastal defence authorities agreed upon a new and participative procedure to develop an integrated flood defence solution (Hofstede, 2001).

Zusammenfassung

Die Gemeinden Timmendorfer Strand und Scharbeutz liegen in der Lübecker Bucht (Schleswig-Holstein). Ihre touristische Attraktivität als Küstenorte mit breiten Sandstränden bedingt eine starke Ausrichtung der Wirtschaft auf den Tourismus. Die jährliche Übernachtungszahl liegt bei etwa 1,3 Millionen. Gleichzeitig leben fast 6.000 Einwohner weniger als drei Meter über dem Meeresspiegel bzw. sind bei extremen Sturmhochwassern akut überflutungsgefährdet. Der Hochwasserschutz, vorwiegend ein Strandwall mit Höhen von ca. NN +2,5 bis +4,0 m, ist mangelhaft. Bei einer Jahrhundertflut mit einem Wasserstand von ca. NN +2,1 m wäre es bereits heute fraglich, ob der Strandwall noch als Schutz funktionieren würde. Bei einem Meeresspiegelanstieg von 0,5 m wäre statistisch jedes Jahrzehnt einmal mit einer solchen Flut zu rechnen. Zuständig für den Hochwasserschutz sind die Gemeinden. In der Vergangenheit hat die staatliche Küstenschutzverwaltung mehrmals auf die kritische Lage hingewiesen und technische Vorschläge unterbreitet. Da es sich hierbei um Deiche handelte, war die Haltung der Gemeinden eher skeptisch (ein Deich auf dem Strand schadet der touristischen Attraktivität). Um diese Pattsituation zu durchbrechen wurde im Jahre 1999 mit den Gemeinden vereinbart, ein neues aktives Beteiligungsverfahren zur Entwicklung eines integrierten Hochwasserschutzkonzeptes durchzuführen.

1 Einleitung

Im Jahre 1872 suchte eine verheerende Flut die deutsche Ostseeküste heim. Mit Wasserständen von mehr als drei Metern über Normal Null (NN) wurden auch die Küstenniederungen der Gemeinden Timmendorfer Strand und Scharbeutz in der Lübecker Bucht (Abb. 1) völlig überflutet. In der Niederung von Scharbeutz wurden alle Häuser (zwei!) zerstört und starben 5 Menschen, d.h. alle dortigen

Einwohner (Kiecksee 1972). In der Gemeinde Timmendorfer Strand gab es, bis auf den kleinen Hafen Niendorf (hier starben 4 Menschen), noch keine Siedlung in der Küstenniederung. Heute leben in beiden Gemeinden zusammen 5.667 Menschen weniger als drei Meter über NN. Darüber hinaus sind in den touristisch stark entwickelten Niederungen Sachwerte in Höhe von 1,7 Milliarden Euro konzentriert (Reese *et al.*, 2001). Das Risiko (Tab. 1) ist somit unvergleichbar höher als im Jahre 1872.

	Scharbeutz	Timmendorfer Strand	Summe
Fläche (km ²)	2,79	5,27*	8,06
Einwohner	1.118	4.549	5.667
Sachwerte (Mio. €)	278	1.444	1.722
Arbeitsplätze	297	1.599	1.796
Gästebetten**	1.463	4.464	5.927
*) ohne Himmelsdorfer See			
**) nur Einheiten mit 9 und mehr Gästebetten wurden berücksichtigt.			

Tab. 1: Sozio-ökonomische Parameter für die Küstenniederungen (< NN +3 m) von Scharbeutz und Timmendorfer Strand (Quelle: Reese *et al.*, 2001)

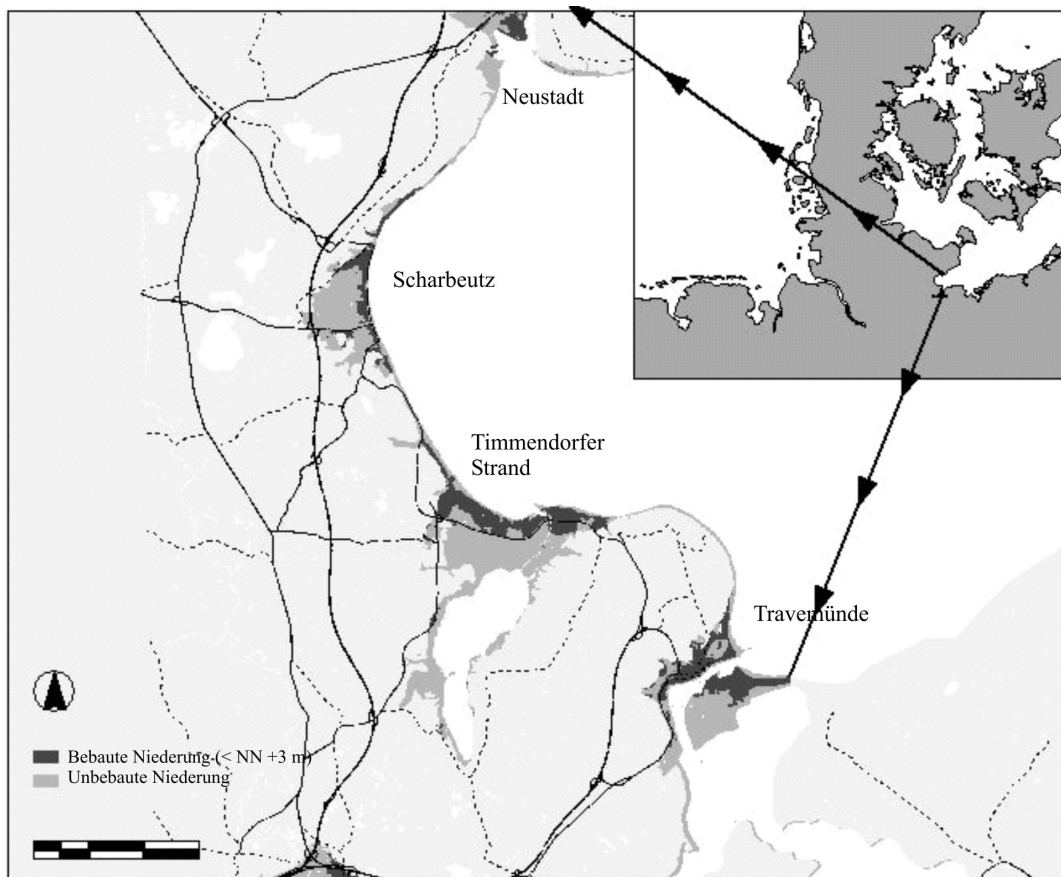


Abb. 1: Übersichtskarte der Gemeinden Timmendorfer Strand und Scharbeutz mit Angabe der besiedelten und unbesiedelten überflutungsgefährdeten Bereiche (< NN +3 m)

Die Niederrückküste hat in den Gemeinden eine Länge von etwa 10 km. Im Inneren einer Bucht gelegen, hat die Küste eine ausgeglichene Sedimentbilanz, d.h., Erosionsschutz (Küstensicherung) ist nicht erforderlich. Der Schutz vor Hochwasser wird vorwiegend durch einen auf Nehrungen aufgesetzten Strandwall mit gelegentlicher Dünenbildung realisiert, deren Oberkante zwischen NN +2,5 und NN +4 m liegt. Wie aus der Abbildung 2 hervorgeht, hat ein Wasserstand von NN +2,1 m am Pegel Neustadt (nördlich vom Scharbeutz) einen statistischen Wiederkehrintervall von 100 Jahren. Unter Berücksichtigung des Wellenauflaufes muss bei diesem Wasserstand an den niedrigen Stellen des Strandwalles mit einem erheblichen Wellenüberlauf gerechnet werden. Im ungünstigen Fall ist auch ein Versagen des Hochwasserschutzes nicht auszuschließen. Das Intergovernmental Panel on Climate Change rechnet für dieses Jahrhundert mit einem Meeresspiegelanstieg zwischen 0,09 und 0,88 m; der Mittelwert liegt knapp unter 0,5 m (IPCC, 2001). In der Abb. 2 ist die Folge skizzenhaft dargestellt. Mit einem entsprechenden Hochwasserstand müsste danach im Jahre 2100 alle 10 Jahre gerechnet werden.

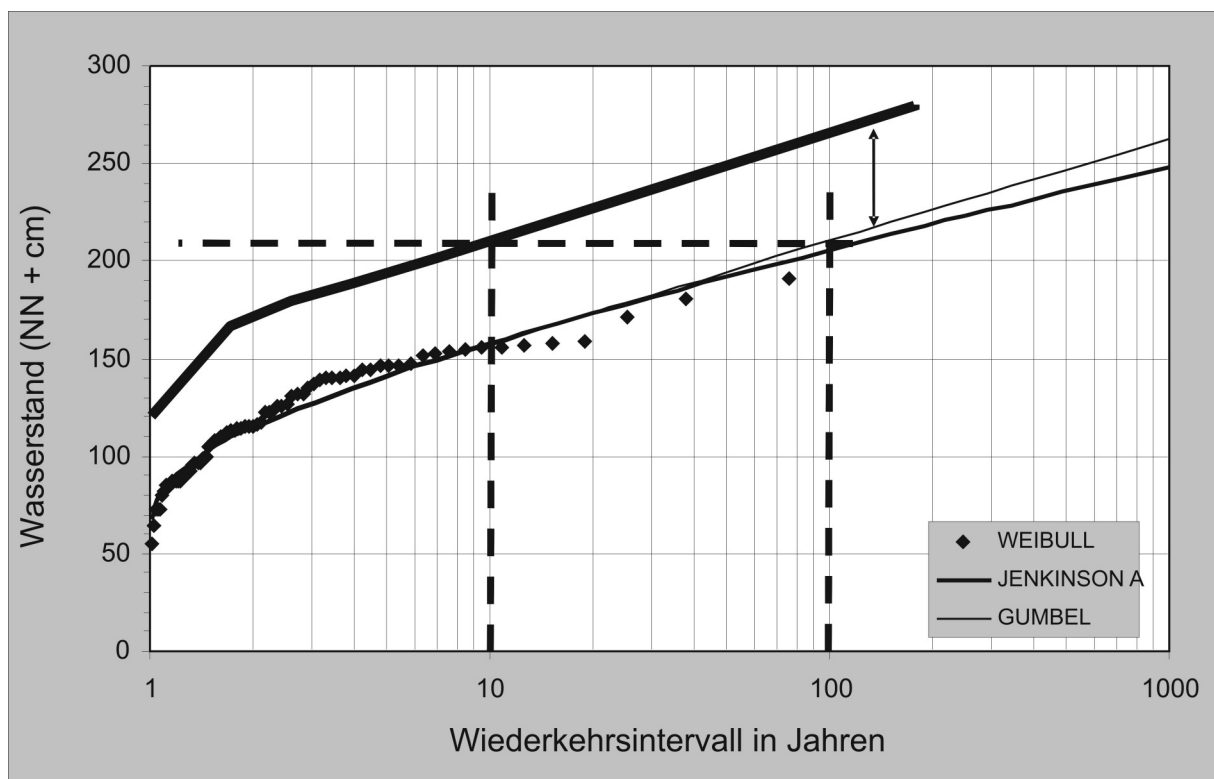


Abb. 2: Häufigkeitsverteilung der jährlichen Höchstwasserstände am Pegel Neustadt für den Zeitraum 1921 – 1996 (Wasserstände bezogen auf das Jahr 2000). Skizzenhaft dargestellt sind die Folgen eines Meeresspiegelanstieges von 0,5 m.

Die staatliche Küstenschutzbehörde hat im Jahre 1961 den Gemeinden einen ersten Vorschlag zur Verbesserung des Hochwasserschutzes gemacht. Er bestand darin, im Strand- und Strandwallbereich einen Deich zu errichten. Auch spätere Vorschläge der Fachbehörden sahen ähnliche Lösungen vor. Die damals wie heute für den Hochwasserschutz zuständigen Gemeinden lehnten diese Lösung ab, würde sie doch die wirtschaftliche Grundlage (zu) stark beeinträchtigen. Die touristische Attraktivität beider Badeorte (Übernachtungszahl: ca. 1,3 Millionen pro Jahr) ist zum größten Teil durch die breiten Sandstrände gegeben. Bei einem Besuch des für den Küstenschutz in Schleswig-Holstein zuständigen Ministers in den Gemeinden im Jahre 1999 wurde die unbefriedigende Situation erörtert. Es wurde vereinbart, in mehreren Schritten ein von allen Beteiligten getragenes Küstenschutzkonzept für die

Gemeinden zu entwickeln. Um die Erfordernis der Maßnahme zu dokumentieren wurde eine mikroskalige Ermittlung verschiedener sozialer und wirtschaftlicher Parameter (Tab. 1) durchgeführt. Mit diesen Daten und den naturwissenschaftlichen Grundlagen (z.B. Abb. 2) wurde ein innovatives Verfahren zur aktiven Bürgerbeteiligung, die Sensitivitätsanalyse, angewandt. Die in dieser Analyse von den Einwohnern erarbeiteten Vorschläge dienten dann als Basis für einen Ideenwettbewerb unter ausgewählten Planungsbüros. Diese drei Schritte (Wertermittlung, Sensitivitätsanalyse, Ideenwettbewerb) wurden erstmalig in der Küstenschutzplanung angewandt. Als Beispiel für aktive Bürgerbeteiligung im Küstenschutz wird nachfolgend die durchgeführte Sensitivitätsanalyse beschrieben und aus der Sicht des Verfassers bewertet.

2 Die Sensitivitätsanalyse

Die moderne Gesellschaft verlangt zunehmend umfassendere und mehr aktive Beteiligung der Betroffenen an Planungs- und Entscheidungsprozeduren (Fürst *et al.*, 1998). Das bestehende Planfeststellungsverfahren beinhaltet schon verschiedene Schritte zur Berücksichtigung von privaten und öffentlichen Interessen:

1. Umweltverträglichkeitsprüfung bei zu erwartenden signifikanten Auswirkungen auf Natur und Umwelt,
2. schriftliche Beteiligung der anerkannten Umweltverbände bei zu erwartenden signifikanten Auswirkungen auf Natur und Umwelt,
3. schriftliche Beteiligung der betroffenen Verwaltungen,
4. Beteiligung der privat Betroffenen durch Auslegung der Pläne in den betroffenen Gemeinden mit der Möglichkeit zur schriftlichen Stellungnahme (mit Bekanntgabe der Auslegung in der lokalen Presse),
5. Termin, in dem alle schriftlich eingegangenen Einwände mit den Beteiligten erörtert werden,
6. Entscheidung durch die Planfeststellungsbehörde nach Berücksichtigung aller Interessen für und wieder den Plan. Seine Entscheidung soll alle öffentlichen und privaten Interessen mit dem Ziel einer gerechten Abwägung berücksichtigen,
7. Klagerecht der Beteiligten gegen diese Entscheidung.

Die hier aufgezeigten Beteiligungsmöglichkeiten sind jedoch alle reaktiv, d.h., der Plan ist bereits im Entwurf durch den Bauträger erstellt. Öffentlich und private Betroffene können „nur“ noch reagieren. Mit Ausnahme der ländlichen Struktur- und Entwicklungsanalyse (LSE) in Schleswig-Holstein sowie dem LEADER+ Programm der EU existieren kaum formalisierte Instrumente für Bürger wie auch für NGOs aktiv bei der Erstellung der Entwürfe bzw. aktiv an der Gestaltung ihres Umfeldes mitzuwirken. In der Konsequenz sind die Reaktionen der Betroffenen oft negativ und kann eine aufwendige und teure Anpassung der ursprünglichen Pläne erforderlich werden.

Wie in anderen öffentlichen Sektoren wird diese Forderung einer aktiven Mitwirkung in der Planung auch in der schleswig-holsteinischen Küstenschutzverwaltung integriert. Als Instrument der Information und Kommunikation wurde 1999 der Beirat Integriertes Küstenschutzmanagement mit Erfolg installiert (Hofstede und Hamann, 2002). In einem Pilotprojekt wurden darüber hinaus die Möglichkeiten und Grenzen der aktiven Beteiligung mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse untersucht. Dieses Verfahren basiert auf der Anwendung des Sensitivitätsmodells nach Prof. Vester ©. Es eignet sich insbesondere als Grundlage für eine nachhaltige Umsetzung von Küstenschutzmaßnahmen, da im Rahmen des Systemansatzes: (1) alle relevanten Lebensbereiche integriert werden, (2) deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden, und (3) allen Betroffenen vor Ort die Teilnahme am Diskussions- und Ar-

beitsprozess ermöglicht wird. Die Sensitivitätsanalyse ist damit eine stark integrative Methode. Der letzte Punkt deutet auf eine wichtige Funktion dieses Verfahrens hin. Es soll insbesondere die Interessen der Beteiligten vor Ort aktiv einbeziehen und dadurch Wege zur nachhaltigen Entwicklung von Küstenregionen im Dialog erarbeiten. Mit diesem Verfahren wurde den Bürgerinnen und Bürgern als direkt Betroffene die Möglichkeit geboten, aktiv an der Entwicklung des Küstenschutzkonzeptes mitzuwirken. Die einzelnen Schritte werden nachfolgend beschrieben.

Konsensmatrix 17.05.2000		Wirtschaftskr. d. Ortes	Attrakt. Tourismusang.	Grad d. Erwerbssicherung	Einwohnerzahl	Gästezahl	attrakt. Strandbereich	Küstensicherung	Lebensqualität	Sicherh. d. Menschen	Freizeit- u. Kulturangebot	Intakte Landschaft	Intakte Ostsee	Effiz. Infrastruktur	Finanzm. d. Gemeinden	zukunftsor. Politik	Image des Ortes	Verkehrsentwicklung
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	Wirtschaftskr. d. Ortes		3	3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	2	0	2
2	Attrakt. Tourismusang.	2		3	0	3	2	0	1	0	2	2	1	2	2	0	3	2
3	Grad d. Erwerbssicherung	1	0		2	0	0	0	2	0	1	0	0	0	3	0	0	0
4	Einwohnerzahl	2	0	0		0	0	1	2	1	1	1	1	0	3	1	0	2
5	Gästezahl	3	1	2	0		2	0	0	1	0	1	1	0	3	1	0	2
6	attrakt. Strandbereich	1	3	2	1	3		1	3	0	1	1	0	1	2	0	3	0
7	Küstensicherung	1	0	0	1	1	2		3	3	0	0	0	1	1	0	1	0
8	Lebensqualität	1	0	0	3	2	0	0		0	0	0	0	0	0	1	2	0
9	Sicherh. d. Menschen	0	0	0	3	1	0	0	2		0	0	0	0	0	0	2	0
10	Freizeit- u. Kulturangebot	2	3	1	2	3	1	0	3	0		1	1	0	2	0	2	2
11	Intakte Landschaft	1	2	1	2	3	1	1	3	0	1		2	0	0	0	2	0
12	Intakte Ostsee	2	3	2	2	3	3	0	2	1	1	1		0	0	0	2	0
13	Effiz. Infrastruktur	3	2	2	2	3	1	1	3	0	1	2	0		0	0	1	1
14	Finanzm. d. Gemeinden	1	2	1	0	0	1	2	1	1	2	0	0	3		2	0	2
15	zukunftsor. Politik	1	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	0	2	2		0	1
16	Image des Ortes	2	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
17	Verkehrsentwicklung	2	1	0	0	1	0	0	2	1	1	1	0	3	2	1	1	

Abb. 3: Konsensmatrix. Dargestellt wird die Stärke der gegenseitigen Wechselbeziehungen der 17 erarbeiteten Variablen aufeinander (0 = keine Wirkung; 3 = starke Wirkung).

Vor der eigentlichen Analyse wurde das Verfahren in einer Bürgerversammlung durch eine unabhängige Beratungsfirma den Einwohnern beider Gemeinden vorgestellt. Die Analyse wurde dann auf freiwilliger Basis von etwa 25 Bürgern in insgesamt 9 von der unabhängigen Beraterfirma moderierten Gesprächsrunden durchgeführt (Kaul und Reins, 2000).

In einem ersten Schritt haben die Teilnehmer das zugrunde liegende System, die Küstenniederung Timmendorfer Strand und Scharbeutz, in einem Modell abgebildet. Der erste Schritt erlaubt, Aussagen über die Rolle der einzelnen Variablen (z.B. "attraktiver Strandbereich", "intakte Ostsee", "Küstensicherung") in dem Untersuchungsgebiet zu treffen und die Zusammenhänge innerhalb des Systems bzw. die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Variablen zu analysieren (Abb. 3). Er erfolgte in fünf Gesprächsrunden innerhalb eines Zeitraums von vier Monaten. Die Variablen und die (quantitativen) Wechselwirkungen wurden von den Teilnehmern an der Sensitivitätsanalyse erarbeitet, d.h. es gab keine Einflussnahme durch die Küstenschutzbehörden.

Teilszenarien

TS 1: KSM 'Nulllösung'

Systemmodell: IKSK TS / S (II)

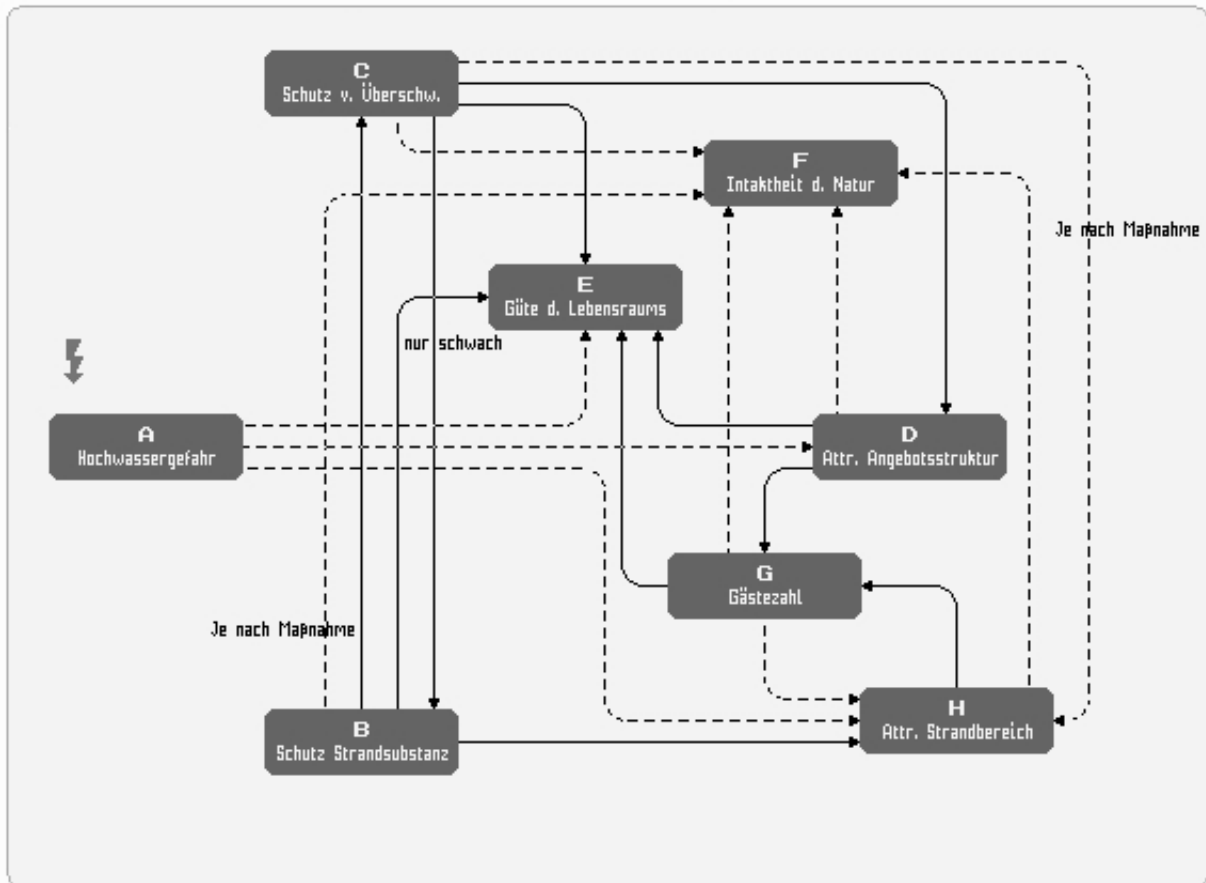


Abb. 4: Teilszenario Küstenschutz. Dargestellt sind die gegenseitigen Wechselbeziehungen zwischen den für den Küstenschutz signifikanten Parametern (gestrichelte Linie = negativer Effekt; durchgezogene Linie = positiver Effekt). Variable A (Hochwassergefahr) stellt die externe Variable dar, die das Modell „dynamisiert“.

Der zweite Schritt, der sich über einen Zeitraum von zwei Monaten erstreckte und vier Gesprächsrunden umfasste, zielte auf konkrete Fragestellungen ab, die im Sinne einer nachhaltigen Küstenschutzlösung untersucht werden sollten. Dazu wurde aus dem entwickelten Systemmodell des ersten Schrittes ein Teilszenario „Küstenschutz“ abgeleitet (Abb. 4). In dem Teilszenario wurden die Auswirkungen von fünf Küstenschutzlösungen (zum Beispiel „keine Maßnahmen“ oder „Deich auf dem Strand“) auf Schlüsselvariablen der Gemeinden (z.B. „attraktiver Strandbereich“ oder „Lebensqualität“) abgeschätzt. Das Teilmodell wurde mit der externen Variablen Hochwassergefahr (die mit der Zeit zunimmt infolge eines angenommenen Meeresspiegelanstieges von 0,5 m pro Jahrhundert) dynamisiert. Die Resultate für die Maximallösung (Landesschutzdeich auf dem Strand) sind in Abb. 5 dargestellt. Durch den Bau des Landesschutzdeiches nimmt die Güte des Lebensraumes zu (Sicherheit vor Überflutungen). Die Attraktivität des Strandes nimmt durch das Überbauen stark ab, was sich zeitverzögert negativ auf die Gästepzahl auswirkt. Diese Lösung wurde von den Teilnehmern an der Analyse abgelehnt. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich hier nicht um eine wissenschaftlich untermauerte Analyse handelt. Die hier grafisch nicht dargestellte Nulllösung (keine Gegenmaßnahmen bei zunehmender

Hochwassergefahr) ergab, dass die Güte des Lebensraumes durch die abnehmende Sicherheit vor Überflutungen nach einigen Jahrzehnten rapide sinkt. Auch diese Lösung wurde folglich abgelehnt. Eine in der Landschaft integrierte Mischlösung wurde letztendlich von den Teilnehmern favorisiert. Die Beteiligten haben sich von „Skeptikern“ zu „Befürwortern“ eines Küstenschutzkonzeptes gewandelt.

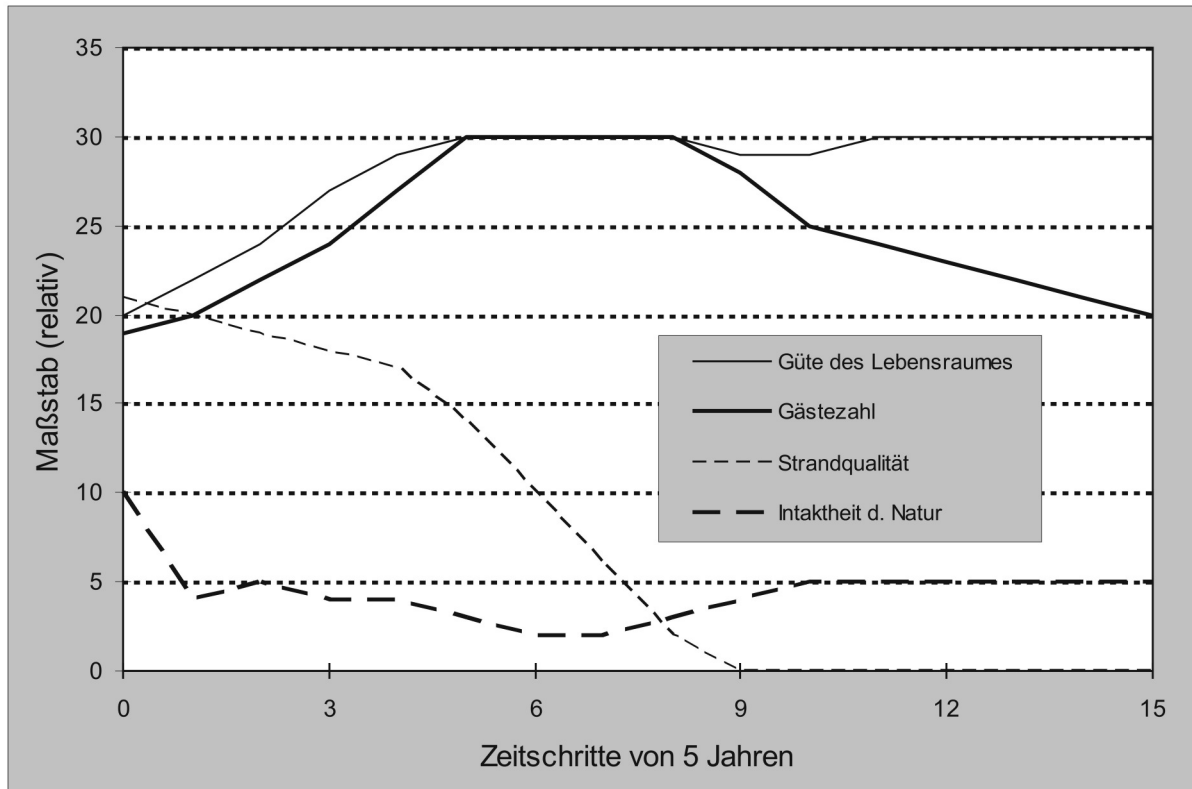


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf der Auswirkungen vom Bau eines Landesschutzdeiches auf wesentliche Variablen.

3 Bewertung und Schlussbemerkungen

In einer SWOT-Analyse (Stärken, Schwächen, Chancen und Gefahren-Analyse) wurde die Sensitivitätsanalyse als Beteiligungsinstrument untersucht (Hofstede, 2001). Mit diesem Verfahren können ohne großen Aufwand Produkte, Prozeduren, Leistungen, etc. auf ihre Erfolgsaussichten und Effektivität bewertet werden. Die Analyse stellt eine subjektive Einschätzung der/des Verfasser/s dar. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 2 eingetragen.

Eine offensichtliche Schwäche der Sensitivitätsanalyse stellt die geringe Zahl der Teilnehmer (max. 25) im Vergleich zur Zahl der Betroffenen dar. Als Konsequenz können die Resultate der Arbeitsgruppe nachträglich skeptisch hinterfragt bzw. abgelehnt werden durch Nicht-Beteiligte. Allerdings vertreten die Teilnehmer zumeist Interessengruppen (z.B. Verband der Strandkorbvermieter). Daneben sind sie, üblicherweise, die mehr aktiven Einwohner einer Gemeinde. Als Solche können sie (im positiven wie im negativen Sinne) als „Multiplikatoren“ funktionieren. Die Chancen der Sensitivitätsanalyse sind eine Anerkennung der Problemlage und eine Akzeptanz der Eigenverantwortung, wodurch eine engagierte Mitarbeit bei der Lösungsfindung wahrscheinlicher wird.

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> - aktive und frühzeitige Beteiligung der Betroffenen - systematischer Ansatz - Transparenz der Resultate 	<ul style="list-style-type: none"> - geringe Teilnehmerzahl - ermüdende und zeitaufwendige Prozedur - Abhängigkeit von Freiwilligen
Chancen	Gefahren
<ul style="list-style-type: none"> - (An)Erkennung der Probleme - (An)Erkennung der Verantwortung - Akzeptanz der Lösungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Resultate weichen ab von den Erwartungen des Auftraggebers - Interessenverlust während der Sitzungen - zu wenig Teilnehmer

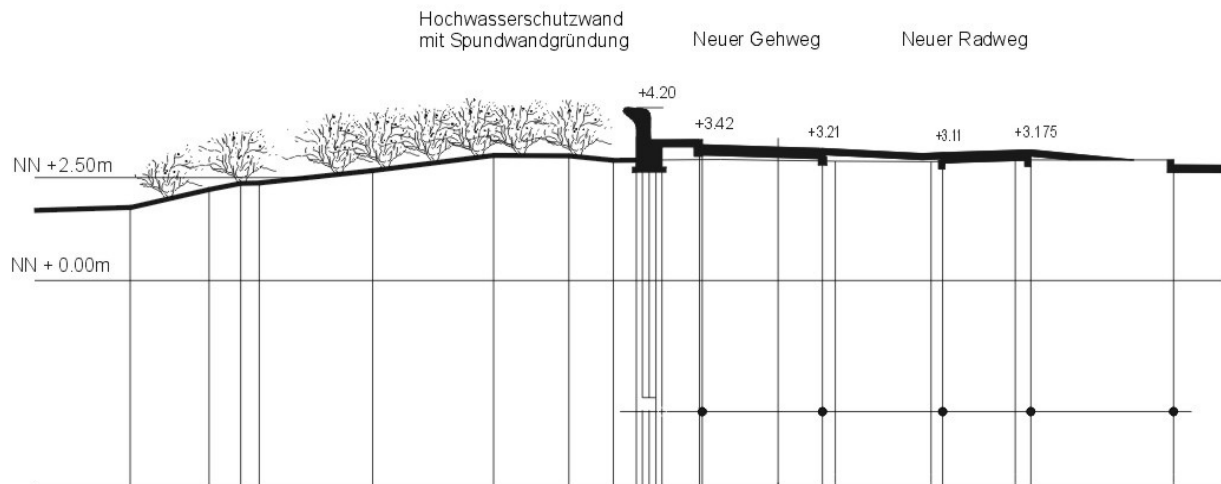
Tab. 2: SWOT-Analyse der Sensitivitätsanalyse.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Sensitivitätsanalyse sind eine gute Vorbereitung und Präsentation der Problemlage wie auch eine möglichst neutrale (externe) Moderation. Die Bedeutung dieser Aspekte bei öffentlichen Beteiligungsverfahren wurde in einem internationalen Projekt: „COMRISK - common strategies to reduce the risk of storm floods in coastal lowlands“ ebenfalls betont (Kaiser *et al.*, 2004). Schließlich war die von den Gemeinden zur Verfügung gestellte gute Verpflegung während der neun Abend- und Wochenendsitzungen eine weitere Randbedingung, die in seiner Bedeutung für einen erfolgreichen Ablauf nicht unterschätzt werden soll.

Die von den Teilnehmern befürwortete Lösung wurde als Grundlage in den nachfolgenden Ideenwettbewerb eingebracht. Vier ausgewählte Ingenieurbüros wurden dazu aufgefordert, innovative Ideen für eine integrative Küstenschutzlösung zu erarbeiten. Die preisgekrönte Lösung sieht überwiegend eine tief gegründete Hochwasserschutzwand entlang der Promenade vor (Abb. 6). Durch entsprechende Ausgestaltung und mit maximalen Höhen von etwa 0,8 m über der Promenade kann die Wand als physische Abgrenzung zum Strand und Strandwall/Dünenbereich angesehen werden, ohne jedoch den Ausblick zu versperren.

Seit der Sensitivitätsanalyse sind bereits vier Jahre vergangen. Insbesondere bei der Festlegung des Bemessungswasserstandes gab es Verzögerungen. Dadurch entsteht die Gefahr, dass die Sensitivitätsanalyse und ihre Ergebnisse „aus den Gedächtnis“ geraten. Bereits jetzt werden teilweise wieder die alten Forderungen (Sandaufspülung und Buhnen als Küstensicherung, kein Hochwasserschutz) laut. Dies bestätigt die Erkenntnis, wonach die eigentliche Maßnahme möglichst bald nach der Beteiligungsprozedur durchgeführt werden sollte.

Lösung A



Variantentyp V2.2 (Hw +2.50)

Abb. 6: Darstellung der vom Preisgericht favorisierten Lösung, eine tief gegründete Hochwasserschutzwand entlang der Promenade.

Danksagung

Der Verfasser, der die Studie für die Behörden begleitete, dankt ausdrücklich den Teilnehmerinnen und Teilnehmern an der Analyse. Nur ihre freiwillige und engagierte Mitarbeit ermöglichten die Pilotstudie. Des Weiteren wird den Bürgermeistern der Gemeinden Timmendorfer Strand und Scharbeutz, den Herren Popp, Rüder und (später) Owerien, für ihre Gastfreundschaft und logistische Unterstützung wie auch für ihre positive Einstellung und Teilnahme an der Analyse gedankt. Schließlich gilt ein Dank den Mitarbeitern der Beratungsfirma, die Herren Kaul und Reins, für ihre professionelle, neutrale und sympathische Moderation.

4 Literatur

FÜRST, D. / SCHOLLES, F. / SINNING, H.: Sociological and planning fundamentals, planning theories and methods, 1998, Ch. 7. In: http://www.laum.uni-hannover.de/ilr/lehre/Ptm/Ptm_Part.htm

HOFSTEDE, J.L.A.: Participatory planning in coastal defence: a pilot study from the Baltic Sea coast of Germany. In: Proceedings of the 36th DEFRA Conference of River and Coastal Engineers. DEFRA, London, 2001, S. 02.2.1 – 02.2.12.

- HOFSTEDÉ, J.L.A. / HAMANN, M.: Integrated management of coastal defence in Schleswig-Holstein: experiences and challenges. In: SCHERNEWSKI, G. / SCHIEWER, U.: Baltic Coastal Ecosystems, structure, function and coastal zone management. Central and Eastern European Development Studies, Springer, Berlin, 2002, S. 377-388.
- KAISER, G. / REESE, S. / STERR, H. / MARKAU, H.-J.: COMRISK Subproject 3 – public perception of coastal flood defence and participation in coastal flood defence planning. Gutachten im Auftrag des Innenministeriums des Landes Schleswig-Holstein, Kiel, 2004, 203 S. (unveröffentlicht).
- KAUL, J.-A. / REINS, C.: Abschlussbericht der Sensitivitätsanalyse zu einem integrierten Küstenschutzkonzept für die Küstenniederung Timmendorfer Strand/Scharbeutz. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Kiel, 2000, 49 S. (unveröffentlicht).
- KIEKSEE, H.: Die Ostseesturmflut 1872. Schriften des Deutschen Schiffahrtsmuseums Bremerhaven. Band 2, Heide, 1972, 152 S.
- REESE, S.: Die Vulnerabilität des schleswig-holsteinischen Küstenraumes durch Sturmfluten. Fallstudien von der Nord- und Ostseeküste. Berichte aus dem Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Universität Kiel, Bd. 30, 2003, 305 S. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
- REESE, S. / MARKAU, H.-J. / STERR, H.: Wertermittlung hochwassergefährdeter Gebiete in den Gemeinden Scharbeutz und Timmendorfer Strand. Untersuchung im Auftrag der Gemeinden Scharbeutz und Timmendorfer Strand, Timmendorfer Strand, 2001, 63 S. (unveröffentlicht).

Adresse

Dr. Jacobus Hofstede
Innenministerium des Landes Schleswig-Holstein
Postfach 7125
D-24171 Kiel
Germany

E-mail: jacobus.hofstede@im.landsh.de

Besonderheiten des Sturmflutschutzes in urbanen Ästuargebieten am Beispiel Hamburgs

Jürgen Triebner und Gabriele Gönnert

Strom- und Hafengebäude Hamburg

Summary

Coastal protection is based on the two columns of "storm surge protection facilities" and "coastal defense on a prevent and avert basis". Guiding principle of coastal protection in Hamburg is: maximum possible safety standard for the whole city of Hamburg. The safety standard will be ensured by the dimension level used for dimensioning storm surge protection facilities. The "storm surge protection facilities" comprise coastal protection constructions as well as property of objects often in front of the public dike line – called main dike line. The "coastal defense on a prevent and alert basis" comprises all measures on an organizational and planning level necessary to take defensive measures as part of catastrophe control. Storm surge observation and storm surge research are basic parts of this area of responsibility .

Because of this system, Hamburg is protected against an extreme storm surge and against the present climate change. Storm surge research includes the control of tidal protection facilities by means of continuous examination of gauges which themselves are based on analyses and evaluation of the development of storm surge and climate warming, as well as on their influence on storm surge and on the general mean sea level development. Moreover, the coastal protection management is controlled and developed. Examples of each column will be presented in the following text.

Zusammenfassung

Der Küstenschutz in Hamburg basiert auf den Säulen „Bauliche Anlagen“ und „Vorbeugender und abwehrender Sturmflutschutz“, dem Grundprinzip folgend: Gewährleistung der größtmöglichen und gleichen Sicherheit an allen Orten der Stadt. Sie wird gewährleistet durch einen Küstenschutz basierend auf einem definierten Extremereignis, dem Bemessungswasserstand. Die baulichen Anlagen umfassen Hochwasserschutz- und Flutschutzanlagen sowie Gebäude mit Objektschutz, die häufig vor dem öffentlichen HWS - auch Hauptdeichlinie genannt - liegen. Der vorbeugende und abwehrende Sturmflutschutz umfasst alle planerischen und organisatorischen Maßnahmen für die Durchführung von Abwehrmaßnahmen als Teilaufgabe des Katastrophenschutzes. Ein grundlegender Bestandteil dieses Aufgabenbereiches ist die Sturmflutbeobachtung und die Sturmflutforschung.

Mit Hilfe dieses Konzeptes ist die Stadt Hamburg sowohl gegen sehr schwere Sturmfluten gewappnet als auch für die derzeitige Klimaänderung gesichert. Im Bereich der Sturmflutforschung werden die Sturmfluten in ihren Veränderungen kontinuierlich analysiert, die Auswirkungen von Klimaänderung betrachtet sowie das Vorhersageverfahren an Änderungen angepasst und letztendlich hierüber der Küstenschutz der Stadt insgesamt weiterentwickelt.

1 Einleitung: Konzept des Sturmflutschutzes in Hamburg

Ziel des Sturmflutschutzes in Hamburg ist die Gewährleistung einer gleichen, größtmöglichen Sicherheit an allen überflutungsgefährdeten Bereichen der Stadt. Die Grundlage für diese Sicherheitsbetrachtung bildet der Bemessungswasserstand, abgeleitet aus einer definierten Bemessungsturmflut. Küstenschutz orientiert am „abwehrenden“ Bemessungswasserstand führt in der Regel zu einem linearen Küstenschutz (GISZAS, 2004). Er berücksichtigt jedoch zumindest in einem Teilbereich die Klimaänderung über den prognostizierten Meeresspiegelanstieg.

Hamburg hat die Ergebnisse seiner Sturmflutforschung in die Festlegung der Bemessungsturmflut mit stromauf ansteigenden Bemessungswasserständen eingebracht, die am Pegel St. Pauli einen Wert von NN+7,30 m ausweisen. Auf der Grundlage mehrjähriger wissenschaftlicher Untersuchungen an verschiedenen Instituten ist ein neues Bemessungskonzept entwickelt worden, das auf der Grundlage des Bemessungswasserstandes die Wellenwirkung bei Sturmfluten differenziert berücksichtigt und anstelle von Hochwasserschutz durch gleiche Höhe als Schutzziel „*Hochwasserschutz durch gleiche Sicherheit*“ definiert. Die Grundlagen wie Sollhöhenbestimmung, Berechnungsansätze, konstruktive Anforderungen und bauliche Möglichkeiten zur Reduzierung des Wellenauflaufes sind in technische Vorschriften eingeflossen.

Obwohl der Bemessungswasserstand eine sehr hohe Sicherheit gewährleistet, gibt es immer rechnerisch in extrem kleinen Wahrscheinlichkeiten auch jenes Ereignis, das ihn überschreiten kann. Hier liefert der Katastrophenschutz mit Evakuierungsplänen für überflutungsgefährdete Gebiete hinter dem öffentlichen HWS einen wichtigen, zusätzlichen Beitrag für die Sicherheit der Bevölkerung. Auch in Hinblick auf die Klimaänderung bedeutet das Vorhandensein von Evakuierungsplänen eine zusätzliche Sicherheit der Bevölkerung. Ergänzend wird in der Sturmflutbeobachtung und Sturmflutforschung die Klimaveränderung einbezogen und berücksichtigt.

Die Anpassung des Sturmflutschutzes an die Sturmflutentwicklung ist ein besonderes Anliegen der hamburgischen Politik. So wurden nach 1962 in Hamburg neue leistungsfähige Deiche und Hochwasserschutzwände gebaut und auf die Hauptdeichlinie auf heute 100 km verkürzt. Nach 1976 wurde der öffentliche Hochwasserschutz durch einen privaten Hochwasserschutz ergänzt, dessen Bau zu 75% staatlich gefördert wurde. Auch die HafenCity, mit seinen Wohn- und Bürogebäuden vor dem öffentlichen Hochwasserschutz liegend, bedarf des Schutzes vor Sturmflutgefahren.

Das Sturmflutschutzkonzept in Hamburg basiert im Prinzip auf den zwei Säulen:

1. Bauliche Anlagen

Sie umfassen den öffentlichen Hochwasserschutz entlang der Elbe und den privaten Hochwasserschutz, überwiegend im Hafen gelegen, sowie die Flutschutzanlagen in der HafenCity und Gebäude mit Objektschutz, die meist vor der Hauptdeichlinie liegen.

2. Vorbeugender und abwehrender Sturmflutschutz

Der vorbeugende und abwehrende Sturmflutschutz umfasst die Sturmflutforschung, die Sturmflutwarnung sowie die Planung, Organisation und Durchführung von Abwehrmaßnahmen mit der Verteidigung der Hochwasserschutzanlagen als Teilaufgabe des Katastrophenschutzes.

Die Sturmflutforschung selbst umfasst die kontinuierliche Überprüfung der Bemessungswasserstände mithilfe der

- Analyse und Bewertung aller Sturmfluten und
- Analyse von besonderen Ereignissen bezogen auf einen Sturmflutfall wie das Hochwasser der Elbe im August 2002

sowie die Beobachtung

- der Klimaentwicklung und ihre Auswirkungen auf Sturmfluten
- der Meeresspiegelentwicklung.

Sie berücksichtigt auch Weiterentwicklungen des bislang sehr guten Küstenschutzes.

2 Bauliche Anlagen des Sturmflutschutzes

2.1 Der öffentliche Hochwasserschutz

Der öffentliche Hochwasserschutz umfasst die Hauptdeichlinie in Hamburg. Sie schützt in erster Linie die Bevölkerung. Der Bau, die Instandhaltung und die Verteidigung des öffentlichen Hochwasserschutzes ist Aufgabe der öffentlichen Verwaltung.

Der öffentliche Hochwasserschutz besteht aus 77,5 km Deiche und 22,5 km Hochwasserschutzwände. Zusammen mit 6 Sperrwerken, 6 Schleusen, 27 Schöpfwerken und Deichsielen sowie 30 Toren (Gatts) schützen sie die Stadt und schotten die Nebenarme der Elbe ab. Die Schutzhöhen liegen zwischen NN+7,20 und 9,25 m (Abb.1). Die Höhendifferenzen sind mit dem Konzept des Sturmflutschutzes zu erklären, dass von gleicher Sicherheit aber nicht von gleicher Höhe ausgeht. Infolgedessen wird die Höhe der Anlagen nach den örtlichen Gegebenheiten und Erfordernissen schwanken, was insbesondere im Zusammenhang mit der Wellenaufbauhöhe zu sehen ist.

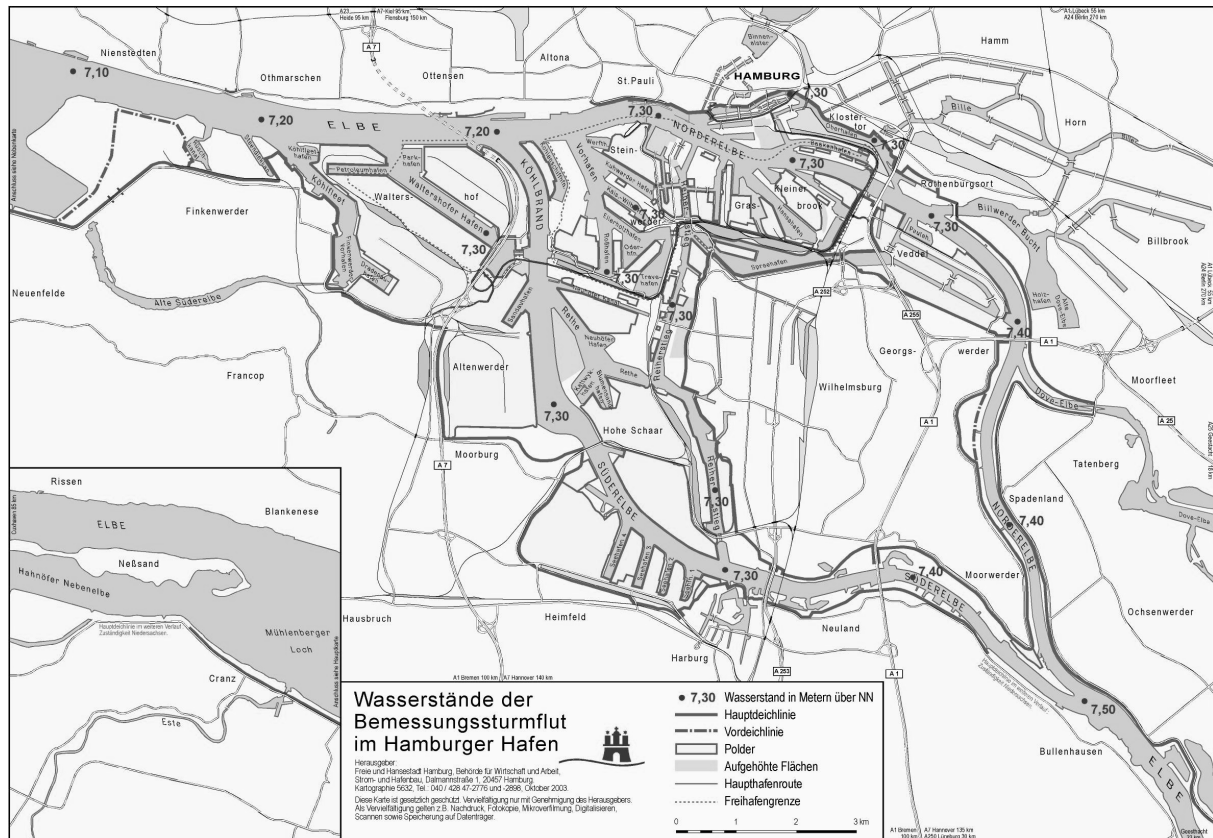


Abb. 1: Wasserstände der Bemessungsturmflut im Hamburger Hafen (Behörde für Wirtschaft und Arbeit, Strom- und Hafenaufbau)

Der Hochwasserschutz in einem dicht besiedelten, urbanen Umfeld gestaltet sich zum Teil schwierig. Vielerorts müssen aufgrund der beengten Platzverhältnisse oder besonderen Nutzung angepasste technische Lösungen gefunden werden. Im Innenstadtbereich und in Finkenwerder sind Uferkonstruktionen gleichzeitig teilweise Hochwasserschutzanlage und Promenade. Gatts ermöglichen hier den Zugang zu den Landeanlagen und Hafenfähren. Eine Besonderheit ist das Gatt bei Airbus Deutschland (Abb.2). Hier queren Flugzeuge den Deich und eine Straße. Dafür wurde 1997 ein 85 m breites Hubtor

gebaut, das im abgesenkten Zustand von den Flugzeugen überfahren werden kann. Die Baukosten betragen rd. 6 Mio. Euro.



