Die Küste, 76 FAK (2009), 1-256

Heft 76 Jahr 2009

## Die Küste

ARCHIV FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK AN DER NORD- UND OSTSEE

ARCHIVE FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY ON THE NORTH SEA AND BALTIC COAST

HERAUSGEBER: KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN

# Die Küste

#### ARCHIV FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK AN DER NORD- UND OSTSEE

ARCHIVE FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY ON THE NORTH SEA AND BALTIC COAST

Heft 76 · Jahr 2009

Herausgeber: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen

Kommissionsverlag: Boyens Medien GmbH & Co. KG, Heide i. Holstein Druck: Boyens Offset

#### ISSN 0452-7739 ISBN 978-3-8042-1067-7

#### Anschriften der Verfasser dieses Heftes:

Brzank, Alexander, Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und Geo-Information, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover, a.brzank@gom.com; Buß, Thomas, Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer, Sachsenkamp 1-3, 20097 Hamburg, Thomas.Buss@lsbg.hamburg.de; Dibbern, Stefanie, Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein Husum, Herzog-Adolf-Str. 1, 25813 Husum, stefanie.dibbern@lkn.landsh.de; Eckhold, Jörg-Peter, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest, Schloßplatz 9, 26603 Aurich, joerg-peter.eckhold@wsv.bund.de; Gönnert, Gabriele, Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer, Sachsenkamp 1-3, 20097 Hamburg, Gabriele.Goennert@lsbg.hamburg.de; Göpfert, Jens, Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover, goepfert@ipi. uni-hannover.de; Heinert, Michael, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Gaußstr. 22, 38106 Braunschweig, m.heinert@tu-bs.de; Heipke, Christian, Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover, heipke@ipi.uni-hannover.de; Hofstede, Jacobus, Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Mercatorstr. 3, 24062 Kiel, jacobus.hofstede@mlur.landsh.de; Horst, Sebastian, Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen, Podbielskistr. 331, 30659 Hannover, sebastian.horst@lgn.niedersachsen.de; Jäger, Bernd, Staatliches Amt für Umwelt und Natur Rostock, Erich-Schlesinger-Str. 35, 18059 Rostock, bernd.jaeger@staunhro.mv-regierung.de; Jahn, Cord-Hinrich, Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen, Podbielskistr. 331, 30659 Hannover, cord-hinrich.jahn@ lgn.niedersachsen.de; Jensen, Jürgen, Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Abteilung Wasserbau und Hydromechanik, Paul-Bonatz-Str. 9-11, 57076 Siegen, jensen@fb10.unisiegen.de; Mohr, Axel, Der Senator für Umwelt, Bau, Verkehr und Europa, Ansgaritorstr. 2, 28195 Bremen, axel.mohr@umwelt.bremen.de; Much, Dagmar, Hamburg Port Authority, Neuer Wandrahm 4, 20457 Hamburg, Dagmar.Much@hpa.hamburg.de; Müller-Navarra, Sylvin, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie Hamburg, Bernhard-Nocht-Str. 78, 20359 Hamburg, muellernavarra@bsh.de; Niemeier, Wolfgang, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Gaußstr. 22, 38106 Braunschweig, W.Niemeier@tu-bs. de; Rost, Christian, Technische Universität Dresden, Geodätisches Institut, Georg-Behr-Str. 7, 01062 Dresden, christian.rost@tu-dresden.de; Schenk, Alexander, Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen, Podbielskistr. 331, 30659 Hannover, alexander.schenk@lgn.niedersachsen. de; Sörgel, Uwe, Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover, soergel@ipi.uni-hannover.de; Strotmann, Thomas, Hamburg Port Authority, Neuer Wandrahm 4, 20457 Hamburg, thomas.strotmann@hpa.hamburg.de; Sudau, Astrid, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz, sudau@bafg.de; Tengen, Dieter, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Gaußstr. 22, 38106 Braunschweig, d.tengen@tu-bs.de; Thorenz, Frank, Nds. Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Jahnstr. 1, 26506 Norden, Frank.Thorenz@nlwkn-nor.niedersachsen.de; Thumm, Sigrid, Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer, Sachsenkamp 1–3, 20097, Hamburg, sigrid.thumm@lsbg.hamburg. de; van Riesen, Dirk, Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein Husum, Herzog-Adolf-Str. 1, 25813 Husum, dirk.vanriesen@lkn-sh.de; von Lieberman, Nicole, Technische Universität Hamburg-Harburg, Denickestr. 22, 21073 Hamburg, vonlieberman@ tu-harburg.de; von Storch, Hans, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Max-Planck-Str. 1, 21502 Geesthacht, hvonstorch@web.de; Wahl, Thomas, Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, Abteilung Wasserbau und Hydromechanik, Paul-Bonatz-Str. 9–11, 57076 Siegen, thomas.wahl@uni-siegen.de; Wanninger, Lambert, Technische Universität Dresden, Geodätisches Institut, Georg-Behr-Str. 7, 01062 Dresden, lambert.wanninger@tu-dresden.de; Weiss, Robert, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz, weiss@bafg.de; Weisse, Ralf, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Institut für Küstenforschung, Max-Planck-Str. 1, 21502 Geesthacht, ralf.weisse@gkss.de.

Die Küste, 76 FAK (2009), 1-256

Geschäftsführer: Dr.-Ing. RAINER LEHFELDT, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg Redaktionsleiter "Die Küste": Dipl.-Ing. DETLEF SCHALLER, Bismarckstraße 13, 25813 Husum

Die Verfasser sind für den Inhalt der Aufsätze allein verantwortlich. Nachdruck aus dem Inhalt nur mit Genehmigung des Herausgebers gestattet: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Geschäftsstelle, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg.

Vorsitzender des Kuratoriums: Dr. KLAUS SCHINDEL, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Heinemannstraße 2, 53175 Bonn

#### Inhaltsverzeichnis

JACOBUS HOFSTEDE, THOMAS BUSS, JÖRG-PETER ECKHOLD, AXEL MOHR, BERND JÄGER, THOMAS STROTMANN, FRANK THORENZ und NICOLE VON LIEBERMAN Küstenschutzstrategien – Bericht einer FAK-Arbeitsgruppe	1
JENS GÖPFERT, UWE SÖRGEL, CHRISTIAN HEIPKE und ALEXANDER BRZANK Integration von Informationen über Echoverteilung und Rückstreuintensitäten in den Filterprozess von Laserdaten	75
ALEXANDER BRZANK, CHRISTIAN HEIPKE, JENS GÖPFERT und UWE SÖRGEL Ableitung Digitaler Geländemodelle im Wattenmeer aus luftgestützten Laserscannerdaten	91
LAMBERT WANNINGER, CHRISTIAN ROST, ASTRID SUDAU, ROBERT WEISS, WOLFGANG NIEMEIER, DIETER TENGEN, MICHAELA HEINERT, CORD-HINRICH JAHN, SEBASTIAN HORST und ALEXANDER SCHENK Bestimmung von Höhenänderungen im Küstenbereich durch Kombination geodätischer Messtechniken	121
DIRK VAN RIESEN und DAGMAR MUCH Modellierung morphodynamischer Prozesse an sandigen Brandungsküsten	181
Sylvin H. Müller-Navarra Über neuere Verfahren der Wasserstands- und Sturmflutvorhersage für die deutsche Nordseeküste	193
STEFANIE DIBBERN und SYLVIN H. MÜLLER-NAVARRA Wasserstände bei Sturmfluten entlang der nordfriesischen Küste mit den Inseln und Halligen	205
GABRIELE GÖNNERT, JÜRGEN JENSEN, HANS VON STORCH, SIGRID THUMM, THOMAS WAHL und RALF WEISSE Der Meeresspiegelanstieg. Ursachen, Tendenzen und Risikobewertung	225
Errata Fehlerberichtigung "Die Küste" 74	257

### Küstenschutzstrategien Bericht einer FAK-Arbeitsgruppe

#### Vorwort

Der Fachausschuss für Küstenschutzwerke (FAK) wurde 1972 als gemeinsamer Ausschuss der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), (vormals Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau), und der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. (HTG) gegründet und mit der Aufgabe betraut, Empfehlungen für die funktionelle und konstruktive Planung sowie wirtschaftliche Bauausführung von Küstenschutzwerken an Nord- und Ostsee nach dem neuesten Stand der Technik zu erarbeiten. Veröffentlicht wurden bisher die "Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken" als EAK 1981, EAK 1993 und EAK 2002. Sie wurden durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) in "Die Küste" 36/1981, 55/1993 und 65/2002 abgedruckt. Ende 2009 gehören dem Ausschuss folgende Herren an:

- Buß, Thomas, Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (Hamburg),
- Daemrich, Karl-Friedrich, Dr.-Ing., Franzius-Institut der Universität Hannover,
- Eckhold, Jörg-Peter, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest (Aurich),
- Eggert, Wolf-Dietrich, Dr.-Ing.,
- Fröhle, Peter, Dr.-Ing., Institut für Umweltingenieurwesen der Universität Rostock,
- Heinrichs, Michael, Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (Husum),
- Herr, Burghard, Dr.-Ing. (Hamburg),
- Hofstede, Jacobus, Dr., Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (Kiel),
- Jäger, Bernd, Staatliches Amt für Umwelt und Natur (Rostock),
- Kortenhaus, Andreas, Dr.-Ing., Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig,
- Mohr, Axel, Senator für Umwelt, Bau, Verkehr und Europa der freien Hansestadt Bremen (als Gast),
- Peters, Karsten, Dr.-Ing., IMS Ingenieurgesellschaft (Hamburg),
- Pohl, Martin, Dr.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau (Hamburg),
- Probst, Bernd, Vorsitzender des Fachausschusses,
- Schade, Daniel, Dr.-Ing., Ingenieurbüro Mohn GmbH (Husum),
- Schlie, Siegmund, Fa. Hirdes (Rostock),
- Schüttrumpf, Holger, Prof. Dr.-Ing., Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen,
- Schirmacher, Rüdiger, Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (Husum),
- Sommermeier, Knut, Staatliches Amt für Umwelt und Natur (Rostock) (als Gast),
- Strotmann, Thomas, Hamburg Port Authority (Hamburg),
- Temmler, Helmut, Dr.,
- Thorenz, Frank, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küstenschutz und Naturschutz, Betriebsstelle Norden/Norderney (Norden).

2

Die Mitglieder des Ausschusses für Küstenschutzwerke wurden nach dem Grundsatz berufen, Küsteningenieure der Wasserbau- und Wasserwirtschaftsbehörden, der Universitäten, von Planungsbüros und von einzelnen Bauunternehmen zusammenzuführen, um sowohl Fragen der Bemessung als auch die funktionelle und konstruktive Gestaltung der Küstenschutzwerke zu behandeln.

Der Fachausschuss bearbeitet zurzeit folgende Themen:

- Sickervorgänge im Deich
- Bemessung und Unsicherheit
- Deichverteidigung bei und nach Sturmflut
- Deichvorland
- Dünen als HW-Schutz
- Hochwasserschutzwände.

Immer wichtiger – besonders im Hinblick auf künftige Entwicklungen – werden aber auch Abstimmungen über strategische Planungen. In den Strategien der Küstenländer werden die langfristigen Ziele und Grundsätze für den Küstenschutz festgelegt und die Rahmenbedingungen beschrieben. Externe Faktoren wie gesellschaftlicher Wertewandel, politische und gesetzliche Vorgaben sowie Änderungen der natürlichen Rahmenbedingungen bedingen eine regelmäßige Überprüfung und Fortschreibung dieser Strategien. Eine Übersicht über die in den Küstenländern umgesetzten Strategien kann hierzu wichtige Grundlagen liefern. Aus diesem Grund hat der Fachausschuss für Küstenschutzwerke erstmalig einen Statusbericht über Küstenschutzstrategien erstellt. Hierzu wurde eine Arbeitsgruppe mit folgenden Mitgliedern eingerichtet:

- Jacobus Hofstede, Dr. (Obmann),
- Thomas Buß,
- Jörg-Peter Eckhold,
- Axel Mohr,
- Bernd Jäger,
- Thomas Strotmann und
- Frank Thorenz.

Als externer Berater wurde Prof. Nicole von Lieberman, Institut für Wasserbau der TU Hamburg-Harburg hinzugezogen.

Folgende Themen wurden bearbeitet:

- 1) eine Grundsatzerörterung über Strategien des Küstenschutzes und
- 2) eine Bestandsaufnahme der in den Küstenländern angewendeten Küstenschutzstrategien einschließlich einer Synopse.

Die Ergebnisse sind in den Kapiteln zwei und drei dargelegt. In Kapitel vier folgt ein Ausblick mit künftigen Herausforderungen und möglichen Lösungsoptionen. Der Bericht wurde am 19.10.2009 vom Fachausschuss mit einem herzlichen Dank an die Bearbeiter einstimmig verabschiedet und hiermit veröffentlicht.

Kiel, im Oktober 2009

Bernd Probst Ausschussvorsitzender

#### Zusammenfassung

Entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste liegen 12 000 km<sup>2</sup> Küstenniederungen mit rd. 2,5 Millionen Einwohnern. Soziale und wirtschaftliche Nutzungen in diesen Niederungen wurden erst durch den Küstenschutz ermöglicht bzw. können langfristig nur unter der Voraussetzung eines funktionierenden Küstenschutzes stattfinden. Bedingt durch die unterschiedlichen Rahmenbedingungen und die von Land zu Land abweichende Geschichte der Sturmflutkatastrophen gibt es heute unterschiedliche Küstenschutzstrategien in den fünf deutschen Küstenländern. In den Strategien werden die langfristigen Ziele und Grundsätze für den Küstenschutz festgelegt und die Rahmenbedingungen beschrieben. Externe Faktoren wie gesellschaftlicher Wertewandel, politische und gesetzliche Vorgaben sowie Änderungen der natürlichen Rahmenbedingungen wie der Klimawandel bedingen eine regelmäßige Überprüfung und Fortschreibung dieser Strategien. Eine Übersicht über die in den Küstenländern umgesetzten Strategien kann hierzu wichtige Grundlagen liefern. Aus diesem Grund hat der Fachausschuss für Küstenschutzwerke erstmalig einen Statusbericht über Küstenschutzstrategien erstellt. Folgende Themen wurden bearbeitet: (1) eine Grundsatzerörterung über Strategien des Küstenschutzes und (2) eine Bestandsaufnahme der in den Küstenländern angewendeten Küstenschutzstrategien einschließlich einer Synopse. Die Ergebnisse sind in den Kapiteln zwei und drei dargelegt. In Kapitel vier folgt ein Ausblick mit künftigen Herausforderungen und möglichen Lösungsoptionen. Der Bericht wurde am 19.10.2009 vom Fachausschuss einstimmig verabschiedet und hiermit veröffentlicht.

#### Schlagwörter

Küstenschutz, Küstenschutzstrategie, Ländervergleich, Klimawandel, Küstenrisikomanagement

#### Summary

About 12,000 km<sup>2</sup> of coastal flood-prone lowlands with 2.5 million inhabitants are situated along the North Sea and Baltic Sea coasts of Germany. Social and economic uses in these lowlands were made possible by, and depend upon, a functioning coastal flood defence and coastal protection or, rather, coastal risk management (CRM). As a result of varying boundary conditions and storm flood histories, CRM-strategies differ among the five German coastal States Bremen, Hamburg, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern and Schleswig-Holstein. The strategies contain the long-term goals and aims for CRM as well as a description of the respective physical and socioeconomic boundary conditions. External factors like societal change, political and legal prescriptions as well as changes in natural boundary conditions like climate change determine a regular evaluation and updating of the strategies. An overview of the five CRM strategies may deliver valuable information for this. Consequently, the German Board for Coastal Flood Defence and Protection Works (FAK) established, for the first time, a status report with the following themes: (1) a principal consideration of CRM strategies, and (2) a survey of the presently applied CRM strategies in the five coastal States, including a synopsis. The results are described in the chapters 2 and 3. Chapter 4 contains an outlook with future challenges and possible solutions.

#### Keywords

Coastal protection, coastal strategie, comparison of strategies, climate change, coastal risk management

#### Inhalt

1.	Einleitung	5
2.	Strategien des Küstenschutzes	7
	2.1 Einführung	7
	2.2 Deutschland im internationalen Raum	9
3.	Bund- und Länderüberblick	12
	3.1 Einführung	12
	3.2 Bund- und Länder-Kooperationen	12
	3.2.1 Gemeinschaftsaufgabe "Verbesserung der Agrarstruktur und des	
	Küstenschutzes"	14
	3.2.2 Forschung im Kusteningenieurwesen	15
	3.2.3 Internationale Zusammenarbeit	16
	3.2.4 Integriertes Kustenzonenmanagement	16
	3.2.5 Ausnahme vom Grundsatz der Landerzustandigkeit	1/
	3.3 Hansestadt Bremen	19
	3.3.1 Aligemeiner Überblick	19
	3.3.2 Kustenschutzstrategie der Hansestadt Bremen	20
	3.3.5 Recutice Grundlagen und administrative Strukturen	21
	3.5.4 Demessungskonzepte	22
	3.5.5 Weitergenende Oberlegungen und Ausblick	24
	3.4.1 Allgamainar Überblick	20
	3.4.2 Küstenschutzstrategie der Hansestadt Hamburg	20
	3.4.3 Rechtliche Grundlagen und administrative Strukturen	30
	3.4.4 Bemessungskonzente	32
	3 4 5 Weitergehende Überlegungen und Ausblick	33
	3.5 Mecklenburg-Vorpommern	35
	3.5.1 Allgemeiner Überblick	35
	3.5.2 Küstenschutzstrategie des Landes Mecklenburg-Vorpommern	36
	3.5.3 Rechtliche Grundlagen und administrative Strukturen	37
	3.5.4 Bemessungskonzepte	40
	3.5.5 Weitergehende Überlegungen und Ausblick	42
	3.6 Niedersachsen	45
	3.6.1 Allgemeiner Überblick	45
	3.6.2 Küstenschutzstrategie des Landes Niedersachsen	47
	3.6.3 Rechtliche Grundlagen und administrative Strukturen	49
	3.6.4 Bemessungskonzepte	51
	3.6.5 Weitergehende Überlegungen und Ausblick	52
	3.7 Schleswig-Holstein	54
	3.7.1 Allgemeiner Überblick	54
	3.7.2 Küstenschutzstrategie des Landes Schleswig-Holstein	56
	3.7.3 Rechtliche Grundlagen und administrative Strukturen	57
	3.7.4 Bemessungskonzepte	59
	3.7.5 Weitergehende Überlegungen und Ausblick	61
	3.8 Synopse	64
	3.8.1 Strategien	64
	3.8.2 Allgemeine Rahmenbedingungen	64
	3.8.3 Rechtliche Rahmenbedingungen	65
	3.8.4 Administrative Strukturen und Finanzierung	66
	3.8.5 Bemessungskonzepte	66
4.	Ausplick	68
	<b>4.1</b> EG-110cflwasserfisikofflanagementrichtlinie	60 60
	4.2 Anipassung an den Kinnawander	טא 70
5	T.J. INISINUKUIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIAUUII	70
э.		12

#### 1. Einleitung

Entlang der deutschen Nord- und Ostseeküste liegen 12.000 km<sup>2</sup> Küstenniederungen mit rd. 2,5 Millionen Einwohnern (Abb. 1, Tab. 1). Soziale und wirtschaftliche Nutzungen in diesen Niederungen wurden erst durch den Küstenschutz ermöglicht bzw. können langfristig nur unter der Voraussetzung eines funktionierenden Küstenschutzes stattfinden. Die Gewährleistung des Küstenschutzes erfordert erhebliche Anstrengungen. In der Tabelle 2 sind die jährlichen investiven Ausgaben des Küstenschutzes seit 1999 aufgelistet. Demnach wurden seit 2000 fast 1,3 Mrd. Euro für Baumaßnahmen in Deutschland aufgewendet.



Abb. 1: Durch Sturmfluten gefährdete Gebiete an der deutschen Nord- und Ostseeküste

Seit etwa zwei Jahrtausenden schützen sich die Einwohner der norddeutschen Küstenniederungen vor Überschwemmungen und Landabbruch. Sie entwickelten – abhängig von den natürlichen Rahmenbedingungen sowie den technischen, finanziellen und personellen Möglichkeiten – hierzu Schutzstrategien. Eine alte Redewendung, die bereits Kriterien einer solchen Strategie erfüllt, besagt: "Wer nich will dieken, der mut wieken!" (Spade-Landrecht, 16. Jh.). Bedingt durch die unterschiedlichen Rahmenbedingungen und die von Land zu Land abweichende Geschichte der Sturmflutkatastrophen gibt es heute unterschiedliche Küstenschutzstrategien in den fünf deutschen Küstenländern. Das föderale System in Deutschland, wonach, da der Bund bisher auf die Ausübung seiner Gesetzgebungskompetenz verzichtet hat, die Zuständigkeit für den Küstenschutz bei den jeweiligen Bundesländern liegt, hat ebenfalls zu dieser Varianz beigetragen. 6

Land	Fläche (km <sup>2</sup> )	Einwohner	Hauptdeiche (km)
Hansestadt Bremen	360	549 000	74
Hansestadt Hamburg	270	180 000	103
Mecklenburg-Vorpommern	1 080	182 000	218 (+ 60 km Vollschutzdünen)
Niedersachsen	6 600	1 200 000	645
Schleswig-Holstein	3 691	292 000	431
Summe	12 001	2 403 000	1 471

Tab. 1: Flächen und Einwohner der durch Sturmfluten gefährdeten Gebiete in Deutschland

Tab. 2: Investive Ausgaben (EU-, Bundes- und Landesmittel) für den Küstenschutz in den Ländern seit 2000 (in Mio. €)

	Bremen	Hamburg	Mecklenburg- Vorpommern	Nieder- sachsen	Schleswig- Holstein	Gesamt	Bundesanteil (GAK)
2000		48,2	16,9	57,5	41,4	164,0	113,5
2001		56,2	18,3	48,1	36,6	159,2	92,2
2002	0,3	49,1	15,6	50,4	34,5	149,9	77,2
2003		32,0	16,2	56,7	29,2	134,1	80,4
2004		33,4	13,2	49,1	31,0	126,7	65,5
2005		41,3	13,6	51,4	32,8	139,1	67,4
2006	1,0	39,2	13,3	49,8	30,8	134,1	65,7
2007	3,1	26,3	13,7	63,6	36,4	143,1	81,0
2008	4,2	25,0	12,6	65,7	35,8	143,3	60,3
Gesamt:	8,6	350,7	133,4	492,3	308,5	1.293,5	703,2

In den Strategien der Küstenländer werden die langfristigen Ziele und Grundsätze für den Küstenschutz festgelegt und die Rahmenbedingungen beschrieben. Externe Faktoren wie gesellschaftlicher Wertewandel, politische und gesetzliche Vorgaben sowie Änderungen der natürlichen Rahmenbedingungen bedingen eine regelmäßige Überprüfung und Fortschreibung dieser Strategien. Eine Übersicht über die in den Küstenländern umgesetzten Strategien kann hierzu wichtige Grundlagen liefern. Aus diesem Grund hat der Fachausschuss für Küstenschutzwerke entschieden, erstmalig einen Statusbericht über Küstenschutzstrategien zu erstellen.

Folgende Themen wurden abgearbeitet: (1) eine Grundsatzerörterung über Strategien des Küstenschutzes, und (2) eine Bestandsaufnahme der in den Küstenländern angewendeten Küstenschutzstrategien einschließlich einer Synopse. Die Ergebnisse sind in den Kapiteln zwei und drei dargelegt. In Kapitel vier folgt ein Ausblick mit künftigen Herausforderungen und möglichen Lösungsoptionen.

#### 2. Strategien des Küstenschutzes

#### 2.1 Einführung

Vor dem Hintergrund sich zunehmend überlagernder Nutzungen in Küstenräumen und des hieraus resultierenden Konfliktpotentials wird auf nationaler und internationaler Ebene die Entwicklung von integrierten Strategien für das Küstenrisikomanagement gefordert. Generell bezweckt eine Strategie ein zielorientiertes Vorgehen mittels eines langfristig ausgelegten Planes. Zentrale Merkmale eines solchen Plans sind:

- Zukunftsbezogenheit (der Plan soll mittel- bis langfristige Lösungen bieten),
- Ungewissheit (ein Mangel an Wissen über die künftigen Entwicklungen, der im Plan – zum Beispiel mittels Szenarien und flexiblen Lösungen – berücksichtigt wird),
- Rationalität (angestrebter Zweck und verwendete Mittel sollen in einem vernünftigen Maß zueinander stehen),
- Prozesscharakter (die Planung verläuft mehrstufig und iterativ als Abfolge von Phasen),
- Gestaltungscharakter (aktive Mitgestaltung der Zukunft), und
- Informationscharakter (die Planung liefert Informationen für Entscheidungsträger, Betroffene und andere).

Für den Küstenschutz zeigt – in Erweiterung der Definition nach DIN 4047-2 – eine Strategie notwendige und langfristige Maßnahmen zur Sicherung der Küsten des Festlandes und der Inseln gegen die zerstörerischen Einwirkungen des Meeres auf. Dabei wird zwischen Hochwasserschutz (Schutz vor sturmflutbedingten Überschwemmungen) und Erosionsschutz (Schutz gegen Uferrückgang und Erosion) unterschieden. Hinter dem Begriff Küstenschutz steckt somit das Grundbedürfnis der Bevölkerung, den Küstenbereich als einen wichtigen Siedlungs-, Wirtschafts- und Kulturraum vor diesem Einwirkungen als Teil der Daseinsvorsorge zu schützen.

Das "Intergovernmental Panel on Climate Change" hat im Jahre 1990 drei Küstenschutzstrategien formuliert (IPCC, 1990) (Abb. 2):

- Rückzug: Verlassen der gefährdeten Küstenniederungen,
- Anpassung: angepasste Nutzungen in den gefährdeten Küstenniederungen (zum Beispiel Häuser auf Warften, Aquakultur statt Landwirtschaft), und
- Verteidigung: Schützen der gefährdeten Küstenniederungen, zum Beispiel durch die Anlage von Deichen oder Verstärkung von Dünen.

Eine klare Trennung zwischen den einzelnen Strategien ist nicht immer möglich; die Grenzen sind eher fließend. PROBST (1994) definiert noch eine vierte Küstenschutzstrategie; die des Vordringens. Das Meer wird zurück gedrängt, zum Beispiel mittels Aufschüttung oder Neueindeichung. Gebiete, die im Einflussbereich des Sturmflutgeschehens liegen, erhalten somit einen Schutzstandard (siehe Kap. 4.2).

Wie nachfolgend beschrieben, haben die deutschen Küstenbewohner diese Strategien im Laufe der Zeit angewendet. Die Besiedlung der Küstenniederungen an der Nordsee begann vor mehr als 2000 Jahren, als Bewohner der höher gelegenen Gebiete sich hier aus verschiedenen Gründen niederließen. Auf die stetig wachsende Bedrohung durch Sturmfluten – seit nunmehr mehreren tausend Jahren steigt der Meeresspiegel mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten an – reagierten die Bewohner der Küstenregionen mit unterschiedlichen Strategien. In einer Phase eines rascheren Vordringens des Meeres erfolgte zunächst ein Rückzug aus den überfluteten Gebieten in höher gelegene Flächen. Etwa zu Beginn unserer Zeitrechnung wurde im Sinne einer Anpassung mit dem Bau von Warften (Wurten) begonnen, wobei zu-



Abb. 2: Strategien des Küstenschutzes nach IPCC (1990)

nächst nur einzelne Häuser auf den künstlich geschaffenen Erhebungen errichtet wurden, wenig später auch kleine Ringdeiche zum Schutz der Siedlungen. In einer Periode eines steigenden Meeresspiegels fiel der Beginn des Deichbaus an der deutschen Nordseeküste. So entstand um 1000 n. Chr. die Strategie der Verteidigung. Die ersten Deiche waren einfache und niedrige Erdwälle, die aus Marschboden entstanden und mit Rasensoden abgedeckt wurden. Bereits im 12./13. Jahrhundert ergab sich so ein geschlossener Deichzug entlang der Nordseeküste. Sehr schwere Sturmfluten (z. B. Erste Marcellusflut 1219, Luciaflut 1287, Zweite Marcellusflut 1362) führten immer wieder zu Rückschlägen im Deichbau, woraufhin die Deiche stetig instand gesetzt, erhöht und verstärkt wurden. Aus den gewonnenen Erfahrungen entstand das Konzept, dem Deich eine ausreichende Höhe und einen ausreichend breiten Querschnitt gegen die im Laufe der Jahrhunderte steigenden Sturmflutwasserstände zu geben. Dabei wurde der neue Deich jeweils nur um ein geringes Maß höher als der vorher aufgetretene höchste Wasserstand errichtet. Es wurde also jeweils auf einen Wasserspiegelanstieg reagiert, eine heute übliche Berücksichtigung zu erwartender zukünftiger Entwicklungen erfolgte nicht. Nach der ersten "großen Mandränke" (Zweite Marcellusflut) im Jahre 1362, in der das Meer große Landgebiete verschlang, wurde den Deichen neben ihrer Schutzfunktion ein bedeutender Stellenwert für die Landgewinnung zugewiesen. Mit Hilfe von Eindeichungen wurden verlorene Gebiete im Sinne des Vordringens wieder zurückgewonnen und zur landwirtschaftlichen Nutzung herangezogen. Zahlreiche Wieder- und Neueindeichungen konnten bereits im 16. Jahrhundert die großen Landverluste teilweise ausgleichen (ERCHINGER, 2006; VON LIEBERMAN, 1999; KRAMER, 1996). In der jüngeren Vergangenheit haben sich die gesellschaftspolitischen Zielsetzungen einschneidend geändert. Mit der neuen Zielsetzung war es nicht mehr erforderlich, neue landwirtschaftliche Nutzflächen – zum Beispiel durch Neueindeichungen – zu erschließen. Somit wird heute wieder im Wesentlichen die Strategie der Verteidigung umgesetzt. Die (deutlich kürzere) Geschichte des Küstenschutzes an der deutschen Ostseeküste unterscheidet sich wegen den abweichenden Rahmenbedingungen stark von der an der Nordseeküste. Generell wird auch hier heute die Strategie der Verteidigung angewandt. In den letzten Jahren werden jedoch vermehrt Deichrückverlegungen (Rückzug) geplant und umgesetzt.

Die Umsetzung von Küstenschutzstrategien wird in der Regel in Generalplänen für den Küstenschutz beschrieben. Diese Pläne beinhalten:

- Problemstellung und Beschreibung des Planungsgebiets.
- Für den Küstenschutz stellen die Gefährdung durch Sturmfluten und Küstenerosion die wesentlichen Herausforderungen dar. Das Planungsgebiet umfasst den Bereich, für den bestimmte Schutzziele (oder auch Handlungsziele) erreicht werden sollen. Über dieses Gebiet sollen die relevanten Informationen zusammengetragen werden.
- Zielsetzung und rechtliche Rahmenbedingungen. Die Zielsetzung legt fest, wie die Probleme im Planungsgebiet mittel- bis langfristig behoben werden sollen. In den Zielen wird der Grad des gesellschaftlichen Schutzbedürfnisses festgelegt. Die Ziele sollten möglichst mess- und erreichbar, d. h., quantifizierbar und realistisch sein. Sie sind eingebettet in die übergeordneten Ziele einer Raumentwicklung und dienen der Sicherstellung dieser als Vorsorgeaufgabe. Die im Rahmen der Zielsetzung zu berücksichtigenden (relevanten) rechtlichen Rahmenbedingungen sollten hier aufgeführt werden.
- Beschreibung der Maßnahmen einschl. Schutzstandards. Herzstück der Küstenschutzstrategie ist die Darstellung der für die Zielerreichung erforderlichen Maßnahmen. Sie beschreiben, wie die Ziele mittel- bis langfristig erreicht werden sollen. In den Schutzstandards bzw. den Bemessungsangaben sollten mögliche zukünftige Änderungen in den Rahmenbedingungen berücksichtigt werden.
- Beschreibung der Organisationsstruktur. Die Beschreibung beinhaltet die zur Zielerreichung erforderliche Organisationsstruktur (einschl. Zuständigkeiten).
- Finanzierungs- und Überwachungsplan.
  Die Finanzierungs- und Überwachungspläne ermöglichen Aussagen über die Umsetzung der Küstenschutzstrategie und können in den Plan integriert werden.
- Ausblick.

Wesentlicher Bestandteil einer Küstenschutzstrategie ist schließlich ein Ausblick: Wie können künftige Änderungen zum Beispiel in der Gesellschaft oder der Klimawandel Einfluss auf die Strategie entfalten? Hier sollten auch die (abzubauenden) Kenntnisdefizite aufgelistet werden.

#### 2.2 Deutschland im internationalen Raum

Alle Anrainerstaaten der Nordsee verfolgen aufgrund der großen Sturmflutgefährdung der Region umfassende, teils ähnliche Strategien zum Schutz vor den Gefahren des Meeres. Im Rahmen des INTERREG IIIB-Projektes "COMRISK – gemeinsame Strategien zur Reduzierung der Risiken von Sturmfluten in Küstenniederungen" (HOFSTEDE, 2005) wurde eine Bewertungsstudie über die in den Nordsee-Anrainerstaaten angewandten Küstenschutzstrategien durchgeführt (VAN NIELEN-KIEZENBRINK und KLOOSTER, 2005). Es wurde unterschieden zwischen den sich aus den sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen ergebenden Herausforderungen und den Schwerpunkten in den Strategien.

In der Tab. 3 ist die Relevanz ausgewählter Herausforderungen in den untersuchten Ländern dargestellt. Sie basiert auf die im Rahmen des Projektes durchgeführten Literaturrecherchen und Expertenbefragungen. 10

	UK	NL	В	DK	Nds.	HH	SH
Meeresspiegelanstieg	٠	•	•	•	•	•	•
Nutzungsdruck	•	•	•			•	
Ausdehnung Küstenniederungen	•	•	•		•	•	•
Fehlen natürlichen Schutzes	•	•		•	•		•
Risikobewusstsein Bevölkerung	•	•	•		•		
Verfügbares Budget	•	•	•	•	•	•	•
Personalkapazität			•				

Tab. 3: Herausforderungen im Küstenschutz; ● = große Herausforderung, • = Herausforderung (nach VAN NIELEN-KIEZENBRINK & KLOOSTER, 2005)

Aus der Tabelle wird deutlich, dass die Rahmenbedingungen zwischen den Staaten variieren. Diese Unterschiede spiegeln sich in den gewählten Strategien wieder. Sie stellen die jeweiligen Antworten auf die vorhandenen Herausforderungen dar. In allen Ländern bis auf England wird derzeit im Wesentlichen die Strategie der Verteidigung umgesetzt. In England kann auch die Strategie des Rückzuges als Ergebnis einer Risikoanalyse Anwendung finden. Dabei gewinnen besonders ökologische Gesichtspunkte an Bedeutung. Natürliche Prozesse sollen vermehrt zugelassen und mit Zielen des Küstenschutzes kombiniert werden. Es werden jedoch auch in den anderen Ländern vermehrt Überlegungen über alternative Strategien (Anpassung bis teilweise Rückzug) angestellt. Umweltschutzaspekte werden in den Strategien überall ähnlich berücksichtigt, da diese durch internationale und nationale Rechtsnormen vorgegeben sind. Insgesamt zeichnet sich für den Schutz von sandigen Küsten die Entwicklung hin zu Maßnahmen ab, die ein Wirken mit den natürlichen Prozessen an der Küste erlauben. Dieser so genannte weiche Küstenschutz wird beispielsweise durch das Aufspülen von Sand an Erosionsküsten praktiziert. Dies hat auch positive Auswirkungen auf den Erhalt der natürlichen Dynamik und Ressourcen. Der Küstenschutz in England basiert im Wesentlichen auf Kosten-Nutzen- bzw. Risikoanalysen. In den Niederlanden und Dänemark wurden regional unterschiedliche Sicherheitsstandards in Abhängigkeit von den zu erwartenden Schäden festgelegt. In Deutschland sind einheitliche Schutzstandards für sturmflutgeschützte Gebiete eingeführt. Dänemark und England betonen die Bedeutung von lokalen Initiativen und die Umsetzung von (lokal) maßgeschneiderten Lösungen. Diese beiden Länder und, in geringerem Umfang, Hamburg wenden problemorientiert eine Kombination aus technischen und nicht-technischen (z. B. Kompensation, Versicherung, Evakuierungspläne) Lösungen an. Belgien, die Niederlande und die deutschen Küstenländer konzentrieren sich auf technischen Schutz. Schließlich findet in allen Ländern eine Leistungsüberwachung der durchgeführten Maßnahmen statt.

#### 11

#### Küstenmanagement ist Sandmanagement

In den Niederlanden werden derzeit verstärkt Überlegungen über die zu wählende Strategie im Hinblick auf den Meeresspiegelanstieg angestellt. Die Küste bzw. der Küstensockel (ab NN -20 m bis zur landseitigen Grenze der Dünen auf dem Festland) wird dabei als Sandfluss betrachtet, der Sand als Träger aller Funktionen bzw. als ordnendes Prinzip. Der Anstieg des Meeresspiegels verursacht ein (relatives) Sanddefizit, das mittels Sandimport ausgeglichen wird. Der Küstensockel kann somit flexibel – in Abhängigkeit von der Meeresspiegelanstiegsrate – mitwachsen. Die natürliche Dynamik erhält mehr Spielraum, d.h. der Sand muss nicht immer dort eingebracht werden, wo er erodiert ist bzw. wo er fehlt. Dies besorgt der Sandfluss. Die große Ausdehnung des Sandflusses bietet ausreichend Flexibilität. Feste Schutzwerke binden dagegen den Sand und behindern dessen freies Durchströmen. Außerdem können sie den Bewegungen der Küstenlinie nicht folgen, wodurch die Küste einen Teil seiner natürlichen Federkraft verliert. In der Konsequenz wird der sanften Lösung der Sandaufspülung der Vorzug gegeben. Diese Strategie findet allerdings ihre Grenzen in bebauten Gebieten und bei Deichen, die nicht mit dem Meeresspiegel mitwachsen können. Weitere limitierende Faktoren sind die Meeresspiegelanstiegsrate sowie die Verfügbarkeit von Sand.

(Delta-Commissie, 2008)

#### 3. Bund- und Länderüberblick

#### 3.1 Einführung

In diesem Kapitel erfolgt die Bestandsaufnahme der derzeit in den Küstenländern angewendeten Strategien des Küstenschutzes. Vorangestellt in Kap. 3.2 ist eine Beschreibung der relevanten Bundesaspekte.

Strategische Überlegungen zum Küstenschutz finden auch länderübergreifend statt, zum Beispiel im Rahmen des Fachausschusses für Küstenschutzwerke der DGGT und HTG, in dessen Rahmen diese Arbeit entstanden ist. Zu nennen ist weiterhin eine Arbeitsgruppe der Elb-Anrainer Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein, die erstmalig Mitte der 80er Jahre ein gemeinsames Bemessungskonzept für Hochwasserschutzanlagen an der Elbe erarbeitet hat (LÄNDERARBEITSGRUPPE, 1988; SIEFERT, 1998, siehe auch Kap. 3.8.5).

#### 3.2 Bund- und Länder-Kooperationen

Gemäß Grundgesetz (GG) Artikel 74 Abs. 1 Nr. 17 erstreckt sich die konkurrierende Gesetzgebung u. a. auf den Küstenschutz. Allerdings hat der Bund hinsichtlich des Küstenschutzes bisher nicht von der Gesetzgebungskompetenz Gebrauch gemacht.

#### Grundsätze für die Förderung von Küstenschutzmaßnahmen

Zweck der Zuwendungen ist die Abwehr von Naturkatastrophen und Erhöhung der Sicherheit an den Küsten, auf den Inseln sowie an den fließenden oberirdischen Gewässern im Tidegebiet gegen Überflutungen und Landverluste durch Sturmfluten und Meeresangriff.

Gegenstand der Förderung sind: (1) Vorarbeiten (Zweckforschungen, Untersuchungen, Beweissicherungen und Erhebungen im unmittelbaren Zusammenhang mit Küstenschutzmaßnahmen), (2) Hochwasserschutzwerke (Neubau, Verstärkung und Erhöhung von Hochwasserschutzwerken einschließlich notwendiger Wege [Deichverteidigungs- und Treibselräumwege in einer Breite von 3,0 m, in besonders begründeten Ausnahmefällen in einer Breite bis zu 4,5 m] und Befestigungen), (3) Sperrwerke und sonstige Bauwerke in der Hochwasserschutzlinie, (4) Buhnen, Wellenbrecher und sonstige Einbauten in See, (5) Vorlandarbeiten vor Seedeichen bis zu einer Tiefe von 400 m, (6) Sandaufspülungen und (7) Uferschutzwerke.