Abb. 2: Das Gatt im Neß HD bei Airbus Deutschland (Behörde für Wirtschaft u. Arbeit, Strom- u. Hafenbau)

2.2 Der private Hochwasserschutz

Der private Hochwasserschutz dient in der Regel dem Schutz von Industrie- bzw. Hafenanlagen, aber auch einzelnen Wohnanlagen (wie z.B. Neumühlen). Die privaten Anlagen werden von ihren Eigentümern Instand gehalten und verteidigt.

Der private Hochwasserschutz besteht im Hafen aus 48 Einzel- und Gemeinschaftspoldern sowie drei Sperrwerken, die mit insgesamt 109 km Länge und rd. 2.300 ha Fläche etwa 70% des Hafengebietes vor Sturmfluten schützen. Die privaten Anlagen bestehen aufgrund des geringeren Flächenbedarfes überwiegend aus Spundwand- bzw. Stahlbetonkonstruktionen, die die Umschlags- und Lagereinrichtungen mit einer einheitlichen Höhe von NN+7,50 m schützen. Eingeschlossen sind viele infrastrukturelle Bereiche wie Straßen und Hafenbahnanlagen.

2.3 Flutschutzanlagen und Objektschutz

Die HafenCity, zwischen Norderelbe und öffentlichem HWS der Innenstadt gelegen, wird auf Entwicklungsflächen mit Geländehöhen zwischen NN+4,40 und NN+7,20 m errichtet und liegt damit im Überflutungsbereich der Elbe. Das Schutzkonzept sieht eine weitgehend flächenhafte Aufhöhung der frei zugänglichen Bereiche in Form von Warften vor. Dies beinhaltet Geländeaufhöhungen wie auch bauliche Maßnahmen, die eine dauerhafte, sturmflutgeschützte Wohn- und Büronutzung sicherstellen. Die Sollhöhen der Flutschutzanlagen in der HafenCity liegen zwischen NN+7,50 m und NN+8,50 m.

Bereits vor rund 20 Jahren wurde damit begonnen, den nördlichen Hafenrand unterhalb des Geesthanges einer neuen Nutzung zuzuführen. Der Schutz vor Sturmflutgefahren war von Anfang an sowohl aus städtebaulicher als auch aus wasserbaulicher Sicht ein wichtiges Thema. Für dieses Gebiet existiert kein übergreifendes Gesamtentwicklungskonzept wie für die HafenCity. Alternativ ist hier eine Reihe von Einzelkonzepten mit Umnutzung bestehender Gebäude und Neubauten der stadtplanerische Ansatz. Dies führt zu Sturmflutschutzmaßnahmen, die speziell auf die Gebäude abgestellt sind. Gebäude, die im Sturmflutfall der Belastung nicht oder nur bedingt standhalten und aufgrund ihrer Nutzung schnell zu räumen sind, werden durch kontrolliertes Fluten des Erdgeschosses vor Schäden geschützt. Am weitesten verbreitet ist der Sturmflutschutz direkt am Gebäude in Form von Stahlklappen bzw. verstärktes Glas vor den Fenstern oder Schiebetore vor Garageneinfahrten. Auch eine Brücke zum Elbhang als Fluchtweg im Sturmflutfall gehört zum Konzept.

3. Der vorbeugende und abwehrende Sturmflutschutz

3.1 Die Sturmflutforschung

Strom – und Hafenbau unterhält keine eigene Forschungsabteilung. Umfangreiche Untersuchungen werden an die entsprechenden Institute in Auftrag gegeben. Dennoch bedarf es eigener Beobachtungen und Forschungsprojekte um einen für die Weiterentwicklung des Vorhersageverfahrens und der Sicherstellung des Küstenschutzes abgestimmten Erkenntnisgewinn zu erhalten. In diesem Bereich sind Betrachtungen zur Klimaänderung enthalten, so dass in Hamburg versucht wird, diesen Themenkomplex zu berücksichtigen.

Die eigene Sturmflutbeobachtung und -forschung impliziert vier große Themenblöcke

1. Sicherstellung der ausreichenden Bemessung aller baulichen Schutzanlagen durch kontinuierliche Überprüfung der Bemessungswasserstände.
2. Beobachtung von Sturmflutentwicklung aufgrund von anthropogenen, natürlichen oder klimatologischen Veränderungen.
3. Laufende Überprüfung des Sturmflutvorhersageverfahrens.
4. Analyse, wie im Zusammenhang mit Küstenzonenmanagement die Sicherheit der Bevölkerung unter Berücksichtigung der begrenzten räumlichen Verhältnisse einer dicht besiedelten Großstadt wie Hamburg auch zukünftig gewährleistet werden kann.

Zur Darlegung der Absicherung der Hochwasserschutzanlagen in ihrer Höhe wird zunächst die Berechnung des Bemessungswasserstandes vorgestellt (Punkt 1). Im Weiteren wird dann die Sturmflutentwicklung mithilfe der Analyse des Sturmflutverlaufes dargelegt (Punkt 2), während 3 und 4 den Rahmen der vorliegenden Veröffentlichung überschreiten würde.

3.1.1 Der Bemessungswasserstand

Die Deichhöhe wird ermittelt über einen Bemessungswasserstand. Nach dem Ausschuss für Küstenschutzwerke (1993:19) ist der **Bemessungswasserstand** „der für einen vorgegeben Zeitraum zu erwartende höchste Wasserstand, auf den eine Hochwasserschutzanlage unter Berücksichtigung des säkularen Meeresspiegelanstiegs [...] und des Oberwasserzuflusses zu bemessen ist.“ Neben dem Wasserstand ist der durch örtlichen Seegang hervorgerufene Wellenauflauf ein weiterer wichtiger Parameter.

Das Verfahren zur Berechnung des Bemessungswasserstandes wurde von einer Arbeitsgruppe der drei Elbanrainer Hamburg, Schleswig-Holstein und Niedersachsen entwickelt und gilt für die Elbe von Cuxhaven bis Geesthacht (Abb. 3). Die Stadt, die den Eintritt der Elbe in den Ästuartrichter markiert, ist Cuxhaven. Hamburg liegt rund 100 km flussaufwärts.

Das Verfahren basiert auf der Bestimmung einer maßgeblichen Sturmtidekurve für die Elbmündung (Pegel Cuxhaven), deren Höchstwert den Bemessungswasserstand darstellt (SIEFERT, 1998). Diese Kurve bildet die Grundlage für die Modelluntersuchung, die für jeden Ort an der Elbe einen Bemessungswert berechnet. Hierdurch ist es möglich die ungünstigsten Wechselwirkung zwischen Tide und Windstau auf dem Weg von Cuxhaven bis Hamburg zu erfassen und zusätzliche Aussagen über Verweildauer hoher Zwischenstände und den zeitlichen Ablauf der Sturmflut zu bestimmen (SIEFERT, 1998).

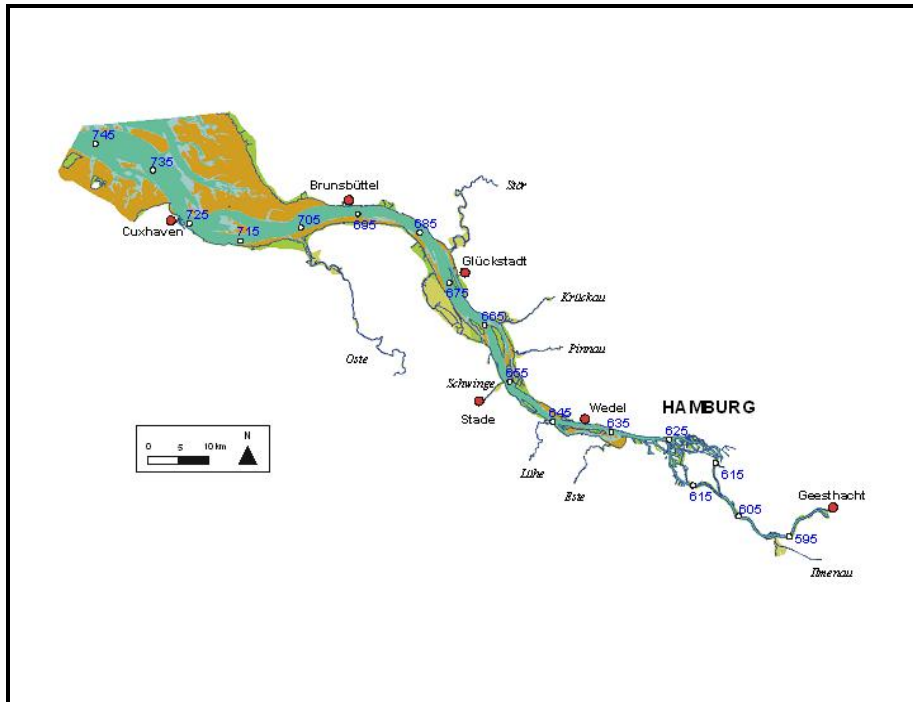


Abb. 3: Elbe von Cuxhaven bis Geesthacht (Behörde für Wirtschaft und Arbeit, Strom- und Hafenbau)

Die maßgebliche Sturmidekurve (Abb. 4) setzt sich zusammen aus

- den aktuellen Tideverhältnissen (beschrieben durch die mittlere Tidekurve),
- den Säkularveränderungen, gekennzeichnet im Meeresspiegelanstieg
- den meteorologischen Einflüsse, im wesentlichen der Windstau,
- den Einflüssen der Schwingungen in der Nordsee, in erster Linie den Fernwellen,
- ergänzt durch zusätzliche astronomische Einflüsse.

Die letzten drei Punkte werden in der Windstaukurve zusammengefasst, die rund 90% ihrer Beträge aus dem Windeinfluss besteht. Die restlichen 10% bilden die ergänzenden astronomischen Einflüsse (vor allem Spring- und Nipptide) und die Schwingungen der Nordsee. Der Einfluss der Astronomie entsteht durch Berechnung des Windstaus über die mittlere Tidekurve. Diese wird hier gewählt, da sie laut SIEFERT (1998) das aktuelle Tidegeschehen am besten repräsentiert. Die mittlere Tidekurve wird gebildet aus dem 10 jährigen Mittel.

Zur Bestimmung der extremen Windstaukurve werden die Sturmflutverläufe in Cuxhaven seit 1900 ausgewertet und die Windstaukurven aller hohen Sturmfluten des 19. Jahrhunderts. Der entscheidende Parameter ist das Windstaumaximum, das bei Thw bislang 375 cm am 16./17.2.1962 erreichte und 430 cm bei Tnw am 23.12.1894. Die Wechselwirkung zwischen Tide und Windstauentwicklung bewirkt, dass der Windstau bei Thw rund 90% der Höhe des Wertes bei Thw erreicht. Für die maßgebliche Windstaukurve wird deshalb der bisher höchste Windstau erfasst und übertragen auf die Bedingungen bei THw. Wird der Stauwert von 430 cm bei Tnw auf die Situation bei Thw übertragen, ergibt sich eine Höhe von 385 cm. Der weitere Verlauf der Windstaukurve wird rekonstruiert aus einem sehr schweren Sturmflutverlauf in Annäherung an die Sturmflut vom 3.1.1976, deren Verlauf erhöht und verlängert wurde.

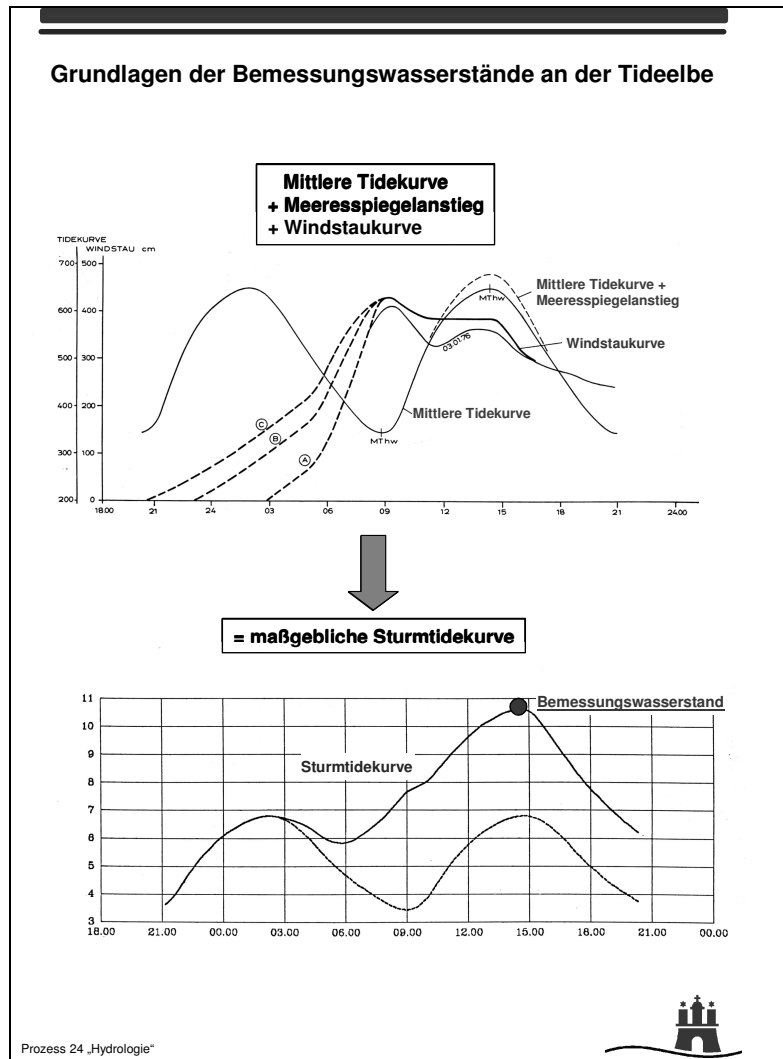


Abb. 4: Maßgebliche Sturmflutkurve für Cuxhaven (Behörde für Wirtschaft u. Arbeit, Strom- u. Hafenausbau,)

Die Säkulentwicklung wird anhand der Trendentwicklung in Cuxhaven festgelegt. In Cuxhaven liegt ein Trend von

- 1850 bis 1996: 22 cm/Jh im MThw
- 12 cm/Jh im Mtnw
- 10 cm/Jh im MThw vor,
- 1900 bis 2003: 23 cm/Jh im MThw
- 6 cm/Jh im MTnw
- 17 cm/Jh im Mthb vor.

Es wird deshalb ein Säkulentrend von 30 cm/Jh im Hochwasser und 0 cm/Jh im Niedrigwasser berücksichtigt. An dieser Stelle wird durch Berücksichtigung des Säkulentrends eine „long-term“ Betrachtung angestellt und in kleinem Umfang die Klimaentwicklung berücksichtigt.

Neben den genannten Faktoren ist der Oberwasserzufluss eine wichtige Einflussgröße. Er spielt vor allem im Bereich der schmalen Elbrinne oberhalb des Hamburger Stromspaltungsgebietes eine wichtige Rolle. So führt eine Erhöhung des Oberwasserzuflusses (gemessen am Pegel Neu Darchau) um $1000\text{m}^3/\text{s}$ zu einer Erhöhung des Sturmflutcheitels um 25 cm. Es wurde deshalb ein sehr hoher Ober-

wasserabfluss von 2200m³/s festgelegt. Stromab von Hamburg spielt der Oberwassereinfluss nur noch eine geringe Rolle (GÖNNERT, G./ FERK, U. 2000).

Die so ermittelten Werte, werden einem numerischen Modell als Eingangsgröße vorgegeben. Das numerische Modell kann anhand der neuesten Topographie, die bereits die anthropogenen und die natürlichen Veränderungen erfasst, für jeden Ort entlang der Elbe einen eigenen Bemessungswert ermitteln. Sie steigen von Cuxhaven mit 6,65 m NN bis Hamburg auf eine Bandbreite von 7,20 m NN bis 9,25 m NN an. Diese Werte sind jedoch noch nicht die endgültigen Höhen der Hochwasserschutzanlagen. Zusätzlich wird für jeden Ort die Wirkung des Seegangs (Auflauf/Reflexion etc.) berücksichtigt. Erst beide Werte zusammen bilden dann die Höhe der Hochwasserschutzanlagen.

3.1.2 Überprüfung der Sturmfluten in Hinblick auf natürliche, anthropogene und Klimaveränderungen

Die Überprüfung der Sturmfluten in Hinblick auf Klimaänderungen erfolgt nach dem Verfahren von GÖNNERT, 2003. Um das Sturmflutklima umfassend zu analysieren, ist es notwendig, nicht nur die Entwicklung von Scheitelhöhen, Frequenz und Dauer zu betrachten, sondern Sturmfluten in ihrem gesamten Verlauf zu erfassen. Zentrale Bedeutung kommt daher der Windstaukurve als Differenzkurve zwischen gelaufener Sturmflut und mittlerer bzw. astronomischer Tide zu. Sie bildet den Einfluss des Sturmflut verursachenden Faktors - des Windes - und dessen Änderungen direkt ab. Mögliche Änderungen der Windverhältnisse verändern somit den Verlauf - und damit den Charakter - einer Sturmflut. Veränderungen im Sturmflutklima sind auf diese Weise gut zu erfassen.

Hierfür wird die Windstaukurve in "Anstieg", "Scheitel" und "Abfall" parametrisiert (Abb: 5). Über Korrelation der einzelnen Parameter lässt sich erarbeiten, welche Wirkung ein spezifischer Windverlauf auf die Windstauhöhe hat (Abb. 6).

Es zeigt sich z.B. für die Korrelation „Windstuanstieg“ zu „Windstaumaximum“, dass in Cuxhaven gilt, dass bei großen, sehr schnellen Anstiegen der Windgeschwindigkeit sehr hohe Windstaumaxima gebildet werden. Die dargestellten Sturmfluten entstammen aus einem Kollektiv seit 1900. In dieser Zeit lag eine Erhöhung der globalen Mitteltemperatur von 0,6°C vor. Die gebildete Einhüllende stellt den Bereich dar, indem sich Sturmfluten unter momentanen Klimabedingungen entwickeln können. Jede neue Sturmflut wird unter diesem Gesichtspunkt analysiert. Es wird davon ausgegangen, dass Sturmfluten, die unterhalb der dargestellten Einhüllenden in einem physikalisch sinnvollen Ablauf stattgefunden haben, im Rahmen der bisherigen Klimaänderungen liegen und keine Abweichungen zeigen. So war zwar die Sturmflut vom 3.12.1999 ein Extremereignis, dennoch fällt sie mit ihrem Verlauf in den Bereich einer normalen sehr schweren Sturmflut. Auf diese Weise glückt die Bewertung von mehr als 200 Sturmfluten unterschiedlichster, individueller Abläufe in ein System zu bringen und Abweichungen auch bedingt durch Klimaänderung sehr schnell und kontinuierlich feststellen zu können.

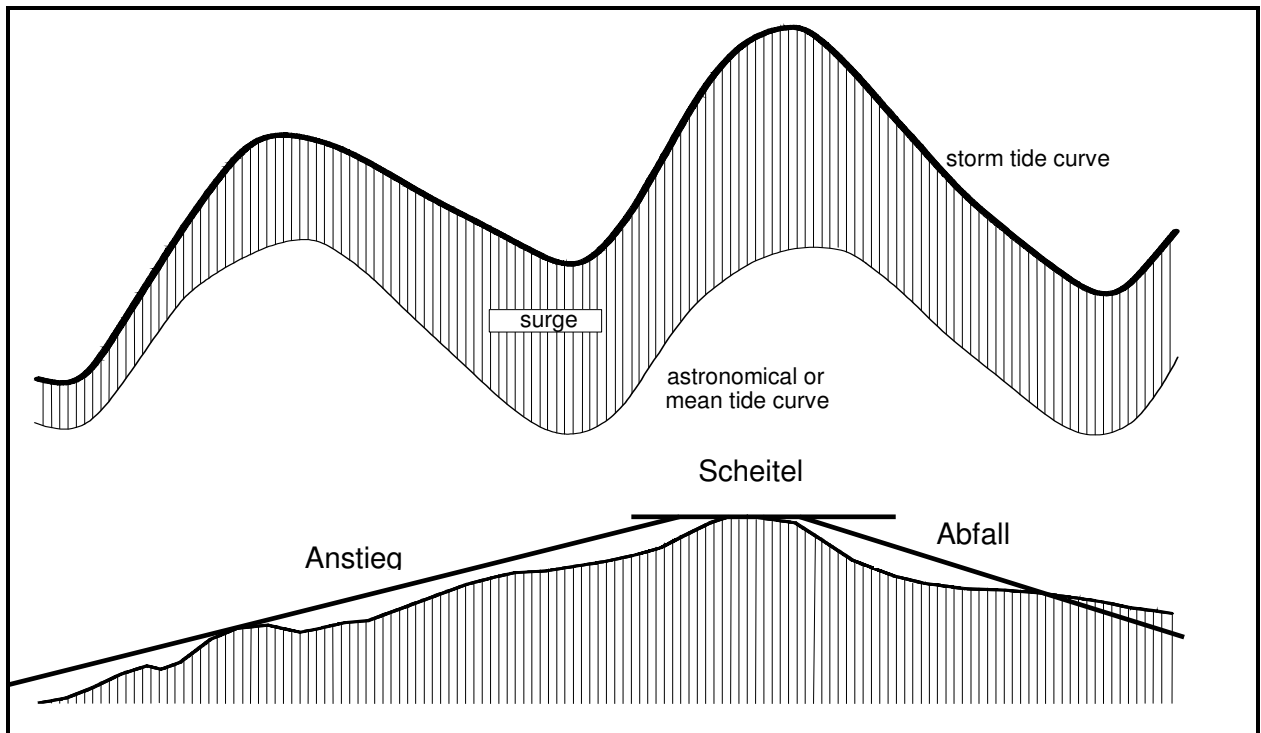


Abb. 5: Parametrisierung der Windstaukurve in Anstieg, Scheitel und Dauer (GÖNNERT; G. 2003)

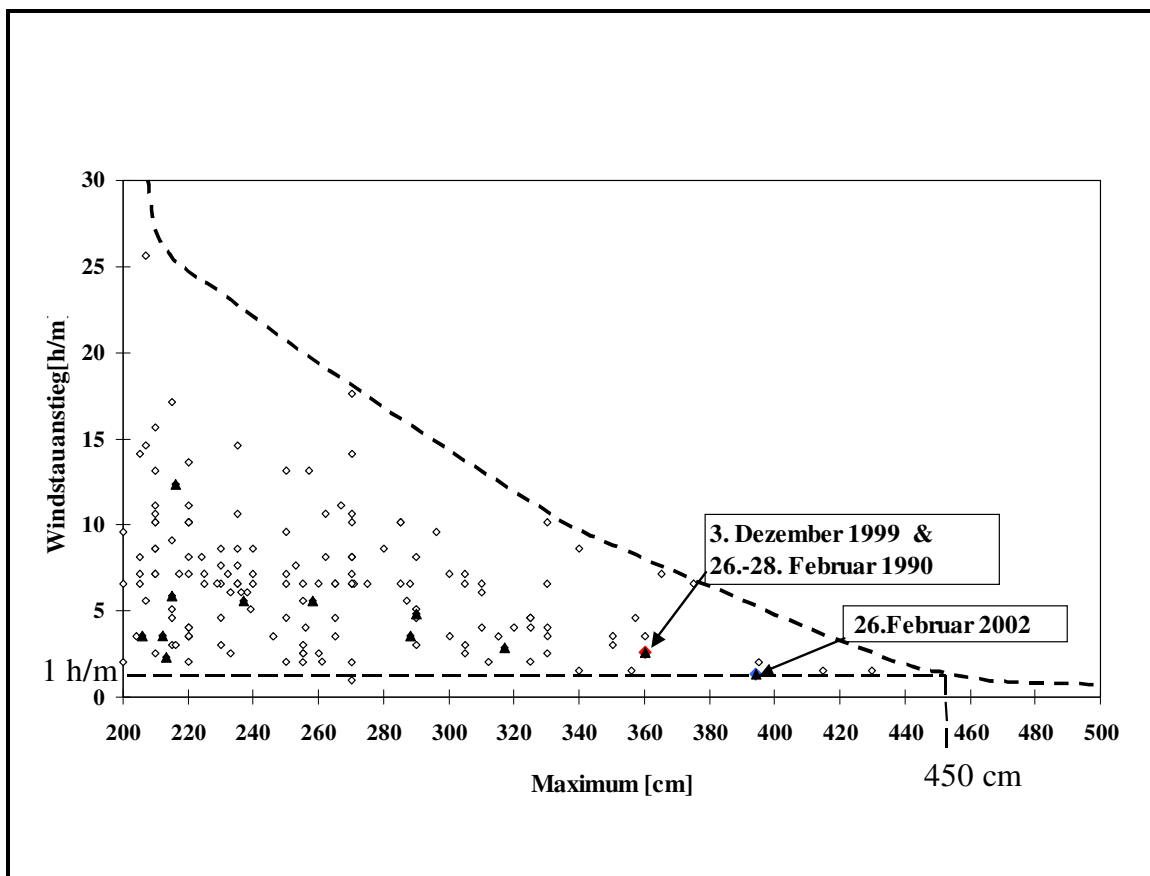


Abb. 6: Korrelation der Windstauparameter Windstauanstieg mit dem Windstaumaximum aller Sturmfluten in Cuxhaven seit 1900 (GÖNNERT, 2003)

3.2 Der Hamburger Sturmflutwarndienst

Nach der Sturmflut 1976 wurde als Folge eines Senatsauftrages im gleichen Jahr der Hamburger Sturmflutwarndienst – WADI eingerichtet, der die Vorhersagen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie präzisieren soll. Seine Aufgaben umfassen die Berechnung der Sturmflutvorhersagen für Hamburg nach Höhe und Eintrittszeit und die Warnung der Bevölkerung über die Behörde für Inneres sowie der Betriebe im Hafen, der Behörden, Betroffener und der Organisationen im Katastrophenschutz über einen eigenen Funkkreis und Telefonansagen. Die Warnungen werden halbstündlich wiederholt. Die Einsätze erfolgen, wenn ein Wasserstand von NN+4,50 m und höher zu erwarten ist.

Das Vorhersageverfahren hat Prof. Dr.-Ing. Siefert entwickelt. Es basiert auf gemessenen Daten entlang der Nordseeküste und in der Elbmündung, deren Abhängigkeiten im Fortschritt einer Sturmflutide von Borkum über Cuxhaven bis Hamburg empirisch aus Sturmfluten abgeleitet und in Regeln umgesetzt wurden. Es wird mit der Sturmflutentwicklung laufend angepasst.

3.3 Sturmflutschutz als Teilaufgabe des Katastrophenschutzes

Die Koordination, Lenkung und Durchführung aller Maßnahmen im Sturmflutschutz ist in Hamburg eingebunden in den Katastrophenschutz. Dafür sind regional zuständige Katastrophendienststäbe in den Bezirken und im Hafen eingerichtet worden, mit zentraler Lenkung durch den „Zentralen Katastrophendienststab“ ZKD der Behörde für Inneres. Sie werden unterstützt durch private Hilfsorganisationen, das Technische Hilfswerk (THW) und die Bundeswehr. Einsatzschwelle ist ein erwarteter Wasserstand von NN+4,50 m.

Für den Sturmflutfall wurden differenzierte Planungen geschaffen, die Alarmierungs-, Einsatz- und Abwehrmaßnahmen wie die Verkehrslenkung, die Verteidigung der Deiche bis hin zu Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vorsehen, die an Wasserstandsstufen gekoppelt sind. Bestandteil sind auch die vorbeugende Information, einmal jährlich gemeinsame durchzuführende Sturmflutübungen und im Sturmflutfall die rechtzeitige telefonische Warnung der Betroffenen sowie die Information der Bevölkerung über z.B. Rundfunk und Fernsehen.

Bei Sturmfluten über NN+6,50 m wird der gesamte Hafen gesperrt und auch die Polder geräumt, bei erwarteten Wasserständen über NN+7,30 m alle überflutungsgefährdeten Bereiche der Stadt hinter öffentlichen Hochwasserschutzanlagen planmäßig evakuiert.

3.3.1 Verteidigung der Hochwasserschutzanlagen

Die Verteidigung des öffentlichen Hochwasserschutzes erfolgt durch die Deichverteidigungsorganisation der Behörde für Bau und Verkehr. Sie besteht aus rd. 300 Mitgliedern der Deichverbände und Bediensteten Hamburger Behörden und wird durch Hilfskräfte der Feuerwehren, des THW und der Deichwacht unterstützt. Material wie Sandboden und Klei, Sandsäcke sowie Hilfsgeräte stehen zentral und dezentral zur Verfügung. Die Alarmierung und der Einsatz der Verteidigungskräfte wird vom ZKD mit koordiniert und mit gelenkt. Sie wird alarmiert, wenn Wasserstände über NN+5,00 m erwartet werden.

Die Polder sind unter der Führung eines mit hoheitlichen Befugnissen aufgestatteten Einsatzleiters zu verteidigen. In der Polderverteidigung werden rd. 1.500 Personen eingesetzt, die erforderlichen Maßnahmen sind in Alarm- und Einsatzplänen dokumentiert und orientieren sich an örtlichen Gefährdungen wie z.B. die Drempelhöhen der Sturmfluttore. Die Hafenspolder sind eingebunden in den regionalen Katastrophendienststab Hafen.

3.3.2 Die gesetzlichen Grundlagen

Der Sturmflutschutz ist in Hamburg in erster Linie im Wasser- und im Katastrophenschutzrecht verankert. Das Hamburger Wassergesetz (HWaG) regelt u.a. das Wohnen vor der Hauptdeichlinie und in Verbindung mit Verordnungen über öffentliche und private Hochwasserschutzanlagen die Anforderungen an Bau, Unterhaltung und die Verteidigung dieser Anlagen. Ihr Bau erfordert ein Planfeststellungs- oder Plangenehmigungsverfahren, in dem alle Sturmflutschutzbelange abgehandelt werden.

Die privaten Eigentümer haben einen Hochwasserschutzbeauftragten einzusetzen, der für den technisch einwandfreien Zustand verantwortlich ist, 2mal jährlich eine interne Schau und 1mal jährlich eine Sturmflutübung durchzuführen hat.

Die Flutschutzanlagen in der HafenCity und andere bauliche Anlagen in hochwassergefährdeten Gebieten werden im Zuge des Baugenehmigungsverfahrens zugelassen und dabei einer gesonderten Prüfung (Bauprüfdienst) unterzogen. In der HafenCity auf der Grundlage einer speziellen Verordnung.

Das Katastrophenschutzgesetz regelt in Verbindung mit Verordnungen, Richtlinien und Dienstweisungen die Einrichtung und Organisation der Katastrophenschutzbehörden sowie deren Stäbe mit den jeweiligen Aufgaben z.B. bei Sturmfluten.

4 Literatur

AUSSCHUß DER „KÜSTENSCHUTZWERKE“ DER DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR ERD- UND GRUNDBAU E.V. SOWIE DER HAFENBAUTECHNISCHEN GESELLSCHAFT E.V. (1981): Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken - EAK 1981. In: Die Küste, 36: 1-320.

GISZAS, H.: Sturmflutschutz: Herausforderung und Sicherheitskonzepte. In: Hansa,(141), Heft2, 2004, S. 47:51.

GÖNNERT, G./ S.K. DUBE/ T.S. MURTY & W: SIEFERT: Global Storm Surges: Theory, Observations and Applications. (=Die Küste, 63).

GÖNNERT, G. (2003): Sturmfluten und Windstau in der Deutschen Bucht. Charakter, Veränderungen und Maximalwerte im 20. Jahrhundert. In: Die Küste, Heft 65.

GÖNNERT, G./ FERK, U. (2000): Sturmflutschutz angesichts von globalem Klimawandel und anthropogenen Einflüssen dargestellt am Beispiel von Deutscher Bucht und Elbe. In: Blotenvorge, H./ Ossenbrügge J./ Wood, G.: Lokal verankert – weltweit vernetzt, Stuttgart, 2000, S. 163-170. Länder-Arbeitsgruppe (1988): Bemessungswasserstände entlang der Elbe. In: Die Küste, 47: 31-50.

SIEFERT, G. (1998): Bemessungswasserstände 2085A entlang der Elbe. Ergebnisse einer Überprüfung durch die Länderarbeitsgruppe nach 10 Jahren. In: Die Küste, Heft 60, 1998, S: 228-255.

Adressen

Dipl. Ing. J. Triebner
Department of Port and River Engineering
Dalmanstraße 1
20457 Hamburg
Germany

E-mail: Juergen.Triebner@ht.hamburg.de

PD. Dr. G. Gönnert
Department of Port and River Engineering
Dalmanstraße 1
20457 Hamburg
Germany

E-mail: Gabriele.Goennert@ht.hamburg.de

Methodik zur Ermittlung von Seegangparametern für die Bemessung von Bauwerken - Fortschreibung des Generalplans Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern -

Peter Fröhle¹, Dirk Carstensen², Knut Sommermeier³, Birger Gurwell³,
Christian Schlamkow¹, Stefan Drägerdt²

¹ Universität Rostock ² Technische Universität Dresden ³ StAUN Rostock

Summary

The basis for design and construction of coastal protection and flood protection structures in the federal state of Mecklenburg-Vorpommern are defined in the Master Plan Coast and Flood Protection Mecklenburg-Vorpommern (Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern). Based on the selected safety level, design high water levels have been defined in sections for the complete Baltic Coast of Mecklenburg-Vorpommern. Furthermore methods for the selection of other design parameters and design methods are described in the Master Plan.

At present, works for the update of the Master Plan are carried out and a revised version is scheduled for the year 2005, with main focuses on:

- description of the natural environment of the Baltic coast between Trave and Swine,
- principles for design of coastal protection measures in M-V,
- existing coastal protection structures and
- planned coastal protection structures with high realisation priority,

The Master Plan 2005 will contain wave parameters for the design of coastal protection measures along the Baltic coastal stretches and the "Bodden" coast. Selected aspects of the work leading to the design wave conditions are presented in the following sections.

Zusammenfassung

Die Abteilung Küste des Staatlichen Amtes für Umwelt und Natur, Rostock (StAUN) bearbeitet derzeit die Fortschreibung des Generalplans Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern. In diesem Zusammenhang ist es eines der Ziele, für die gesamte Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns Seegangparameter als Grundlage für die Bemessung von Küstenschutzwerken zu ermitteln. Die Arbeiten werden in einer Zusammenarbeit des StAUN Rostock mit der Universität Rostock und der Technischen Universität Dresden durchgeführt.

Die Untersuchungen erfolgen wegen der spezifisch unterschiedlichen Bedingungen getrennt für die Außenküste und die Boddengewässer. In diesem Beitrag werden ausschließlich die Verhältnisse für die Außenküste betrachtet.

Im Folgenden werden die verwendete Methodik zur Ermittlung und der Stand der Untersuchungen zur Ermittlung der Seegangs-Bemessungsgrößen dargestellt.

1 Einleitung

Die Abteilung Küste des Staatlichen Amtes für Umwelt und Natur arbeitet an der Fortschreibung des bestehenden Generalplans „Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern“. Neben der Katalogisierung der bisher durchgeführten Maßnahmen des Küsten- und Hochwasserschutzes erfolgt die Ausweisung von Vorhaben für die nächsten Jahre. Grundlegend dazu sind die derzeit gültigen

Bemessungsansätze und Belastungsgrößen für Küstenschutzanlagen zu überprüfen. Dies betrifft vor allem die örtlich anzusetzenden Bemessungshochwasserstände (BHW) sowie die Belastungen aus Seegang. Hierzu werden vom StAUN Rostock in Zusammenarbeit mit der Universität Rostock und der Technischen Universität Dresden Untersuchungen zur Festlegung von hydrodynamischen Bemessungsparametern für die gesamte Küste Mecklenburg-Vorpommerns als Grundlage für den Entwurf und die Bemessung von Küstenschutzwerken durchgeführt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt hierbei auf der Festlegung von Bemessungsgrößen für die Belastungsgröße Seegang sowie dessen Verknüpfung mit wechselnden Wasserständen.

Die Untersuchungen werden für die Außenküste (Ostseeküste) sowie wegen der in Teilen gänzlich anderen Fragestellungen in einem getrennten Projekt auch für die inneren Küstengewässer (Bodden) durchgeführt. Die Bearbeitung der Projekte ist für den Zeitraum 2003 bis Anfang 2005 geplant. Im Folgenden wird der Schwerpunkt auf die methodische Vorgehensweise sowie auf die Darstellung ausgewählter Ergebnisse gelegt.

2 Untersuchungen zur Ermittlung von hydrodynamischen Bemessungsparametern für Küstenschutzwerke an der Außenküste

2.1 Ansatz und Methodik

Ansätze für den Entwurf und die Bemessung von Küstenschutzwerken unterliegen keiner Normung und werden in der Praxis aus Schrifttum mit empfehlenden Charakter z.B. EAK 1993 und EAK 2002, SPM 1984 oder CEM2002 abgeleitet. Zur Lösung der Bemessungsprobleme, häufig unter Einschaltung von spezialisierten Ingenieurbüros oder Hochschulinstituten (vgl. EAU 1996, E136), stehen vielfach mehrere methodische Ansätze mit unterschiedlichen spezifischen Anforderungen an die Eingangsdaten zur Verfügung. Zudem sind für unterschiedliche Bauwerke auch die Bemessungseingangsdaten unterschiedlich festzulegen. So erfordert beispielsweise die Bemessung einer Hochwasserschutzwand die Definition denkbarer extremer Einzelereignisse (Wasserstände und/oder Wellen), die Bemessung einer Strandvorspülung dagegen die Definition von mittleren Wasserständen und Seegangereignissen mit der zugehörigen Verteilung über die Wellenhöhen und die Anlaufrichtungen. Somit können Eingangsdaten für die Bemessung von Küstenschutzwerken immer nur problemabhängig und ortsabhängig definiert werden. Das gilt für Hochwasserschutzaufgaben und Bauwerke zur Beeinflussung der Sedimentbewegung in gleicher Weise (Kohlhase 2004).

Als Eingangsdaten für die Bemessung von Bauwerken wurden im Rahmen der Untersuchungen zur Ermittlung der Bemessungsgrößen für die Außenküste Mecklenburg-Vorpommerns

- extreme Ereignisse und zugehörige Eintrittswahrscheinlichkeiten,
- mittlere Ereignisse und zugehörige Eintrittshäufigkeiten sowie
- mögliche Ungenauigkeiten / Unsicherheiten

festgelegt.

Diese Größen werden im Rahmen der Untersuchungen ortsabhängig ermittelt.

Die Untersuchungen sind in die folgenden Arbeitsschritte geteilt:

- Einteilung der Küste und Festlegung von räumlich übergeordneten Küstenabschnitten
- Aufbereitung und Bewertung vorhandener hydrographischer und meteorologischer Daten*
- Ermittlung von Zeitserien des Seegangs auf der Grundlage der vorhandenen Daten
- Statistische Analyse der Daten und Ermittlung von Bemessungsgrößen

* Wegen der begrenzten Zeit, die für die Untersuchungen zur Verfügung steht, werden zur Bearbeitung der Fragestellung keine weiteren Messungen in der Natur durchgeführt.

- Aufbereitung der Bemessungsgrößen für kleinräumige Küstenabschnitte und tabellarische Zusammenstellung sowie Aufbereitung für das GIS Küste Mecklenburg-Vorpommern

Im Folgenden werden die Arbeitsschritte näher erläutert und ausgewählte Ergebnisse dargestellt.

2.2 Einteilung der Küste und Festlegung von Küstenabschnitten

Als Kriterien für die Festlegung der Küstenabschnitte wurde insbesondere die Homogenität der Abschnitte bezüglich der Bemessungsdaten (im wesentlichen Seegang) nach küstenwasserbaulichen Gesichtspunkten definiert. In Abb. 1 sind die 13 übergeordneten Küstenabschnitte (A1 – A13) zusammengestellt.

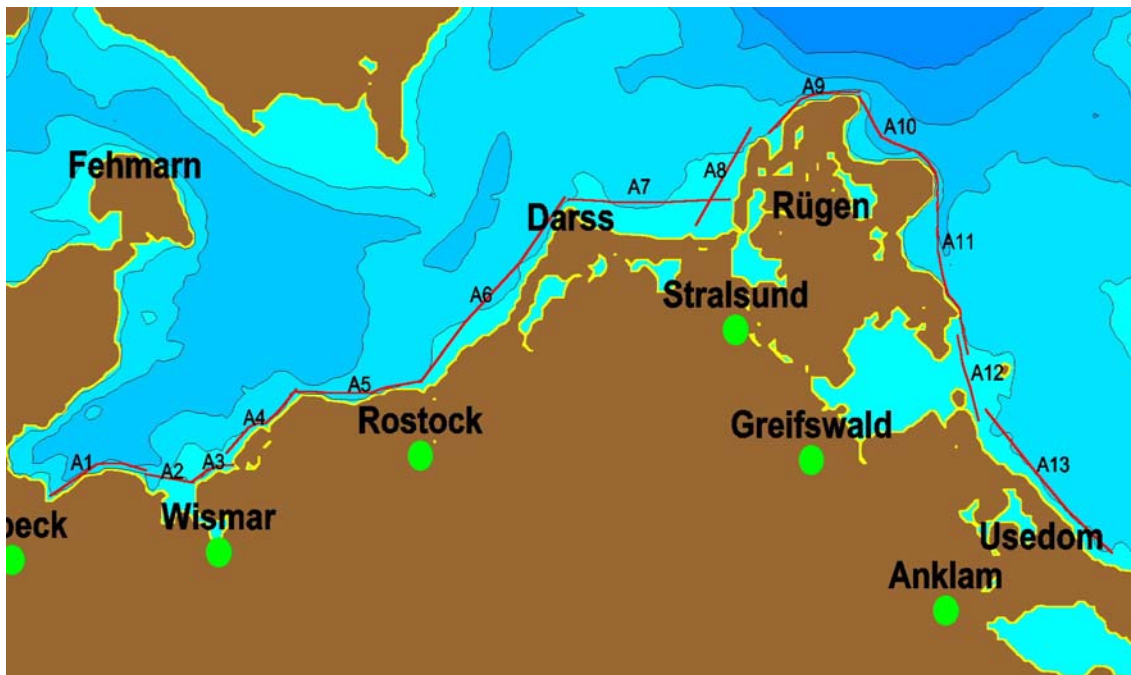


Abb. 1: Definition räumlich übergeordneter Küstenabschnitte für die Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns

Diese Abschnitte werden im Zuge der weiteren Bearbeitung in kleinräumige Küstenabschnitte untergliedert, für die dann die Bemessungsgrößen abgeleitet werden. Es wurde festgelegt, dass die Einflüsse morphologischer Strukturen, die eine räumliche Ausdehnung von weniger als 2,5km aufweisen, nicht aufgelöst werden.

Als Grundlage für die Bewertung der Variabilität des Seegangs innerhalb der gewählten Abschnitte und somit auch für die Signifikanz der Ergebnisse wurden in einer Parameterstudie Simulationsrechnungen mit dem numerischen Seegangmodell SWAN (Holthuijsen et al. 1993) durchgeführt. Für die gewählten übergeordneten Küstenabschnitte wurde die Verteilung der Wellenparameter über den jeweiligen Küstenabschnitt ermittelt.

Ein Ergebnis der Parameterstudie ist in Abb. 2 beispielhaft als Variabilität der signifikanten Wellenhöhen (H_{m0}) für den Küstenabschnitt 6 "Warnemünde – Fischland – Darss" dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die signifikanten Wellenhöhen in den definierten Schnitten zumindest Abschnittsweise als konstant angesehen werden können. Die Unterschiede der Wellenhöhen sind im wesentlichen auf lokale Effekte zurückzuführen und können einerseits auf die unterschiedlichen Wassertiefen im Bereich des Schnitts sowie andererseits auf Rand- und Abschirmeffekte für einzelne Windrichtungen zurückgeführt und somit im Zuge der weiteren Bearbeitung aus den Berechnungen eliminiert werden. Die Variabilität der Wellenparameter liegt über weite Bereiche der gewählten Küstenabschnitte unter 10%. Insgesamt kann somit – auch für die hier nicht dargestellten Parameter Wellenanlaufrichtungen

(Θ_m) und Wellenperioden (T_{02}) – festgestellt werden, dass die Definition von Wellenparameter für einzelne Küstenabschnitte eine zulässige Vereinfachung darstellt.

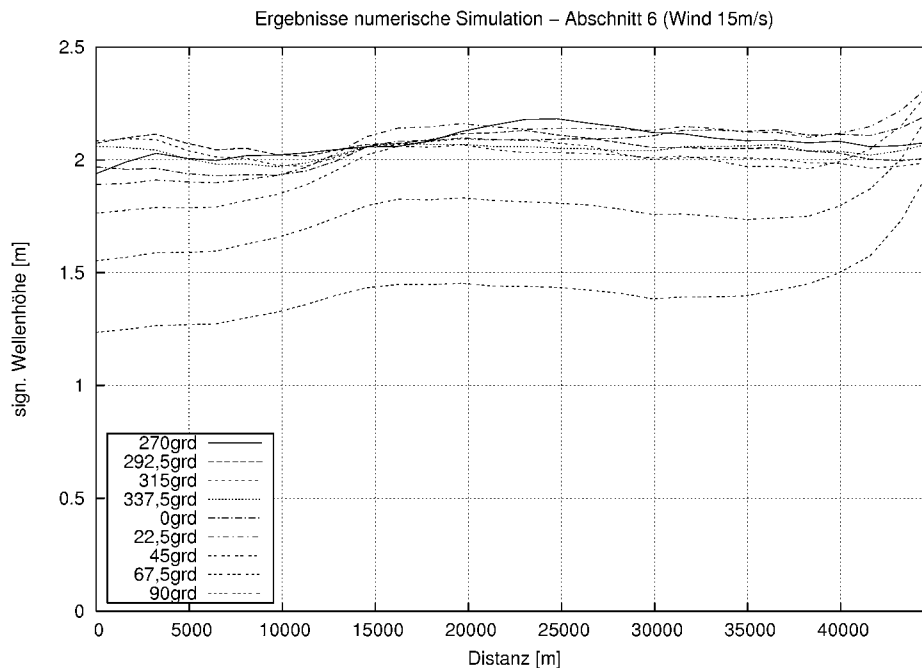


Abb. 2: Variabilität der signifikanten Wellenhöhen im Abschnitt 6 "Warnemünde – Fischland - Darss", Parameterstudie Küstenabschnitte, stationäre SWAN Simulation, Windgeschwindigkeit $U_{10}=15\text{m/s}$, Windrichtungen siehe Graphik

2.3 Aufbereitung und Bewertung vorhandener hydrographischer und meteorologischer Daten

Die für die Untersuchungen verfügbaren Eingangsdaten, die z.B. in der Datenbank des StAUN Rostock verfügbar sind, werden abschnittsbezogen zugeordnet und für die weiteren Anwendungen aufbereitet. Hierin eingeschlossen sind neben Messdaten des StAUN, des Deutschen Wetterdienstes, des Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, der zuständigen Wasser- und Schifffahrtsämter sowie von Universitäten auch verfügbare Simulationsrechnungen zur Seegangsvorhersage wie z.B. Simulationsrechnungen der GKSS.

Als Datenarten mit den entsprechenden Eigenschaften (Geschwindigkeit, Richtung, Zeitverhalten, Höhe usw.) wurden berücksichtigt:

- Wind
- Seegang
- Wasserstände

Die Daten liegen für den mecklenburg-vorpommerschen Teil der Ostseeküste an ca. 35 Messlokation über einen Zeitraum von ca. 1-2 Jahren bis zu etwa 50 Jahren vor. Die Datenlage für den Wind und die Wasserstände ist vergleichsweise gut. Seegangsdaten aus Messungen sind nur für ausgewählte Lokationen verfügbar.

2.4 Ermittlung von Zeitserien des Seegangs auf der Grundlage vorhandener Daten

Auf der Grundlage der verfügbaren Eingangsdaten werden für die räumlich übergeordneten Küstenabschnitte Zeitreihen des Seegangs nach folgenden Methoden ermittelt:

- Seegangsvorhersageverfahren
 - o SPM-Flachwasservorhersageverfahren (SPM 1984)
 - o Vorhersageverfahren nach Wagner (1967, 1985)

- Numerische Modellierung (stationär (Fröhle & Schlamkow 2004) und instationär)
 - o WAM
 - o SWAN (Holthiusen et al. 1993)
- Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen (z.B. IWR 2000)

Der Schwerpunkt der Untersuchungen wird auf Seegangsvorhersageverfahren sowie auf die Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen gelegt. Die Untersuchungen mit den numerischen Modellen dienen der Absicherung der Ergebnisse mit den Vorhersageverfahren bzw. der Ergebnisse der Korrelationsverfahren.

Als Grundlage für die Bewertung der Zuverlässigkeit der einzelnen Methoden der Seegangsermittlung wurden vergleichende Untersuchungen durchgeführt. Neben den Vorhersageverfahren (SPM 1984, Wagner 1985) wurden Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen (vgl. Fröhle 2000, IWR 2000) und die numerische Modellierung angewendet.

Zum Vergleich der Methoden wurden für ausgewählte Abschnitte in der südwestlichen Ostsee Zeitserien der Wellenparameter (Wellenhöhen, -perioden und -anlaufrihtungen) mit zugehörigen Wasserständen und Windinformationen erzeugt und mit den im Institut für Wasserbau für den Bereich der südwestlichen Ostsee vorhandenen Seegangsmessungen verglichen. Ein zeitlicher Ausschnitt aus den Daten ist beispielhaft für den Bereich Warnemünde in Abb. 3a-3c dargestellt. Zur Verdeutlichung der Unterschiede wurden die gemessenen und berechneten Wellenhöhen zusätzlich in x-y-Darstellungen eingetragen (Abb. 4a bis Abb. 4d). Vergleichbare Auswertungen wurden auch für die Wellenperioden und -anlaufrihtungen sowie für andere Messlokationen durchgeführt, auf diese Auswertungen wird inhaltlich Bezug genommen, auf Abb. wird aber wegen des beschränkten Raums in diesem Beitrag verzichtet.

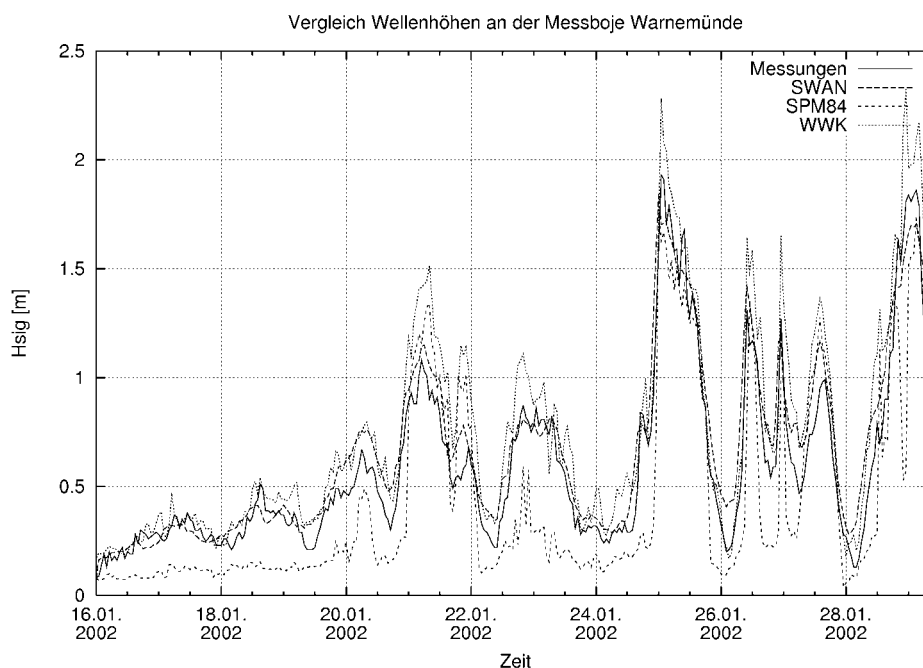


Abb. 3a: Zeitserien von Wellenhöhen für den Bereich Warnemünde, Daten aus Messungen, Wind-Wellen-Korrelationen, Wellenmodellen und Vorhersageverfahren

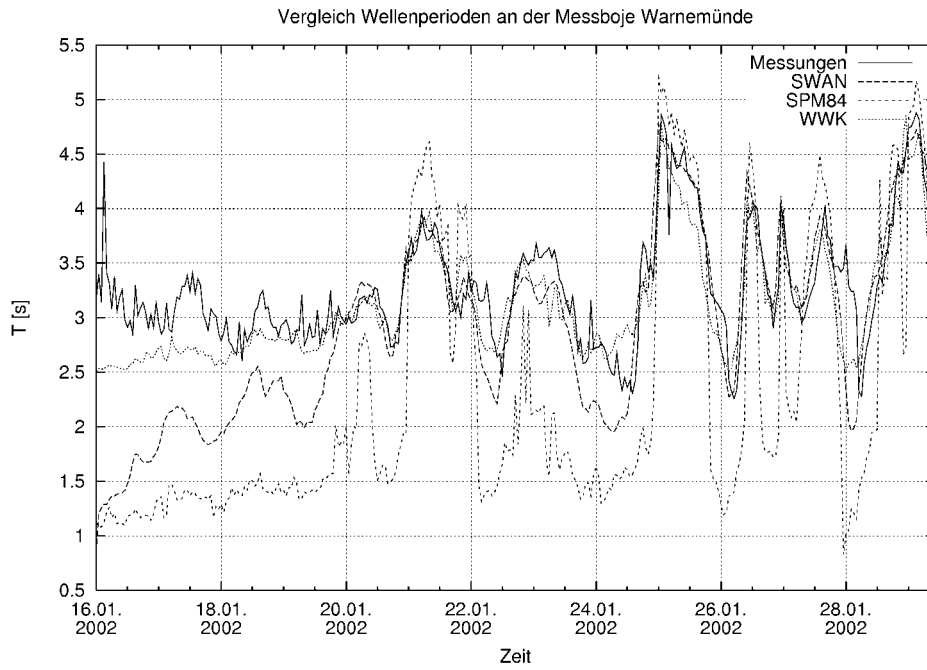


Abb. 3b: Zeitserien von Wellenperioden für den Bereich Warnemünde, Daten aus Messungen, Wind-Wellen-Korrelationen, Wellenmodellen und Vorhersageverfahren

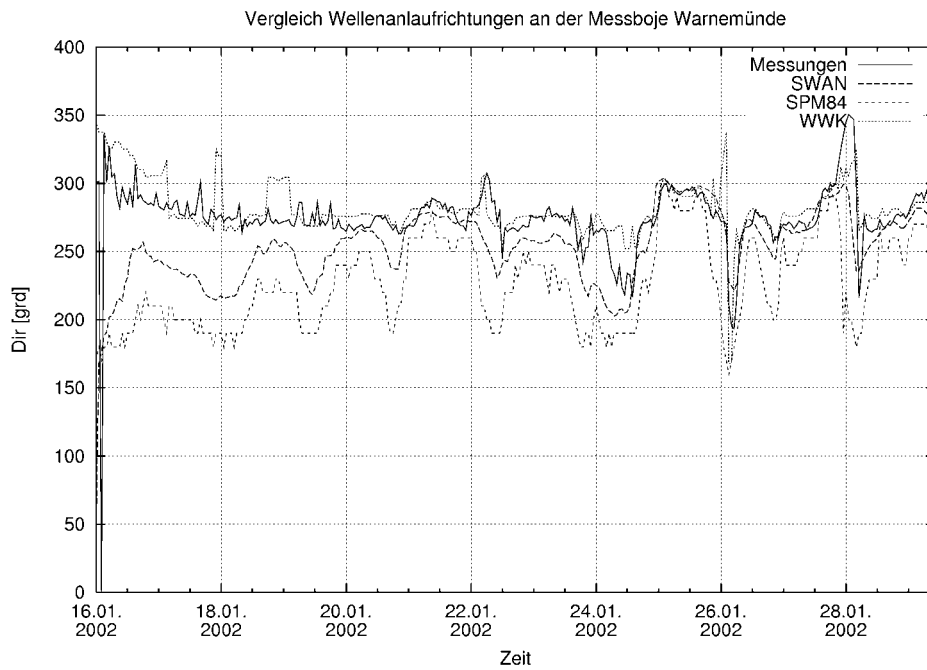


Abb. 3c: Zeitserien von Wellenanlafrichtungen für den Bereich Warnemünde, Daten aus Messungen, Wind-Wellen-Korrelationen, Wellenmodellen und Vorhersageverfahren

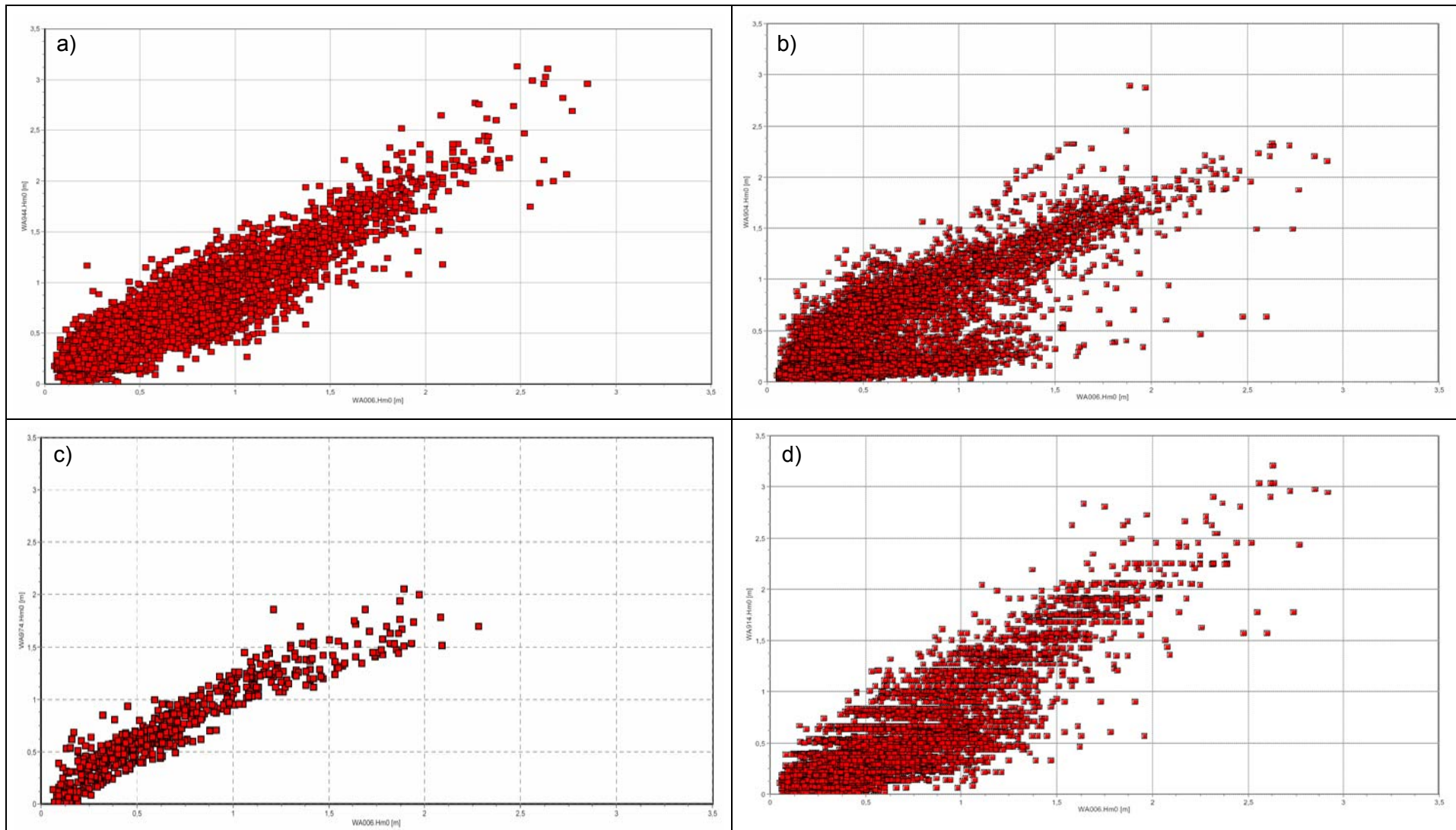


Abb. 4: Vergleich gemessener und simulierter Wellenhöhen an der Station Warnemünde a) Wind-Wellen-Korrelationen, b) Vorhersage nach SPM, c) instationäre SWAN Simulationen (hochaufgelöste Windinformationen, Gitternetz 1km x 1km) d) stationäre SWAN Simulationen

Allgemein werden die gemessenen Ereignisse zumindest qualitativ ausreichend wiedergegeben. Wie zu erwarten, ist die absolute Genauigkeit der Verfahren im Vergleich zu Messdaten jedoch höchst unterschiedlich. Unter der Annahme, dass die in der Natur durch Messung gewonnenen Größen den vorhandenen Zustand am genauesten abbilden, liefern Wind-Wellen-Korrelationen, die ja für eine bestimmte Position an Messungen geeicht sind, im Mittel die Ergebnisse mit den geringsten Abweichungen. Die gemessenen Wellenhöhen, -perioden und -anlaufrihtungen werden praktisch exakt abgebildet. Es ist aber darauf hinzuweisen, dass auch diese Methodik ihre Grenzen hat, insbesondere für extreme Ereignisse und wenn die Daten zur Ermittlung der Korrelationen abschnittsweise lückenhaft sind. Ferner kann diese Methodik nur angewandt werden, wenn zeitgleiche Messdaten für den Wind und den Seegang vorliegen.

Die Ergebnisse der numerischen Simulationsrechnungen mit dem Modell SWAN zeigen sowohl bei der stationären Berechnung als besonders auch bei der instationären Berechnung vergleichsweise geringe Abweichungen von den gemessenen Ergebnissen. Ein weiterer Vorteil der numerischen Simulation liegt darin, dass neben der zeitlichen Variabilität auch die räumliche Variabilität des Seegangs erfasst wird (vgl. Abb.5). Die Anforderungen an die Eingangsdaten und an die Leistungsfähigkeit der Computersysteme sind jedoch erheblich. Nach den Ergebnissen von hier nicht im einzelnen dargestellten Voruntersuchungen müssen die numerischen Berechnungen zur Seegangsvorhersage jeweils den gesamten Bereich der südlichen Ostsee etwa westlich von Bornholm (vgl. Berechnungsgebiet in Abb. 5) umfassen. Auch die Anforderungen an die Eingangsdaten, d.h. die Bathymetrie und die Winddaten sind sehr hoch. Derzeit wird das Modell mit einer Bathymetrie mit einer Auflösung von ca. 1km x 1km (Seifert et al. 2001) sowie mit Windfeldern des DWD in einer räumlichen Auflösung von ca. 7km x 7km und einer zeitlichen Auflösung von 1h betrieben.

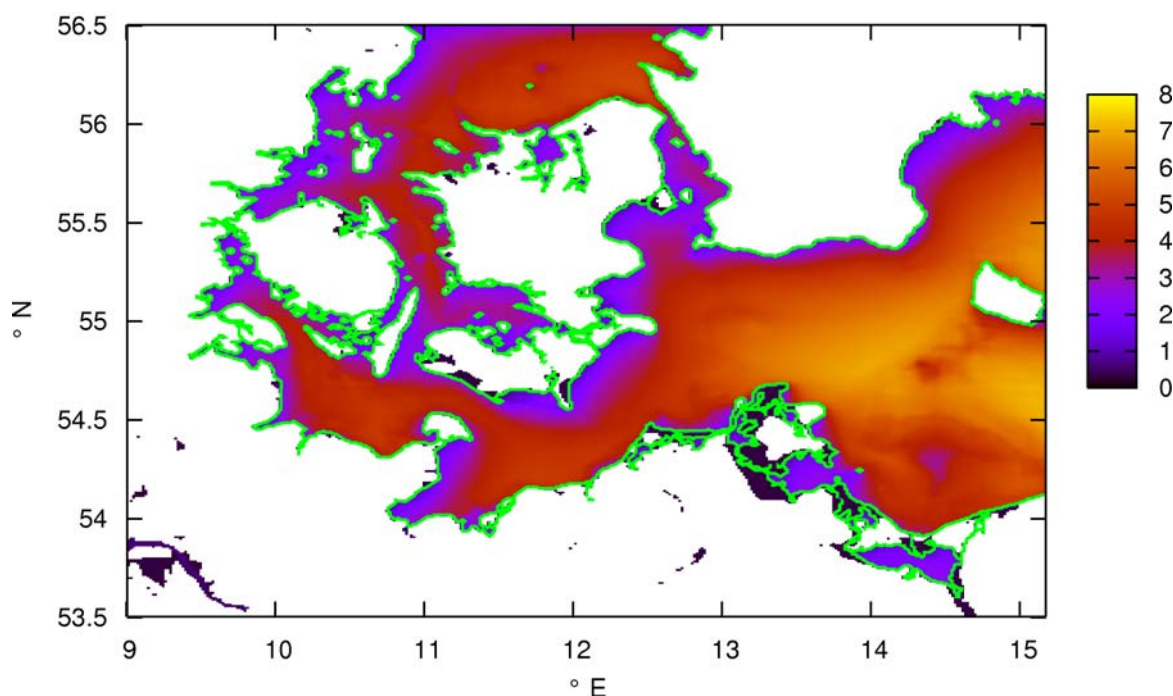


Abb. 5: Räumliche Verteilung der Wellenhöhen in der südlichen Ostsee (Wind 45°, 20 m/s)

Ferner ist darauf hinzuweisen, dass bei allen Vorteilen der numerischen Simulation auch die numerische Modellierung nicht ohne Verifikation und kritische Analyse der Ergebnisse angewendet werden kann. Die Modelle zur Ermittlung von Wellenhöhen bieten mehrere Ansätze zur Berechnung des Energieeintrags in die Wassersäule sowie eine Vielzahl von parametrisierten Ansätzen und Parametern. Beispielsweise erlaubt das numerische Modell SWAN die Ermittlung der Wellen nach 1. 2. oder 3. Generation der Wellenvorhersage und verwendet parametrisierte Ansätze für den Windschub, die

nichtlinearen Wellen-Wellen-Interaktionen sowie für die Flachwassereffekte und das Wellenbrechen. Diese Modelle und Parameter müssten eigentlich speziell für jedes Untersuchungsgebiet bestimmt und angepasst werden. Dies kann jedoch im wesentlichen aus Mangel an Seegangsdaten häufig nicht erfolgen, so dass die Modelle mit den Standardeinstellungen betrieben werden. Bei sorgfältiger Anwendung lassen sich dennoch - wie die Beispiele zeigen – auch mit den Standardeinstellungen durchaus brauchbare Ergebnisse mit den numerischen Modellen erzielen.

Die Ergebnisse mit den vergleichsweise größten Abweichungen wurden erwartungsgemäß mit der Flachwasser Seegangsvorhersage nach dem Shore-Protection-Manual ermittelt. Jedoch ist der Berechnungsaufwand gering und insbesondere die Wellenhöhen bei Ereignissen mit hohen mittleren Windgeschwindigkeit ($U > 10 \text{ m/s}$) werden gut wiedergegeben. Hinzuweisen ist auch darauf, dass extreme Ausreißer teilweise auch auf die Wind-Datenbasis zurückzuführen sind.

Insgesamt kann basierend auf den Auswertungen für die südwestliche Ostsee festgestellt werden, dass

- die gemessenen Wellenparameter (Wellenhöhe, -periode und –anlaufrichtung) im Mittel mit einer Wind-Wellen-Korrelation praktisch exakt (Steigung $m=1$) wiedergegeben werden und die mittlere Streuungen mit rd. $\Delta H_{m0} = 0,15 \text{ m}$ vergleichsweise gering sind.
- die Wellenhöhen bei einer hochauflösenden instationären numerischen Simulation mit dem Modell SWAN im Mittel fast exakt abgebildet werden (Steigung $m=1,02$) und auch die Wellenanlaufrichtungen und –perioden nahezu an die Qualität der Ergebnisse mit den Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen heranreichen. Die Rechenzeiten mit dem instationären Modell sind aber mit den derzeit verwendeten Rechnern noch sehr lang, so dass nur vergleichsweise kurze Zeiträume mit dem instationären Modell bearbeitet werden können. Hier wird zukünftig Abhilfe durch den Einsatz eines Großrechners erwartet. Mittlere Streuungen der Parameter können derzeit noch nicht angegeben werden, da die Datenbasis zu gering ist.
- die Wellenhöhen bei einer stationären numerische Simulation mit dem Modell SWAN im Mittel leicht (ca. 5%-10%) überschätzt werden, die Wellenanlaufrichtungen und –perioden stärker von den Messwerten abweichen als bei der Wind-Wellen-Korrelation aber geringer als der Vorhersage nach dem Shore Protection Manual. Die mittleren Streuungen betragen rd. $\Delta H_{m0}=0,2^*$.
- die Wellenhöhen bei einer Wellenvorhersage nach dem Shore Protection Manual im Mittel leicht unterschätzt (ca. 10%) werden und wie auch die Parameter Wellenanlaufrichtung und –periode erheblich streuen (die mittlere Streuungen rd. $\Delta H_{m0}=0,25 \text{ m}^*$).

Details der Untersuchungen zur Zuverlässigkeit der Methoden sind in Fröhle & Schlamkow (2004) dargestellt.

2.5 Statistische Analyse des Seegangs

Als Ergebnis der Untersuchungen wurden für die räumlich übergeordneten Küstenabschnitte Zeitserien der Wellenparameter mit zugehörigen Wasserständen und Windinformationen erzeugt. Diese Zeitserien sind von unterschiedlichem zeitlichen Umfang und weisen je nach angewandeter Methodik (vgl. 2.4) und verfügbarer Datengrundlage unterschiedliche Genauigkeiten auf.

Neben den Daten ist eine weitere Grundlage für die statistischen Untersuchungen des Seegangs und der zugehörigen Größen die problemabhängige Definition von erforderlichen Bemessungsgrößen. Hierin eingeschlossen sind je nach Fragestellung extreme Ereignisse unter dem Aspekt des Risikos für ggf. zulässige Zerstörung von Bauwerken einschließlich der Strände sowie mittlere Ereignisse.

Die ermittelten Zeitserien werden nach statistischen Verfahren ausgewertet. Es werden extreme Ereignisse und zugehörige Eintrittswahrscheinlichkeiten, mittlere Ereignisse und zugehörige Eintrittshäufigkeiten ermittelt sowie Ungenauigkeiten abgeschätzt.

* Die mittleren Abweichungen werden wesentlich beeinflusst durch die Qualität der Winddaten. Hier kommt es für einzelne Windrichtungen offensichtlich zu Abschattungswirkungen als Folge der orographischen Bedingungen im Bereich des Windmessers (vgl. Abb. 4).

Als Grundlage für die statistischen Untersuchungen wurden beispielsweise für den Bereich Warnemünde im Zuge der Untersuchungen aus den meteorologischen Daten, den Seegangsmessungen, Wind-Wellen-Korrelationen und Vorhersageverfahren mehrere Zeitserien des Seegangs für einen Zeitraum von rd. 25 Jahren erzeugt. Ein Ausschnitt aus einer dieser Ganglinien ist in Abb. 6 dargestellt.

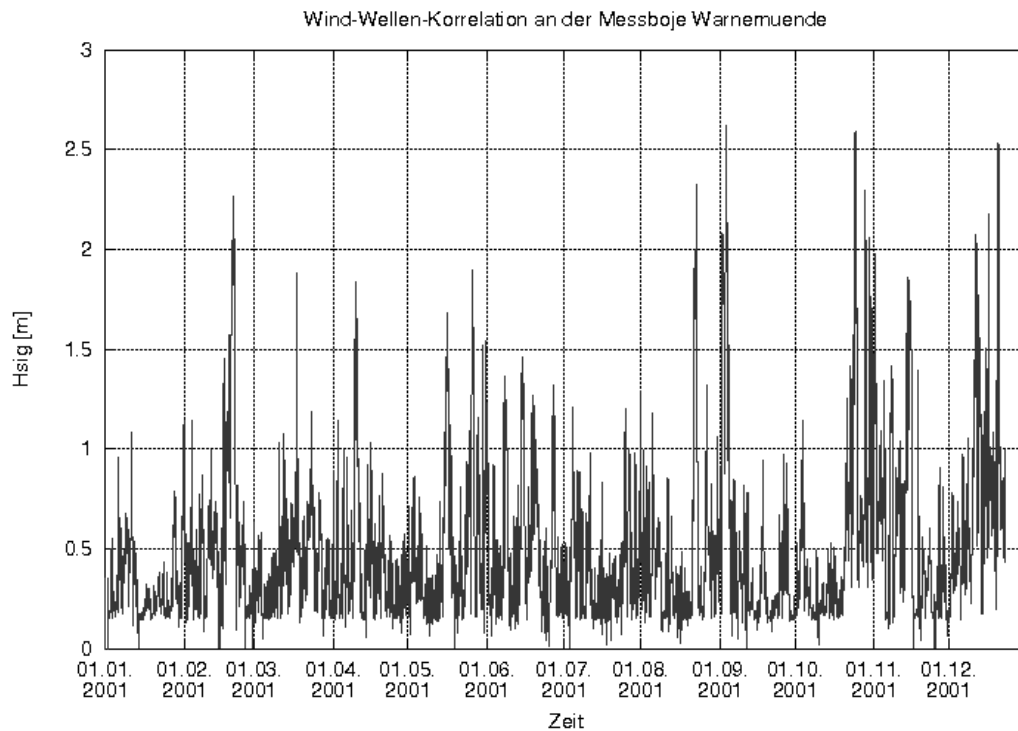


Abb. 6: Zeitserie der Wellenhöhen in Warnemünde, Zeitraum Jan.-Dez. 2001

%	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180	202,5	225	247,5	270	292,5	315	337,5
0,125	9,871	4,239	3,174	1,425	1,333	3,882	2,767	4,424	4,081	1,943	4,074	3,232	7,876	2,058	1,265	1,003
0,375	0,942	1,694	0,975	0,660	0,351	0,389	0,268	0,101	0,254	0,485	1,621	2,303	3,598	2,861	1,375	0,694
0,625	0,669	1,302	0,138	0,003	0,001	-	-	-	-	0,001	0,042	0,527	2,059	3,336	1,322	0,748
0,875	0,412	0,541	0,010	-	-	-	-	-	-	-	-	0,035	0,522	2,463	0,436	0,571
1,125	0,168	0,211	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,344	2,090	0,773	0,280
1,375	0,254	0,082	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,036	1,345	0,328	0,172
1,625	0,102	0,025	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,009	1,144	0,324	0,107
1,875	0,043	0,010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001	0,375	0,456	0,043
2,125	0,011	0,002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001	0,274	0,138	0,028
2,375	0,004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001	0,085	0,124	0,010
2,625	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,066	0,051	0,005
2,875	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,049	0,045	0,002
3,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,012	0,009	-
3,375	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,002	0,001	0,002
3,625	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001	0,002	-

Tab. 1: Mittlere prozentuale Häufigkeitsverteilung des Seegangs in Abhängigkeit von der Wellenhöhen und der Wellenanlaufichtung (Datengrundlage stationäre SWAN Simulationen)

Aus den Zeitserien werden dann mittels statistischer Verfahren mittlere Häufigkeiten berechnet und extreme Ereignisse abgeschätzt. Die mittlere Seegangsverteilung basierend auf den stationären SWAN Simulationen sind für den Bereich Warnemünde in Tab. 1 angegeben.

Ein Beispiel für die Anpassung von Extremwertverteilungen an die Jahresmaxima der signifikanten Wellenhöhen ist für den Küstenabschnitt A6 (Fischland, Darss) in Abb. 7 dargestellt. Hieraus werden extreme Wellenhöhen mit den zugehörigen mittleren Eintrittshäufigkeiten abgeleitet. Diese sind für die Küstenabschnitte A6 und Warnemünde in Tab. 2 beispielhaft angegeben. In den Werten der Tab. 2 sind noch keine Korrekturen für die systematischen Abweichungen der angewendeten Vorhersagemethoden enthalten. Unter der Annahme der entsprechenden Korrekturfaktoren (vgl. im Einzelnen Kap. 2.4) sind die Ergebnisse für die beiden Verfahren (SWAN stationär und SPM) annähernd gleich. Beispielsweise ergeben sich nach Korrektur für den Küstenabschnitt A6 für die signifikanten Wellenhöhen mit einem mittleren Wiederkehrintervall von 50 Jahren für die nach der SPM Methode ermittelten Wellenhöhen $H_{m0}=3,60\text{m}$ und für die nach der stationäre SWAN Methode ermittelten Wellen $H_{m0}=3,64\text{m}$. Der absolute Unterschied beträgt $\Delta H_{m0}=0,04\text{m}$ und ist deutlich geringer als die aus der statistischen Extrapolation resultierenden Unsicherheiten.

Jährlichkeit	10	20	50	100	250
A6 SPM	3,08 m	3,19 m	3,32 m	3,41 m	3,52 m
A6 SWAN stationär	3,67 m	3,74 m	3,82 m	3,87 m	3,92 m
WM SPM	2,90 m	3,06 m	3,27 m	3,42 m	3,63 m
WM SWAN stationär	3,69 m	3,77 m	3,85 m	3,90 m	3,96 m

Tab. 2: Extreme Wellenhöhen in den Küstenabschnitten A6 und Warnemünde (WM) mit zugehörigen mittleren Eintrittswahrscheinlichkeiten (ohne Berücks. der Vorhersageungenauigkeiten)

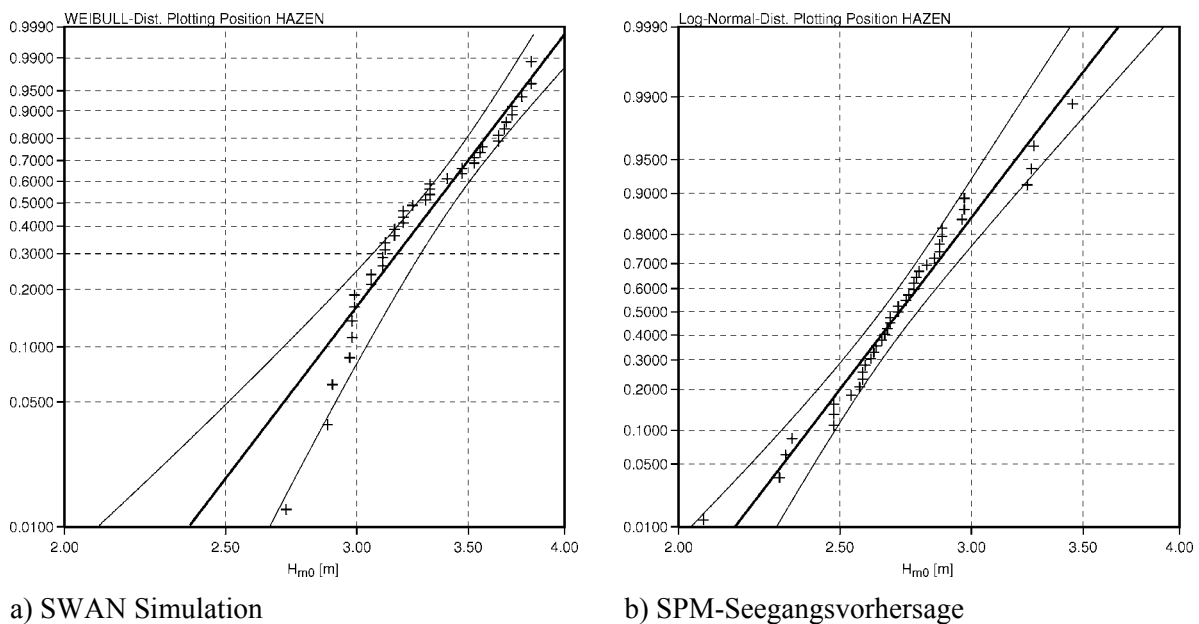


Abb. 7: Extreme Wellenhöhen und zugehörige Extremwertverteilungen für den Küstenabschnitt A6 Fischland, Darss (ohne Berücksichtigung der Vorhersageungenauigkeiten)

Die Arbeiten zu diesem Themenkomplex sind derzeit noch nicht komplett abgeschlossen. Hinweise zu statistischen Verfahren und der erforderlichen Datenbasis werden beispielsweise auch in den EAK 2002 bzw. in Fröhle (2000) gegeben.

Die Verknüpfung von Wasserständen und Seegang für übergeordnete Küstenabschnitte erfolgt auf statistischem Wege aus Wasserstandsmessungen und den ermittelten Seegangsdaten. Ein Beispiel für die statistischen Zusammenhänge zwischen Wellenhöhen und Wasserständen sind in Abb. 8 dargestellt.

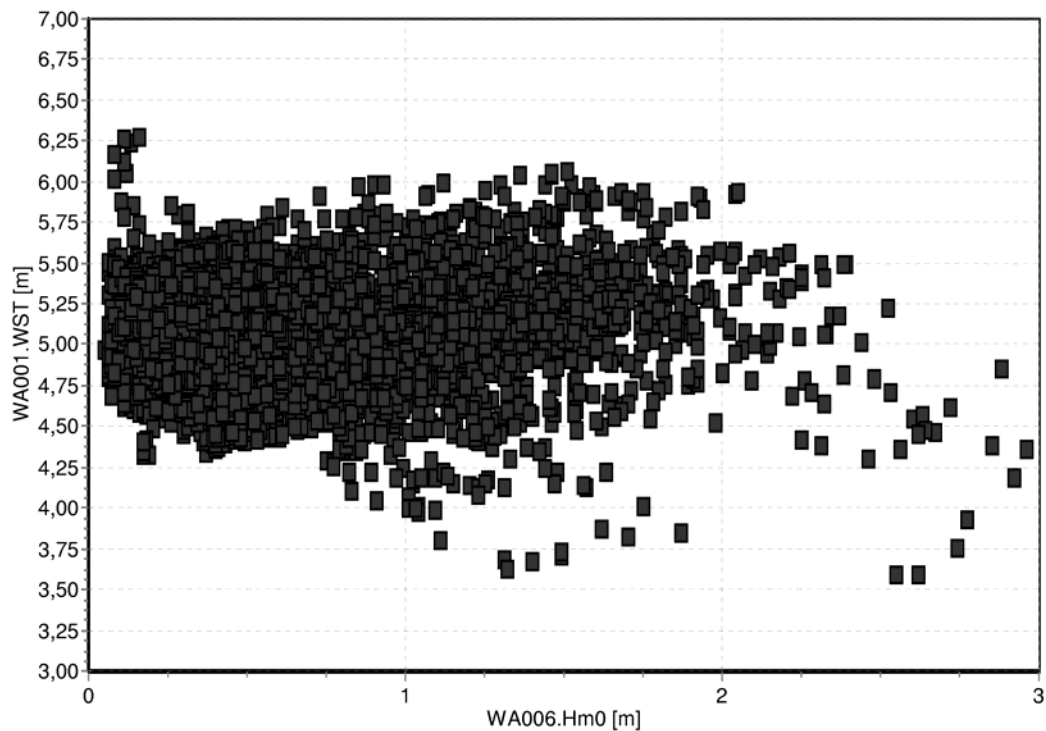


Abb. 8: Signifikante Wellenhöhe und zeitlich zugehörige Wasserstände Warnemünde (Messungen Zeitraum 1999 – 2002)

Im einzelnen ist es das Ziel der statistischen Untersuchungen für die übergeordneten Abschnitte:

- extreme Seegangsverhältnisse für hohe,
- mittlere und
- niedrige Wasserstände sowie
- extreme (hohe und niedrige) Wasserstände für hohe Seegangsbelastungen.

zu ermitteln. Die Untersuchungen hierzu sind derzeit in Bearbeitung.

2.6 Aufbereitung der Bemessungsgrößen

Die mit der statistischen Analyse ermittelten Bemessungsgrößen werden mit numerischen Verfahren und Ansätzen auf kleinräumige Küstenabschnitte skaliert.

Eine Berechnung der Parameter für die kleinräumigen Küstenabschnitte erfolgt mit dem numerischen Modell:

- SWAN sowie für ausgewählte Abschnitte vergleichend mit
- DEM Simulationsmodell MIKE21 und, sofern für die Küstenabschnitte möglich,
- nach dem Ansatz von BATTJES und JANSSEN.

Aus den Ergebnissen werden – als offene Anlage zum Generalplan – die entsprechenden Tabellen:

- Bemessungsseegang für BHW-Verhältnisse,
- Extremer Seegang für die kleinräumigen Abschnitte und
- mittlerer Seegang für die räumlich übergeordneten Abschnitte

abgeleitet und für die Anwendung im Generalplan sowie im GIS Küste Mecklenburg-Vorpommern aufbereitet.

Wegen der begrenzten Zeit für die Durchführung des Projekts und auch wegen der beschränkten Eingangsdatenlage ist zu erwarten, dass nicht alle Küstenabschnitte mit dem gleichen Detaillierungsgrad untersucht werden können. Daher ist es ein weiteres Ziel der Untersuchungen Küstenabschnitte mit vergleichsweise „schlechter“ Datengrundlage zu identifizieren und ggf. in weiteren Bearbeitungsschritten sukzessive abzuarbeiten. Hinweise bezüglich der zu erwartenden Genauigkeit der Bemessungsgrößen werden in den angegebenen Ungenauigkeiten berücksichtigt.

3 Schlußfolgerungen und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde die für den Bereich der Außenküste Mecklenburg-Vorpommerns angewandte Methodik zur Ermittlung von Seegangs-Bemessungsparametern für küstenwasserbauliche Strukturen und Bauwerke dargestellt. Die entwickelte Methodik stellt eine Verbesserung bei der Auswahl von Bemessungsseegang dar. Es erfolgen quantitative Angaben zu den Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der Wellenparameter und bei der statistischen Extrapolation der Daten sowohl für die extremen Ereignisse als auch für die mittleren Verhältnisse. Durch die Verknüpfung von Wasserständen und Seegang werden Angaben zum gemeinsamen Eintreten von extremen Wasserständen und dem dann resultierenden Seegang möglich.

Im Zuge der Bearbeitung wurde weiterer Bearbeitungs- und Forschungsbedarf hinsichtlich der Festlegung der hydrodynamischen Bemessungsparameter als Grundlage für die Bemessung von Küsten- und Hochwasserschutzwerken an der Ostseeküste deutlich, insbesondere:

- die umfassende Einbeziehung numerischer Modelle zur Seegangsvorhersage,
- die Durchführung von Seegangsmessungen an ausgewählten Lokationen zur Vervollständigung der Datengrundlage,
- die erweiterte Bewertung der zu erwartenden quantitativen und qualitativen Unterschiede für die unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung der Seengangsdaten,
- die Einbeziehung der spektralen Verteilung der Seegangsennergie,
- die erweiterte statistische Verknüpfung von Seegang, Wasserstand und ggf. Strömungen,
- die Ermittlung von statistischen Verteilungsfunktionen der Seegangparameter und abhängiger und unabhängiger hydrodynamischer Größen als Grundlage für die Anwendung probabilistischer Bemessungsverfahren,
- die Definition von hydrodynamischen Bemessungsdaten,
- die Bewertung des Risikos für einzelne Küstenabschnitte,
- die Anwendung probabilistischer Sicherheitskonzepte für die Bemessung von Hochwasserschutzsystemen sowie
- die Anwendung der Methodik auf die Boddengewässer Mecklenburg-Vorpommerns.

Die oben genannte Aufgabenstellung sowie die daraus resultierenden Fragestellungen werden Grundlage sein für ein erweitertes Forschungsvorhaben zur Ermittlung von hydrodynamischen Bemessungsgrößen für die Ostseeküste.

4 Literatur

CEM: Coastal Engineering Manual, CEM Summary, Coastal Engineering Research Centre (CERC)
<http://bigfoot.wes.army.mil/cem026.html>, (Stand: 2003)

- EAK 1993: Empfehlungen für Küstenschutzwerke, Empfehlungen des Ausschusses für Küstenschutzwerke, Die Küste, Heft 55, Heide 1993
- EAK 2002: Empfehlungen für Küstenschutzwerke, Empfehlungen des Ausschusses für Küstenschutzwerke, Die Küste, Heft 65, Heide 2002
- EAU 1996: Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen, Häfen und Wasserstraßen, EAU 1996, 9. Auflage, Ernst & Sohn, 1996
- FRÖHLE, P.: Messung und statistische Analyse von Seegang als Eingangsgröße für den Entwurf und die Bemessung von Bauwerken des Küstenwasserbaus, Rostocker Berichte aus dem Fachbereich Bauingenieurwesen, Heft 2, Rostock 2000
- FRÖHLE, P., SCHLAMKOW, C.: High resolution numerical wave simulations compared to wave measurements and wave hindcast methods, Proc. Second German-Chinese Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering, NanJing, October 11th – October 13th 2004, to be published
- HOLTHUIJSEN, L.H., BOOIJ, N. & RIS, R.C.: A spectral wave model for the coastal zone, Proceedings 2nd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, New Orleans, Louisiana, July 25-28, 1993, New York, pp. 630-641.
- KOHLHASE, S.: Zur Konzeption von technischen Maßnahmen zur Küstensicherung mit Beispielen aus dem Küstengebiet der Nord- und Ostsee, Jahrbuch der Hafenbautechnischen Vereinigung, 54. Band, Hamburg 2004
- IWR: Einfluss von Steiluferabbrüchen an der Ostsee auf die Prozessdynamik angrenzender Flachwasserbereiche, Teilprojekt Hydrodynamik, Abschlussbericht, Rostock 2000 (unveröffentlicht)
- Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Umwelt M-V: Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz M-V, Schwerin 1994
- Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Umwelt M-V: Küstenschutz in Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin 1997
- SEIFFERT T., TAUBER, F. & KAYSER, B.: A High Resolution Spherical Grid Topography of the Baltic Sea – revised edition, Proceedings of the Baltic Sea Science Congress, Stockholm 25-29. November 2001
- SPM: Shore Protection Manual, Coastal Engineering Research Centre, U.S. Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, 1984
- WAGNER, H.: „Bestimmung der durch Wind erzeugten, stationären Strömungs- und Stauerscheinungen in Seen und Meeren“, Dissertation, TU Dresden, 1967
- WAGNER, H.: Empirisch-rechnerische Prognose von durch Wind erzeugten Wellen. Seewirtschaft, Heft 6 1985, Berlin

Adressen

Dr.-Ing. Peter Fröhle
Dipl.-Ing. Christian Schlamkow
Institut für Wasserbau
Universität Rostock
Justus-von-Liebig-Weg 6, LAG II
18059 Rostock

Dr. Birger Gurwell
Dipl.-Ing. Knut Sommermeier
StAUN Rostock
Erich-Schlesinger-Str. 35
18059 Rostock

Dr. Dirk Carstensen
Dipl.-Ing. Stefan Drägerdt
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik
Technische Universität Dresden

01062 Dresden

E-mail:
peter.froehle@bauing.uni-rostock.de
christian.schlamkow@bauing.uni-rostock.de
birger.gurwell@staunhro.mv-regierung.de
knut.sommermeier@staunhro.mv-regierung.de
dirk.carstensen@mailbox.tu-dresden.de
stefan.draegerdt@mailbox.tu-dresden.de

Sicherheitsüberprüfung der Schleswig - Holsteinischen Landesschutzdeiche an der Westküste hinsichtlich des Wellenaufbaus bzw. des Wellenüberbaus für den Generalplan 2001

Joachim Grüne¹ und Joachim Gärtner²

¹Forschungszentrum Küste, ²Amt für ländliche Räume Husum

Summary

For the performance of a safety analysis models and procedures were developed for the evaluation of the decisive sea state (evaluation of a wave parameter register) and for the calculation of the decisive wave run-up and overtopping. These models consider the natural sea state characteristic as well as the complexity of the dike cross-sections in nature and are based on results from long-time flotsam level surveys, on results from extensive wave measurements on foreshore of dykes at different places at the German North Sea coast and on results from wave run-up measurements in field at dikes with different cross-sections and sea state conditions as well as from large-scale laboratory tests. Since an economically optimized safety analysis cannot be performed with generalised dike profiles for coastline sections due to the local variation of its profile forms and crown heights, the safety analysis has been performed for the locally surveyed dike profiles.

Zusammenfassung

Für die Sicherheitsüberprüfungen wurden Berechnungsmodelle und -verfahren für die Ermittlung des maßgebenden Seegangs (Erstellung eines Seegangskatasters) und des maßgebenden Wellenaufbaus bzw. Wellenüberbaus entwickelt, die insbesondere die natürliche Seegangsscharakteristik und die Komplexität der Deichquerschnitte in der Natur berücksichtigen. Diese Modelle und Verfahren basieren auf langjährigen Einmessungen der Treibselgrenzen, auf Erkenntnissen aus umfangreichen Wellenmessungen in Deichnähe an verschiedenen Orten der deutschen Nordseeküste und auf Erkenntnissen aus Wellenaufbaumessungen in der Natur an Deichen mit verschiedenartigen Querschnitten und Seegangsverhältnissen sowie aus großmaßstäblichen Laborversuchen. Da eine wirtschaftlich optimierte Sicherheitsüberprüfung der Landesschutzdeiche wegen ihrer Vielfalt an Außenprofilformen und Kronenhöhen nicht mit Regelprofilen erfolgen kann, wurde auf die bisher üblichen abschnittsweise einheitlichen Wellenaufbauten und Sollhöhen verzichtet und eine individuelle Überprüfung aufgemessener Deichprofile vorgenommen.

1 Einleitung

Die Sicherheitsüberprüfungen für die Landesschutzdeiche der Westküste Schleswig-Holsteins wurden vom Forschungszentrum Küste (FZK) in Kooperation mit dem Amt für ländliche Räume Husum durchgeführt und knüpften an die gemeinsame Durchführung des Forschungsvorhabens „Seegangs- und Wellenaufbaumessprogramm Dithmarscher Küste und Elbe“ an (Gärtner et. al., 1995). Zu Beginn der Arbeiten war die Untersuchung von etwa 60 Deichabschnitten entsprechend der Aufteilung des Generalplans 1986 vorgesehen. Das vorgesehene Konzept wurde nach ersten Teilergebnissen für das Testgebiet Dithmarschen wie folgt wesentlich verändert und vor allem stark ausgeweitet:

Mit dem neu erstellten Berechnungsmodell (Kapitel 2) zur Ermittlung des Wellenaufbaus wurde im Umkehrverfahren eine Methode zur Bestimmung der Seegangssparameter aus den zahlreich vorliegenden Treibselmessungen (Kapitel 5) entwickelt. Als Endergebnis konnte für die gesamte Deichlinie

der Westküste ein Verzeichnis der für die Sicherheitsüberprüfungen maßgebenden Seegangparameter (Seegangskataster) erstellt werden (Kapitel 6). Für Detailuntersuchungen zum Seegang (Brunsbüttel-Alter Hafen) wurde das numerische Modell SWAN eingesetzt. Das zusätzlich zur Ermittlung des Wellenaufaufs- bzw. -überlaufs vorgesehene Modell ODIFLOCS wurde nicht verwendet, da es bei stark ungleichförmigen Außenprofilformen versagt und nicht geeicht werden kann (Grüne/Wang, 1998).

Weiterhin zeigten die Vorarbeiten, daß sich die bestehenden Landesschutzdeiche mit repräsentativen Deichprofilen (Regelprofilen) nur unzulänglich beschreiben lassen, da sich die Außenprofile und Kronenhöhen meist ständig ändernd. Daher wurde das Konzept der Sicherheitsüberprüfung dahingehend geändert, dass im Generalplan 2001 keine Sollhöhen mehr festgelegt wurden, sondern ein individueller Nachweis für aufgemessene Profile der Landesschutzdeiche geführt wird. Regelprofile werden lediglich zu ersten Entwurfsprofilen (Kapitel 7). Statt repräsentativer Deichquerschnitte für 60 Abschnitte wurden insgesamt 468 Deichprofile untersucht, davon 313 Deichprofile der Landesschutzdeiche und 154 Entwurfsprofile (Grüne/Wang, 2002).

Die Bemessungswasserstände (Referenzwasserstände) für die einzelnen Küstenabschnitte wurden vom Amt für ländliche Räume vorgegeben und waren nicht Bestandteil der Untersuchungen.

2 Berechnung des Wellenaufaufs und des Wellenüberlaufs

Für die Berechnung des Wellenaufaufs und Wellenüberlaufs wurde ein Berechnungsmodell auf der Grundlage von Math-CAD erstellt. Dieses Modell verknüpft analytisch-empirische Ansätze mit den neuesten Erkenntnissen aus Messungen in der Natur, aus groß- und kleinmaßstäblichen physikalischen Laboruntersuchungen (Composite model – Wissenstandsmodell) und berücksichtigt insbesondere die natürlichen Seegangsverhältnisse und die unregelmäßigen Deichprofilformen (Grüne & Wang, 2002).

Für die Berechnung des Wellenaufaufs wurde der international übliche HUNT-Ansatz erweitert, wobei der bisherige empirische Koeffizient durch das Produkt aus den Einzelbeiwerten K_i ersetzt wird:

$$R = \Pi K_i \cdot \sqrt{H} \cdot T$$

$$K_i = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot K_8 \cdot K_9$$

Mit diesen Einzelbeiwerten K_i (Tabelle 1) werden die unterschiedlichen Einflüsse für Seegangs- und Auflaufparameter, Seegangscharakteristik, Wellenanlaufrichtung, relative Wassertiefenverhältnisse, Deichgeometrie und Oberflächenbeschaffenheit beschrieben (Grüne & Wang, 2000). Für einige Beiwerte wurden Ansätze aus der Literatur verwendet, andere Beiwerte wurden durch schrittweise Verifikation unter Verwendung von Ergebnissen aus Messungen des Seegangs und des Wellenaufaufs in der Natur (Grüne, 1996, 1997a) und im großmaßstäblichen Labor (Grüne/Wang, 1998) ermittelt. Die einzelnen Beiwerte sind teilweise Konstante, teilweise enthalten sie Funktionen mit Variablen.

Einfluss aus	Beiwert	Beiwert für
Wellenauflauf	K_0	die dimensionsfreie Darstellung der Formel
	K_1	den statistischen Auflaufparameter (z.B. R_{98})
Seegangscharakteristik	K_2	die Charakteristik des Seegangs
	K_3	den statistischen Wellenhöhenparameter (z.B. $H_{1/3}$)
	K_4	den statistischen Wellenperiodenparameter (z.B. T_m)
	K_5	die relativen Wassertiefenverhältnisse vor dem Deich
	K_6	schräge Wellenanlaufrichtungen
Deichgeometrie	K_7	die Bauwerksgeometrie (Neigung der Außenböschung)
	K_8	Die Bauwerksgeometrie (zusätzliche Bermen)
	K_9	die Deichoberflächenrauigkeit

Tabelle 1: Beiwerte für die Erweiterung des HUNT-Ansatzes zur Berechnung des Wellenaufaufs

In Abb. 1 wird der berechnete Wellenauflauf R_{98} bzw. R_{max} in Abhängigkeit des Ruhewasserstandes SWL (entspricht dem örtlichen Verlauf auf der Außenböschung) mit gemessenen Wellenauflaufwerten R_{98} und den Treibselmessungen verglichen. Für diese Berechnungen wurde das aus den Naturmessungen ermittelte Verhältnis $R_{max} / R_{98} = 1,1$ verwendet, das von der Neigung der Außenböschung abhängt. Die Berechnung der maßgebenden Neigung (Ersatzneigung) erfolgt durch das Modell mit den eingegebenen aufgemessenen Deichprofilkoordinaten. Als Eingangsparameter für den Seegang dienen die Bestimmungsparameter für die maßgebenden Seegangparameter (hier $H_{1/3}$ und T_m), die im nächsten Kapitel beschrieben werden.