Träger der Vorhaben (Begünstigte) können das Land und sonstige Körperschaften des öffentlichen Rechts sein. Teilnehmergemeinschaften nach dem Flurbereinigungsgesetz können Zuwendungsempfänger sein, wenn die Mittel ausschließlich zum Zwecke des Grunderwerbs eingesetzt werden.

Zuwendungen werden gewährt unter dem Vorbehalt des Widerrufs für den Fall, dass die geförderten

• Grundstücke, Bauten und baulichen Anlagen innerhalb eines Zeitraumes von zwölf Jahren ab Fertigstellung,

• technischen Einrichtungen, Maschinen und Geräte innerhalb eines Zeitraumes von fünf Jahren ab Lieferung

veräußert oder nicht mehr dem Zuwendungszweck entsprechend verwendet werden.

Die Zuwendungen werden als Zuschuss gewährt. Zuwendungsfähig sind: (1) Vorarbeiten (siehe oben), (2) die förderungsfähigen Baukosten der oben genannten Förderungsgegenstände (die Baukosten, die nach Abzug von Leistungen Dritter aufgrund besonderer Verpflichtungen und der übrigen nicht förderungsfähigen Kosten verbleiben), (3) Bauoberleitung und die Kosten für Architekten- und Ingenieurleistungen nach der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) in der jeweils geltenden Fassung, (4) die infolge der Ausführung von Küstenschutzmaßnahmen notwendigen Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege, wenn sie einen räumlichen Bezug zur jeweiligen Küstenschutzmaßnahme haben, (5) notwendiger Grunderwerb für eine Küstenschutzmaßnahme, und (6) die Kosten für Baumaßnahmen in unabwendbarem Umfang, die infolge von Küstenschutzmaßnahmen zwingend erforderlich sind. Dabei sind Vorteile Dritter durch Beiträge angemessen zu berücksichtigen.

Küstenschutzmaßnahmen, für die ökologisch wertvolle Flächen benötigt werden, sind nur förderungsfähig: (1) soweit die notwendige Sicherheit nicht durch andere vertretbare Maßnahmen erreicht werden kann, und (2) wenn im Fachplan oder in einem landschaftspflegerischen Begleitplan festgelegt ist, dass die eingedeichten Flächen, die ökologisch besonders wertvoll sind, grundsätzlich zu Ersatzbiotopen (Schutzzonen) gestaltet bzw. entwickelt werden. Bisher bereits landwirtschaftlich genutzte Flächen bleiben davon unberührt.

Nicht zuwendungsfähig sind: (1) der Bau von Verwaltungsgebäuden, (2) die Beschaffung von Kraftfahrzeugen und Geräten, (3) die Unterhaltung und Pflege von Küstenschutzanlagen, (4) der Bau von Schöpfwerken sowie von Be- und Entwässerungsanlagen, (5) Geldzahlungen anstelle von Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen, und (6) gewässerkundliche Daueraufgaben und institutionelle Förderungen.

Ist das Land aufgrund gesetzlicher Verpflichtungen Träger des Vorhabens oder zur Zahlung der Baukosten verpflichtet, werden 70 % der ihm anfallenden förderungsfähigen Kosten vom Bund erstattet. Bei anderen Trägern (siehe oben) soll die Gesamtförderung durch Zuschüsse von Bund und Land für eine Maßnahme 95 % der förderungsfähigen Kosten nicht übersteigen. Bei Maßnahmen des Küstenschutzes und bei sonstigen wasserwirtschaftlichen und kulturbautechnischen Maßnahmen ist in allen Fällen eine sachliche Trennung vorzunehmen. Die Zuwendungsempfänger dürfen die Zuschüsse nicht an natürliche oder juristische Personen des Privatrechts weitergeben oder ausleihen. Auch dürfen die Zuwendungsempfänger nicht geringer belastet werden, als ihnen unter Berücksichtigung aller Vorteile zugemutet werden kann. Dabei sollen die Vorteile der Zuwendungsempfänger durch Eigenleistungen in angemessener Höhe berücksichtigt werden. Eigenleistungen sind bare Eigenmittel, Darlehen und der Wert der unbaren Leistungen.

#### 3.2.1 Gemeinschaftsaufgabe "Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes"

Mit der Ergänzung des GG in Art. 91a von 1969 um die "Gemeinschaftsaufgabe Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes" (GAK) wurde die bereits zuvor praktizierte finanzielle Beteiligung des Bundes an den Küstenschutzbaumaßnahmen der Länder verfassungsrechtlich verankert. Danach wirkt der Bund hinsichtlich der Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes bei der Erfüllung von Aufgaben der Länder mit, soweit diese Aufgaben für die Gesamtheit bedeutsam sind und die Mitwirkung des Bundes zur Verbesserung der Lebensverhältnisse erforderlich ist.

Durch das Gesetz über die Gemeinschaftsaufgabe "Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes" (GAKG, vom 3. September 1969, BGBl. 1969 I S. 1573, neu gefasst durch Bekanntmachung vom 21.7.1988, BGBl. 1988 I S. 1055, zuletzt geändert durch Art. 2 G vom 2.5.2002, BGBl. 2002 I S. 1527) werden die Einzelheiten zur Umsetzung und Erfüllung der Gemeinschaftsaufgabe festgelegt. Die "Gemeinschaftsaufgabe Küstenschutz" wird hier als Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit der Küste der Nord- und Ostsee sowie an den fließenden oberirdischen Gewässern im Tidegebiet gegen Sturmfluten einschl. der für diese Maßnahmen erforderlichen Vorarbeiten definiert. Gemäß GAKG stellen der Bund und die Länder zur Erfüllung der GAK jährlich gemeinsam einen Rahmenplan auf. Aufstellung und Beschluss des Rahmenplans erfolgen durch einen Planungsausschuss (PLANAK). Im PLANAK arbeiten Bund (16 Stimmen) und Länder (je 1 Stimme) gleichberechtigt zusammen. Die Länder können so ihre spezifischen Interessen im direkten Zusammenwirken mit dem Bund verfolgen. Dem PLANAK gehören das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) als Vorsitzender, das Bundesfinanzministerium (BMF) und ein Minister jedes Landes an. In ihm wird mit den Stimmen des Bundes und der Mehrheit der Länder, d. h. mit mindestens 25 Stimmen beschlossen.

Der Rahmenplan enthält die Förderungsgrundsätze für alle im Rahmen der GAK förderbaren Maßnahmen. In den Förderungsgrundsätzen werden der Verwendungszweck der Mittel, die Fördervoraussetzungnen sowie die Art und die Höhe der Förderung näher bestimmt. Alle Förderungsgrundsätze sind im Laufe der Jahre immer wieder an die jeweiligen Gegebenheiten und Erfordernisse angepasst worden. Beim Küstenschutz werden heute vor allem investive Maßnahmen wie Neubau, Verstärkung und Erhöhung von Hochwasserschutzwerken, Sperrwerken, Buhnen, Wellenbrechern, Uferschutzwerke sowie Vorlandarbeiten und Sandaufspülungen einschließlich der jeweils dazugehörigen Vorarbeiten gefördert.

Außerdem enthält der Rahmenplan einen Finanzierungsplan, der auf den jährlichen Anmeldungen der Länder beruht und die vorzusehenden Mittel des Bundes und jedes Landes zur Verwendung für Maßnahmen der verschiedenen Förderungsgrundsätze ausweist.

Gemäß GAKG erstattet der Bund jedem Land 70 % die ihm in Durchführung des Rahmenplans entstandenen Ausgaben für Küstenschutzmaßnahmen, wobei die Gesamtsumme entsprechend dem jeweiligen Haushaltsplans des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz insgesamt aufgebracht wird. Eine Differenzierung der Bundeszuschüsse nach der Leistungsfähigkeit der Länder ist dabei unzulässig. Einen Überblick über die in den letzten zehn Jahren aus der Gemeinschaftsaufgabe Küstenschutz abgerufenen Bundesmittel gibt die letzte Spalte in Tab. 2.

Die fünf Küstenländer haben auf ihrer Konferenz am 11. April 2007 festgestellt, dass der Klimawandel einen erheblich weiteren Anstieg des Meeresspiegels zur Folge haben und die Bedrohung der Küstenregionen damit weiter zunehmen wird (Kap. 4.2). Da die Leistungsfähigkeit der Küstenländer angesichts der bevorstehenden Aufgaben im Ausbau von Deichen und Sturmflutschutzanlagen begrenzt ist, hat sich der Präsident des Senats Bremen als federführendes Land im Rahmen der Initiative der Regierungschefs der Küstenländer mit Schreiben vom 20.6.2008 an die Bundeskanzlerin gewandt, um eine deutliche Aufstockung der Bundesmittel für den Küstenschutz zu bewirken. Diesem Anliegen hat sich der Bund nicht verschlossen und den Küstenländern zugesichert, aufgrund des angemeldeten Mehrbedarfs der Küstenländer den Bundesmittelanteil im Rahmen der GAK im Zeitrahmen 2009 bis 2025 um insgesamt 380 Mio. Euro zu erhöhen. Der PLANAK hat im Januar 2009 dazu den "Sonderrahmenplan für Maßnahmen des Küstenschutzes in Folge des Klimawandels" beschlossen, der vorsieht, dass den Küstenländern in den Jahren 2009 bis 2025 für zusätzliche Küstenschutzmaßnahmen, die in Folge der Klimaänderung erforderlich sind, insgesamt 380 Mio. Euro – jährlich maximal 25 Mio. Euro – zusätzliche Bundesmittel zur Verfügung stehen. Der Sonderrahmenplan enthält außerdem detaillierte Finanzierungsregelungen einschließlich eines sehr flexiblen Verteilerschlüssels, der anhand des gemeldeten Mehrbedarfs der Länder festgelegt worden ist.

#### 3.2.2 Forschung im Küsteningenieurwesen

In den deutschen Küstengewässern der Nord- und Ostsee erfüllen neben den für den Küstenschutz zuständigen Dienststellen der Länder weitere Fachdienststellen des Bundes und der Länder im Bereich der Seeschifffahrt, der Hafenverwaltungen und der Wasserwirtschaft die ihnen durch Gesetz übertragenen Aufgaben des Küsteningenieurwesens. Mit dem Ziel, über die Verwaltungsgrenzen hinweg Aufgaben der Küsteningenieurforschung zu koordinieren bzw. gemeinsam durchzuführen, wurde im Jahre 1973 das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) durch Zusammenschluss der auf diesem Gebiet tätigen Fachverwaltungen gebildet. Der Bund ist im KFKI durch die Bundesministerien für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz sowie für Bildung und Forschung vertreten, die Länder Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Hamburg, Bremen und – seit 1992 – Mecklenburg-Vorpommern durch ihre zuständigen Ressorts (THORENZ und EGGERT, 2004).

Bedingt durch die Zielsetzungen des KFKI ist die KFKI-Forschung durch ein hohes Maß an Anwendungsorientiertheit geprägt. Es sollen Methoden und Produkte entwickelt werden, die von den Endnutzern möglichst unmittelbar angewendet werden können oder wichtige Teilschritte in der Erreichung dieses Zieles in einem Gesamtkonzept darstellen.

Vorrangiges Ziel der Forschung im Küsteningenieurwesen ist die Prognose von Entwicklungen und Ereignissen sowie die zielorientierte, kontrollierte und wirtschaftliche Reaktion auf die Entwicklungen und Ereignisse, um die Lebensbedingungen und Entfaltungsmöglichkeiten der Menschen an den Küsten langfristig und umweltverträglich sicherzustellen. Hierbei geht es vorrangig um

- die Entwicklung oder Weiterentwicklung von Methoden der Messtechnik, der Datenauswertung und der physikalischen und mathematischen Modellierung,
- die Gewinnung von Kenntnissen über die vorwiegend physikalisch geprägten Naturvorgänge und Wechselwirkungen und
- die Entwicklung von Verfahren zur Bemessung und funktionalen Optimierung von Bauwerken.

Das aktuelle Forschungskonzept des KFKI (KFKI, 2001) verzeichnet folgende Sachthemen als Schwerpunkt der Forschung:

- Großräumige Transport- und Formänderungsprozesse zur Prognose der künftigen Entwicklung der Küstengewässer,
- kleinräumige Transport- und Formänderungsprozesse u. a. zu Riffen, Rinnenverlagerungen und Vorgängen im Umfeld von Bauwerken,
- Bemessungsgrundlagen für Bauwerke an der Küste,
- Randdünen- und Bauwerksbelastung,
- Bauwerksbemessung und -optimierung,
- Erfassung der Naturvorgänge.

Des Weiteren sollen die Forschungsmethoden für den Bereich des Küsteningenieurwesens entwickelt bzw. hierauf adaptiert werden. Schließlich hat sich das KFKI die Aufgabe gestellt, die große, laufend steigende Zahl von Naturmessdaten, Ergebnissen von Sedimentationsrechnungen, Erkenntnissen über Zustände und Vorgänge sowie Forschungs- und Untersuchungsmethoden u. a. über ein Meta-Dateninformationssystem (NOKIS) und Forschungsergebnisse selbst in der Fachzeitschrift "Die Küste" der interessierten (Fach-)Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung stellt die Mittel für die Forschung im Küsteningenieurwesen zur Verfügung.

#### 3.2.3 Internationale Zusammenarbeit

Seit 1996 existiert ein informelles Beratungsgremium, die "North Sea Coastal Managers Group" von Mitarbeitern der Küstenschutzbehörden aus Deutschland, Belgien, Dänemark, den Niederlanden und Groß-Britannien. Seit 2006 ist auch Frankreich Mitglied. Für Deutschland sind neben dem federführenden Bund (BMELV) die Küstenländer Niedersachsen und Schleswig-Holstein vertreten. Während der jährlichen Treffen werden grenzüberschreitende und strategische Fragestellungen des Küstenschutzes wie EU-Regulierungen und der Klimawandel erörtert. Zum Beispiel wurde im Juni 2006 beim Jahrestreffen in Dänemark eine gemeinsame Position zur geplanten EG-HWRMRL erarbeitet.

Im Rahmen der trilateralen Regierungszusammenarbeit zum Schutz des Wattenmeeres existiert seit 2001 die Expertengruppe "Küstenschutz und Meeresspiegelanstieg" aus Mitarbeitern der Natur- und Küstenschutzverwaltungen der Wattenmeeranrainer. Ihr Auftrag ist die Erörterung von nachhaltigen Lösungen für den Küstenschutz im Wattenmeer unter besonderer Berücksichtigung des erwarteten Klimawandels. Seit 2003 stellt Schleswig-Holstein den Obmann dieser Gruppe. Zwischenzeitlich wurden zwei Berichte erstellt, die weithin Anerkennung fanden (CPSL, 2001, 2005). Die Gruppe wurde 2006 um Mitarbeiter der Landesplanung erweitert.

#### 3.2.4 Integriertes Küstenzonenmanagement

Die Küsten von Nord- und Ostsee sind sowohl land- als auch seeseitig von dynamischen Entwicklungen geprägt. Sie sind Kristallisationspunkte für Handel und Wirtschaft, aber zugleich auch verletzbar und gefährdet. Dieser Problematik eingedenk haben das Europäische Parlament und der Rat Empfehlungen zur Umsetzung einer Strategie für ein integriertes Management für die Küstengebiete in Europa ausgesprochen (202/413/EG vom 30. Mai 2002). Das Integrierte Küstenzonenmanagement (IKZM) ist ein Verfahren zur ganzheitlichen Raumentwicklungsplanung in Küstengebieten. Es ist der Nachhaltigkeit verpflichtet und hat die ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekte gleichwertig zu berücksichtigen. Hierbei kommt dem Küstenschutz eine besondere Bedeutung zu. In Erwägung einer Bedrohung der Küstenzonen der Gemeinschaft infolge der Klimaänderungen basiert der strategische Ansatz der EU u. a. auf angemessene und aus ökologischer Sicht verantwortungsvolle Küstenschutzmaßnahmen einschließlich des Schutzes von Küstensiedlungen und ihres Kulturerbes.

Die Mitgliedstaaten wurden mit der Empfehlung dazu aufgefordert, in Zusammenarbeit mit den regionalen Behörden, überregionalen Organisationen und weiteren sog. Stakeholdern eine nationale Strategie für das integrierte Management der Küstengebiete zu entwickeln. Daraufhin hat das Bundeskabinett im März 2006 eine nationale IKZM-Strategie verabschiedet und die Empfehlung durch gleichzeitigen Bericht an die Europäische Kommission umgesetzt. Die federführend vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit entwickelte Strategie ist in enger Abstimmung mit den Bundesressorts, Küstenbundesländern, unter Beteiligung der Öffentlichkeit und unter Einbeziehung aller betroffenen Akteure formuliert worden. Neben einer Bestandsaufnahme enthält sie Handlungsempfehlungen zur Optimierung sowie weitere Schritte (www.ikzm-strategie.de).

#### 3.2.5 Ausnahme vom Grundsatz der Länderzuständigkeit

Der Bund ist gemäß Bundeswasserstraßengesetz unter anderem für die Unterhaltung der Seewasserstraßen zuständig. Zur Stabilisierung der Fahrwasser von Ems und Jade werden Strombaumaßnahmen auf den Inseln Borkum, Wangerooge und Minsener Oog durchgeführt. Durch eine Schriftwechselvereinbarung zwischen dem Bundesminister für Verkehr und dem Niedersächsischen Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten haben 1975/76 der Bund und Niedersachsen die örtlichen Zuständigkeiten auf Wangerooge und Borkum geregelt. Des Weiteren gehören zu den Aufgaben des Bundes auch Arbeiten und Maßnahmen zur Sicherung des Bestandes der Insel Helgoland (ohne Düne).

Außerdem betreibt die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes die die jeweilige Tidegrenze bildenden Staustufen in der Elbe (Geesthacht), der Weser (Bremen) und der Ems (Herbrum) sowie Sturmflutsperrwerke in der Leda, der Oste, der Este (inneres Estesperrwerk) und der Eider als Zubehör der Bundeswasserstraße.

#### Hochwasserschutz und Ausbau von Bundeswasserstraßen

Ein Großteil des deutschen Außenhandels wird mit Hilfe des Seeverkehrs abgewickelt. Der Seehandel weist seit Jahren deutliche Wachstumsraten auf. Um der Veränderung der Welthandelsflotte hin zu immer größeren Schiffen gerecht werden zu können, sind die seewärtigen Zufahrten zu den deutschen Häfen dieser Entwicklung anzupassen.

Beim Ausbau dieser Bundeswasserstraßen bildet die Untersuchung der Auswirkungen auf die Belastungen der Küstenschutzbauwerke einen Schwerpunkt der Planung und öffentlich-rechtlichen Genehmigung. Entsprechend einem Beschluss der Bundesregierung von 2002 ist beim Ausbau von Flussmündungen die Hochwasserneutralität der Vorhaben nachzuweisen.

Beispielsweise wurden im Rahmen der jüngsten Planfeststellungsverfahren für die von den Ländern Hamburg bzw. Niedersachsen und Bremen beantragten Vertiefungen der Unter- und Außenelbe sowie der Unter- und Außenweser von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) umfangreiche Untersuchungen zu den Auswirkungen dieser Vorhaben auf Hochwasserereignisse durchgeführt. In beiden Fällen konnte in einem hochauflösenden mathematischen Modell für extreme Sturmfluten und gleichzeitig sehr hohem Oberwasserabfluss nachgewiesen werden, dass ausbaubedingt das Deichsicherheitsniveau gegenüber dem bisherigen Niveau nicht verschlechtert wird, das heißt, die Hochwasserneutralität gewährleistet ist.

Im Hinblick auf den Klimawandel hat die BAW zusätzlich Berechnungen zur Abschätzung der ausbaubedingten Veränderungen der Tidewasserstände unter Berücksichtigung eines beschleunigten säkularen Meeresspiegelanstiegs von 90 cm durchgeführt. Die Berechnungen zeigen, dass die Auswirkungen der Fahrrinnenvertiefungen nach Eintritt des angestiegenen Meeresspiegels geringer sein werden als die für den heutigen Zustand prognostizierten ausbaubedingten Veränderungen.

#### 3.3 Hansestadt Bremen

#### 3.3.1 Allgemeiner Überblick

Das Stadtgebiet Bremens sowie die etwa 60 km nördlich gelegene Seestadt Bremerhaven bilden das Bundesland "Freie Hansestadt Bremen". Dem Stadtgebiet Bremens ist auch das Überseehafengebiet in Bremerhaven zugeordnet, für das jedoch die Gemeindeverwaltung der Stadt Bremerhaven aufgrund eines Vertrages mit der Stadt Bremen verwaltungsmäßig zuständig ist. Die naturräumliche Situation Bremens und Bremerhavens wird wesentlich durch die Weser geprägt, die ab dem Weserwehr in Hemelingen tidebeeinflusst ist und als Unterweser bezeichnet wird. Die seit 1887 durchgeführten Vertiefungsmaßnahmen an Außen- und Unterweser führten hier zu einer starken Vergrößerung des Tidehubes auf zurzeit ca. 4 m (MThw ca. NN + 2,40 m, MTnw ca. NN – 1,60 m am Pegel Vegesack). Diese Situation setzt sich bis in die größeren Nebengewässer, die Lesum, Wümme und Ochtum in Bremen sowie mit einem geringeren Tidehub in die Geeste in Bremerhaven, fort.

Bremen und Bremerhaven liegen, mit Ausnahme des bis zu NN + 20 m hohen Geestrückens in Bremen-Nord, auf niedrigem Geländeniveau. Die Städte sind auf Grund ihrer Höhenlage nicht nur von Sturmfluten bedroht: in Bremen liegen große Teile der Stadtgebiete unter NN + 3,0 m. Diese Bereiche würden ohne ein funktionierendes Hochwasserschutzsystem täglich zwei Mal während der Flutphase überschwemmt werden. Abb. 3 zeigt die hochwassergefährdeten Gebiete Bremens und Bremerhavens sowie die Hauptgewässer und die Landesschutzdeichlinie.

Das Land Bremen ist nicht nur durch die häufiger zu erwartenden Sturmflutereignisse, sondern auch durch Hochwasser aus der Ober- und Mittelweser sowie der Geeste in Bremerhaven und der Ochtum und Wümme in Bremen, dem so genannten Binnenhochwasser, gefährdet. Während eine Sturmflut insbesondere die Städte Bremerhaven und Bremen bis oberhalb des Weserwehres in Bremen-Hemelingen bedroht, sind die Auswirkungen von Binnenhochwässern ausschließlich an den Deichen der Stadt Bremen von der Landesgrenze in Hemelingen-Arsten bis zum Weserwehr bzw. entlang der Wümme, Geeste und Ochtum zu beachten. Unterhalb dieses Bereiches ist die Weser durch die vorangegangenen Ausbaumaßnahmen für die Schifffahrt in der Lage, Binnenhochwasser mit nur unbedeutend erhöhten Wasserständen abzuführen.

Der Bereich **Bremerhaven** wird auf einer Länge von etwa 15 km mit Hilfe von Küstenschutzbauwerken vor Sturmfluten geschützt. Im Norden und Süden der Hochwasserschutzlinie befinden sich der stadtbremische Überseehafen, der Containerterminal und der landeseigene Fischereihafen, wo Hafenkajen und Schleusen als Kombinationsbauwerke ausgeführt sind, um gleichzeitig den hafen- und schiffsbedingten Anforderungen als auch den küstenschutzbedingten Anforderungen als Landesschutzdeichlinie zu genügen. Zwischen den beiden Hafenkomplexen befindet sich der Stadtkern Bremerhavens.

Entlang des Weserufers erstrecken sich Gründeiche mit Kronenlagen von NN +7,50 m bis NN + 8,90 m. Im Bereich des Überseehafens übernehmen Kaimauern (Containerkaje) mit einer Höhe von NN +7,50 m die Hochwasserschutzfunktion. Bei der Columbuskaje erfüllt eine zurückverlegte Spundwand mit einer Höhe von NN +5,94 m bis NN +6,80 m diesen Zweck.

Innerhalb des Küstenabschnittes Bremerhaven mündet die Geeste in die Weser. Die Geeste wird gegen Sturmfluten durch das Geestesperrwerk geschützt. Die Sperrtorhöhe liegt derzeit noch bei NN + 5,79 m und wird ab Frühjahr 2009 auf NN + 6,45 m erhöht. Die normalen Tiden laufen bis zum Tidesperrwerk etwa 4 km oberhalb der Mündung auf. Der



Abb. 3: Übersichtskarte von Bremen und Bremerhaven mit hochwassergefährdeten Gebieten

Fischereihafen wird durch eine Doppelschleuse (Fischereihafenschleuse NN +7,20 m) und der Überseehafen durch zwei Schleusen, die Kaiserschleuse (NN +6,19 m), die mit Baubeginn in 2008 im Zuge der Erneuerung auf NN +7,60 m erhöht wird und die Nordschleuse (NN +5,76 m) von der tidebeeinflussten Weser abgetrennt.

Das Stadtgebiet **Bremens** wird auf einer Länge von etwa 155 km mit Hilfe von Hochwasserschutzbauwerken geschützt. Davon liegen etwa 87 km der Landesschutzdeichlinie oberhalb der Sperrwerke an den Flüssen Lesum, Wümme und Ochtum. Im Hafenbereich sind nur die Häfen im Industriehafengebiet abgeschleust und vor Sturmfluten geschützt. Die Deichhöhen entlang der Weser von der südlichen Landesgrenze bis zur nördlichen Landesgrenze liegen, abhängig auch von der Art des Bauwerkes, zwischen NN + 10,50 m im Süden und NN + 7,20 m im Norden.

#### 3.3.2 Küstenschutzstrategie der Hansestadt Bremen

Unmittelbar vor der Sturmflut im Februar 1962 wurde das Sturmflutsperrwerk an der Geeste in Betrieb genommen. Durch den Bau konnte die damalige Landesdeichschutzlinie von ca. 26 km auf ca. 13 km verkürzt werden. Weitere Sperrwerke sind an den Mündungen der Lesum und Ochtum errichtet worden. Mit deren Bau und der Inbetriebnahme am 1.10.1979 verkürzte sich die Länge der sturmflutgefährdeten Deichlinie an der Lesum um 38 km und an der Ochtum um 22 km. In Verbindung mit dem Bau der Sperrwerke wurden Hochwasserschutzanlagen in Bremen-Nord errichtet und die vorhandenen Weserdeiche für die nach Inbetriebnahme der Sperrwerke zu erwartenden höheren Sturmflutwasserstände in der Weser erhöht. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Sturmflut vom Februar 1962 wurden in den folgenden Jahren sämtliche Deichstrecken in Bremen und Bremerhaven erhöht, so dass die schweren Sturmfluten 1976 sowie 1994 keine erheblichen Schäden im Land Bremen verursachen konnten.

Mit einem ständigen Halten und Verbessern der Deichlinie wird die Strategie der "Verteidigung" verfolgt. Dieses Vorgehen wird auch in dem Bericht "Hochwasserschutz im Land Bremen" und im "Generalplan Küstenschutz 2007" zukünftig angestrebt, indem die Qualität der Landesschutzdeiche zu sichern ist und eine Berücksichtigung des Meeresspiegelanstiegs infolge der klimatischen Veränderungen zu erfolgen hat. Eine weitere in Fachkreisen diskutierte Alternative stellt die Realisierung eines Sturmflutsperrwerkes dar. Bei der Realisierung eines Sturmflutsperrwerkes südlich von Bremerhaven entstünden jedoch ca. 6-fach höhere Kosten (SCHUCHARDT und SCHIRMER, 2005). Im Rahmen von KLIMU (Klimaszenario der Fallstudie "Klimaänderung und Unterweserregion", Universität Bremen) wurde in einem Teilprojekt durch ZIMMERMANN et al. (2004) weiterhin festgestellt, dass der Bau eines Mündungssperrwerkes den Verlust wertvoller Vorlandbiotope im Baubereich und auf den angrenzenden Flächen zur Folge hätte. Das Ausmaß der ökologischen Auswirkungen hängt dabei in erster Linie von der Dauer, der Häufigkeit und dem Zeitpunkt des Sperrwerksbetriebes ab. Die Akzeptanz dieser Maßnahme vor Ort wäre voraussichtlich relativ gering. Diese Reaktionsvariante entspräche wiederum einem "Vordringen" und setzte die Strategie des linearen Küstenschutzes fort.

Die Wiederherstellung eines ausreichenden Hochwasserschutzes gemäß den Vorgaben des Generalplanes 2007 über die Erhöhung der in Niedersachsen und Bremen bestehenden Deichlinie ist somit die einzige real verbleibende Handlungsperspektive. Gemeinsam mit dem Land Niedersachsen wurde deshalb ein neuer Generalplan Küstenschutz aufgestellt und im April 2007 veröffentlicht. In diesem Plan wird die Strategie der "Verteidigung" der vorhandenen Landesschutzdeichlinie weiterhin verfolgt.

#### 3.3.3 Rechtliche Grundlagen und administrative Strukturen

Die Aufgabe der Unterhaltung und Überwachung der Deiche und Hochwasserschutzbauwerke übernehmen in Bremen die Deichverbände am linken und rechten Weserufer; in Bremerhaven werden diese Aufgaben von bremenports und dem Magistrat der Stadt Bremerhaven wahrgenommen. Eine Abstimmung dieser Organe mit dem Land Niedersachsen in grundsätzlichen Fragen ist von großer Wichtigkeit, insbesondere mit Blick auf die vier Sperrwerke in den Mündungen der Geeste, Lesum, der Ochtum und der Hunte.

In den Jahren 2000 bis 2005 wurden im Land Bremen für den Hochwasserschutz finanzielle Mittel in Höhe von ca. 15 Mio. EUR aufgewendet. Im Rahmen der auf die Deichverbände übertragenen Unterhaltungsverpflichtungen haben die Bremischen Deichverbände am linken und am rechten Weserufer in den Jahren 2001 bis 2005 Zahlungen in Höhe von ca. 4,4 Mio. EUR für die Unterhaltung und den Betrieb (inkl. Energie- und Personalkosten) von Hochwasserschutzanlagen von der Stadtgemeinde Bremen erhalten. Der Deichschutz für das Land Bremen erfolgt in enger Abstimmung mit dem Land Niedersachsen. Für den Bereich Bremerhavens wie für den Bereich Bremen ist die Deichverteidigung Teil des Katastrophenschutzes. Hochwasserwarndienst, Deichkontrolle während der Zeit der Hochwassergefahr und vorbereitende Organisation für Deichsicherungsmaßnahmen sind die wesentlichen Elemente für den Einsatzfall.

Die Durchführung des Hochwasserschutzdienstes (Sturmflutdienst/Deichverteidigung) in **Bremerhaven** ist gemäß Geschäftsbesorgungsvertrag zwischen Bremen und bremenports als Regelaufgabe an bremenports übertragen worden. Die abzuleistenden Aufgaben im Deichverteidigungsfall sind in einer jährlich aktualisierten Fassung einer "Sturmflutordnung" von bremenports beschrieben. Die Sturmflutordnung regelt die einzuleitenden Sicherheitsmaßnahmen bei verschiedenen Hochwasserständen am Landesschutzdeich in Bremerhaven. Im Katastrophenfall in der Stadtgemeinde Bremerhaven – einschließlich stadtbremischen Überseehafengebietes – ist der Oberbürgermeister der Stadt Bremerhaven für die Durchführung des Katastrophenschutzes zuständig. Die genannte Sturmflutordnung ist Bestandteil der Katastrophenschutzordnung für die Stadtgemeinde Bremerhaven. Das Hansestadt Bremische Hafenamt ist im Katastrophenfall im Katastrophenstab Bremerhavens vertreten.

In **Bremen** wird der Alarmkalender für den Katastrophenschutzbereich Deichverteidigung vom Senator für Umwelt, Bau, Verkehr und Europa (SUBVE) jährlich aktualisiert. Der Kalender enthält Vorschriften für die Meldevorgänge, benennt verantwortliche Personen und Aufgaben im Einsatzfall, enthält Telefon- und Funkgerätenummern, beschreibt sturmflutgefährdete Gebiete, verzeichnet die betroffenen Gebiete, wichtige Bauwerke und beschreibt Einsatzkräfte, Material und Kraftfahrzeuge. Der Kalender für den Katastrophenschutzbereich Deichverteidigung ist Bestandteil des Katastrophenschutzkalenders der Stadtgemeinde Bremen. Der Senator für Umwelt, Bau, Verkehr und Europa ist für den Bereich Deichverteidigung im Katastrophenschutzstab beim Senator für Inneres vertreten.

#### 3.3.4 Bemessungskonzepte

In Bremen und Bremerhaven werden die jeweiligen Stadtgebiete durch Landesschutzdeiche vor Überflutungen geschützt. Eine weitere Unterteilung in Haupt- und Schutzdeiche wie in Niedersachsen existiert nicht.

Die Landesschutzdeichlinie weist die gleichen Elemente (Fußsicherungen, Treibselräumwege, Deichgräben, Deichverteidigungswege usw.) wie in Niedersachsen auf. Unterbrochen wird diese Deichlinie durch das Lesumsperrwerk, das die Lesum- und Wümmeniederung vor Überflutungen schützt sowie das Geestesperrwerk in Bremerhaven. Eine Besonderheit stellt die Landesschutzdeichlinie in den Hafengebieten dar, wo Hafenkajen und Schleusen als Kombinationsbauwerke ausgeführt sind um gleichzeitig den hafentechnischenund schifffahrtsbedingten Anforderungen als auch den küstenschutzbedingten Erfordernissen als Landesschutzdeichlinie zu genügen.

Die Verstärkung der Hochwasserschutzanlagen wird im Zuge der Umsetzung des "Generalplans Küstenschutz" durch die zuständigen Projektträger (die beiden Deichverbände sowie der Senator für Wirtschaft und Häfen, vertreten durch bremenports und die Bremer Investitionsgesellschaft) umgesetzt.

Die bislang noch gültigen Solldeichhöhen für Bremen resultieren im Wesentlichen aus Untersuchungen des Franzius-Institutes der Universität Hannover aus dem Jahre 1959. Diese Höhen wurden im Rahmen der sog. "Ingenieurkommission" 1979 überprüft. Zum damaligen Zeitpunkt wurde kein weiterer Handlungsbedarf ermittelt. Auch aufgrund der schweren Sturmfluten am 28.1.1994 bzw. 10.1.1995 haben sich Niedersachsen und Bremen dazu entschieden, die Höhe ihrer Landesschutzdeiche erneut zu überprüfen.

Um die vorhandenen Schutzsysteme zu analysieren und zu bewerten, kam für die Länder Niedersachsen und Bremen von Vornherein nur ein einheitliches Vorgehen in Betracht. Mit dieser Aufgabe haben die Länder Niedersachsen und Bremen den Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) beauftragt. Die Überprüfung der Deichhöhen entlang der Weser hat für Bremen und Bremerhaven ergeben, dass weite Bereiche der vorhandenen Landesschutzdeiche erhöht werden müssen. Die Ergebnisse dieser Überprüfung werden im neu aufgestellten Generalplan Küstenschutz für die niedersächsischen und bremischen Deiche und Deichanlagen zusammengefasst.

Ein besonderes Problem stellt die Einschätzung möglicher Auswirkungen von Klimaveränderungen dar, insbesondere die Auswirkungen auf den säkularen Meeresspiegelanstieg.

Die Auswertung langer Pegelaufzeichnungen ergibt bislang einen säkularen Anstieg des mittleren Tidehochwassers (MThw) von ca. 25 cm in den letzten 100 Jahren an der offenen Küste.

Aufgrund des Verlaufes und des relativ kurzen Beobachtungszeitraums insgesamt lassen die Pegelbeobachtungen der Nordsee derzeit noch keine gesicherten Rückschlüsse auf die zukünftige Entwicklung des Meeresspiegels zu.

Niedersachsen und Bremen haben sich auf Grund des am 2.2.2007 vom IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) vorgelegten 4. Berichtes über den klimabedingt zu erwartenden Meeresspiegelanstieg dazu entschieden, das Vorsorgemaß gegenüber dem Generalplan Küstenschutz um weitere 25 cm auf damit insgesamt 50 cm zu erhöhen. Für die Weser bedeutet dieses, dass sich der Bemessungswasserstand am Mündungspegel Bremerhaven von NN + 6,37 m (gemäß Generalplan Küstenschutz 2007) auf nunmehr NN + 6,62 m (6,37 m +0,25 m = 6,62 m) erhöht.

Die herzustellenden Deichendhöhen ergeben sich dann für Bremerhaven grundsätzlich aus der im Generalplan genannten Höhe plus 25 cm. Für Bremen wird die erforderliche Deichhöhe nach dem gleichen Verfahren ermittelt. Massive Bauwerke wie Sperrwerke und Sturmflutschutzwände, die nur in Kombination mit technischen Bauwerkselementen ihre Funktion erfüllen können, werden zudem bereits heute mit weiteren 75 cm entweder gleich hergestellt, mindestens aber ist eine Erhöhung von weiteren 75 cm konstruktiv zu berücksichtigen.

Geringe Abweichungen zu dem oben beschriebenen Vorgehen haben sich im Zuge der weiteren Planungen aus der Tatsache ergeben, dass für die neuen Wasserstände die Wellenauflaufhöhen noch einmal zu überprüfen waren. Weiterhin ist für Bremen-Stadt zu berücksichtigen, dass gemäß weiterer Berechnungen die Erhöhung des Bemessungswasserstandes an der offenen Küste um + 25 cm, in Bremen lediglich noch einen Anstieg von + 16 cm bewirkt. Inzwischen liegen für fast alle Bereiche der Landesschutzdeichlinie die entsprechenden Berechnungen der Forschungsstelle Küste bzw. des Franzius-Institutes der Universität Hannover vor. Diese Ergebnisse bilden letztlich die Grundlage zur Neufestlegung der Höhe der Landesschutzdeiche.

Zur gewässerkundlichen Auswertung stehen Daten für die Pegel Bremerhaven, Vegesack und Große Weserbrücke für die Zeit ab 1901 zur Verfügung (Abb. 4, Tab. 4).



Abb. 4: HThw Pegel Gr. Weserbrücke, heute: Wilhelm-Kaisen-Brücke. Höchste Tidehochwasserstände im Zeitraum 1901 bis 1999

Tab. 4: Mittlere Tidewasserstände [m NN] Jahresreihe 1996/2005 an a	ausgewählten	Pegeln
---	--------------	--------

Pegelort	Gewässer	MThw	MTnw	MThb	HHThw (Datum)
Brake	Weser	2,09	-1,81	3,90	5,25 (17.02.1962)
Vegesack	Weser	2,36	-1,55	3,91	5,33 (28.01.1994)
Weserwehr Hemelingen	Weser	2,58	-1,40	3,98	6,25 (06.01.1926)

Die zeitliche Gefährdung der Deiche bei einem Sturmfluthochwasser umfasst in der Regel einen Zeitraum eines Tidehochwassers von etwa 5 bis 6 Stunden. Möglich aber selten ist bei länger anhaltendem Sturm auch eine Verkettung nacheinander eintretender Sturmfluthochwasserstände. Das heißt, dass innerhalb von 24 Stunden 2 mal ein Sturmfluthochwasserstand mit dazwischen liegendem Tideniedrigwasser eintritt.

#### 3.3.5 Weitergehende Überlegungen und Ausblick

Sturmfluthochwasser und Binnenhochwasser werden zukünftig verstärkt eine Gefahr für die Deiche Bremens und Bremerhavens darstellen. Der Senat der Freien Hansestadt Bremen sieht sich deshalb in der Pflicht, das heutige gute Schutzniveau weiter auszubauen und damit die Menschen in Bremerhaven und Bremen auch zukünftig vor Überschwemmungen zu schützen. Dieses Ziel beinhaltet aber auch, ständig die Rahmenbedingungen für Hochwasserentstehung zu überprüfen, um rechtzeitig entsprechende Maßnahmen ergreifen zu können. Zur Zeit gilt das insbesondere für die Klimaveränderungen sowie daraus resultierende Folgen.