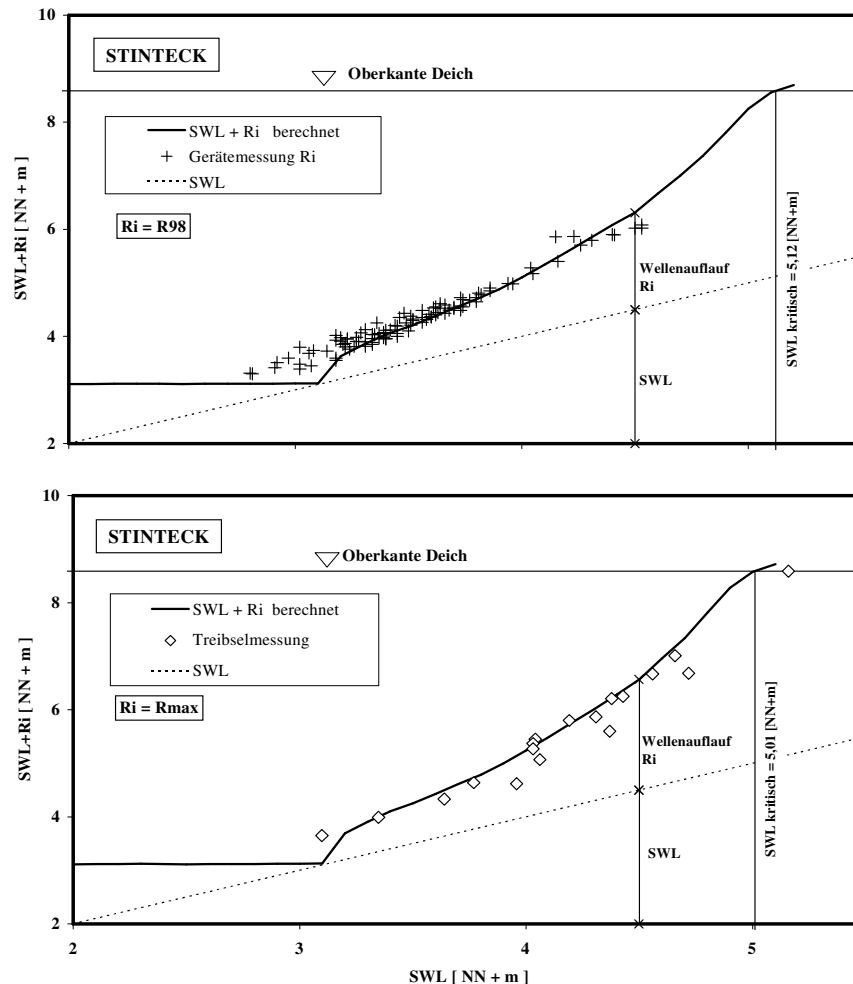


Abb. 1: Vergleich der berechneten Verläufe des Wellenaufbaus mit gemessenen Wellenaufbauparametern (oberer Teil) und Treibselmessungen (unterer Teil)

Die Berechnung des Wellenüberlaufs erfolgt mit dem international üblichen Ansatz von v.d.MEER für mittlere Überlaufmengen. Das Berechnungsmodell ermöglicht eine Gesamtanalyse des Deichaußenprofils hinsichtlich Wellenauflauf und Wellenüberlauf ohne Vorgabe eines bestimmten Bemessungswasserstandes (siehe Kapitel 7). Diese Eigenschaft bietet insbesondere bei der Planung künftiger Deichbaumaßnahmen die Möglichkeit, die Wirkung unterschiedlicher Deichgeometrien hinsichtlich der Höhe des Wellenaufbaus zu untersuchen und damit die Deichgeometrie zu optimieren. Abb. 2 zeigt beispielhaft im rechten Teil eine vergleichende Berechnung des örtlichen Verlaufs des Wellenaufbaus auf der Außenböschung bis zum Wert SWL_{krit} (R_{98} erreicht die Deichkronenhöhe) für die unterschiedlichen Deichprofilformen im linken Teil. Das Berechnungsmodell ermöglicht im Umkehrverfahren auch die Ermittlung von Seegangparametern aus Treibselmessungen (siehe Kapitel 6).

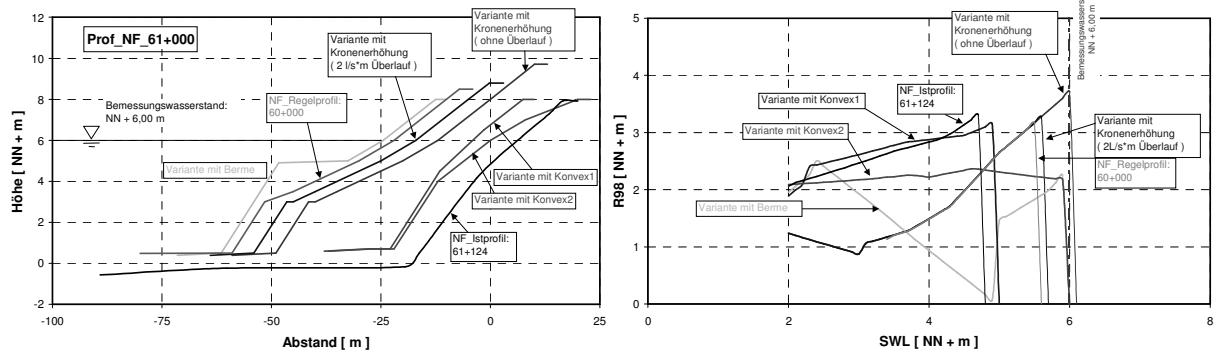


Abb. 2: Örtliche Verläufe des Wellenaufbaus R_{98} auf der Außenböschung bis zum Wert SWL_{krit} (im rechten Teil) für unterschiedliche Deichprofilformen (im linken Teil).

3 Beschreibung der Seegangparameter durch das Gradientenverfahren

Die Seegangsverhältnisse an Deichen mit davor liegenden ausgedehnten Wattflächen sind nur in geringem Maße von der Energie der aus den tieferen Bereichen der Nordsee anlaufenden Wellen beeinflusst. Durch die abnehmenden Wassertiefen am seeseitigen Rand der Wattgebiete wird die Seegangenergie so stark gedämpft, daß ein nennenswerter Seegang im Bereich der Deichlinie nur bei stark erhöhten Sturmflutwasserständen auftreten kann.

Ergebnisse aus bisher durchgeführten Messungen der Seegangsverhältnisse in der Natur haben bestätigt, daß insbesondere auf Wattgebieten die dominierende Korrelation der gemessenen Wellenhöhen im wesentlichen mit der Wassertiefe bzw. dem Wasserstand gegeben ist (siehe u.a. Grüne, 1991, 1997a, 1997b). Ein Beispiel für eine solche Korrelation der gemessenen Wellenhöhen $H_{1/3}$ mit dem Ruhewasserstand SWL zeigt Abb. 3, während die entsprechende Korrelation zwischen Wellenhöhen und Windgeschwindigkeit wesentlich geringer ausgeprägt ist. Für die Wellenperioden T_m in Abb. 4 besteht eine ausgeprägte Korrelation mit den Wellenhöhen $H_{1/3}$. Ähnliche, jedoch weniger stark ausgeprägte Verhältnisse treten auch an Deichen mit Vorstrandbereich in Ästuarien auf.

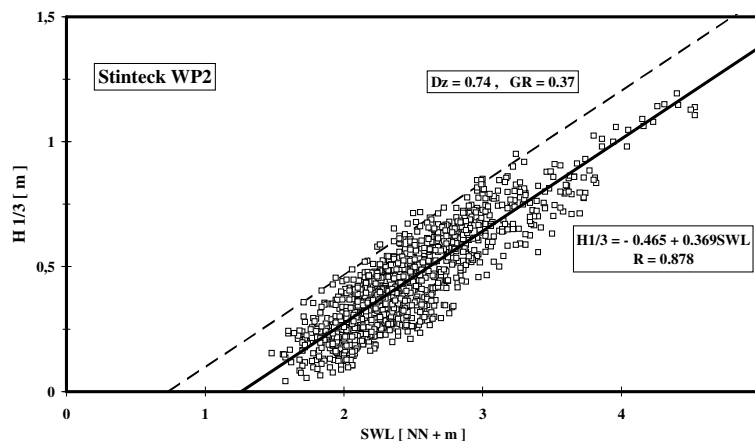


Abb. 3: Gemessene Wellenhöhen $H_{1/3}$ in Abhängigkeit vom Ruhewasserstand SWL

Die örtliche Wassertiefe bzw. der örtliche Wasserstand SWL bildet somit den maßgebenden Indikator für das örtliche Seegangsklima. Damit sind örtlicher Windstau und örtlicher Seegang unentkoppelbar verbunden. Die Korrelationsparameter sind Ortsgrößen und enthalten alle Informationen (als Black-box) über die Morphologie des Küstenvorfeldes und der Wattgebiete (Gebietscharakteristiken). Sie beschreiben damit in komplexer Form die Seegangsgenerierung und ihre Fortpflanzung im Bereich der offenen See, beim Übergang in flachere Bereiche, auf den Wattgebieten und dem Deichvorland.

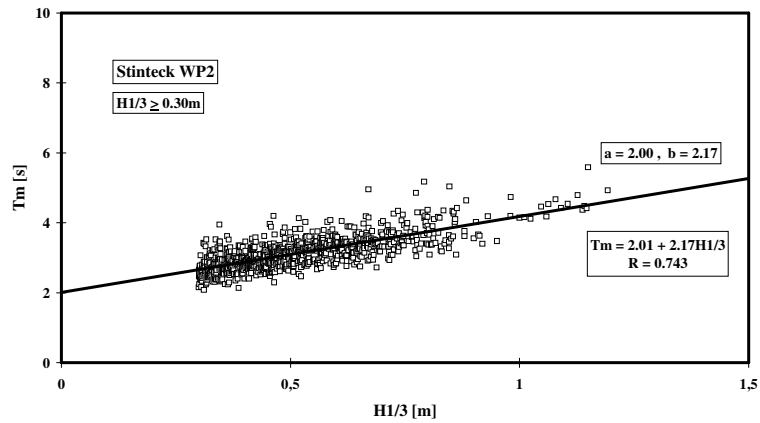


Abb. 4: Gemessene Wellenperioden T_m in Abhängigkeit von den Wellenhöhen $H_{1/3}$

Die ortsfesten Korrelationsparameter der linearen Regressionen aus Abb. 3 und 4 werden für die Beschreibung der Seegangparameter $H_{1/3}$ und T_m mit dem Gradientenverfahren (Grüne, 1991) verwendet, wie in Abb. 5 schematisch dargestellt. Mit den Bestimmungsparametern Dz und GR ergeben sich die Wellenhöhe $H_{1/3}$ als Funktion des Wasserstandes SWL und mit den Bestimmungsparametern a und b die Wellenperiode T_m als Funktion der Wellenhöhe $H_{1/3}$. Im Bereich von Ästuaren kann eine parabel-förmige Ausgleichskurve eine bessere Anpassung an die Wellenhöhen ergeben.

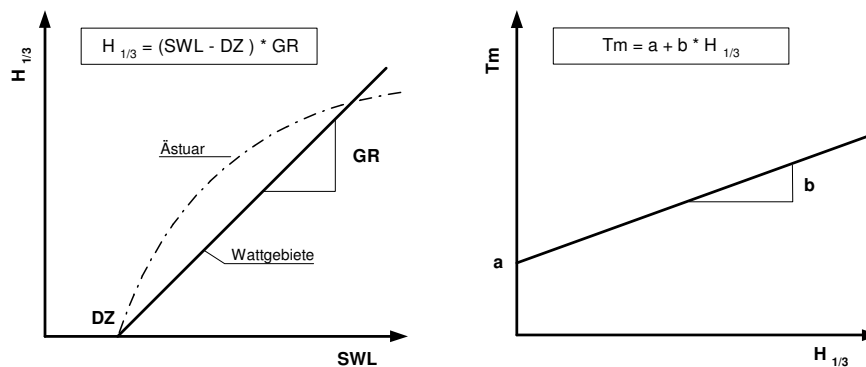


Abb. 5: Schematische Beschreibung der Seegangparameter mit dem Gradientenverfahren

Der Nulldurchgang der Regressionsgeraden ergibt den Wasserstand Dz mit der Wellenhöhe $H_{1/3} = 0$. Die örtliche Wassertiefe kann in einen welleninaktiven Bereich (Dz) und in einen wellenaktiven Bereich ($SWL - Dz$) unterteilt werden. Diese Bestimmungsparameter hängen von der örtlichen Lage ab und ermöglichen Rückschlüsse auf die Zusammenhänge zwischen örtlichem Seegang und örtlichen morphologischen Gebietscharakteristiken. Die Bestimmungsparameter Dz und GR nehmen mit zunehmender Entfernung von der seeseitigen Wattgrenze und von den Wattströmen bzw. Tiderinnen ab. Für einen Ort, für den keine Messungen vorliegen, können an Hand der für diesen Ort maßgebenden morphologischen Gebietscharakteristiken die Bestimmungsparameter abgeschätzt werden.

4 Einfluß von Vorländern auf die Seegangparameter

Über die Wirkung eines Vorlandes auf den Seegang und den Wellenauflauf am Deich gibt es bisher nur wenige völlig unbefriedigenden Kenntnisse. Ergebnisse aus Untersuchungen im GWK zeigen, daß der Wellenauflauf an Deichen mit Vorland in der gleichen Art und Weise wie für Deiche ohne Vorland berechnet werden kann (Grüne/Wang, 1998), wenn man die Seegangparameter auf dem Vorland verwendet. Untersuchungen in der Natur und im großmaßstäblichen Labor zur seegangsdämpfenden

Wirkung von Vorländern werden von Wang/Grüne (1997) beschrieben. Mit den Ergebnissen in der Natur (Umhüllende in Abb. 6) wurde für die Sicherheitsüberprüfungen ein Dämpfungsfaktor F_{VH} für die Wellenhöhe $H_{1/3}$ wie folgt berücksichtigt, während die Wellenperiode T_m unverändert bleibt:

$$H_{1/3(v)} = H_{1/3(w)} * F_{VH} \quad \text{mit } F_{VH} = 0,8 \ln(SWL)^{0,85} - 0,40$$

mit dem Grenzwert $Dv / H_{1/3(w)} \leq 2,75$; (v) Vorland, (w) Wattgebiet vor dem Vorland

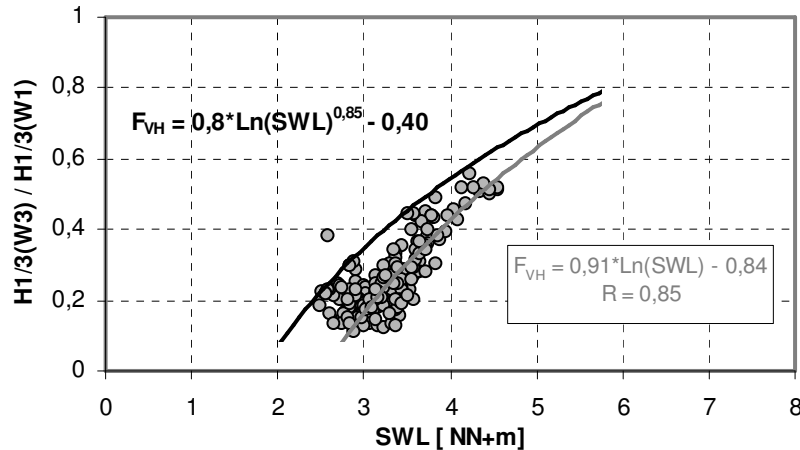


Abb. 6: Verwendeter Ansatz für die Dämpfung der Wellenhöhen $H_{1/3}$ auf Vorländern

5 Ermittlung von Seegangparametern mit dem Treibselanpassungsverfahren

An zahlreichen Stationen der Schleswig-Holsteinischen Westküste werden Treibselmessungen vorgenommen, die teilweise bis 1976 zurück reichen, um daraus den Wellenauflauf für höhere Bemessungswasserstände abschätzen zu können. Im Rahmen der Vorarbeiten für die Sicherheitsüberprüfungen wurden diese Messungen erstmals systematisch aufbereitet, um sie für ein neu entwickeltes Verfahren zur Ermittlung von Seegangparametern zu nutzen (Grüne/Wang, 2002).

Untersuchungen im GWK des Forschungszentrums Küste haben gezeigt, daß die nach Sturmfluten aufgemessenen Treibselgrenzen dem höchsten Wellenauflauf R_{max} während des höchsten Ruhewasserstandes Thw der Sturmflut entspricht. Damit ergibt sich aus den einzelnen Treibselmessungen für unterschiedlich hohe Sturmfluten der örtliche Verlauf des Wellenauflaufparameters R_{max} , der damit nur noch vom Ruhewasserstand SWL und von der Deichgeometrie der Außenböschung abhängt.

Das neue Verfahren (Treibselanpassungsverfahren) ermittelt die Bestimmungparameter für die Seegangparameter mit dem Berechnungsmodell im Umkehrverfahren durch Vergleich des berechneten örtlichen Verlaufs von R_{max} mit dem örtlichen Verlauf der Treibselmessungen. Es basiert auf der Voraussetzung, daß sich unter idealisierten Randbedingungen (Homogenität der Treibselmessungen und der Seegangmessungen sowie richtiger Berechnungsansatz) die beiden Verläufe decken, wenn die für die Berechnung von R_{max} verwendeten Bestimmungparameter die örtlich auftretenden Seegangparameter $H_{1/3}$ und T_m richtig repräsentieren. Für die Anwendung unter natürlichen Bedingungen müssen örtlich unterschiedliche Abweichungen von den idealisierten Randbedingungen berücksichtigt werden.

In Abb. 7 ist die Ermittlung von Bestimmungparametern nach dem Treibselanpassungsverfahren beispielhaft dargestellt. Zunächst werden die Bestimmungparameter entsprechend der örtlichen Gebietscharakteristik grob abgeschätzt. Der damit berechnete Verlauf von R_{max} wird mit dem Verlauf der Treibselmessungen (Hüllkurve) verglichen (oberer Teil). Dann werden die Bestimmungparameter iterativ solange variiert, bis der berechnete Verlauf für R_{max} sich der Hüllkurve der Treibselmessungen bestmöglichst anpasst (unterer Teil). Die aus den jeweiligen Bestanpassungen ermittelten Bestimmungparameter der benachbarten Meßstationen werden untereinander verglichen und ggfs. noch

durch weitere Bestanpassungen untereinander angepaßt. Vergleiche mit gemessenen Bestimmungsparemtern ergaben Abweichungen für die Seegangparameter $H_{1/3}$ und T_m bis zu etwa 15%; jedoch gegenläufiger Art, was bedeutet, daß sich die Abweichungen bei der Berechnung des Wellenaufbaus gegenseitig fast aufheben und damit die Werte $SWL_{krit.}$ nur noch wenige Zentimeter voneinander abweichen. Das Verfahren wirkt somit selbstkorrelierend.

Insgesamt wurden für 143 Treibelmeßstationen an der Westküste Schleswig-Holsteins einschließlich der Inseln Seegangparameter nach dem Treibselanpassungsverfahren ermittelt.

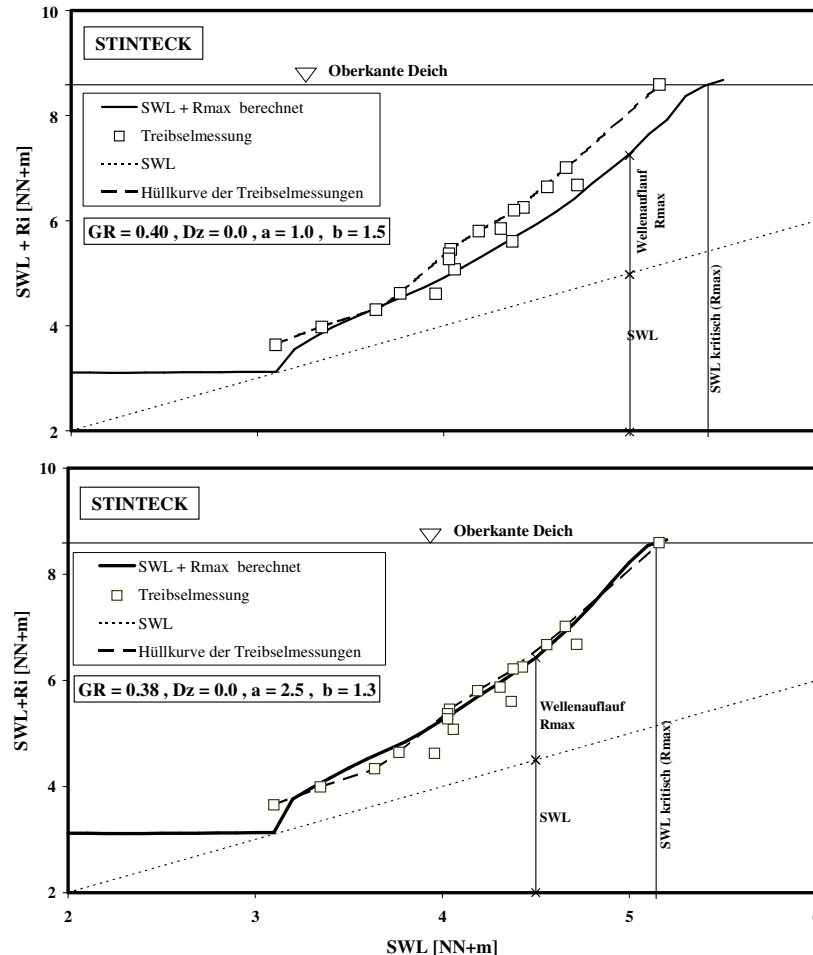


Abb. 7: Beispiel für die Ermittlung der Bestimmungsparemtern nach dem Treibselanpassungsverfahren (Anpassungsversuch im oberen Teil sowie Bestanpassung im unteren Teil)

6 Erstellung eines Seegangskatasters für die Sicherheitsüberprüfungen

Die Ergebnisse für die nach dem Treibselanpassungsverfahren für 143 Stationen ermittelten Bestimmungsparemtern bilden die Grundlage zur Festlegung des Verlaufs des Bemessungsseegangs entlang der gesamten Deichlinie, da sie die größte Datendichte hinsichtlich der räumlichen Verteilung aufweisen und damit eine umfangreiche Information über den auftretenden Seegang liefern. Dies wird in Abb. 8 deutlich: Der linke Teil zeigt einen ausgewählten Abschnitt der Westküste mit dem Verlauf der Deichlinie, den Treibelmeßstationen sowie der morphologischen Charakteristik des Wattengebietes. Der rechte Teil zeigt die räumliche Verteilung der aus den Treibselmessungen ermittelten Seegangsparemtern $H_{1/3}$ und T_m , deren Verläufe im wesentlichen dem des Bestimmungsparemtern GR entsprechen. Der aus den Berechnungen zur Treibselanpassung ermittelte Verlauf (Hüllkurve) wird dann mit dem Verlauf der Deichlinie und der Küstenvorfeldmorphologie (Gebietscharakteristik) verglichen.

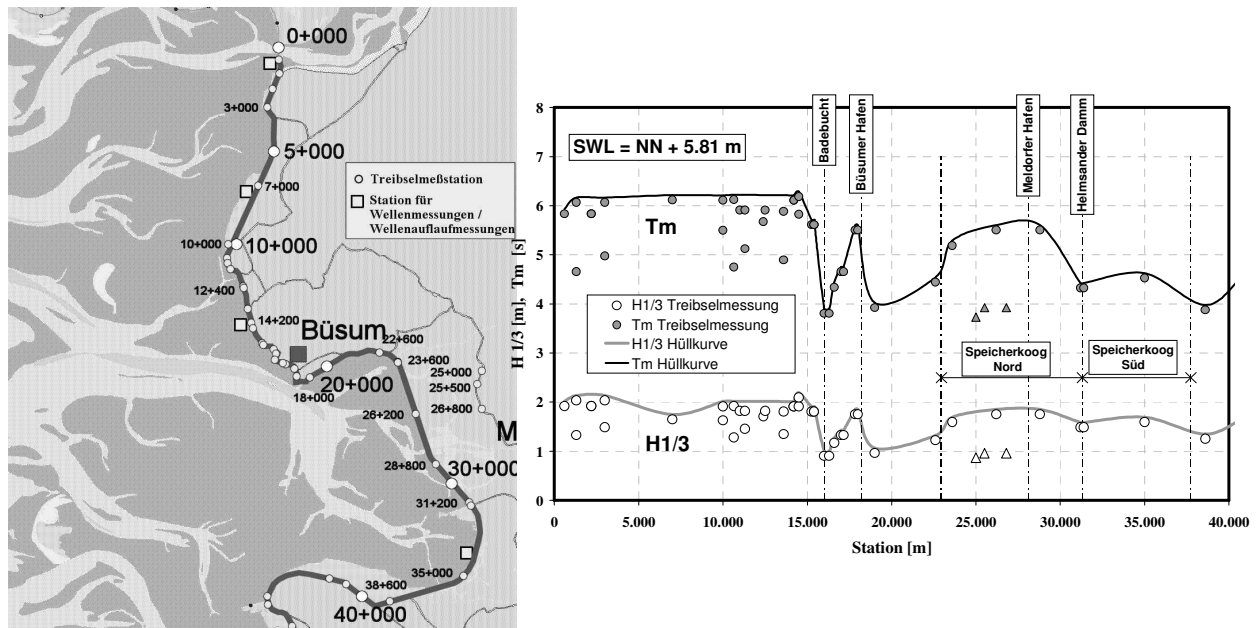


Abb. 8: Ausgewählter Küstenabschnitt mit den Treibsel- und Seegangsmessstationen (links) und räumliche Verteilung der aus Treibselmessungen ermittelten Seegangparameter (rechts)

Bei diesem Vergleich wird die Plausibilität zwischen dem Verlauf der ermittelten Bestimmungsparameter und der Gebietscharakteristik des Küstenvorfeldes überprüft sowie ggfs. die Parameter für unterschiedliche Bestanpassungen variiert. Weiterhin werden die Bereiche und ihre Grenzen festgelegt, für die der Seegang in etwa gleich ausgeprägt ist. Für diese Bereiche wird die räumliche Seegangverteilung für einzelne Küstenabschnitte mit konstanten Werten für die Bestimmungsparameter generalisiert. Die mit diesen generalisierten Bestimmungsparametern berechneten Seegangparameter für den ausgewählten Küstenabschnitt sind in Abb. 9 dargestellt, ebenso wie die Ergebnisse aus Seegangsmessungen an vier Meßstationen, die zur Eichung der ermittelten Werte an diesen Stützstellen) dienen.

Der Verlauf der generalisierten Seegangparameter (Seegangskataster für die Bemessung) entlang der Deichlinie an der gesamten Westküste ist in Abb. 10 dargestellt. Dagegen sind die Ergebnisse aus den Berechnungen mit dem SMB-Vorhersageverfahren wegen der komplexen Topographie nur bedingt aussagefähig sind, lediglich im Elbebereich oberhalb Brunsbüttel liefert das Verfahren verwertbare Ergebnisse.

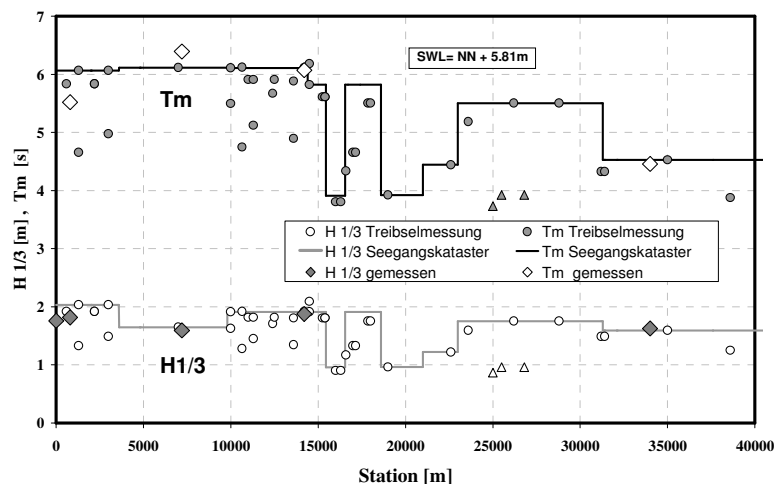


Abb. 9: Vergleich der nach unterschiedlichen Verfahren ermittelten Seegangparameter

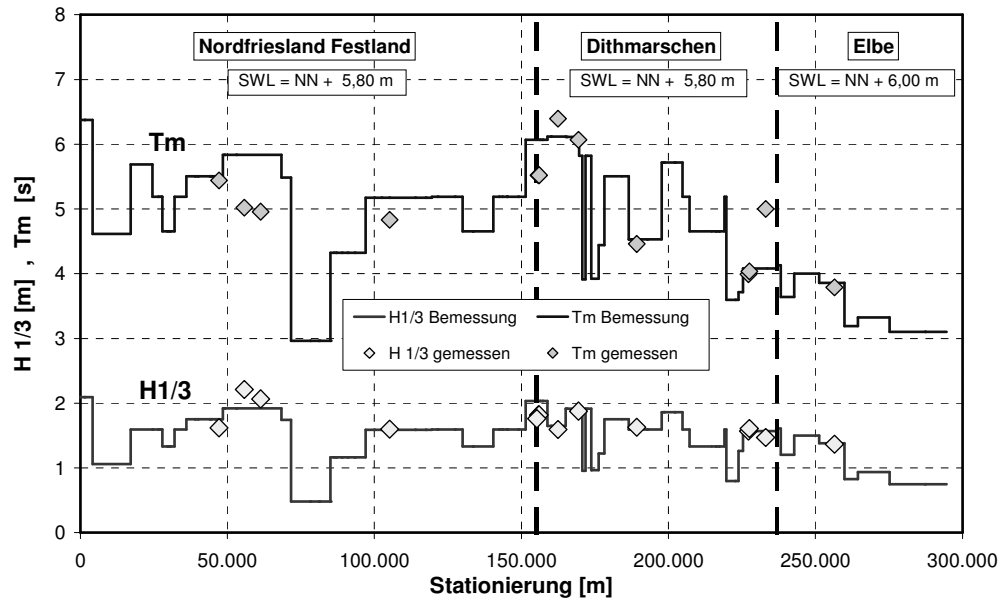


Abb. 10: Verlauf der generalisierten Seegangparameter (Seegangskataster für die Bemessung) entlang der gesamten Deichlinie an der Westküste Schleswig-Holsteins (ohne Inseln)

7 Durchführung der Sicherheitsüberprüfungen

Zunächst war vorgesehen, die Sicherheitsüberprüfungen mit ausgewählten repräsentativen Deichprofilen und mit Regelprofilen für die jeweiligen Küstenabschnitte durchzuführen. Die Vorarbeiten zur Auswahl von entsprechenden Deichprofilen zeigten jedoch, dass sich die Außenprofilneigungen und Kronenhöhen der bestehenden Landesschutzdeiche entlang der Deichlinie meist ständig ändernd und sich daher mit repräsentativen Deichprofilen (Regelprofilen) nur unzulänglich genau beschreiben lassen. Die bisherige Festlegung von abschnittsweise einheitlichen Sollkronenhöhen lässt eine wirtschaftlich optimierte Sicherheitsüberprüfung nicht zu; da die Größe des Wellenaufbaus und des Wellenüberbaus im wesentlichen von der Profilform der Außenböschung abhängt. Die Form der Außenböschung hat oft einen stärkeren Einfluß auf die bestehende Sicherheit als die Sollhöhe. Ferner ist eine vorgegebene Sollhöhe oft nicht erforderlich oder es eine Erhöhung kann zu einer Verminderung der Sicherheit führen, wenn beispielsweise ein Deich trotz höherer Kronenhöhe mit steilerer Außenneigung einen relativ höheren Wellenaufbau aufweist als ein niedrigerer Deich mit flacherer Außenneigung.

Daher wurde das Konzept der Sicherheitsüberprüfung dahingehend geändert, dass im Generalplan 2001 keine Sollhöhen mehr festgelegt wurden, sondern ein individueller Nachweis für einzelne Profile der Landesschutzdeiche geführt wird. Dies gilt auch für alle künftigen Verstärkungen oder Neubaumaßnahmen (hierbei mit gleichzeitiger Überprüfung der Entwurfsgrundlagen). Regelprofile nehmen in ihrer Bedeutung ab und werden lediglich zu ersten Entwurfsprofilen.

Die aufgemessenen Deichprofile der bestehenden Landesschutzdeiche wurden auf einem Rechner derart aufbereitet, dass sie in einem für alle Profile gleichen Maßstab untereinander verglichen werden konnten. Bei diesem Vergleich untereinander in fortlaufender Reihenfolge der Stationierung wurden alle Veränderungen des Außenprofils und der Kronenhöhe erfasst. Die Auswahl erfolgte abschnittsweise unter Berücksichtigung der jeweils angrenzenden Deichprofile in den Nachbarabschnitten derart, daß zunächst mindestens ein Profil je Abschnitt ausgewählt wurde. Befanden sich in einem Abschnitt Profile mit unterschiedlicher Deichgeometrie, so wurden aus jeder Gruppe der unterschiedlichen Deichprofile mindestens je eins ausgewählt. Zusätzliche Profile wurden innerhalb eines Abschnittes dann ausgewählt, wenn bei mehreren im wesentlichen gleichen Deichprofilen deutliche Unterschiede in der Kronenhöhe oder Wechsel in der Seegangbelastung auftraten.

Die Sicherheitsüberprüfung erfolgte durch eine funktionale Bewertung des für ausgewählte Deichprofile ermittelten Wellenaufbaus und Wellenüberbaus, der für jedes ausgewählte Deichprofil getrennt mit dem Berechnungsmodell ermittelt wurde. Als Eingangsparameter für den Seegang wurden die generalisierten Werte aus dem Seegangskataster (Abb. 10) verwendet. Es wurden die folgenden Parameter für den Wellenaufbau und Wellenüberbau zur Bewertung ermittelt und zusammengestellt:

Die deichprofilsspezifischen Parameter, die nur von der Profilform abhängen:

$SWL_{krit.}$	Wasserstand, für den R_{98} die Kronenhöhe erreicht
$SWL1l_{krit.}$	Wasserstand, für den ein Überlauf von 1 l/sm erreicht wird
$SWL2l_{krit.}$	Wasserstand, für den ein Überlauf von 2 l/sm erreicht wird
$SWL10l_{krit.}$	Wasserstand, für den ein Überlauf von 10 l/sm erreicht wird

und die auf den jeweiligen Referenzwasserstand bezogenen Parameter:

$R_{98}(REW)$	Wellenaufbau R_{98} für den jeweiligen Referenzwasserstand REW
Überlaufreserve	vertikaler Abstand des Wellenaufbaus R_{98} bis zur Kronenhöhe
Überlaufmenge q	in l/sm für den jeweiligen Referenzwasserstand

War der Wert für $SWL_{krit.}$ geringer als der Referenzwasserstand, so wurde der Wert für den Wellenaufbau R_{98} angegeben und es ergab sich eine Überlaufreserve als Höhendifferenz zwischen der Kronenhöhe und dem auf den Ruhewasserstand $SWL_{krit.}$. War der Referenzwasserstand höher als $SWL_{krit.}$, trat ein Überlauf ein und es wurde die berechnete mittlere Überlaufwassermenge q angegeben.

Insgesamt wurden statt der repräsentativen Deichquerschnitte für 60 Abschnitten insgesamt 468 Deichprofile untersucht, davon 313 Deichprofile der bestehenden Landesschutzdeiche und 154 Entwurfsprofile (bisherige Regelprofile). In Abb. 11 sind einige der Ergebnisse der Sicherheitsüberprüfung der Landesschutzdeiche (Stand 1999-2000) graphisch dargestellt, ebenso das Deichkronenniveau und zum Vergleich die Sollhöhen der Deichkronen nach dem Generalplan 1986.

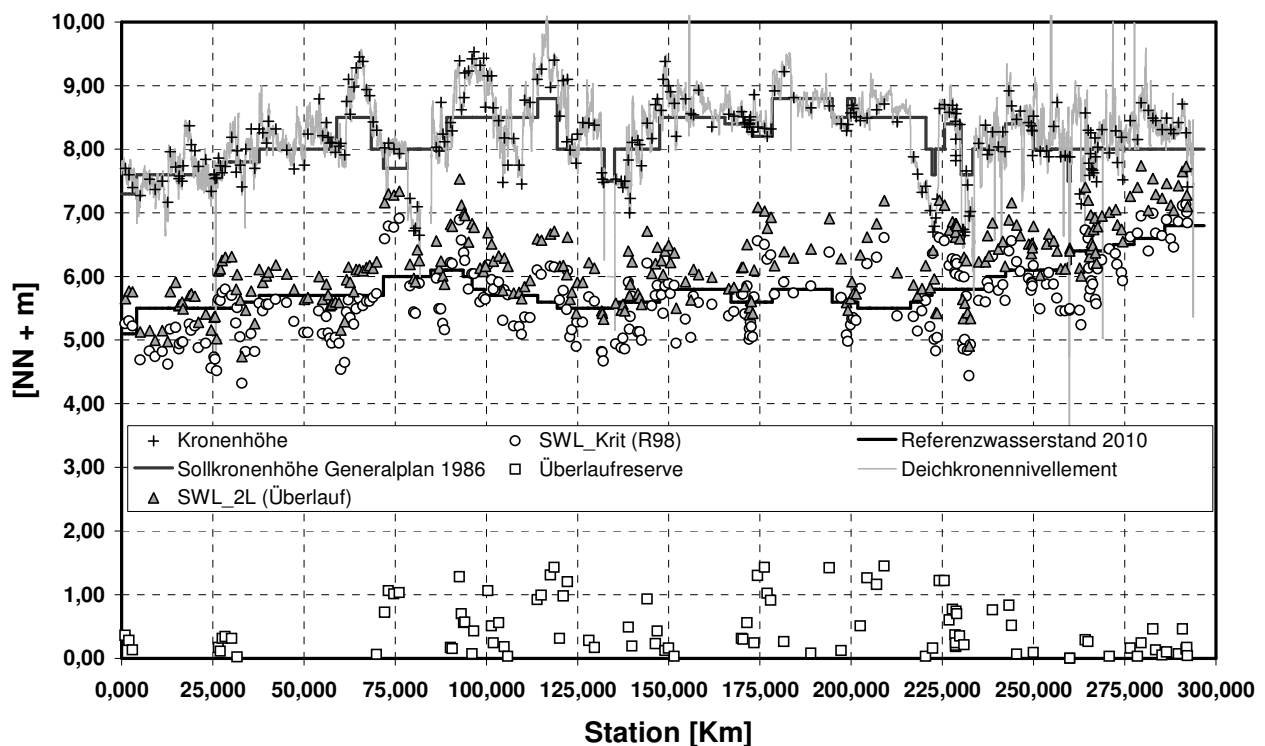


Abb. 11: Ergebnisparameter der Sicherheitsüberprüfung an der Westküste Schleswig-Holsteins

Als Kriterium für die Bewertung der funktionalen Sicherheit der bestehenden Landesschutzdeiche hinsichtlich des auftretenden Wellenaufbaus bzw. Wellenüberlaufs wurde die ermittelte durchschnittliche Überlaufmenge betrachtet. Binnenböschungen von Seedeichen mit intaktem Grasbewuchs halten der Belastung durch Überlaufwasser über einen längeren Zeitraum stand, wobei die Infiltrationsmenge von der Durchlässigkeit des Bodenmaterials abhängt. Als größter zulässiger Grenzwert wurde für die Sicherheitsüberprüfungen eine mittlere Überlaufmenge $q = 2 \text{ l/s} \cdot \text{m}$ festgelegt. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand der bodenmechanischen Prozesse kann vorausgesetzt werden, dass eine 1:3 geneigte, mit deichbaufähigem Klei abgedeckte und ausreichend unterhaltende Binnenböschung, eine solche Überlaufmenge schadlos übersteht. Im Einzelfall mit stark abweichender Randbedingungen könnten sich Änderungen für den festgelegten Grenzwert ergeben.

Eine Bewertung der Ergebnisse nach dem vorstehend erläuterten Sicherheitskriterium wurde sowohl für alle untersuchten Einzelprofile als auch für die Küstenabschnitte entsprechend der Einteilung des Generalplans 2001 vorgenommen. Unter Berücksichtigung dieses Grenzkriteriums für einer maximal zulässigen mittlere Überlaufmenge von 2 l/sm wurden die Bereiche der Landesschutzdeiche, die diesen Wert überschreiten, in mehrere Klassen eingeteilt, für die sich folgende jeweilige Anforderungen ergeben:

- Fortführung der im Generalplan 1986 geplanten Erneuerungs- bzw. Verstärkungsmaßnahmen.
- Maßnahmen zur Beseitigung von örtlich begrenzter Unterschreitung des Grenzkriteriums.
- Deicherneuerungs- bzw. Deichverstärkungsmaßnahmen mit neuen optimierten Profilen.

8 Literatur

- GÄRTNER, J / STRÖTZEL, J. / Grüne, J.: Seegangs- und Wellenaufbaumeßprogramm Dithmarscher Küste und Elbe, Entwurf, 1995, ALW Heide / GWK (unveröffentlichter Bericht).
- GRÜNE, J.: Nearshore wave climate under real sea state conditions. Proc. 3rd Intern. Conf. on Coastal and Port Eng. in developing countries (COPEDEC III), 1991, Mombasa, Kenia.
- GRÜNE, J.: Field study on wave run-up on seadykes. Proc. 25th Intern. Conf. on Coastal Engineering (ICCE '96), 1996, Orlando, USA.
- GRÜNE, J.: Field study on wave climate in wadden seas and in estuaries. Proc. 3rd Intern. Symp. on Ocean Wave Measurements and Analysis (WAVES '97), 1997a, Virginia Beach, USA.
- GRÜNE, J.: Ermittlung des maßgebenden Seegangs und des Wellenaufbaus für die Küstenschutzmaßnahme Neufelder Koog, 1997b, Forschungszentrum Küste (unveröffentlichter Bericht)
- GRÜNE, J./ WANG, Z.: Abschlußbericht Teil 4 – Wellenaufbau: Ergebnisse aus großmaßstäblichen Laborversuchen, aus Messungen in der Natur und aus numerischer Simulation“, KFKI-Projekt Nr. 45 „Bemessung auf Seegang“, 1998, Forschungszentrum Küste, (unveröffentlichter Bericht)
- GRÜNE, J./ WANG, Z.: Wave run-up on sloping seadykes and revetments. Proc. 27th Intern. Conf. on Coastal Engineering (ICCE '2000), 2000, Sydney, Australien.
- GRÜNE, J./ WANG, Z.: Ermittlung von Wellenaufbau bzw. Wellenüberlauf an der Landesschutzdeichen der Westküste Schleswig – Holsteins für den Generalplan Küstenschutz, Teilberichte A bis H, 2002, Forschungszentrum Küste (unveröffentlichte Berichte).
- MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHE RÄUME, LANDESPLANUNG, LANDWIRTSCHAFT UND TOURISMUS DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN: Generalplan Küstenschutz, 2001, Kiel.
- WANG, Z. / GRÜNE, J.: The effect of foreland on wave climate changes. Proc. 3rd Intern. Symp. on Ocean Wave Measurements and Analysis (WAVES '97), 1997, Virginia Beach, USA.

Adresse

Dipl.-Ing. Joachim Grüne, Betriebsleiter Forschungszentrum Küste (FZK)
Forschungszentrum Küste, Merkurstrasse 11, 30419 Hannover, Germany
RBD Dipl.-Ing. Joachim Gärtner, Dezernent
Amt für Ländliche Räume Husum, Herzog-Adolf-Str. 1, Husum, Germany

E-mail: gruene@fzk.uni-hannover.de

Änderung des Sturmflutrisikos der niedersächsischen Küste bei Klimawandel

Stephan Mai¹, Anne Elsner¹, Volker Meyer² und Claus Zimmermann¹

¹Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Universität Hannover

²Geographisches Institut, Abt. Wirtschaftsgeographie, Universität Hannover

Summary

Due to climate change a rise of tidal water levels and intensifying westerly winds, causing an increase in wave load, as coupled numerical simulations of tidal flow and waves reveal, has to be expected. As consequence of this increase in loads the safety of the coastal defence system decrease while the risk of flooding of coastal hinterlands increase. In order to quantify these changes a method of probabilistic failure and risk analysis is presented under consideration of the actually available data bases. An exemplary application of this method is given in order to evaluate the impact of climate change on coastal safety provided by sea dikes along the estuary Außenweser. The assessment revealed that a rise in water level of 50 cm will increase the risk due to storm surges up to 500 %. In comparison to that an increase of wind speed of 7 % will lead to an increase of risk of up to 30 %. The largest sensitivity with respect to water level rise is found for sea dikes with forelands while these show the lowest sensitivity with respect to an increase in wind speed. In order to cope with this increase of risk different strategies of risk minimisation, e.g. heightening of sea dikes or setting-up secondary dikes respectively, are given and evaluated with respect to their efficiency.

Zusammenfassung

Der Klimawandel läßt an den deutschen Küsten einen Anstiegs der Tidewasserstände sowie eine Intensivierung der Westwinde, welche, wie gekoppelte numerische Simulationen von Tidedrömungen und Seegang zeigen, eine Zunahme der Seegangsbelastung mit sich bringt, erwarten. Als Folge dieser wachsenden Belastungen vermindert sich die Sicherheit der Küstenschutzanlagen, so daß das Sturmflutrisiko für das Küstenhinterland zunimmt. Zur Quantifizierung dieser Änderungen wird unter Berücksichtigung der derzeit verfügbaren Datenbasis das Konzept der probabilistischen Versagens- und Risikoanalyse vorgestellt und exemplarisch zur Beurteilung der Folgen des Klimawandels für den durch Deiche gewährleisteten Küstenschutz an der Außenweser eingesetzt. Die Analyse zeigte, daß mit einem um 50 cm erhöhtem Tidehochwasser eine Zunahme des Sturmflutrisikos um bis zu 500 % zu erwarten ist, wobei Küstenabschnitte mit Vorlanddeichen die größte Sensitivität gegenüber Wasserstandsanstieg aufweisen. Im Vergleich dazu führt eine Intensivierung der Westwinde um 7 % nur zu einer Risikozunahme um bis zu 30 %, wobei Küstenabschnitte mit Schardeichen die größte Sensitivität gegenüber einer Windzunahme aufweisen. Als Reaktion auf dieses erhöhte Risiko werden risikomindernde Anpassungsmaßnahmen, wie Deicherhöhungen sowie die Anlage zweiter Deichlinien, vorgestellt und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit beurteilt.

1 Einführung in den Risikobegriff

Im Land Niedersachsen wird der Schutz des Hinterlands durch eine Vielzahl von Küstenschutzelementen gewährleistet (ZIMMERMANN/MAI 1998). Der Hauptdeich stellt an der deutschen Küste das bedeutendste Küstenschutzelement dar. Seine Bemessung erfolgt zur Zeit auf der Grundlage eines deterministischen Verfahrens, dem sog. a-b-c-d-Verfahren (AUSSCHUSS FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE 2002). Eine Beurteilung der Folgen des Klimawandels für den Küstenschutz ist auf der

Grundlage dieses Verfahrens jedoch nicht möglich, sondern erfordert die Erweiterung des deterministischen Bemessungsverfahrens zu einem probabilistischen Bemessungsverfahren, wie es z.B. bereits in niederländische Regelwerke (VERGEER 1990) Einzug gehalten hat. Mit der Einführung der Probabilistik ist zunächst die Berechnung der Wahrscheinlichkeit einer Unterbemessung von Hauptdeichen, sog. Versagenswahrscheinlichkeit p_f , möglich. Um (als wichtigen Schritt der Integration des Küstenschutzes in das Küstenzonenmanagement) neben der Wahrscheinlichkeit eines Deichversagens auch die mit dem Versagen verbundene Folgeschäden C_f durch Überflutung bei der Bemessung zu berücksichtigen, erfolgt schließlich die Erweiterung der probabilistischen Bemessung zur probabilistischen Risikoanalyse, deren zentrale Größe - das Risiko R - vereinfachend als

$$R = p_f \cdot C_f \quad (1)$$

definiert wird (PROBST 1994).

Zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit wird der auch in der deterministischen als maßgebend angesehene Versagensmechanismus „Erosion der Binnenböschung nach Wellenüberlauf“ zugrunde gelegt, welcher in Abb. 1 dargestellt ist. Für diesen ergibt sich folgender Grenzzustand Z :

$$Z = h_D - Thw - R_n \quad (2)$$

$$R_n = \alpha_n \cdot \gamma_f \gamma_b \gamma_\theta \cdot \sqrt{\frac{g}{2 \cdot \pi}} \cdot H_s T_m \tan(\alpha_d) \quad (3)$$

mit Deichhöhe h_D , Tidehochwasserstand Thw , von n % der Wellen nicht überschrittene Auflaufhöhe R_n , signifikante Wellenhöhe H_s , mittlere Wellenperiode T_m , Deichneigung α_d , Abminderungen zur Berücksichtigung von Böschungsrauigkeit, Bermen und schrägem Wellenangriff γ_f , γ_b , γ_θ und dem vom zulässigen Wellenüberlauf abhängigen Parameter α_n . Für weitere Versagensmechanismen finden sich die Grenzzustandsgleichungen bei VERGEER (1990) und bei KORTENHAUS und OUMERACI (2002). Da insbesondere Tidehochwasserstand und Seegang wahrscheinlichkeitsverteilte Größen sind, ist auch die Grenzzustandsvariable Z wahrscheinlichkeitsverteilt. Für die Versagenswahrscheinlichkeit gilt dann

$$p_f = \int_{-\infty}^0 p_Z(Z) dZ = \iint_{Z < 0} p_{Thw, R_n}(Thw, R_n) dR_n dThw \quad (4)$$

mit der Wahrscheinlichkeitsdichte $p_Z(Z)$ der Grenzzustandsvariable bzw. der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsdichte von Tidehochwasserstand und Wellenaufwurf $p_{Thw, R_n}(Thw, R_n)$.



Abb. 1: Stufen des Versagensmechanismus „Erosion der Binnenböschung nach Wellenüberlauf“

Der bei Versagen zu erwartende Überflutungsschaden berechnet sich aus der Integration der vom Grad des Versagens abhängigen Schadensdichte $s_f(Z, x, y)$ im von Überflutung betroffenen Hinterland gemäß

$$C_f(Z) = \iint s_f(Z, x, y) dx dy \quad (5)$$

Die Schadensdichte folgt ihrerseits aus der nach Vermögensart i kategorisierten Wertdichte $w_i(x,y)$ unter Verwendung eines von der Überflutungswassertiefe $d(Z,x,y)$ abhängigen Schädigungsgrades $\varphi(d(Z,x,y))$

$$s_f(Z, x, y) = \sum_i \varphi_i(d(Z, x, y)) \cdot w_i(x, y) \quad (6)$$

Aus (4) und (5) folgt schließlich eine erweiterte Definition des Risikos

$$R = \int_{-\infty}^0 p_Z(Z) C_f(Z) dZ \quad (7)$$

Eine beispielhafte Anwendung der in (2) bis (7) vorgestellten Risikoanalyse zur Abschätzung der Klimafolgen ist im folgenden für die Küste zwischen Bremerhaven und Cuxhaven gegeben.