Die im "Generalplan Küstenschutz" genannten Deichverstärkungsmaßnahmen müssen möglichst zeitnah durchgeführt werden. Es sprechen alle Gesichtspunkte dafür, für Bremen einen entsprechenden Umsetzungszeitraum wie entlang der niedersächsischen Unterweser vorzusehen. Es muss vermieden werden, das Maßnahmenpaket zu einem späteren Zeitpunkt als Niedersachsen abzuwickeln.

Im Zuge der Erarbeitung des Generalplans Küstenschutz 2007 ist im Übrigen deutlich geworden, dass die deichrechtlichen Vorschriften der Länder Niedersachsen und Bremen z. T. erheblich voneinander abweichen, was im Interesse eines gemeinsamen Vorgehens der Länder nicht vorteilhaft ist. Der SUBVE überarbeitet daher gegenwärtig das Bremische Wassergesetz. Beabsichtigt ist eine weitgehende Anpassung an das niedersächsische Deichrecht; hierbei ist jedoch den unterschiedlichen Strukturen der beiden Bundesländer Rechnung zu tragen.

Parallel zu diesen Grundsätzen beim Sturmflutschutz hat das Land Niedersachsen beim Binnenhochwasserschutz Handlungsbedarf für Deiche im Mittelweserbereich benannt und entsprechende Mittel beantragt. Durch die Verstärkung der Deichstrecke ergibt sich auch ein verbesserter Schutz von Teilen des Bremer Ostens, die im Falle eines Deichversagens durch Überschwemmung betroffen wären. Deichverstärkungen werden auch auf der linken Weserseite oberhalb Bremens geplant und zur Ausführung vorbereitet. Die Bremischen Deichverbände am rechten und linken Weserufer stimmen sich bezüglich dieser niedersächsischen Planungen zum Binnenhochwasserschutz im Weserbereich mit den benachbarten niedersächsischen Verbänden ab und planen ihrerseits angleichende deichverstärkende Maßnahmen für die Deiche links und rechts der Weser zwischen der südlichen Landesgrenze und dem Weserwehr Hemelingen.

#### Bremen

Betrieb und Unterhaltung der Hochwasserschutzanlagen im Bereich der Stadtgemeinde Bremen werden von den Bremischen Deichverbänden am linken und rechten Weserufer in den jeweiligen Verbandsgebieten ausgeführt. Im Auftrag der Stadt Bremen unterhalten und betreiben beide Deichverbände zusätzlich seit dem 1.10.2001 Hochwasserschutzanlagen, die bisher in der Unterhaltung der Stadtgemeinde Bremen lagen. So wird das Hochwasserabflussregime Werdersee/Kleine Weser und das Wehr Kleine Weser am linken Weserufer vom Bremischen Deichverband am linken Weserufer und das Lesumsperrwerk sowie die Hochwasserschutzanlagen in Bremen-Nord vom Bremischen Deichverband am rechten Weserufer betrieben. Die Anlagen sind entweder im Besitz der Deichverbände oder der Stadtgemeinde Bremen bzw. des Landes Bremen. Für den Bereich der Stadtgemeinde Bremen zuständige Behörde ist der Senator für Bau, Umwelt und Verkehr.

#### 3.4 Freie und Hansestadt Hamburg

#### 3.4.1 Allgemeiner Überblick

Obwohl die Freie und Hansestadt Hamburg rd. 100 km weit von der Nordseeküste entfernt liegt, beinhaltet die geographische Lage der Metropole am Tideästuar Elbe eine Gefährdung durch Sturmfluten in ganz besonderem Maße. Seit Jahrhunderten stellt der tideoffene Hafen, der auch für die große Seeschifffahrt jederzeit erreichbar sein muss, den wichtigsten Wirtschaftsfaktor dar. Die Nutzung der tief liegenden Marschgebiete setzt seit Stadtgründung Hochwasserschutzmaßnahmen wie das Aufwerfen von Warften, den Bau von Deichen und Schutzwänden sowie das Treffen von Vorkehrungen zur Schadensminimierung bei Eintritt von extremen Sturmfluten voraus.

Insgesamt ist rund ein Drittel der Hamburger Stadtfläche durch Sturmfluten gefährdet (Abb. 5) und somit auf einen sicheren Hochwasserschutz angewiesen. Hier wohnen mehr als 180 000 Einwohner, es befinden sich rd. 165 000 Arbeitsplätze und es lagern Waren und Güter im Wert von mehr als 10 Mrd. EUR in diesen Gebieten.



Abb. 5: Stadtgebiet von Hamburg mit überflutungsgefährdeten Bereichen und Hauptdeichlinie

Der Entwicklungsdruck auf diesen Flächen hat insbesondere in den letzten Jahren eine besondere Dynamik erfahren. Ein Grund liegt darin, dass die alten und häufig innenstadtnahen Hafenbereiche den heutigen hafentechnischen Flächenansprüchen nicht mehr genügen und damit Chancen für neue hafenunabhängige Nutzungen entstehen.

Hamburg schützt sich heute mit einer rd. 103 km langen öffentlichen Hauptdeichlinie vor Sturmfluten. Diese Linie besteht auf einer Länge von 78 km aus Erddeichen und 25 km aus Hochwasserschutzwänden. In die Linie integriert sind sechs Sperrwerke, sechs Schleusen, 27 Deichsiele und 38 Tore (Gatts). Das Anlagevermögen beträgt mehr als 1 Mrd. Euro.

Daneben sind vor allem im Hafengebiet private Polder zum Schutz von Betrieben, Anlagen und Gütern entstanden. Dieser staatlich geförderte private Hochwasserschutz wurde nach der Sturmflut von 1976 installiert, bei der große Teile des Hafengebietes von dem mit NN +6,45 m bis heute höchsten Sturmflutscheitelwasserstand überflutet wurden. Die heute 48 privat organisierten Hafenpolder verteidigen eine 109 km lange Hochwasserschutzlinie mit drei Sperrwerken sowie rd. 840 Toren. Durch diese Anlagen ist eine Fläche von 2.300 ha bzw. rd. 70 % des Hafengebietes mit einer einheitlichen Höhe von NN +7,50 m vor Sturmfluten geschützt.

Neben den Hafenpoldern gibt es am Nordufer der Elbe kleinere Polder mit Wohn- und Büronutzung, die von den Eigentümern gebaut, unterhalten und verteidigt werden.

#### 3.4.2 Küstenschutzstrategie der Hansestadt Hamburg

Der Sturmflutschutz in Hamburg basiert auf den drei Säulen:

- Technischer Schutz
- Operativer Schutz
- Präventiver Schutz.

Den Technischen Schutz stellen die baulichen Anlagen zum Sturmflutschutz dar:

- die öffentliche Hauptdeichlinie mit ihren Kreuzungsbauwerken,
- die nach 1976 gegründeten privaten Polder im Hafenbereich,
- die besonders in den letzten Jahren entstandenen Warften und vor der Hauptdeichlinie liegenden Wohn- und Bürogebäude mit Objektschutz und Rettungswegen hinter die Hauptdeichlinie.

Daneben bildet heute der organisatorische und operative Sturmflutschutz mit dem Sturmflutwarndienst, der Deichverteidigung als Teilaufgabe des Katastrophenschutzes und die staatliche Aufsicht über die privaten Hochwasserschutzanlagen die wichtige zweite Säule im Hamburger Küstenschutzkonzept.

Die dritte Säule ist der vorbeugende Sturmflutschutz mit einer offenen Risikokommunikation und der Sturmflutforschung.

#### Bauwerke zum Schutz vor Sturmfluten

Die heute verfolgte Küstenschutzstrategie basiert im Wesentlichen auf den Empfehlungen der 1986 vom Senat der Freien und Hansestadt Hamburg einberufenen "Unabhängigen Kommission Sturmfluten". Unter dem Eindruck einer beobachteten Zunahme der Häufigkeit und Schwere von Sturmfluten mit Scheitelwasserständen, die bereits mehrfach über dem der Katastrophensturmflut von 1962 lagen sowie den aufkeimenden Diskussionen über die möglichen Folgen eines langfristig zu erwartenden Klimawandels, hatte der Senat sich bei den Entscheidungen zum künftigen Hochwasserschutzes für Hamburg durch ein Gremium mit Vertretern der Politik, der Wirtschaft und Fachleuten beraten lassen.

Die Kommission empfahl nach Abwägung der betrachteten Alternativen in einer ersten Stufe die möglichst kurzfristige Anpassung der vorhandenen Hochwasserschutzanlagen an die erhöhten Bemessungswasserstände, um ein in den Nachbarländern bereits weitgehend vorhandenes Sicherheitsniveau zu erreichen. Mit den Beschlüssen zum heute noch laufenden "Bauprogramm Hochwasserschutz" folgte der Senat dieser Empfehlung. Mit Gesamtinvestitionen von mehr als 650 Mio. EUR werden im Rahmen des Bauprogramms die Schutzhöhen im Mittel um fast einen Meter angehoben. Bis Ende 2008 sind mehr als 95 % der Linienbauwerke (Deiche und Hochwasserschutzwände) und rd. 75 % der Einzelbauwerke (Schleusen, Sperrwerke, Siele, Schöpfwerke und Tore) verstärkt oder neu gebaut worden. Die Baumaßnahmen können, nach heutigem Stand, bis zum Jahr 2013 weitgehend abgeschlossen werden.

Aufgrund der Dringlichkeit hat sich Hamburg bereits 1995 hinsichtlich der Finanzierung des Bauprogramms von der Höhe der Bundeszuschüsse aus der Gemeinschaftsaufgabe "Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes" abgekoppelt. Die jährlichen Investitionen im Hamburger Sturmflutschutz betrugen seitdem zwischen ca. 25 Mio. EUR und 56 Mio. EUR, die zur Verfügung stehenden Bundeszuschüsse lagen jedoch i. M. nur bei rd. 8 Mio. EUR. Es waren somit erhebliche Anteile über den Hamburger Haushalt zu finanzieren. Zur Beschleunigung des Bauprogramms konnte für einige Baumaßnahmen in den ländlich geprägten Gebieten eine Mitfinanzierung durch die Europäische Union erreicht werden. Die Zuschüsse der EU betrugen in den Jahren 2000 bis 2006 insgesamt rund 35 Mio. EUR.

Über die Anpassung der Anlagen im laufenden Bauprogramm hinaus wurden bereits durch die "Unabhängige Kommission" Vorüberlegungen durchgeführt, wie Hamburg sich langfristig vor Sturmfluten schützen will. Hier waren insbesondere zwei weitere Aspekte einzubeziehen. Dies ist zum einen ein Sicherheitszuschlag für das im Hamburger Ballungsraum vorhandene erhöhte Schadenspotential ("Metropolzuschlag"). Aber auch die fortgeschriebenen Prognosen zur Auswirkung von Klimaänderungen auf die Sturmfluthäufigkeit und die Sturmfluthöhen sind in die Festsetzungen von Bemessungswasserständen und Sollhöhen einzubeziehen. Zwei Lösungen zum langfristigen Hochwasserschutz sind deshalb schon von der Unabhängigen Kommission intensiv diskutiert worden:

- 1. Der Bau eines Sturmflutsperrwerks westlich von Hamburg.
- 2. Die weitere Erhöhung der vorhandenen Hochwasserschutzanlagen, ggf. in Verbindung mit der Einrichtung von Entlastungspoldern an der Unterelbe.

Mögliche Standorte für ein Sperrwerk wurden im Bereich Finkenwerder und elbabwärts bei Brokdorf gesehen. Weitere Planungsüberlegungen führten jedoch dazu Sperrwerkslösungen auch langfristig auszuschließen. Ausschlaggebend hierfür war die Tatsache, dass es sich bei einem Sperrwerk um ein technisch hochkompliziertes und in der erforderlichen Größe bisher beispielloses und unerprobtes Bauwerk gehandelt hätte. Neben den absehbar sehr hohen Investitions- und Betriebskosten wurden weiterhin erhebliche nautische Probleme für die Schifffahrt bei Sturmflutwetterlagen und ökologische Folgeschäden befürchtet.

Die im Zusammenhang mit dem zweiten Lösungsweg – Erhöhung der vorhandenen Schutzlinien – in Betracht gezogene Schaffung von Entlastungspoldern hatte zum Ziel, einen Ausgleich für die Verluste an Überflutungsraum durch die Baumaßnahmen an der Tideelbe nach 1962 zu schaffen. Insgesamt sind seitdem Fluträume von fast 150 km<sup>2</sup> durch Vordeichungen, Sperrwerke, Aufhöhungen usw. verloren gegangen. Mit den Ländern Schleswig-Holstein und Niedersachsen ist das Anlegen von Entlastungspoldern an der Unterelbe intensiv diskutiert worden. Die Arbeitsgruppe hat jedoch in ihrem Abschlussbericht festgehalten, dass der hohe technische Aufwand, die sehr hohen Investitions- und Betriebskosten, sowie die erheblichen Eingriffe in die Landschaft durch den begrenzten Nutzen – Kappung der Sturmflutscheitel in Hamburg um max. 50 cm – aus damaliger Sicht nicht aufzuwiegen seien.

Als einziger Lösungsweg für die Sicherstellung des langfristigen Hamburger Hochwasserschutzes bleibt somit die weitere Verstärkung der vorhandenen Anlagen. Dieser Empfehlung wird bereits im laufenden Bauprogramm Rechnung getragen. So wird beim Neubau von Hochwasserschutzwänden eine weitere Erhöhungsmöglichkeit um bis zu 0,80 m statisch und konstruktiv berücksichtigt. Da insbesondere die Hochwasserschutzwände überwiegend völlig neu gebaut werden müssen – die nach 1962 unter hohem Zeitdruck errichteten Bauwerke weisen häufig keine statischen Reserven auf und können nicht mehr aufgestockt werden – berücksichtigt ein großer Teil der konstruktiven Anlagen bereits diese Ausbaureserve.

Als ergänzende Vorsorgemaßnahme für den Katastrophenfall können bauliche Maßnahmen innerhalb der deichgeschützten Gebiete sinnvoll sein. Denkbar ist insbesondere die Berücksichtigung hoch liegender Versorgungs- und Evakuierungswege in der Bauleit- und Erschließungsplanung. Darüber hinaus fehlt für sturmflutschutzbegründete Bauvorschriften die rechtliche Rechtfertigung, die Umsetzung von Vorsorgemaßnahmen bleibt insofern der privaten Initiative überlassen.

#### Katastrophenabwehr und Deichverteidigung

Um bei einer herannahenden Sturmflut die richtigen Entscheidungen treffen zu können, hält Hamburg einen eigenen Sturmflutwarndienst (WADI) vor. Der WADI tritt zusammen, wenn Wasserstände von mehr als NN +4,50 m in Hamburg zu erwarten sind. Er ist auf Prognosen für die Elbe spezialisiert und in der Lage, präzise Vorhersagen zu Höchstwasserständen und Eintrittszeitpunkten zu liefern. Die Vorhersagen des WADI werden über Funk auch den Hafenbetrieben und anderen Privaten zur Verfügung gestellt.

Neben der Verstärkung der öffentlichen Schutzanlagen hat Hamburg eine leistungsfähige Deichverteidigungsorganisation aufgebaut. In einem jährlich fortgeschriebenen Deichverteidigungsplan sind Einzelheiten der Organisation und Aufgaben der Deichverteidigung geregelt. Der Deichverteidigungsplan legt den Einsatz der Deichverteidigungskräfte und den Material- und Geräteeinsatz im Sturmflutfall verbindlich fest. Dies betrifft insbesondere:

- das Schließen der Öffnungen in der Hauptdeichlinie,
- die Bekämpfung von Gefahren,
- Evakuierungsplanungen,
- die Sicherung von Schadensstellen,
- die Nachsorge,

soweit öffentliche Hochwasserschutzanlagen betroffen sind.

#### Risikokommunikation

Da es eine absolute Sicherheit vor Katastrophenereignissen, wie es Sturmfluten sein können, nicht geben kann, ist es eine wesentliche Aufgabe der Verantwortlichen, ein entsprechendes Bewusstsein bei allen Betroffenen zu entwickeln und aufrechtzuerhalten. Die Hamburger Hochwasserschutzanlagen bieten heute ein hohes Maß an Sicherheit, das durch die laufenden Baumaßnahmen noch weiter angehoben wird. Trotzdem kann es extreme Sturmflutereignisse geben, für die die Anlagen nicht bemessen sind. Gerade in einem Ballungsraum wie Hamburg mit seiner Konzentration von Menschen, Arbeitplätzen und Werten ist eine offene und regelmäßige Kommunikation des Restrisikos eine wichtige und dauerhafte Aufgabe aller Verantwortlichen. In Hamburg werden hierzu regelmäßig verschiedene Wege genutzt, z. B.

- die Verteilung von Hinweisblättern und Broschüren an die Bewohner der tief liegenden Gebiete, in denen auf mögliche Gefahren hingewiesen, mit Vorsorgemaßnahmen vertraut gemacht wird und Hinweise zum richtigen Verhalten gegeben werden. Auf Übersichtskarten sind u. a. besonders gefährdete Gebiete und Fluchträume dargestellt
- Hinweise zum Sturmflutschutz in den Telefonbüchern
- Informationen und Hinweise im Internet
- die laufende Information zum Stand des Bauprogramms und zu einzelnen Baumaßnahmen.

Bei Flächen und Bauwerken die außerhalb der öffentlichen Hochwasserschutzlinie liegen, erfolgen die notwendigen Warnhinweise durch entsprechende Beschilderungen. Für Polder und viele bauliche Anlagen sind regelmäßige Kontrollen und Übungen vorgeschrieben, bei denen die Bedeutung der Hochwasserschutzeinrichtungen ins Bewusstsein gerufen wird.

#### 3.4.3 Rechtliche Grundlagen und administrative Strukturen

Rechtliche Grundlage für den Schutz vor Hochwassergefahren ist das Hamburgische Wassergesetz und die hierauf fußenden Verordnungen:

- Verordnung über öffentliche Hochwasserschutzanlagen (Deichordnung)
- Verordnung über Private Hochwasserschutzanlagen (Polderordnung)
- Verordnung zum Schutz vor Sturmfluten im Gebiet der HafenCity (Flutschutzverordnung).

Aufgrund der herausragenden Bedeutung des Hochwasserschutzes für die gesamte Stadt sind heute alle Aufgaben des öffentlichen Hochwasserschutzes beim Hamburger Staat konzentriert, d. h. neben den ministeriellen Aufgaben auch die Planung, der Bau, die Unterhaltung und der Betrieb der Anlagen. Bis zur Sturmflutkatastrophe von 1962, bei der 315 Menschen ihr Leben verloren, sind die Deichunterhaltung und zu wesentlichen Teilen auch der Deichneubau, durch die Deichverbände und ihre Mitglieder wahrgenommen worden. Dieses geschah zum Teil in jahrhunderte langer Tradition. Der fast vollständige Neubau der Hochwasserschutzanlagen nach 1962 überstieg jedoch die Möglichkeiten der Deichverbände bei Weitem. Zudem wurde es erforderlich weitaus größere Gebiete als die traditionellen sieben Deichverbandsgebiete vor den höher und häufiger auflaufenden Sturmfluten zu schützen. Von den heute noch existierenden drei Verbänden werden daher lediglich noch Mitwirkungsrechte und -pflichten wahrgenommen, insbesondere:

- Teilnahme an der Deichverteidigung, Personalrekrutierung,
- Mängel- und Schadensfeststellung, Teilnahme an den Deichschauen,
- Pflege des Gefahrenbewusstseins in der Bevölkerung für drohende Sturmfluten.

Abweichend hiervon ist der Sturmflutschutz außerhalb der öffentlichen Hochwasserschutzlinien geregelt. Im Hafen entstanden nach 1976 – überwiegend in privater Initiative – 60 Polder mit insgesamt 109 km Hochwasserschutzwänden und Deichen, vier Sperrwerke und rd. 840 Tore. Planung, Bau und Betrieb dieser Schutzanlagen liegen in der Verantwortung der privaten Eigentümer und Betriebe. Diese waren nach der bisher höchsten Sturmflut in Hamburg am 3./4. Januar 1976, die im Hafen Schäden in Höhe von mehr als 50 Mio. EUR verursachte, am ehesten in der Lage die erforderlichen Maßnahmen zügig und unter Berücksichtigung der spezifischen Sicherheitsanforderungen vorzubereiten und durchzuführen. Gleiche Regelungen gab es für die zeitgleich entstandenen privaten Wohnpolder am nördlichen Altonaer Elbufer. Die Stadt Hamburg leistete beim Aufbau dieser Schutzanlagen erhebliche finanzielle Unterstützung. Vom Jahr 2009 an erhalten die privaten Eigentümer die Möglichkeit ihre Hochwasserschutzanlagen im Rahmen eines neuen Förderprogramms weiter zu verstärken, um eine mit dem öffentlichen Hochwasserschutz vergleichbare Sicherheit zu erreichen.

Für den Betrieb und die Unterhaltung der Deiche sind heute überwiegend die Bezirksämter zuständig. Die vor allem im Innenstadtbereich gelegenen Hochwasserschutzwände werden dagegen, ebenso wie die Einzelbauwerke, durch den "Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer" (LSBG) und die "Hamburg Port Authority" (HPA) betrieben und unterhalten. Insgesamt standen für diese Aufgaben in den letzten Jahren Sachmittel in Höhe von rd. 2 Mio. EUR jährlich zur Verfügung.

#### Organisation der Deichverteidigung und Gefahrenabwehr

Nach einsatztaktischen Gesichtspunkten ist die öffentliche Schutzlinie in vier Deichverteidigungsgebiete unterteilt worden.

Im Einsatzfall wird die örtliche Überwachung und Kontrolle der Hochwasserschutzanlagen durch so genannte Deichwarte wahrgenommen. Die regionale Leitung aller Einsatzmaßnahmen bis hin zu Evakuierungen erfolgt durch drei "Regionale Katastrophendienststäbe" (RKD). Die RKD sind neben Vertretern von Polizei und Feuerwehr mit technischen Fachkräften und verantwortlichen Mitarbeitern der Hilfsorganisationen besetzt. Der übergeordnete "Zentrale Katastrophendienststab" (ZKD) nimmt die zentralen Aufgaben wahr, wie Rundfunk- und Fernsehwarnungen, Abgabe von Sperrgebietserklärungen und Räumungsaufforderungen und das Herbeiführen von zusätzlichen Einsatzkräften, Geräten und Material. Der ZKD legt darüber hinaus in Abhängigkeit von den Vorhersagen des Hamburger Sturmflutwarndienstes die Wasserstandsstufen fest. An die insgesamt 4 Wasserstandsstufen sind die Alarmierung, der Beginn und der Umfang von Einsatz- und Abwehrmaßnahmen gekoppelt. Die Deichverteidigungsorganisation geht ab der Wasserstandsstufe 2 (vorhergesagte Wasserstände von NN +5,50 m bis NN +6,00 m) mit rund 400 Kräften in den Einsatz. Die Zahl der planmäßigen Kräfte erhöht sich bis zu Wasserstandsstufe 4 (höher als NN +7,30 m) auf 1120 Personen. Den Einsatzkräften stehen neben den bereitgestellten Fahrzeugen, Geräten und sonstigem Material auch 220 000 gefüllte Sandsäcke in 12 Depots zur Verfügung.

In regelmäßig stattfindenden Übungen der Stäbe und der Einsatzkräfte werden die Reaktionsfähigkeit und die Zusammenarbeit aller Beteiligten verbessert.
Zur Identifikation von Gefährdungsbereichen steht im Rahmen der Gefahrenabwehr darüber hinaus ein Hochwassersimulationsprogramm zur Verfügung. Das Programm bietet die Möglichkeit auf Grundlage eines digitalen Geländemodells und prognostizierter bzw. tatsächlich eingetretener Wasserstände hydrologische Ereignisse wie Überflutungen direkt zu visualisieren und auszuwerten. Das Modell kann damit ein wichtiges Instrument z. B. bei der Evakuierungsplanung sein. Das Simulationsprogramm kann auch für Risikoabschätzungen und Prioritätensetzungen bei der Planung von Baumaßnahmen genutzt werden.

# 3.4.4 Bemessungskonzepte

An der Unterelbe existierten in den Elbanrainerländern lange Zeit unterschiedliche Bemessungsansätze für den Hochwasserschutz. Auch in Hamburg sind über die Jahrhunderte immer wieder durch Hochwasserereignisse ausgelöste, meist örtlich begrenzte Deichbauten und Anpassungen erfolgt. Bis zur Sturmflutkatastrophe von 1962 war die Sturmflut vom 3./4. Februar 1825 die schwerste und höchste im Elbegebiet mit einer Höhe von NN +5,24 m am Pegel St. Pauli (Abb. 6). Erstmalig wurde in der Folge dieser Sturmflut eine Höhe von NN +5,70 m für die Hamburger Hochwasserschutzanlagen festgesetzt. Diese Höhe erwies sich erst 1962 als nicht mehr ausreichend. Im Bauprogramm nach 1962 sind die Anlagen deshalb auf eine weitgehend einheitliche Höhe von NN +7,20 m erhöht bzw. neu gebaut worden.



Abb. 6: Sturmfluten über NN +4,00 m und Deichhöhen in Hamburg seit 1750

1986 wurden dann von einer Arbeitsgruppe der drei Länder Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Hamburg ein gemeinsames Bemessungsverfahren konzipiert, das den Erkenntnissen über das besondere Tide- und Sturmflutgeschehen in einem Tideästuar Rechnung trägt und sich insofern von den rein stochastischen bzw. deterministischen Verfahren unterscheidet (Arbeitsgruppe der Länder Niedersachsen, Schleswig- Holstein und Hamburg, 1988).

Das Verfahren basiert im Wesentlichen auf der Bestimmung einer maßgebenden Sturmtidenkurve für den Mündungsbereich der Elbe (hier Cuxhaven) sowie Berechnungen in unterschiedlichen numerischen und einem empirischen Modell zur Ermittlung des Sturmflutablaufs in der Elbe. Als Ergebnis dieser Modellierungen sind für den Hamburger Bereich stromauf ansteigende Bemessungswasserstände zwischen NN +7,10 m an der westlichen Hamburger Landesgrenze bei Blankenese/Cranz und NN +7,80 m an der östlichen Landesgrenze in Altengamme durch einen Senatsbeschluss formell festgesetzt worden.

Die auf dem Bemessungswasserstand aufbauende Sollhöhenfestlegung für die Hamburger Deiche und die Uferwände erfolgte auf der Grundlage einer differenzierten Betrachtung und unter Einbeziehung des örtlich zu erwartenden Seegangs und hydraulischer Modelluntersuchungen zur Ermittlung des Wellenauf-/überlaufs, die u. a. mit Hilfe von Treibseleinmessungen aus abgelaufenen Sturmfluten verifiziert wurden. Für die Ermittlung des Bemessungsseegangs wurde ein maßgeblicher Windsektor von 220° bis 300° mit Windgeschwindigkeiten von 20 m/s westlich der Elbbrücken und 17 m/s östlich der Elbbrücken zugrunde gelegt. Mit der "Richtlinie zur Sollhöhenberechnung und -bestimmung" (FREIE UND HAN-SESTADT HAMBURG, 1995) erfolgte hieraus die Freibord- und Sollhöhenfestlegung für die gesamte Hamburger Hauptdeichlinie. Damit wurde dem Leitbild 'Gleiche Sicherheit statt gleicher Höhe' folgend, die bisher weitgehend einheitliche Freibordfestsetzung zugunsten genauerer Ansätze, die den tatsächlichen Belastungen der Schutzanlagen besser gerecht wird, verlassen.

# 3.4.5 Weitergehende Überlegungen und Ausblick

Zwischen den Ländern Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Hamburg besteht Einvernehmen, dass es auch in der Zukunft ein gemeinsam getragenes Bemessungskonzept für die Hochwasserschutzanlagen im Bereich der Unterelbe geben muss. Die im Jahr 2007 abgeschlossene Überprüfung des bisherigen Bemessungsverfahrens hat gezeigt, dass die statistischen Grundlagen der 1986 festgesetzten Bemessungswasserstände nach wie vor gültig sind und das Verfahren die physikalischen Verhältnisse angemessen wiedergibt. Es ist jedoch deutlich geworden, dass das Verfahren insgesamt weiterentwickelt werden muss, da einige Aspekte nur unzureichend abgebildet werden. Insbesondere fehlt ein prognostischer Anteil für die zu erwartenden Änderungen durch den Klimawandel und die Berücksichtigung unterschiedlicher Schutzbedarfe an der Tideelbe. Darüber hinaus hat sich die Bemessungspraxis für Hochwasserschutzanlagen in den drei Ländern unterschiedlich entwickelt. Für die Metropole erscheint es unerlässlich Risikoaspekte in die Bemessung einzubeziehen und das angestrebte Sicherheitsniveau neu zu diskutieren.

Die Freie und Hansestadt Hamburg entwickelt darüber hinaus langfristige Strategien für ein ganzheitlich integriertes Vorgehen zum Sturmflutschutz und zu Risikominimierung.

# Hafencity Hamburg

Die Einhaltung der Anforderungen zum Sturmflutschutz ist auch in der neuen HafenCity in erster Linie in der Verantwortung der privaten Grundeigentümer und Besitzer. Erstmalig für Hamburg entsteht ein ganzer Stadtteil mit 5.500 Wohnungen und mehr als 20.000 Arbeitsplätzen im Überflutungsbereich außerhalb der öffentlichen Hochwasserschutzlinie. In einem "Masterplan HafenCity" ist das sog. "Warftenkonzept" entwickelt worden, das eine schrittweise Aufhöhung der Flächen bzw. Teilflächen von i.M. NN +5,50 m auf eine Höhe von mindestens NN +7,50 m vorsieht. Damit wird ein Sicherheitsniveau erreicht, das dem innerhalb der öffentlichen Schutzlinie gleichwertig ist. Die Stadt stellt vor allem die Erschließung über hoch liegende Verkehrsanbindungen her. Die wesentlichen Anforderungen an den Bau, die Nutzung und die Verteidigung von Grundstücken und Gebäuden sind in einer im Mai 2002 erlassenen "Flutschutzverordnung HafenCity" (FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, 2002) zusammengefasst. In den Baugenehmigungsverfahren werden die in einem Leitfaden (FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, 2002) zusammengestellten technischen Anforderungen (Schutzhöhen, Belastungen) abgeprüft. Die Einbindung in den Katastrophenschutz der Stadt erfolgt gemäß einem "Einsatzkonzept für die HafenCity bei Sturmfluten" (FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, 2002). Hier wird die Zusammenarbeit der für die Gefahrenabwehr verantwortlichen Behörden mit den für die Objekte Verantwortlichen geregelt.



HafenCity mit Hauptdeichlinie

#### 3.5 Mecklenburg-Vorpommern

#### 3.5.1 Allgemeiner Überblick

Die Küste Mecklenburg-Vorpommerns mit einer Gesamtlänge von 1945 km ist infolge der grundlegenden eiszeitlichen Prägung stark gegliedert. Bis zur Gegenwart anhaltende Küstenausgleichsprozesse führten zur weitgehenden Abriegelung der flachen Bodden- und Haffgewässer von der Ostsee. Die Außenküste hat eine Länge von 377 km und die Boddenund Haffküste 1568 km. Insbesondere die Außenküste mit ihrem häufigen Wechsel von Steilküsten (140 km) und Flachküsten (237 km) weist eine hohe Dynamik auf. Ca. 65 % befinden sich im Rückgang und nur 13 % unterliegen dem Einfluss von Akkumulation.

Auf einer Länge von 106 km bilden Landesküstenschutzdünen das prägende Küstenschutzelement (Abb. 7). Auf 60 km Länge müssen Dünen allein, ohne hinterliegende Deiche, in der Lage sein, die Sturmfluten zu kehren. Aus diesem Grund sind hier Sandaufspülungen eine dominierende Küstenschutzmethode. Im Zeitraum 1990 – 2008 wurden 14 Mio. m<sup>3</sup> Sand in Düne, Strand und Schorre eingebaut. Wesentlicher Bestandteil des Küstenschutzsystems an der Außenküste sind Buhnen, deren Aufgabe in der Verminderung des natürlichen Rückganges oder der Stabilisierung von Aufspülsanden besteht. Die Gesamtzahl der Buhnen beträgt 1136 Stück. Der überwiegende Teil sind einreihige Holzpfahlbuhnen. Diese befinden sich in 20 Buhnensystemen auf einer Küstenlänge von 79 km. Exponierte, stark belastete Steilküstenabschnitte mit akut gefährdeten Ortsinnenbereichen oder mit Aufhängerwirkung



Abb. 7: Übersichtskarte Mecklenburg-Vorpommen mit den überflutungsgefährdeten Niederungen und Schutzanlagen

36

für benachbarte Flachküsten werden heute durch freistehende Wellenbrecher wirksam lokal stabilisiert. Früher kamen dafür kliffnahe Steinwälle oder Ufermauern zum Einsatz. Die Gesamtlänge der Landesküstenschutzdeiche (Deiche 1. Ordnung) beträgt 218 km, davon sind 155 km Bodden- und Flussdeiche und 45 km Seedeiche. Letztere bedürfen in der Regel der Kombination mit belastungsmindernden Dünen oder Geröllwällen im Vorland. Bei Eintritt der Bemessungssturmflut würde ohne wirksame Küstenschutzanlagen eine Fläche von ca. 1080 km<sup>2</sup> auf Grund der natürlichen Höhenlage überfluten. Im gefährdeten Küstengebiet leben fast 11 % der Bevölkerung von Mecklenburg-Vorpommern.

Seit 1990 betrugen die investiven Aufwendungen für den Neubau und die Verstärkung von Küstenschutzanlagen sowie die Erhaltung ihrer Leistungsfähigkeit ca. 260 Mio. EUR. In Abb. 8 ist eine Verteilung der verwendeten Mittel maßnahmebezogen zusammengestellt.



Abb. 8: Zusammenstellung der Aufwendungen für Küstenschutzmaßnahmen im Zeitraum 1991–2005

# 3.5.2 Küstenschutzstrategie des Landes Mecklenburg-Vorpommern

Die Strategie des Küstenschutzes in Mecklenburg-Vorpommern basiert auf den natürlichen Gegebenheiten und den küstenschutztechnischen Traditionen. Dem Erhalt der natürlichen Küstendynamik kommt, soweit mit den Schutzanforderungen vereinbar, oberste Priorität zu. Naturnahe Methoden, wie Sandaufspülungen sowie der vorrangige Einsatz von natürlichen Baustoffen, wie Holzpfähle im Buhnenbau und Natursteine beim Wellenbrecher- und Deckwerksbau, tragen den Empfehlungen der Helsinki-Kommission zum Schutz der Meeresumwelt der Ostsee sowie der touristischen Nutzung der Strände Rechnung.

Ausgerichtet ist die Strategie, auf der Grundlage des Landeswassergesetzes, auf den Schutz von im Zusammenhang bebauten Gebieten. Entsprechend der Nutzung der überflutungs- bzw. rückgangsgefährdeten Flächen ergibt sich eine differenzierte strategische Herangehensweise. An der Außenküste ist im Flachküstenbereich die Verteidigung auf den bestehenden uferliniennahen Schutztrassen inklusive der Sicherung der Trassen selbst gegen Küstenrückgang die Regel. Neben dem direkten Schutz der Ortslagen an der Außenküste verhindern durchgehende Dünenzüge und Seedeiche Durchbrüche bei Sturmfluten in die Bodden- und Haffgewässer, wodurch sich dort geringere Bemessungshochwasserstände und Seegangsbelastungen ergeben. Wo durchgehende Verteidigungslinien nicht erforderlich sind, werden auch Ringdeichungen um Ortschaften angelegt (Anpassung) und nicht bebaute Gebiete dem natürlichen Überflutungsgeschehen überlassen.

Steilküstenbereiche werden durch den als öffentliche Pflichtaufgabe realisierten Küstenschutz nur verteidigt, wenn eine akute Gefährdung von Ortsinnenbereichen durch Küstenrückgang zu erwarten ist. Solange dies nicht der Fall ist, wird die Strategie des Rückzugs angewandt, um die Funktion der Kliffs als Sedimentlieferant für die Flachküstenabschnitte zu erhalten. Ausgenommen sind ausgewählte, exponierte Steilküstenabschnitte, die wegen ihrer großräumigen Wirkung auf die Küstenlinienentwicklung der benachbarten Abschnitte stabilisiert werden müssen.

An den Bodden- und Haffküsten wird neben der Verteidigung auf vorhandenen Trassen auch der Rückzug im Bereich unterdimensionierter, langer und ortsferner Deichstrecken verfolgt. Wenn der Ausbau und die Unterhaltung zur Kehrung des Bemessungshochwassers (BHW) mit unvertretbarem technischem und finanziellem Aufwand verbunden ist, werden sie durch ortsnahe, erheblich verkürzte Deichneubauten ersetzt. Angestrebt wird in diesem Zusammenhang die Renaturierung der ausgedeichten Flächen u. a. auch als Ausgleich für Eingriffe, die durch Küstenschutzmaßnahmen verursacht wurden. Erforderlichenfalls werden die Altdeiche zur Belastungsminderung oder zur Aufrechterhaltung der landwirtschaftlichen Nutzung erhalten.

Besondere Anforderungen stellt der notwendige Schutz der überflutungsgefährdeten Bereiche der Hafenstädte dar, die ein hohes Schadenspotential aufweisen, z. Zt. jedoch über keine oder unzureichende Schutzanlagen verfügen. Hier sind intelligente Lösungen gefragt, die sich in den städtischen Raum einpassen. Nur im Ausnahmefall sind küstennahe, verkürzte Trassen möglich und sinnvoll, wie bei den Planungen für den Sturmflutschutz Greifswalds, als dessen Kernstück ein Sperrwerk im Fluss Ryck vorgesehen ist. Da sich die Verfügbarkeit von relativ überflutungssicheren bebaubaren Flächen erhöht, kann hier im gewissen Sinn von Vordringen gesprochen werden.

Die Regel ist im städtischen Bereich eher eine Anpassungsstrategie. Dabei werden neben linienförmigen Schutzanlagen, insbesondere Wände, auch Flächenerhöhungen und BHWsichere Wohngeschosshöhen sowie angepasste Nutzungen im Rahmen der Bauleitplanung vorgesehen. Mobile Elemente sollen nur im Ausnahmefall oder im Objektschutz Verwendung finden. Die Anzahl zu verschließender Deichscharten ist zu minimieren.

## 3.5.3 Rechtliche Grundlagen und administrative Strukturen

### Rechtliche Grundlagen des Küstenschutzes

Der Küstenschutz wird durch das Wassergesetz des Landes Mecklenburg-Vorpommern (LWaG) geregelt. Das Gesetz bestimmt Zuständigkeiten, zulässige Nutzungen und Genehmigungspflichten sowie den Fortbestand der vor seinem Inkrafttreten bereits festgelegten Küstenschutzgebiete. Der Küstenschutz umfasst alle Maßnahmen zur Sicherung menschlicher Nutzungen an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns vor Überflutung und Küstenrückgang. Der Küstenschutz wurde zur öffentlichen Aufgabe erklärt, die jedoch keinen Rechtsanspruch Dritter begründet. Die Pflicht zur Sicherung der Küsten ist auf den Schutz von im Zusammenhang bebauten Gebieten begrenzt.

### Zuständigkeit, Organisation, Finanzierung

Das Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes ist oberste Wasserbehörde und in dieser Eigenschaft auch für den Küstenschutz zuständig.

Die Zuständigkeit für Planfeststellungen und Plangenehmigungen von Küstenschutzanlagen obliegt dem Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie.

Für alle sonstigen mit dem Küstenschutz verbundenen wasserrechtlichen Vollzugsaufgaben sind die Staatlichen Ämter für Umwelt und Natur (StAUN) als untere Landesbehörden verantwortlich.