2 Versagenswahrscheinlichkeit von Küstenschutzsystemen

Die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit nach (2) bis (4) erfordert eine langjährige Datenbasis der Belastungsgrößen. Während diese für die Wasserstände verfügbar ist, liegt sie für den Seegang nicht vor. Die Seegangsstatistik ist daher aus der Windstatistik mit Hilfe numerischer Seegangssimulation (MAI/ZIMMERMANN 2004) zu ermitteln (MAI/ZIMMERMANN 2003). Die Abb. 2 zeigt exemplarisch die aus Messungen ermittelte Wasserstands- und Windstatistik sowie die über numerische Seegangssimulationen ermittelte Statistik von Wellenhöhe und -periode. Als Grundlage einer Klimafolgenanalyse sind neben dem Status-Quo außerdem Szenarien infolge des Klimawandels geänderte Statistiken von Wasserstand, Wind und Seegang gegeben. Nutzt man diese zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit, so folgt aus dem Vergleich von Klimaszenario und Status Quo die Wirkung von Klimaänderungen. Die Abb. 3 gibt die relative Zunahme der Versagenswahrscheinlichkeit einzelner Deichabschnitte zwischen Bremerhaven und Cuxhaven infolge Wasserstands- bzw. Windanstieg wieder. Die Sensitivität des Küstenschutzes ist gegenüber dem prognostizierten Wasserstandsanstieg erheblich größer als gegenüber der prognostizierten Intensivierung des Windes. So nimmt die Versagenswahrscheinlichkeit infolge eines Wasserstandsanstiegs von 0,5 m um bis zu 500 % und infolge einer Intensivierung des Windes um 7 % um bis zu 30 % zu.

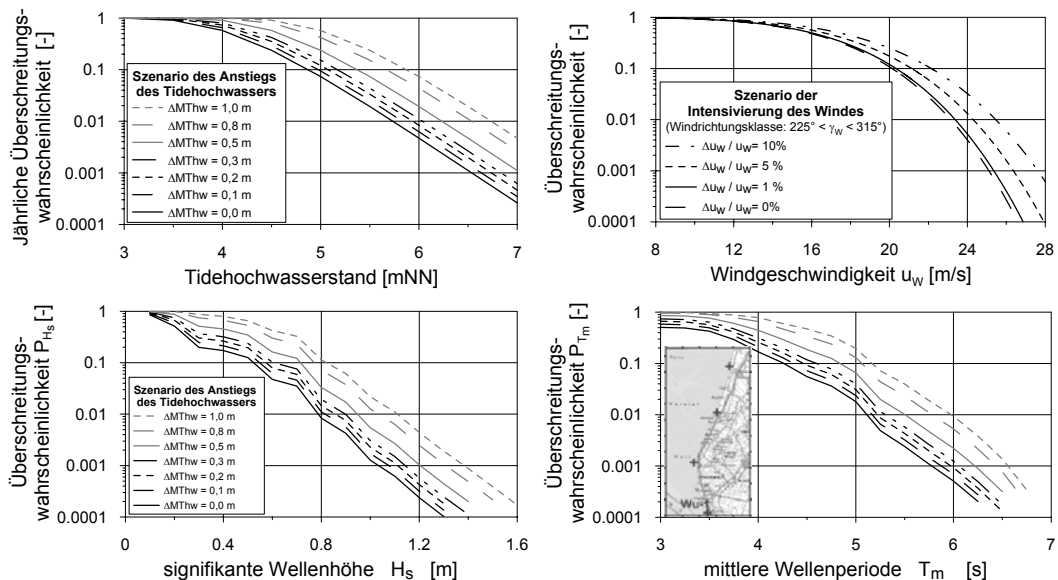


Abb. 2: Aus Messungen abgeleitete Statistik des Tidehochwasserstands und des Windes (oben) sowie die über numerische Seegangssimulationen ermittelte Statistik von Wellenhöhe und -periode (unten) – Status Quo und Szenarien des Klimawandels

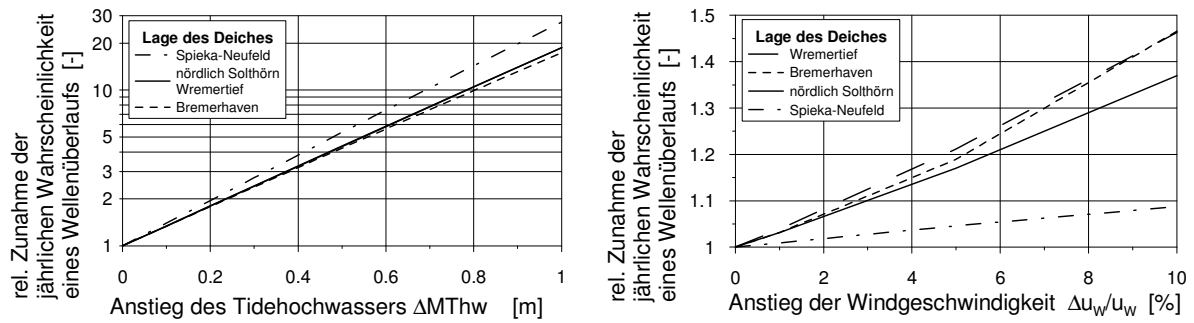


Abb. 3: Relative Zunahme der Wahrscheinlichkeit des Wellenüberlaufs an Hauptdeichen zwischen Bremerhaven und Cuxhaven als Folge eines Wasserstands- (links) und Windanstiegs (rechts) (MAI 2004)

In diesem Zusammenhang weisen Vorlanddeiche (speziell die mit vorgelagertem Sommerdeich) die größte Sensitivität gegenüber einem Anstieg des Wasserspiegels auf, während Schardeiche die größte Sensitivität gegenüber der Intensivierung des Windes besitzen.

3 Wertbestand im Küstenhinterland

Als Voraussetzung der Schadensberechnung ist zunächst eine Schadenspotentialanalyse durchzuführen. Hierbei wird der gesamte sozioökonomische Wertbestand im gefährdeten Küstenhinterland quantifiziert und räumlich verortet.

Für Untersuchungsgebiete regionaler Ausdehnung eignet sich dazu die folgende mesoskalige Vorgehensweise (MEYER/MAI 2003, MEYER/MAI 2004):

Die Quantifizierung der Schadenspotentiale erfolgt zunächst auf Gemeindeebene. Erhoben werden neben den Einwohnern die Wertkategorien Wohnkapital, Hausrats- und Pkw-Vermögen, Anlage-, Vorratsvermögen und Bruttowertschöpfung der Wirtschaftsbereiche sowie der Wert des Viehbestands, öffentlicher Freiflächen, Straßen und Bahnlinien und Bodenwerte. Wesentliche Quelle für diese Daten bilden vor allem amtliche Statistiken. In einigen Fällen, wie z. B. beim Anlagevermögen, welches nur auf Landesebene ausgewiesen wird, ist eine Abschätzung auf Gemeindeebene über Hilfsgrößen wie die Beschäftigtenzahl notwendig.

Die so erhobenen Schadenspotentiale werden in einem zweiten Schritt mit Hilfe digitaler Flächennutzungsdaten des ATKIS-Basis-DLM im GIS räumlich modelliert. Hierbei wird jede Wertkategorie einer oder mehreren ihr entsprechenden Flächennutzungskategorien zugeordnet. So wird beispielsweise das Wohnkapital auf den Flächennutzungskategorien „Wohnbauflächen“ und „Flächen gemischter Nutzung“ verortet.

Mit Hilfe dieser Vorgehensweise lassen sich Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Schadenspotentiale vor allem zwischen Siedlungsflächen, die Vermögenswertkonzentrationen von >50 EUR/qm in dörflichen und >100 EUR/qm in städtischen Bereichen aufweisen, und Siedlungsfreiflächen mit Wertkonzentration von zumeist <1 EUR/qm realitätsnah darstellen. Zwar lassen sich durchaus auch innerhalb der Siedlungsbereiche Flächen unterschiedlicher Wertkonzentrationen nachweisen; deren Heterogenität vor allem innerhalb großer Städte läßt sich mit der beschriebenen Methodik jedoch nur eingeschränkt berücksichtigen. So sind in den oben genannten ATKIS-Daten beispielsweise keine Informationen bezüglich der Bebauungsdichte, des Wohlstandsniveaus oder der Wirtschaftsstruktur enthalten.

Um die Verteilung der Schadenspotentiale auch innerhalb größerer Städte genauer darstellen zu können, wurde die o. g. Methodik weiterentwickelt, indem zusätzlich kleinräumige Geomarketingdaten

der Firma infas-Geodaten integriert wurden. Diese beinhalten auf Stimmbezirksebene sozioökonomische Informationen, wie z. B. die Einwohnerzahl, einen Kaufkraftindex, die Anzahl, Größe und Branchenzugehörigkeit von Betrieben sowie Anzahl und Typ der Gebäude in dem jeweiligen Stimmbezirk. Abb. 4 zeigt beispielsweise den Kaufkraftindex in den Stimmbezirken Bremerhavens.

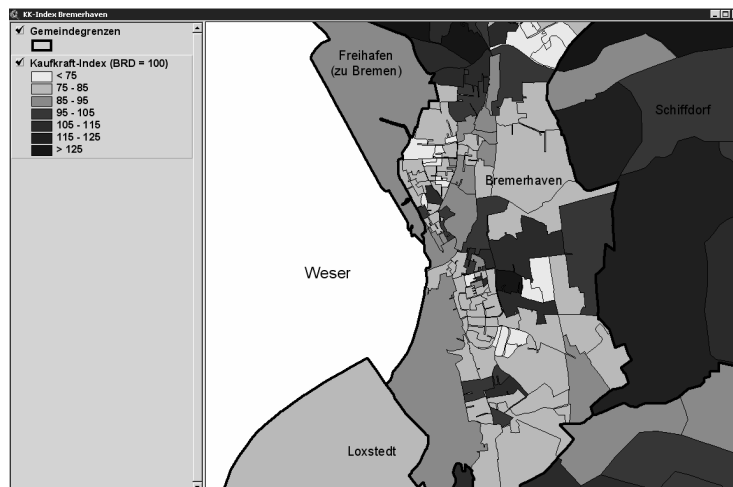


Abb. 4: Kaufkraftindex in den Stimmbezirken Bremerhavens

Diese Informationen werden innerhalb der zweiten Methodik genutzt, um die räumliche Modellierung mehrerer Wertkategorien zu verbessern:

Die Einwohnerzahlen auf Stimmbezirksebene ermöglichen neben einer exakteren Verteilung der Bevölkerung zudem eine genauere Verortung der damit verbundenen Wertkategorien Wohnkapital, Hausrat und Pkw-Vermögen. Letztere können zusätzlich mit Hilfe des Kaufkraftindex in ihrer Quantität angepaßt werden, je nachdem, ob es sich um „reiche“ oder „arme“ Stadtteile handelt.

Über die Angaben zur Anzahl, Größe und Branchenzugehörigkeit der Betriebe läßt sich die Beschäftigtenzahl innerhalb der Stimmbezirke zumindest grob abschätzen. Diese Hilfsgröße wird verwendet, um die Wertkategorien Wertschöpfung, Anlage- und Vorratsvermögen der Wirtschaftsbereiche besser verorten zu können.

Mit Hilfe der Informationen zur Bebauungsstruktur läßt sich zudem die durchschnittliche Geschößzahl und damit der Anteil der vornehmlich betroffenen Erdgeschosse in den Stimmbezirken abschätzen. Diese Information fließt zwar bislang nicht in die unten dargestellten Ergebnisse der Schadenspotentialanalyse mit ein, ermöglicht aber eine zusätzliche Einschätzung, welcher Anteil des Wertbestandes im Überflutungsfall tatsächlich betroffen wäre.

Abb. 5 zeigt die räumliche Verteilung aller Vermögenswerte(d.h. der Wertkategorien Wohnkapital, Hausrats-, Pkw-, Anlage-, Vorrats- und Viehvermögen sowie öffentliche Grünflächen ohne die linienhaften Vermögenswerte der Straßen und Bahnlinien sowie Bodenwerte.) in Bremerhaven, wie sie sich gemäß dieser weiterentwickelten Methodik ergibt. Abb. 5 zeigt zusätzlich die Veränderungen gegenüber den Ergebnissen der ersten Methodik. Die größten Veränderungen sind dabei in den städtischen Siedlungsbereichen zu beobachten: Hier werden vor allem die Innenstadt und zentrumsnahe Wohngebiete mit ihrer hohen Bebauungsdichte höher bewertet, aber auch einige Industriegebiete, die offensichtlich einen hohen Besatz an Betrieben aufweisen. Geringer bewertet werden hingegen zum einen weniger dicht bebaute Wohngebiete am Stadtrand Bremerhavens und zum anderen Industrie- und Gewerbegebiete die offenbar weniger intensiv genutzt werden. Mit Hilfe dieser räumlich differenzierten Ergebnisse kann die weiterentwickelte Methodik der Schadenspotentialanalyse somit einen Beitrag

leisten, mögliche Überflutungsschäden auch innerhalb größerer Städte (ohne mikroskalige Erhebung) genauer prognostizieren zu können.

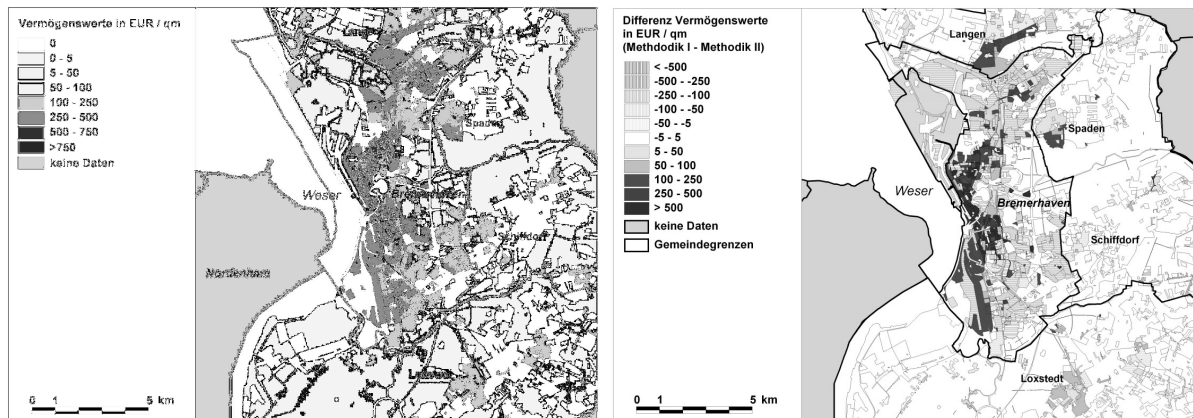


Abb. 5: Verteilung der Vermögenswerte in Bremerhaven nach Methodik II (links) und absolute Veränderungen der Verteilung der Vermögenswerte bei Methodik II gegenüber Methodik I (rechts)

4 Überflutung bei Versagen des Küstenschutzsystems

Im Falle des Versagens eines Küstenschutzsystems führt die Überflutung des Hinterlandes zu einer Schädigung der Werte auf den betroffenen Flächen. Um die Höhe dieses Schadens abschätzen zu können, muß neben der Erfassung des vorhandenen Wertbestands im Hinterlandes ermittelt werden, welche Flächen aufgrund ihrer Lage von der Überflutung betroffen sein können. Diese Festlegung der gefährdeten Flächen kann heutzutage mittels zweidimensionaler numerischer Strömungssimulationen erfolgen. Diese Methodik ist zwar in ihrer Anwendung aufwendiger als die einfachere Methodik des Verschneidens von Geländehöhen mit einem maßgebenden Sturmflutwasserstand, hat jedoch den Vorteil, daß sowohl die Ausdehnung der ermittelten Überflutungsfläche als auch die Überflutungshöhen realitätsnäher sind. Zudem wird durch die Simulation der Prozeß des Überflutens festgehalten, wodurch Aussagen über Verweildauer und Vorwahrzeiten getroffen werden können. Wichtigste Basisdaten für die Durchführung der Simulation ist ein Geländemodell, welches neben den Geländehöhen auch die Bathymetrie sowie die Küstenschutzanlagen enthält. Weiter Eingangsparmeter sind die sich während einer Sturmflut im Verlauf der Tide ändernden Wasserstände, sowie Abflüsse in Flüssen.

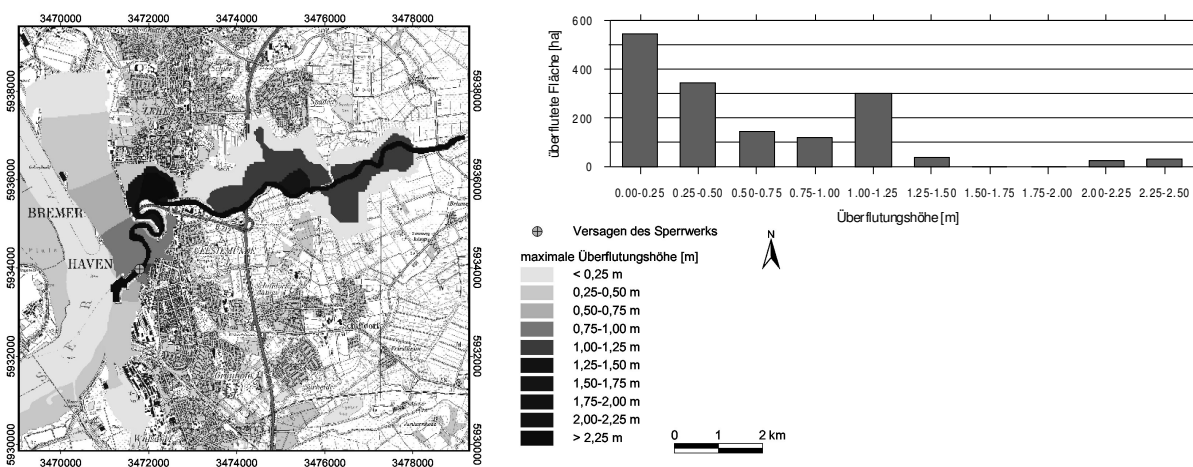


Abb. 6: Überflutungsausdehnung bei Versagen des Geeste-Sperrwerks mit der Verteilung der maximalen Überflutungshöhen. Berechnet für die Sturmflut vom 29.10.1996

Im vorliegenden Untersuchungsbeispiel wurde mit Hilfe der Simulation ermittelt, welche Flächen von einer Überflutung betroffen sein können, falls das Geeste-Sperrwerk während einer Sturmflut versagt und nicht zu schließen ist. Als Basis dient eine Geländemodell mit einer Rasterauflösung von 25 m, an dessen westlichem Rand die Tidekurve der Sturmflut vom 29.10.1996 für den Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm in den Flußlauf eingesteuert wird. Die Auswirkungen des Versagen des Geeste-Sperrwerks während einer Sturmflut zeigen die in Abb. 6 dargestellten Ergebnisse der Simulation. Die Überflutung, dargestellt mit den maximal während des Überflutungsprozesses erreichten Wasserstände, dringt entlang der Geeste ca. 8 km und entlang des Hafengebietes ca. 5 km weit ins Hinterland vor. Die Verteilung der Überflutungshöhen zeigt, daß auf der Hälfte der betroffenen Flächen Überflutungshöhen von bis zu 0,50 m erreicht werden. Höher steht das Wasser in der Nähe des Sperrwerks mit Überflutungshöhen von bis zu 1 m. Überflutungshöhen über 1 m finden sich entlang den Niederungen der Geeste, hier steht das Wasser in den Senkebereichen bis über 2 m.

5 Monetarisierung der Überflutungsschäden

Die Berechnung des sich durch die Überflutung ergebenden Schadens erfolgt entsprechend (5) und (6) über die vorhanden Wertbestände auf den betroffenen Flächenen sowie dem Schädigungsgrad der Flächen. Der Schädigungsgrad einer Fläche ergibt sich dabei aus der Höhe der Überflutung auf ihr. Dieser Zusammenhang zwischen Schädigungsgrad und Überflutungshöhe kann in Wasserstands-Schadensfunktionen beschrieben werden. Abb. 7 zeigt die für die durchgeführte Schadensanalyse verwendeten Schadensfunktionen aufgeteilt nach unterschiedlichen Wertkategorien.

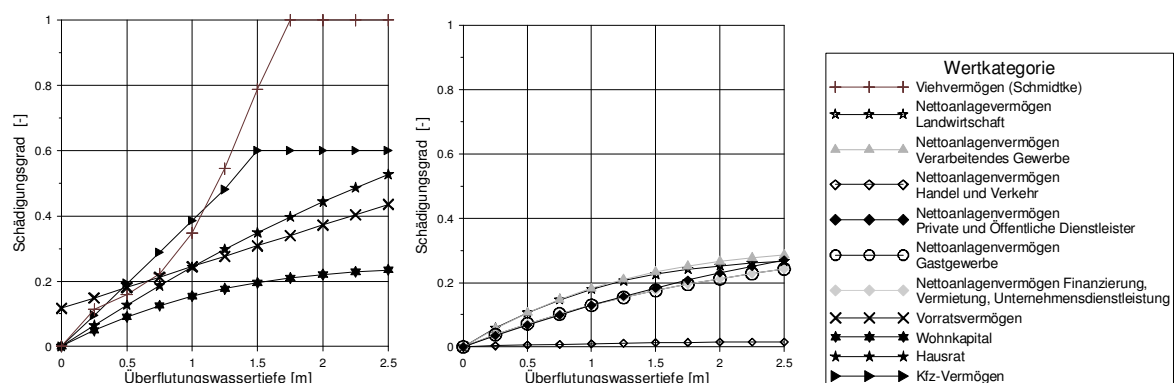


Abb. 7: Schadensfunktionen für die Berechnung des Schädigungsgrades einer überfluteten Fläche (nach OTTE ET AL. 2003)

Um den Schädigungsgrad einer Fläche bestimmen zu können, muß die maximale Überflutungshöhe, die sich während des Überflutungsverlaufs auf der Fläche einstellt, ermittelt werden. Hierzu wird aus den einzelnen Zeitschritten der Überflutungssimulation der jeweils höchste Überflutungswert einer Fläche herausgelesen, so daß als Ergebnis ein Raster mit den maximalen Überflutungshöhen entsteht. Diese maximalen Überflutungshöhen bilden zusammen mit den Vorhanden Vermögenswerten und den Schadensfunktionen die Basis der Schadensberechnung.

Die Schadensberechnung erfolgt automatisiert in dem GIS ArcView mit dem Tool "Loss-Calculator" (ELSNER ET AL. 2004). In der Analyse wird die gesamte überflutete Fläche zunächst auf ihre unterschiedlichen Nutzungsformen hin untersucht. Jeder dieser Nutzungsformen werden in einem zweiten Schritt die für den Wertbestand der Fläche relevanten Wertkategorien, z.B. Hausrat, Wohnkapital, Kfz für die Flächennutzung Wohnbaufläche, zugewiesen und darauf aufbauend die Einzelschäden dieser Wertkategorien berechnet. Hierzu wird mit Hilfe der Schadensfunktionen der Schädigungsgrad der

Fläche bezüglich der jeweiligen Kategorie ermittelt und dieser mit dem zugehörigen Vermögenswert multipliziert. Der Schaden einer bestimmten Flächennutzung ergibt sich damit aus der Aufsummierung der Einzelschäden, die sich für die Wertkategorien ergeben. Der Gesamtschaden der Überflutung berechnet sich aus der Summe aller, auf den einzelnen Flächen entstehender, Schäden.

Das Ergebnis einer Schadensanalyse ist in starkem Maße von der Auflösung der Eingangsdaten abhängig. Im Folgenden wurde untersucht, wie sich unterschiedliche Methoden der Schadenspotenzialanalyse auf die Schadenshöhe auswirken. Dazu wurde die Schadensanalyse mit ansonsten gleichbleibenden Parametern mit unterschiedlichen Datensätzen für den ermittelten Wertbestand (siehe Kapitel 3) durchgeführt.

Mit dem, nach Methodik I ermittelten, Wertbestand ergibt die Analyse ein von Überflutung betroffenes Vermögen von ca. 1,8 Mrd. € sowie einen Schaden in Höhe von ca. 211 Mio. Euro. Für die gleiche Überflutungsfläche fällt der Vermögensbestand um 40 % (2,5 Mrd. €) und der Schaden um 60% (341 Mio. Euro) höher aus, wenn der Wertbestand nach Methodik II erfaßt wird.

6 Sturmflutrisiko für das Küstenhinterland und Maßnahmen zur Risikominderung

Aus der Kombination der nach Kapitel 2 bzw. Kapitel 5 zu berechnenden Versagenswahrscheinlichkeit und Folgeschäden folgt gemäß (7) das Sturmflutrisiko. Beispiele der bei dieser Berechnung zu berücksichtigenden Abhängigkeit des Folgeschadens von der Versagensintensität sind für einen Deichabschnitt nördlich von Bremerhaven in Abb. 8 gegeben. Ein von 6 mNN auf 7 mNN erhöhter Scheitelwasserstand der Sturmflut bedeutet demnach ein Zunahme des Überflutungsschadens von 30 %, die Verdoppelung der Deichbruchweite von 150 m auf 300 m zieht eine Schadenzunahme um 50 % nach sich. Infolge des Klimawandels ist eine Risikozunahme zu erwarten, welche die in Abb. 3 dargestellte Zunahme der Versagenswahrscheinlichkeit etwa um 10 % übertrifft.

Eine Kompensation dieser durch den Klimawandel bedingten Risikozunahme ist einerseits durch Erüchtigung des bestehenden Küstenschutzsystems (z.B. durch Deicherhöhung) zur Verminderung der Versagenswahrscheinlichkeit und andererseits durch Anlage zweiter Schutzlinien zur Verminderung des Überflutungsschadens möglich.

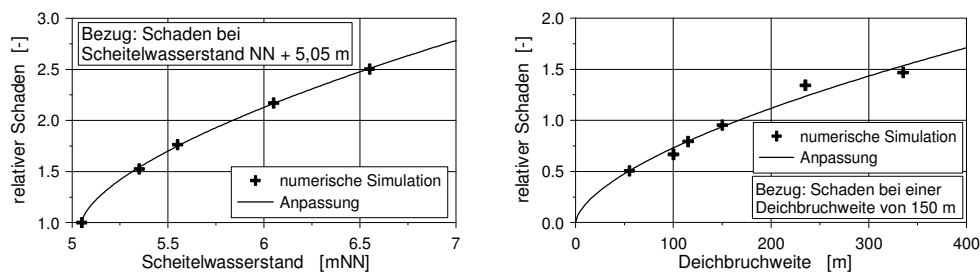


Abb. 8: Abhängigkeit des Folgeschadens von der Versagensintensität: Schadenzunahme bei wachsendem Scheitelwasserstand (links) bzw. bei wachsender Deichbruchweite (rechts)

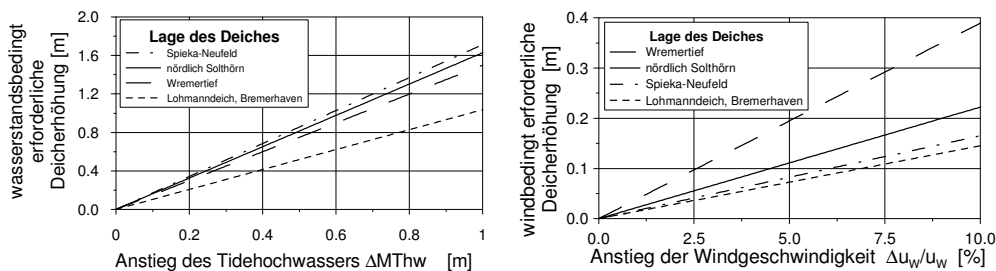


Abb. 9: Erforderliche Deicherhöhung zur Kompensation der wasserstands- (links) und windbedingten (rechts) Risikozunahme (MAI 2004)

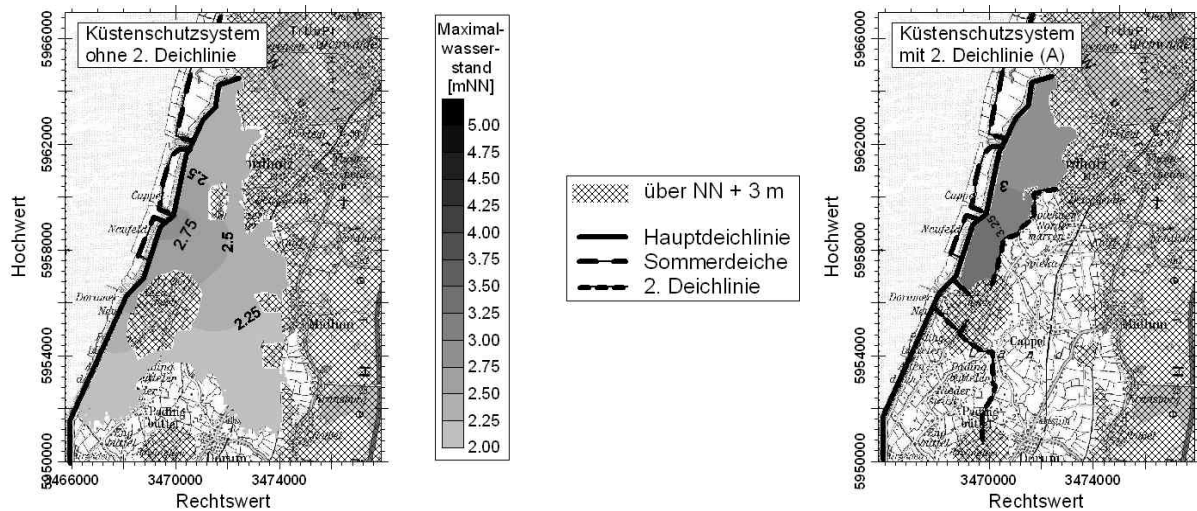


Abb. 10: Minderung des Überflutungsschadens durch Anlage zweiter Deichlinien

Für die Deichstrecke zwischen Bremerhaven und Cuxhaven ergeben sich zur Beibehaltung des aktuellen Risikos die in Abb. 9 dargestellten erforderlichen Deicherhöhungen. So ist infolge eines Wasserstandsanstiegs von 0,5 m der Deich um bis zu 0,9 m und infolge einer Intensivierung des Windes von 7 % um bis zu 0,3 m zu erhöhen.

Die durch die Anlage einer zweiten Deichlinie erreichbare Reduzierung der Überflutungsfläche ist exemplarisch in Abb. 10 wiedergegeben. Bei der Beurteilung der Wirksamkeit zweiter Deichlinien ist jedoch zu berücksichtigen, daß mit der Reduzierung der Überflutungsfläche um 70 % eine Erhöhung der Überflutungswassertiefe um 140 % verbunden ist. Dennoch ist für das hier gegebene Beispiel eine Schadensreduzierung um ca. 65 % zu erwarten. Die Anlage der zweiten Deichlinie könnte somit die infolge eines Wasserstandsanstiegs von 0,25 m zu erwartende Risikozunahme kompensieren.

Die Methodik der probabilistischen Risikoanalyse eignet sich also nicht nur als Werkzeug zur Analyse der Folgen des Klimawandels auf den Küstenschutz, sondern unterstützt auch die Entscheidungsfindung über die optimale Strategie zur Risikominderung.

7 Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse sind im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundprojekt „Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste“ (www.krim.uni-bremen.de) durch das Teilprojekt „Klimaänderung und Küstenschutz“ (Projektkennzeichen: 01 LD 0014) erarbeitet worden.

8 Literatur

- AUSSCHUSS FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE: EAK 2002 - Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken. In: Die Küste, Heft 65, Heide i. Holstein, 2002, 589 S.
- ELSNER, A./ MAI, S./ ZIMMERMANN, C.: Risikoanalyse - ein Element des Küstenzonenmanagements. In: Coastal Reports, Heft 1, 2004, S. 137-147.
- KORTENHAUS, A./ OUMERACI, H.: Probabilistische Bemessung für Seedeiche. In: LWI Bericht, Nr. 877, Leichtweiß-Institut, Braunschweig, 2002, 221 S.
- MAI, S.: Klimafolgenanalyse und Risiko für die Küstenzone. Am Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Hannover angenommene Dissertation, Hannover, 2004, 234 S.

- MAI, S./ ZIMMERMANN, C.: Risk Analysis - Tool for Integrated Coastal Planning. In: Proc. of the 6th Int. Conf. on Coastal and Port Engineering in Developing Countries COPEDEC, Colombo, Sri Lanka, 2003, CD-ROM.
- MAI, S./ ZIMMERMANN, C.: Veränderung der Seegangsbedingungen an den Küsten von Jade und Weser als Folge der Klimaänderung. In: Coastal Reports, Heft 1, 2004, S. 93-100.
- MEYER, V.: Methoden der Sturmflut-Schadenspotenzialanalyse an der deutschen Nordseeküste. Am Fachbereich Geowissenschaften und Geographie der Universität Hannover eingereichte Dissertation. Hannover, 2004, 210 S.
- MEYER, V./ MAI, S.: Verfahren zur Berechnung der Schäden nach Deichbruch an der niedersächsischen Küste. In: Essener Geographische Arbeiten, Band 35, Essen, 2003, S. 169-178.
- MEYER, V./ MAI, S.: Überflutungsschäden im Küstenhinterland nach Deichbruch. In: Wasserwirtschaft, Heft 11, Wiesbaden, 2004 (im Druck).
- OTTE, C./ YU, I. / ELSNER, W.: 2. Zwischenbericht des Teilprojekts 5 - "Regionalökonomische Risiko- und Reaktions-Analyse des Klimawandels" (REcoACT) des Projektvorhabens "Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste" (KRIM), Universität Bremen, 2003 (unveröffentlicht).
- PROBST, B.: Überlegungen für einen Küstenschutz der Zukunft. Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 75, 1994, Hannover, S. 52 – 68.
- VERGEER, G. J. H.: Probabilistic Design of Flood Defences. In: CENTER FOR CIVIL ENGINEERING RESEARCH AND CODES (CUR) Report, Heft 141, Gouda, Netherlands, 1990, S. 154.
- ZIMMERMANN, C./ MAI, S.: Analyse von Küstenschutzsystemen unter Risikoaspekten. HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, Nr. 6, Hamburg, 1998, S. 67-70.

Adressen

Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Dipl.-Phys. Stephan Mai
Dipl.-Geogr. Anne Elsner
Prof. Dr.-Ing. Claus Zimmermann
Universität Hannover, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen
Nienburger Str. 4
30167 Hannover
Germany

Dipl.-Geogr. Volker Meyer
Universität Hannover, Geographisches Institut, Abt. Wirtschaftsgeographie
Schneiderberg 50
30167 Hannover
Germany

E-mail: Stephan.Mai@mbox.fi.uni-hannover.de
Anne.Elsner@fi.uni-hannover.de
meyer@wigeo.uni-hannover.de
Claus.Zimmermann@fi.uni-hannover.de

Risiken eines Klimawandels an den Küsten Schleswig-Holsteins - Schadenspotenziale und Vulnerabilität

Horst Sterr, Hans-Jörg Markau, Stefan Reese

Geographisches Institut CAU Kiel

Summary

The coasts of highly developed states such as Germany show a significant increase of vulnerability in the socio-economic sphere in the 20th Century particularly due to an intensified population growth, an increasing consumption of space and the installation of high-quality infrastructure. Regarding recent trends of climate change and sea level rise the low-lying coastal area of Northern Germany faces severe risks from extreme storm surges. The increasing vulnerability and the risk of flooding can be measured with different procedures. The results of our investigations on different levels of scale show substantial differences in socio-economic risk measurements. This emphasises the need of practice-suited and standardized micro-scale methodologies for risk analysis needed in coastal defence planning and implementation. Apart from the scientific risk analysis the social evaluation of risks gains more importance in future decision-making procedures. For this purpose both the social perception of the risk and the individual and collective standards and values have to be integrated throughout planning processes by intensified public participation.

Zusammenfassung

Gerade an den Küsten von hoch entwickelten Staaten wie Deutschland ist im 20. Jahrhundert insbesondere infolge eines verstärkten Bevölkerungswachstums, eines rasch zunehmenden Flächenbedarfs und der Errichtung aufwändiger Infrastruktur eine signifikante Vulnerabilisierung der sozioökonomischen Sphäre zu erkennen. Vor dem Hintergrund eines möglichen Klimawandels und eines verstärkten Meeresspiegelanstiegs wird so auch die zunehmende Gefährdung des norddeutschen Küstenraumes durch hydrologische Extremereignisse deutlich. Die daraus resultierende wachsende Vulnerabilität und das Risiko können heute mit Hilfe verschiedener Verfahren abgeschätzt werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen auf verschiedenen Maßstabsebenen zeigen hierbei aber erhebliche Differenzen und unterstreichen somit den Bedarf an praxistauglichen und standardisierten mikroskaligen Analyseverfahren insbesondere für die Maßnahmenplanung. Doch neben der naturwissenschaftlich-technischen Analyse des Risikos gewinnt bei zukünftigen Entscheidungsverfahren die gesellschaftliche Risikobewertung immer mehr an Bedeutung. Hierzu sind die gesellschaftliche Perzeption des Risikos und die individuellen und kollektiven Wertvorstellungen durch eine verstärkte Partizipation der Öffentlichkeit in den Planungsprozess zu integrieren.

1 Einleitung

Die Küstenzonen gelten insbesondere vor dem Hintergrund der Risiken und Folgen eines Klimawandels als besonders gefährdet: Sowohl Küstenökosysteme als auch die in Küstenräumen lebende Bevölkerung sowie Sachwerte unterliegen angesichts eines zunehmenden Meeresspiegelanstiegs und der vermuteten Zunahme der Intensität und Häufigkeit von extremen Sturmflutereignissen einer wachsenden Gefährdung. In zukünftigen Küstenschutzstrategien müssen diese Entwicklungen verstärkt berücksichtigt werden.

So müssen in einem ersten Schritt differenzierte Informationen zu den Schadenspotenzialen und der Schadenserwartung bereitgestellt werden. Da aber diese beiden Aspekte lediglich zwei relevante Fak-

toren bei der Ermittlung der Verletzlichkeit von Küstenräumen darstellen, müssen eine ganze Reihe weiterer Einflüsse analysiert werden. Die Organisation des Katastrophenschutzes und die individuelle und kollektive Bereitschaft für Vorsorgemaßnahmen sind hierbei wichtige Größen für das Maß der Vulnerabilität von Küstenräumen. In einem zweiten Schritt müssen die Risiken in einem rationalen Bewertungsverfahren zur Analyse und Bewertung von Klimafolgen integriert werden, wie es u. a. in Form eines Integrierten Küstenzonenmanagements erprobt wird. Entscheidend bleibt, dass die Risikoanalyse einerseits und die Bewertung möglicher negativer Folgen als normativer Vorgang andererseits getrennt bleiben. Für den hier skizzierten Zusammenhang werden empirische Beispiele aus Schleswig-Holstein vorgestellt.

2 Die Ausgangssituation

Auch wenn die detaillierten Abläufe noch vielfach unklar sind, so besteht doch gegenwärtig ein breiter wissenschaftlicher Konsens darüber, dass ein anthropogen verstärkter globaler Klimawandel schon in den nächsten Jahrzehnten zu erheblichen Veränderungen im Klimageschehen führen wird - allem Anschein nach zeichnet sich schon jetzt ein menschlicher *fingerprint* bei den Klimatrends der letzten Jahrzehnte ab. Ein herausragendes Problem ist dabei der Meeresspiegelanstieg, der die weltweit zahlreich vorhandenen küstennahen Niederungsgebiete besonders gefährdet. Die Projektionen mit der höchsten Eintretenswahrscheinlichkeit für den globalen Anstieg liegen bei etwa 50 cm bis zum Jahr 2100. Dies erscheint wenig, ist jedoch mehr als das Doppelte der bisherigen Anstiegsbeträge an der deutschen Nordseeküste und nahezu das Dreifache des Anstiegs an der Ostseeküste. Die Anhebung des Ausgangsniveaus für Sturmfluten könnte hierbei auch zu einer Zunahme der Sturmfluthäufigkeit und zu einer stärkeren Intensität von Seegang und Brandung führen. Im Zusammenwirken mit der erwarteten Zunahme von Höhe und Frequenz der Sturmfluten ist somit auch eine offensichtliche Zunahme der Küstengefährdung zu erwarten.

Gerade an den Küsten von hoch entwickelten Staaten wie Deutschland hat im 20. Jahrhundert eine signifikante *Vulnerabilisierung* der sozioökonomischen Sphäre stattgefunden, besonders infolge von Bevölkerungswachstum, einem rasch zunehmenden Flächenbedarf, Errichtung aufwändiger Infrastruktur etc. Dies bedeutet eine Entwicklung in Richtung hoher Schadenspotenziale und steigender Schadensanfälligkeit. Volkswirtschaftlich gesehen sind in Deutschland die Hochwässer an Flüssen und Sturmfluten an den Küsten die Naturereignisse mit den höchsten Schäden und damit eine der größten Herausforderungen für unsere Gesellschaft. So hat die Hamburg-Sturmflut vom Februar 1962 fast 350 Menschenleben gefordert - soviel wie kein anderes Ereignis in Deutschland nach dem Krieg - und das Elbe-Hochwasser im August 2002 unterstreicht mit einem Gesamtschadensvolumen von ca. 10 Mrd. € die volkswirtschaftliche Bedeutung von Naturkatastrophen (vgl. DKKV, 2003). Die derzeit beobachteten Trends im Klimageschehen lassen zudem eine Häufung solcher Ereignisse im 21. Jahrhundert als sehr plausibel erscheinen. Insbesondere für die Regionen, in denen ein erwärmungsbedingter Meeresspiegelanstieg noch durch Landsenkungstendenzen verstärkt wird - seien sie isostatischer, tektonischer oder anthropogener Natur - ist die Gefährdungslage als besonders kritisch anzusehen. Geowissenschaftliche Untersuchungen der letzten Jahrzehnte belegen, dass auch die deutschen Küstenregionen an Nord- und Ostsee zu eben diesen stark gefährdeten Gebieten gehören.

Künftig wird also vermutlich auch ein wachsender Teil der norddeutschen Küstenbevölkerung zunehmend darunter leiden, dass mehr und mehr Siedlungen und landwirtschaftliche Flächen sowie Verkehrs- und Industrieeinrichtungen von häufigen Überflutungen bedroht sind oder dass tief greifende Beeinträchtigungen anderer *klassischer* Nutzungsformen wie Schifffahrt, Fischerei und Tourismus zu großen wirtschaftlichen Einbußen führen.

Diese Tendenzen zeigen den zunehmenden Bedarf an naturwissenschaftlich-technischen Risikoanalysen einerseits und der gesellschaftlicher Bewertung der ermittelten Risiken in den betroffenen Küstenräumen andererseits. So können zukünftig Vorsorgemaßnahmen wie die des Küstenschutzes an die

natürlichen und sozioökonomischen Bedingungen angepasst und außerdem soziale Wertvorstellungen in das Risikomanagement integriert werden. Im Folgenden werden methodische Grundlagen und empirische Untersuchungsergebnisse der Analyse und der Bewertung des Sturmflutrisikos an den Küsten Schleswig-Holsteins diskutiert.

3 Sozioökonomische Risikoanalyse

In der naturwissenschaftlich-technischen Perspektive werden Risikoanalysen gegliedert in die Analyse der Gefährdung, d.h. der Häufigkeit und Intensität extremer Ereignisse, und die Abschätzung der Vulnerabilität, also der Schadensersparung, die spezifischen Ereignissen zugeschrieben wird.

Die erläuterten Veränderungen im natürlichen Küstensystem (Hydrographie, Morphologie und Ökologie) ziehen weit reichende Folgen im ökonomischen und gesellschaftlichen Systemgefüge nach sich, was im Allgemeinen eine höhere Vulnerabilität für die Küstenbevölkerung und deren materielle Lebensgrundlagen bedeutet (IPCC 1992, 2001). Die Abb. 1 zeigt die verschiedenen Vulnerabilitätstypen im Kontext der naturwissenschaftlich-technischen Risikoanalyse.

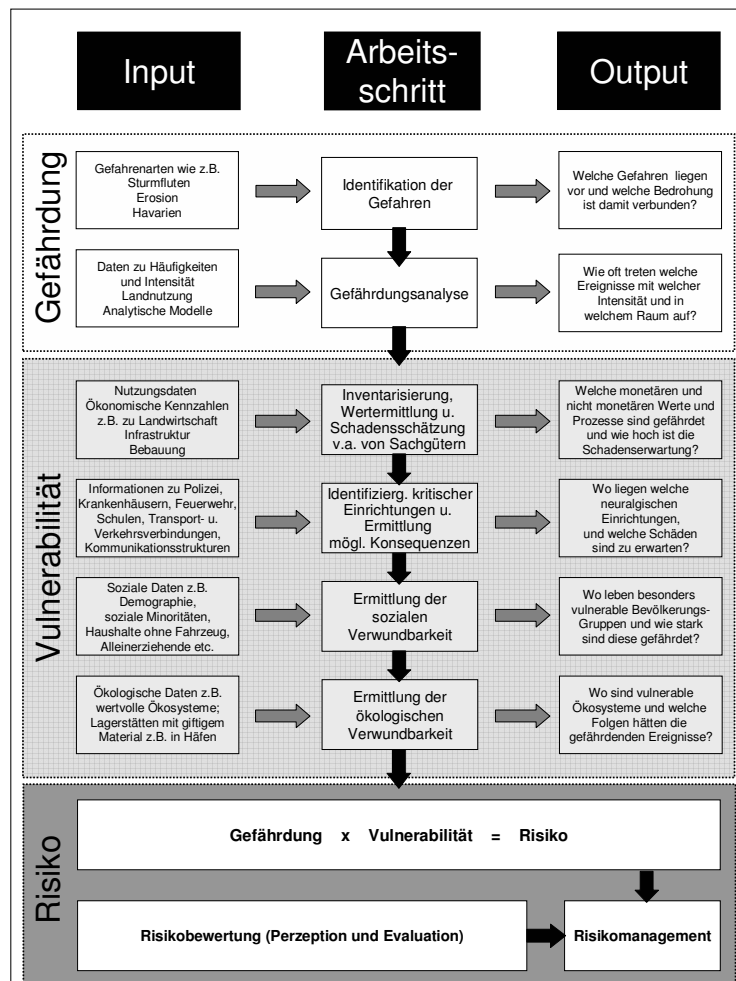


Abb. 1: Naturwissenschaftlich-technische Risikoanalyse

Nach der Identifikation des Gefährdungsbildes und der Ermittlung der Intensitäten und Häufigkeiten bzw. Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Gefahren sowie deren räumliche Ausdehnung, werden die verschiedenen Risikoelemente hinsichtlich ihrer Werte und den potenziellen Schädigungen analysiert. In der Praxis werden diese Vulnerabilitätsanalysen zum Teil vor dem Hintergrund von Kosten-Nutzen-

Analysen bei Planungsvorhaben durchgeführt. Hierzu ist die Ermittlung der monetären Schadenserwartungen erforderlich, wobei verschiedene Probleme bzw. Grenzen der Monetarisierung auftreten. Insbesondere ökologische und kulturhistorische Strukturen, aber auch ökonomische Größen werden aber aufgrund ihrer zum Teil sehr komplexen Erfassung vernachlässigt. Ein besonderes Problem ergibt sich zudem durch die ethisch-moralische Fragestellung nach der monetären Bewertung von Menschenleben (nebenbei bemerkt: Ansätze hierzu gibt es zahlreiche, vgl. NOWITZKY, 1997).

4 Vulnerabilitätsanalysen im Küstenraum

Die möglichen negativen Konsequenzen durch extreme Sturmfluten waren in der Vergangenheit Gegenstand zahlreicher Untersuchungen auch im deutschen Küstenraum (s. MARKAU, 2003; REESE, 2003). Eine vollständige Vulnerabilitätsanalyse, wie sie in Abb. 1 dargestellt ist, ist aber bis dato in Deutschland nicht durchgeführt worden. Zudem unterscheiden sich in den vorliegenden Untersuchungen sowohl die Analysemethoden und -techniken als auch die Untersuchungsergebnisse teils erheblich. So wurden Vulnerabilitätsanalysen in der Vergangenheit je nach der Größe des zu untersuchenden Gebietes und der Zielsetzung der Analyse auf unterschiedlichen Skalen durchgeführt. Drei verschiedene Betrachtungsebenen lassen sich differenzieren (s. Tab. 1 u. Abb. 2; zu den methodischen Ansätzen s. REESE, 2003):

- Makroskalige Studien finden Anwendung in überregionalen Untersuchungsgebieten. Auf der nationalen bzw. internationalen Betrachtungsebene sind vor allem politische Ziele und Grundsatzentscheidungen Anlass der Untersuchungen (vgl. IPCC, 1992).
- Mesoskalige Ansätze finden vorwiegend Anwendung auf regionaler Ebene (vgl. HAMANN & KLUG, 1998). Hauptziel dieser Verfahren ist die strategische Planung z.B. im Rahmen der Prioritätensetzung bei Küstenschutzmaßnahmen.
- Mikroskalige Untersuchungen sind i. d. R. auf kleinräumige Gebiete begrenzt und fokussieren auf lokaler Ebene die potenziell gefährdeten Objekte (z.B. Gebäude). Aufgrund ihres hohen Detailgrades werden sie hauptsächlich im Rahmen der konkreten Maßnahmenplanung durchgeführt (vgl. REESE et al., 2001).

Maßstabsebene		Makro	Meso	Mikro
Raumbezug		(Inter-) national	Regional	Lokal
		Grenzübergreifender Küstenraum	Küstenregion	Potenzielles Überflutungsgebiet
Integriert in... <i>Beispiel Bearbeiter Quelle</i>	politische Konzepte	<i>Küsten Norddeutschlands IPCC IPCC, 1992 Ebenhöh et al., 1997</i>		
	<i>Politische Abstimmung</i>			
	Strategien		<i>Bewertungsgutachten Schleswig-Holstein FTZ-Westküste Hamann/ Klug, 1998</i>	
	<i>Schutz und Prioritäten</i>			
	Maßnahmen			<i>MERK-Studie FTZ-Westküste Reese et al., 2003</i>
	<i>Küstenschutz</i>			

Tab. 1: Maßstabsebenen bei Vulnerabilitätsanalysen im Küstenraum

Aufgrund der vergleichsweise großen Untersuchungsräume basieren makro- und mesoskalige Methoden auf aggregierten Daten, d.h. vorwiegend auf amtlichen Statistiken. Die Daten werden i. d. R. auf Gemeindeebene erhoben und auf kleinere Flächeneinheiten oder -nutzungen projiziert. Mit mikroska-

ligen Methoden werden hingegen Detaildaten auf der Ebene einzelner Gebäude oder Flurstücke verarbeitet, die üblicher Weise auf empirischen Erhebungen und Liegenschaftsinformationen basieren.