Im Landeswassergesetz ist zur Erfüllung der Pflichtaufgabe "Küstenschutz", d. h. der Bau und die Unterhaltung von Küstenschutzanlagen zur Sicherung im Zusammenhang bebauter Gebiete, die Bildung von Küstenschutzverbänden nach besonderer gesetzlicher Vorschrift vorgesehen. Bis zur Gründung dieser Verbände wurden die Aufgaben des Küstenschutzes an die staatliche Umweltverwaltung übertragen und durch die Staatlichen Ämter für Umwelt und Natur wahrgenommen. Im StAUN Rostock ist die Abteilung Küste als Kompetenzzentrum für den Küstenschutz angesiedelt. Sie übernimmt als Arbeitseinheit mit zentralisiertem Küstenschutzsachverstand Grundlagen-, Planungs- und Serviceaufgaben für die StÄUN Schwerin, Rostock, Stralsund und Ueckermünde als untere Wasserbehörden und staatliche Bauverwaltung und gewährleistet so eine einheitliche Behandlung der gesamten Küste Mecklenburg-Vorpommerns. Diese Organisationsform hat sich in den vergangenen Jahren bewährt. Neben der staatlichen Umweltverwaltung übernehmen die im Land gegründeten Wasser- und Bodenverbände Küstenschutzaufgaben. Sie sind für den Bau und die Unterhaltung der Deiche und Anlagen zuständig, die dem Schutz landwirtschaftlicher Flächen dienen. Die Finanzierung der investiven Küstenschutzmaßnahmen erfolgt im Wesentlichen mit Mitteln aus der Gemeinschaftsaufgabe "Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes". Seit Aufstellung des Generalplanes Küsten- und Hochwasserschutz im Jahr 1995 werden in Mecklenburg-Vorpommern jährlich ca. 15 Mio. EUR für den Küstenschutz eingesetzt. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass pro Jahr etwa 5 Mio. EUR erforderlich sind, um das bereits vorhandene Schutzniveau gegen die Rückgangstendenz der Küste aufrecht zu erhalten. Nach außerordentlichen Ereignissen, wie z. B. dem Befall der Holzpfahlbuhnen mit dem Schiffsbohrwurm (Teredo navalis) oder nach Sturmflutereignissen, wurden aber auch zusätzlich Landesmittel zur Verfügung gestellt, um die aufgetretenen Schäden schnell zu beseitigen. Die erforderlichen Unterhaltungsmittel von ca. 2 Mio. EUR pro Jahr werden aus dem Landeshaushalt bereitgestellt. Deiche und zugehörige Anlagen, die dem Überflutungsschutz landwirtschaftlicher Flächen dienen, werden durch die Wasser- und Bodenverbände unterhalten und die dafür entstehenden Kosten auf die bevorteilten Flächeneigentümer umgelegt.

# Hochwassermeldedienst

Der Warn- und Alarmdienst wird durch die Hochwassermeldedienstverordnung des Landes Mecklenburg-Vorpommern geregelt. Hochwassermeldezentren für die Ostsee, einschließlich der Bodden- und Haffgewässer, sind das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie für die Herausgabe von Sturmflutwarnungen sowie Wasserstandsvorhersagen und die Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord für die Meldung von Wasserständen.

In Mecklenburg-Vorpommern gibt es 4 Alarmstufen, die wasserstandsabhängig ausgerufen werden. In der Stufe 1 erfolgt nur der Wasserstandsmeldedienst. In Stufe 2 kommt der Kontrolldienst, in Stufe 3 der Wachdienst und in Stufe 4 der Abwehrdienst hinzu. Die Stufe 1 wird durch das örtlich zuständige Staatliche Amt für Umwelt und Natur ausgelöst und aufgehoben. Die Stufen 2–4 werden durch den jeweiligen Landrat bzw. Oberbürgermeister nach Anhörung des örtlich zuständigen StAUN ausgelöst und aufgehoben. Die Aufgaben bei der Durchführung der vorbereitenden und abwehrenden Maßnahmen in den Alarmstufen 2–4 sind in Abwehrplänen zu regeln. Die Erarbeitung dieser Pläne und die Leitung der vorbereitenden und abwehrenden Maßnahmen in den Alarmstufen 2–4 erfolgt durch den jeweiligen Landrat bzw. Oberbürgermeister. Die Staatlichen Ämter für Umwelt und Natur sind dabei als Fachberater eingebunden.

### Wasserwehr und Katastrophenschutz

Gemeinden, die erfahrungsgemäß durch Sturmfluten gefährdet werden können, sind durch das Landeswassergesetz verpflichtet, einen Wasserwehrdienst einzurichten. Dieser ist entweder selbständig organisiert oder der öffentlichen Feuerwehr angegliedert.

Erreicht das Sturmflutereignis Katastrophenausmaße, regelt sich die Bekämpfung nach dem Landeskatastrophenschutzgesetz. Die Zuständigkeit für alle zu ergreifenden Maßnahmen liegt dann bei den jeweiligen Landräten bzw. Oberbürgermeistern. Sind mehrere Landkreise bzw. kreisfreie Städte betroffen, was in der Regel der Fall sein wird, werden die Maßnahmen unter Leitung des Innenministers koordiniert.

In Mecklenburg-Vorpommern können im Falle einer Sturmflut insgesamt 10 Landkreise und kreisfreie Städte von den Auswirkungen unmittelbar betroffen sein.

#### Raumordnung

Im Landesraumentwicklungsprogramm wurden folgende Grundsätze festgelegt, die auch in präzisierter Fassung in den Regionalen Raumordnungsprogrammen der Planungsregionen Westmecklenburg, Mittleres Mecklenburg/Rostock und Vorpommern Berücksichtigung fanden:

- Für den Küsten- und Hochwasserschutz bedeutsame Bereiche an der Küste und an den Flüssen umfassen Gebiete, die bei Eintritt des Bemessungsereignisses in Folge des Fehlens oder Versagens von Hochwasser- bzw. Sturmflutschutzeinrichtungen überschwemmt werden können, ein besonderes Schadenspotential aufweisen bzw. nach Landeswasserrecht festgelegte Überschwemmungs- bzw. Küstenschutzgebiete.
- 2) In den Regionalen Raumordnungsprogrammen können weitere Vorbehaltsgebiete Küsten- und Hochwasserschutz an den Küsten und Flüssen auf der Grundlage fachplanerischer und -technischer Daten festgelegt werden. Eine weitere Differenzierung über die Ausweisung von Vorranggebieten Küsten- und Hochwasserschutz, in denen der Küsten- und Hochwasserschutz Vorrang vor allen anderen Nutzungsansprüchen hat, ist möglich.

- An der Ostseeküste und in den Niederungsbereichen der Elbe sind insbesondere die besiedelten Bereiche durch K
  üsten- bzw. Hochwasserschutzbauten zu sichern.
- 4) An der Küste sind im Zusammenhang bebaute Gebiete vor Sturmfluten zu schützen. Außerhalb dieser Gebiete ist die Entwicklung einer natürlichen Küstendynamik weitestgehend zuzulassen ...

Im Landesraumentwicklungsprogramm und in den Regionalen Raumordnungsprogrammen wird ausdrücklich auf das Wassergesetz des Landes Mecklenburg-Vorpommern und auf den Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz verwiesen und dementsprechend vom Grundsatz her eine Übereinstimmung zwischen den Küstenschutzstrategien und der Raumordnung hergestellt.

#### 3.5.4 Bemessungskonzepte

Küstenschutzanlagen haben den Zweck, den in ihrem Schutzbereich lebenden Menschen weitestgehende Sicherheit vor dem Ertrinken und vor schweren materiellen Verlusten selbst bei extremen Ereignissen zu bieten. Sie werden nach einem einheitlichen Vorgehen bemessen, das mit dem in anderen Küstenbundesländern vergleichbar ist und für die Siedlungen in überflutungsgefährdeten Küstengebieten einheitliche Lebensverhältnisse gewährleistet.

Sofern keine akute Gefahr für Leib und Leben zu erwarten ist, werden Küstenschutzanlagen allerdings nur errichtet, wenn der durch sie verhinderte Schaden den Aufwand für ihren Bau und ihre Unterhaltung übersteigt.

#### Bemessungswasserstand

Die fundamentale Größe aller Planungen für den staatlichen Küstenschutz ist der Bemessungshochwasserstand (BHW). Er basiert auf dem höchsten bisher zuverlässig gemessenen Wasserstand während einer Sturmflut (Vergleichswertverfahren). Für die Außenküste bilden die Scheitelwerte der extremen Sturmflut vom 12./13. November 1872 die Grundlage. Da für die Bodden und Haffe kaum verwertbare Messwerte extremer Sturmfluten vorliegen, wurden hier numerische Modelle herangezogen. Unter der Annahme, dass die Küstenschutzanlagen der Außenküste nicht versagen, wurde die Ganglinie der Sturmflut 1872 an den natürlichen hydraulischen Verbindungen eingesteuert und maximale Füllungswasserstände der inneren Seegewässer ermittelt. Ergänzend war es notwendig, in den flachen Boddengewässern die lokal möglichen Windstaueffekte zu berechnen und bei der Bestimmung der maßgeblichen Wasserstände zu berücksichtigen.

Unabhängig von den aktuellen Prognosen zum künftigen klimaänderungsbedingten Meeresspiegelanstieg wird ein auf der Grundlage der wissenschaftlichen Untersuchungen an langjährigen Pegelreihen festgestellter Säkularanstieg von ca. 20 bis 30 cm für 200 Jahre (zurückliegender Zeitraum bis 1872 plus voraussichtliche Nutzungsdauer der meisten Küstenschutzanlagen) berücksichtigt.

Es ergeben sich BHW-Werte an der Außenküste zwischen NHN +2,35 m (Arkona/ Rügen) und NHN +3,50 m (Pötenitz/Westmecklenburg). (NHN = Normalhöhennull). In der Fischland-Darß-Zingster Boddenkette und den inneren Küstengewässern der Insel Usedom sind die BHW-Werte aufgrund der sehr schmalen Verbindungen zur Ostsee und der darauf beruhenden eingeschränkten Korrelation von Außen- und Binnenwasserstand teilweise wesentlich geringer.

#### Möglichkeit zur Reduktion des BHW

Die Erfahrungen der vergangenen Jahre haben gezeigt, dass es nicht immer angebracht ist, den Bemessungshochwasserstand als starres Instrument zu verwenden. Neuerdings wird deshalb bei der Bemessung von Schutzanlagen für Gebiete, in denen keine akute Lebensgefahr besteht, die Möglichkeit einer Reduktion eingeräumt, um insbesondere ökonomische Kriterien und kommunale Interessen angemessen berücksichtigen zu können.

Im konkreten Einzelfall kann der Bemessungshochwasserstand daher um bis zu 25 % reduziert werden. Auch bei maximaler Reduktion ist überall gewährleistet, dass die so bemessene Schutzanlage noch Ereignissen bis zu einem Wiederkehrsintervall von 100 Jahren standhält. Für die Außenküste kommt wegen der besonderen Gefährdungssituation eine Reduktion des BHW grundsätzlich nicht in Betracht.

#### Bemessungsseegang

Im Ergebnis von Seegangsmodellierungen, vergleichenden statistischen Auswertungen von Seegangsmessungen und Vorhersageverfahren, die von der Universität Rostock und der Technischen Universität Dresden durchgeführt wurden, liegt flächendeckend für die Küste Mecklenburg-Vorpommerns der lokal der Bemessungssturmflut zuzuordnende Seegang vor. Da die Seegangsbelastung abhängig von der Lage und Gestalt des Küstenabschnitts und von der Größe und Tiefe des Gewässers ist, unterscheiden sich die Belastungen an der Außenküste deutlich von denen an den inneren Seegewässern.

An der Außenküste ergeben sich an 13 übergeordneten Lokationen für das angesetzte Wiederkehrsintervall von 250 Jahren mit Windgeschwindigkeiten zwischen 25 und 30 m/s signifikante Tiefwassserwellenhöhen von 2 bis 5 m. Diese Daten bildeten die Grundlage zur Berechnung der lokalen Wellenparameter in der Uferzone. Dort sind bei Eintritt des BHW signifikante Wellenhöhen zwischen 1,5 und 2 m maßgebend.

Für die inneren Seegewässer war es wegen ihrer kleinräumigen Unterschiedlichkeit erforderlich Seegangsberechnungen für 179 Lokationen vorzunehmen. Aufgrund des zeitlich stark verzögerten Sturmflutverlaufs mussten hier nicht nur die Sturmflut erzeugenden Windrichtungen sondern alle Windsektoren berücksichtigt werden. Unter Zugrundelegung langjähriger Windverteilungen wurden Windgeschwindigkeiten zwischen 10 m/s (SO) und 25 m/s (NO) angesetzt, die wegen der stark variierenden Form der Gewässer signifikante Wellenhöhen von wenigen Dezimetern in einigen Rügenschen Bodden bis über 1 m im Greifswalder Bodden ergaben.

#### Dünenbemessung

Während Deiche, Deckwerke u. a. Küstenschutzanlagen wie in allen deutschen Küstenländern auf der Grundlage allgemeiner Richtlinien wie der EAK, ergänzt durch zutreffende Teile aus Regelwerken wie DIN, EN und EVN bemessen werden, stellt die Bemessung von Dünen eine Besonderheit dar. Dünen sind das die Flachküsten Mecklenburg-Vorpommerns prägende Landschaftselement und auf immerhin 106 km Küstenlänge gleichzeitig zentrale Anlage des Küstenschutzsystems.

Während früher die Dünendimensionierung auf Erfahrungswerten beruhte, liegen seit 2004, berechnet durch die Technische Universität Braunschweig auf der Basis von numerischen Modellierungen mit einem Quertransportmodell, Solldünendimensionen für alle Landesküstenschutzdünen vor. In Abhängigkeit von der Höhe des seeseitigen Dünenfußes und der Dünenkronenhöhe ist grafisch oder tabellarisch die erforderliche Kronenbreite bestimmbar. Diese Kronenbreite beinhaltet bei Vollschutzdünen, die allein das BHW kehren müssen, die Abbruchbreite bei BHW (Reserveteil) und einen sicheren Restquerschnitt von 5 m Breite (Sicherheitsteil). Bei Systemschutzdünen, bei denen Deiche oder Ufermauern die Aufgabe des Sicherheitsteiles übernehmen, entspricht die Sollkronenbreite der Abbruchbreite bei BHW. An den im Küstenrückgang befindlichen Abschnitten müssen sowohl Vollals auch Systemschutzdünen durch Wiederholungsaufspülungen in unregelmäßigen Abständen verstärkt werden. Dabei wird zusätzlich zur Solldünendimension ein seeseitiger Verschleißteil angelegt, der so dimensioniert wird, dass er in der Regel frühestens nach 5 Jahren dem völligen Abtrag unterlegen ist und erst dann die nächste Sandaufspülung erforderlich wird.

### 3.5.5 Weitergehende Überlegungen und Ausblick

Mit dem im Frühjahr 2009 herausgegebenen Übersichtsheft des Regelwerks Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern wird der aktuelle Kenntnisstand zusammengefasst, das seit Veröffentlichung des Generalplanes 1995 Erreichte bilanziert und ein Ausblick auf die künftigen Aufgaben gegeben. Damit wurde der Übergang vom starren, gebundenen Generalplan zum flexiblen "Regelwerk Küstenschutz M-V" eingeleitet, das künftig in einzelnen themenbezogenen Heften die Grundlagen des Küstenschutzes in M-V vorgeben wird. Die einzelnen Hefte sind leicht aktualisierbar und somit dem schnell wachsenden Erkenntnisstand, besonders hinsichtlich des Klimawandels, gut anpassbar.

Gegenwärtig weisen die Prognosen für den globalen Meeresspiegelanstieg bis 2100 noch eine große Spannweite (18 bis 59 cm gemäß IPPC, 2007) auf. Auch sind die regionalen Auswirkungen noch schwer vorher bestimmbar. Einen wichtigen Beitrag zu regionalen Anpassungs- und Handlungsstrategien liefert die von der Landesregierung in Auftrag gegebene, 2008 fertig gestellte Studie "Klimaschutz und Folgen des Klimawandels in M-V". Für die Küste Mecklenburg-Vorpommerns wird darin ein Anstieg des mittleren Meeresspiegels von 20 bis 30 cm bis 2100 abgeschätzt, was etwa eine Verdoppelung der bisher gemessenen Werte bedeuten würde. Die zu erwartenden Klimaentwicklungen müssen natürlich in eine auf Nachhaltigkeit abzielende, regionale Küstenschutzstrategie einfließen.

Allerdings besteht bei den meisten, erst in den letzten Jahren errichteten bzw. ausgebauten Küstenschutzanlagen kein akuter Handlungsbedarf, da bei der Bemessung bereits der aktuelle Meeresspiegelanstieg für den Nutzungszeitraum berücksichtigt ist. Die heute errichteten Anlagen besitzen daher einen Sicherheitspuffer der auf ca. 70 Jahre ausgelegt ist. Sollte sich der Meeresspiegelanstieg künftig verdoppeln, hätte dies zunächst die Halbierung des Sicherheitspuffers auf 35 Jahre zur Folge. Es besteht daher noch die Möglichkeit genauere Prognosen abzuwarten und zunächst die Defizite im bestehenden Schutzsystem auf bisherigem Niveau zu schließen.

Ungeachtet dessen gilt es die Leistungsfähigkeit der Küstenschutzanlagen unter sich ändernden äußeren Bedingungen regelmäßig zu überprüfen. Insbesondere betrifft dies die Küstenschutzdünen, die als flexible Anlagen in der vordersten Reihe als erste von durch Meeresspiegelanstieg forciertem Küstenrückgang und möglicherweise häufigeren Sturmfluten betroffen sind. Dazu ist ein teilautomatisiertes Dünenkataster in Arbeit, das in regelmäßigen Abständen oder nach Sturmfluten mit Hilfe von Laserscanning-Luftaufnahmen Defizite zu den Sollabmessungen aufzeigen kann. Ergänzend müssen durch langfristig vorausschauende Erkundung und Verfügbarmachung von Sandlagerstätten in See die periodisch erforderlichen Aufspülungen abgesichert werden.

Aber auch für die übrigen Sturmflutschutzanlagen ist in Hinblick auf die Berichtspflichten zur EU-HWRMRL (EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie) der vorhandene Sicherheitsstandard und in den Risikogebieten das Gefährdungspotential zu ermitteln. Die Grundlage für die Feststellung der Gebiete mit potentiell signifikantem Hochwasserrisiko liegt mit dem Digitalen Geländemodell "Küstengefährdung M-V", das laufend mit neuen Vermessungs- und Laserscanningaufnahmen aktualisiert wird, vor.

Im Übersichtsheft des Regelwerks Küstenschutz M.-V. (2009) werden für die Zukunft folgende allgemeine Handlungsempfehlungen gegeben:

- Die öffentliche Aufklärung der Bevölkerung über relevante Gefahren durch Stürme, Sturmfluten, Überflutungen und Küstenrückgang hat zunehmende Bedeutung.
- Die Schaffung neuer Problembereiche durch Bebauung in potenziellen Gefährdungsräumen, die von Überflutungen, Küstenrückgang und Steilküstenabbrüchen bedroht sind, sollte durch konsequente Anwendung der gesetzlichen Regelungen vermieden werden. Die Begründung neuer Küstenschutzerfordernisse kann so ausgeschlossen werden. Sicherheitsabstände an rückgängigen Küsten sollten in der Regel so gewählt werden, dass für die neuen Baukörper ein Mindestnutzungszeitraum von 100 Jahren gewährleistet ist. Dies dient nicht allein der Risikobegrenzung, sondern auch dem Erhalt von Handlungsoptionen des Landes.
- Die vorhandenen Küstenschutzanlagen sind sukzessive an die veränderten Bedingungen anzupassen bzw. langfristig ist deren selektive Rückverlagerung dort zu planen und schrittweise zu realisieren, wo der technisch-ökonomische Aufwand in vernünftigem Verhältnis zum Nutzen steht.
- Fortsetzung und Förderung eines wissenschaftlichen Küstenmonitorings durch Fachbehörden des Landes in Zusammenarbeit mit Universitäten/Hochschulen mit dem Ziel, Gefährdungspotenziale zu erkennen, zu dokumentieren und in Geoinformationssystemen sowie Karten vorzuhalten.

# Das traditionelle Küstenschutzsystem in Mecklenburg-Vorpommern: Düne – Küstenschutzwald – Deich

Nach der Sturmflut 1872 und den nachfolgenden Ereignissen 1904, 1913 und 1954 entstanden auf der Halbinsel Fischland-Darß-Zingst und der Insel Usedom in 100 bis 200 m Entfernung von der Uferlinie Seedeiche, die auf Seegangsdämpfung im Vorlandbereich angewiesen sind. Für den Fall des Durchbruchs der Düne und der dann folgenden Einebnung wurde ein weiteres dämpfendes Element benötigt. Aus diesem Grunde erfolgte eine Aufforstung des Vorlandes zwischen Deich und Düne als sogenannter Küstenschutzwald.

Infolge des langfristigen Küstenrückganges sind heute die Waldbreiten häufig stark reduziert. In den Jahren 1994/95 wurde die Dämpfungswirkung von Wald deshalb wissenschaftlich untersucht. Dabei zeigte sich, dass die wellendämpfende Wirkung von Wald früher überschätzt wurde. Neben der Rauheitsgeometrie (abhängig vom Aufbau des Waldes) und den Ausgangswellenparametern haben insbesondere die Restdünenhöhe nach dem Überströmen und die Vorlandhöhe wesentlichen Einfluss auf die Wellenhöhe am Deich. Waldbreiten < 30 m, die heute teilweise vorhanden sind, kann keine Dämpfungswirkung mehr zugeschrieben werden. Mit Ausnahme von Breiten > 100 m wird der Wald für die Deichbemessung rechnerisch nicht angesetzt, aber als zusätzliches wellendämpfendes Element erhalten.

Als weitere Funktionen sind die Begünstigung des äolischen Dünenaufbaus und -erhaltes sowie die Verfestigung der Vorlandoberfläche zu nennen.

Das traditionelle Küstenschutzsystem aus Düne, Küstenschutzwald und Seedeich existiert heute auf 29 km Küstenlänge.

#### 3.6 Niedersachsen

#### 3.6.1 Allgemeiner Überblick

Für die niedrig liegenden Gebiete an der Niedersächsischen Küste mit den großen Ästuaren Ems, Weser und Elbe und für die vorgelagerten Ostfriesischen Inseln bildet der Schutz vor Sturmfluten und Erosion eine unverzichtbare Voraussetzung für die Sicherung eines über 6600 km<sup>2</sup> großen Siedlungsgebietes, in dem mehr als 1,2 Mio. Menschen leben (Abb. 9). Küstenschutz bildet somit ein wesentliches Element der Daseinsvorsorge und dient dazu, die übergeordneten raumordnerischen Ziele einer nachhaltigen räumlichen Entwicklung der Küstengebiete und eines möglichst gefahrlosen Lebens und Wirkens des Menschen, wie sie im Landesraumordnungsprogramm Niedersachsen (LROP, 2008), formuliert sind, sicherzustellen. Die niedrig gelegenen Küstenmarschen ziehen sich weit in das Binnenland hinein und schließen an hochliegende Geestgebiete an. Vor der Küste liegen die Ostfriesischen Inseln, von denen sieben als bedeutsame Tourismusstandorte dauerhaft bewohnt sind. Diese sind als sandige Barriereinseln besonders den dynamischen Kräften des Meeres ausgesetzt. Als Lebensgrundlage für den Menschen kann die Leistungsfähigkeit dieses Siedlungs-, Wirtschafts-, Kultur- und Naturraumes nur durch einen wirksamen Küstenschutz als Vorsorgeaufgabe dauerhaft gesichert werden. Die mehr als 1000 Jahre zurück reichende Geschichte des Deichbaus in Niedersachsen ist durch ein ständiges Ringen des Menschen mit den Kräften des Meeres gekennzeichnet: Dollart, Leybucht und Jadebusen sind bis heute sichtbare Zeugnisse von ehemaligen tiefen Meereseinbrüchen in das Festland.



Abb. 9: Deichgeschütztes Gebiet, Hauptdeiche und Sperrwerke an der Festlandsküste (NLWKN, 2007)

Der Sturmflutschutz wird oft über eine Kombination aus verschiedenen Küstenschutzelementen, die zusammen ein Küstenschutzsystem bilden, gewährleistet (Abb. 10 und Tab. 5). Hierbei unterscheiden sich die technischen Schutzkonzepte für den Küstenschutz an der Festlandsküste und auf den Ostfriesischen Inseln wegen der unterschiedlichen Gegebenheiten.

An der Festlandsküste und den Tideflüssen besteht eine geschlossene Linie aus 610 km Hauptdeichen und 17 Sturmflutsperrwerken als sturmflutkehrenden Schutzelementen. Die Hauptdeichlinie beginnt an der Niederländischen Grenze und endet an der Elbe an der Staustufe Geestacht. Die Kronenhöhe der Hauptdeiche bewegt sich in Abhängigkeit von den hydrodynamischen Belastungen von ca. NN +5,6 m in Cuxhaven bis über NN +9 m an der Elbe oberhalb Hamburgs und in Utlandshörn/Ostfriesland. Als Erosionsschutz befinden sich vor dem Deich oder Deichvorland im Watt Lahnungen und Buhnen, die zum Schutze des Deiches zu erhalten sind. Auf größeren Strecken der niedersächsischen Hauptdeichline sind diese Schutzanlagen vorhanden.

An den Tideflüssen Ems, Weser und Elbe und deren Nebenflüssen schützen Sperrwerke die Niederungsgebiete der Niedersächsischen Küste bis weit in das Binnenland hinein vor Sturmfluten und erhöhten Tiden. Drei Sperrwerke liegen auf dem Gebiet benachbarter Bundesländer. Die Größe der Sperrwerke und deren Betriebszustände variieren in Abhängigkeit von den jeweiligen örtlichen Erfordernissen. Mit einer Gesamtöffnungsbreite von 476 m ist das Emssperrwerk das größte Sperrwerk in Niedersachsen, welches zusätzlich mit einer Staufunktion zur Gewährleistung der Überführung von Schiffsneubauten ausgestattet ist. Oberhalb eines Sperrwerks liegen i. d. R. Schutzdeiche, die dem Schutz eines Gebietes vor Wasser dienen, welches wegen der Sperrung des Tidegewässers nicht abfließen kann und deshalb für die Dauer einer Sperrwerkschließung gespeichert werden muss. Schutzdeiche dienen gleichzeitig als Überflutungssicherheit bei Versagen des jeweiligen Sperrwerks.

Die seewärts der Hauptdeiche gelegenen, nicht überflutungsgeschützten Deichvorländer ermöglichen die Gestaltung des Hauptdeiches als Vorlanddeich ohne zusätzliche Sicherungswerke. Das Deichvorland ist gemäß dem Niedersächsischen Deichgesetz (NDG) deshalb zum Schutz des Deiches zu pflegen und zu erhalten. Große Teile der Deichvorländer an der Niedersächsischen Küste sind durch Landgewinnungsmaßnahmen überwiegend unter landwirtschaftlichen Zielsetzungen gewonnen worden. Heute besitzt das Deichvorland vor allem für den Küstenschutz als Schutzelement für den Hauptdeich und für den Naturschutz als wertvoller Biotop eine sehr große Bedeutung. Zum Erhalt des Deichvorlandes leisten Lahnungen und Buhnen als Schutzwerke einen wichtigen Beitrag, weil natürliche Vorlandentwicklung nur noch in wenigen geschützten Bereichen stattfindet.

Als weiteres Schutzelement dienen hinter der Hauptdeichlinie liegende, als zweite Deichlinie gewidmete Deiche, die durch ehemalige, jetzt vorgedeichte, Hauptdeichlinien gebildet werden. Zweite Deichlinien sollen bei Versagen eines Hauptdeiches oder Sperrwerkes die Überschwemmung im geschützten Gebiet einschränken und so zur Reduzierung potentieller Schäden beitragen. Zweite Deichlinien sind in Niedersachsen nur auf kleineren Teilstrecken der Hauptdeichlinie mit einer Gesamtlänge von 138 km vorhanden und sind zu erhalten.

Die Ostfriesischen Inseln bzw. deren Vorläufer sind als sandige Barriereinseln im Zuge des nacheiszeitlichen Meeresspiegelanstieges entstanden und unterliegen durch Seegang,



Abb. 10: System aus Küstenschutzelementen (NLWKN, 2007)

Strömung und Wind ständigen morphologischen Veränderungen. Zur Sicherung der Dünen und Strände vor durch Sturmfluten und Küstenerosion bedrohten Ortslagen sind beginnend in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts die Westköpfe aller Inseln mit Ausnahme von Juist und Langeoog durch massive wasserbauliche Anlagen festgelegt worden. Diese Anlagen wurden nachfolgend in Folge von Sturmflutschäden und Erosion in mehreren Schritten erweitert und bilden heute einen wichtigen Teil des Sturmflutschutzes.

Die Nordseiten der Inseln werden überwiegend durch Schutzdünen gegen Sturmfluten geschützt. Diese bestehen überwiegend aus ausreichend breiten und hohen natürlichen Dünenzügen, die flächenhaft mit Breiten von bis zu 400 m gewidmet sind. Schutzdünen und überwiegend an der Wattseite liegende Hauptdeiche bilden als geschlossene Ringe den Sturmflutschutz für Siedlungsbereiche und Infrastruktur (Abb. 11). In Sturmfluten verringern zudem die Ostfriesischen Inseln als natürliches Barrieresystem die Seegangsbelastung der Festlandsküste.

Insgesamt sind auf den Ostfriesischen Inseln ca. 88 km Schutzdünen und ca. 35 km Hauptdeiche als primäre Küstenschutzanlagen vorhanden.

	Festland	Ostfriesische Inseln	Gesamt
Hauptdeiche [km]	610	35	645
Sperrwerke [Anzahl]	17*	_	17
Schutzdünen [km]	_	88	88
2. Deichlinie [km]	138	_	138

Tab. 5: Übersicht über Insel- und Küstenschutzanlagen in Niedersachsen

\* davon 14 auf niedersächsischem Gebiet und drei auf Gebiet anderer Bundesländer mit Schutzwirkung auch für Niedersachsen

### 3.6.2 Küstenschutzstrategie des Landes Niedersachsen

Die Sturmflut vom 1.2.1953, die in den südlichen Niederlanden aber auch in Belgien und Großbritannien viele Menschenleben forderte und schwere Schäden verursachte, war Anlass den Ausbau der Küstenschutzanlagen mit Hilfe des 1955 aufgelegten Niedersächsischen Küstenprogramms systematisch voranzutreiben und damit die Hauptdeichlinie zu verstärken und in ihrem Verlauf zu optimieren. Nach der Katastrophenflut vom 16./17.2.1962 wurde das Ausbauprogramm für Deiche und andere Küstenschutzanlagen wesentlich intensiviert, die Deichbauregeln überprüft und an die Erfahrungen angepasst. Im Jahr 1973 hat der Nds. Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten den "Generalplan Küstenschutz Niedersachsen" herausgegeben und die zu dem Zeitpunkt noch durchzuführenden Maßnahmen zusammengestellt. Mit Hilfe großer Investitionen in den Küstenschutz von über 2,2 Mrd. EUR seit 1955 ist der Sicherheitsstandard der Küstenschutzanlagen in Niedersachsen heute höher als je zuvor.

Mit dem im Jahr 2007 aufgestellten Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen – Festland – werden Grundsätze des Küstenschutzmanagements formuliert und der aktuelle Ausbaubedarf der Küstenschutzanlagen dargestellt (NLWKN, 2007). Für die Ostfriesischen Inseln und die Schutzdeiche werden weitere Teile des Generalplans erstellt.

In Niedersachen werden, im Unterschied z. B. zu den Niederlanden oder Schleswig-Holstein große zusammenhängende Gebiete geschützt, welche überwiegend nicht durch Polderdeiche unterteilt sind. Ziel ist es deshalb, für die überflutungsgefährdeten Gebiete einen möglichst gleichwertigen Schutz gegen einen in Sturmfluten zu erwartenden höchsten Tidehochwasserstand als Bemessungswasserstand sicherzustellen. Neben den Hauptdeichen und Sperrwerken kommt den Deichvorländern und den Schutz- und Sicherungsanlagen des Deiches eine wichtige Rolle zu, da diese wesentlich zur Funktionalität des Hauptdeichs beitragen. Zusammen mit den auf Teilstrecken vorhandenen zweiten Deichlinien wird so ein Küstenschutzsystem gebildet, dessen zentrales Element der Hauptdeich bildet und welches im Aufbau örtlich variieren kann (Abb. 10). Vorrangiges Ziel ist es heute, die Küstenschutzanlagen zu erhalten sowie wo notwendig zu erhöhen und zu verstärken. Neueindeichungen werden nicht mehr vorgenommen.

Für die Deichvorländer bestand bis in die zweite Hälfte des letzten Jahrhunderts hinein die Zielsetzung, durch Lahnungsbau neue Landflächen für die landwirtschaftliche Nutzung zu gewinnen. Heute stehen für die Vorländer deren Küstenschutzfunktion und die sehr hohe Wertigkeit für den Naturschutz im Vordergrund. Um die Zielvorgaben des Küstenschutzes und des Naturschutzes für das Deichvorland zu harmonisieren, werden in Niedersachsen Managementpläne für das Deichvorland von Küsten- und Naturschutz aufgestellt, die gemeinsame Ziele und Maßnahmen für das Deichvorland definieren (THORENZ und CARSTENS, 2004; NLWKN, 2007). Da sich große Teile der Vorländer mit Ausnahme der Buchten und wenigen geschützten Bereichen ohne Küstenschutzmaßnahmen im Abbruch durch Erosion befinden würden, ist es heute das Ziel, die Vorländer zu erhalten und wo erforderlich zu entwickeln. Deichvorlandmanagementpläne bilden damit einen wichtigen Baustein für den nachhaltigen Umgang mit dem Deichvorland im Sinne eines integrierten Managements.



Abb. 11: Küstenschutzsystem für die Insel Norderney (Datengrundlage TK 50 der LGN)

Das generelle Ziel für die sandigen Ostfriesischen Inseln besteht in der Sicherstellung des Sturmflutschutzes und des Bestandserhalts. Das technische Konzept zur Sicherstellung der Funktion der Schutzdünen als Sturmflutschutz ist maßgeblich abhängig von der Sedimentversorgung des Strandes, den hydrodynamischen Belastungen und bereichsspezifisch formulierten Schutzzielen (THORENZ, 2006). In durch massive Bauwerke geschützten Bereichen, die längerfristiger Erosion unterliegen, wird die vorhandene Küstenschutzlinie gesichert und derzeit auf Norderney Sedimentdefizite zusätzlich bedarfsweise durch Strandauffüllungen ergänzt. In reinen Dünenbereichen kommen unterschiedliche technische Konzepte zur Ausführung, die auf Grund der räumlichen Ausdehnung der Schutzdünen ein größeres Maß an Flexibilität und eine Anpassung an die natürlichen Prozesse ermöglichen, um den Sturmflutschutz sicherzustellen. Diese reichen von einer Sicherung der vorhandenen Küstenlinie durch Sandaufspülungen über ingenieurbiologische Maßnahmen zum Wiederaufbau der Dünensubstanz durch Sandfang- und Dünenbaumaßnahmen bis hin zu einem teilweisen Zulassen der Erosion unter Sicherstellung der Sturmflutschutzfunktion der Schutzdünen mittels rückwärtiger, naturnah gestalteter Verstärkungen der Schutzdünen.

Die besondere Situation der Inseln als einerseits touristisch sehr bedeutsames und stark frequentiertes Gebiet und andererseits in großen Teilen naturschutzrechtlich geschützter Bereich als Teil des Nationalparks Niedersächsisches Wattenmeer erfordert eine gezielte Abstimmung der Anforderungen des Küstenschutzes mit Kommunen und Naturschutzverwaltung im Sinne eines integrierten Managements.

Um Planungen und Maßnahmen des Küstenschutzes zweckmäßig, wirtschaftlich und nachhaltig umsetzen zu können, sind Kenntnisse über das natürliche Umfeld und dessen Wechselwirkungen mit diesen Maßnahmen erforderlich. Eine Beobachtung, Bewertung und weitere Erforschung der komplexen Naturvorgänge im Küstenraum mit den vorgelagerten Watten, Inseln, dem Küstenvorfeld und den Ästuaren stellt deshalb auch im Hinblick auf das Erkennen und Prognostizieren der Auswirkungen von Klimaänderungen eine wichtige Aufgabe dar, die unmittelbare Auswirkungen auf die Bemessung der Küstenschutzanlagen hat. In Kooperation mit Bundes- und Landesdienststellen und Forschungseinrichtungen werden hierzu notwendige Daten erfasst und bewertet. Wichtige Forschungsschwerpunkte sind auch die Verbesserung von Bemessungsansätzen, eine Optimierung der Bauwerksgestaltung und die Weiterentwicklung von Küstenschutzstrategien. Im nationalen Bereich bildet hierbei die Koordination der angewandten Forschung durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), in welchem das Land Niedersachsen Mitglied ist, einen wichtigen Baustein (KFKI, 2001). Daneben erfolgt eine europäische Zusammenarbeit auf Ebene der Anrainerstaaten der südlichen Nordsee sowie auf trilateraler Ebene mit den Niederlanden und Dänemark sowie mit Küstenländern im Nordseeraum.

Wichtige Elemente der niedersächsischen Küstenschutzstrategie, wie sie im Generalplan Küstenschutz dargestellt sind, bilden neben dem Ausbau und der Unterhaltung der Küstenschutzanlagen auch die möglichst frühzeitige Prognose von Sturmfluten durch den Sturmflutwarndienst einschließlich der gezielten Information von Betroffenen, sowie Deichverteidigung, Gefahrenabwehr und Katastrophenschutz (NLWKN, 2007). Die rechtlichen Grundlagen und administrativen Strukturen hierzu sind im folgenden Abschnitt zusammenfassend dargestellt.

## 3.6.3 Rechtliche Grundlagen und administrative Strukturen

In Niedersachsen werden Belange des Küstenschutzes über eigenständiges Gesetz beregelt. Das Niedersächsische Deichgesetz (NDG, 2004) definiert als primäre Ziele des Küstenschutzes den Schutz von Gebieten vor Sturmfluten und die Bestandserhaltung der Ostfriesischen Inseln. Es enthält Legaldefinitionen für Küstenschutzanlagen und Grundsätze für deren Bemessung sowie u. a. Normen für deren Erhaltung, Nutzung und Benutzung, Bau und Veränderung und Kontrolle. Die dauerhafte Funktionsfähigkeit von Küstenschutzanlagen wird über ein Nutzungsverbot dieser sowie von Zonen vor und hinter den Anlagen für andere Zwecke, eine dauerhafte Erhaltung und Unterhaltung, die Kontrolle des Zustandes und der Überprüfung der notwendigen Sollhöhen gewährleistet.

Oberste Deichbehörde ist das Niedersächsische Ministerium für Umwelt und Klimaschutz. Der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) ist als Landesoberbehörde dem Ministerium nachgeordnet und nimmt Landesaufgaben im Küstenschutz wahr. Die Landkreise und kreisfreien Städte führen als untere Deichbehörde Vollzugs- und Überwachungsaufgaben im Bereich des Deichrechts aus. Einige deichrechtliche Aufgaben, die für die Sicherheit und die Versorgung der Bevölkerung von herausragender Bedeutung sind, liegen in der Zuständigkeit des NLWKN. Hierbei handelt es sich z. B. um die Zulassung von Deichbaumaßnahmen oder die Widmung und Bestickfestsetzung von Deichen. Die Zuständigkeiten auf dem Gebiet des Deichrechts werden im Einzelnen über die Zuständigkeitsverordnung zum NDG definiert.

Die Deicherhaltung ist i. d. R. eine gemeinsame Verantwortung aller im Schutze der Deiche lebenden Grundstückseigentümer, die in Niedersachsen in 22 Hauptdeichverbänden zusammengeschlossen sind. Im Falle besonders schwieriger Rahmenbedingungen für Erhaltung und Betrieb von Anlagen wie Sturmflutsperrwerken, dem Küstenschutz auf den Ostfriesischen Inseln und einigen ausgewählten Deichstrecken am Festland liegt die Verantwortung beim Land Niedersachsen vertreten durch den NLWKN.

Der Sturmflutwarndienst des NLWKN stellt bei einer drohenden Sturmflut die frühzeitige Information der Deichverbände und Kommunen sicher. Er bildet eine wichtige Voraussetzung für den Betrieb der Sturmflutsperrwerke und für die gefahrlose Bewirtschaftung der Vorländer. Der NLWKN betreibt diesen Warndienst als innerbetriebliches Steuerungsinstrument, dessen Ergebnisse auf freiwilliger Grundlage der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden. Die Sturmflutvorhersage fußt dabei auf den Windvorhersagen des Deutschen Wetterdienst (DWD). Sie erfolgt in enger Zusammenarbeit mit dem DWD, unter Berücksichtigung der Vorhersagen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) sowie niederländischen Pegel- und Winddaten. Dabei wird unterschiedlichen regionalen Anforderungen und lokalen Besonderheiten Rechnung getragen.

Für die Deichverteidigung bilden die Deichverteidigungsordnungen, die von den Deichbehörden auf Grundlage des NDG erlassen werden, eine wesentliche Grundlage. Diese sollen im Gefahrenfall die Voraussetzung für einen sofortigen Einsatz der Hilfskräfte, Materialien und Geräte schaffen. Der Träger der Deicherhaltung hat gemäß NDG für die Deichverteidigung vorzusorgen.

Zuständig im Rahmen der allgemeinen Gefahrenabwehr sind die Gemeinden auf Grundlage des Niedersächsischen Gesetzes über die öffentliche Sicherheit und Ordnung (Nds. SOG, 2007). Im Katastrophenfall greift das Niedersächsische Katastrophenschutzgesetz (NKatSG, 2004). Der Katastrophenschutz obliegt als Aufgabe des übertragenen Wirkungskreises den Landkreisen und kreisfreien Städten (Katastrophenschutzbehörden). Die Polizeidirektionen führen die Fachaufsicht über die Katastrophenschutzbehörden. Oberste Fachaufsicht führt das Innenministerium. Andere Behörden, Dienststellen und sonstige Träger öffentlicher Aufgaben wirken im Rahmen ihrer Zuständigkeiten oder im Wege der Amtshilfe im Katastrophenschutz mit. Ihre Zuständigkeiten bleiben unberührt. Im Katastrophenfall sollen sie nur im Einvernehmen mit der Katastrophenschutzbehörde handeln. Katastrophenschutzpläne enthalten insbesondere das Alarmierungsverfahren, Informationen über die im Katastrophenfall zu treffenden Sofortmaßnahmen sowie die Einsatzkräfte und -mittel. Die große Bedeutung des Küstenschutzes für die nachhaltige räumliche Entwicklung der Küstengebiete wird im Landesraumordnungsprogramm Niedersachsen (LROP, 2008) deutlich: Der Küsten- und Sturmflutschutz sind unabdingbare Voraussetzungen für die Besiedlung der Küstenzone. Sie sind maßgeblich, um an der Küste und auf den Inseln ein möglichst gefahrloses Leben und Wirken des Menschen zu ermöglichen. Die niedersächsische Küste und die vorgelagerten Inseln sind deshalb vor Schäden durch Sturmfluten und Landverlust zu schützen. Die Voraussetzung für eine dauerhafte und nachhaltige Besiedlung der Ostfriesischen Inseln ist zu gewährleisten. In der niedersächsischen Küstenzone sollen durch eine ganzheitliche abwägende räumliche Steuerung frühzeitig Nutzungskonflikte im Rahmen eines integrierten Managements der Küste vermieden bzw. minimiert werden.

Die Planung und Umsetzung von Küstenschutzmaßnahmen ist in einen breiten rechtlichen Rahmen eingebunden, der eine intensive Abstimmung der Maßnahmen erfordert. Einen Überblick hierzu gibt der Generalplan Küstenschutz. Zukünftig wird für den Küstenschutz die Umsetzung der EU-HWRMRL (Richtlinie 2007/60/EG), deren Anforderungen schrittweise bis Ende 2015 erfüllt sein müssen, von wesentlicher Bedeutung sein.

Investive Küstenschutzmaßnahmen werden überwiegend aus Mitteln der Gemeinschaftsaufgabe "Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes" (GA) sowie in Teilen durch Mittel aus EU-Strukturfonds finanziert (siehe Kap. 3.1). Für Küstenschutzmaßnahmen wurden in Niedersachsen seit 1955 mit der Aufstellung des Niedersächsischen Küstenprogramms bis zum 1.1.2006 rund 2,2 Mrd. EUR aus der Gemeinschaftsaufgabe investiert. Es konnten damit beachtliche Fortschritte in der Verbesserung des Küstenschutzes durch Erhöhung und Verstärkung der Küstenschutzanlangen und Verkürzung der Deichlinie erzielt werden.

In den Jahren 2000 bis 2007 wurden in Niedersachsen für Investitionsmaßnahmen im Küstenschutz im Mittel ca. 53 Mio. EUR verausgabt (siehe Tab. 2). Hiervon entfallen auf GA-Mittel ca. 93 % bei einer Bund/Land-Aufteilung von 70 % zu 30 % und ca. 7 % auf EU-Mittel.

Der Generalplan Küstenschutz Teil Festland definiert einen Investitionsbedarf von 520 Mio. EUR mit Stand 1. Januar 2006. Es sind gemäß Generalplan u. a. noch etwa 125 km Hauptdeichlinie zu erhöhen und zu verstärken. Für die Ostfriesischen Inseln beträgt der Investitionsbedarf mehr als 100 Mio. EUR. Schwerpunkte von Küstenschutzmaßnahmen werden in den nächsten Jahren unter anderem in Deichverstärkungen im Bereich des Jadebusens und der Weser sowie im Küstenschutz für die Ostfriesischen Inseln bestehen.

### 3.6.4 Bemessungskonzepte

Grundsätze zur Ermittlung der Sollhöhe von Hauptdeichen enthält das NDG, in welchen festgelegt ist, dass die Sollhöhe aus der Summe von Bemessungswasserstand und Bemessungswellenauflauf gebildet wird. Zur Ermittlung des Bemessungswasserstandes wird für durch Ausbaumaßnahmen unbeeinflusste Bereiche das deterministische Einzelwertverfahren eingesetzt, in welchem vier Einzelwerte – das mittlere Tidehochwasser (MThw), die größte Springerhöhung, der Höhenunterschied zwischen MThw und dem höchsten eingetretenen Tidehochwasser, der größte bisher eingetretene Windstau sowie der zukünftig zu erwartende Anstieg für 100 Jahre – addiert werden. Die Bemessungswasserstände an Ästuardeichen werden i. d. R. mit Hilfe von hydrodynamisch-numerischen Modellen unter Berücksichtigung des maßgeblichen Oberwasserabflusses ermittelt, um das Systemverhalten des Ästuars entsprechend berücksichtigen zu können. Für die Elbe und die Weser werden die Verfahren unter den angrenzenden Bundesländern abgestimmt. Zur Kontrolle dient das Vergleichsverfahren (NLWKN, 2007).

Der Meeresspiegelanstieg wird im niedersächsischen Bemessungsverfahren über den säkularen Anstieg des MThw sowie potentielle Folgen des Klimawandels berücksichtigt. Für den Pegel Norderney als einem von Ausbaumaßnahmen weitestgehend unbeeinflussten Pegel an der niedersächsischen Küste ergibt sich ein Wert von durchschnittlich ca. 25 cm in 100 Jahren bezogen auf das 19-jährige gleitende Mittel. Der Verlauf ist dabei nicht gleichmäßig, sondern zeigt Phasen stärkeren Anstiegs bis ca. 1930 und ab ca. 1960 sowie schwächeren Anstieges im Zwischenzeitraum.

Im Rahmen einer vorsorgenden Planung wird zur Berücksichtigung zukünftiger Auswirkungen des Klimawandels aufbauend auf dem Generalplan Küstenschutz gemäß Entscheidung des niedersächsischen Umweltministers vom Juli 2007 zukünftig ein Vorsorgemaß von 50 cm/100 Jahre für die Ermittlung des Bemessungswasserstandes berücksichtigt. Eine Anpassung von Deichen an einen verstärkten Meeresspiegelanstieg ist technisch überwiegend mit vertretbarem Aufwand möglich, da die überwiegend mit Boden erbauten Deiche eine vergleichsweise gute Anpassungsfähigkeit aufweisen. Wo es zweckmäßig ist, können z. B. die Binnenbermen des Deiches breiter ausgeführt werden, um zukünftig Deichverstärkungen innerhalb der Deichbasis vornehmen zu können. Für massive Bauwerke werden Gründung und Tragwerk so ausgelegt, dass eine Nacherhöhbarkeit auf bis zu 100 cm konstruktiv möglich ist, da eine spätere Anpassung im Regelfall einen sehr großen Aufwand erfordert.

Der Bemessungswasserstand stellt eine noch nicht eingetretene Sturmfluthöhe dar, die das Zusammenwirken jeweils ungünstiger Faktoren berücksichtigt, aber keine absolute Sicherheit vor Sturmfluten sondern einen definierten Sicherheitsstandard bedeutet. Die einheitliche Anwendung dieses Verfahrens soll gewährleisten, dass an der niedersächsischen Nordseeküste ein möglichst gleichwertiger Schutz vor Sturmfluten erreicht wird.

Für die Bestimmung des Bemessungsseegangs an Deichen kommen im Regelfall verifizierte mathematische Seegangsmodelle zur Anwendung. Der Bemessungswellenauflauf wird auf Grundlage von international eingeführten Berechnungsansätzen ermittelt. In Abhängigkeit von der jeweiligen Lokalität können die einzelnen Größen, die zur Ermittlung des Bemessungswasserstandes mit Hilfe des Einzelwertverfahrens beitragen, vergleichsweise stark differieren.

Für die Küstenschutzanlagen in Niedersachsen wird eine regelmäßige Überprüfung der erforderlichen Sollhöhen der Küstenschutzanlagen in einem Turnus von 5 bzw. 10 Jahren durchgeführt.

### 3.6.5 Weitergehende Überlegungen und Ausblick

Die Sicherung der niedersächsischen Küstengebiete gegen Sturmfluten und Erosion bildet wegen deren großer Bedeutung als Siedlungs-, Wirtschafts-, Kultur- und Naturraum eine wesentliche Zukunftsaufgabe der Daseinsvorsorge dar, die dauerhaft gewährleistet werden muss. Eine wesentliche Basis für zukünftige Planungen bildet der Generalplan Küstenschutz Niedersachsen-Bremen für das Festland aus dem Jahr 2007. Trotz großer Anstrengungen zur Verbesserung des Küstenschutzes mit einem Investitionsvolumen von ca. 2,2 Mrd. Euro besteht noch ein weiterer erheblicher Investitionsbedarf für die Erhöhung und Verstärkung der Küstenschutzanlagen am Festland und auf den Ostfriesischen Inseln. Neben langfristigen Planungen liegt ein wesentlicher Schwerpunkt des Küstenschutzes deshalb auch in dem Abbau von vorhandenen Defiziten.

Für zukünftige Planungen des Küstenschutzes sind die potentiellen Auswirkungen der globalen Erwärmung auf die Veränderung des Meerespiegelanstieges und der Sturmfluthäufigkeit von großer Bedeutung aber mit großen Unsicherheiten behaftet. Für die Bemessung von Küstenschutzanlagen wird deshalb zukünftig ein erhöhtes Vorsorgemaß berücksichtigt. Parallel werden die erforderlichen Bemessungsgrößen auch im Hinblick auf klimaänderungsbedingte Veränderungen regelmäßig überprüft und die wissenschaftlichen und technischen Grundlagen für die Beurteilung von Fragestellungen des Küstenschutzes und Küsteningenieurwesens im Rahmen nationaler und internationaler Zusammenarbeit kontinuierlich weiterentwickelt. Dieses ist auch deswegen von besonderer Bedeutung, weil das sehr komplexe, dynamische System des Küstenvorfeldes, der Inseln, des Wattenmeeres und der Ästuare durch nichtlineare gekoppelte hydro-morphologische Prozesse gekennzeichnet ist.

Die vielfältigen Nutzungen und Ansprüche im Küstenraum von Küstenschutz, Naturschutz, Landwirtschaft und Fischerei, Tourismus, Häfen und Schifffahrt sowie Industrie und Handel erfordern zunehmend eine Integration und Abstimmung dieser Ansprüche durch ein integriertes Management der Raumordnung. Im Rahmen einer langfristigen integrierten Küstenschutzplanung ist zu berücksichtigen, dass die Erhöhung, Verstärkung und weitere Planung und Umsetzung von Küstenschutzstrategien und -maßnahmen Raum benötigt. Deshalb bildet die Freihaltung von Planungsräumen wie z. B. im Bereich der Deichschutzzone, des Deichvorlandes und der Schutzdünen von schwer revidierbaren Nutzungen insbesondere in Siedlungsbereichen eine wichtige Grundlage für einen nachhaltigen Küstenschutz. Diese Anforderungen bedürfen im Rahmen der Raumordnung und Bauleitplanung aber auch im Abgleich mit dem Naturschutz auch vor dem Hintergrund der Anforderungen aus der EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie einer integrativen Berücksichtigung. Ziel ist es, den Küstenraum als Lebensgrundlage der Menschen durch ein Küstenschutzmanagement nachhaltig zu sichern und zu entwickeln.

Der Klimawandel stellt einen langfristigen Prozess dar. Es ist nach dem jetzigen Kenntnisstand davon auszugehen, dass für längerfristige Planungen im Küstenschutz ausreichende Reaktionszeiten für die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen auf Basis entsprechender Strategien vorhanden sind. Gleichwohl benötigt die Umsetzung von integrierten Küstenschutzstrategien und -plänen aus finanziellen, planerischen und rechtlichen Gründen entsprechende Vorlaufzeiten. 54

## 3.7 Schleswig-Holstein

Im Jahre 2001 wurde der "Generalplan Küstenschutz: Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein" nach einem umfassenden Beteiligungsverfahren durch die Landesregierung verabschiedet (MLR, 2001). Dieser Sonderplan enthält das langfristige Konzept bzw. die Strategie für den Küstenschutz in Schleswig-Holstein. Die nachfolgenden Ausführungen entstammen zum größten Teil dem Generalplan.

# 3.7.1 Allgemeiner Überblick

Schleswig-Holstein ist das einzige Bundesland mit Ost- und Nordseeküste (Abb. 12). Insgesamt misst die Küstenlinie 1190 km. An beiden Küsten ist Küstenschutz erforderlich. Die überflutungsgefährdeten Küstenniederungen (Westküste bis NN +5 m, Ostküste bis NN +3 m, Abb. 12) umfassen 3691 km<sup>2</sup> bzw. 24 % der gesamten Landfläche von Schleswig-Holstein mit 306 368 Einwohnern und Sachwerten in Höhe von 38 Milliarden EUR (Tab. 6).

	Nordsee	Ostsee	Schleswig-Holstein
Küstenlinie (km)	553	637	1190
Landesschutzdeiche (km)	364	67	431
Zweite Deichlinie (km)	569	-	569
Regionaldeiche (km)	44	52	96
Küstenniederungen			
– Fläche (km²)	3357	287	3691
– Einwohner	252 618	53 750	306 368
– Sachwerte (Mrd. EUR)	30,97	7,20	38,17
– Bruttowertschöpfung (Mrd. EUR/J)	6,4	1,5	7,9
– Arbeitsplätze	85 079	25 569	110 648
– Gästebetten*	31 986	19 533	51 519

Tab. 6: Relevante Küstenschutzparameter für Schleswig-Holstein (\*: nur Einrichtungen mit mehr als 8 Betten wurden berücksichtigt).

Die Westküste von Schleswig-Holstein wird durch eingedeichte Küstenmarschen und das Wattenmeer geprägt. Die Küstenlinie ist 553 km lang, davon sind 297 km Festlands-, 195 km Insel- und 61 km Halligküsten. Etwa 77 km der Westküste werden durch das Ufer der Unterelbe eingenommen. Das Wattenmeer hat eine Fläche von etwa 1.700 km<sup>2</sup> und setzt sich aus Inseln (13 %), Tiderinnen, (27 %), Wattflächen (57 %) und Salzwiesen (3 %) zusammen. Seit Jahrtausenden werden die Küstenmarschen besiedelt. Zunächst fand die Bewohnung vor allem auf Warften statt, etwa ab dem 11. Jahrhundert wurden zunehmend Deiche zum Schutz der Wohn- und Nutzflächen gebaut. Die nachfolgenden Jahrhunderte sind vom ständigen Kampf der Marschenbewohner mit dem "Blanken Hans" gekennzeichnet. Katastrophale Sturmfluten sind aus den Jahren 1364 und 1642 bekannt (Erste und Zweite Große Mandränke). Die letzte Sturmflut, bei der Menschen ertranken, fand im Jahre 1825 statt. Der letzte Deichbruch passierte während der Sturmflut im Jahre 1976. Die bisher höchsten Wasserstände wurden 1976 (südlich von Pellworm) bzw. 1981 (nördlich von Pellworm) gemessen. Heute wird das 3357 km<sup>2</sup> große Marschgebiet durch eine fast ununterbrochene, 408 km lange Deichlinie gegen Überflutungen gesichert. In den Küstenmarschen wohnen 253 000 Menschen und sind Sachwerte in Höhe von 31 Milliarden EUR vorhanden. Von den Marschen werden 2025 km<sup>2</sup> zusätzlich durch eine zweite Deichlinie (Tab. 6), die sich aus Mitteldeichen zusammensetzt, gesichert. Dieses Gebiet erfährt somit den höchsten Schutz. Das restliche Gebiet wird durch Mitteldeiche in 75 Köge zergliedert, die jeweils als abgegrenzter Überflutungsraum wirken.



Abb. 12: Übersichtskarte Schleswig-Holstein mit den überflutungsgefährdeten Küstenniederungen

Im Gegensatz zur reliefarmen Westküste hat die schleswig-holsteinische Ostküste ihre bewegte Grundstruktur hauptsächlich durch Gletschervorstöße erhalten. Nach der letzten Eiszeit setzte der sog. Küstenausgleich ein, indem vorspringende Küstenabschnitte abgetragen wurden und hier Steilufer entstanden. Heute beträgt die Länge der Küstenlinie 637 km, 162 km davon entfallen auf die Schlei, und 87 km gehören zur Insel Fehmarn. Die Länge der Steilufer beträgt 146 km, die restlichen 491 km sind Flachküsten. An der Ostküste werden Küstenniederungen erst seit Anfang des vorletzten Jahrhunderts in größerem Umfang durch Deiche vor Hochwassern geschützt. Das letzte katastrophale Sturmhochwasser an der Ostküste liegt bereits über 130 Jahre zurück. Aus diesem Grund ist das Bewusstsein für die Gefahren von Überschwemmungen bei der Küstenbevölkerung überwiegend geringer als in den Marschen an der Westküste. Insgesamt liegt eine Fläche von 287 km<sup>2</sup> unterhalb von NN +3 m (Tab. 6). In diesen Küstenniederungen wohnen 54 000 Menschen und sind Sachwerte in Höhe von 7,2 Milliarden EUR vorhanden. Die Länge der Hochwasserschutzanlagen entlang der Ostküste beträgt insgesamt 119 km.

## 3.7.2 Küstenschutzstrategie des Landes Schleswig-Holstein

Die Strategie des staatlichen Küstenschutzes in Schleswig-Holstein ergibt sich aus dem Landeswassergesetz. Wie bereits in Kap. 1 erwähnt, ist sie das Resultat einer historischen Entwicklung mit gesellschaftlicher Konsensfindung. Entsprechend lässt sie sich nicht in allen Aspekten rational begründen. Grundsätzlich wird die Strategie der Verteidigung umgesetzt. In Naturschutzkreisen wird auch die Strategie des Rückzuges (Aufgabe oder Rückverlegung von Deichen) diskutiert. Im Generalplan Küstenschutz (MLR, 2001) steht dazu: "Rückverlegungen oder Aufgabe von Deichen sind nur in Ausnahmefällen möglich". Sie kommen nur in Frage, wenn der Sicherheitsstandard mindestens erhalten bleibt, die Betroffenen einverstanden sind und der Küstenschutz von Mehrkosten freigehalten wird (PROBST, 1998). Bei Regionaldeichen, die keine Menschenleben schützen und daher geringere Schutzanforderungen haben, kann eine solche Maßnahme geboten sein, wenn sozio-ökonomische Gründe, insbesondere das Kosten-Nutzen-Verhältnis dafür sprechen. An der Ostseeküste wird derzeit im Raum Gelting eine entsprechende Maßnahme durchgeführt. Ein sonstiger Deich soll entwidmet werden bei gleichzeitiger Anlage eines rückwärtigen Landesschutzdeiches.

Bis Mitte des letzten Jahrhunderts wurde die Strategie des Vordringens (Landgewinnung) an der Westküste noch praktiziert. Bedingt durch die neuen Zielsetzungen in der Landwirtschaft war es danach nicht mehr erforderlich, neue Nutzflächen zu erschließen (PROBST, 1996). Die letzte Vordeichung mit dem (Teil-)Ziel der Landgewinnung wurde 1953 bis 1955 durchgeführt (Friedrich-Wilhelm-Lübke-Koog). Danach wurden und werden nur noch erforderliche Deichverstärkungen durchgeführt.

Strategische Überlegungen zum Küstenschutz sind im Generalplan Küstenschutz dargelegt (MLR, 2001). Als Schutzstrategie wird der Begriff des integrierten Küstenschutzmanagements (IKM) eingeführt. IKM ist der dynamische und kontinuierliche Planungsprozess, durch welchen Entscheidungen zum Schutz der Menschen und ihrer Besitztümer gegenüber den Naturgefahren des Meeres getroffen werden. Es stellt eine Weiterentwicklung der bisherigen Strategie dar, indem es: (1) den Küstenschutz als räumliche Planungsaufgabe betrachtet, (2) andere Ansprüche an das Küstengebiet bereits frühzeitig und gebührend in den Küstenschutz integriert, (3) die Öffentlichkeit vermehrt am generellen Planungsprozess beteiligt, und (4) den Klimawandel und die Unsicherheiten bei seiner Prognose verstärkt berücksichtigt.

## 3.7.3 Rechtliche Grundlagen und administrative Strukturen

Sämtliche, den Küstenschutz in Schleswig-Holstein betreffenden Rechtsvorschriften sind im Landeswassergesetz (LWG) zusammengefasst. Im LWG § 62 wird der Küstenschutz definiert. Nach dem althergebrachten Grundsatz "wer nicht will deichen, muss weichen", obliegt noch heute die Aufgabe des Küstenschutzes grundsätzlich demjenigen, der davon Vorteil hat. Im LWG § 63 werden jedoch öffentliche Aufgaben definiert, die im Interesse des Wohls der Allgemeinheit erforderlich sind. Beispiele sind der Bau und die Unterhaltung von gewidmeten Landesschutz- und Regionaldeichen. Auch die Sicherung der Inseln und Halligen sowie die Wattflächen und Wattrinnen im Sinne eines flächenhaften Küstenschutzes, ist eine öffentliche Aufgabe.

Die Planungspraxis im Küstenschutz stützt sich auf Generalpläne, die allerdings den Charakter von Sonderplänen besitzen. Sie sind weder für Gemeinden und Kreise noch für andere Planungsträger verbindlich, eher können sie als programmatische Aussagen des zuständigen Fachministers mit Selbstbindungswirkung angesehen werden.

Das Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume ist oberste Küstenschutzbehörde und außer für alle grundsätzlichen Aufgaben des Küstenschutzes gemäß LWG § 108 zuständig für Planfeststellungen und Plangenehmigungen von Deichen, die sich in der Trägerschaft des Landes befinden. Es ist außerdem zuständig für die Bestimmung der Sollabmessungen (Bestick) für die Landesschutzdeiche und die in der Trägerschaft des Landes befindlichen Regionaldeiche sowie für die Widmung, Um- oder Entwidmung von Deichen. Seit der Verwaltungsreform im Jahre 2008 ist der Landesbetrieb für den Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz in Husum (LKN) obere und untere Küstenschutzbehörde. Für die Landesschutz- und die Regionaldeiche des Landes ist der LKN sowohl Träger der jeweiligen Maßnahmen als auch Anhörungsbehörde für die Planfeststellungsverfahren. Für alle übrigen Aufgaben des Küstenschutzes ist ebenfalls der LKN als untere Küstenschutzbehörde zuständig, insbesondere für die Instandhaltung der im Eigentum des Landes befindlichen Küstenschutzanlagen, die Aufsicht über die übrigen Küstenschutzanlagen, die Planfeststellung bzw. Genehmigung von Küstenschutzanlagen anderer Maßnahmeträger sowie die Aufsicht über die Erfüllung der nach küstenschutzrechtlichen Vorschriften bestehenden Verpflichtungen. Insgesamt sind in Schleswig-Holstein etwa 450 Personen im staatlichen Küstenschutz tätig.

Die Finanzierung der investiven Küstenschutzmaßnahmen erfolgt im Wesentlichen nach dem aufgrund von Art. 91a GG erlassenen Bundesgesetz über die Gemeinschaftsaufgabe (GA) "Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes" (siehe Kap. 3.1). Bei Baumaßnahmen der Wasser- und Bodenverbände und Gemeinden haben diese einen Eigenanteil zu tragen, dessen Höhe sich nach einer Landesverordnung regelt. Die Unterhaltungsmaßnahmen an staatlichen Küstenschutzanlagen werden zu 100 % vom Land finanziert. Das LWG sieht allerdings vor, dass diejenigen, deren Grundstücke geschützt werden, zu den Kosten des Baus und der Instandhaltung nach dem Maß ihres Vorteils herangezogen werden können. Soweit möglich werden weitere Finanzierungsquellen eingesetzt. Hierzu gehören Mittel der Europäischen Union, Eigenmittel der Träger bei kommunalen und Verbandsmaßnahmen sowie ggf. Sondermittel. Durchschnittlich werden in Schleswig-Holstein jährlich etwa 50 Millionen EUR für den Küstenschutz ausgegeben. Hiervon sind derzeit etwa 35 % reine Landesmittel, 55 % GA-Mittel (70 % Bund, 30 % Land) und 10 % EU-Mittel. Wichtigste und kostenträchtigste Maßnahmen des Küstenschutzes in Schleswig-Holstein sind Verstärkungen von Landesschutzdeichen, Vorlandarbeiten und Sandaufspülungen. Nach dem Generalplan Küstenschutz aus dem Jahre 2001 musste etwa ein Viertel der Landesschutzdeiche in Schleswig-Holstein vordringlich verstärkt werden. Hiervon sind inzwischen etwa ein Drittel fertig gestellt. Breite und hohe Vorländer entfalten an der Westküste wichtige Schutzfunktionen vor Landesschutzdeichen. Zur Sicherung dieser Vorländer existieren an der Westküste fast 700 km Erd- und Holzlahnungen sowie etwa 6400 km Grüppen. Diese müssen relativ arbeitsintensiv gebaut und unterhalten werden. An der Westküste von Sylt wird durch Sturmfluten jährlich etwa eine Millionen m<sup>3</sup> Sand erodiert, wodurch das Ufer um etwa 1 m pro Jahr zurückweichen würde. Seit 1984 wird die Westküste jedoch erfolgreich durch Sandaufspülungen stabilisiert.

Trotz hoher Sicherheitsstandards kann der Küstenschutz keine absolute Sicherheit gewährleisten. Nach dem Landeskatastrophenschutzgesetz des Landes Schleswig-Holstein ist das Innenministerium oberste Katastrophenschutzbehörde und sachlich zuständig für Katastrophenschutzaufgaben, die räumlich über den Bezirk eines Kreises oder einer kreisfreien Stadt hinausgehen. Untere Katastrophenschutzbehörden sind die Landräte und die Bürgermeister/innen der kreisfreien Städte sowie der oder die Bürgermeister/in der Gemeinde Helgoland. Der LKN ist technische Fachbehörde und nimmt aufgrund ihres gesetzlichen Auftrages die mit dem Schutz der Niederungen gegen Hochwasser und Sturmfluten zusammenhängenden Aufgaben wahr. Darunter fallen insbesondere auch Maßnahmen, die zur Abwehr einer Hochwasserkatastrophe erforderlich sind sowie die Vorhaltung eines hydrologischen Dienstes, der die Wasserstandsentwicklungen beobachtet und entsprechende Meldungen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie entgegennimmt sowie eine Vorhersage und Beurteilung des Sturmereignisses für die jeweilige Küstenregion vornimmt. Alle für die Gefahrenabwehr zuständigen Behörden verfahren im Falle einer Katastrophe nach ihren hierfür erstellten Abwehrplänen. Die vor Ort ansässigen Wasser- und Bodenverbände (Deichverbände) sowie Bundeswehr und freiwillige Hilfsorganisationen sind wichtige Partner bei der Abwehr von Hochwasser- und Sturmflutgefahren.

Im Landesraumordnungsplan Schleswig-Holstein von 1998 (eine Fortschreibung steht kurz vor dem Abschluss) werden drei Grundsätze und Zielsetzungen mit Bezug auf den Küstenschutz genannt:

- Zum Schutz vor Hochwasser und Sturmfluten sind Schutzmaßnahmen erforderlich. Oberste Priorität für den Küstenschutz hat der Schutz von Menschen und ihren Siedlungen durch Deiche und Sicherungswerke.
- Die Zielsetzungen im Generalplan Küstenschutz in Schleswig-Holstein sind zugleich Ziele der Raumordnung und Landesplanung. Bei der Flächenordnung sind die Belange des Küstenschutzes zwingend zu beachten. Landesplanerische Ziele für die einzelnen Küstenschutzmaßnahmen und Deichlinien werden in den Regionalplänen konkretisiert.
- Wo Küstenschutzanlagen nicht möglich sind, müssen Sicherungsvorkehrungen getroffen werden. Siedlungen in hochwassergefährdeten Gebieten sollen nur bei entsprechenden Schutzvorkehrungen weiterentwickelt werden.

In den Regionalplänen werden diese Grundsätze und Zielsetzungen weiter konkretisiert. So werden die überflutungsgefährdeten Küstenniederungen in entsprechenden Abbildungen dargestellt. Im Regionalplan für den Landesteil Schleswig heißt es beispielsweise hierzu: "Bei Planungen und Maßnahmen im Küstenbereich sowie in meerseitig hochwassergefährdeten Gebieten (siehe Abb. 12) sind die Belange des Küstenschutzes zu berücksichtigen. Der Küstenschutz hat in der Abwägung stets eindeutigen Vorrang vor allen anderen Belangen". Weiterhin ist in den Plänen eine Liste der jeweils im Planungsraum wichtigsten Küstenschutzmaßnahmen (gemäß Generalplan Küstenschutz) enthalten.

#### 3.7.4 Bemessungskonzepte

Eine absolute Sicherheit gegen Überflutungen können Deiche nicht bieten. Vielmehr muss ein akzeptabler Sicherheitsstandard gefunden und definiert werden. Die Sollabmessung von Landesschutzdeichen setzen sich gemäß Generalplan Küstenschutz 2001 aus dem maßgebenden Sturmflutwasserstand (Bemessungswasserstand), der maßgebenden Wellenauflaufhöhe, und einem Klimazuschlag zusammen. Der maßgebende Sturmflutwasserstand hat den folgenden Bedingungen zu genügen:

- er soll eine Eintrittswahrscheinlichkeit von n = 0,01 (einmal in 100 Jahren), bezogen auf das Jahr 2000 haben (statistisches Verfahren),
- er soll nicht niedriger sein, als der auf heute bezogene Wasserstand der bisher höchsten Sturmflut (Vergleichswertverfahren), und
- er soll nicht niedriger sein als die Summe des größten beobachteten Windstaus über dem Tidehochwasser und des möglichen höchsten Springtidehochwassers (Einzelwertverfahren).

Für die Westküste ergibt das statistische Verfahren, für die Ostküste das Vergleichswertverfahren (Abb. 13) den ungünstigsten Wert. Diese werden der Bemessung jeweils zugrunde gelegt.



Abb. 13: Jahreshöchstwasserstände am Pegel Travemünde seit 1825

Etwa alle 10 Jahre findet eine Sicherheitsüberprüfung der Landesschutzdeiche in Bezug auf Wasserstand und Wellenauflauf- bzw. -überlauf statt. Zunächst wird ein Referenzwasserstand für das jeweilige Überprüfungsjahr ermittelt (2010, 2020, etc.). Für die Westküste erfolgt dies mit dem statistischen, für die Ostküste mit dem Vergleichswertverfahren. Für den Referenzwasserstand wird anschließend der Wellenauflauf- bzw. -überlauf ermittelt. Nach derzeitigem Kenntnisstand kann ein Deich eine Überlaufmenge von 2 Liter pro Sekunde und laufendem Meter ohne Schäden widerstehen. Neuere Untersuchungen deuten daraufhin, dass auch höhere Mengen möglich sind.

Die Deichabschnitte, an denen ein stärkerer Überlauf errechnet wird, werden in eine Prioritätenliste für Deichverstärkungen aufgenommen. Bei der Festlegung dieser Liste werden auch weitere technische, soziale und ökonomische Angaben berücksichtigt. Die erste Überprüfung mit dem neuen Verfahren hat ergeben, dass in Schleswig-Holstein 110 km der Landesschutzdeiche vordringlich verstärkt werden müssen. Für diese Deichabschnitte werden in der jeweiligen Maßnahmenplanung Sollabmessungen festgelegt. Der Bemessungswasserstand wird auf das Baujahr + 100 Jahre bezogen, d. h., für die Westküste einschl. Tideelbe wird ein Klimazuschlag von 0,5 m, für die Ostküste von 0,3 m berücksichtigt. Die Ergebnisse werden auch künftig durch die drei oben genannten Verfahren nach der oben genannten Vorgehensweise abgesichert. Die Deichhöhe für die Verstärkung ergibt sich aus dem Bemessungswasserstand und dem zugehörigen Wellenauflauf für das gewählte Profil, wobei ein Wellenüberlauf von 2 Litern pro Sekunde und laufendem Meter zugelassen wird. Wasserstand und Wellenauflauf sind in diesem Verfahren miteinander verknüpft. Mit dem Überprüfungsverfahren wird eine regelmäßige Übersicht über den Sicherheitsstatus der Deiche gewährleistet. Neue Erkenntnisse, auch hinsichtlich der Folgen von Klimaänderungen, können zeitnah einfließen. Darüber hinaus können in der jeweiligen Maßnahmenplanung auch Sollabmessungen für ein vom Regelguerschnitt abweichendes Profil (z. B. Böschungsneigungen, Knickpunkte) berechnet und umgesetzt werden. Hierdurch wird unter Beibehaltung des Sicherheitsstandards ein den örtlichen Verhältnissen angepasstes Herangehen ermöglicht.

Wegen der geringeren Schutzanforderungen an Regionaldeiche gegenüber Landesschutzdeichen sind diese in ihren Profilabmessungen weniger wehrfähig konzipiert. Für die Wahl des Schutzstandards dieser Anlagen sind die sich aus den jeweiligen Standorten ergebenden, individuellen Sicherheitsbedürfnisse der Vorteilhabenden und Maßnahmeträger maßgebend. Für weitere Hochwasserschutzanlagen wie Mauern, Dämme und Dünen, für die nach LWG eine Genehmigung erteilt wird, ist eine Überwachung des Bau- und Instandhaltungszustandes erforderlich. Ansonsten ist im Unterschied zu Deichen eine förmliche Überwachung durch die Küstenschutzbehörde nicht vorgesehen. Eine finanzielle Förderung des Baus oder der Verstärkung ist möglich, wenn die Hochwasserschutzwirkung nachgewiesen wird. Diese Anlagen unterliegen nicht der gesetzlichen Schaupflicht. Für die Sicherheitserfordernis und die Bemessung gelten die Ausführungen zu den Regionaldeichen entsprechend.

Ein Schwerpunkt des Küstenschutzes in Schleswig-Holstein ist die Insel Sylt, die besonders stark durch Küstenabbruch bedroht ist. Für die Westküste wurde im Jahre 1986 ein Fachplan erstellt, in dem die möglichen technischen Maßnahmen aufgeführt und bewertet sind. Der Fachplan wurde 1997 nach einem umfassenden Forschungsprogramm fortgeschrieben. Ziel ist es, die Küstenlinie aus dem Jahre 1984 zu halten. Das Konzept sieht eine optimierte Form der Sandaufspülungen auf dem Strand vor. Seit 1984 wurden insgesamt 31,4 Mio. m<sup>3</sup> Sand aufgespült (Abb. 14). Schwerpunkte der Aufspülungen bilden die Inselenden sowie die Inselmitte vor Westerland.



Abb. 14: Entwicklung der Mengen und Kosten der Sandaufspülungen vor Sylt

# 3.7.5 Weitergehende Überlegungen und Ausblick

Die gesellschaftlichen Wertvorstellungen bedingen heute eine breite und frühzeitige Mitwirkung der Bevölkerung an Planungs- und Entscheidungsvorgängen. Andere (private und öffentlich-rechtliche) Ansprüche an den Küstenraum müssen gebührend in den Küstenschutz integriert werden. Um diesen Ansprüchen genüge zu tun wurde im Jahre 1999 der Beirat Integriertes Küstenschutzmanagement gegründet. Der Beirat dient der Beteiligung der privaten und öffentlich-rechtlichen Betroffenen an dem generellen Planungsprozess des Küstenschutzes. Unter weitgehender Öffnung für andere Belange werden küstenschutzfachliche Interessen diskutiert. Der Beirat hat eine beratende Funktion und tagt unter dem Vorsitz des Ministers regulär zweimal pro Jahr. Er setzt sich aus den folgenden für den Küstenschutz wesentlichen Ansprechpartnern zusammen: Kommunalverbände (7 Vertreter), Wasund Bodenverbände (7), Naturschutzverbände und -Verwaltung (6), und ser-Küstenschutzverwaltung (7). Ein wesentlicher Aspekt der Öffentlichkeitsbeteiligung ist deren umfassende Information über die Aktivitäten im staatlichen Küstenschutz. Das Informieren dient auch dazu, die Bevölkerung über die Bedeutung des Küstenschutzes (als wesentliche Voraussetzung für eine nachhaltige Nutzung der Küstenniederungen) aufzuklären. Weiterhin soll die Information das Risikobewusstsein der Bewohner der Küstenniederungen stärken. Gemäß Generalplan werden entsprechende Aktivitäten, zum Beispiel im Rahmen der EU-Projekte COMRISK (HOFSTEDE, 2005) und SafeCoast (www.safecoast.org) entwickelt.

Insbesondere im akademischen Bereich werden in den letzten Jahren vermehrt Risikoüberlegungen zum Küstenschutz angestellt. Risiko im Küstenschutz ist das Produkt aus der Versagenswahrscheinlichkeit von Küstenschutzanlagen und der Schadenserwartung im Falle 62

eines Versagens. Eine Zunahme oder Abnahme des Risikos ergibt sich aus einer Änderung der Versagenswahrscheinlichkeit und/oder der Schadenserwartung (PROBST, 1994). Unter Risikomanagement werden Maßnahmen zur Reduzierung, Steuerung und Regulierung von Risiken verstanden. Im Generalplan Küstenschutz sind entsprechende Überlegungen enthalten (MLR, 2001). Mit dem Risikomanagement in Schleswig-Holstein werden:

- physikalische, soziale und ökonomische Entwicklungen, die das Risiko beeinflussen, ermittelt und bewertet,
- landesweite Prioritäten nachvollziehbar festgelegt,
- die Effektivität von verschiedenen Küstenschutzmaßnahmen (Varianten) gemessen und verglichen, und
- Strategien und Maßnahmen optimiert.

Das Risikomanagement in Schleswig-Holstein dient nicht dazu, unterschiedliche Sicherheitsstandards für durch Landesschutzdeiche geschützte Köge bzw. Küstenniederungen festzulegen. Für alle Landesschutzdeiche wurde im Generalplan Küstenschutz ein einheitlicher Sicherheitsstandard definiert. Mit dem eingeführten Risikomanagement wird es jedoch möglich, die Köge bzw. Küstenniederungen mit den höchsten Risiken nachvollziehbar zu ermitteln und in der Prioritätenliste für Deichverstärkungen entsprechend aufzunehmen. Des Weiteren liefern die im Rahmen der Risikoanalysen durchgeführten Wertermittlungen für die Küstenniederungen wichtige Grundlagen für die Information der Bevölkerung.

Inzwischen wird kaum noch bezweifelt, dass sich das Klima durch die menschlichen Aktivitäten signifikant ändern wird. Insgesamt muss der Küstenschutz wohl mit einer Zunahme der hydrodynamischen Belastungen an den Küstenschutzanlagen rechnen. Der zeitliche Verlauf und das Ausmaß dieser Zunahme können jedoch derzeit nicht bestimmt werden. Eine vorsorgliche Küstenschutzplanung muss daher Instrumente enthalten, die ein flexibles und zeitnahes Reagieren auf Änderungen in den hydrologischen Rahmenbedingungen ermöglichen. Dies wird durch die Sicherheitsüberprüfungen und das Risikomanagement gewährleistet.