Wie Abb. 2 zeigt, bergen alle drei Skalen Vor- und Nachteile. Während die mikroskaligen Methoden durch hohe Genauigkeit hervortreten, müssen gleichzeitig große Datenmengen erhoben werden, was mit einem z. T. sehr hohen Aufwand bzw. hohen Kosten verbunden ist. Makro- und mesoskalige Studien hingegen zeichnen sich durch einen geringeren Arbeitsaufwand aus, erreichen aber auch nur einen geringeren Detailgrad. So ist die Wahl der Analysemethodik neben der Größe des Untersuchungsgebietes und den vorhandenen Mitteln auch wesentlich von der Frage abhängig, wie detailliert die Informationen für die Planungstätigkeit sein sollen.

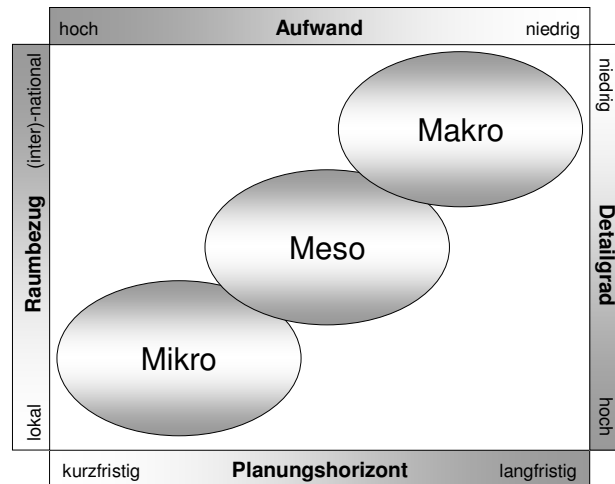


Abb. 2: Charakteristika der verschiedenen Maßstabsebenen

Die Unterschiede der jeweiligen Betrachtungsebenen werden deutlich, wenn man die Analyseergebnisse der unterschiedlichen Skalen vergleicht (Tab. 2). So konnten wir im Rahmen verschiedener Wertermittlungen teils eklatante Diskrepanzen nachweisen (vgl. HAMANN & KLUG, 1998; REESE et al., 2003). Ein exemplarischer Vergleich der Ergebnisse dieser Studien für die Stadt Kiel ergibt folgendes Bild:

Untersuchungsraum		Stadt Kiel				
Maßstabsebene		Mikro	Relation	Meso	Relation	Makro
Kategorie	Betroffene Fläche (ha)	569	1 : 1,3	740	1 : 1,51	1.117
	Einwohner	1.700	1 : 44,8	76.200	1 : 0,32	24.400
	Sachwerte gesamt	4,71 Mrd. €	1 : 4,14	19,5 Mrd. €	1 : 0,19	3,62 Mrd. €
	Sachwerte je ha	8,28 Mio. €	1 : 3,18	26,35 Mio. €	1 : 0,12	3,24 Mio. €

Tab. 2: Schadenspotenzialanalysen unterschiedlicher Maßstabsebenen in der Stadt Kiel (Quelle: Ebenhöf et al., 1997; Hamann & Klug, 1998; Reese et al., 2003)

Die Unterschiede der Untersuchungsergebnisse sind evident: So wird mit der mesoskaligen Methode eine mehr als dreifach höhere Zahl der gefährdeten Einwohner ermittelt als mit Hilfe des makroskali-

gen Verfahrens und sogar das ca. 45fache im Vergleich zur mikroskaligen Methodik! Während die monetären Sachwerte der mikro- und makroskaligen Untersuchungen noch ähnliche Größenordnungen aufweisen, so zeigen wiederum die mesoskaligen Ergebnisse einen vier- bzw. fünf mal höheren Wert gegenüber den anderen Verfahren bzw. Maßstabsebenen¹.

Auch wenn wir an dieser Stelle mit der Stadt Kiel ein extremes Beispiel differenter Untersuchungsergebnisse gewählt haben - in ländlichen Räumen fallen die Unterschiede deutlich geringer aus -, so zeigt diese Darstellung doch sehr eindrucksvoll die teils eklatanten Diskrepanzen zwischen den verschiedenen Maßstabsebenen. Diese resultieren zum einen aus der unterschiedlichen Abgrenzung der potenziellen Überflutungsgebiete, sind aber zum anderen auch auf teils erhebliche methodische Unterschiede der Verfahren zurückzuführen. So werden z.B. mit der mesoskaligen Methode die Einwohner auf die Wohnbebauung (identifiziert anhand der TK50) im potenziellen Überflutungsgebiet (abgegrenzt anhand der 5 m-Isohypse) übertragen, während bei dem mikroskaligen Verfahren die realen Einwohnerzahlen (selektiert aus dem Einwohnermelderegister) den entsprechenden Adressen der Gebäude (ermittelt über Straßenkataster und Nutzungskartierungen) im potenziellen Überflutungsgebiet (abgegrenzt anhand der 4 m-Isohypse) zugeordnet werden.

Die aufgezeigten Differenzen bestätigen die Forderung nach mikroskaligen Vulnerabilitätsstudien insbesondere für die konkrete Maßnahmenplanung und vor dem Hintergrund von Kosten-Nutzen-Überlegungen sowie einer zunehmenden Verknappung öffentlicher Mittel. Da mikroskalige Verfahren aber aufgrund ihres erheblichen Aufwandes nur selten machbar sind, scheint es zukünftig sinnvoll, auf der Basis der bestehenden methodischen Ansätze ein standardisiertes Verfahren zu entwickeln. Zudem sollte der Schnittbereich zwischen der meso- und mikroskaligen Methodik näher beleuchtet werden, um zukünftige Analysen mit geringerem Aufwand zu ermöglichen.

5 Gesellschaftliche Risikobetrachtung

Es ist unumstritten, dass das gesellschaftliche Urteil auch das Management von Naturrisiken determiniert. So ist die drängende gesellschaftspolitische Frage nach der Risikovorsorge, den Handlungsprioritäten und -präferenzen auch im Küstenraum nur unter Berücksichtigung der gesellschaftlichen Bewertung der Risiken und des Nutzens von anthropogenen Aktivitäten zu beantworten. Da Entscheidungen bezüglich des Umgangs mit Risiken, wie z.B. die Allokation der Mittel, von der Gesellschaft mitgetragen werden müssen, ist es erforderlich, die Sichtweise der betroffenen Bevölkerung zu verstehen und in zukünftige Maßnahmenplanungen zu integrieren.

Während die gesellschaftliche **Risikobewertung** im Wesentlichen durch die Risikowahrnehmung (Perzeption) und spezifische Wertvorstellungen bedingt wird, kann die Integration der individuellen und kollektiven Meinungen und Bedürfnisse insbesondere durch eine verstärkte **Partizipation** der Öffentlichkeit ermöglicht werden.

5.1 Risikobewertung im schleswig-holsteinischen Küstenraum

Wie bewerten die Küstenbewohner das Sturmflutrisiko in den potenziell überflutungsgefährdeten Räumen Schleswig-Holsteins?

Um diese Frage zu beantworten, haben wir im Rahmen der Forschungsprojekte MERK² und COM-RISK³ (MERTSCH, 2003; REESE et al., 2003; KAISER et al., 2004) an der Nordseeküste (St. Peter-

¹ Unser Ergebnisvergleich bezieht sich in diesem Fall ausschließlich auf die Gesamtergebnisse der verschiedenen Verfahren und berücksichtigt nicht die methodischen Unterschiede wie z.B. die Wahl und Analysetechnik verschiedener Schadenskategorien. Bei einer Gegenüberstellung der komparablen Ergebnisse (z.B. gleicher Schadenskategorien) zeigen sich aber ähnliche Verhältnisse (vgl. REESE, 2003).

² MERK = Mikroskalige Evaluation der Risiken in überflutungsgefährdeten Küstenniederungen, gefördert vom *Bundesministerium für Bildung und Forschung* und *Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus Schleswig-Holstein*.

Ording) und an der Ostseeküste (Lübeck) Befragungen in der potenziell betroffenen Bevölkerung durchgeführt. Der Fokus lag hierbei auf der Analyse des Risikobewusstseins und den individuell wahrgenommenen Möglichkeiten von präventiven und reaktiven Maßnahmen zur Minimierung von Schäden und zur Verbesserung der Risikokommunikation (vgl. MARKAU, 2003). Die Tab. 3 zeigt exemplarische Befragungsergebnisse.

	St. Peter-Ording	Lübeck
Bewusstsein und Erfahrung	Einem Großteil der Bevölkerung in St. Peter-Ording ist das Sturmflutrisiko bewusst, denn Sturmfluten werden als Teil des Lebens an der Nordseeküste betrachtet. Die Anzahl derer, die in der Vergangenheit persönliche Erfahrungen durch Sturmflutereignisse machen konnten, ist relativ hoch. Der Großteil der Befragten sieht in St. Peter-Ording nur ein geringes Risiko einer katastrophalen Sturmflut.	Das Bewusstsein und die Erfahrungen bezüglich des Risikos leichter Hochwasserereignisse sind im betroffenen Gebiet Lübecks sehr stark ausgeprägt. Das ist auf die periodischen Überflutungen in der Vergangenheit zurückzuführen. Die Möglichkeit eines extremen Hochwassers beeinflusst die Risikoeinschätzung aber nur marginal.
Schutzstatus	Die institutionellen Maßnahmen zum Schutz vor Sturmfluten bzw. für den Ereignisfall werden zu ähnlichen Anteilen als ausreichend bzw. nicht ausreichend bewertet. Nur ein geringer Teil der Befragten weiß, welche individuellen und behördlichen Strategien und Maßnahmen im Katastrophenfall erforderlich sind. Verbesserungsmöglichkeiten werden sowohl im Küstenschutz als auch in der Information der Bevölkerung und verschiedenen Maßnahmen zur Katastrophenbewältigung gesehen.	Küstenschutzmaßnahmen werden von ca. zwei Drittel der Befragten als sinnvoll bewertet, allerdings nur dann, wenn der Charakter der Wohngegend dabei nicht verloren geht. Der Großteil der Betroffenen ist auf leichte Hochwasser relativ gut vorbereitet. Schwerere Ereignisse werden aber in der individuellen Prävention kaum berücksichtigt.
Zukünftiger Umgang mit dem Risiko	Ein möglicher Klimawandel wird im Küstenraum zum großen Teil als zusätzliche Bedrohung angesehen. Mehr als zwei Drittel der Befragten würden aber zukünftig auch bei einem erhöhten Sturmflutrisiko in der Gemeinde St. Peter-Ording wohnen bleiben. Das vorhandene Wissensdefizit ist nach Meinung der Befragten auf einen Mangel an behördlichen Informationen bezüglich präventiver und reaktiver Maßnahmen zurückzuführen. Daher wird eine intensivere Informationspolitik gefordert.	Knapp ein Viertel der Befragten meinen, in den letzten Dekaden eine Zunahme von Hochwasserereignissen beobachtet zu haben. Unter dem Eindruck eines aktuellen Überflutungserignisses und unter dem Aspekt einer möglichen zukünftigen Häufung von Hochwasserereignissen planen aber nur ca. ein Drittel aller Befragten einen veränderten Umgang mit dem Überflutungsrisiko.

Tab. 3: Risikobewertung im schleswig-holsteinischen Küstenraum - St. Peter-Ording und Lübeck (Quelle: nach Markau, 2003)

Vergleicht man die Ergebnisse der Einwohnerbefragung in St. Peter-Ording und in Lübeck, so zeigen sich insbesondere aufgrund der differenten Rahmenbedingungen deutliche Unterschiede in der Bewertung des Sturmflutrisikos an der Nord- und Ostseeküste:

An der *Nordseeküste* wehren sich die Menschen seit 1000 Jahren mit umfangreichen Küstenschutzmaßnahmen gegen die periodisch auftretenden Sturmfluten. Die heutige Küstenlinie ist im Wesentlichen das Ergebnis solcher Extremereignisse und der anthropogenen Bemühungen, sich gegen diese zu schützen und dem Meer Land abzugewinnen. Zahlreiche katastrophale Sturmfluten sind historisch überliefert und die letzten verheerenden Ereignisse der Jahre 1962 und 1976 sind den Küstenbewohnern noch in guter Erinnerung. Somit haben sich die Menschen an der Westküste Schleswig-Holsteins an das Leben hinter dem Deich gewöhnt, denn Sturmfluten gehören zum Leben an der Westküste dazu. Obwohl sich die Bevölkerung der ständigen Bedrohung bewusst ist, bedingt das historisch gewachsene Vertrauen in den Küstenschutz die Wahrnehmung eines relativ hohen Sicherheitsstatus. Um diesen zu erhalten, besteht seitens der Küstenbewohner die kompromisslose Forderung nach einem Ausbau bzw. einer Erhaltung der bestehenden Küstenschutzmaßnahmen. Doch wegen des hohen Schutzstatus an der Westküste, ist ein Großteil der Bevölkerung nur unzureichend auf ein mög-

³ COMRISK = Common strategies to reduce the risk of storm floods in coastal lowlands. Subproject 3: Public perception of coastal flood defence and participation in coastal flood defence planning, gefördert von der EU und dem Innenministerium Schleswig-Holstein.

liches Überflutungsereignis vorbereitet (*Deicheffekt*). Insbesondere eine Verbesserung des Wissens um mögliche präventive bzw. reaktive Maßnahmen könnte im Ereignisfall mögliche Schäden - auch an Personen - minimieren. Hierzu ist eine veränderte Informationspolitik seitens der Kommunen und Behörden notwendig. Diese wird von den Einwohnern in St. Peter-Ording auch explizit gefordert.

An der *Ostseeküste* hingegen führt die geringere Eintrittswahrscheinlichkeit extremer Ereignisse dazu, dass leichte Überschwemmungen das mentale Bild der Ostsee als Gefahrenquelle prägen. Lediglich in wenigen, periodisch überfluteten Teilräumen besteht hinsichtlich des Sturmflutrisikos ein ausgeprägtes Bewusstsein. Aber auch in diesen Teilräumen wird das Risiko lediglich auf der Basis der erfahrenen leichten Ereignisse bewertet, so dass die Vorsorgemaßnahmen nur unzureichend an ein Extremereignis angepasst sind. Darüber hinaus bestehen in weiten Räumen, die in der Vergangenheit nur sehr selten von Überflutungen betroffen waren, kaum Maßnahmen zum Schutz gegen den Einfluss des Meeres. Hier bestimmen insbesondere natürliche Strukturen, wie z.B. historisch gewachsene Strandwälle und Dünen, das Bild des Küstenschutzes. Wo diese aber fehlen, nämlich in den urbanen Zentren, die alleamt nicht hochwassersicher angelegt wurden, ist die Vulnerabilität gegenüber einem (wenn auch seltenen) Extremhochwasser besonders hoch. Außerdem ist hier vielfach auch eine gewisse Sorglosigkeit im Umgang mit dem Sturmflutrisiko zu konstatieren. Diese kommt z.B. dadurch zum Ausdruck, dass auch heute noch vielerorts in unmittelbarer Nähe zur Ostsee neue Gebäude ohne jegliche Schutzmaßnahmen errichtet werden.

5.2 Partizipation der Bevölkerung

Die Wertvorstellungen und Meinungen der Bevölkerung sollten zukünftig auch im Rahmen des Risikomanagements im Küstenraum Berücksichtigung finden. Die prinzipiellen und idealer Weise zu erwartenden Vorteile eines solchen partizipativen Ansatzes sind offensichtlich: die Bevölkerung greift gestaltend in die Entwicklung ihres Umfeldes ein und der Politikverdrossenheit wird durch das Erfahren demokratischer Verhaltensweisen und die aktive Integration in das Sozialsystem entgegengewirkt. Dieses begünstigt einen *Wiederaufbau* des Vertrauensverhältnisses zwischen Gesellschaft und Staat und bewegt die Beteiligten möglicherweise zu einem dauerhaften gesellschaftspolitischen Engagement. Außerdem kann sich die Partizipation positiv auf die Planungsqualität auswirken, da diese sich dem kritischen Auge der Öffentlichkeit stellen muss und auf der Basis lokalspezifischen Wissens und Erfahrungen Fehler identifiziert werden können. Eine korrekte und faire Beteiligung ermöglicht zudem eine Konsensbildung und die Identifikation der Beteiligten mit den Planungsergebnissen. Die Verantwortung wird so auf eine breite Basis verteilt, was Schuldzuschreibungen bei negativen Auswirkungen der Planungen verhindert. Ein wichtiger Aspekt der Partizipation ist auch der Wissensgewinn aller Akteure. So können sowohl die Planer und Politiker als auch die Bevölkerung wichtige Erkenntnisse über lokale Zusammenhänge erschließen und sich über ihre gesellschaftliche Verantwortung bewusst werden (vgl. MARKAU, 2003).

Neben den zahlreichen Vorteilen partizipativer Planungen sind hiermit aber auch Schwierigkeiten und Probleme verbunden. So blockieren unflexible Planer und Verwaltungsangehörige immer wieder eine korrekte Beteiligung z.B. aus Konfliktangst, Mangel an Interesse, Angst vor Mehraufwand und organisatorischer und fachlicher Überforderung. Zudem führen die fehlenden bzw. negativen Erfahrungen der Bürger oft zu resignativer Selbstbegrenzung und Apathie und nicht zuletzt erschweren verfahrenstechnische Probleme immer wieder den verstärkten Einsatz partizipativer Instrumente auch im Risikomanagement von Naturgefahren.

Auch die schleswig-holsteinische Küstenschutzverwaltung sieht in der Partizipation der Öffentlichkeit einen wichtigen Aspekt nachhaltigen und integrativen Verwaltungshandelns. So ist z.B. ein wesentlicher Bestandteil der Beteiligung der Öffentlichkeit „...deren umfassende Information über die Planungen im Küstenschutz. Das Informieren dient auch dazu, die Bevölkerung über die Bedeutung des Küstenschutzes - als eine wesentliche Voraussetzung für eine nachhaltige Nutzung der Küstenniede-

rungen - aufzuklären. Weiterhin soll die Information das Risikobewusstsein der Bewohner der Küstenniederungen stärken.“ (MLR, 2001, S. 44) Mit diesem Ansatz und zahlreichen Investitionen in die Erforschung der spezifischen Sturmflutgefahren kommt das Innenministerium Schleswig-Holsteins als oberste Küstenschutzbehörde auch den skizzierten Forderungen der betroffenen Bevölkerung nach einer verbesserten Informationsvermittlung nach.

So wurde von Januar bis Juli 2000 für die Küstenniederung der Ostseegemeinden Timmendorfer Strand und Scharbeutz in einer Pilotstudie eine sog. *Sensitivitätsanalyse* durchgeführt (s. dazu auch HOFSTEDER in diesem Band). Ziel war es hierbei qualitative Aussagen über die möglichen Folgen verschiedener Küstenschutzmaßnahmen für das System *Küstenniederung* zu treffen. Die Sensitivitätsanalyse ist hierbei eine stark integrative Methode, da sie in der Systemmodellierung alle Lebensbereiche sowie deren Wechselwirkungen berücksichtigt und allen Betroffenen vor Ort die Teilnahme am Diskussions- und Arbeitsprozess ermöglicht (vgl. KAUL & REINS SYSTEM GBR, 2000). Das Verfahren hat gezeigt, dass die Bevölkerung großes Interesse an einer aktiven Mitbestimmung im Planungsprozess des Küstenschutzes hat. Das hohe Interesse der Bevölkerung resultiert vermutlich aus den erwarteten negativen Effekten von Küstenschutzmaßnahmen in den Niederungsgebieten der Gemeinden für den wichtigen Wirtschaftsfaktor Tourismus. Da der Verfahrensablauf geprägt war von konstruktiver Kooperation aller Beteiligten und darüber hinaus die Empfehlungen der Arbeitsgruppe in die weitere Planung übernommen wurden, ist das betrachtete Verfahren abschließend als erfolgreiches Pilotprojekt einer aktiven Partizipation zu werten. Es wäre wünschenswert, zukünftig solche Verfahren bei der konkreten Maßnahmenplanung zu etablieren.

6 Fazit

Gegenwärtig steht der Risikoforschung im Küstenraum ein breites Spektrum an Methoden und Techniken zur Analyse des Risikos von Küstenüberflutungen zur Verfügung. Es fehlen aber vielfach noch standardisierte und praxistaugliche Verfahren insbesondere für die mikroskalige Betrachtung der negativen Folgen von extremen Sturmflutereignissen. Die erheblichen Differenzen, die ein Vergleich von Untersuchungen auf unterschiedlichen Maßstabsebenen aufzeigt, unterstützt die Forderung nach mikroskaligen Analyseverfahren, die für die konkrete Maßnahmenplanung z.B. im Küstenschutz geeignet sind. Zudem sind Techniken zu entwickeln, mit denen die Ergebnisse der Risikoanalyse zukünftig einer breiten Öffentlichkeit allgemeinverständlich präsentiert werden können. Die wichtigste Zukunftsaufgabe obliegt aber den behördlichen Institutionen: So ist die Öffentlichkeit zukünftig verstärkt am Risikomanagement- und Planungsprozess zu beteiligen. Nur über eine Demokratisierung der Entscheidungsprozesse kann das Wissenspotenzial der Bevölkerung in das Management integriert, die individuelle Eigenverantwortung in der Öffentlichkeit gestärkt und die Akzeptanz von Maßnahmen erlangt werden. Grundvoraussetzung hierfür ist eine adäquate Risikokommunikation und die Bereitschaft aller Akteure zur Kooperation und Konsensfindung. Der Risikobewertung mit Methoden der empirischen Sozialforschung wird in diesem Zusammenhang zukünftig eine besondere Bedeutung zukommen.

7 Literatur

DKKV: Hochwasservorsorge in Deutschland. Lernen aus der Katastrophe 2002 im Elbegebiet. Schriftenreihe des DKKV, Bd. 29, Bonn, 2003.

EBENHÖH, W./ STERR, H./ SIMMERING, F.: Potentielle Gefährdung und Vulnerabilität der deutschen Nord- und Ostseeküste bei fortschreitendem Klimawandel - Projektbericht, Oldenburg, 1997.

- HAMANN, M./ KLUG, H.: Wertermittlung für die potentiell sturmflutgefährdeten Gebiete an den Küsten Schleswig-Holsteins. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für ländliche Räume, Landwirtschaft, Ernährung und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein - unveröffentlichter Endbericht, Büsum, 1998.
- HOFSTEDDE, J.: Timmendorfer Strand und Scharbeutz: Zwei Ostseegemeinden schützen sich vor Klimaänderungen, in diesem Band.
- IPCC: Global Climate Change and the Rising Challenge of the Sea. Report of the Coastal Zone Management Subgroup, Margarita Island, 1992.
- IPCC: Third Assessment Report, Cambridge, 2001.
- KAISER, G./ REESE, S./ STERR, H./ MARKAU, H.-J.: COMRISK – Common strategies to reduce the risk of storm floods in coastal lowlands. Subproject 3: Public perception of coastal flood defence and participation in coastal flood defence planning, final report, Kiel, 2004.
- KAUL & REINS SYSTEM GBR: Abschlußbericht der Sensitivitätsanalyse zu einem integrierten Küstenschutzkonzept für die Küstenniederung Timmendorfer Strand/ Scharbeutz, Kiel, 2000.
- MARKAU, H.-J.: Risikobetrachtung von Naturgefahren. Analyse, Bewertung und Management des Risikos von Naturgefahren am Beispiel der sturmflutgefährdeten Küstenniederungen Schleswig-Holsteins, Berichte des Forschungs- und Technologiezentrums Westküste, Bd. 31, 2003.
- MERTSCH, S.: Risikomanagement als Konzept zur Risikominderung am Beispiel der überflutungsgefährdeten Räume Schleswig-Holsteins. Diplomarbeit im Fach Geographie an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, unveröffentlicht, Bonn, 2003.
- MLR: Generalplan Küstenschutz - Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein 2001, Kiel, 2001.
- NOWITZKI, K.-D.: Konzepte zur Risikoabschätzung und Bewertung. In: BECHMANN, G.: Risiko und Gesellschaft. Grundlagen und Ergebnisse interdisziplinärer Risikoforschung, Opladen, 1997, S. 125-165.
- REESE, S.: Die Vulnerabilität des schleswig-holsteinischen Küstenraumes durch Sturmfluten – Fallstudien von der Nord- und Ostseeküste, Berichte des Forschungs- und Technologiezentrums Westküste, Bd. 30, 2003.
- REESE, S./ MARKAU, H.-J./ STERR, H.: Wertermittlung hochwassergefährdeter Gebiete in den Gemeinden Scharbeutz und Timmendorfer Strand. Untersuchung im Auftrag der Gemeinden Scharbeutz und Timmendorfer Strand, unveröffentlichter Endbericht, Büsum, 2001.
- REESE, S./ MARKAU, H.-J./ STERR, H.: MERK - Mikroskalige Evaluation der Risiken in überflutungsgefährdeten Küstenniederungen. Forschungsprojekt im Auftrag des BMBF und MLR S-H - unveröffentlichter Endbericht, Büsum, 2003.

Adresse

Prof. Dr. Horst Sterr
Dr. Hans-Jörg Markau
Dr. Stefan Reese
Geographisches Institut CAU Kiel
Ludewig-Meyn-Str. 14
24118 Kiel
Germany
E-Mail: sterr@geographie.uni-kiel.de
markau@geographie.uni-kiel.de
reese@geographie.uni-kiel.de

Klimawandel: die Vulnerabilität einer Küstenregion

Bastian Schuchardt¹ und Michael Schirmer²

¹BioConsult Schuchardt & Scholle GbR

²Universität Bremen FB 2; Abt. Aquatische Ökologie

Summary

Climate change will establish itself within the Lower Weser Region by rising sea-level, temperature and CO₂-concentration and changes in precipitation and winds. Apart from the continuing uncertainty of the degree of change the possible impacts have to be investigated to allow precautionary action. Analysing regional vulnerability demands an analysis of the interaction of these climate parameters with the natural and the social systems and their adaptation capacities. Such a comprehensive analysis has been done within the interdisciplinary research project KLIMU shared by 8 subprojects covering natural, engineering and social sciences.

The results revealed that the effects provoked by the selected climate scenario within the Lower Weser Region can altogether be assessed as moderate and controllable due to historically grown infrastructure and utilisation. A demand for action, however, arises under the defined conditions predominantly for the scope of coastal protection. The results underline that a comprehensive assessment of the vulnerability of a region can successfully only be performed within integrative studies including socio-economic aspects.

Zusammenfassung

Der globale Klimawandel wird sich auch in der Unterweserregion nicht nur mit steigendem Meeresspiegel, sondern auch mit steigenden Temperaturen, veränderter Niederschlags- und Windverteilung sowie erhöhten CO₂-Konzentrationen manifestieren. Trotz aller Unsicherheiten über Art und Ausmaß dieser Veränderungen müssen die möglichen Wirkungen erforscht werden, um vorsorgendes Handeln zu ermöglichen. Dabei erfordert die Analyse der Vulnerabilität einer Region die Analyse des Zusammenwirkens aller Klimaparameter sowohl auf das natürliche wie auch auf das gesellschaftliche System sowie deren Adaptationskapazität. Eine solche umfassende Analyse ist im Rahmen des interdisziplinären Forschungsvorhabens KLIMU durch die Beteiligung von 8 Teilprojekten aus den Natur-, Ingenieurs- und Sozialwissenschaften erfolgt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Auswirkungen des betrachteten Klimaszenarios für die Unterweserregion als insgesamt relativ schwach und, aufgrund der historisch entwickelten Strukturen und Nutzungsformen, als beherrschbar bewertet werden können. Handlungsbedarf entsteht unter den hier angenommenen Klimaänderungsbedingungen v.a. im Bereich Küstenschutz. Es wird deutlich, dass die Vulnerabilität einer Region nur durch integrative Studien unter Einschluss sozio-ökonomischer Aspekte umfassend beurteilt werden kann.

1 Einleitung

Da sich langfristige anthropogene Klimaänderungen voraussichtlich nur begrenzt abwenden lassen werden, gewinnen neben der eigentlichen Klimaforschung Untersuchungen zu den Auswirkungen und den möglicherweise erforderlichen Vorsorgemaßnahmen zunehmend an Bedeutung (BMBF 2003). Es ist deshalb aktuell Aufgabe des Bereichs Klimawirkungsforschung innerhalb von DEKLIM, dem Deutschen Klimaforschungsprogramm des BMBF, die Auswirkungen von Klimaänderungen (Klima-

schwankungen und langfristige Veränderungen) auf ausgewählte natürliche und sozioökonomische Systeme und ihre Wechselbeziehungen zu untersuchen. Dabei geht es nicht nur darum, die Sensitivität dieser Systeme gegenüber einer Klimaänderung zu bestimmen, sondern ganz wesentlich auch darum, ihre Adaptionkapazität zu betrachten, um so frühzeitig Wissen über erforderliche und/oder mögliche Reaktionsmaßnahmen bereitzustellen und die Grenzen zu bestimmen, oberhalb derer diese Kapazität erschöpft ist.

Dies erfordert die synoptische Betrachtung der Auswirkungen und Adaptionkapazitäten der natürlichen und der sozioökonomischen Systeme. Deshalb können diese Untersuchungen nur von interdisziplinären Gruppen durchgeführt werden. Innerhalb von DEKLIM C werden daher nur interdisziplinäre Projektverbünde gefördert, die bereits in der Planungsphase ihre sehr unterschiedlichen Methoden und Modelle so zwischen den verschiedenen Teilprojekten aufeinander abgestimmt haben, dass eine synoptische Analyse der jeweiligen natürlichen und sozioökonomischen Systeme innerhalb jedes Verbundes möglich ist.

Quasi in Vorbereitung des Bereichs Klimawirkungsforschung innerhalb von DEKLIM war in den Jahren davor von BMBF und den norddeutschen Küstenländern die Förderaktivität „Klimaänderung und Küste“ mit dem Ziel aufgelegt worden, vorsorgeorientiert die möglichen Folgen des sich immer klarer abzeichnenden Klimawandels für den Küstenraum zu analysieren. Neben sektoralen Projekten sind auch zwei interdisziplinäre Fallstudien gefördert worden, die die möglichen Konsequenzen einer Klimaänderung für die Insel Sylt (DASCHKEIT/SCHOTTES 2002) und die Unterweserregion (Verbundvorhaben KLIMU; SCHUCHARDT/SCHIRMER 2005) abzuschätzen hatten.

Ziel und Aufgabe von KLIMU

Übergeordnetes Ziel der „Fallstudie Klimaänderung und Unterweserregion“ (KLIMU) war es, als Grundlage für einen gesellschaftlichen Diskurs interdisziplinär die Sensitivität der hydrologischen, ökologischen und sozio-ökonomischen Strukturen des „Natur-, Lebens- und Wirtschaftsraumes“ Unterweserregion gegenüber einer möglichen Klimaänderung zu untersuchen und auf dieser Grundlage verschiedene Handlungsoptionen zu entwickeln, also die Analyse der Vulnerabilität der Unterweserregion gegenüber einem Klimawandel.

Vulnerabilität

Vulnerabilität steht für ein Konzept, zu dem eine Vielzahl unterschiedlicher Definitionen vorliegen (STERR et al. 2000). Der Begriff wird sowohl sehr speziell als „möglicher Schaden bei Eintritt eines Extremereignisses“ als auch (in jüngerer Zeit vermehrt und v.a. auch im sozialwissenschaftlichen Bereich) in sehr viel breiterer Weise als integrativer Ansatz genutzt, der

- auf die querschnittsorientierte Analyse der Auswirkungen von zukünftigen Veränderungen einschließlich der Betrachtung der Adaptionkapazität und
- auf die Einbindung von Stakeholdern bei dieser Analyse

zielt und dabei

- die natürlichen (biophysical vulnerability), ökonomischen und sozialen Dimensionen (social vulnerability) eines Problems und
- die Analyse von Risikoexposition und –bewältigung bzw. Adaptionkapazität

verbindet.

Wir folgen hier der aktuellen (gegenüber früheren Definitionen verbreiteten) Definition des IPCC (2002): “Vulnerability is the degree to which a system is susceptible to, or unable to cope with, adverse effects of climate change, including climate variability and extremes. Vulnerability is a function

of the character, magnitude, and rate of climate variation to which a system is exposed, its sensitivity, and its adaptive capacity" (IPCC-definition adaptive capacity: "the ability of a system to adjust to *climate change* (including *climate variability* and extremes) to moderate potential damages, to take advantage of opportunities, or to cope with the consequences").

Wesentliche Arbeitsschritte sind die Analyse und die Bewertung der Vulnerabilität. Bedeutsam ist im Kontext Klimawandel dabei nicht nur die parallele Analyse von biophysikalischer und sozialer Vulnerabilität, sondern auch von aktueller und zukünftiger (s. BERKHOUT et al. 2004). Aufgabe einer solchen integrativen Vulnerabilitätsanalyse soll die vorsorgende Feststellung von Handlungsbedarf und –fähigkeit sein; sie kann keine detaillierten Analysen für ein konkretes Risikomanagement ersetzen, sehr wohl aber eine Vorarbeit dazu darstellen. Im Folgenden sollen, aufbauend auf die vorliegende Darstellung der Gesamtergebnisse des Verbundvorhabens (SCHUCHARDT/SCHIRMER 2005), ausgewählte Ergebnisse vor dem Hintergrund des skizzierten Vulnerabilitätskonzepts als integrativem Ansatz dargestellt und eine Gesamteinschätzung versucht werden.

2 Material und Methoden

Projektansatz

Die komplexe Aufgabe des Vorhabens war nur durch die Beteiligung sowohl ingenieur- und naturwissenschaftlicher als auch sozialwissenschaftlicher Disziplinen mit ihrer jeweiligen Methodik zu bearbeiten und erforderte damit zwingend einen explizit interdisziplinären Ansatz, der vor allem die Wechselwirkungen zwischen Naturraum und Gesellschaft abbilden musste. Die Fallstudie KLIMU arbeitete wesentlich mit Szenarien, in denen sowohl Art und Ausmaß der Klimaänderung definiert als auch verschiedene „Zukunftsbilder“ als möglich erscheinende gesellschaftliche „Zukünfte“ konstruiert wurden. Dieser zweite Schritt diente methodisch v.a. der Berücksichtigung des Aspekts, dass eine Klimaänderung nicht auf den gegenwärtigen Zustand von Natur und Gesellschaft wirken wird, sondern auf einen in unbekannter Weise veränderten.

Um das Projektziel zu erreichen, war zusätzlich zu den sektoralen Ergebnissen auch ein querschnittsorientiertes Verständnis der Zusammenhänge, Prozesse und Trends im Untersuchungsgebiet essentiell. Dazu wurden zentrale Relationsgeflechte identifiziert, die die für den Projektzusammenhang in der Region wesentlichen Wechselwirkungen zwischen Naturraum und Gesellschaft abbilden. Der natur- und ingenieurwissenschaftliche Teil des Verbundvorhabens wurde im Wesentlichen auf der Grundlage vorhandener Daten und Informationen bearbeitet; nur punktuell wurden Messungen und Kartierungen durchgeführt. Für die sozialwissenschaftlichen Teilprojekte waren Interviews und Expertengespräche wesentliche empirische Grundlage.

Untersuchungsgebiet

Zentrales Untersuchungsgebiet war das innere Weser-Ästuar zwischen Bremen und Bremerhaven und seine Marsch. Die einzelnen TP mussten z. T. auch angrenzende Gebiete bzw. ganze Einzugsgebiete hinzunehmen, um die das Systemverhalten steuernden Parameter beschreiben zu können.

Projektstruktur

Es waren 8 Teilprojekten (TP) an KLIMU beteiligt: Das TP Unterweser-Simulation (GKSS Forschungszentrum Geesthacht) hat Hydrodynamik, Stofftransport und Gewässergüte der Unterweser (UW), das TP Grundwasser (Universität Hannover) das großräumige Verhalten des Grundwasserlei-

ters und der Bodenfeuchte, das TP Wasserwirtschaft (TU Braunschweig) Niederschlag, Verdunstung und Abfluss von Teileinzugsgebieten sowie das Wassermanagement in den Marschen analysiert. Aufgabe des TP Küstenschutz (Franzius-Institut, Universität Hannover) war es, die Versagenswahrscheinlichkeiten der Küstenschutzsysteme bei veränderten Randbedingungen zu analysieren. Dabei waren Output-Parameter des einen TP jeweils Input-Parameter der anderen, so dass ein intensiver Austausch essentiell war. Das TP Ökologischer Komplex (Universität Bremen, Biologie) hat auf der Ebene der Biotoptypen die ökologische Situation in der Unterweser, dem Vorland und der Marsch bearbeitet. Das sozioökonomische Teilsystem wurde durch 2 TP bearbeitet. Die TP Flächenbeanspruchung und Regionalplanung (Universität Bremen, Geographie) und Ökonomische Folgen (Universität Bremen, Ökonomie) untersuchten auf der Grundlage von Interviews und unter Nutzung eines dazu entwickelten regionalen ökonometrischen Modells die möglichen sozialen und ökonomischen Folgen des Klimawandels. Das TP Integrative Analyse (Universität Bremen, Ökologie; BioConsult Schuchardt & Scholle GbR, Bremen) hatte den interdisziplinären Forschungsprozess zu strukturieren sowie die sektoralen Ergebnisse der verschiedenen Arbeitsschritte während der gesamten Projektlaufzeit nach einheitlichen Kriterien zusammenzuführen.

Klimaszenario

Auf der Grundlage der IPCC-Annahmen und einer Regionalisierung der Ergebnisse eines globalen Klimamodells ist ein Klimaszenario für 2050 definiert worden (SCHIRMER 2005), das nicht nur eine Erhöhung des Meeresspiegels, sondern die Veränderung einer Vielzahl von Parametern einschließt:

- Mittlerer Meeresspiegelanstieg: +55 cm (15 cm säkular, 40 cm anthropogen)
- Zunahme des Tidehubs in Bremerhaven + 30 cm (MTHW + 15 cm; MTNW –15 cm)
- Temperatur bodennah: +2,7 Grad Celsius
- Niederschlag: +9,8 % (März-Mai + 22,1 %; Juni-Aug. –6,0 %)
- Wind: + 3,8 % (Sept.-Nov. +6,8 %; Juni-August –4,3 %)
- CO₂: Verdoppelung

Um zudem die interannuelle Variabilität der Klima-Parameter zu berücksichtigen, wurde das Klimaszenario sowohl auf die Daten von 1991 (feuchtes Jahr) als auch auf die von 1994 (trockenes Jahr) projiziert.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Analyse der Auswirkungen des Klimaszenarios

Auf der Grundlage einer Charakterisierung der speziellen naturräumlichen Bedingungen des Unterweserraumes und seiner Nutzung ließen sich drei regionale Relationsgeflechte als Subsysteme identifizieren, in denen sich die Interdependenzen zwischen Naturraum und Gesellschaft jeweils spezifisch ausprägen. In dem Geflecht „Unterweser“ wurden die Wechselwirkungen zwischen der naturräumlichen Ausprägung und der Nutzung der Unterweser als Schifffahrtsstraße und Vorfluter und die ökonomischen und ökologischen Klimafolgen zusammengefasst. Als Geflecht „Küstenschutz“ wurden die Wechselwirkungen zwischen Naturraum, Schadensrisiko, Art und Ausprägung der Küstenschutzanlagen sowie die dazu erforderliche soziale Organisation und Finanzierung zusammengeführt. Ein drittes Geflecht zentrierte auf die Landwirtschaft. Diese hat ökonomisch zwar an Bedeutung verloren, prägt aber den Naturraum flächenhaft und ist in besonderer Weise von ihm abhängig. Die Konsequenzen

des Einwirkens des Klimaszenarios auf die **Status quo-Situation** werden im Folgenden für diese drei Relationsgeflechte dargestellt (s. SCHUCHARDT/SCHIRMER 2005b).

Relationsgeflecht Unterweser

Hydrographie: Der im Klimaszenario formulierte Meeresspiegelanstieg von MTHW +70cm in der Außenweser setzt sich bis zum Tidewehr Hemelingen mit einer leichten Reduzierung auf +64cm relativ ungehindert fort; der Anstieg des NW um +40cm wirkt bis Bremen unverändert weiter. In den Nebenflüssen mit längerer Fließstrecke reduziert sich die Wasserstandserhöhung stromaufwärts. Das Oberwasser aus Mittelweser und Nebenflüssen folgt der Veränderung des Niederschlags nicht direkt, sondern saisonal deutlich verzögert. Es kommt zu einer mäßigen Erhöhung der hohen Frühjahrsabflüsse um den Faktor 1,3, während sich die niedrigen sommerlichen Oberwässer auf den Faktor 0,9 reduzieren. Die Verweilzeiten des Weserwassers im Ästuar verlängern sich besonders für geringe Oberwässer, wie sie v.a. im Sommer auftreten, um bis zu 30 %.

Wasserstände und Bodenfeuchte im Vorland: Die Veränderungen der hydrographischen Situation in der Unterweser wirken sich auch auf die Wasserstände und die Bodenfeuchte des genutzten und des ungenutzten Vorlandes aus. In den nicht sommerbedeichten Vorländern wird es etwas feuchter; für ungünstige Fälle müsste die landwirtschaftliche Nutzung eingestellt werden. In den Sommerpoldern, die über freien Sielzug entwässern, kann die Entwässerung voraussichtlich den veränderten Anforderungen angepasst werden (HOFFMANN et al. 2005).

Gewässergüte der Unterweser: Die Temperatur des Weserwassers folgt relativ direkt der Temperatur der Luft und steigt deshalb wie im Klimaszenario für die Luft angenommen um im Mittel 2,7° C. an. Das charakteristische Unterweser-Längsprofil der Temperatur bleibt erhalten. Durch die Intensivierung der Sauerstoffzehrung werden die örtlichen Sauerstoffdefizite um 1-2 mg/l verstärkt.

Biotoptypen: Art und Ausdehnung der Biotoptypen in und an der Unterweser verändern sich bei Vernachlässigung morphodynamischer Anpassungsprozesse v.a. als Folge des Meeresspiegelanstiegs deutlich. Der Flächenanteil der Flachwasserzonen vergrößert sich um ca. 29%, der der Watten um ca. 55%. Die Röhrichtfläche vergrößert sich um ca. 58%, v.a. auf Kosten des genutzten Grünlandes. Die Verlagerung der in ihrer Lage natürlicherweise sehr variablen Brackwasserzone um im Mittel ca. 2 km stromauf führt zu einer gleichsinnigen Verschiebung der an die entsprechenden Salinitäten angepassten Biotoptypen.

Biozönose: Zu Veränderungen in der Biozönose kommt es zum einen v.a. als Folge des Temperaturanstiegs, zum anderen durch die o.g. Verschiebungen der Biotoptypenausstattung. Der CO₂-Anstieg verändert das Artenspektrum vermutlich kaum, er steigert allerdings voraussichtlich die Primärproduktion um bis zu 25%. Zu Verschiebungen im Artenspektrum (hier wurde v.a. die Avifauna als Indikatorgruppe genutzt) wird v.a. die deutliche Zunahme der Röhrichtflächen und die Abnahme der Grünlandflächen auf dem tidebeeinflussten Vorland und die Etablierung einer feuchteren Grünland-Gesellschaft in den Sommerpoldern führen: eine Zunahme röhrichtbewohnender Arten und die Abnahme von Wiesenbrütern wird eine Folge sein. Vor allem bei den Insekten wird sich der derzeit bereits vorhandene Trend der Einwanderung thermophiler Arten verstärken.

Schifffahrt/Hafenwirtschaft: Die Auswirkungen eines steigenden Meeresspiegels werden von der Schifffahrt eher positiv beurteilt. Von der Hafenwirtschaft wird ein geringer bis mäßiger Bedarf für eine Anpassung von Betriebsabläufen und Anlagen bei einem Wasserspiegelanstieg gesehen (KNOGGE/ELSNER 2005).

Landwirtschaft: Etwa 30% der tideoffenen genutzten Vorländer werden im Klimaszenario regelmäßig überflutet und fallen für die landwirtschaftliche Nutzung aus. Aber auch auf den übrigen nicht durch Sommerdeiche geschützten Flächen wird eine Nutzung nur eingeschränkt möglich sein. In den

Sommerpoldern dagegen ist eine landwirtschaftliche Nutzung vermutlich weiterhin möglich, allerdings unter erschwerten Bedingungen. Damit bleibt, wie insgesamt bei der Landwirtschaft, die tatsächliche zukünftige Nutzung stark von den politisch-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen abhängig.

Energieerzeugung: Eine Reihe von Kraftwerken und Industriebetrieben nutzt das Wasser der Unterweser zu Kühlzwecken. Die Temperaturerhöhung schränkt die Nutzbarkeit des Weserwassers ein, da Grenzwerte zur Wassertemperatur behördlich festgelegt sind.

Instrumente: Die für das Relationsgeflecht Unterweser absehbaren primären Klimawirkungen erfordern keine unmittelbaren Konsequenzen für die Organisation des gesellschaftlichen Instrumente wie Wasserwirtschaft, Raumplanung etc. Eventuell erforderliche Maßnahmen z. B. im Bereich der Gewässerreinigung, können vermutlich mit dem vorhandenen Instrumentarium geleistet werden.

Relationsgeflecht Küstenschutz

Hydrographie: Die Klimawirkungen auf den Naturraum innerhalb des Relationsgeflechts Küstenschutz vermitteln sich v.a. über den Meeresspiegelanstieg und die Zunahme der Windgeschwindigkeiten (s.o.).

Biotoptypen: Die Klimawirkungen auf die Biotoptypen des Vorlandes sind im RG Unterweser nur von nachgeordneter Bedeutung, da im inneren Ästuar die Funktion des Vorlandes innerhalb des Küstenschutzsystems vergleichsweise gering ist.

Technischer Küstenschutz: Die Ergebnisse der probabilistischen Analyse zeigen (ZIMMERMANN ET AL. 2005), dass die Wiederkehrintervalle einer Wellenüberlaufsituation (hier definiert als Versagen) im Klimaszenario am linken (westlichen) Weserufer bei deutlichen kleinräumigen Unterschieden im Mittel von derzeit ca. 1000 Jahren auf ca. 200 Jahre im inneren und 800 Jahre im seewärtigen Abschnitt der Unterweser sinken. Am rechten Weserufer werden die Wiederkehrintervalle von im Mittel 3000 Jahre auf ca. 800 Jahre im seewärtigen Bereich der Unterweser und ca. 800 - 1000 Jahre im inneren Abschnitt reduziert.

Probabilistische Ansätze stellen bisher im Untersuchungsgebiet nicht die Grundlage für die Festsetzung von Bestickhöhen der Deiche dar. Andernorts werden Versagenswahrscheinlichkeiten von 1:1.000 bis 1:10.000 als tolerierbar angesetzt. Vor diesem Hintergrund, aber auch bei Sicherstellung der derzeitigen Versagenswahrscheinlichkeiten, sind Anpassungen der Küstenschutzsysteme als Reaktion auf das Klimaszenario erforderlich (s.u.).

Sozioökonomische Aspekte: Auswirkungen auf den sozioökonomische Sektor entstehen bei dem hier gewählten methodischen Ansatz, der nicht die Wirkungen von Deichbrüchen analysiert sondern davon ausgeht, dass das Küstenschutzsystem auch an einen beschleunigten Meeresspiegelanstieg angepasst wird, nicht. Hier zu betrachtende Auswirkungen entstehen deshalb erst durch die erforderlichen Anpassungsmaßnahmen des Küstenschutzsystems (s.u.).

Relationsgeflecht Landwirtschaft

Die Wirkungen des Klimaszenarios auf den Naturraum sind in der Kulturlandschaft Unterwesermarsch, die historisch ein komplexes System zur Steuerung der Wasserstände und der Bodenfeuchtigkeit entwickelt hat, stark vom gesellschaftlichen Umgang mit den Folgen und den jeweiligen Leitbildern (Zielen) geprägt. Für die Analyse der primären Klimawirkungen haben wir die Meliorationswasserstände binnendeichs konstant gehalten, soweit dies durch eine entsprechende Betriebsweise der Siele und Schöpfwerke in ihrer derzeitigen Ausstattung möglich ist.

Grundwasserhaushalt: Bei einer weitgehenden Beibehaltung der Meliorationswasserstände in den mit Pumpwerken ausgestatteten Sieleinzugsgebieten verringern sich die Grundwasserflurabstände nur

wenig (<20 cm), und mit nur sehr schwachen Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Nutzung. Die grundwasserbürtigen Abflüsse, die über die Siele abzuführen sind, erhöhen sich jedoch deutlich (s.u.). Die im Status quo vorhandene Versalzung des Hauptwasserleiters wird sich klimabedingt voraussichtlich nicht bzw. nur geringfügig ändern.

Bodenwasserhaushalt: Im ganz überwiegenden Teil des Untersuchungsgebietes, in dem sich die Flurabstände um <20cm verändern, bleibt die Bodenkundliche Feuchtestufe gleich oder sinkt um 1 (wird also trockner). Dies ist v.a. Folge der temperaturbedingt erhöhten Evapotranspiration.

Grabenwasserstände und Siele: Aufgrund des Ansteigens des Meeres-/Weserwasserspiegels, der vermehrten Niederschläge und des vermehrten Wasserandrangs aus der Geest erhöhen sich die Wassermengen, die aus der Marsch über das Grabensystem abzuführen sind (je nach Bilanzierungsraum um ca. 20 –65 %). Ein Einhalten der derzeitigen Meliorationswasserstände ist in allen mit Mündungsschöpfwerken ausgerüsteten Sieleinzugsgebieten durch verlängerte Betriebszeiten mit den vorhandenen Pumpenleistungen möglich. Die Pumpmengen werden sich im Mittel etwa verdoppeln (MANIAK et al. 2005).

Biototypen: Für den überwiegenden Teil der als Grünland genutzten Binnendeichsflächen ist bei Beibehaltung der Meliorationswasserständen nicht mit deutlichen Veränderungen der Biototypenausstattung zu rechnen. Der Anstieg der Jahresmitteltemperatur und besonders die höheren Wintertemperaturen werden das weitere Einwandern thermophiler Arten begünstigen. Auf ca. 6 % der Grünlandflächen muss im Klimaszenario mit Ertragseinbußen gerechnet werden, auf die u.U. mit veränderter Bewirtschaftung reagiert werden würde. Sowohl auf einigen Flussmarsch- als auch und auf einigen Brackmarschstandorten (ca. 10 % der Fläche des UG) können sich die Bedingungen für eine ackerbauliche Nutzung verbessern.

Wasserwirtschaft: Die Wasserwirtschaft ist neben dem Küstenschutz in der Kulturlandschaft Unterweserregion das zentrale Instrument zur Sicherung der Nutzbarkeit der Flächen. Die Klimawirkungen führen nicht zu grundsätzlich anderen Anforderungen an dieses Instrument.