Der Erfolg der Küstenschutzarbeiten in Schleswig-Holstein zeigt sich auch daran, dass seit 1962 weder Menschenleben noch größere Sachverluste zu beklagen sind. Dabei haben die Sturmfluten in den Jahren 1976 und 1981 an unserer Westküste die höchsten jeweils gemessenen Wasserstände erbracht. Die Meeresangriffe auf die Küsten nehmen stetig zu und es werden immer mehr Werte in überflutungsgefährdeten Gebieten geschaffen. Dies führt zu Risikoerhöhungen, denen im Rahmen einer vorsorglichen Planung zu begegnen ist. Der Küstenschutz wird somit niemals enden.

### Beirat Integriertes Küstenschutzmanagement

Ein Kennzeichen der heutigen Gesellschaft ist der Anspruch der Bevölkerung, bei Entscheidungen der öffentlichen Hand frühzeitig und intensiv informiert und beteiligt zu werden. Für die Verwaltung bietet dies Chancen. Die Mitwirkung kann zu Engagement und geteilter Verantwortung führen, zu der Erkennung der wirklichen Herausforderungen beitragen und schließlich in besser umsetzbaren Lösungen mit erhöhter Akzeptanz resultieren.

In Schleswig-Holstein wurde im Jahre 1999 der Beirat Integriertes Küstenschutzmanagement (BIK) gegründet. Der BIK dient in erster Linie der Beteiligung der privaten und öffentlich-rechtlichen Betroffenen an dem generellen Planungsprozess des Küstenschutzes. Größere Einzelmaßnahmen werden jedoch ebenfalls erörtert. Der Beirat ist ein Gremium, in dem küstenschutzfachliche Belange unter weitgehender Öffnung für andere Belange diskutiert werden. Er hat eine beratende Funktion und setzt sich aus den folgenden Ansprechpartnern zusammen:

- Schleswig-Holsteinischer Landkreistag (2 Mitglieder),
- Schleswig-Holsteinischer Gemeindetag (3),
- Städteverband Schleswig-Holstein (2),
- Landesverband der Wasser- und Bodenverbände (3),
- Marschenverband (3),
- Landschaftszweckverband Sylt (1),
- Landesnaturschutzverband Schleswig-Holstein e.V. (3),
- BUND Schleswig-Holstein e. V. (1),
- schleswig-holsteinische Natur- und Umweltschutzverwaltung (2) und
- schleswig-holsteinische Küstenschutzverwaltung (7).

Die Mitglieder werden von ihren jeweiligen Institutionen namentlich bestimmt und vom zuständigen Minister in den Beirat berufen. Unter dem Vorsitz des Ministers tagt der BIK regulär zweimal pro Jahr. Zusätzlich können Sondersitzungen einberufen werden. Bisher wurden zwei Sondersitzungen zu den Themen "Generalplan Küstenschutz" (2001) und "Elbe" (2006) durchgeführt. Zur fachlichen Beratung und Klärung von Einzelfragen kann der BIK Fachbeiräte einrichten. Derzeit sind Fachbeiräte zum Vorlandmanagement und zur zweiten Deichlinie installiert.

Nach zehn Jahren und 20 Sitzungen kann folgendes Resümee gezogen werden. Der Beirat hat zu einem verbesserten Erfahrungsaustausch geführt und durch frühzeitige gegenseitige Information dazu beigetragen, manch potenzielles Konfliktfeld nicht aufkommen zu lassen bzw. frühzeitig zu entschärfen. Aber trotz verbesserten Informationsaustauschs bleiben unterschiedliche Standpunkte und Zielvorstellungen. Der BIK diskutiert Herausforderungen und (Kompromiss-)Lösungen bzw. kann Entscheidungen vorbereiten, sie selbst jedoch nicht treffen. Ein erreichter Konsens hat wegen der Unverbindlichkeit des Gremiums nicht immer Bestand.

#### 3.8 Synopse

In diesem Kapitel werden signifikante Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen den Küstenländern thematisch aufgegliedert und zusammenfassend dargestellt. Eine erschöpfende Darstellung aller Unterschiede und Ähnlichkeiten würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

# 3.8.1 Strategien

Obwohl die Rahmenbedingungen zum Teil stark unterschiedlich sind (siehe unten), wird in den deutschen Küstenländern generell die Strategie der Verteidigung umgesetzt. Allerdings existieren in den meisten Ländern Fallbeispiele für einen Rückzug mittels Rückdeichung, in erster Linie aus ökologischen Erwägungen. Die ausgedeichten Niederungen sind unbesiedelt. Die Strategie des Vordringens wird nicht angewandt, allerdings auch nicht explizit ausgeschlossen.

Initiiert durch die Klimadiskussion stellen die Länder strategische Überlegungen zur Anpassung an dem Klimawandel an, wo der Küstenschutz integrativer Bestandteil eines ganzheitlichen Herangehens ist. Die Strategie der Anpassung, insbesondere mittels angepasster Landnutzung, ist derzeit Thema verschiedener internationaler Projekte mit Beteiligung deutscher Küstenländer, zum Beispiel der trilateralen deutsch-dänisch-niederländischen Zusammenarbeit im Wattenmeer (CPSL, 2005).

### 3.8.2 Allgemeine Rahmenbedingungen

Die allgemeinen Rahmenbedingungen sind naturgemäß stark unterschiedlich. So ist die Tide in der Nordsee deutlich stärker ausgeprägt als in der Ostsee, während die Sturmflutdauern in der Nordsee überwiegend deutlich kürzer als in der Ostsee sind. Die reliefarme Nordseeküste bzw. das Wattenmeer stellt – zumindest langfristig und beim moderaten Meeresspiegelanstieg – eine Sedimentsenke dar. Die Ostseeküste wird durch Ausgleichsprozesse, d. h., Erosion an den Landspitzen und Sedimentation in den Buchten, gekennzeichnet. Die Stadtstaaten liegen an Ästuaren, während für Mecklenburg-Vorpommern die Bodden typisch sind. In der Nordsee traten die bisher höchsten Sturmfluten überwiegend in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts auf. In der Ostsee liegt das letzte katastrophale Sturmhochwasser bereits mehr als 135 Jahre zurück. Die sozioökonomischen Rahmenbedingungen variieren ebenfalls stark, insbesondere zwischen den Stadt- und den Flächenstaaten.

Es gibt aber auch Ähnlichkeiten. In allen Küstenländern existieren ausgedehnte Küstenniederungen bzw. sind signifikante Flächenanteile und Einwohnerzahlen potenziell überflutungsgefährdet. Alle Küstenländer unterliegen der Bedrohung durch stark erhöhte Meereswasserstände, obwohl die auslösenden Faktoren zum Teil unterschiedlich sind. Alle Küsten sind zum größten Teil aus Lockersedimenten aufgebaut. Deshalb herrscht, insbesondere an den Küsten der Flächenstaaten, eine ausgeprägte Morphodynamik vor und sind längere Küstenstrecken von Erosion betroffen. In der Konsequenz ist Küstenschutz in allen Küstenländern eine prioritäre landespolitische Aufgabe. Zum Vergleich ist z. B. in Norwegen Küstenschutz trotz seiner Küstenlänge ein weitgehend unbekannter Begriff.

### 3.8.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Der Bund hat bisher von seiner gesetzgeberischen Kompetenz im Bereich Küstenschutz keinen Gebrauch gemacht. Derzeit wird der Küstenschutz in Landesgesetzen geregelt, die teilweise erheblich voneinander abweichen (siehe unten). In der relevanten Rahmengesetzgebung des Bundes (Wasserhaushalt, Naturschutz, etc.) gibt es aber einheitliche Vorgaben, die die Länder entsprechend umzusetzen haben.

In Niedersachsen wird der Küstenschutz in einem eigenständigen Deichgesetz geregelt, in den übrigen Küstenländern sind die rechtlichen Regelungen des Küstenschutzes in den Landeswassergesetzen enthalten. Ein detaillierter Vergleich der landesgesetzlichen Regelungen würde, wegen der zum Teil stark unterschiedlichen Formulierungen (Begriffsbestimmungen siehe Tab. 7, Aufgabenzuordnungen, etc.), den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Deshalb werden nur die wichtigsten Unterschiede nachfolgend dargestellt.

Niedersachsen	Hauptdeiche, Schutzdeiche, zweite Deichlinie, Notdeiche
Schleswig-Holstein	Landesschutzdeiche, Regionaldeiche, Mitteldeiche, Binnendeiche
Mecklenburg-Vorpommern	Seedeiche, Boddendeiche, Flussdeiche (I. Ordnung: Landesschutzdeiche; II. Ordnung: Deiche zum Schutz landwirtschaftlicher Flächen)
Hansestadt Hamburg	Hauptdeiche, zweite Deichlinie, private Polderbauwerke
Hansestadt Bremen	Landesschutzdeiche

Tab. 7: Gesetzliche Begriffsbestimmungen für Deiche im Ländervergleich

Eine wesentliche Gemeinsamkeit drückt sich trotz unterschiedlicher Bezeichnungen in dem öffentlich-rechtlichen Charakter der genannten Deiche aus, die i. d. R. durch Widmung erfolgt.

Nach niedersächsischem Deichgesetz können Dünen durch Widmung die Funktion einer Schutzdüne (Sturmflutschutz oder Bestandserhalt einer Insel) erhalten. Auch in Mecklenburg-Vorpommern werden sie im Landeswassergesetz explizit als mögliche Küstenschutzmaßnahme benannt. In der schleswig-holsteinischen Wassergesetzgebung fehlt eine solche funktionelle Zuordnung, während in Hamburg und Bremen keine Küstendünen existieren. In Mecklenburg-Vorpommern haben die nach altem DDR-Recht festgelegten Küstenschutzgebiete weiterhin Bestand. In Hamburg entstanden nach 1976 vor der öffentlichen Hochwasserschutzlinie umfassende private Schutzanlagen. Im hamburgischen Wassergesetz sind deshalb - im Gegensatz zu den übrigen Ländern - Regelungen für private Hochwasserschutzanlagen enthalten. Schließlich ist die Einbindung von Wasser- und Bodenverbänden bzw. Deichverbänden in allen Ländern unterschiedlich geregelt. So ist in Niedersachsen die Erhaltung wesentlicher Teile der Deichstrecken am Festland Aufgabe der Deichverbände, während in Schleswig-Holstein das Land zuständig ist für den Bau und die Unterhaltung der Landesschutzdeiche sowie der Regionaldeiche auf den Inseln und Halligen. Für alle übrigen Deiche sind die Verbände bzw. Gemeinden zuständig. In Hamburg sind alle im öffentlichen Eigentum stehenden Hochwasserschutzanlagen von der Stadt zu

unterhalten, wiederherzustellen und zu verteidigen. Die Verbände haben hier Mitwirkungsrechte und -pflichten, zum Beispiel in der Gefahrenabwehr.

# 3.8.4 Administrative Strukturen und Finanzierung

Die unterschiedlichen Zuständigkeiten bedingen voneinander abweichende administrative Strukturen. Gemeinsamkeit ist, dass jeweils ein Ministerium bzw. Senator die oberste Küstenschutz- bzw. Wasserbehörde bildet. Unterschiede bestehen vor allem in den Erhaltungs- und Unterhaltungsverpflichtungen für Küstenschutzanlagen und der Aufgabenwahrnehmung im übertragenen Wirkungskreis auf kommunaler Ebene. Die Strukturen können sich relativ schnell ändern. So wurden in Niedersachsen in den Jahren 1998 bzw. 2005 die Landesaufgaben des dem zuständigen Ministerium nachgeordneten Bereichs im Küstenschutz und der Wasserwirtschaft in einem Landesbetrieb organisiert, in Hamburg erfolgte dies im Jahre 2007 und in Schleswig-Holstein im Jahre 2008. In Hamburg wurden 2005 Aufgaben des Hochwasserschutzes im Hafen in die neu gegründete Hamburg Port Authority (HPA) eingegliedert. Die HPA ist eine Anstalt des öffentlichen Rechts. In Bremerhaven sind die Unterhaltungsaufgaben der Hochwasserschutzlinie per Geschäftsbesorgungsvertrag im Jahre 2002 auf die BremenPORTS Management + Services GmbH & Co. KG übertragen worden.

Zur Finanzierung des Küstenschutzes in den Küstenländern werden Mittel der Bund-Länder-Gemeinschaftsaufgabe "Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes", Mittel aus EU-Förderprogrammen sowie reine Landesmittel, genutzt. Auch werden die Vorteilhabenden für den öffentlichen-rechtlichen Küstenschutz, d. h., die Eigentümer der geschützten Grundstücke, in unterschiedlicher Art und Weise (Übernahme von Arbeiten, Bereitstellung von Flächen und Böden, Verbandsbeiträge für die Deichunterhaltung) nach dem Maß ihres Vorteiles zu den Kosten herangezogen. Die jeweiligen Anteile der vier Finanzierungsquellen unterscheiden sich zwischen den Küstenländern.

#### 3.8.5 Bemessungskonzepte

Die Bemessungskonzepte unterscheiden sich naturgemäß für die verschiedenen Küstenschutzanlagen. Am weitestgehenden definiert sind sie zumeist in den jeweiligen Fachgesetzen oder Generalplänen für die Deiche (Haupt-, Landesschutz- bzw. Seedeiche). Die Bestickhöhe wird in allen Ländern aus einem Bemessungswasserstand und einer (maßgeblichen) Wellenauflaufhöhe gebildet. Der Meeresspiegelanstieg wird im Bemessungswasserstand berücksichtigt (siehe unten).

Zur Bestimmung der Bemessungswasserstände für die Küstenschutzanlagen werden verschiedene, zumeist deterministische Verfahren genutzt. In Mecklenburg-Vorpommern und für die Ostküste von Schleswig-Holstein geht der auf heute bezogene Scheitelwert der bisher höchsten Ostseesturmflut (1872 und 1913) in die Bemessung ein (Vergleichswertverfahren). Für die Westküste von Schleswig-Holstein wird der Scheitelwert einer Sturmflut mit einer statistischen Wahrscheinlichkeit von 0,01 zugrunde gelegt (statistisches Verfahren), welches durch das deterministische Einzel- und Vergleichswertverfahren abgesichert wird. In Niedersachsen und Bremen wird der Bemessungswasserstand für die offene Küste mit Hilfe des Einzelwertverfahrens ermittelt. In den Ästuaren Ems und Weser kommen hydronumerische Modelle zum Einsatz, die auch den Oberwasserabfluss berücksichtigen. Für die Elbe entwickelten die Anlieger (Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein) ein gemeinsames Verfahren zur Bestimmung des Bemessungswasserstandes. Es basiert im Wesentlichen auf abgestimmten Eingangswerten für Cuxhaven sowie Berechnungen mit hydronumerischen Modellen zur Ermittlung der Bemessungswasserstände in der Elbe unter Berücksichtigung des Oberwasserabflusses. In allen Ländern wird zu dem Bemessungswasserstand der Bemessungsseegang und Bemessungswellenauflauf durch die Anwendung von numerischen bzw. deterministischen Verfahren ermittelt, die für die jeweiligen spezifischen Verhältnisse verifiziert wurden. Der künftige Meeresspiegelanstieg wird in den Küstenländern zum Teil unterschiedlich berücksichtigt. In Bremen, Niedersachsen und Schleswig-Holstein (Westküste und Tideelbe) wird für zu verstärkenden Deiche im Bemessungswasserstand ein Zuschlag von 0,5 m berücksichtigt, in Hamburg, Schleswig-Holstein (Ostküste) und Mecklenburg-Vorpommern derzeit 0,3 m. Für massive Bauwerke werden in Bremen, Hamburg und Niedersachsen Baureserven von 0,75 bis 1,0 m für spätere Nachverstärkungen berücksichtigt.
## 4. Ausblick

Die Gewährleistung der Sicherheit der etwa 2,5 Millionen Einwohner der deutschen Küstenregionen vor Überflutungen und Landabbruch ist eine ständige Aufgabe der Küstenschutzverwaltung. Zunehmende hydrodynamische Belastungen und verstärkter Nutzungsdruck lassen den Schluss zu, dass der Küstenschutz eine Daueraufgabe ist. Anschließend werden einige übergeordnete Themen, die in den nächsten Jahren vermehrt Aufmerksamkeit fordern werden, dargestellt.

# 4.1 EG-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie

Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union haben am 6.11.2007 eine Richtlinie über die Bewertung und Bekämpfung von Hochwassern (EG-HWRMRL) veröffentlicht die, entgegen des deutschen Bundeshochwasserschutzgesetzes, auch Regelungen für den Küstenschutz beinhaltet. Die Umsetzung dieser Richtlinie wird, trotz Möglichkeiten der Berücksichtigung bestehender Pläne, die Küstenschutzverwaltung in den nächsten Jahren in erheblichem Umfang binden, nicht zuletzt wegen der Beteiligung der Öffentlichkeit sowie der Abstimmungen auf Flussgebietsebene gemäß EG-Wasserrahmenrichtlinie.

Auf der Grundlage einer vorausschauenden Bewertung des Hochwasserrisikos sollen die Mitgliedstaaten die Gebiete feststellen, für die ein potenziell signifikantes Hochwasserrisiko besteht oder als realistisch betrachtet wird. Für diese Gebiete sollen in zwei Schritten und nach bestimmten Vorgaben Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten sowie Hochwasserrisikomanagementpläne erstellt werden. Die Einstufung soll bis Ende 2011 erfolgt sein, die Karten sollen bis Ende 2013, die Pläne bis Ende 2015 erstellt sein. Die Richtlinie ist durch das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) in nationales Recht umgesetzt.



Abb. 15: Regelkreis Küstenrisikomanagement (HOFSTEDE, 2007)

Die Managementpläne sollen alle Aspekte des Hochwasserrisikomanagements (Abb. 16) erfassen, wobei der Schwerpunkt auf Vermeidung, Schutz und Vorsorge, einschließlich Hochwasservorhersagen und Frühwarnsystemen, liegt. Die Schritte Vermeidung, (persönliche) Bereitschaft/Vorsorge und Notfallmaßnahmen dienen der Schadensreduzierung. Die Vermeidung bzw. Begrenzung von erhöhten Schadenserwartungen kann durch die Raumordnung und Bauleitplanung gesteuert werden. Die "Hafencity" in Hamburg (Kap. 3.4.3) ist ein Beispiel für das Zusammenwirken der Raumordnung bzw. Bauleitplanung und des Küstenschutzes. Zuständig für die Aspekte Vorsorge (unter Anderem mittels Risikokommunikation, siehe Kap. 4.3), Notfallmaßnahmen und (vorläufige) Wiederherstellung ist in erster Linie der Katastrophenschutz. Raumordnung und Katastrophenschutz sind somit im Rahmen eines holistischen Küstenrisikomanagements eng verflochten mit dem Küstenschutz.

Diese Ausführungen belegen, dass die Umsetzung der EU-HWRMRL eine integrative und interdisziplinäre Aufgabe darstellt. Da das Küstenrisikomanagement jeweils einen (kleinen) Teilaspekt der Raumordnung und des Katastrophenschutzes darstellt liegt es nahe, die Koordination in erster Linie durch den Küstenschutz zu initiieren und zu organisieren.

#### 4.2 Anpassung an den Klimawandel

Es besteht weitgehend Konsens darüber, dass sich das globale Klima durch die menschlichen Aktivitäten signifikant ändern wird. Für den Küstenschutz sind die künftige Entwicklung des Meeresspiegels sowie Änderungen der Sturmhäufigkeit und -stärke, auch im Hinblick auf die lange Nutzungsdauer vieler Küstenschutzanlagen, von größter Bedeutung.

Das "Intergovernmental Panel on Climate Change" hat als weltweit anerkanntes Fachgremium zum Thema Klimaänderungen im Jahre 2007 seinen vierten Bericht über den künftigen Klimawandel vorgelegt (IPCC, 2007). In dem Bericht werden Werte zwischen 18 und 59 cm für den zu erwartenden mittleren globalen Meeresspiegelanstieg bis 2100 angegeben. Nicht berücksichtigt (wegen fehlendem wissenschaftlichen Konsens und fehlender Erkenntnisse) sind CO<sub>2</sub>-Rückkoppelungen und das dynamische Verhalten der Landeiskappen (Grönland und Antarktis). Ein beschleunigtes Abschmelzen von Grönland könnte die Werte um 10 bis 20 cm anheben, wobei das IPCC höhere Werte nicht ausschließt. Neueste Satellitenaufnahmen von Grönland lassen vermuten, dass die Schmelzvorgänge sich in den letzten Jahren beschleunigen. Darüber hinaus wird Grönland auch nach 2100 zum Meeresspiegelanstieg beitragen. Falls die Temperaturen über Jahrhunderte 2 bis 5 Grad Celsius höher blieben, würde Grönland komplett abschmelzen. Zuletzt war Grönland vor etwa 125 000 Jahren eisfrei; damals lag der Meeresspiegel um etwa 5 m höher als heute.

Neben der Unsicherheit bezüglich der großen Landeiskappen ist auch die Regionalisierung des Meeresspiegelanstieges, zum Beispiel für die deutschen Küsten, nicht gelöst. Sicher ist, dass der Meeresspiegelanstieg regional unterschiedlich ausfallen wird. Die genaue regionale Verteilung und das genaue Ausmaß sind jedoch bisher nicht bekannt (GÖNNERT et al., 2009).

In diesem Zusammenhang hat die holländische Delta-Kommission im Jahre 2008 in seinem Bericht an die Regierung über mögliche Anpassungsmaßnahmen im Umgang mit dem Klimawandel folgende pessimale Annahmen hinsichtlich des zu erwartenden Meeresspiegelanstiegs getroffen: 0,65 bis 1,3 m bis 2100 und 2 bis 4 m bis 2200. Nach Ansicht der Kommission stellen diese Zahlen plausible Höchstwerte (worst-case-scenarios) auf der Basis von neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen dar. Es wird empfohlen, diese Werte zu nutzen um somit die anstehenden Entscheidungen und Maßnahmen nachhaltiger zu gestalten. Die Kommission hat Ihre Ergebnisse 2008 veröffentlicht (DELTA COMMISSIE, 2008). Im Bericht werden 12 Empfehlungen aufgelistet. Demnach sollen an den Außenküsten verstärkt Sandaufspülungen durchgeführt werden, und zwar in solchen Mengen, dass die Küsten anwachsen (Strategie des "Vordringens", siehe auch Kap. 2.1). Der Anwachs soll als Puffer bei noch stärkerem Meeresspiegelanstieg dienen. Hierzu sollen entsprechende Entnahmegebiete in der Nordsee reserviert werden. Des Weiteren werden sog. "Delta- bzw. Superdeiche" als vielversprechend aufgeführt (Strategie des "Halten der Linie"). Diese Deiche sind entweder so hoch, so breit oder so stark, dass die Gefahr eines plötzlichen und unkontrollierten Überlaufs praktisch gleich Null ist. In Japan sind solche Superdeiche mit einer mehrere hundert Meter breiten Deichkrone bereits umgesetzt. Zur Finanzierung dieser Maßnahmen wird ein nationaler Deltafonds vorgeschlagen, der gesetzlich abgesichert werden sollte.

Zur künftigen Entwicklung der Sturmtätigkeit existieren keine einheitlichen Vorhersagen. Das Forschungszentrum GKSS Geesthacht hat Modellrechnungen zu künftigen Sturmwasserständen für die Nordseeküste veröffentlicht (GROSSMANN et al., 2006). Demnach könnten die Sturmflutwasserstände gegen Ende dieses Jahrhunderts im Vergleich zum Ende des letzten Jahrhunderts in der inneren deutschen Bucht bis maximal 0,4 m ansteigen, in der Tideelbe (St. Pauli) um maximal etwa 0,6 m. In Richtung dänischer und niederländischer Grenzen nehmen die Werte auf etwa 0,1 m ab. Die Zahlen sind allerdings noch mit sehr großen Unsicherheiten behaftet. Auch sind sie mit den heutigen Windstauwerten (bis maximal 4,5 m) in Relation zu setzen. Für die Deutsche Ostseeküste existieren bis heute keine Sturmflutszenarien. Auch wegen der zu erwartenden gravierenden Folgen einer künftigen Änderung der Sturmtätigkeit ist diese Thematik ein Schwerpunkt der heutigen Klimaforschung (z. B. WOTH et al., 2006).

Aus obigen Ausführungen geht hervor, dass der Küstenschutz insgesamt mit einer Zunahme der hydrodynamischen Belastungen an den Küstenschutzanlagen rechnen muss. Der zeitliche Verlauf und das genaue Ausmaß dieser Zunahme können jedoch derzeit nicht bestimmt werden. Eine vorsorgliche Küstenschutzstrategie muss daher Instrumente enthalten, die ein flexibles und zeitnahes Reagieren auf Änderungen in den hydrologischen Rahmenbedingungen ermöglichen. Beispiele sind sog. No-Regret-Maßnahmen wie Sandaufspülungen (die entsprechend in der Intensität angepasst werden können), die Berücksichtigung von statischen Belastungsreserven (die eine spätere Nachverstärkung erleichtern), regelmäßige Sicherheitsüberprüfungen und effektive Überwachungsprogramme.

#### 4.3 Risikokommunikation

Untersuchungen belegen, dass das Bewusstsein um die Gefahren von Sturmfluten bei den Bewohnern der Küstenniederungen oft wenig ausgeprägt ist. Eine Befragung in fünf sturmflutgefährdeten Küstenorten in den Nordsee-Anrainerstaaten im Rahmen des INTER-REG-Projektes COMRISK ergab Folgendes (HOFSTEDE et al., 2005): Nur 7 % der Befragten haben private Maßnahmen zum Schutz vor Überschwemmungen getroffen; 59 % wussten nicht, was sie bei einer Überschwemmung tun sollten. In einem Küstenort gaben 60 % der Befragten sogar an, nicht in einer sturmflutgefährdeten Niederung zu wohnen.

Zum Einen hängt das geringe Gefahrenbewusstsein damit zusammen, dass die letzte Katastrophenflut bereits über 45 Jahre (Nordsee) bzw. 135 Jahre (Ostsee) zurückliegt. Zweitens führen die heutigen hohen Schutzstandards der Anlagen wie auch die diesbezügliche Aussagen: "die Deiche sind sicher", zu einem hohen Sicherheitsgefühl in der Bevölkerung. Schließlich kann auch ein gewisser psychologischer Verdrängungseffekt bei den Betroffenen nicht ausgeschlossen werden, d. h., wegen der hohen Wohnqualität an der Küste werden negative Aspekte nicht wahrgenommen.

Ein geringes Gefahrenbewusstsein verleitet dazu, Maßnahmen zum persönlichen Schutz zu vernachlässigen. Auch ist die Bereitschaft, auf Warnungen bis hin zu Evakuierungsaufforderungen zu reagieren, oft nicht besonders ausgeprägt. Ein geringes Gefahrenbewusstsein kann des Weiteren Konsequenzen für die Sicherheitsstandards der Küstenschutzanlagen haben. Diese wird maßgeblich dadurch bedingt, wie viel eine Gesellschaft für die Herstellung und Einhaltung der Standards ausgeben kann und will. Ein geringes Gefahrenbewusstsein in Zusammenhang mit der schwierigen Lage der öffentlichen Haushalte kann sich negativ auf die Investitionsbereitschaft auswirken. Obwohl es unwahrscheinlich ist, dass ein festgelegter Sicherheitsstandard formal abgesenkt wird, kann eine Reduzierung der Finanzmittel indirekt hierzu führen. Beispiele sind eine reduzierte Instandhaltung oder die Verzögerung einer durch den Meeresspiegelanstieg bedingten Verstärkung.

Eine Kommunikationsstrategie, die sowohl auf die Gefahr eines Versagens der Küstenschutzanlagen und deren Konsequenzen hinweist als auch über mögliche technische und Verhaltensmaßnahmen zur Verbesserung der persönlichen Bereitschaft informiert, kann letztendlich erheblich zur Senkung der Schadenserwartungen und damit des Risikos beitragen. Ein Beispiel für eine solche Kommunikationsstrategie existiert in Hamburg (Kap. 3.4.3). Insbesondere im Hinblick auf den erwarteten Klimawandel wird dieser Aspekt des Küstenrisikomanagements (Abb. 15) zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die EU-HWRMRL (Kap. 4.1) greift dies bereits auf, in dem sie in Artikel 10 eine umfassende Information und Beteiligung der Betroffen im Rahmen der Erstellung der Karten und Pläne vorschreibt.

## 5. Schriftenverzeichnis

- ARBEITSGRUPPE DER LÄNDER NIEDERSACHEN, SCHLESWIG-HOLSTEIN UND HAMBURG: Bemessungswasserstände entlang der Elbe, Hamburg, 1986. Die Küste, 47, 1988.
- ARBEITSGRUPPE DER LÄNDER NIEDERSACHEN, SCHLESWIG-HOLSTEIN UND HAMBURG: Bemessungswasserstände 2085 A entlang der Elbe, Ergebnisse einer Überprüfung nach 10 Jahren, Hamburg, 1997. Die Küste, 60, 1998.
- ASCHENBERG, H. und KROKER, G.: Sturmfluten und Hochwasserschutz in Hamburg, Freie und Hansestadt Hamburg, 1992.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (ed.): Integriertes Küstenzonenmanagement in Deutschland, nationale Strategie für ein integriertes Küstenzonenmanagement (Bestandsaufnahme, Stand 2006). Nach der EU-Empfehlung 2002/413/EG vom 30. Mai 2002, Kabinettsbeschluss vom 22.3.2006, Bonn, 2006.
- CPSL: Final report of the trilateral working group on coastal protection and sea level rise. Wadden Sea Ecosystem, 13, 2001.
- CPSL: Coastal protection and sea level rise solutions for a sustainable coastal protection in the Wadden Sea region. Wadden Sea Ecosystem, 21, 2005.
- DELTA COMMISSIE: Samen werken met water. Een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst. Bevindingen van de Deltacommissie, 2008.
- DER SENATOR FÜR BAU UND UMWELT: Hochwasserschutz im Land Bremen. Bremen, 2003.
- DETTE, H. und NEWE, J.: Bemessung der Landesküstenschutzdünen Mecklenburg-Vorpommerns, Bericht Nr. 879a, AG: StAUN Rostock, Abt. Küste, AN: TU Braunschweig, LWI, 2004.
- EG-HWRMRL 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. Amtsblatt der Europäischen Union L 288 vom 6. November 2007.
- ERCHINGER, H. F.: Sturmfluten Küstenschutz zwischen Ems und Weser. Norden, 2005.
- FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, BAUBEHÖRDE UND WIRTSCHAFTSBEHÖRDE: Richtlinie für die Sollhöhenberechnung und -bestimmung im öffentlichen Hochwasserschutz. Hamburg, 1995.
- FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, BEHÖRDE FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELT: Leitfaden Sollhöhen und Lastannahmen im Bereich der HafenCity. Hamburg, 2008.
- FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, BEHÖRDE FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELT: Plan zur Verteidigung der Hochwasserschutzanlagen in Hamburg. Hamburg, 2008.
- FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, BEHÖRDE FÜR INNERES: Einsatzkonzept für die HafenCity bei Sturmfluten. Hamburg, 2002.
- FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, WIRTSCHAFTSBEHÖRDE: Die Entwicklung des Hamburger Stromspaltungsgebietes 1950 bis 1994. Statusbericht, Hamburg, 1995.
- FREIE UND HANSESTADT HAMBURG: Sturmfluten und Hochwasserschutz in Hamburg. Hamburg, 1986.
- GROSSMANN, I.; WOTH, K. and VON STORCH, H.: Localization of global climate change: storm surge scenarios for Hamburg in 2030 and 2080. Die Küste, 71, 2006.
- HAMBURGISCHES GESETZ- UND VERORDNUNGSBLATT Nr. 19, Verordnung zum Schutz vor Sturmfluten im Bereich der HafenCity. Hamburg, 2002.
- HOFSTEDE, J. L. A.: COMRISK Common Strategies to Reduce the Risk of Storm Floods in Coastal Lowlands – an Introduction, In: Hofstede, J.L.A. (ed.): COMRISK – Common Strategies to Reduce the Risk of Storm Floods in Coastal Lowlands, Special Edition. Die Küste, 70, 2005.
- HOFSTEDE, J. L. A.; KAISER, G.; REESE, S. and STERR, H.: Risk perception and public participation COMRISK subproject 3. Die Küste, 70, 2005.
- HORLACHER, H.-B.; CARSTENSEN, D. und DRÄGERT, S.: Bemessung von Küstenschutzbauwerken an den Bodden- und Haffküsten von Mecklenburg-Vorpommern. AG: StAUN Rostock, Abt. Küste, AN: TU Dresden, IWD, 2006, unveröff.
- HORLACHER, H.-B.; CARSTENSEN, D.; DRÄGERT, S.; FRÖHLE, P. und SCHLAMKOW, C.: Bemessungsseegang Außenküste Mecklenburg-Vorpommern. AG: StAUN Rostock, Abt. Küste, AN: TU Dresden, IWD; Universität Rostock, UIW, 2006, unveröff.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): Strategies for adaptation to sea level rise. Report of the IPCC coastal zone management subgroup, Rijkswaterstaat, Den Haag, 1990.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): Climate Change 2001, the scientific basis summary for policy makers. www.ipcc.ch, 2001.
- IPCC: Climate Change 2007: the Physical Science base, summary for policy makers, 2007.
- KFKI: Forschungskonzept für das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI). 2001.
- KRAMER, J.: Kein Deich. Kein Land. Kein Leben. Geschichte des Küstenschutzes an der Nordsee, Leer, 1996.
- LÄNDERARBEITSGRUPPE: Bemessungswasserstände entlang der Elbe. Die Küste, 47, 31–50, 1988.
- LIEBERMAN, N. VON: Leitbildmotiv für den Küstenschutz der Nordseeküste am Beispiel der Vorländer – Dissertation, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, H. 83, 1999.
- LROP: Neubekanntmachung der Verordnung über das Landesraumordnungsprogramm Niedersachsen (LROP), Nds. GVBL Nr. 10 vom 22. Mai 2008, 2008.
- MINISTERIUM FÜR ARBEIT, BAU UND LANDESENTWICKLUNG MECKLENBURG-VORPOMMERN: Raumentwicklungsprogramm Mecklenburg-Vorpommern, 2005.
- MINISTERIUM FÜR BAU, LANDESENTWICKLUNG UND UMWELT MECKLENBURG-VORPOMMERN: Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern, 1995.
- MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ MECKLENBURG-VORPOMMERN: Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern, Übersichtsheft, 2009.
- MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ARBEIT UND TOURISMUS MECKLENBURG-VORPOMMERN: Klimaschutz und Folgen des Klimawandels in Mecklenburg-Vorpommern, 2008.
- MLR (Ministerium für ländliche Räume, Landesplanung, Landwirtschaft und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein): Generalplan Küstenschutz – integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein. Kiel, 2001.
- NLWKN: Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen Teil Festland –, 2007.
- NDG: Niedersächsisches Deichgesetz i. d. F. vom 23. Februar 2004 (Nds. GVBl. S. 83) geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 5. November 2004 (Nds. GVBl. S. 417), 2004.
- NDS.SOG: Niedersächsisches Gesetz über die öffentliche Sicherheit und Ordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 19. Januar 2005 (Nds. GVBl. S. 9) zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 14. Dezember 2007 (Nds. GVBl. S. 720), 2007.
- NIELEN-KIEZEBRINK, M. VAN and KLOOSTER, J.: Evaluation of policies and strategies for coastal risk management – COMRISK subproject 1, In: Hofstede, J. L. A. (ed.): COMRISK – Common Strategies to Reduce the Risk of Storm Floods in Coastal Lowlands, Special Edition. Die Küste, 70, 2005.
- NKATSG: Niedersächsisches Katastrophenschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. Februar 2002 (Nds. GVBl. S. 73) geändert durch Artikel 6 des Gesetzes vom 16. September 2004 (Nds. GVBl. S. 362), 2004.
- NLWKN (Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz): Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen Teil Festland, 2007.
- PROBST, B.: Küstenschutz 2000 Neue Küstenschutzstrategien erforderlich? Wasser und Boden, 46, 11, 1994.
- PROBST, B.: Deichvorlandbewirtschaftung im Wandel der Zeit. Die Küste, 58, 1996.
- PROBST, B.: Leitbild und Ziele des Küstenschutzes in Schleswig-Holstein. Wasser und Boden, 50, 12, 1998.
- RAT: Empfehlung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Umsetzung einer Strategie für ein integriertes Management der Küstengebiete in Europa. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 148/24, 2002.
- RAT: Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Bewertung und Bekämpfung von Hochwasser. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Juni 2006.
- SCHIRMER, M. und SCHUCHARDT, B. (eds.): Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste (KRIM) – Teilprojekt VII: Integrative Analyse und Decision Support System (Endbericht), 2005 (im Druck).

- SIEFERT, W.: Bemessungswasserstände 2085 A entlang der Elbe Ergebnisse einer Überprüfung durch die Länderarbeitsgruppe nach 10 Jahren. Die Küste, 60, 227–256, 1998.
- THORENZ, F. und EGGERT, W.- D.: Forschung für das Küsteningenieurwesen im KFKI. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft Band 54, 2004.
- THORENZ, F. und CARSTENS, R.: Vorlandmanagement in Niedersachsen. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft Band 54, 2004.
- THORENZ, F.: Coastal Defence Strategies for Sandy Coastlines as a Building Block for Integrated Coastal Zone Management. Proceedings Third Chinese-German Joint Symposium in Costal and Ocean Engineering, NCK University Tainan, 2006.
- UNABHÄNGIGE KOMMISSION STURMFLUTEN, Abschlußbericht, Hamburg, WHG: Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585) 1989.
- WOTH, K.; WEISSE, R. und VON STORCH, H.: Dynamical modelling of North Sea storm surge extremes under climate change conditions. An ensemble study. Ocean Dynamics, 56, 2006.
- ZIMMERMANN, C.; VON LIEBERMAN, N. und MAI, S.: Die Auswirkungen einer Klimaänderung auf das Küstenschutzsystem an der Unterweser, In: Schirmer, M. und Schuchardt, B. (eds.): Umweltnatur- und Umweltsozialwissenschaften, Springer-Verlag, 139–148, 2004.

# Integration von Informationen über Echoverteilung und Rückstreuintensitäten in den Filterprozess von Laserdaten

Von JENS GÖPFERT, UWE SÖRGEL, CHRISTIAN HEIPKE und ALEXANDER BRZANK

## Zusammenfassung

Für viele Aufgaben des Küstenmanagements und des Küstenschutzes bilden digitale Geländemodelle (DGM) eine der wichtigsten Grundlagen. Sie werden beispielsweise zur Massenberechnung von Dünen und Deichen oder bei den Simulationen von Überflutungsszenarien genutzt. Eine immer häufiger verwendete effiziente Methode zur Generierung der Datenbasis für die DGM ist das Airborne Laserscanning (ALS), dessen Vorteile besonders in schwer zugänglichen Watt- und Inselbereichen zum Tragen kommen. Neben Effizienz und Wirtschaftlichkeit spielen insbesondere Genauigkeit und Zuverlässigkeit einer Messmethode speziell im sicherheitsrelevanten Küstenbereich eine entscheidende Rolle. Im Allgemeinen bietet ALS in vegetationslosem ebenem Gelände eine Höhengenauigkeit von 15 cm. Wird der Laserstrahl jedoch von dichter Vegetation beeinflusst, sinkt das Genauigkeitspotential und die Zuverlässigkeit des Messverfahrens. Verschiedene Filteralgorithmen wurden entwickelt, um Vegetationspunkte aus den aufgenommenen Datensätzen zu entfernen. Diese nutzen aber zumeist ausschließlich geometrische Kriterien, beispielsweise Neigung oder Höhenunterschiede in einer definierten Nachbarschaft, zur Unterscheidung. In Gebieten mit dichter Vegetation und bewegtem Gelände, in denen nur ein geringer Prozentsatz der Laserpulse die Geländeoberfläche erreicht, versagen die zugehörigen Annahmen und die Filterung schlägt fehl. Dies führt zu einem positiven Höhenversatz in den Daten. In diesem Artikel werden zusätzliche Merkmale vorgeschlagen, welche mit den radiometrischen Eigenschaften der rückstreuenden Objekte verknüpft sind und den Filterprozess unterstützen können. Der vorgestellte neue Algorithmus verwendet die Intensitätswerte sowie die Verteilung der Mehrfachechos für eine adaptive Bestimmung der Gewichte innerhalb einer iterativen Flächenschätzung. Auf der Grundlage von Kontrollflächen, die sich in verschiedenen Arten von Küstendünengebüsch befinden, wird das Potential der Methode veranschaulicht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Integration der zusätzlichen Merkmale die Differenzen zwischen der geschätzten Oberfläche und den Kontrollmessungen reduziert.