Landwirtschaft: Die Ertragslage der Landwirtschaft wird sich bei gleichen ökonomischen Randbedingungen im Klimaszenario aus den o.g. Gründen eher verbessern. Nur kleinräumig ist mit Einschränkungen zu rechnen.

3.2 Analyse der derzeitigen Adaptionkapazität

Die Ergebnisse, die hier nicht im Detail dargestellt werden können (s. dazu SCHUCHARDT/SCHIRMER 2005) zeigen, dass die Wirkungen des Klimaszenarios in der Gesamtbetrachtung als insgesamt relativ schwach und beherrschbar bewertet werden können. Wesentliche Ursache ist die hohe Anpassungskapazität der in der Unterweser-Region vorhandenen, z.T. historisch gewachsenen Strukturen an die sich durch den Klimawandel voraussichtlich verändernden Umweltbedingungen. Dies soll im Folgenden für verschiedene Beispiele illustriert werden.

Wasserwirtschaft: Die Analyse zeigt, dass die derzeitigen Meliorationswasserstände im Klimaszenario trotz der erhöhten Abflüsse in allen mit Mündungsschöpfwerken ausgerüsteten Sieleinzugsgebieten durch verlängerte Betriebszeiten auch mit den derzeit vorhandenen Pumpenleistungen möglich ist; im Sommer ist mit deutlich trockneren Bedingungen zu rechnen. Durch die Nutzung der vorhandenen Zuwässerungseinrichtungen können Trockenschäden für die Landwirtschaft jedoch voraussichtlich weitgehend vermieden werden und sind nur für höher liegende Bereiche zu erwarten. Die Bewältigung dieser Konsequenzen des Klimaszenarios ist also unter entsprechender Nutzung des vorhandenen, historisch entwickelten Wassermanagementsystems möglich; die Anpassungskapazität ist hoch.

Landwirtschaft: Die Landwirtschaft in der Wesermarsch ist durch die flächenhaft dominierende standortangepasste Grünlandnutzung und eine entsprechende Nutzung des vorhandenen Wassermanagementsystems (s.o.) voraussichtlich in der Lage, sich durch übliche betriebliche Maßnahmen an den Klimawandel anzupassen (BAHRENBERG ET AL. 2005; KRAFT ET AL. 2005). Deutlichere Wirkungen als im Binnenland ergeben sich, v.a. als Folge des Meeresspiegelanstiegs, im nicht durch Sommerdeiche geschützten Vorland, wo vermutlich die Aufgabe landwirtschaftlicher Flächen erforderlich wird. Eine Anpassung wäre durch den Neubau von Sommerdeichen möglich; Zielkonflikte mit dem Naturschutz wären zu erwarten. Insgesamt machen die KLIMU-Ergebnisse deutlich, dass die Landwirtschaft in der Unterweserregion deutlich stärker durch die EU-Politik als durch den Klimawandel beeinflusst werden wird.

Kühlwassernutzung: Die verschiedenen an der Unterweser derzeit in Betrieb befindlichen Kraftwerke nutzen das Wasser der Weser als Kühlwasser. Bei dem erwarteten Anstieg der Wassertemperaturen als einem Aspekt des Klimawandels wird die Einhaltung der derzeit beauftragten Aufwärmspannen bei der Einleitung von Kühlwasser nicht ohne weiteres möglich sein (GRABEMANN et al. 2005). Mögliche Anpassungen wären die Errichtung von Kühltürmen, Betriebseinschränkungen während bestimmter Wetterlagen, Schließung von Kraftwerken/ Nutzung regenerativer Energie oder die Erhöhung der derzeit bestehenden Grenzwerte. Das Beispiel macht deutlich, dass das Spektrum möglicher Anpassungsvarianten breit ist und die einzelnen Möglichkeiten jeweils ganz unterschiedliche Voraussetzungen und Konsequenzen haben. Vor einer Entscheidung ist also ein gesellschaftlicher Diskurs erforderlich, der aufgrund langfristiger Planungszeiträume für Erneuerungsinvestitionen im Kraftwerkssektor frühzeitig begonnen werden sollte.

Küstenschutz: Wesentlicher Handlungsbedarf unter Klimaänderungsbedingungen wurde in KLIMU für den Küstenschutz identifiziert. Es wurden deshalb, anschließend an in der öffentlichen Diskussion befindliche Möglichkeiten, 3 Reaktionsvarianten des Küstenschutzes konzipiert: (1) die Verstärkung der Deichlinien, (2) die Rückverlegung eines Deichabschnittes und die Anlage von Sturmflutentlastungspoldern am rechten Weserufer und (3) der Bau eines Sturmflutsperrwerkes in der Wesermündung. Für alle Maßnahmen wurden Konsequenzen und Kosten abgeschätzt sowie ihre Wirksamkeit modelliert (VON LIEBERMAN et al. 2005).

Die Ergebnisse zeigen, dass für die Variante 1 Deicherhöhungen um 0,2 –2,3 m erforderlich wären und dabei Kosten von ca. 46 Mio. € bei Sicherung des derzeitigen Wiederkehrintervalls entstehen würden. Probleme entstehen durch Standsicherheit (örtlich), Bauzeit, Platz- und Kleibedarf und örtlich die ökologischen Auswirkungen. Für die Variante 2, die die Anlage von 3 Entlastungspoldern mit zusammen ca. 5.570 ha und die Ausdeichung der Luneplate (ca. 1.000 ha) umfasst, zeigte die Modellierung, dass das Maßnahmenbündel den Scheitelwasserstand der Bemessungsturmflut (mit Klimaszenario) bei Brake um 0,35 und bei an der Stadtgrenze Bremen um 0,70 cm absenkt. Die Kosten, nur für den Bau der erforderlichen Polderdeiche, würden sich auf ca. 350 Mio. € belaufen. Probleme entstehen v.a. bei Kettentiden, durch den Flächenbedarf, den Umfang der Baumaßnahmen, die erforderlichen Eingriffe in Eigentumsrechte und die ökologischen Auswirkungen. Bei Realisierung der Variante 3, der Errichtung eines Sturmflutsperrwerkes südlich von Bremerhaven, entstehen Kosten von 300-400 Mio. €. Probleme entstehen durch den Flächenbedarf, die Konsequenzen für die Hydrodynamik, die Nutzungsdauer, die Unterhaltungskosten und die ökologischen Auswirkungen.

Die Kosten sind je nach Variante zwar erheblich, bedeuten bei Beibehaltung der derzeitigen Finanzierungsform jedoch nur einen relativ kleinen Impuls für das regionale ökonomische System (KNOGGE 2002).

Auch bzgl. der erforderlichen Anpassungsmaßnahmen des Küstenschutzes ist die Anpassungskapazität also als hoch zu bezeichnen, auch deshalb, weil es für den Küstenschutz eine historisch gewachsene und etablierte Organisations- und Finanzierungsstruktur gibt und die Akzeptanz, wenn auch unter-

schiedlich für die verschiedenen hier skizzierten Varianten, in der Bevölkerung aufgrund der historischen Erfahrungen („Trutz blanke Hans“) hoch ist (KÖNIG et al. 2002).

3.3 Analyse der zukünftigen Adaptionkapazität

Auch ohne Klimawandel hat sich die Gesellschaft in der Vergangenheit und wird sich auch in Zukunft stetig verändern. Der zukünftige Klimawandel wird also auf eine Gesellschaft treffen, die gegenüber der heutigen in einem nicht prognostizierbaren Ausmaß verändert sein wird. Um diesen Zusammenhang zumindest beispielhaft zu bearbeiten, haben wir in KLIMU aus der unendlichen Vielzahl möglicher zukünftiger Veränderungen in der Region Unterweser, die unabhängig von einer Klimaänderung eintreten könnten, einige uns im Projekt-Zusammenhang besonders wesentlich erscheinende Aspekte ausgewählt, die schlaglichtartig mögliche Veränderungen der Klimasensitivität der Region beurteilen helfen sollten. Diese von uns als Zukunftsbilder bezeichneten Szenarien (s. SCHUCHARDT et al. 2005) fokussieren auf ausgewählte Schnittstellen zwischen den Systemen Gesellschaft und Naturraum und versuchen jeweils die Flanken (Spannweite) möglicher Entwicklungen zu bezeichnen. Im Vordergrund stand dabei die Frage, wie solche Entwicklungen die Sensitivität des Gesamtsystems gegenüber einer Klimaänderung bzw. die Adaptionkapazität verändern würden.

Zukunftsbilder landwirtschaftliche Nutzung

Es wurden sowohl eine moderate Intensivierung als auch eine moderate Extensivierung der derzeitigen landwirtschaftlichen Nutzung in ihren Konsequenzen analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass das Zukunftsbild „Fortschreitende Intensivierung“ tendenziell die Klimasensitivität der Region erhöhen würde, da sich die Oberflächenabflüsse (geringfügig) erhöhen würden und damit die klimabedingt erhöhten zu pumpenden Wassermengen weiter steigen würden. Zudem wären die dann dominierenden Biotoptypen Acker und Intensivgrünland empfindlicher gegenüber sich verändernden Standortbedingungen. Das Zukunftsbild „Extensivierung“ würde dagegen tendenziell zu einer Reduzierung der Empfindlichkeit gegenüber einer Klimaänderung führen, da sich der Wasseranfall reduzieren würde und der Biotoptyp mesophiles Grünland toleranter gegenüber sich ändernden Standortbedingungen wäre.

Zukunftsbilder Seeverkehr Unterweser

Die denkbaren langfristigen Entwicklungen der Nutzung der Unterweser als Schifffahrtsstraße haben zwei Flanken: zum einen ist aufgrund der erwarteten starken Zuwächse im See- und Küstenverkehr eine Sicherung bzw. ein weiterer Ausbau vorstellbar (Szenario Vertiefung). Zum anderen ist (deutlich weniger wahrscheinlich) eine verstärkte Fortsetzung des aktuellen Trends einer immer stärkeren Verlagerung des Seeverkehrs von Bremen nach Bremerhaven denkbar, bis hin zur Aufgabe der stadtbremischen Häfen als Seehäfen (BAHRENBURG 2001). Dies könnte dazu führen, dass die Fahrwassertiefen in der Unterweser wieder verringert werden, wie in BUND (1996) vorgeschlagen (Szenario Verflachung).

Als Ausbau-Szenario haben wir folgende Tiefen für die Analyse zugrunde gelegt: seewärts Bremerhaven von 14,5 auf 16,5 m und zwischen Brake und Bremerhaven von 9 auf 11 m unter SKN. Für das Verflachungs-Szenario sind wir für die Außenweser ebenfalls von einer Vertiefung von 14,5 auf 16,5 m ausgegangen; für den Abschnitt Brake – Bremerhaven von einer Verflachung von 9 auf 6 m und für den Abschnitt Brake – Bremen von 9 auf 4 m unter SKN.

Die Simulationen haben gezeigt, dass sich die mittleren Hoch- und Niedrigwasser im Zukunftsbild Vertiefung sowohl ohne als auch mit Klimaveränderung jeweils „nur“ um wenige Zentimeter verän-

den. Die angenommenen Vertiefungen erhöhen also tendenziell die Klimasensitivität der Region; allerdings nur in einem, bezogen auf die hier anzuwendende Tiefenschärfe, relativ geringem Maß. Im Szenario Verflachung verändern sich die mittleren Hoch- und Niedrigwasser dagegen deutlich. Ohne Klimaszenario steigt das mittlere Niedrigwasser in Bremen um ca. 1,60 m an; das mittlere Hochwasser sinkt um ca. 40 cm, so dass sich der mittlere Tidehub in Bremen von ca. 4 m auf ca. 2 m halbiert. Mit Klimaszenarios laufen in Bremen das mittlere Hochwasser ca. 0,4 m (gegen 0,7 m ohne Verflachung) und das mittlere Niedrigwasser ca. 1,9 m höher auf als im Status quo. Die angenommene Verflachung würde die Klimasensitivität der Region bezüglich der Sturmflutgefährdung also etwas senken, allerdings auch nur in einem relativ geringen Ausmaß.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass die definierten Zukunftsbilder die Sensitivität der Region gegenüber einem Klimawandel z. T. deutlich, über wiegend aber eher schwach, verändern können. Dabei kann diese Sensitivität sich je nach Zukunftsbild sowohl reduzieren als auch erhöhen. Unter dem Gesichtspunkt der langfristigen Vorsorge sollten deshalb bei zukünftigen raumbedeutsamen Planungen und bei der Formulierung von Förder- und Entwicklungsprogrammen immer auch die Konsequenzen für die Klimasensitivität des Raumes bzw. bestimmter Parameter analysiert werden.

4 Fazit

Die Ergebnisse von KLIMU haben insgesamt plausibel gemacht, dass die Folgen des betrachteten Klimaszenarios für die Unterweserregion aufgrund der hohen Adaptionkapazität insgesamt bewältigbar sein werden (SCHIRMER/SCHUCHARDT 2005). Ein ähnliches Ergebnis liegt auch für die Insel Sylt vor (DASCHKEIT/SCHOTTES 2003), während z.B. für das Land Brandenburg besonders bzgl. der Auswirkungen auf die Landwirtschaft die Folgen des Klimawandels nur eingeschränkt bewältigbar erscheinen (GERSTENGARBE et al. 2003).

Es ist vor diesem Hintergrund also sowohl von Bedeutung, durch regionale Studien zur Anpassungskapazität an den Klimawandel vorsorgend regional differenziertes Orientierungswissen zu erarbeiten, als auch die Ergebnisse in regionalen Diskursen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels breit zu kommunizieren.

Von besonderer Bedeutung ist es vor diesem Hintergrund, zukünftige Planungen auf ihre „Klimasensitivität“ hin zu betrachten, um die Anpassungskapazität der Region wenn möglich nicht zu reduzieren, sondern zu vergrößern. Dazu könnte mittelfristig (z.B. im Rahmen der Raumordnung) ein regionales differenziertes Risikomanagement der Folgen von Klimaänderung sinnvoll werden, welches in ein an Nachhaltigkeit orientiertes Integriertes Küstenzonenmanagement einzubetten ist.

5 Literatur

- BAHRENBERG, G.: Die Region Unterweser - Flächennutzung und Entwicklungsperspektiven im Zeichen des Klimawandels. Universität Bremen, Institut für Geographie, Materialien und Manuskripte Heft 26, 2000, S. 1-88.
- BAHRENBERG, G./ KÖNIG, G.: Sozialräumliche Wirkungen eines Klimawandels im Unterwesergebiet - eine qualitative Analyse. In: SCHUCHARDT, B./ SCHIRMER, M. (Hrsg.): Klimawandel und Küste: die Zukunft der Unterweserregion, Heidelberg, 2005, S. 189-207.
- BERKHOUT, F./ HERTIN, J./ GANN, D. M.: Learning to adapt: organisational adaptation to climate change impact. Tyndall Centre Working Paper 47, 2004, S. 1-21.

- BMBF: Herausforderung Klimawandel. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Referat Öffentlichkeitsarbeit, Bonn, 2003, S. 1-56.
- BUND: Das Weserästuar im Spannungsfeld zwischen Natur- und Küstenschutz. Bremer Beiträge für Naturkunde und Naturschutz 2, 1996, S. 1-96.
- DASCHKEIT, A. / SCHOTTES, P. (Hrsg.): Klimafolgen für Mensch und Küste am Beispiel der Nordseeinsel Sylt, Heidelberg, 2000, S. 1-335.
- GERSTENGARBE, F.-W./ BADECK, F./ HATTERMANN, F./ KRYSANOVA, V./ LAHMER, W./ LASCH, P./ STOCK, M./ SUCKOW, F./ WECHSUNG, F./ WERNER, P.C.: Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. PIK-Report 83, 2003, S. 1-76.
- GRABEMANN, H.-J. / GRABEMANN, I. / MÜLLER, A.: Die Auswirkungen eines Klimawandels auf Hydrografie und Gewässergüte der Unterweser. In: SCHUCHARDT, B. / SCHIRMER, M. (Hrsg.): Klimawandel und Küste: die Zukunft der Unterweserregion, Heidelberg, 2005, S. 59-77.
- HOFFMANN, B./ MECKELBURG, M./ MEINKEN, M.: Folgen einer Klimaänderung für den Grund- und Bodenwasserhaushalt der Unterwesermarsch. In: SCHUCHARDT, B. / SCHIRMER, M. (Hrsg.): Klimawandel und Küste: die Zukunft der Unterweserregion, Heidelberg, 2005, S. 103-136.
- IPCC (2002): Climate Change 2001.-Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge University Press; Cambridge.
- KNOGGE, T.: Umweltschocks und langfristige regionale Wirtschaftsentwicklung. Eine integrative Analyse regionalökonomischer Folgen des globalen Klimawandels. Mit dem Fallbeispiel der nordwestdeutschen Küstenregion. Reihe Strukturwandel und Strukturpolitik, Bd. 3, 2002, Frankfurt a. Main, S. 1-174.
- KNOGGE, T./ ELSNER, W.: Regionale ökonomische Folgen eines Klimawandels : Vermögensschäden und Wertschöpfungsverluste in den klimasensitiven Sektoren. In: SCHUCHARDT, B. / SCHIRMER, M. (Hrsg.): Klimawandel und Küste: die Zukunft der Unterweserregion, Heidelberg, 2005, S. 209-220.
- KÖNIG, G./ SCHUCHARDT, B./ VON LIEBERMAN, N.: Zur Akzeptanz verschiedener langfristiger Küstenschutzstrategien an der Unterweser: Eindrücke aus dem Projekt Klimaänderung und Unterweserregion (KLIMU). Bremer Beiträge zu Geographie und Raumplanung 36, 2000, S. 183-193.
- KRAFT, D./ OSTERKAMP, S./ SCHIRMER, M.: Ökologische Folgen eines Klimawandels für die Unterweser und ihre Marsch. In: SCHUCHARDT, B./ SCHIRMER, M. (Hrsg.): Klimawandel und Küste: die Zukunft der Unterweserregion, Heidelberg, 2005, S. 167-188.
- MANIAK, U./ WEIHRAUCH, A./ RIEDEL, G.: Die wasserwirtschaftliche Situation in der Unterwesermarsch unter der Einwirkung einer Klimaänderung. In: SCHUCHARDT, B./ SCHIRMER, M. (Hrsg.): Klimawandel und Küste: die Zukunft der Unterweserregion, Heidelberg, 2005, S. 79-100.
- SCHIRMER, M.: Das Klimaszenario der Fallstudie „Klimaänderung und Unterweserregion“ (KLIMU). In: SCHUCHARDT, B./ SCHIRMER, M. (Hrsg.): Klimawandel und Küste: die Zukunft der Unterweserregion, Heidelberg, 2005, S. 49-56.
- SCHIRMER, M./SCHUCHARDT, B.: Die Sensitivität der Unterweserregion gegenüber einer Klimaänderung: Synopse und Empfehlungen. In: SCHUCHARDT, B./ SCHIRMER, M. (Hrsg.): Klimawandel und Küste: die Zukunft der Unterweserregion, Heidelberg, 2005, S. 299-318.
- SCHUCHARDT, B./ SCHIRMER, M. (Hrsg.): Klimawandel und Küste: die Zukunft der Unterweserregion, Heidelberg, 2005a, S. 1-341.

- SCHUCHARDT, B./ SCHIRMER, M.: Integrative Analyse und Bewertung der Auswirkungen eines Klimawandels auf die Unterweserregion. In: SCHUCHARDT, B./ SCHIRMER, M. (Hrsg.): Klimawandel und Küste: die Zukunft der Unterweserregion, Heidelberg, 2005b, S. 223-240.
- SCHUCHARDT, B./ GRABEMANN, I./ GRABEMANN, H.-J./ KRAFT, D./ MEINKEN, M./ OSTERKAMP, S./ WEIHRAUCH, A.: Zukunftsbilder: wie könnten zukünftige Veränderungen die Klimasensitivität der Unterweserregion beeinflussen? In: SCHUCHARDT, B./ SCHIRMER, M. (Hrsg.): Klimawandel und Küste: die Zukunft der Unterweserregion, Heidelberg, 2005, S. 255-256.
- STERR, H./ KLEIN, R./ REESE, S: Climate Change and Coastal Zones: An Overview of the State-of-the-Art on Regional and Local Vulnerability Assessment. Fondazione Eni Enrico Mattei. Nota di Lavoro 38, 2000, S. 1-24.
- VON LIEBERMAN, N./ GRABEMANN, I./ MÜLLER, A./ OSTERKAMP, S.: Vergleichende Abschätzung von Effektivität und Nebenwirkungen verschiedener Reaktionsvarianten des Küstenschutzes an der Unterweser gegenüber einer Klimaänderung. In: SCHUCHARDT, B./ SCHIRMER, M. (Hrsg.): Klimawandel und Küste: die Zukunft der Unterweserregion, Heidelberg, 2005, S. 2433-254.
- ZIMMERMANN, C./ VON LIEBERMAN, N./ MAI, S.: Die Auswirkungen einer Klimaänderung auf das Küstenschutzsystem an der Unterweser. In: SCHUCHARDT, B./ SCHIRMER, M. (Hrsg.): Klimawandel und Küste: die Zukunft der Unterweserregion, Heidelberg, 2005, S. 139-148.

Adressen

Dr. Bastian Schuchardt
BioConsult Schuchardt & Scholle GbR
Reeder Bischoff Str. 54
28757 Bremen
Germany

E-mail: schuchardt@bioconsult.de

Dr. Michael Schirmer
Universität Bremen FB 2
Postfach 330 440
28334 Bremen
Germany

E-mail: schi@uni-bremen.de

Integriertes Küstenzonenmanagement – Planungsansatz für nachhaltige Küstenentwicklung

Achim Daschkeit

Geographisches Institut Universität Kiel

Summary

The consequences of climate change have to be regulated by coastal protection measures primarily; following an adaptive capacity-approach coastal protection must be embedded in Integrated Coastal Zone Management (ICZM) to consider environmental and sociocultural conditions on a local level. At present several ICZM-approaches are discussed in the member states of the EU, so that „good / best practise“ is not well-defined. With regard to this debate some options and barriers of ICZM as a planning approach are depicted.

Zusammenfassung

Die Regulation der Folgen eines möglichen Klimawandels ist in erster Linie Aufgabe des Küstenschutzes; im Sinne eines adaptive capacity-Ansatzes muss Küstenschutz eingebettet sein in ein Integriertes Küstenzonenmanagement (IKZM), damit die naturräumlichen und soziokulturellen Bedingungen auf der lokalen Ebene angemessen berücksichtigt werden können. Derzeit bestehen aber unterschiedliche Auffassungen über IKZM, auf europäischer und deutscher Ebene besteht kein Konsens über eine „gute IKZM-Praxis“. Vor diesem Hintergrund werden Möglichkeiten und Grenzen von IKZM im Sinne eines Planungsansatzes diskutiert.

1 Planung in Küstenzonen

Der amtierende Präsident des BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg / Rostock) hat einmal die Frage aufgeworfen, ob es sich bei der Nordsee um einen „Industriepark“ oder um ein „Naturschutzgebiet“ handelt (Ehlers o. J.). Diese bewusst polarisierende Alternative spielt beim Stichwort „Industriepark“ auf die vielfältigen Nutzungen an, die in der Nordsee (aber nicht nur dort) anzutreffen sind: die Nordsee als Verkehrsweg, als Fischereigebiet, als Rohstoffquelle, als Raum zur Energiegewinnung, als touristisch genutzter Raum, usw. usf. Diese Vielfalt der Nutzungsansprüche ist in der Tat erst in den letzten Jahren so richtig wahrgenommen worden, das Sondergutachten des Umweltrates aus dem Jahr 2004 zeigt dies im Detail für Nord- und Ostsee auf (SRU 2004), ebenso wie die eindrucksvollen Karten, die im Internet über das BSH-Informationssystem CONTIS allgemein zugänglich sind und die sich teilweise überlagernden Nutzungen anzeigen (<http://www.bsh.de/de/Meeresnutzung/Wirtschaft/CONTIS-Informationssystem/index.jsp>). Ein Faktor für die verstärkte Wahrnehmung einer intensiven Nutzung von Meeres- und Küstengebieten ist der forcierte Ausbau der Offshore-Windenergienutzung im Bereich der Ausschließlichen Wirtschaftzone (AWZ), der aus politischen Gründen (Klimaschutz) unterstützt wird. Beim Stichwort „Naturschutz“ denkt man evtl. zunächst an die „unberührte Weite des Meeres“ oder an die Nationalparke entlang des schleswig-holsteinischen und niedersächsischen Wattenmeeres oder an das europäische System von Schutzgebieten „Natura 2000“, das derzeit aufgrund europäischer Vorgaben (FFH-Richtlinie, Vogel-

schutzrichtlinie) im Küstenmeer und in der AWZ implementiert wird – und das beileibe nicht immer konfliktfrei, denn Naturschutz wird vielfach als eine unter vielen Nutzungsformen angesehen (weitere Informationen unter www.habitatmarenatura2000.de/).

Schon diese kurze Skizze, die sich zwar auf die Situation an den Küstenräumen der deutschen Nord- und Ostsee bezieht, in ähnlicher Form aber auch für andere Meeres- und Küstengebiete zutrifft, zeigt deutlich auf, dass es einer gewissen Regulierung bedarf, um die verschiedenen Nutzungsansprüche miteinander zu vereinbaren. Bezogen auf die deutschen Verhältnisse, eröffnet sich hier also ein geeignetes Betätigungsfeld für Raumplanung bzw. Raumordnung. Gleichzeitig stellt sich unwillkürlich die (Gegen)Frage, warum der deutsche Küsten- und Meeresraum gerade angesichts der Planungsdichte an Land nicht schon längst in ähnlicher Weise beplant wird – die Gründe hierfür sind tatsächlich in einer Vernachlässigung dieses Raumes zu suchen, die sich bis in das Grundgesetz zurück verfolgen lässt; dies wurde anlässlich der Pallas-Havarie 1998 detailliert herausgearbeitet.

Auf jeden Fall lässt sich seit einigen Jahren beobachten, dass der Bund und die Bundesländer das Thema „marine Raumplanung“ (SRU 2004) entdeckt haben – erwähnenswert sind hier u. a. die Beschlüsse der Ministerkonferenzen für Raumordnung vom Dezember 2001 und vom Oktober 2003, in denen die Küstenländer gebeten werden, den Geltungsbereich ihrer Raumordnungspläne auf die 12-Seemeilen-Zone des Meeres auszudehnen; gleichzeitig wird der Bund gebeten, seinerseits eine Raumentwicklungsstrategie für die AWZ (200-Seemeilen-Zone) zu entwickeln – in Absprache mit den Bundesländern sowie ggf. den Nachbarstaaten – sowie den Geltungsbereich des Raumordnungsgesetzes auf die AWZ zu erweitern. Die Dringlichkeit einer planerischen Regulation gerade in der AWZ ist natürlich insbesondere vor dem Hintergrund der Offshore-Windenergienutzung zu sehen, vor allem angesichts der Frage, ob und wie eine Integration der verschiedenen Nutzungsansprüche überhaupt im Rahmen von Genehmigungsverfahren vorgenommen werden kann (die Kurzantwort auf diese Frage lautet im übrigen, dass eine ernsthafte Abwägung konkurrierender Nutzungsansprüche in der AWZ derzeit auf der Grundlage der einschlägigen Gesetze – insb. Seeanlagenverordnung SeeAnlV und Umweltverträglichkeitsgesetz UVPG – gerade *nicht erfolgen kann*; vgl. exemplarisch Czybulka 2003; Dahlke 2002; SRU 2004; Tiedemann 2002).

Aus der Perspektive der Planung für Küsten- und Meeresräume soll es ein Wechselspiel zwischen der Bundesebene einerseits und der Ebene der Küstenbundesländer bzw. regionaler Akteure (bspw. Zusammenschlüsse von Kreisen, Planungsregionen o. Ä.) geben. Über diese Gegenseitigkeit wissen wir derzeit wenig – ob also der Bund tatsächlich regionale und Landesinteressen berücksichtigen kann bzw. will oder ob sich die kommunalen und regionalen Interessen tatsächlich an dem orientieren, was als Bundesperspektive an Leitlinien der Raumordnung vorgegeben wird.

2 Integriertes Küstenzonenmanagement

Parallel zu den geschilderten Aktivitäten kommt das so genannte Integrierte Küstenzonenmanagement (IKZM) ins Spiel: Auf der Basis eines EU-Demonstrationsprogramms zu IKZM in den Jahren 1996-1999 sowie einer daraus abgeleiteten Empfehlung der EU hierzu (30. Mai 2002) sollen die Staaten bis 2006 nationale IKZM-Strategien erarbeiten (vgl. für die deutschen Aktivitäten BMVBW 2004; den Stand der nationalen Bestandsaufnahme schildern Gee / Kannen 2004; die Länderaktivitäten werden vorgestellt von: Liebrecht 2004; Toben 2004; Vespermann 2004). Die Entwicklung von IKZM geht zum einen auf die Erkenntnis der Übernutzung der Meeres- und Küstegebiete und der damit verbundenen Einschränkung der Regulations-, Produktions-, Nutzungs- und Informationsfunktionen zurück. Zum anderen war die Debatte um die Folgen möglicher Klimaänderungen im Küstenraum seit Ende der 1980er / Anfang der 1990er Jahre maßgeblich (Klein 2003). Beide Bereiche sind natürlich eng miteinander verknüpft. Von Anfang an ist dabei immer wieder hervor gehoben worden, dass es einer variablen, den konkreten Problemen angemessenen Definition von Küste bedarf – mal wird so der

Küstenstreifen im engeren Sinne, mal ganze Flusseinzugsgebiete betrachtet, wenn es bspw. um die Nährstoffbelastung von Küstenräumen geht.

IKZM wird als Möglichkeit zur Lösung von Konflikten im Küstenraum angesehen, in einem weiter gefassten Verständnis wird darunter die umfassende Beschreibung und Bewertung von Küstensystemen sowie die Formulierung von Zielvorstellungen und deren Umsetzung bezüglich des Schutzes und der Bewirtschaftung bzw. Verwaltung (= Management) der dort vorhandenen Ressourcen verstanden. Die Kenntnis von Zielvorstellungen – durchaus im Sinne einer „Vision“ – bezieht sich dabei nicht nur auf die rechtlich-planerisch vorgegebenen Entwicklungsziele bestimmter Regionen, sondern ebenso auf eine umfassende Kenntnis darüber, welche Entwicklungsziele gesellschaftlich „gewollt“ sind. In diesen Prozess sind demgemäß traditionelle, kulturelle und historische Aspekte spezifischer Küstengebiete ebenso einzubeziehen wie die dort auftretenden Interessenslagen, Nutzungskonflikte und rechtlich-administrativen Strukturen (im Sinne von Planungen auf verschiedenen Ebenen). Als wichtige, recht allgemein gehaltene Prinzipien, die bei einem IKZM zu beachten sind, gelten gemeinhin:

- Kooperationsprinzip
- Kommunikationsprinzip
- Partizipationsprinzip
- Wissens- und Informationsprinzip
- Innovationsprinzip
- Leitbildprinzip (aus Platzgründen soll hier nicht weiter auf die Grundlagen von IKZM eingegangen werden, vgl. dazu: ARL 2001; Bodungen / Tuner 2001; Brown et al. 2003; Czybulka 2000; Daschkeit 2004; Dixon-Gough 2001; EU 2000a, b; Gee et al. 2000; Kay / Alder 1999).

Auch für IKZM auf europäischer Ebene gilt: die EU gibt einen noch recht allgemein gehaltenen Rahmen vor, den die Staaten und nach geordneten Verwaltungseinheiten konkretisieren; die EU nimmt andererseits die Erfahrungen aus den Regionen auf und versucht sie in der Folge bspw. in der Regionalförderung zu berücksichtigen. Ob hier tatsächlich ein – man möchte sagen – *Gegenstromverhalten* realisiert wird, ist eine momentan offene Frage.

3 Konvergenzen und Divergenzen

Eine weniger offene Frage ist hingegen, dass die Initiativen zu IKZM einerseits sowie die Überlegungen für Fragen einer marinen Raumplanung andererseits eng miteinander verknüpft sind – beiden Herangehensweisen ist die Zielsetzung der Ermöglichung einer nachhaltigen Entwicklung im Küsten- und Meeresraum gemeinsam, wobei die Integration von land- und seeseitigen Aspekten konzeptionell im Mittelpunkt steht. Neben den Gemeinsamkeiten sind aber auch gegensätzliche Auffassungen erkennbar:

- Zum einen wird IKZM als informelles Instrument bzw. als Mittel der Raumordnung / Raumplanung angesehen. IKZM wird hier als Arbeitsmethode, als Denkweise beschrieben; man könnte dies als eine eher weiche Auffassung von IKZM bezeichnen. Der SRU (2004) hebt bspw. auf den Umstand ab, dass IKZM gegenüber rechtlich geregelten Planungsverfahren informell bleibt und damit eben ohne rechtlich bindende Wirkung (die Charakterisierung als Papiertiger drängt sich auf ...).
- Zum anderen wird mitunter die genau gegenteilige Auffassung vertreten: Raumplanung ist als Mittel, als Instrument für IKZM anzusehen. IKZM ist gewissermaßen das Dach, unter dem die Raumplanung firmiert.

Schaut man sich noch etwas detaillierter IKZM-Aktivitäten an (Daschkeit 2004), so lassen sich weitere Auffassungen für IKZM finden, die die Heterogenität von IKZM-Praxis und IKZM-Forschung gleichermaßen widerspiegeln. IKZM wird derzeit definiert als

- Übertragung von Planungsansätzen von Land auf das Meer („marine Raumplanung“, SRU 2004, s. o.),
- regionales Entwicklungskonzept mit ökonomischer Ausrichtung,
- nachhaltige Nutzung von Küstenregionen (... was immer genau unter Nachhaltigkeit zu verstehen ist ...),
- Instrument zum Schutz empfindlicher Ökosysteme aus einer mehr ökologischen bzw. Naturschutzperspektive; hier wird oftmals auf den „ökosystemaren Ansatz“ rekurriert, der letztlich auf die CBD (Convention on Biological Diversity) zurückgeht,
- Möglichkeit zur Gewährleistung ökologischer und Lebensqualität (wobei die Ansätze der Umwelt- und Lebensqualität eine eigene Geschichte haben, in jüngster Zeit teilweise wieder verstärkt aufgegriffen werden; vgl. Häberli et al. 2002),
- seeseitiger Geltungsbereich der WRRL,
- „Planungsphilosophie“ und als
- Instrumentarium zum Aufbau und Unterstützung von Akteursnetzwerken (Auflistung ohne Anspruch auf Vollständigkeit).

4 IKZM-Indikatoren

Es ist offensichtlich, dass diese heterogenen Verständnisse von IKZM auch unterschiedliche Folgen für die Ausgestaltung von „realen“ IKZM-Prozessen haben werden. Die Heterogenität der verschiedenen IKZM-Verständnisse ist an und für sich nicht weiter problematisch, es wird nur deutlich, dass auf dieser Grundlage kaum eine Aussage darüber möglich ist, wie man sich eigentlich eine „gute IKZM-Praxis“ vorstellen könnte; für den einen ist IKZM dann „gut“, wenn möglichst viele Schutzgebiete ausgewiesen werden, für die andere ist IKZM dann „gut“, wenn möglichst viele Schiffe gebaut und damit Arbeitsplätze geschaffen werden. Dies verweist auf das praktisch wie wissenschaftlich gleichermaßen relevante Problem der Ableitung und Evaluierung von Indikatoren für IKZM. An anderer Stelle konnte aufgezeigt werden (Daschkeit / Sterr 2003a), dass zwar eine Reihe umfassend angelegter Vorschläge für IKZM-Indikatoren vorliegen (siehe dazu exemplarisch: Belfiore et al. 2003; van Buuren et al. 2002; Schuchardt et al. 2004; Olsen 2003), diese aber zwei entscheidende Schwächen aufweisen:

- Erstens wird nur sehr am Rande die Differenzierung in deskriptive Bestandteile einerseits und präskriptive andererseits aufgegriffen. IKZM ist (und bleibt) nun mal ein in erster Linie öffentlicher, politisch-normativer Prozess, bei dem wissenschaftliche Analysen jeweils eine ganz bestimmte Funktion haben. Das bedeutet, dass man bspw. Daten zur Entwicklung der Nährstoffsituation in Küstengewässern nicht in einen Topf werfen kann mit Daten zur Fortentwicklung des IKZM-Prozesses in einer definierten Küstenregion. Gängige Vorgehensweise – bspw. der EEA – ist es, Daten bzw. Informationen zu den beiden genannten Beispielen in qualitativer Weise auf einer ordinalen Skala abzubilden (zum Beispiel in der Dreier-Gliederung „gut – mittel – schlecht“ auf der Basis von Experteneinschätzungen).
- Zweitens ist diese Art des Vorgehens vor allem deswegen unzureichend, weil sie zumeist nicht konsequent zu Ende geführt wird. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen (Tabelle 1, Beispiel aus Olsen 2003): Olsen bezieht sich auf gesellschaftliche Rahmenbedingungen für IKZM, dies lässt sich als eine IKZM-Dimension bezeichnen; innerhalb dieser Dimension werden 5 Kategorien unterschieden, u. a. der Umstand, dass ein formelles Mandat für IKZM benötigt wird. Man kann die Olsen'schen Kategorien im geläufigen Sprachgebrauch als IKZM-Kriterien bezeichnen – es ist nicht nur plausibel, sondern entspricht auch der Erfah-

zung, dass ein formelles Mandat als Legitimationsgrundlage ein wichtiges Kriterium für IKZM zu sein scheint. Hierunter subsumiert Olsen dann als Indikator u. a. die Etablierung von Kommission und Netzwerken. An genau dieser Stelle erfolgen dann keine näheren Ausführungen mehr – hier wird es aber erst „spannend“: Der Indikator „Etablierung von Kommissionen und Netzwerken“ kann in der (allgemeinen) Form nicht bestimmt und entsprechend nicht geprüft werden – es braucht also (mindestens) eine konkretisierende Variable (bzw. einen Merkmalsträger), z. B. (-) Entwicklung der Anzahl von IKZM-Kommissionen im Zeitraum von xxxx bis xxxx, oder (-) Entwicklung der Anzahl von Personen, die in IKZM-Netzwerken mitarbeiten, wiederum im Zeitraum von xxxx bis xxxx. Entscheidend wird dann aber erst der nächste Schritt: Die einzelnen Variablen bzw. Merkmalsträger weisen (logischerweise) Merkmalsausprägungen auf – bezogen auf die Entwicklung der Anzahl von IKZM-Kommissionen im Zeitraum xxxx bis xxxx könnten dies zum Beispiel (fiktive Werte) zwischen 3 und 12 sein. Nun kommt es darauf an, welche Merkmalsausprägung in welcher Weise bewertet wird: Sind 0 bis 4 Kommissionen „nicht gut“, 5 bis 8 Kommissionen „mittelmäßig“ und 9 bis 12 Kommissionen „gut“? Es geht an dieser Stelle nicht um den quantifizierenden Aspekt, sondern vielmehr darum, dass *erst an dieser Stelle* eine normative Setzung (im Sinne einer Zuweisung: deskriptive Merkmalsausprägung → präskriptive Wertigkeit) stattfindet, die aber für die Bestimmung von IKZM-Kriterien und die Bestimmung eines „guten / gelungenen“ IKZM essenziell ist.

IKZM-Dimensionen	IKZM-Kriterien	IKZM-Indikatoren	Variablen / Merkmalsträger	Merkmalsausprägungen	Bestimmung der Wertigkeit → Wertzuweisung
Beispiel aus Olsen (2003): Gesellschaftliche Rahmenbedingungen	Formelles Mandat für IKZM (Legitimation)	Etablierung von Kommissionen und Netzwerken	Entwicklung der Anzahl von IKZM-Kommissionen im Zeitraum von xxxx bis xxxx	0 – 4 ⇔ ⇔ 5 – 8 ⇔ ⇔ 9 – 12 ⇔ ⇔	nicht gut mittelmäßig gut

Tab. 1: Struktur zur Bewertung von IKZM-Prozessen (exemplarisch) (Quelle: eigener Entwurf)

5 Schlussfolgerungen

Was aber können wir nun auf der Basis der erwähnten Heterogenität von IKZM-Verständnissen schlussfolgern? Festzuhalten ist, dass IKZM ganz offensichtlich noch nicht fertig „ausbuchstabiert“ ist. Wenn wir in Deutschland bleiben und auf die Ebene der Bundesländer schauen, ist erkennbar, dass trotz gewisser Ähnlichkeiten Unterschiede in der Umsetzung von IKZM deutlich sind. Im Rahmenkonzept des Landes Schleswig-Holstein wird eine raumplanerische Perspektive verfolgt, die wesentlich auf Land-Meer-übergreifende Zusammenhänge abstellt und sich auf regionale und lokale Aktivitäten stützt bzw. diese unterstützt. Hervorzuheben ist, dass jüngst (dsn 2004) der maritimen Komponente des gesamten Bundeslandes – und damit auch dem IKZM-Gedanken – deutlich mehr Aufmerksamkeit zuteil wird. Traditionell spielt im Rahmen von IKZM natürlich auch der Küstenschutz eine wichtige Rolle; dies zeigt sich nicht nur an der Formulierung „Integriertes Küstenschutzmanagement (IKM)“, sondern auch daran, dass hierfür 1999 ein Beirat ins Leben gerufen wurde, der IKZM-Elemente aufgreift. In Niedersachsen hat sich IKZM in Form eines Raumordnungskonzeptes etabliert, hier wird allerdings eine deutlich sektorale Zugangsweise gewählt. In Mecklenburg-Vorpommern ist

das (im Entstehen befindliche) Landes-Raumentwicklungsprogramm der maßgebliche Rahmen (vgl. auch Melzer 2004). Gemeinsam ist diesen Länder-Ansätzen, dass sie – ganz im Sinne der „marinen Raumplanung“ des SRU (2004) – einen planerischen Hintergrund haben, der zweifelsfrei zentral und Grund legend, für IKZM aber eventuell nicht ausreichend ist (für weitere Informationen und links vgl. <http://www.eucc-d.de>).

Geht man noch eine Ebene tiefer (Kommunen, Kreise) und begibt sich auf die Suche danach, was dort konkret als „gute IKZM-Praxis“ vor Ort umgesetzt wird, so erfährt man vielfach, dass offenbar IKZM „schon immer praktiziert“ wurde – es wurde lediglich anders bezeichnet. So werden Regionale Entwicklungskonzepte genauso als IKZM bezeichnet wie tourismuspolitische Initiativen; Küstenschutz wird mit Küstenmanagement ebenso gleichgesetzt wie Produktentwicklung aus marinen Rohstoffe (blaue Biotechnologie) uws. usf. (böse Zungen würden hier von Etikettenschwindel sprechen, aber das geht m. E. oft an der Zielrichtung solcher Aktivitäten vorbei; auf alle Fälle ist es aber nicht unbedingt einfach, noch einen Zusammenhang zwischen der EU-Empfehlung zu IKZM und den konkreten Initiativen vor Ort herzustellen).

Nun kann die geschilderte Situation, die doch ein eher ernüchterndes Bild auf die IKZM-Praxis wirft, nicht unbedingt verwundern, denn: es existieren mittlerweile eine Reihe von (Planungs-)Ansätzen, die auf ziemlich ähnliche Verfahren hinauslaufen: mal ist die Rede von Regionalmanagement im Küstenraum, mal die Rede von adaptivem Ressourcen- oder Umweltmanagement (Ratter 2001), mal von Leitbild orientierten Entwicklungskonzepten, mal von Risikomanagement, das einer Risikoanalyse und –bewertung bedarf (Markau / Reese 2003) etc. In diese Kategorie gehört nach meiner Auffassung ebenso der Ansatz der *adaptive capacity*, wie er u. a. von Klein (2003) im Rahmen von Vulnerabilitätsanalysen entwickelt wurde: Ausgangspunkt war die Analyse und Bewertung der Folgen eines möglichen Klimawandels in Küstenräumen, wie sie zunächst im Rahmen des IPCC entwickelt wurde. Hatte man sich in den 1990er Jahren verstärkt der Handlungsvariante „Vermeidung“ von treibhausrelevanten Klimagasen zugewandt, wurde vor allem in den letzten ca. 5 Jahren die Handlungsvariante „Anpassung“ stärker gewichtet. In jüngster Zeit hat auch die EEA (2004) den Aspekt Anpassung hervorgehoben, gleichzeitig aber betont, dass Anpassungsstrategien nur Sinn machen würden, wenn sie in einen umfassenden Kontext eingepasst sind.

Es wurde klar erkannt, dass neben Vorsorge- auch Anpassungsstrategien an die Folgen eines Klimawandels notwendig sind, diese aber zumeist in regionaler Perspektive unter Berücksichtigung der regionalen bzw. lokalen Gegebenheiten betrachtet werden müssen (vgl. Daschkeit / Sterr 2003b). So wurde der Ausgangspunkt, sich zunächst „isoliert“ um den Einfluss des Klimawandels auf die regionale Küstenentwicklung zu kümmern, immer weiter ausgeweitet und der Faktor Klima als einer unter vielen wahrgenommen, der nun „im Kontext“ der allgemeinen naturräumlichen wie soziokulturellen Entwicklung einer Küstenregion betrachtet werden muss (Schröder et al. 2002 umschreiben dies für den Forschungsbereich als Übergang von Szenarioanalysen hin zu integrierten Vulnerabilitätsstudien). Man landet auf diese Weise dann bspw. beim „Küstenschutzmanagement“, wie es in Schleswig-Holstein seit einigen Jahren praktiziert wird (s. o.); und wenn dabei „moderne“ Planungsinstrumente wie Partizipation eingesetzt und auch andere Nutzungsansprüche neben dem Küstenschutz zumindest im Ansatz bedacht werden, ist dort tatsächlich eine gewisse Nähe zum IKZM-Gedanken zu konstatieren. Hier schließt sich der Kreis der Argumentation wieder – und wieder bleibt eine gewisse Ratlosigkeit, ob und wie sich IKZM von anderen Planungsansätzen, die den Küstenraum betreffen, unterscheidet.

6 Fazit

Ist nun also IKZM ein Planungsansatz für nachhaltige Küstenentwicklung – oder ist IKZM etwas anderes als ein Planungsansatz, und wir wissen nur noch nicht genau was? Die Frage kann hier nicht

endgültig beantwortet werden; IKZM ist auf alle Fälle *kein* wissenschaftliches und in diesem Sinne objektiveres Verfahren zur Lösung von Konflikten in Küstenräumen – auch wenn die Idee von IKZM oftmals von der Wissenschaft in die Praxis transferiert worden ist. Es lässt sich aber festhalten, dass IKZM – unabhängig davon ob es ein Planungsansatz im engeren Sinne ist oder nicht – auf keinen Fall „von oben“ verordnet werden kann, sondern das ganz offensichtlich eine „bottom up“-Perspektive maßgeblich ist – das gilt für die Analyse und Bewertung von Klimafolgen ebenso wie für die Analyse oder Bewertung jedweder Nutzungsansprüche im Küstenraum. Aus diesem Grund ist es nahe liegend, auf die kommunale und regionale *Praxis* zu fokussieren. Genauso wie Schuchardt et al. (2004) nach der IKZM-Tauglichkeit abgeschlossener Planungsverfahren im Küstenraum fragen und dies anhand definierter Kriterien und Indikatoren bewerten, genauso ist es notwendig, die laufenden Aktivitäten im Küstenraum auf diese Weise zu betrachten. Dabei ist es zunächst zweitrangig, ob die Aktivitäten im Küstenraum direkt als IKZM oder anderweitig bezeichnet werden – es ist notwendig, Kriterien und Indikatoren für das zu entwickeln, was „gute IKZM-Praxis“ sein soll. Bislang gibt es meines Wissens hierzu noch keine Bemühungen, die auf die Vorarbeiten u. a. von Schuchardt et al. (2004) aufsetzen und gleichzeitig auf die europäischen Indikatorenansätze (Burbridge 2004; ETC-TE 2004) Bezug nehmen könnten (und müssten); gleichzeitig müssten diese bis zu Ende „dekliniert“ werden, damit ein Indikatoren-gestütztes Instrumentarium zur Verfügung steht, anhand dessen zunächst „gute IKZM-Praxis“ und im zweiten Schritt dann IKZM definiert werden kann. Erst dann ließen sich nachprüfbar Argumente vorbringen, ob sich IKZM von anderen modernen Ansätzen zur Regulation von Nutzungskonflikten bzw. zur Ermöglichung einer nachhaltigen Entwicklung im Küstenraum unterscheidet – oder eben nicht.

7 Literatur

- ARL (Akademie für Raumforschung und Landesplanung): Neue Aufgaben in den deutschen Küstenzonen. Gedanken über die Weiterentwicklung der räumlichen Planung an Nord- und Ostsee. Hannover, 2001 (Arbeitsmaterial ARL, Nr. 280).
- BELFIORE, S./ BALGOS, M./ McLEAN, B./ GALOFRE, J. BLAYDES, M./ TESCH, D.: A Reference Guide on the Use of Indicators for Integrated Coastal Management. Fontenoy, 2003.
- BMVBW (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen) (Hrsg.): Auf dem Weg zur nationalen Integrierten Küstenzonenmanagement-Strategie. Perspektiven der Raumordnung. Dokumentation des Workshops in Berlin am 23. und 24. Oktober 2003. Bonn, 2004.
- BODUNGEN, B./ TURNER, R. K. (eds.): Science and Integrated Coastal Management. Berlin, 2001.
- BROWN, K./ TOMPKINS, E. L./ ADGER W.N.: Integrated Coastal Conservation and Development. London, 2003.
- BURBRIDGE, P.: A Critical Review of Progress towards Integrated Coastal Management in the Baltic Sea Region. In: SCHERNEWSKI, G./ LÖSER, N.: Managing the Baltic Sea. Warnemünde, 2004, Coastline Reports 2, S. 63-75.
- CZYBULKA, D.: Ist die nationale Rechtsordnung auf ein integriertes Küstenzonenmanagement (IKZM) vorbereitet? In: Zeitschrift für geologische Wissenschaften, Jg. 28, 2000, Heft 6, S. 683-696.
- CZYBULKA, D. (Hrsg.): Naturschutz und Rechtsregime im Küsten- und Offshore-Bereich. Vierter Warnemünder Naturschutzrechtstag. Baden-Baden, 2003 (Beiträge zum Landwirtschaftsrecht und zur Biodiversität, Band 1).
- DAHLKE, Chr.: Genehmigungsverfahren von Offshore-Windenergieanlagen nach der Seeanlagenverordnung. In: Natur und Recht 8, 2002, S. 472-479.
- DASCHKEIT, A.: Sozial-Ökologie im Küstenraum. Kiel, 2004 (Habil.-schrift i. V.).