## Schlagwörter

Airborne Laserscanning, Vegetation, Digitale Geländemodelle, Filterung, LIDAR, Rückstreuintensitäten, Echoverteilung

#### Summary

Accurate digital terrain models (DTM) are one of the most important requirements for many applications in coastal management and safety, such as the calculation of the volume of dunes and dikes for the purpose of coastal protection. Airborne LIDAR sensors provide dense height information of large areas in an efficient manner, therefore such data are appropriate to derive suitable DTM. Besides reasons of efficiency and economy, the accuracy and especially the reliability of the data are essential factors for the applicability in safety related domains. In case of moderate surface roughness in non-vegetated areas LIDAR DTM usually provide a standard deviation in height of less than 15 cm. However, the accuracy and reliability of the LIDAR DTM points suffer if the laser beam interacts with vegetation. Several filter algorithms were developed in order to eliminate the vegetation points in LIDAR data sets. Usually, they apply geometric criteria, for instance the slope in a defined neighbourhood, to solve this task. However, in areas of very dense vegetation and rough terrain, where only a few laser pulses are able to penetrate the canopy, such processing often fails resulting in an upward height shift of the derived DTM. In this paper additional features are proposed, which correspond to the reflectance characteristics of the backscattering objects, to support the filtering process. The introduced new algorithm uses intensity information and the distribution of multiple echoes for adaptive determination of the weights during an iterative surface fitting. Based on several control areas located in different types of coastal shrubberies the potential of this method is demonstrated. The results show that the integration of the new features decreases the differences between the LIDAR based surface and the control measurements.

## Keywords

Airborne Laserscanning, vegetation, digital terrain models, filtering, LIDAR, backscattered intensities, echo distribution

#### Inhalt

1.	Einleitung	76
	1.1 Motivation	76
	1.2 Stand der Forschung	77
2.	Neuer Filteralgorithmus	78
	2.1 Vorüberlegungen	78
	2.2 Neuer Filteransatz	81
3.	Experimente	84
4.	Bewertung und Ausblick	89
5.	Danksagung	89
6.	Schriftenverzeichis	90

## 1. Einleitung

## 1.1 Motivation

Heutzutage ist das luftgestützte Laserscanning eine der wichtigsten Techniken zur Generierung von großflächigen Höheninformationen und der daraus abgeleiteten digitalen Geländemodelle. Die Vorteile dieses berührungslosen Messverfahrens kommen besonders im Bereich der deutschen Nordseeküste zur Geltung, wo der Zugang für terrestrische Methoden aufgrund dichter Vegetation auf den Inseln und teilweise in den Vorlandbereichen, sowie des periodisch überfluteten Wattenmeeres eingeschränkt ist. Die Qualität des LIDAR (light detection and ranging) DGM hängt im Wesentlichen von dem verwendeten Sensor, den Befliegungsparametern (z.B. Flughöhe über Grund), der Nachbearbeitung der Daten (z.B. Streifenanpassung und Georeferenzierung) und der Topographie der abgetasteten Fläche ab. Bei geringer Geländeneigung in vegetationslosen Gebieten erreichen die mit Laserscanning bestimmten Punkthöhen üblicherweise Standardabweichungen von weniger als 15 cm. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des LIDAR DGM sinkt jedoch, wenn der Laserstrahl auf Vegetationsflächen trifft. Die Art der Vegetation sowie die Jahreszeit beeinflussen die Durchdringungsrate des Laserpulses. Niedrige Vegetation lässt sich häufig nicht vom darunter liegenden Boden trennen. Dies führt zu einem aus verschiedenen Reflexionen zusammengesetzten Signal, dessen Schwerpunkt sich oberhalb der eigentlichen Geländeoberfläche befindet. Folglich wird die Laufzeit des Laserpulses sowie die daraus abgeleitete Entfernung zum Sensor zu kurz bestimmt, was zu einem Höhenfehler für den jeweiligen Laserpunkt führt. Je nach Entfernungsauflösung können neuere Sensoren in höherer Vegetation für einen ausgesandten Puls Mehrfachechos aufzeichnen, die durch Reflexionen von Pflanzenteilen in ver-

schiedenen Höhen hervorgerufen werden. Viele Filteralgorithmen zur Entfernung von Vegetationspunkten in den Datensätzen stützen sich auf die Annahme, dass das letzte zurück gestreute Echo die Geländeoberfläche repräsentiert. Bei sehr dichter Vegetation werden jedoch auch diese Echos häufig von Rückstreuern, die sich vollständig in Vegetationsschichten befinden, erzeugt. Dies führt ebenfalls zur Messung einer zu kurzen Distanz zwischen Sensor und Boden sowie dementsprechend zu Laserpunkten, die oberhalb der eigentlichen Geländeoberfläche liegen (positiver Höhenversatz). Heutzutage angewandte automatische Filteralgorithmen nutzen häufig ausschließlich geometrische Kriterien, wie beispielsweise Höhendifferenzen und Neigungen, um die Vegetationspunkte zu detektieren (siehe Kap. 1.2 für Details). Die Funktionstüchtigkeit dieser Methoden setzt die Existenz einer ausreichenden Anzahl von Bodenpunkten voraus. Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Untersuchungsgebiet an der deutschen Nordseeküste ist jedoch von vielfältiger dichter Vegetation, wie verschiedene Gebüschstrukturen, bedeckt, die nur eine geringe Durchdringungsrate der Laserstrahlen gestatten. Ein zusätzliches Problem bei der Filterung ergibt sich aus der Tatsache, dass die Vegetation sich oft in kleinen Tälern befindet. Dadurch liegen die Vegetationspunkte manchmal sogar niedriger als die sie umgebenden Kämme. Diese Aspekte führen zu unbefriedigenden Ergebnissen herkömmlicher Filterverfahren. In diesem Artikel wird deshalb eine neue Methode vorgestellt, welche das Reflexionsverhalten der rückstreuenden Objekte berücksichtigt, um den Filterprozess zu unterstützen.

## 1.2 Stand der Forschung

Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Landschaften wurden verschiedene Filtermethoden zur automatischen Separation von Boden- sowie Vegetations- und Gebäudepunkten entwickelt. Die Dissertation von SITHOLE (2005) bietet einen umfassenden Überblick über die existierenden Algorithmen, ihre Klassifizierung nach verschiedenen Kriterien, eine Beschreibung des ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) Filtertests und ein Ansatz für eine neue Filtertechnik. SITHOLE unterschied die Filtermethoden bezüglich ihrer Datenstruktur, der berücksichtigten Nachbarschaften, des Maßes für Geländeunstetigkeiten, einfacher oder iterativer Verfahren, des zugrunde liegenden Filterkonzeptes und der Integration externen Wissens. Vier Hauptgruppen wurden entsprechend den folgenden Konzepten definiert:

- basierend auf Neigung (z.B. VOSSELMANN, 2000; ROGGERO, 2001)
- Block Minimum (z.B. WACK and WIMMER, 2002)
- basierend auf Oberflächenrekonstruktion (z.B. KRAUS and PFEIFER, 1998)
- Clusterung/Segmentierung (z.B. BROVELLI, 2002).

Ein anderes Kriterium bewertet die Integration des Reflexionsverhaltens der rückstreuenden Objekte, wie beispielsweise Intensitäten oder die Verteilung von Mehrfachechos bei der Filterung. Unter allen Teilnehmern des ISPRS-Testes berücksichtigte jedoch nur BRO-VELLI (2002) die Differenzen zwischen erstem und letztem Echo im Filterprozess. Die mit den Laserpunkten abgespeicherten Intensitätswerte wurden dagegen bisher noch nicht in einem der getesteten Algorithmen verwendet. Einige Ansätze zur Klassifizierung von Objekten aus Laserscannerdaten nutzten allerdings den Informationsgehalt dieses Merkmals. MOFFIET et al. (2005) untersuchte beispielsweise Möglichkeiten anhand von unterschiedlichen Echos (erste, letzte und einzelne) sowie der zugehörigen Intensitätswerte Baumarten zu unterscheiden. Neben anderen Merkmalen verwendeten TóvARI und VöGTLE (2004) die Intensitäten, um Vegetation, Gebäude und Bodenpunkte zu klassifizieren. BRZANK et al. (2008) entwickelten einen Algorithmus, der unter Berücksichtigung der Intensitäten Wasserflächen in Laserscannerdaten des Wattenmeeres detektiert.

Eine notwendige Voraussetzung für die Interpretation und Auswertung von Full-Waveform-Daten, die von den neuesten Scannern aufgezeichnet werden können, ist ein aussagekräftiges physikalisches Modell der komplexen Interaktion zwischen Laserstrahl und den rückstreuenden Objekten innerhalb des Strahlenkegels, die auch eine Ausdehnung in vertikaler Richtung besitzen können. Auf Grundlage der Radargleichung beschreibt JELALIAN (1992) die fundamentalen Zusammenhänge zwischen Emitter, dem reflektierenden Objekt und dem Empfänger für die Technologie des Laserscannings. Dabei werden die sensor- und objektabhängigen Parameter formal getrennt, und ein objektbezogener Rückstreuquerschnitt wird definiert. WAGNER et al. (2006) veranschaulichen zusätzlich die Beziehungen zwischen den räumlichen Variationen des Rückstreuquerschnittes und der Amplitude sowie der Breite der reflektierten Echos. Diese theoretischen Überlegungen sollten im nächsten Schritt in praktische Anwendungen dieser Merkmale bei der Filterung und Klassifizierung münden.

Der Ansatz in diesem Artikel basiert hauptsächlich auf dem Verfahren der robusten Filterung, die in KRAUS und PFEIFER (1998) vorgestellt wurde. Dieser iterative Algorithmus verwendet die Lineare Prädiktion als Interpolationsmethode zur erstmaligen Oberflächenmodellierung. Die Verbesserungen der Laserpunkthöhen bezüglich der Oberfläche der vorangegangenen Iteration bestimmen die Gewichte für die nächste Ausgleichung unter Verwendung einer speziellen Transferfunktion (Formel 1). Niedrige Gewichte werden Punkten oberhalb der geschätzten Fläche (wahrscheinlich Vegetation) zugewiesen, während Punkte darunter (wahrscheinlich Boden) ein hohes Gewicht erhalten. Der Algorithmus wird beendet, wenn sich die Veränderung der unbekannten Parameter der Fläche unter einem vorher definierten Schwellwert befindet oder eine maximale Iterationsanzahl erreicht ist. Zum Schluss wird anhand eines Schwellwertes für die Verbesserungen der Laserpunkthöhen die Filterung durchgeführt.

$$p(r_i) = \begin{cases} 1 & f \ddot{u} r & g < r_i \\ \frac{1}{1 + (a \cdot (g - r_i)^b)} & f \ddot{u} r & g \ge r_i \end{cases}$$
(1)

mit

p(ri)Gewicht von Punkt ia,bDefinition der SteilheitriVerbesserung von Punkt igVerschiebung in Richtung von ri

#### 2. Neuer Filteralgorithmus

## 2.1 Vorüberlegungen

Der Ansatz, der in diesem Artikel beschrieben wird, wurde im Rahmen eines Projektes in enger Zusammenarbeit mit verschiedenen Behörden des Küstenmanagement und -schutzes erarbeitet. Ein wichtiges Ziel des Projektes bestand in der Analyse des Einflusses küstentypischer Vegetation (z.B. Sanddorn, Kartoffelrose) auf die Genauigkeit der Laserscannerdaten und der Entwicklung von Algorithmen zur automatischen Detektion und Beseitigung möglicher Fehler. Durch einen Vergleich umfangreicher terrestrischer Kontrollmessungen

mit den aufgenommenen Laserdaten konnten Problembereiche bezüglich der Genauigkeit erkannt und Zusammenhänge zwischen den auftretenden Höhenfehlern und den Eigenschaften der Vegetation, wie der Pflanzenart, -höhe und -dichte, hergestellt werden (GÖP-FERT u. HEIPKE, 2006). In einem weiteren Schritt wurden Merkmale aus den verfügbaren Fernerkundungsdaten (z.B. Streuung der Laserpunkthöhen, Intensität der Echos, Merkmale aus Multispektraldaten) extrahiert, welche die Vegetationseigenschaften in den Daten repräsentieren können und somit für eine Klassifizierung aussagekräftig sind. Zur Bestimmung der Signifikanz der Merkmale wurde die Korrelation zum auftretenden Höhenversatz der Laserpunkte in Vegetationsbereichen unter Verwendung der Kontrollmessungen ermittelt. Anschließend wurden die besten Merkmale zur Klassifizierung der Laserdaten in definierte Genauigkeitsbereiche. Die Intensitätswerte der Laserpunkte gehörten beispielsweise zu denjenigen Merkmalen, die eine signifikante negative Korrelation zum Höhenversatz aufwies.

Nachteilig wirkte sich bei diesem Ansatz jedoch aus, dass sich die Genauigkeitsklassen nicht als gut trennbare Clustern im Merkmalsraum abzeichneten, was aber eine wichtige Voraussetzung für solche Klassifizierungsverfahren ist. Wird nur eine spezielle Vegetationsart bei der Analyse berücksichtigt, zeigte der Höhenversatz statt einer clusterförmigen Ausprägung eine eher kontinuierliche Charakteristik. Das bedeutet, innerhalb des ermittelten Genauigkeitsbereiches für eine bestimmte Vegetationsart sind alle Fehlergrößen möglich, was hauptsächlich von der Dichte und Höhe der einzelnen Pflanzen abhängt. Deswegen wurde in einem zweiten Ansatz (GOEPFERT u. SOERGEL, 2007) der Zusammenhang zwischen Merkmal und Höhenversatz der Laserpunkte anhand von kontinuierlichen Funktionen modelliert. Diese Funktionen wurden in Trainingsgebieten geschätzt, für die der Höhenversatz aus Kontrollmessungen bestimmbar war. Mittels der Parameter der ausgeglichenen Funktionen und der extrahierten Merkmale für jeden Laserpunkt konnte im Anschluss der Höhenversatz in anderen Regionen mit ähnlicher Vegetation geschätzt werden.

Ein anderer Vorteil verglichen mit der ersten Methode ergibt sich aus der Berechnung der Merkmale auf Basis der unregelmäßigen Punktwolke, so dass die Signifikanz der Merkmale nicht durch zusätzliche Interpolationseffekte beeinträchtigt wird. Abb. 1 veranschaulicht zwei Beispiele für die modellierten Zusammenhänge zwischen Intensitätswerten und Höhenversatz für Trainingsgebiete mit unterschiedlicher Größe.



Abb. 1: Abhängigkeit zwischen Intensitätswerten und Höhenversatz für Single- und Mehrfachechos für zwei Testgebiete unterschiedlicher Größe: a) 297 Singleechos, b) 1183 Singleechos (Riegl-Scanner LMS-Q560)

80

Allerdings hat auch der zweite Ansatz noch einige Nachteile. Auf der einen Seite sind vielfältige aufwendige Kontrollmessungen für die Trainingsgebiete notwendig, um robuste Funktionen schätzen zu können und die Übertragbarkeit auf andere Regionen zu garantieren. Auf der anderen Seite steigen die Verbesserungen für die geschätzten Funktionen mit größeren und deshalb inhomogeneren Trainingsgebieten und die Aussagekraft der Merkmale sinkt (Abb. 1).

Infolge der größeren Inhomogenität in der Verteilung der Vegetationshöhen und -dichten, verringert sich auch die Signifikanz der Intensitätswerte. Abbildung 2 veranschaulicht diesen Zusammenhang genauer. Wenn die Vegetationshöhen im Trainingsgebiet stark variieren, können sich ähnliche Rückstreuquerschnitte und folglich ähnliche Intensitätswerte für Echos in sehr unterschiedlichen Höhen über dem Boden ergeben. Deshalb hängt die Verwendbarkeit der Intensitätswerte von der Ausdehnung der betrachteten Nachbarschaft ab. So müssen die Trainingsgebiete im zweiten Ansatz klein genug bezüglich der Homogenität ihrer Vegetation und groß genug im Hinblick auf eine robuste Schätzung der Funktionen sein. Darüber hinaus erschwert die Tatsache, dass die Vegetation häufig in kleinen Tälern zu finden ist und deshalb ähnliche Rückstreuquerschnitte, die zwar zu Laserechos mit unterschiedlichen Höhenfehlern gehören, sich aber in der gleichen absoluten Höhe befinden, die Interpretation der Intensitätswerte für größere Trainingsgebiete mit erheblicher Variation der Geländehöhen und Vegetation noch zusätzlich (Abb. 2).

Weitere Aussagen über die Verteilung der Intensitätswerte lassen sich aus der Analyse der Abbildung 1 ableiten, die für das Design eines neuen Filteralgorithmus wichtig sind. Dabei wird von einem Singleecho gesprochen, wenn für einen ausgesandten Laserimpuls nur ein Echo stark genug ist, um im Scanner aufgezeichnet zu werden. Bei einem komplexeren reflektierten Signal mit mehreren signifikanten Echos kennzeichnet das erste oder Firstecho diejenigen Rückstreuer (z.B. die Baumkrone), die dem Scanner am nächsten sind, während das letzte oder Lastecho (z.B. niedrige Äste oder der Boden) die am weitesten entfernten Rückstreuer repräsentiert.

- Je höher sich ein Singleecho in der Vegetation befindet, desto kleiner werden die zugehörigen Intensitätswerte.
- Es existieren Singleechos mit Intensitätswerten und Höhenfehlern, die auch für die ersten Echos (von mehreren) zu beobachten sind.
- Aufgrund des Energieverlustes durch vorangegangene Rückstreuer, deren Echostärke oberhalb des Schwellwertes des Scanners liegt, ist die durchschnittliche Intensität des letzten Echos (von mehreren) eines Laserpulses kleiner als der gleiche Wert für ein ungestörtes Singleecho am Boden (Abschattungseffekte).
- Die Intensitätswerte der letzten Echos (von mehreren) variieren in Abhängigkeit vom zugehörigen Rückstreuquerschnitt und der Stärke vorangegangener Rückstreuer. Weil diese Einflussfaktoren nur schwer zu trennen sind, ist der Intensitätswert der letzten Echos für die Filterung weniger nützlich.

Neben den Ergebnissen der Datenanalyse unterstützen theoretische Überlegungen die Verwendung der Intensität im Filterprozess. Obwohl die Intensitätswerte der Laserechos durch die Firmen auf unterschiedliche Art und Weise abgeleitet werden, sind sie doch in jedem Fall eine Funktion der Amplitude des zurück gestreuten Signals, die von der räumlichen Variation des Rückstreuquerschnittes abhängt (WAGNER et al., 2006). Der Reflexionsgrad, das Streuverhalten und die wirksame Fläche der reflektierenden Objekte werden im Konzept des Rückstreuquerschnitts zusammengefasst, um die Eigenschaften von Punktstreuern zu modellieren. Für in Ausbreitungsrichtung des Laserstrahles ausgedehnte Objekte wurde ein so genannter differentieller Rückstreuquerschnitt eingeführt. Nach diesem Konzept beinhal-



Abb. 2: Die Korrelation zwischen Intensitätswerten (und den zugehörigen Rückstreuquerschnitten) und dem Höhenversatz hängt stark von der Homogenität der Verteilung der Vegetationshöhe und -dichte im Testgebiet ab

ten sowohl Amplitude als auch die von ihr abgeleitete Intensität wichtige Informationen über die Charakteristik von Teilen komplexer Objekte, wie beispielsweise die Struktur einer Pflanze, und somit über die Vegetationsdichte. Im Ausgangsfall eines vertikal einfallenden Laserstrahles mit gleichmäßiger Energieverteilung besitzt demnach eine ebene Geländeoberfläche einen homogenen Rückstreuquerschnitt (runder Messfleck) sowie ein schmales Echosignal mit großer Amplitude, während für ein gemischtes Signal mit Anteilen von Reflexionen am Boden und in niedriger Vegetation die Pulsbreite aufgeweitet und die Amplitude abgeschwächt ist. Bei der Analyse von Gebüschstrukturen in der vegetationslosen Phase wird deutlich, dass je höher das Echo sich in der Vegetation befindet, desto dünner die Äste und Zweige werden, die zum potentiellen Rückstreuquerschnitt beitragen können. Deshalb verringert sich auch in der Theorie die Amplitude des Echosignals und folglich die zugehörigen Intensitätswerte für Laserpunkte in den oberen Bereichen der Vegetation. Diese Aussage deckt sich somit mit den Erkenntnissen der Datenanalyse im vorigen Abschnitt.

## 2.2 Neuer Filteransatz

Während in den vorherigen Ansätzen die Intensitätswerte direkt in die Berechnung des Höhenversatzes einflossen, werden sie im neuen Algorithmus zur Bestimmung der Gewichte in einer iterativen Flächenschätzung verwendet<sup>1</sup>. Verschiedene Erwägungen unterstützen diese mittelbare Integration der Intensitätswerte in den Filterprozess. So könnte beispielsweise bei einer aus den Daten abgeleiteten hohen Gewichtung der Intensitätswerte im zweiten Ansatz die sich aus den Laserpunkten ergebende Oberfläche stark von den Höhenwerten abweichen, da die Intensität direkt an der Berechnung der Höhenverbesserungen beteiligt ist. Um diesen Effekt zu vermeiden sind die Laserhöhen die einzigen Beobachtungen bei der Flächenschätzung des neuen Algorithmus, während die Intensitätswerte an der Bestimmung der jeweiligen Gewichte mitwirken. Ein anderes Argument bezieht sich auf die Theorie der

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Das grundlegende Konzept der robusten Filterung findet sich in KRAUS u. PFEIFER (1998).

Ausgleichungsrechnung. Die Gewichte werden normalerweise aus den a priori-Standardabweichungen der zugehörigen Beobachtungen (in diesem Falle die Laserhöhen) abgeleitet. Je breiter das Echosignal der Lasermessung und je geringer die Trennbarkeit der jeweiligen Amplitude vom Rauschen wird, desto unsicherer wird die Ermittlung der exakten Position des Echos im Signal. Deshalb deutet eine geringere Intensität auf eine größere Standardabweichung bei der Entfernungsbestimmung hin und ein kleineres Gewicht sollte eingesetzt werden.

Im neuen Verfahren wird eine iterative Oberflächenschätzung in einer lokalen Nachbarschaft durchgeführt, welche im aktuell bearbeiteten Single- oder Lastecho zentriert ist. Die Methode beginnt mit einer lokalen Schätzung einer Fläche erster oder zweiter Ordnung mit gleich gewichteten Beobachtungen (Beobachtungsgleichungen in Formel 2) aus einem Flugstreifen in einem über den Datensatz zu verschiebenden Fenster (gelber Kreis in Abb. 4a) als Näherungslösung.

$$r_i = f(\hat{a}, x_i, y_i) - z_i \tag{2}$$

mit

r<sub>i</sub> Verbesserung für Punkt i
â Vektor der Unbekannten (Parameter der Fläche)
x<sub>i</sub>,y<sub>i</sub> Koordinaten von Punkt i
z<sub>i</sub> Beobachtung für Punkt i

Die resultierenden Verbesserungen werden im Anschluss analysiert, um die Gewichte der Beobachtungen für die nächste Iteration zu aktualisieren. Die Gewichte setzen sich aus zwei Anteilen zusammen. Formel 1 überführt die Verbesserungen direkt in die erste Komponente des Gewichtes  $p(r_i)$ . Dabei wird angenommen, dass die Laserpunkte unterhalb der geschätzten Fläche zum Boden und die Punkte oberhalb der Fläche tendenziell zur Vegetation gehören. Der zweite Anteil des Gewichtes  $p(I_i)$  wird aus der Analyse der Intensitätswerte für die Singleechos und der räumlichen Echoerteilung für die Lastechos berechnet. Zu diesem Zweck werden zwei lineare Übertragungsfunktionen definiert:

- Wenn mindestens drei Firstechos in der betrachteten Nachbarschaft vorhanden sind, wird dem Mittelwert ihrer Intensitäten ein Gewicht von 0,2 zugewiesen, so dass sich ein Stützpunkt der Intensitätsübertragungsfunktion ergibt (Bezug: Aussage 2 in Kap. 2.1). Anderenfalls erhält der Mittelwert derjenigen Singleechos das Gewicht 0,4, welche die größten negativen Verbesserungen besitzen (wahrscheinlich Vegetation – Aussage 1). Diese empirischen Werte berücksichtigen, dass die Firstechos mit einer höheren Wahrscheinlichkeit zur Vegetation gehören. Der zweite Punkt der Übertragungsfunktion wird durch den Mittelwert der Intensitäten der Singleechos mit den größten positiven Verbesserungen (wahrscheinlich Boden – Aussage 1) festgelegt. Dieser Stützpunkt erhält das Gewicht 1. Gemäß der Aussage 3 in Kap. 2.1 gehen in diesem Teil des Algorithmus nur die Intensitätswerte der Single- und Firstechos ein. Die lineare Intensitätsübertragungsfunktion (Abb. 3) wird auf Werte zwischen 0 und 1 begrenzt und in Abhängigkeit von den Verbesserungen nach jeder Iteration aktualisiert.
- 2. Wie in der Aussage 4 erörtert wurde, sind die Intensitätswerte der Lastechos weniger aussagekräftig. Deshalb wird ihre zweite Gewichtskomponente im Ausgleichungsprozess über die Höhendifferenzen zu den zugehörigen Firstechos definiert. Dieses Konzept stützt sich auf die Annahme, dass eine größere Differenz die Wahrschein-

lichkeit für das jeweilige Lastecho erhöht, ein Bodenpunkt zu sein. Die Echoverteilungsübertragungsfunktion wird durch die Echos mit der größten Höhendifferenz (Gewicht 1) für die aktuelle Fensterposition und einer fiktive Differenz von 0m (Gewicht 0,2) festgelegt.

Um das Gesamtgewicht für die Laserpunkte zu berechnen, werden die beiden Komponenten miteinander multipliziert (Formel 3). In jeder Iteration werden die Gewichte entsprechend den genannten Regeln aktualisiert. Der Prozess wird nach einer vorgegebenen maximalen Iterationsanzahl beendet. Abschließend wird die Verbesserung des zentralen Laserpunktes abgespeichert und das Fenster wird zum nächsten Last- oder Singleecho in der Datei verschoben. Nach der Bearbeitung aller Laserpunkte in der Datei wird die eigentliche Filterung durchgeführt, indem die gespeicherten Verbesserungen mit einem vorher definierten Schwellwert verglichen werden.



Abb. 3: Festlegung einer Gewichtskomponente unter Verwendung der Intensitätswerte und der Verbesserungen der vorangegangenen Iteration

$$p_i = p(r_i) \cdot p(I_i) \tag{3}$$

mit

- p<sub>i</sub> Gesamtgewicht von Punkt i
- p(r<sub>i</sub>) Gewichtskomponente von Punkt i auf der Basis der Verbesserungen
- p(I<sub>i</sub>) Gewichtskomponente von Punkt i auf der Basis der Intensitätswerte und der Echoverteilung.

Aufgrund der starken Abhängigkeit der Intensitätswerte von den Eigenschaften der verschiedenen Laserscanner, wie beispielsweise die zeitliche Pulsstabilität oder die unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung der Intensitäten, wird ihre Verwendbarkeit für jede Iteration und Fensterposition entsprechend der Aussage 1 in Kap. 2.1 geprüft. Wenn die Singleechos oberhalb der geschätzten Fläche eine kleinere Intensität aufweisen als die Punkte unterhalb, stimmen die Daten mit dem theoretischen Modell überein und die Intensitätswerte werden im Filterprozess berücksichtigt. Anderenfalls wird nur die erste Komponente des Gewichts, die direkt aus den Verbesserungen abgeleitet wurde, verwendet. Die Information "Intensität genutzt" in den folgenden Experimenten bezieht sich auf diesen Test.

#### 3. Experimente

Die Experimente basieren auf drei Flugmissionen und einer Vielzahl von Trainingsflächen, die mittels Tachymeter und GPS-Techniken aufgenommen wurden. Die Daten der ersten Mission, die vor allem die Ostfriesische Insel Juist abdecken, wurden im März 2004 während einer Messkampagne der Firma TopScan mit dem ALTM 2050-Scanner von Optech erhoben. Die Flughöhe betrug 1000 m und das eingesetzte System gewährleistete eine Punktdichte von 2 Punkten pro m<sup>2</sup>. Der Hauptteil der Untersuchungen wurde mit Hilfe von Laserdaten ausgeführt, welche von der Milan Flug GmbH aufgenommen wurden und die Region der Ostfriesischen Insel Langeoog während der vegetationslosen Periode (April 2005 und 2006) beinhalten. Während dieser Messkampagnen wurde ein LMS-Q560-System der Firma Riegl eingesetzt. Bei einer Flughöhe von 600 m erreichte das System Punktdichten von rund 3 Punkten pro m<sup>2</sup>. Die Kontrollflächen beinhalten verschiedene Populationen von Küstendünengebüschen, wie Kartoffelrose, Sanddorn und Kriechweide. Eine detaillierte Beschreibung der Referenzdaten findet sich in GÖPFERT u. HEIPKE (2006).

Die Experimente in diesem Abschnitt konzentrieren sich auf die Verifikation des Vorteils, der bei der Integration von Intensitätswerten und Echoverteilung im Filterprozess entsteht. Die zwei ersten Tests sollen den Einfluss der Fenstergröße (der betrachteten Nachbarschaft) sowie der Iterationsanzahl auf die Genauigkeit der Oberflächenrekonstruktion mit Hilfe von Kontrollmessungen im Trainingsgebiet "Weide 2" in Flugstreifen 1 der Befliegung "Langeoog 2005" quantifizieren. Zusätzlich werden dabei geeignete Werte für diese beiden Parameter für die folgenden Untersuchungen festgelegt. Die Parameter a und b der Funktion für die robuste Filterung (Formel 1) wurden dabei auf 1,5 und 2 gesetzt, während für g der Wert 0 für die folgenden Tests zugewiesen wurde.

Im ersten Experiment wurde die Oberflächenschätzung mittels einer Ebene in drei Iterationen (entsprechend den Ergebnissen in Tab. 2) unter Verwendung von Nachbarschaften verschiedener Größe (Tab. 1) durchgeführt. Wenn die Größe des Fensters erweitert wird, steigen auch der Mittelwert und die Standardabweichung der Differenzen zwischen den Kontrollmessungen und der geschätzten Fläche. Für einen größeren Bereich ist die ausgeglichene Ebene demnach nicht mehr in der Lage, die wahre Geländeoberfläche mit ausreichender Genauigkeit zu modellieren. Als einen geeigneten Kompromiss aufgrund der folgenden Überlegungen wird der Radius des Fensters für weitere Analysen auf 2,5 m begrenzt. Auf der einen Seite wird ein relativ großer Wert gewählt, um eine minimale Punktanzahl im Fenster für die Flächenschätzung sowie für die Trennung von Boden und Vegetation auf der Grundlage der Verbesserungen zu gewährleisten. Eine erfolgreiche Unterscheidung ist sowohl für die robuste Filterung als auch für die Bestimmung der Intensitätsübertragungsfunktion notwendig. Ein für diese Trennbarkeit geeigneter Radius hängt von der Durchdringungsrate der Laserstrahlen in der jeweiligen Vegetation ab. Außerdem sollten genügend Laserpunkte im betrachteten Fenster existieren, die Aussage 1 aus Abschnitt 2.1 erfüllen, um die Eignung der Intensitätswerte für den Algorithmus bewerten zu können. Der höhere Prozentsatz in der Spalte "Intensität genutzt" in Tabelle 1 für größere Nachbarschaften unterstützt diese Überlegungen. Auf der anderen Seite verringert ein großer Radius die Genauigkeit der geschätzten Oberfläche und die Qualität der bestimmten Übertragungsfunktionen, da in einem größeren Fenster die Vegetation inhomogener in ihrer Ausprägung ist und die Zusammenhänge somit schwerer zu modellieren sind (siehe auch Abb. 1 und 2).

Tab. 1: Einfluss der Größe der definierten Nachbarschaft auf den Mittelwert und die Standardabweichung der Differenzen zwischen Kontrollmessungen und geschätzter Oberfläche, durchschnittliche Anzahl von Punkten im Fenster und Prozentsatz der Fensterpositionen mit verwendeter Intensität (Kontrollfläche "Weide 2" in Flugstreifen 1 "Langeoog 2005")

Radius (m)	Mittelwert (cm)	Standardabweichung (cm)	Punkt- anzahl	Fenster mit genutzter Intensität (%)
1,5	5,12	7,70	24	73,7
2,0	5,33	7,98	42	77,7
2,5	5,41	9,08	63	81,2
3,0	5,68	10,85	92	84,5
5,0	7,83	19,20	250	95,1

Tab. 2: Einfluss der Iterationsanzahl auf den Mittelwert und die Standardabweichung der Differenzen zwischen Kontrollmessungen und geschätzter Oberfläche (Kontrollfläche "Weide 2" in Flugstreifen 1 "Langeoog 2005")

	Anzahl der Iterationen				
	1	2	3	5	10
Mittelwert (cm)	7,021	5,479	5,413	5,408	5,408
Standardabweichung (cm)	10,375	9,146	9,078	9,073	9,073

Tab. 2 visualisiert den Einfluss der Iterationsanzahl auf die Genauigkeit des Algorithmus. Offensichtlich verringern sich sowohl der Mittelwert als auch die Standardabweichung der Differenzen zwischen den Kontrollmessungen und der geschätzten Oberfläche kontinuierlich, und eine stabile Lösung ergibt sich nach wenigen Iterationen, was die Anwendbarkeit der Methode hinterlegt. In den weiteren Analysen werden 3 Iterationen verwendet.

Der Prozentsatz der Laserpunkte, in deren Umgebung die Intensitätswerte den Verbesserungen hinsichtlich der Theoretischen Überlegungen (Aussage 1 in Kap. 2.1) entsprechen, beträgt über 90 % für die meisten der Kontrollflächen, welche sich in Bereichen von verschiedenen Küstendünengebüschen befinden (Tab. 3). Ein niedriger Prozentsatz kann für einige Flächen mit geringerer Punktdichte beobachtet werden. Dieses Ergebnis bestätigt die Anfangsexperimente mit verschiedenen Fenstergrößen und somit auch variierender Punktanzahl (Tab. 1). Eine mögliche andere Erklärung dieses Phänomens berücksichtigt die Lage der Kontrollflächen im Flugstreifen. Die zwei Testgebiete "Weide 2" und "Rose 2" befinden sich am Rand des Flugstreifens 2 der Messkampagne 2005. Aufgrund des größeren Einfallswinkels der Laserstrahlen im Vergleich zum Nadirblick sind die Durchdringungsrate und die Variationen des Rückstreuquerschnittes kleiner. Deshalb könnte die Signifikanz der Intensitätswerte am Rande der Flugstreifen etwas geringer ausfallen. Die größere Standradabweichung für diese Kontrollflächen unterstützt diese These.

Die Anwendbarkeit der Informationen über die Reflexionscharakteristik beschränkt sich auf Flächen mit Küstendünengebüsch (Abb. 4). Während Punkte, für deren Nachbar86

Tab. 3: Informationen zu den verschiedenen Kontrollflächen: Gesamtanzahl der Laserpunkte, Prozent-
satz der Fensterpositionen mit verwendeter Intensität für Flächen erster und zweiter Ordnung, Anzahl
der Laserpunkte in der Nachbarschaft (r = 2,5 m)

Testgebiet (Scanner-Flughöhe)	Anzahl Laserpunkte	Intensität genutzt-Ebene (%)	Intensität genutzt- Fläche 2. Ord. (%)	Anzahl Punkte im Fenster (r = 2,5 m)
Juist 2004 (ALTM 2050–1000 m)				
Rose/Weide	4046	89,7	88,7	48
Langeoog 2005 (LMS-Q560–600 m)				
Rose/Sanddorn (Streifen 1)	3015	99,8	99,8	63
Rose/Weide (Streifen 1)	497	99,4	99,3	57
Sanddorn 1 (Streifen 1)	820	99,1	99,8	67
Sanddorn 2 (Streifen 1)	574	91,6	92,5	60
Rose 1 (Streifen 1)	736	96,5	98,5	57
Rose 2 (Streifen 1)	450	91,8	90,7	62
Rose 2 (Streifen 2)	265	89,8	89,8	37
Weide 1 (Streifen 1)	419	93,1	93,1	68
Weide 2 (Streifen 1)	453	81,2	83,7	63
Weide 2 (Streifen 2)	260	77,3	83,1	37
Strandhafer (Streifen 1)	705	87,2	86,5	59
Langeoog 2006 (LMS-Q560–600 m)				
Sanddorn 1 (Streifen 11)	522	94,8	97,5	42
Sanddorn 2 (Streifen 11)	302	74,2	77,8	31
Sanddorn 2 (Streifen 12)	199	80,9	91,0	21

schaft die Intensitätswerte berücksichtigt werden, spärlich und zufällig in Gebieten mit Heide und Wiesen verteilt liegen, wird diese Information für die Oberflächenschätzung in der Testfläche "Sanddorn 2" (grüne Punkte in Abb. 4a) und in der Gebüschregion auf der linken Seite des Bildausschnittes (siehe Biotoptypenkartierung in Abb. 4b) fast für jede Fensterposition integriert. Aufgrund der geringen Vegetationshöhe und anderer Rückstreueigenschaften für Wiesenflächen und Heide ist die Signifikanz der Intensitätswerte gering. Dies zeigt jedoch auch den Nutzen der Intensität als ein Merkmal unter anderen zum Zwecke der Artenunterscheidung in einer Klassifizierung.



(a)

(b)

Abb. 4: Wenn die Verteilung der Intensitätswerte und der zugehörigen Verbesserungen mit der Theorie im betrachteten Fenster (gelber Kreis in (a) – Radius 2,5 m) übereinstimmt, wird die Intensität für die Filterung verwendet (kleine weiße Punkte), anderenfalls nicht (schwarze Punkte). Die grünen Punkte in (a) kennzeichnen die Kontrollmessungen für ein Habitat mit Sanddorn. Hintergrund: (a) Orthophoto, (b) Biotoptypenkartierung

Tab. 4 fasst den Mittelwert und die Standardabweichungen der Differenzen zwischen Kontrollmessungen und der geschätzten Oberfläche für alle Testgebiete und Flugkampagnen mit unterschiedlichen Methoden zusammen. Im Vergleich zur Näherungslösung mit gleich gewichteten Beobachtungen (erste und zweite Datenspalte) wird durch den iterativen Prozess bei der robusten Filterung (dritte und vierte Datenspalte) die geschätzte Fläche in jedem Testgebiet durch niedriger liegende Laserpunkte bezüglich der Kontrollmessungen gelegt. Die Integration der Rückstreuinformationen verstärkt für jede untersuchte Fläche diesen Effekt. Zusätzlich wird auch die Standardabweichung für zwei Drittel der Testgebiete durch die Verwendung der auf den Intensitätswerten beruhenden Gewichte verringert.