- DASCHKEIT, A./ STERR, H.: Was ist Integriertes Küstenzonenmanagement? Kriterien für IKZM. Kiel, 2003a (unveröffentlicht).
- DASCHKEIT, A./ STERR, H.: Klimawandel in Küstenzonen. In: UWSF, Jg. 15, 2003b, Heft 3, S. 199-207.
- DIXON-GOUGH, R. W.: European Coastal Zone Management. Ashgate, Aldershot (u.a.), 2001, International land management series.
- DSN: Zukunft Meer. Studie für die Staatskanzlei des Landes Schleswig-Holstein. Kiel, 2004.
- EEA (European Environment Agency): Impact of Europe's changing climate. An indicator-based assessment. Kopenhagen, 2004 (EEA Report No 2/2004).
- EHLERS, P.: Die Nordsee – Industriepark oder Naturschutzgebiet? Hamburg, o. J. (unveröffentlicht).
- ETC-TE (European Topic Centre on Terrestrial Environment): Measuring Sustainable Development on the Coast. A Report to the EU ICZM Expert Group by the Working Group on Indicators and Data led by the ETC-TE. Brüssel, 2004.
- EU: Integrated Coastal Zone Management. Commission proposal for a European Parliament and Council Recommendation concerning the implementation of Integrated Coastal Zone Management in Europe (COM/2000/545). Brüssel, 2000a.
- EU: Integrated Coastal Zone Management. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament on Integrated Coastal Zone Management: a Strategy for Europe (COM/2000/547). Brüssel, 2000b.
- EU: Empfehlung des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2002 zur Umsetzung einer Strategie für ein integriertes Management der Küstengebiete in Europa. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft vom 6.6.2002, L 148/24-27, Brüssel, 2002.
- GEE, K./ KANNEN, A.: Raumplanungsstrategien an der Küste und im Meer: Erste Ergebnisse der Bestandsaufnahme und Thesenpapier. In: BMVBW (Hrsg), 2004, S. 10-21.
- GEE, K./ KANNEN, A./ STERR, H.: Integrated Coastal Zone Management: What Lessons for Germany and Europe? Empfehlungen und Ergebnisse der Ersten Deutschen Konferenz zum Integrierten Küstenzonenmanagement. Büsum, 2000 (Forschungs- und Technologiezentrum Westküste, Bericht Nr. 21).
- HÄBERLI, R./ GESSLER, R./ GROSSENBACHER-MANSUY, W./ LEHMANN POLLHEIMER, D.: Vision Lebensqualität: nachhaltige Entwicklung – ökologisch notwendig, wirtschaftlich klug, gesellschaftlich möglich. Zürich, 2002 (Synthesebericht des Schwerpunktprogramms Umwelt Schweiz).
- KAY, R./ ALDER, J.: Coastal Planning and Management. Routledge, London, New York, 1999.
- KLEIN, R. J. T.: Coastal Vulnerability, Resilience and Adaptation to Climate Change. An Interdisciplinary Perspective. Dissertation Universität Kiel, Potsdam, 2003.
- LIEBRENZ, F.: Erwartungen an eine nationale IKZM-Strategie aus Sicht der Länder. Aus Sicht Schleswig-Holsteins.- In: BMVBW (Hrsg.), 2004, S. 31-33.
- MARKAU, H.-J./ REESE, S.: Naturgefahren und Risikobetrachtung im schleswig-holsteinischen Küstenraum. In: Die Küste, Jg. 67, 2003, S. 3-22.
- MELZER, M.: Umsetzung des IKZM in den deutschen Küstenländern. Wedel, 2004 (unveröffentlicht).
- OLSEN, S. B.: Frameworks and indicators for assessing progress in integrated coastal management initiatives. Ocean & Coastal Management, Vol. 46, S. 347-361.
- RATTER, B. M. W.: Adaptives Umweltmanagement am Niagara Escarpment in Ontario, Kanada. Berlin (u. a.), 2001 (Umweltnatur- & Umweltsozialwissenschaften, Band 6).

- SCHRÖDER, M./ CLAUSSEN, M./ GRUNWALD, A./ HENSE, A./ KLEPPER, G./ LINGNER, S./ OTT, K./ SCHMITT, D./ SPRINZ, D.: Klimavorhersage und Klimavorsorge. Berlin (u. a.), 2002.
- SCHUCHARDT, B./ BILDSTEIN, T./ LANGE, H./ LANGE, J./ PESTKE, S./ OSTHORST, W./ SCHIRMER, M./ WILLE, D./ WINTER, G.: Wie wir gute IKZM-Praxis definieren: erste Ergebnisse des Forschungsvorhaben RETRO. In: SCHERNEWSKI, G./ DOLCH, T. (Hrsg.): Geographie der Meere und Küsten. Warnemünde, 2004, Coastline Reports 1, AMK-Tagung 28.-30.4.2004, S. 153-162.
- SRU (Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen): Meeresumweltschutz für Nord- und Ostsee. Sondergutachten. Baden-Baden, 2004.
- TIEDEMANN, A.: Windenergieparke im Meer – Perspektiven für den umweltverträglichen Einstieg in eine neue Großtechnologie. In: LOZÁN, J. L./ RACHOR, E./ REISE, K./ SÜNDERMANN, J./ V. WESTERNHAGEN, H. (Hrsg.): Warnsignale aus Nordsee & Wattenmeer. Eine aktuelle Umweltbilanz. Hamburg, 2002, S. 142-148.
- TOBEN, S.: Aus Sicht Mecklenburg-Vorpommerns. In: BMVBW (Hrsg.), 2004, S. 33-35.
- VAN BUUREN, J. et al.: Testing of indicators for the marine and coastal environment in Europe. Part I: Eutrophication and integrated coastal zone management. Copenhagen, 2002 (European Environment Agency, Technical Report 84).
- VESPERMANN, K.-H.: Erwartungen an eine nationale IKZM-Strategie aus Sicht der Länder. Aus Sicht Niedersachsens. In: BMVBW (Hrsg.), 2004, S. 28-31.

Adresse

Dr. Achim Daschkeit
Geographisches Institut der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Ludewig-Meyn-Str. 14
24118 Kiel
Germany

E-mail: daschkeit@geographie.uni-kiel.de

Folgen eines Meeresspiegelanstiegs in der Ostsee – erste Ergebnisse des SEAREG-Projektes

Hartmut Rudolphi*, Bernd Röber*, Philipp Schmidt-Thomé**, Michael Staudt**,
Reinhard Zölitz-Möller*, Reinhard Lampe*

* Universität Greifswald, ** GTK

Summary

The Interreg IIIB project SEAREG (Sea Level Change Affecting the Spatial Development in the Baltic Sea Region) is focusing on socio-economic and environmental assessment of the effects of climate change on the sea level in the Baltic Sea region (BSR). In cooperation with spatial planners the project is developing a Decision Support Frame (DSF) for impact and vulnerability assessment. The DSF will address planning authorities, decision makers and stakeholders in the case study areas and in the BSR cooperation on spatial planning in general.

Coastal dynamics were estimated considering the island of Usedom as an example. The changes of the historical shoreline of Usedom were determined by maps and aerial photographs from the year 1829 up to now. Future coast lines were calculated with the model of WAGNER (1999) for the next 100 years.

A high resolution elevation model of the Island of Usedom was generated to estimate flood-prone areas depending on different sea level rise scenarios. The potential flood-prone areas were intersected with economical and ecological data sets. Two types of results were produced for the planning authorities, firstly maps and tables showing the affected economical and ecological areas and, secondly, a classification map of the affected areas to establish a priority list of actions.

Zusammenfassung

Das Interreg IIIB Projekt SEAREG (Sea Level Change Affecting the Spatial Development in the Baltic Sea Region) untersucht die möglichen sozioökonomischen und umweltrelevanten Effekte des zu erwartenden Meeresspiegelanstiegs in der Ostseeregion. Der Projektansatz umfasst die Entwicklung eines Entscheidungshilfesystems (Decision Support Frame, DSF) von Natur- und Sozialwissenschaftlern, Planungsbehörden und Entscheidungsträgern.

Für Mecklenburg-Vorpommern wurden die Auswirkungen auf die Außenküste und die überflutungsgefährdeten Gebiete am Beispiel Usedom's erörtert. Die historische Entwicklung der Küstenlinie wurde anhand von Karten und Luftbildern ab 1829 bestimmt. Zur Berechnung der Abrasion und Akkumulation in den kommenden 100 Jahren wurde der potentielle Sedimenttransport nach WAGNER (1999) ermittelt.

Für die Umsetzung des DSF wurden unterschiedliche Datensätze getestet. Anhand eines auf der Basis der TK10 generierten Höhenmodells und Prognosen zum Meeresspiegelanstieg wurden die potentiellen Flächen ausgehalten und mit einzelnen Datensätzen verschnitten. Die einzelnen Objektklassen können von Planern mit Werten (z.B. €/ha oder relativ als Faktor) belegt und analysiert werden.

1 Einleitung

Eine der Grundideen des SEAREG Projektes ist es, die Kommunikation zwischen Planern, Sozial- und Naturwissenschaftlern zu verbessern. Die Entwicklung eines so genannten Entscheidungshilfesystems (DSF, Decision Support Frame) ermöglicht es, die Entscheidungsfindung auf eine solide wissenschaft-

liche Basis zu stützen und hilft, angemessene Gegenmaßnahmen im Falle eines Meeresspiegelanstiegs in der Ostseeregion zu finden. Die Zusammenarbeit und Lernprozesse um das DSF sollen den involvierten Parteien das gegenseitige Verständnis für die unterschiedlichen Standpunkte und Beweggründe verbessern helfen.

Das DSF basiert auf den folgenden vier Säulen (vgl. Abb.1), die sich gegenseitig ergänzen: 1) aus Klima - und Ozeanmodellierung sowie GIS-Anwendungen im regionalen und lokalen Maßstab 2) einer Schadenspotentialanalyse 3) einer Wissensdatenbank und 4) einem Diskussionsforum. (SCHMIDT-THOMÉ 2003)

Die Untersuchungsgebiete sind u.a. die Insel Usedom, Stockholm und die Mälaren Region (Schweden), Helsinki und die Region Itä Uusimaa (Finnland), Danzig (Polen) und Pärnu (Estland).

1.1 GIS - Anwendungen und Klima- und Ozeanmodellierung:

Mit Hilfe eines hochauflösenden regionalen Klima- und Ozeanmodells wurden die Meeresspiegeländerungen der Ostsee für die nächsten 100 Jahre unter Berücksichtigung von Landhebungs- oder Land-senkungsraten modelliert. (STAUDT et al. 2004)

Zwei globale Zirkulationsmodelle lieferten dabei die Randbedingung für das regionale Modell, ferner wurden die Emissionsszenarien A2 und B2 des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) benutzt. Weitere Informationen zur Modellierung finden sich bei MEIER et al. (2004). Für die Untersuchungsgebiete wurden vorhandene Topographie- und Nutzungsdatensätze für die GIS-Verarbeitung aufbereitet und Überflutungsbereiche bzw. überflutungsgefährdende Gebiete eingegrenzt. (SCHMIDT-THOMÉ et al. 2004) Die Universität Greifswald entwickelte darüber hinaus ein automatisiertes GIS-Werkzeug, welches in Zukunft auch in anderen Fallstudien verwendet werden kann (siehe Kapitel 5).

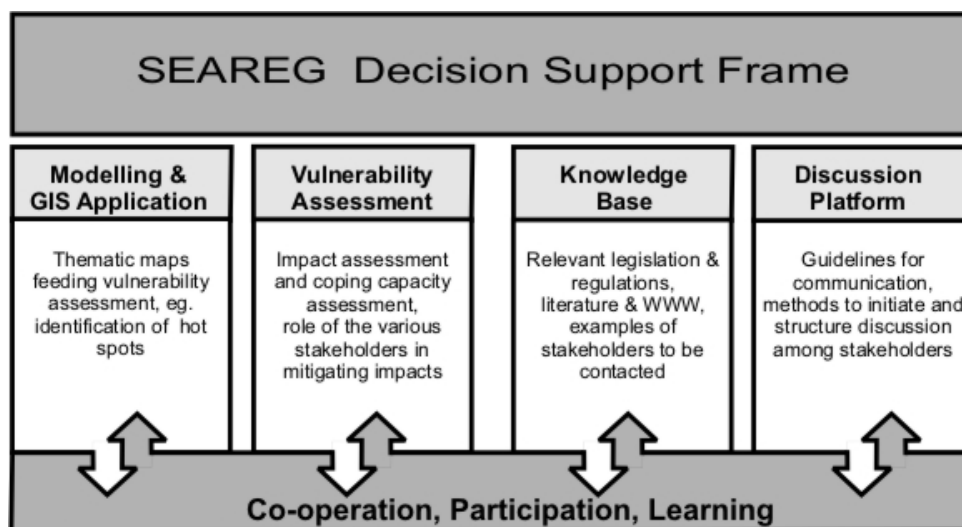


Abb. 1: Aufbau des vom SEAREG Projektes entwickelten Entscheidungshilfesystems

1.2 Schadenspotentialanalyse (Vulnerability assessment)

Die Schadenspotentialanalyse bewertet das Ausmaß der beiden Haupteffekte des Meeresspiegelanstiegs auf das sozioökonomische bzw. ökologische System - den Landverlust durch dauerhafte Überflutung und die Wirkung einer zeitweisen Überflutung durch Sturmfluten. Die beiden genannten Phänomene werden im Wesentlichen durch die vorhandene Topographie bestimmt, während der Impact auf die beiden Systeme komplexer ist. Da das sozio-ökonomische und das ökologische System eng miteinander verwoben sind, werden die Auswirkungen auf beide Systeme gemeinsam analysiert. Die

Analyse der Folgewirkungen berücksichtigt auch die Fähigkeit einer Region, durch entsprechende Schutzmassnahmen, Anpassung oder Nachgeben die (erwarteten) Auswirkungen eines Klimawandels/Meeresspiegelanstiegs zu bewältigen (Coping Capacity). Die Sensitivität einer Region wird dann durch das Ausmaß der Auswirkungen und die Coping Capacity der Betroffenen bestimmt.

1.3 Datenbank (Knowledge base):

Die Schadenspotentialanalyse erfordert umfassendes Fachwissen und die bestmöglichen und aktuellsten Datenbestände. Die Datenbank ist eine Sammlung aller Fachinformationen über Meeresspiegeländerungen und enthält alle maßgebenden Vorschriften, Gesetzgebungen, Literaturhinweise, www-Ressourcen und andere Informationsquellen. Wichtige Akteure und Interessenvertreter werden ermittelt, einschliesslich existierender Expertengruppen. Die Datenbank beinhaltet auch allgemein verständliche Texte über Klimaveränderung und Meeresspiegelanstieg. Sie stellt die Basis für das Diskussionforum dar und unterstützt die Schadenspotentialanalyse.

1.4 Diskussionsforum (Discussion platform):

Kommunikation ist ein wesentliches Hilfsmittel bei der Einschätzung und Ausarbeitung angemessener und akzeptabler Lösungen. Das Diskussionsforum analysiert und fördert den Kommunikationsprozess zwischen Planern, Politikern und Wissenschaftlern und regt den Austausch von Information an. Auf dieser Analyse basierend werden Kommunikationsrichtlinien entwickelt und relevante Themen und Akteure bestimmt. Hilfsmittel, um den Kommunikationsprozess zu analysieren, sind Gespräche am runden Tisch, Emailfragenbögen und Interviews (SCHMIDT-THOMÉ 2004).

2 Untersuchungsgebiet Gdansk, Polen

Gdansk liegt an der Südküste der Ostsee, nahe der Vistula-Mündung. Die Region unterliegt Landsenkungsraten von 1-2 mm/a (WYRZYKOWSKI 1985). 880 ha der Stadt, darunter Wohn- und Industriegebiete, liegen unterhalb von 1 m NN, 1020 ha liegen zwischen 1m und 2,5 m NN. Diese tiefliegenden, überflutungsgefährdeten Bereiche der Küstenterrasse und des Vistula-Deltas enthalten u.a. die wichtigsten Grundwasserreserven von Gdansk. Es gibt eine erhöhte Flutgefahr für diese Bereiche der Stadt, besonders wenn während einer frühen Schneeschmelze im Frühjahr das Hochwasser der Vistula in das noch von Packeis blockierte Delta fließt. Darüber hinaus können starke und langandauernde Nordwinde eine Intrusion von Ostseewasser in das Vistula-Delta verursachen. Unter ungünstigen Bedingungen kann es zu einem Wasserspiegelanstieg von bis zu 1,5 m kommen (ROTNICKI 1995). Das Risiko einer Flut steigt mit einem ansteigenden Meeresspiegel und einer erhöhten Anzahl von schweren Sturmergebnissen. Die Frequenz von gefährlichen Sturmfluten ist in der Bucht von Gdansk von 11 Ereignissen zwischen 1960 und 1979 auf 38 Ereignisse zwischen 1980 und 1999 angestiegen. Innerhalb des gefährdeten Bereiches liegen u.a. die historische Altstadt, Hafenanlagen, Industrie- und Wohngebiete, Lagerhäuser, öffentliche Verkehrsrouen und Strassen, Wasser- und Abwassersysteme, Kläranlagen als auch Grundwasserneubildungsbereiche, welche alle durch einen eventuellen Meeresspiegelanstieg überflutungsgefährdet wären.

3 Untersuchungsgebiet Pärnu, Estland

Pärnu, ein Seebad und ökonomisches Zentrum mit ca. 50 000 Einwohnern, liegt in der Pärnu Bucht an der südöstlichen Ostsee in Estland. Der bis zu 200 m breite Pärnu Fluss und der Zufluss Sauga teilen die Stadt. Die Stadt Pärnu ist 32 km² groß, mit einer maximalen Höhenlage von 10 m NN. Ungefähr 30% der Fläche liegt niedriger als 3,5 m NN. Das Gebiet um Pärnu besteht aus Sedimenten wie Ton, Silt und feinem Sand, welche während der verschiedenen Ostsee-Entwicklungsphasen abgelagert wurden (KONT et al. 2003). Abbildung 2 zeigt die möglichen Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs,

sowie den Überflutungsbereich bei einer 100-jährigen Sturmflut von 1,96m in Pärnu. Hierbei wurde das „high case“ Szenario benutzt (KLEIN 2004).

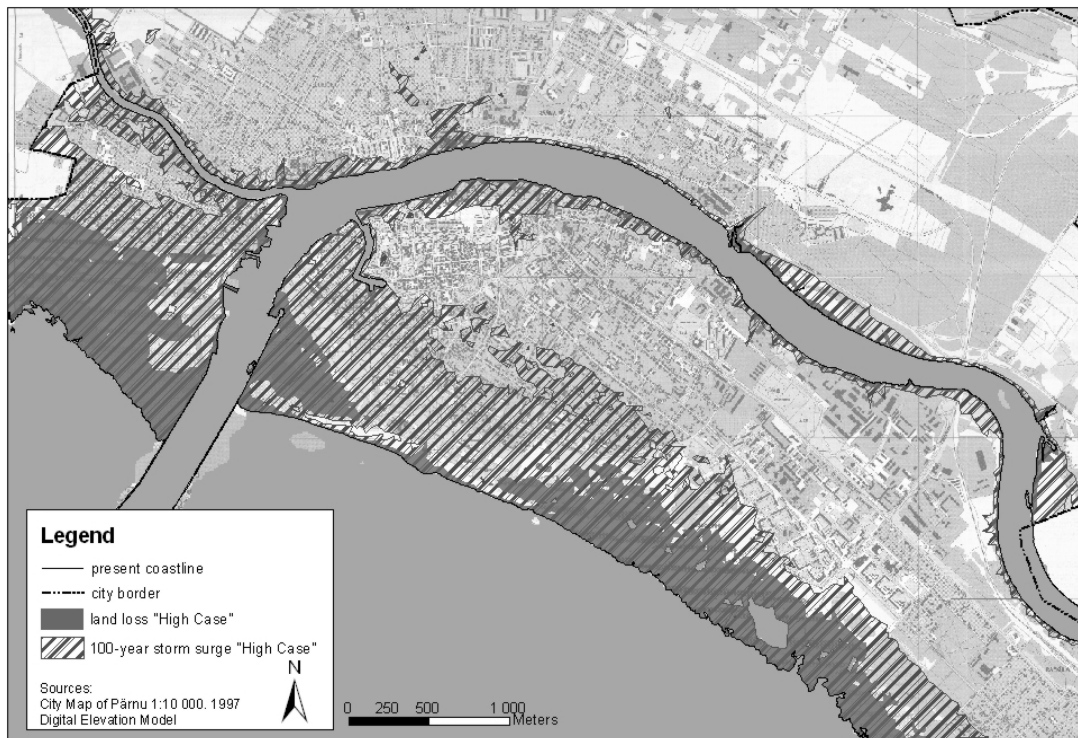


Abb.2: Das Ausmaß des Meeresspiegelanstiegs "high case" Szenario mit einer Sturmflut von 1,96 m in Pärnu, Estland.

4 Szenarien für die Küste Usedom

4.1 Methoden

Die historische Entwicklung der Außenküste

Anhand historischer Karten und Luftbilder wurde der Wandel der Küstenlinie während der letzten 170 Jahre ermittelt. Folgende Karten und Luftbildern wurden dabei verwendet: Preußisches Urmesstischblatt (1829), Messtischblatt (1885), Hansa Luftbilder (1937) und Luftbilder von 1998. Trotz der relativ hohen Verlässlichkeit dieser Quellen stellten die geringe Anzahl von Fixpunkten zum Georeferenzieren und Fehler auf den historischen Karten sowie ein unklarer Liniengang auf den Luftbildern unvermeidliche Fehlerquellen dar, die es bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen gilt.

Die einzelnen Blätter wurden zunächst mit der Bildverarbeitungssoftware Photoshop aufbereitet und dann in ArcView 3.2 georeferenziert. Als Bezugskarte diente die TK 1:10.000 in der Transverse-Mercator-Projektion mit dem Bessel-Ellipsoid. Danach konnten für die vier Zeitschnitte die Strandlinien digitalisiert werden.

Modell zur Berechnung von Akkumulations- und Abrasionsszenarien für die Außenküste

Für die Berechnungen standen folgende Daten zur Verfügung: Regional aufgelöste Windzeitreihen vom Schwedischen Meteorologisch-Hydrologischen Institut (SMHI) für vier Szenarien und zwei Kontrollläufe und vom Deutschen Wetterdienst (DWD) lokale Daten aus dem Ostsee-Seegangmodell

SGBAL. Zusätzlich zu den drei Meeresspiegelszenarien vom SMHI wurde noch eine Prognose von STIGGE (2003) verwendet.

Die Windangaben wurden zunächst in Anlehnung an BÖRNGEN et al. (1999) in 12 Windrichtungsklassen eingeteilt. Die Werte der vier SMHI-Szenarien wurden von den Werten der Kontrollläufe abgezogen, um die durch Klimaänderung verursachte Differenz zu ermitteln. Diese Differenzen wurden zu den Winddaten des DWD addiert und damit vier lokale Wind-Szenarien DWD 2100 a-d generiert. Zusammen mit den Wind-Seegangs-Relationen des SGBAL-Modells wurden daraus die lokalen Szenarien für die Verteilungen der signifikanten Wellenhöhen und Wellenperioden ermittelt.

Im nächsten Schritt wurde der potentielle Sedimenttransport entlang der Außenküste Usedom nach einer Methode von WAGNER (1999) berechnet. Aufgrund der Lage der Insel brauchten dabei nur die 6 Windrichtungsklassen 150° bis 330° berücksichtigt werden.

Aus dem potentiellen Sedimenttransport wurde der Betrag der Strandlinienverschiebung für jeweils 250 m Strandlänge und 25 Jahre nach STEPHAN & SCHÖNFELDT (1999) geschätzt. Für die Zeitabschnitte 2000 bis 2025 und 2025 bis 2050 wurden dazu die Klimadaten vom DWD verwendet, für die beiden Zeitabschnitte 2050 bis 2075 und 2075 bis 2100 die errechneten Werte DWD 2100 a-d. Zusätzlich wurde der Küstenrückgang berücksichtigt, der sich geometrisch aus dem erwarteten Meeresspiegelanstieg ergibt (STEPHAN & SCHÖNFELDT 1999).

Modell zur Berechnung der Grundwassersituation auf den Polderflächen

Große Flächen im NE der Insel Usedom werden von flachgründigen Moorbildungen eingenommen, die seit dem vergangenen Jahrhundert eingepoldert sind. Um diese Polderflächen auch zukünftig nutzen zu können, muss der heutige Grundwasserspiegel erhalten bleiben, bzw. bei weiterer Sackung der Mooroberfläche sogar noch gesenkt werden. Um den Einfluss der Meeresspiegelerhöhung auf die Höhe des Grundwassers zu berechnen, wurde das Modell MODFLOW verwendet. Die Fragestellung dabei lautete: Wie viel Grundwasser muss im Jahr 2100 geschöpft werden, um den heutigen Grundwasserstand halten zu können. Als Beispielfläche diente der Polder zwischen Zinnowitz und der Krumminer Wiek, der eine Fläche von ca. 10 km² aufweist. Eingangsgrößen für die Berechnungen der Grundwasserneubildung waren jeweils 30% der durch die vier SMHI-Szenarien prognostizierten Niederschläge (KUNTZE et al. 1994) und die k_f -Werte von Sand (8,6 m/d) und Torf (6 m/d) (SUCCOW & JOOSTEN 2001). Als durchschnittliches Niveau des Grundwasserstandes wurde -1 m NN angenommen.

4.2 Ergebnisse

Änderungen der Uferlinien seit 1829

Der Vergleich der Küstenlinien seit 1829 zeigt, dass Usedom sich in drei morphodynamische Bereiche einteilen lässt: Nordwestusedom vom Peenemünder Haken bis Zempin, Mittelusedom von Zempin bis Heringsdorf und Südostusedom von Heringsdorf bis Swinemünde.

Der Vergleich der jährlichen Abrasions- und Akkumulationsraten für die einzelnen Bereiche innerhalb der drei Zeitabschnitte zeigt unterschiedliches Sedimenttransportverhalten (Abb. 3). Auffällig sind die hohen Raten im Zeitabschnitt 1829 – 1885. Die geringen Werte nach 1885 sind überwiegend auf Aufspülungen und Sicherungsmaßnahmen am Streckelsberg zurück zu führen. Der Rückgang der Akkumulations- und Abrasionsraten vom Zeitabschnitt 2 (1885-1937) zum Zeitabschnitt 3 (1937-1998) könnte zusätzlich mit Änderungen der Windrichtungen zu erklären sein. STEPHAN & SCHÖNFELDT (1999) untersuchten die Änderungen der Windrichtungen in den beiden Zeiträumen 1885 bis 1939 und 1940 bis 1984. Dabei wurde festgestellt, dass der Wind aus der Richtung Süden im Zeitraum ab

1935 zunahm, bzw. der Wind aus Richtung Nord abnahm. Damit verbunden war auch eine Abnahme der Seegangsbelastung aus dem für Usedom maßgeblichen Sektor.

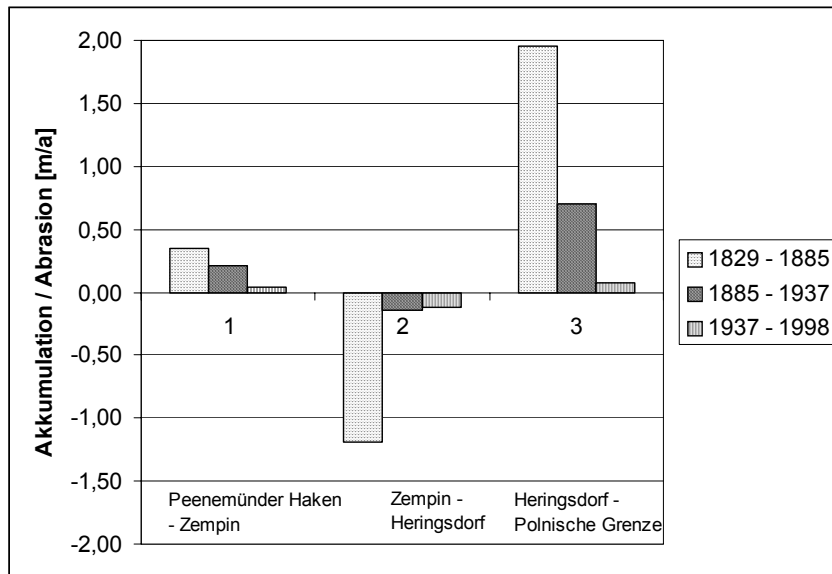


Abb. 3: Vergleich der drei Bereiche Nordwest-, Mittel- und Südostusedom für die Zeitabschnitte 1829 bis 1885 (1), 1885 bis 1937 (2) und 1937 bis 1998 (3).

Modell zur Berechnung von Akkumulations- und Abrasionsszenarien für die Außenküste

Im Folgenden werden nur die zwei der untersuchten vier Szenarien aufgeführt, die die geringste (DWD 2100b, abgeleitet aus dem SMHI-Szenario HCB2) bzw. die größte Klimaänderung (DWD 2100d, abgeleitet aus dem SMHI-Szenario MPIA2) aufweisen. Ein Vergleich der Windrichtungsverteilungen zeigt, dass beim DWD-2100d-Szenario die Belastung für Usedom geringer ist als beim DWD-2100b-Szenario. Auch bei der Verteilung der Windstärken auf die einzelnen Windrichtungsklassen ist die Belastung beim Szenario DWD-2100d geringer. Als Grund dieser bei stärkeren Klimaänderungen auftretenden geringeren Belastung der Usedomer Küste ist die veränderte Westwindhäufigkeit auszumachen, die wegen der NE-Exposition der Außenküste Usedom sich hier in einer geringeren Belastung aus dem maßgeblichen NE-Sektor niederschlägt.

Abbildung 4 zeigt die Abrasion und Akkumulation der kommenden 100 Jahre für beide Szenarien bei einem Meeresspiegelanstieg von 41 cm. In den Akkumulationsgebieten liegt der Küstenzuwachs beim DWD-2100b-Szenario bei durchschnittlich 60 m, beim DWD-2100d-Szenario bei 48 m. In den Abrasionsgebieten ist der Rückgang beim DWD-2100b-Szenario um ca. 2 m größer als beim DWD-2100d-Szenario (durchschnittlich 44 m bzw. 42 m). Bei einem Anstieg von 24 cm sind Durchschnittswerte von 39 m (Abrasion) und 65 m (Akkumulation) zu verzeichnen. Der Vergleich mit den historischen Werten zeigt, dass die Werte größtenteils realistisch sind. Lediglich im Bereich Ückeritz wurde statt der beobachteten Abrasion Akkumulation berechnet. Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Abrasionsraten vor allem durch die Höhe des Meeresspiegelanstiegs und weniger durch unterschiedliche Seegänge beeinflusst werden. Im Gegensatz dazu ist im Akkumulationsbereich der Seegang entscheidend. Hier sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Klimaszenarien mit gleichem Meeresspiegelanstieg größer, als zwischen den Szenarien mit gleichem Klima aber unterschiedlicher Meeresspiegellage. Das dürfte damit zusammenhängen, dass bei einem höheren Meeresspiegel einerseits mehr Material anfällt, aber der größer werdende Akkumulationsbereich wiederum vom höheren Wasserstand überdeckt wird und sich die beiden Effekte gegenseitig aufheben.

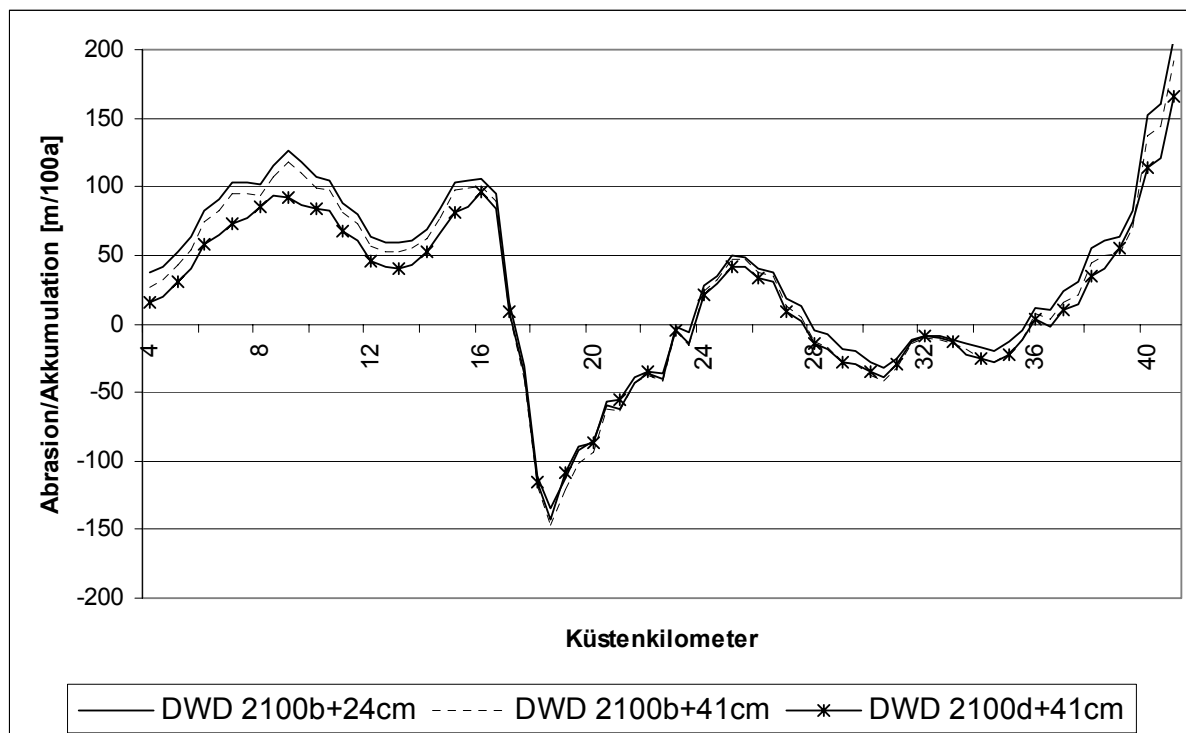


Abb. 4: Mögliche Akkumulations- und Abrasionsraten für die Klimaszenarien DWD 2100b und d bei einem Meeresspiegelanstieg von 24 bzw. 41 cm

Modell zur Berechnung der Grundwassersituation auf den Polderflächen

In Tabelle 1 sind die Erhöhungen der Wassermengen angegeben, die entsprechend der verschiedenen Szenarien zusätzlich abgepumpt werden müssten, um den heutigen Stand des Grundwasserspiegels zu erhalten. Laut Angabe des Wasser- und Bodenverbandes liegt für das Zeitintervall von 1998 bis 2003 die durchschnittliche Menge bei 2.433.333 m³/a. Bei den Ergebnissen ist zu bedenken, dass die anfallenden Mengen sich auf das Winterhalbjahr beschränken. Eine Diskussion über die Wirtschaftlichkeit und den Erhalt solcher Polderflächen aus ökologischer und sozioökonomischer Sicht hat in Zukunft zu folgen.

Tab. 1: Prozentuale Erhöhungen der Pumpmenge (vom Durchschnittswert 1998 bis 2001) aus dem Polder Krummin im Jahr 2100 für verschiedene Szenarien des Meeresspiegelanstiegs

Meeresspiegelanstieg [cm]	Erhöhung [%]
24	8
41	13
82	22

4.3 Anwendungsmöglichkeiten für Planer

Durch die Verarbeitung der Daten in ArcView ist eine praktikable Anwendung der Ergebnisse für Planer möglich. Die Ergebnisse werden als Themen zusammengefasst und können dann in einer GIS Applikation, wie sie beispielsweise von Röber programmiert wurde (siehe Kapitel 5), abgerufen wer-

den. So ist im Zuge von Bebauungsplänen ein punktuelles Abfragen der Ergebnisse möglich. Auch die Verschneidung mit anderen Themen ist gegeben, um gezielt Gebiete nach bestimmten Kriterien ausweisen zu können.

5 Die GIS-Komponente des DSF

Eine der vier Säulen des DSF ist die GIS-Analyse und die Erstellung thematischer Karten für den Planungsprozess. Hierfür müssen zwei Voraussetzungen geklärt werden, zum einen die aktuelle Datenlage und zum anderen die Anforderungen und Wünsche der Raumplanung.

5.1 Vorbetrachtungen

Beim Vergleich der einzelnen Regionalstudien zeichnete sich sehr deutlich ab, dass der **Datenbestand** der einzelnen Länder, Regionen oder Fachbehörden *sehr heterogen* ist.

Die Daten unterscheiden sich unter anderem nach Inhalt, Auflösung, Abdeckungsgrad und ihrer Zugänglichkeit. In Mecklenburg-Vorpommern ist die Verfügbarkeit von Geofachdaten für die Raumplaner im Vergleich zu den Projektpartnern gut, da unter anderem ein digitales Raumordnungskataster und eine digitale Version des Regionalen Raumordnungsprogramms existieren. Der Zugriff auf die Datenbestände anderer Fachbehörden, wie Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS), Topographische Karten unterschiedlicher Maßstäbe, Biotoptypen-/Nutzungstypenkarte (BNTK), Naturschutzgebiete und Grundwasserschutzgebiete ist gegeben.

Um Prognosen zur Meeresspiegeländerung auf Geofachdaten abzubilden, bedarf es eines hinreichend präzisen Höhenmodells. Diese Höhenmodelle sind für die meisten Regionen in der benötigten Genauigkeit nicht verfügbar. In Mecklenburg Vorpommern ist derzeit das DGM25 das Genaueste, jedoch für Analysen der Raumplanung noch zu ungenau. Um innerhalb des Projektes verschiedene Methoden und Ansätze zu prüfen, wurde auf der Basis der TK10 ein eigenes Höhenmodell von Usedom (später für die angrenzenden Regionen des Greifswalder Boddens und des Oderhaffs) modelliert.

Ebenfalls sehr unterschiedlich sind die **Anforderungen und Wünsche der Planungsbehörden** in den Regionalstudien des Projektes. Die Anforderungen reichen von einfachen Karten, welche die potentiell gefährdeten Flächen wertungsfrei aushalten, bis hin zu komplexen Analysen, die mit fiskalischen Werten durchgeführt werden. Das Amt für Raumordnung und Landesplanung Vorpommern bevorzugt möglichst neutrale Aussagen, welche von den Bearbeitern dann problemadäquat bewertet werden.

Diese sehr unterschiedlichen Voraussetzungen und Anforderungen zeigen den Bedarf eines **offenen GIS-Tools** für die Thematik „Meeresspiegelanstieg und Raumplanung“ auf. Unter „offen“ soll hierbei verstanden werden: offen für verschiedene Daten, aus verschiedenen Regionen in verschiedenen Auflösungen und offen für verschiedene Bewertungsmethoden.

5.2 Funktionsweise des GIS-Tools

Die Umsetzung dieses Tools erfolgte mit ArcView 3.2, da zum einen die Raumplanung mit ESRI-Produkten arbeitet und zum anderen das Shape-Format von vielen anderen Programmen als Exportformat unterstützt wird.

Das Endergebnis des Tools ist ein Ergebnistraster, in das die Objekte der einzelnen Themen entsprechend ihren Werten gewichtet einfließen. Einzelne verwertbare Teilergebnisse pro Thema sind die wertungsfreie Darstellung der betroffenen Objekte sowie ein Themenergebnistraster. Das folgende Struktogramm (Abb. 5) zeigt den schematisierten Programmablauf.

Im Schritt **Grundeinstellung** werden allgemeine Parameter wie Pfade abgefragt und die Basiseinstellungen für die Berechnung vorgenommen. Zu den Basiseinstellungen zählen die Breite einer einzelnen Rasterzelle (des Ergebnistrasters), die Wahl des Untersuchungsraumes (z.B. Ämter, Gemeinden etc.)

und der Betrag des Meeresspiegelanstiegs (Abb. 6). Die Berechnungen werden nicht an ein Szenario gebunden, diese zählen als Eingangsparameter. Somit können die Berechnungen jederzeit mit aktuelleren Ergebnissen von anderen Klimamodellen wiederholt werden.

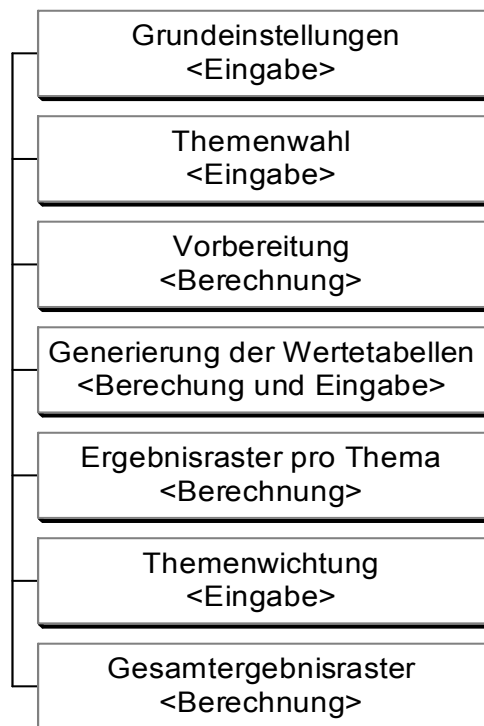


Abb. 5: Schematisierter Programmablauf

Im Schritt **Themenwahl** werden die zu analysierenden Themen (es sind die Geometrietypen Punkt, Linie oder Fläche erlaubt) und pro Thema die zu analysierende Objektklasse gewählt (Abb. 6).

Unter **Vorbereitung** wird das Verschneiden der einzelnen Themen mit dem Untersuchungsgebiet und der Meeresspiegelprognose verstanden. Hierbei entstehen die ersten verwertbaren Teilergebnisse, die neutrale Darstellung der betroffenen Objekte pro Thema (Abb. 6).

Im Schritt **Generierung der Wertetabellen** werden die Objekttypen der einzelnen Themen ausgelesen und die zugehörigen Werte abgefragt. Es besteht dabei die Möglichkeit, mit absoluten (€/ha, €/km etc.), relativen (Faktoren) oder verbalen (gering, mittel, hoch) Werten zu arbeiten.

Nachdem die Zuordnung von Wert zu Objekttyp erfolgt ist, kann der Transfer der Werte entsprechend ihres Anteils in einer Rasterzelle in das **Ergebnisraster pro Thema** erfolgen. Diese Ergebnisraster stellen das zweite verwertbare Teilergebnis der Berechnungen dar.

Bevor das Endergebnis berechnet werden kann, muss der Nutzer nun noch eine **Themenwichtung** durchführen. In dieser legt er fest auf welchen Wert jedes einzelne Thema normiert werden soll. Voreingestellt ist für jedes Thema der Wert 100, so dass alle Themen mit dem gleichen Gewicht in die Berechnung einfließen. Diese können nun nach oben (besonders wichtiger Sachverhalt) oder nach unten angepasst werden.

Danach erfolgt eine Summation der Teilergebnisse in das **Gesamtergebnisraster**, in welchem die einzelnen Räume entsprechend ihrer Wertigkeit unterschieden werden können (Abb. 7).

Sämtliche Einstellungen und Wertzuweisungen einer Analyse werden parallel zu der Berechnung in eine Textdatei abgelegt, dies ermöglicht die Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse.

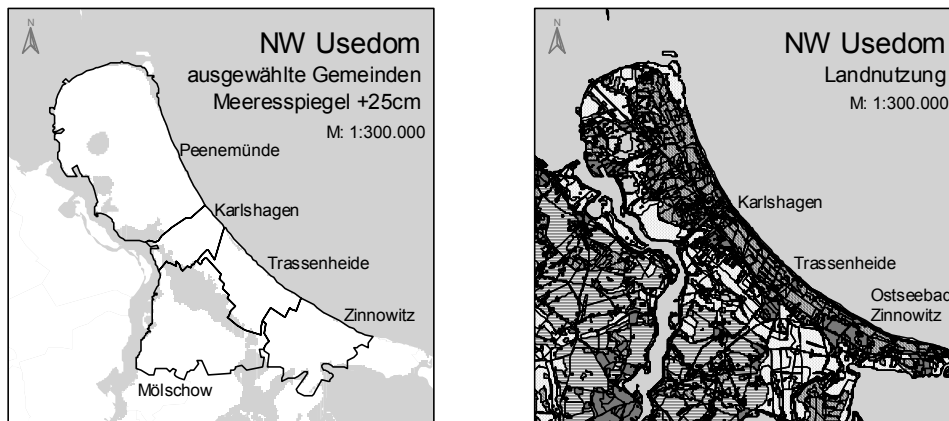


Abb. 6: (links) Beispiel der Parameter: Betrachtungsraum (fünf Gemeinden) und Meeresspiegelanstieg, (rechts) Landnutzung als Beispiel für ein Eingangsthema einer Analyse

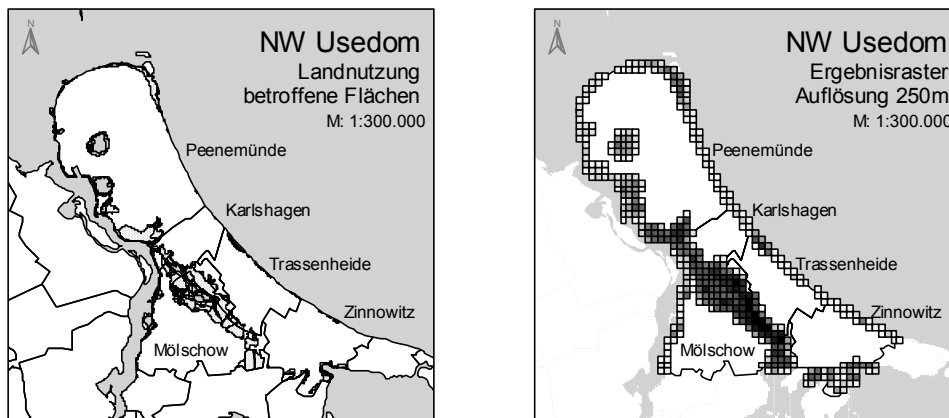


Abb. 7: (links) Teilergebnis – neutrale Darstellung der betroffenen Flächen, (rechts) Ergebnisraster einer Analyse

5.3 Einsatzmöglichkeiten des Tools

Das erste Teilergebnis kann benutzt werden, um Vorsorgeräume für potentiell überflutungsgefährdete Areale auszuweisen. Diese könnten in das Regionale Raumordnungsprogramm einfließen, sofern der Gesetzgeber einen solchen Ordnungsraum für notwendig erachtet. Auch sind diese räumlich differenzierenden Darstellungen wertvoll als zusätzliche, bislang so nicht aufbereitete Hintergrundinformation und als Abwägungsmaterial bei Stellungnahmen der Regionalplaner zu einzelnen Objektplanungen und zur Bauleitplanung der Kommunen.

Das Endergebnis kann helfen, um die im Betrachtungsraum notwendigen Maßnahmen entsprechend ihrer Priorität effizient zu planen.

6 Literatur

BÖRNGEN, M., SCHÖNFELDT, H.-J., RIECHMANN, F. AND TETZLAFF, G. (1999): Seegangsbelastung vor der Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern – Grundlagen des Seegangs atlas für die Gewässer vor dem Darß und Zingst. Küste 61: S. 127 - 147

- KLEIN, J. (2004): GIS based impact assessment of a future sea level change on the city of Pärnu/Estonia, Master Thesis, Universität Stuttgart
- KONT, A., JAAGUS, JAAK AND RAIVO AUNAP (2003): Climate change scenarios and the effect of sea-level rise for Estonia, *Global and Planetary Change* **36**, 1-15.
- KUNTZE, H., ROESCHMANN, G., SCHWERDTFEGER, G. (1994): Bodenkunde, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, 424 S.
- MEIER, MARKUS H.E, BROMAN, BARRY AND ERIK KJELLSTRÖM (2004): Simulated sea level in past and future climates of the Baltic Sea. *Climate Research*, **27**. 59-79.
- ROTNIKI, K. (Ed.) (1995): Polish Coast: Past, Present and Future, *Journal of Coastal Research, Special Issue* **22**, 308.
- SCHMIDT-THOMÉ, P. (ed.) (2003): SEAREG Sea Level Change affecting the Spatial Development in the Baltic Sea Region, *1st Progress Report October 2002-March 2003*, Geological Survey of Finland, Espoo, Finland
- SCHMIDT-THOMÉ, P., STAUDT, M., KALLIO, H. & KLEIN, J. (2004): Developing a Decision Support Frame to Estimate Possible Future Impacts of Sea Level Changes on Soil Pollution, In: Trends in Remediation of Soils and Sediments, Integrated Environmental Technology series, IWA Publishing, London (submitted)
- STAUDT, M., KALLIO, H. & SCHMIDT-THOMÉ, P. (2004): Modelling a future sea level change scenario affecting the spatial development in the Baltic Sea Region – First results of the SEAREG project, In Schernewski and N. Löser (Editors): *Managing the Baltic Sea, Coastline Reports 2* (2004), p.195-199.
- STEPHAN, M., SCHÖNFELDT, H.-J. (1999): Küstenentwicklungsmodell zur langfristigen Berechnung des Sedimenttransports in Abhängigkeit von Windverteilung und welleninduziertem Brandungsstrom an der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns zwischen Warnemünde und Hiddensee. *Küste* **61**: S. 149 – 176
- STIGGE, H.-J. (2003): Zur möglichen Entwicklung des mittleren Wasserstandes im 21. Jahrhundert. *Küste Sonderheft*: S. 102 - 105
- SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (2001): Landschaftsökologische Moorkunde, Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart, 622 S.
- WAGNER, H. (1999): Küstenschutzkonzeption Hiddensee, Abschlußbericht, unveröf. Bericht, 83 S.
- WYRZYKOWSKI, T. (1985): Map of the recent vertical movements of the surface of the Earth crust on the territory of Poland, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa.

Adressen

Hartmut Rudolphi, Bernd Röber, Prof. Reinhard Zölitz-Möller, Prof. Reinhard Lampe
Universität Greifswald, Institut für Geographie und Geologie
Jahnstr. 16
D-17487 Greifswald

Philipp Schmidt-Thomé, Michael Staudt
Geological Survey of Finland (GTK)
Betonimiehenkuja 4
P.O. Box 96, Fin – 02151 Espoo

E-mail: hartmutrudolphi@yahoo.de, roeber@uni-greifswald.de, zoelitz@uni-greifswald.de, lampe@uni-greifswald.de, philipp.schmidt-thome@gtk.fi, michael.staudt@gtk.fi