Die Unterschiede der mittleren Differenzen zwischen den verschiedenen Testgebieten scheinen zu einem großen Teil von ihrer Lage im jeweiligen Flugstreifen abzuhängen. Infolge von Ungenauigkeiten bei der Nachbearbeitung der Laserscannerrohdaten (schlecht verteilte Kontrollmessungen im Wattbereich aufgrund der schwierigen Erreichbarkeit) sind die Flug-

## 88

### Tab. 4: Mittelwert und Standardabweichung der Differenzen zwischen der geschätzten und der wahren Oberfläche (Kontrollmessungen) für die Näherungslösung (eine Iteration), Robuste Filterung und Robuste Filterung mit Intensitätsinformationen

	Ebene (cm)						
Testgebiet (Scanner-Flughöhe)	Initial		Robust		Robust + Int		
(Seamler Flaghone)	Mittelwert	σ	Mittelwert	σ	Mittelwert	σ	
Juist 2004 (ALTM 2050–1000 m)							
Rose/Weide	53,9	58,2	50,8	56,6	43,7	52,4	
Langeoog 2005 (LMS-Q560–600 m)							
Rose/Sanddorn (Streifen 1)	15,0	17,4	12,7	16,6	11,0	16,4	
Rose/Weide (Streifen 1)	20,6	7,4	19,6	7,2	18,1	7,1	
Sanddorn 1 (Streifen 1)	15,0	12,5	14,3	12,3	12,7	11,9	
Sanddorn 2 (Streifen 1)	16,5	11,1	15,7	10,5	13,9	9,3	
Rose 1 (Streifen 1)	7,8	8,3	7,3	8,2	6,4	8,2	
Rose 2 (Streifen 1)	6,5	4,2	6,3	4,1	5,5	4,2	
Rose 2 (Streifen 2)	-2,4	5,4	-2,5	5,4	-3,7	5,6	
Weide 1 (Streifen 1)	12,6	6,0	12,3	6,0	10,8	5,9	
Weide 2 (Streifen 1)	7,0	10,4	6,4	9,8	5,4	9,1	
Weide 2 (Streifen 2)	4,8	12,2	4,1	11,9	3,2	12,6	
Strandhafer (Streifen 1)	13,8	20,6	13,7	20,6	12,8	20,7	
Langeoog 2006 (LMS-Q560–600 m)							
Sanddorn 1 (Streifen 11)	2,1	11,1	0,9	11,0	-1,3	10,7	
Sanddorn 2 (Streifen 11)	-1,9	10,5	-2,9	9,7	-5,5	8,0	
Sanddorn 2 (Streifen 12)	-1,4	10,2	-2,3	9,5	-4,8	9,0	

streifen etwas verkippt. Dieser Aspekt führt zu einem systematischen Offset in Abhängigkeit zur Position im Flugstreifen. Aufgrund der geringen Ausdehnung der Kontrollflächen (durchschnittlich 20 m  $\times$  20 m) sollte dieser Umstand den Vergleich der verschiedenen Methoden hinsichtlich eines Testgebietes aber nur gering beeinflussen.

Wenn die Oberflächenrauheit steigt, verbessert die Verwendung einer Fläche zweiter Ordnung die Ergebnisse etwas. Der Trend ist jedoch ähnlich wie bei der Nutzung einer Ebene. Im Projekt wurden weiterhin Schilfflächen untersucht. Für Sommerbefliegungen ist die Durchdringungsrate der Laserpulse ähnlich gering wie bei den analysierten Gebüschstrukturen auf den Inseln, so dass fast gar keine Bodenpunkte in den Daten vorhanden sind. Dies führt bei größerer Ausdehnung der jeweiligen Vegetationsfläche zum generellen Versagen der Filteralgorithmen, so dass von Befliegungen in der Vegetationsperiode abzuraten ist, wenn man ein DGM erzeugen will. Bei Befliegungen im Frühjahr ist die Durchdringung der Laserpulse für stehende trockene Schilfgebiete gut, und eine Abhängigkeit der Intensitätswerte von der Höhe des zugehörigen Echos über der Geländeoberfläche ist ebenfalls zu beobachten. Damit sind die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Filterung gegeben. Bei durch Wind oder andere Kräfte niedergelegten Schilfschichten erreichen die Laserpulse die Geländeoberfläche in der Regel nicht und für die Filterung fehlen in diesen Bereichen die Informationen über die wahre Geländeoberfläche.

#### 4. Bewertung und Ausblick

In diesem Artikel wurde ein modifizierter Filteralgorithmus vorgestellt, der die Intensitätswerte und die Echoverteilung in der Laserpunktwolke in Gewichte für eine lokale iterative Flächenschätzung überführt. Die Methode wurde anhand verschiedener Testgebiete mit küstentypischen Gebüschstrukturen während der laubfreien Jahreszeit untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Integration der Rückstreuinformationen die geschätzte Oberfläche für jede Testfläche zu den niedrigsten Laserpunkten bezüglich der Kontrollmessungen zieht. Des Weiteren verringert der neue Algorithmus die Standardabweichung der Differenzen zwischen den Kontrollmessungen und der geschätzten Oberfläche in Bezug zur robusten Filterung für zwei Drittel der Testflächen.

Die Punkte für die Intensitätstransferfunktion wurden jedoch hier nur empirisch ermittelt. In zukünftigen Ansätzen sollte die Trennbarkeit der Intensitätswerte der höchsten und niedrigsten Echos bezüglich der geschätzten Oberfläche anhand statistischer Tests analysiert werden. Die Signifikanz dieses Merkmals kann dann weiter genutzt werden, um über eine Integration dieser Information zu entscheiden und die Übertragungsfunktion festzulegen.

Für weiterführende Arbeiten können Fortschritte in der Technik der Laserscanner, die eine Aufzeichnung des gesamten zurück gestreuten Signals (so genannte Full-Waveform-Scanner) ermöglichen, zusätzliche aussagekräftige Merkmale liefern. So ist beispielsweise die Signalbreite des Echos ein Qualitätskriterium für sich. Es beschreibt die Unsicherheit der Objektoberfläche und der Entfernungsmessung des zugehörigen Echos und kann deshalb ebenso leicht für die Bestimmung der Gewichte in den Filterprozess integriert werden.

Die vielversprechenden Untersuchungsergebnisse in diesem Artikel sollten dazu ermutigen, ihre Übertragbarkeit auf andere Vegetationsarten zu analysieren. So könnte beispielsweise die Annahme, dass je höher sich die Laserechos in der Vegetation befinden, desto kleiner werden der zugehörige Rückstreuquerschnitt und die Intensitätswerte, auch für laubfreie Bäume gelten, da unter anderem der Rückstreuquerschnitt durch den Durchmesser der reflektierenden Äste beeinflusst wird.

## 5. Danksagung

Diese Untersuchungen wurden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Projektnummer 03KIS050 gefördert. Zusätzlich bedanken wir uns bei unseren Projektpartnern: dem Amt für ländliche Räume Husum (ALR), der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest (WSD) und dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz Norden-Norderney (NLWKN) für die fachliche und infrastrukturelle Unterstützung.

## 6. Schriftenverzeichnis

- BROVELLI, M.; CANNATA, M. and LONGONI, U.: Managing and processing lidar data within GRASS. In Proceedings of the Open Source GIS-GRASS users conference, Trento, 2002.
- BRZANK, A.; HEIPKE, C.; GOEPFERT, J. and SOERGEL, U.: Aspects of generating precise digital terrain models in the Wadden Sea from lidar water classification and structure line extraction. In ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 63, Nr. 5, 2008.
- GÖPFERT, J. and HEIPKE, C.: Assessment of Lidar DTM Accuracy in Coastal Vegetated Areas: In Int. Arch. of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI/3, Bonn, 2006.
- GOEPFERT, J. and SOERGEL, U.: Estimation of the lidar height offset in coastal vegetated areas. In Int. Arch. of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI/3, Espoo, 2007.
- JELALIAN, A. V.: Laser Radar Systems. Artech House, Boston and London, 1992.
- KRAUS, K. and PFEIFER, N.: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. In ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 53 (4), 1998.
- MOFFIET, T.; MENGERSON, K.; WITTE, C.; KING, R. and DENHAM, R.: Airborne laser scanning: Exploratory data analysis indcates variables for classification of individual trees or forest stands according to species. In ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 59 (2005), 2005.
- ROGGERO, M.: Airborne laser scanning: Clustering in raw data. In Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV Part 3/W4, Annapolis, 2001.
- SITHOLE, G.: Segmentation and Classification of Airborne Laser Scanner Data, Dissertation, TU Delft, 2005.
- SITHOLE, G. and VOSSELMAN, G.: Experimental comparison of filter algorithms for bare-earth extraction from airborne laser scanning point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 59 (1–2), 2004.
- TÓVÁRI, D. and VÖGTLE, T.: Object Classification in Laser-Scanning Data. In Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXVI, Part 8/W2, 2004.
- VOSSELMAN, G.: Slope based filtering of laser altimetry data. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII Part 3B, Amsterdam, 2000.
- WACK, R. and WIMMER, A.: Digital terrain models from airborne laser scanner data a grid based approach. In Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV Part 3B, Graz, 2002.
- WAGNER, W.; ULLRICH, A.; DUCIC, V.; MELZER, T. and STUDNICKA, N.: Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. In ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 60, 2006.

# Ableitung Digitaler Geländemodelle im Wattenmeer aus luftgestützten Laserscannerdaten

Von Alexander Brzank, Christian Heipke, Jens Göpfert und Uwe Sörgel

## Zusammenfassung

Hochgenaue Digitale Geländemodelle (DGM) der Watten stellen eine essentielle Datenquelle für eine Fülle von Aufgaben und Anwendungen im Rahmen des Küstenschutzes sowie der Meeresforschung dar. Traditionell gestaltet sich jedoch die Erhebung der Messdaten insbesondere für die Erstellung großflächiger Modelle aufgrund der periodischen Überflutung schwierig. Deshalb müssen bei der Erzeugung eines DGM im Allgemeinen Einschränkungen hinsichtlich Genauigkeit und Aktualität in Kauf genommen werden. Mit Hilfe des luftgestützten Laserscannings ist man in der Lage, die Wattoberfläche großräumig, hochgenau und innerhalb eines kurzen Zeitfensters zu erfassen. Im Folgenden kann auf der Grundlage dieser Messungen ein präzises DGM generiert werden, sofern die spezifischen Beschränkungen des Messverfahrens berücksichtigt werden.

In diesem Artikel wird ein neuer Arbeitsablauf zur Erstellung eines DGM in den Watten aus luftgestützten Laserscannerdaten beschrieben. Für zwei entscheidende Schritte, namentlich die Klassifikation von Wasserpunkten und die Strukturlinienextraktion, wird darüber hinaus jeweils ein Algorithmus vorgeschlagen.

Anhand von Beispielen werden die beiden Algorithmen getestet. Die Resultate zeigen, dass die vorgestellten Verfahren präzise, zuverlässige Ergebnisse liefern und die Berechnung hochgenauer DGM ermöglichen.

#### Schlagwörter

DGM, Laserscanning, Vermessung, Watt

#### Summary

Highly precise Digital Terrain Models (DTM) of the Wadden Sea are an essential data source for various tasks and applications in the field of coast protection and oceanography. However, the acquisition of height data is in general difficult, especially for the generation of extensive areas, due to the cyclic flooding. Therefore, in regard to accuracy and timeliness limitations of the derived DTM normally have to be accepted. Airborne Laserscanning allows obtaining high accurate height data of the mudflat surface for large areas within a short time period. Based on these measurements a precise DTM can be determined as long as specific limitations of the method are considered.

A new workflow to generate a DTM in the Wadden Sea from Lidar data is presented in this study. For each of the two major steps – namely classification of water points and the extraction of structure lines – an innovative algorithm is proposed.

Both algorithms are tested on the basis of examples. The results prove that the presented methods deliver precise, reliable results and enable the calculation of accurate DTM.

DTM, laserscanning, survey, wadden sea

#### Inhalt

1. Einleitung	92
2. Erzeugung konsistenter Digitaler Geländemodelle im Wattenmeer	94
2.1 Klassifikation von Wasserflächen	95
2.1.1 Klassifikationsmerkmale	96
2.1.2 Gewichtung der Merkmale	97
2.1.3 Kalibrierung der Intensität und der 2D-Punktdichte	97
2.1.4 Automatische Ableitung der Klassifikationsparameter aus den	
Trainingsgebieten	99
2.1.5 Verwendung mehrerer Trainingsets	102
2.1.6 Plausibilisierung	103
2.2 Extraktion von Strukturlinien	103
2.2.1 1D-tanh-Funktion und Ableitung der Strukturlinienpunkte	104
2.2.2 2D-Flächentypen der tanh-Funktion	105
2.2.3 Ableitung der Näherungslösung	107
2.2.4 Bestimmung der Umringgrenzen	108
2.2.5 Festlegung und Kontrolle der Recheneinheiten	108
2.2.6 Berechnung der Startwerte, Ausgleichung und Ableitung der	
Strukturlinienpunkte	108
3. Praktische Tests	109
3.1 Klassifikation von Wasserflächen	109
3.2 Extraktion von Strukturlinien	112
3.3 Ableitung eines Digitalen Geländemodells	114
4. Bewertung und Ausblick	118
5. Danksagung	119
6. Schriftenverzeichnis	119

## 1. Einleitung

Digitale Geländemodelle (DGM) sind unverzichtbare Datenquelle und Arbeitsgrundlage im Küstenschutz. Basierend auf der Analyse von DGM verschiedener Epochen können Küstenschutzanlagen überwacht und hinsichtlich relevanter Änderungen untersucht werden (BRÜGELMANN, 2000). Ebenso können Lage- und Höhenänderungen küstenmorphologisch bedeutsamer Objekte, wie Priele und Dünen, aufgedeckt werden. Weiterhin dienen DGM als Planungsgrundlage für Instandsetzung und Neubau von Küstenschutzanlagen sowie Massenberechnungen. Sie sind unverzichtbar für die Gefahrenanalyse von Überflutungen. Darüber hinaus bilden sie die Grundlage für eine Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen und Aktivitäten wie Windmodellierung, Sedimenttransport, numerische Strömungs- und Wellenmodellierung etc. (PRANDLE et al., 2000).

Alle diese Anwendungen benötigen ein hochgenaues DGM der Watten. Für dessen Erzeugung eignet sich insbesondere das luftgestützte Laserscanning (BALTSAVIAS, 1999). Diese vergleichsweise neue, aber dennoch schon sehr gebräuchliche Methode bietet viele Vorteile. Es handelt sich um ein aktives, luftgestütztes und berührungsloses Messverfahren. Innerhalb kurzer Zeit können große Flächen mit einer Punktdichte von mehreren Punkten pro m<sup>2</sup> erfasst werden. Die durchschnittlich erreichte Lage- und Höhengenauigkeit von  $\sigma_x = \sigma_y =$ 0,5 m bzw.  $\sigma_z = 0,15$  m ermöglicht eine für die oben aufgeführten Anwendungsbereiche hinreichend genaue Geländemodellierung. Das Messverfahren ist in der Praxis weit verbreitet und hat sich als Standardverfahren zur Erhebung von 3D-Geländeinformationen im Wattbereich durchgesetzt. Dennoch treten bei der Geländemodellierung in den Watten spezifische Schwierigkeiten auf, welche die Genauigkeit der abgeleiteten DGM negativ beeinflussen und somit deren Verwendbarkeit beeinträchtigen. Die Hauptfehlerquelle bei der Modellierung von DGM in Watten sind die in den Rohdaten enthaltenen Wasserpunkte. Trotz der Tatsache, dass die Befliegung bei Tideniedrigwasser durchgeführt wird, sind einige Bereiche des Wattes mit Wasser überflutet. Besonders in den Prielen verbleibt Restwasser. Die jeweilige Wassertiefe schwankt zwischen wenigen Zentimetern und mehreren Metern. Der Laserscannerstrahl, der sich bei gängigen Standardsystemen (z.B. Falcon II, ALTM 3100, LMS-Q560 etc.) im Wellenlängenbereich von 1–1,5 µm befindet, durchdringt das Wasser nicht bis zum Watt, sondern wird in unterschiedlichen Anteilen an der Wasseroberfläche reflektiert (ZISSIS, 1993). Die aus diesen Entfernungsmessungen abgeleiteten Punkte entsprechen nicht der Geländeoberfläche<sup>1</sup>. Um jedoch ein DGM erstellen zu können, welches den Verlauf des trockenen Watts genau wiedergibt, müssen Wasserpunkte analog zu Vegetationspunkten auf dem Festland klassifiziert und entfernt werden.

Für die mit Wasser gefüllten Gebiete stehen nach der Klassifikation keine Stützpunkte aus der Laserscannerbefliegung zur Verfügung. Um trotzdem ein lückenloses DGM erstellen zu können, müssen diese Bereiche durch entsprechende Stützpunkte anderer Herkunft gefüllt werden. Dafür bieten sich flächenhaft aufgenommene hydrographische und terrestrische Vermessungen an. Jedoch beeinflussen die unterschiedlichen Genauigkeiten beider Verfahren sowie mögliche morphologische Veränderungen der beobachteten Wattfläche aufgrund des Zeitversatzes zwischen den Messungen die Qualität des aus den verschnittenen Rohdaten erzeugten DGM.

Eine Alternative zur Verwendung von Echolotmessungen stellt das so genannte bathymetrische Laserscanning dar, welches Pulse im Bereich des nahen Infrarots und zusätzlich im Bereich des sichtbaren Lichtes (z.B. Shoal-System – 1064 nm und 532 nm) aussendet. Während das infrarote Signal an der Wasseroberfläche reflektiert wird, durchdringt der Puls im Bereich des sichtbaren Lichts das Wasser bis zum Meeresboden (IRISH and LILLYCROP, 1999). Dadurch ist es möglich, die Topographie sowohl für trockene als auch überflutete Gebiete zu erfassen, wobei die Durchdringung des Wassers abhängig von der Trübung ist. Da das Wasser der Nordsee jedoch insbesondere im Bereich des Wattenmeeres einen hohen Sedimentanteil aufweist, können sehr häufig schon Bereiche mit einer Wassertiefe von einem Meter nicht mehr erfasst werden, weshalb dieses Verfahren keine Verwendung findet (AARUP, 2002).

In den Watten treten an morphologischen Objekten wie Prielen und Platen Strukturlinien<sup>2</sup> auf. Sofern diese linienförmigen Objekte in die Berechnung des DGM einfließen, kann die Genauigkeit des erzeugten DGM zusätzlich gesteigert werden. Jedoch werden aufgrund des Messprinzips nur Massenpunkte und keine speziell an morphologischen Objekten ausgerichteten Punkte bestimmt. Will man auf den Einsatz anderer aufwändiger Erfassungsmethoden verzichten, so müssen die Formlinien und Bruchkanten direkt aus den Laserrohdaten ermittelt werden.

In diesem Artikel wird ein neuer Arbeitsfluss zur Erstellung von hochgenauen DGM aus luftgestützten Laserscannerdaten präsentiert. Dabei wird für die enthaltenen Teilschritte

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> In dieser Arbeit wird dann von einem Digitalen Oberflächenmodell (DOM) gesprochen, wenn ein Höhenmodell aus Laserscannerdaten im Wattbereich berechnet wurde, welches Wasserflächen enthält.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Die Strukturlinie wird innerhalb dieses Artikels als Sammelbegriff für morphologisch bedeutsame Geländelinien verwendet. Diese untergliedern sich in Bruchkanten und Formlinien. Sie unterscheiden sich dahingehend, dass Bruchkanten quer zur Ausbreitungsrichtung nicht stetig differenzierbar sind, während Formlinien in derselben Richtung eine maximale Krümmung aufweisen.

94

– namentlich die Klassifikation der Wasserpunkte sowie die Strukturlinienextraktion – jeweils ein geeignetes Verfahren vorgestellt. Anhand ausgewählter Beispiele werden diese beschrieben, um die Eignung der Methoden zu unterstreichen.

# 2. Erzeugung konsistenter Digitaler Geländemodelle im Wattenmeer

Die Erstellung eines DGM ist die Hauptanwendung für luftgestützte Laserscannerdaten. Dabei umfasst der Prozess von der Aufnahme des Geländes bis zur Modellierung des DGM mehrere Arbeitsschritte. In der Praxis hat sich der Arbeitsablauf gemäß Abb. 1 durchgesetzt (KRAUS u. PFEIFER, 2001). Der Prozess ist auf die Ableitung eines DGM im Binnenbereich ausgerichtet. Aufgrund der speziellen Umweltbedingungen im Watt ist der Arbeitsablauf jedoch für diesen Bereich unzureichend geeignet.



Abb. 1: Klassischer Arbeitsablauf zur Ableitung eines DGM aus Laserscannerdaten

Die Hauptschwierigkeit im Wattenmeer stellen Wasserflächen in Prielen und Senken dar, die von dem Laserstrahl nicht durchdrungen werden können. Da die Wasserpunkte nicht zur gesuchten Geländeoberfläche gehören, müssen die Laserpunkte in die Klassen "Wasser" und "Watt" unterteilt werden. Im Gegenzug ist im Regelfall eine klassische Filterung der Daten in "Boden" und "Nichtboden" nicht notwendig, da der Wattbereich fast vollständig frei von Vegetation sowie künstlichen Anlagen ist. Anschließend werden Daten aus hydrographischen oder terrestrischen Vermessungen verwendet, um die entstandenen Lücken im Bereich der Wasserflächen zu füllen. Nachfolgend leitet man die Strukturlinien aus dem vereinigten Datensatz ab, welche dem anschließenden Modellierungsprozess zugeführt werden. Daraus ergibt sich der neue, angepasste Arbeitsablauf für die Modellierung von Laserscannerdaten in Wattgebieten (Abb. 2).



Abb. 2: Optimierter Arbeitsablauf zur Ableitung eines DGM aus Laserscannerdaten in Wattgebieten

## 2.1 Klassifikation von Wasserflächen

Um die Laserscannerpunkte in die Klassen "Wasser" und "Watt" einzuteilen, müssen aus den Daten Merkmale extrahiert werden, welche eine Unterscheidung ermöglichen. Die Merkmale müssen sich hinsichtlich ihrer Ausprägung bezüglich beider Klassen – physikalisch begründbar – signifikant voneinander unterscheiden. Durch die Analyse der Beziehung zwischen Wasser und Watt sowie der Interaktion des Laserstrahls mit den beiden Geländeoberflächen hat sich herausgestellt, dass die drei Merkmale Höhe H, Intensität I und 2D-Punktdichte P für die Klassifikation sehr gut verwendbar sind.

In dieser Arbeit beruht die Klassifikation auf der Analyse dieser drei genannten Merkmale, welche jeweils aus den Laserpunkten direkt bzw. indirekt gewonnen werden können, unter Verwendung eines aus der "Fuzzy-Control" entlehnten Konzeptes<sup>3</sup>. Jeder Flugstreifen wird dabei getrennt klassifiziert, um Höhensprünge innerhalb zusammenhängender Wasserflächen auszuschließen, die durch unterschiedliche Aufnahmezeitpunkte begründet sind. Die Klassifikation erfolgt entsprechend der Aufnahme für jeden einzelnen Massenpunkt. Dazu wird für jeden Punkt x der Gesamtzugehörigkeitsgrad zur Klasse "Wasser"  $\mu(H_x, I_x, P_x, \beta_x)$ aus den Zugehörigkeitsgraden je Merkmal  $\mu_i$  sowie einem zugeordneten Gewicht  $\delta_i$ , welches die Trennbarkeit der beiden Klassen für dieses Merkmal ausdrückt, durch gewichtete Mittelbildung bestimmt (Gleichung 1). Im Anschluss wird jeder Punkt anhand eines Schwellwertes klassifiziert. Alle notwendigen Klassifikationsparameter werden automatisch aus Trainingsgebieten abgeleitet. Der Klassifizierung folgen mehrere Kontroll- und Verbesserungsschritte, die als Plausibilisierung zusammengefasst sind. Das Ziel dieser Plausibilisierung ist eine innere Kontrolle des Ergebnisses, um Fehlklassifikationen zu lokalisieren und zu beseitigen (siehe Abb. 3).

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Der Algorithmus ist eine Weiterentwicklung eines vorläufigen Ansatzes von BRZANK und HEIPKE (2006).

$$\mu(H_{x}, I_{x}, P_{x}, \beta_{x}) = \frac{\left[\delta_{H} \mu_{H}(H_{x}) + \delta_{I}(\beta_{x}) \mu_{I}(I_{x}, \beta_{x}) + \delta_{P}(\beta_{x}) \mu_{P}(P_{x}, \beta_{x})\right]}{\left[\delta_{H} + \delta_{I}(\beta_{x}) + \delta_{P}(\beta_{x})\right]}$$
(1)

mit

$H_x, I_x, P_x, \beta_x$	Höhe, Intensität, 2D-Punktdichte und Inzidenzwinkel des Punktes x
$\delta_{H}, \delta_{I}(\beta_{x}), \delta_{P}(\beta_{x})$	Gewicht der Merkmale Höhe, Intensität und 2D-Punktdichte des Punktes x
$\mu_{\rm H}({\rm H}_{\rm x}), \mu_{\rm I}({\rm I}_{\rm x}, \beta_{\rm x}), \mu_{\rm P}({\rm P}_{\rm x}, \beta_{\rm x})$	Zugehörigkeitsgrad zur Klasse "Wasser" je Merkmal des Punktes x
$\mu(H_x, I_x, P_x, \beta_x)$	Gesamtzugehörigkeitsgrad zur Klasse "Wasser" des Punktes x
$\beta_x$	Inzidenzwinkel des einfallenden Laserpulses und der Flä- chennormalen bzgl. des Punkts x (siehe Abbildung 4 und Kapitel 2.1.3)



Abb. 3: Flussdiagramm des Algorithmus zur Klassifikation von Wasserflächen aus Laserscannerdaten

2.1.1 Klassifikationsmerkmale

Höhe: Die Höhe H gibt den senkrechten Abstand des jeweiligen Laserpunktes von der Bezugsfläche an. Der zugehörige Wert lässt sich direkt aus den Punktkoordinaten entnehmen. Das Wasser hat generell das Bestreben, einen Zustand geringst möglicher potentieller Energie E<sub>pot</sub> anzunehmen. Solange dieser Zustand nicht erreicht ist und das Wasser die Möglichkeit besitzt, die eigene potentielle Energie zu verringern, erfolgt ein Fließprozess. Ansonsten befindet es sich in Ruhe (bei Vernachlässigung anderer äußerer Kräfte wie z.B. Wind). Im Falle einer ruhigen, geschlossenen Wasserfläche weisen alle umliegenden Wattpunkte mindestens die gleiche, im Allgemeinen jedoch eine größere Höhe auf. Deshalb kann man prinzipiell davon ausgehen, dass mit steigender Höhe die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Wasser sinkt. Da die Fuzzy-Logik in der Klassifikation verwendet wird, sinkt mit steigender Höhe der Zugehörigkeitsgrad zur Klasse "Wasser" entsprechend.

Intensität: Die Intensität I ist eine physikalische Größe, welche der Leistung pro Fläche (KUCHLING, 2004) beziehungsweise pro Raumwinkel (JANZA, 1975) entspricht. Sie wird auch als Energiefluss bezeichnet. Für jeden Laserpunkt wird ein Intensitätswert aufgezeichnet, der angibt, wie stark das empfangene Echo für den jeweiligen Laserpuls ausgefallen ist. Im Allgemeinen geben die Laserscannerhersteller keine Auskunft, wie dieser Wert genau bestimmt wird (BRZANK, 2008). Generell ist er jedoch direkt proportional zur empfangenen Leistung  $P_E$ . Diese ist unter anderem abhängig vom Reflexionsgrad  $\rho$  der Geländeoberfläche. Mit steigendem Wassergehalt sinkt  $\rho$  und demzufolge auch  $P_E$  und I. Im Allgemeinen ist also der Intensitätswert im Wattbereich höher. Deshalb steigt mit sinkender Intensität der Zugehörigkeitsgrad zur Klasse "Wasser".

2D-Punktdichte: Die 2D-Punktdichte P ist ein Verhältnis, welches aus der Anzahl aller Punkte innerhalb eines vorgegebenen Polygons, das im Schwerpunkt des analysierten Punktes x gelagert ist, geteilt durch dessen Größe, gebildet wird. Es beschreibt die Vollständigkeit der in der direkten Nachbarschaft des Punktes x durchgeführten Messungen. Für die Bestimmung werden zusätzlich die benachbarten Laserscanzeilen herangezogen.

Die jeweilige Messung kann nur dann erfolgreich durchgeführt werden, wenn das empfangene Echo eine eindeutig vom Rauschen differenzierbare Leistung  $P_E$  aufweist. Da  $P_E$  mit steigendem Wassergehalt sinkt, verringert sich generell auch die Anzahl der erfolgreichen Messungen und nachfolgend die 2D-Punktdichte. Deshalb steigt mit sinkender 2D-Punktdichte der Zugehörigkeitsgrad zur Klasse "Wasser". Im Allgemeinen sind die 2D-Punktdichte und die Intensität positiv korreliert, da mit Abnahme der Signalstärke die Echodetektion schwieriger wird.

#### 2.1.2 Gewichtung der Merkmale

Hinsichtlich der Interaktion des Wassers mit der Geländeoberfläche sowie der physikalischen Beschreibung des Messvorgangs besteht für jedes verwendete Merkmal theoretisch ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der jeweiligen Ausprägung zwischen der Klasse "Wasser" und "Watt". Bei der Analyse realer Daten zeigt sich jedoch häufig, dass sich die Merkmalswerte kaum oder gar nicht signifikant voneinander unterscheiden. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, besitzt jedes Merkmal i ein eigenes Gewicht  $\delta_i$ , welches ausdrückt, wie gut sich die Punkte anhand des zugehörigen Merkmals unterscheiden lassen. Das Gewicht kann den Wertebereich von 0 bis 1 annehmen, wobei ein steigendes Gewicht eine höhere Trennbarkeit bedeutet.

## 2.1.3 Kalibrierung der Intensität und 2D-Punktdichte

Wie in Kap. 2.1.1 ausgeführt, ist die gemessene Intensität I abhängig von verschiedenen Einflussfaktoren. Aufgrund der Korrelation zwischen Intensität und 2D-Punktdichte besteht zudem ein Zusammenhang zwischen diesen Faktoren und der 2D-Punktdichte. Um die Merkmale in der Klassifikation zu verwenden, müssen sie entweder vorher kalibriert oder die systematischen Verzerrungen innerhalb des Algorithmus berücksichtigt werden. Die Kalibrierung ist jedoch nur für klassenunabhängige Einflussfaktoren wie die Entfernung R möglich. Das Reflexionsverhalten ist aber für die Klassen "Watt" und "Wasser" unterschiedlich. Für diese Kalibrierung wird somit ein Modell der Reflexion der jeweils beleuchteten Oberfläche benötigt. Dieses kann theoretisch aus den Trainingsgebieten durch empirische Modellfunktionen in Abhängigkeit vom Inzidenzwinkel β (siehe Abb. 4) ermittelt werden. Praktisch ist diese Methode aber nicht verwendbar, da für die Kalibrierung die Klassenzugehörigkeit des jeweiligen Punktes bekannt sein muss. Diese Zugehörigkeit stellt aber das eigentliche Ziel der Klassifikation dar und ist somit vorher nicht verfügbar.

Deshalb wird die systematische Verzerrung der Intensität und der 2D-Punktdichte, die insbesondere auf die gerichtete Reflexion der Watt- und Wasserflächen zurückzuführen ist, innerhalb der Klassifikation berücksichtigt. Die Änderung der Merkmalswerte kann für die Klassen "Wasser" sowie "Watt" generell unterschiedlich stark erfolgen. Das heißt, dass die Trennbarkeit der beiden Klassen für die Merkmale Intensität sowie 2D-Punktdichte abhängig von  $\beta$  ist. Da die Gewichte  $\delta_{I}(\beta)$  und  $\delta_{p}(\beta)$  diese Trennbarkeit widerspiegeln, sind sie ebenfalls von  $\beta$  abhängig.

Um den Inzidenzwinkel für den jeweiligen Punkt zu bestimmen, muss aus der aktuellen Position der Flugplattform und den Punktkoordinaten die Abstrahlrichtung bestimmt werden. Der Inzidenzwinkel entspricht dem Winkel zwischen der Abstrahlrichtung und der Flächennormale des Punktes. Die Bestimmung der Flächennormalen ist in der Regel aufwändig sowie rauschanfällig, da aus den umliegenden Punkten die Geländeoberfläche modelliert werden muss. Geht man vereinfachend davon aus, dass die Oberfläche horizontal verläuft, so stimmt  $\beta$  mit dem Abstrahlwinkel  $\alpha$  überein, der dem eingeschlossenen Winkel aus Nadir und Abstrahlrichtung entspricht (siehe Abb. 4).



Abb. 4: Abstrahlwinkel  $\alpha$  (links), Inzidenzwinkel  $\beta$  (rechts)

## 2.1.4 Automatische Ableitung der Klassifikationsparameter aus den Trainingsgebieten

Für die Durchführung der Klassifikation werden mehrere Parameter benötigt, die automatisch aus den Trainingsgebieten abgleitet werden. Diese sind in Tab. 1 aufgeführt:

Klassifikationsparameter	Funktion
konstante Höhenschwellwerte $T_{H\_low}$ und $T_{H\_high}$	Transformation des jeweiligen Höhenwerts in einen unscharfen Zugehörigkeitsgrad zur Klasse "Wasser"
je zwei variable Intensitäts- sowie 2D-Punktdichteschwellwerte $T_{I\_low}(\beta)$ , $T_{I\_high}(\beta)$ , $T_{P\_low}(\beta)$ und $T_{P\_high}(\beta)$	Transformation des jeweiligen Intensitäts- bzw. 2D-Punktdichteschwellwerts in einen unscharfen Zugehörigkeitsgrad zur Klasse "Wasser"
konstantes Gewicht des Merkmals Höhe δ <sub>H</sub>	Beschreibt, wie gut sich die Klassen anhand des Merkmals Höhe unterscheiden lassen
variables Gewicht für die Merkmale Intensität $\delta_I(\beta)$ und 2D-Punktdichte $\delta_p(\beta)$	Beschreibt, wie gut sich die Klassen anhand des Merkmals Intensität bzw. 2D-Punktdichte unter- scheiden lassen
Wasserschwellwert $T_{Wasser}$	Klassifikation des jeweiligen Punktes anhand seines Gesamtzugehörigkeitsgrades zur Klasse "Wasser"

Tab. 1: Klassifikationsparameter und ihre Funktion

Die Schwellwerte  $T_{H_{low}}$ ,  $T_{H_{high}}$ ,  $T_{I_{low}}(\beta)$ ,  $T_{I_{high}}(\beta)$ ,  $T_{P_{low}}(\beta)$  und  $T_{P_{high}}(\beta)$  teilen den Definitionsbereich jeweils in drei Regionen. Unterhalb des unteren bzw. oberhalb des oberen Schwellwertes liegt der Zugehörigkeitsgrad entweder bei 0 oder bei 1. Dies ist abhängig von der Korrelation zwischen dem jeweiligen Merkmal und dem Auftreten von Wasser. Der Zwischenbereich beschreibt die Zone des Übergangs von Wasser zu Watt. Als Zugehörigkeitsfunktion kann prinzipiell jede Funktion verwendet werden, die diesen Übergang hinreichend genau beschreibt. Der hier verwendete Algorithmus nutzt ausschließlich lineare Funktionen. Deren Parameter ergeben sich durch das Festlegen der Schwellwerte je Merkmal.

Zu Beginn werden die Laserpunkte innerhalb der definierten Trainingsgebiete ermittelt. Dazu bestimmt man für alle Punkte die jeweiligen Werte der Merkmale sowie den zugehörigen Inzidenzwinkel. Für die Berechnung der Klassifikationsparameter werden der Mittelwert und die Standardabweichung je Merkmal und Klasse benötigt. Diese können aus den Merkmalswerten bestimmt werden. Dabei ist zu beachten, dass der Mittelwert je Klasse für die Höhe konstant, für die Intensität sowie die 2D-Punktdichte jedoch abhängig vom Inzidenzwinkel ist. Diese Abhängigkeit kann mit Hilfe einer Funktion  $f(\beta)$  ausgedrückt werden, die gegebenenfalls weitere Einflussparameter berücksichtigt. Dabei ist prinzipiell jede Funktion geeignet, die – möglichst physikalisch begründbar – diese Beziehung modellieren kann und wenig Parameter besitzt. Da für die Klassen "Wasser" und "Watt" jeweils keine theoretische Beschreibung des Reflexionsverhaltens vorliegt, wurde eine Funktion mit vier Parametern (Gleichung 2) empirisch gewählt, die z.B. von KRAUS und PFEIFER (1998) als Gewichtsfunktion bei der linearen Prädiktion mit robuster Filterung verwendet wurde. Sie zeichnet sich durch eine geringe Parameteranzahl und ein monoton sinkendes Verhalten bei wachsendem  $\beta$  aus. Durch vermittelnde Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate werden anschließend die Parameter der Funktion aus den Wertepaaren (Inzidenzwinkel, Merkmalswert) berechnet.

$$f(\beta) = \frac{c}{\left(1 + (a\beta)^{b}\right)} + d$$
<sup>(2)</sup>

mit:

- a Halbwertsbreite
- Neigung an der Halbwertsbreite b
- Maßstabsfaktor in z-Richtung с
- Verschiebung in z-Richtung d

Der Mittelwert des jeweiligen Merkmals pro Klasse entspricht dem Wert aus der ausgleichenden Funktion durch Einsetzen des zugehörigen Inzidenzwinkels. Die Verbesserungen einer ausgleichenden Funktion werden verwendet, um die jeweils zugehörige Standardabweichung zu bestimmen (siehe Abb. 5).



Abb. 5: Ausgleichende Funktionen des Merkmals Intensität mit Standardabweichung der Verbesserungen für die Klassen "Wasser" und "Watt"

Die Schwellwerte entsprechen dem jeweiligen Mittelwert der Merkmale für die einzelnen Klassen. So ist  $\mathrm{T}_{\mathrm{H_{low}}}$ gleich der mittleren Höhe des Trainingsgebietes der Klasse "Wasser" und T<sub>H\_high</sub> identisch zum Mittelwert der Höhe der Klasse "Watt". Die Schwellwerte  $T_{I_{low}}(\beta), T_{I_{lhigh}}(\beta), T_{P_{low}}(\beta) \text{ und } T_{P_{lhigh}}(\beta) \text{ sind abhängig von } \beta.$  Durch Einsetzen in die jeweils zugehörige ausgleichende Funktion werden die Schwellwerte ermittelt.

Die Gewichte  $\delta_{H}$ ,  $\delta_{I}(\beta_{x})$  und  $\delta_{P}(\beta_{x})$  drücken die Trennbarkeit der beiden Klassen für das jeweilige Merkmal aus. Diese Trennbarkeit zwischen Wasser und Watt kann durch die Analyse der zugehörigen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen je Merkmal ermittelt werden. Dabei geht man von folgender Annahme aus: Je stärker sich beide Verteilungen überlappen, umso weniger ist dieses Merkmal für die Klassifizierung geeignet, da die Trennbarkeit abnimmt. Folglich muss das daraus abgeleitete Gewicht sinken.

Als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion wird die Gauss-Verteilung angesetzt. Im Folgenden wird das Signifikanzniveau für die Annahme bestimmt, dass die beiden Verteilungen voneinander verschieden sind (also  $\mu_{i_Wasser} \neq \mu_{i_Watt}$ ). Dazu führt man einen t-Test durch (NIEMEIER, 2002). Die Testgröße t<sub>f</sub> ergibt sich zu:

$$t_{f} = \frac{\overline{x}_{Watt} - \overline{x}_{Wasser}}{\sqrt{s_{Watt}^{2} + s_{Wasser}^{2}}} = \frac{d}{s_{d}}$$
(3)

mit:

X W att Mittelwert des jeweiligen Merkmals der Punkte im Trainingsgebiet der Klasse "Watt"

- x Wasser Mittelwert des jeweiligen Merkmals der Punkte im Trainingsgebiet der Klasse "Wasser"
- *s* <sub>w att</sub> Standardabweichung des jeweiligen Merkmals der Punkte im Trainingsgebiet der Klasse "Watt"
- *s* <sub>wasser</sub> Standardabweichung des jeweiligen Merkmals der Punkte im Trainingsgebiet der Klasse "Wasser"

Aus der Standardnormalverteilungsfunktion F(x) wird anschließend das zugehörige Quantil (Freiheitsgrade f, Signifikanzniveau  $\gamma^4$ ) bestimmt, welches mit der Testgröße identisch ist. Aus dem Signifikanzniveau  $\gamma$  wird das Gewicht abgeleitet. Dabei gilt folgende Festlegung: Beträgt das Signifikanzniveau der Trennbarkeit 0,5 oder weniger, so ist eine Unterscheidung nicht möglich. Das Gewicht ist folglich 0. Beträgt  $\gamma$  mehr als 0,5, so kann zwischen beiden Verteilungen unterschieden werden. Mit steigendem Signifikanzniveau wächst auch das Gewicht. Bei einem  $\gamma$  von 1 beträgt das Gewicht 1. Die Berechnung des Gewichtes im Bereich von 0,5 bis 1 erfolgt durch lineare Interpolation.

Für das Merkmal Höhe werden die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (Abb. 6) aus Mittelwert und Standardabweichung der Höhen im Trainingsgebiet "Wasser" bzw. "Watt" gebildet. Die Parameter für die Größen Intensität und 2D-Punktdichte ergeben sich aus der jeweils zugehörigen ausgleichenden Funktion (siehe Gleichung 2).



Abb. 6: Ableitung des Gewichtes anhand des Signifikanzniveaus der Trennbarkeit beider Verteilungen

Nachdem die Gewichte ermittelt sind, kann für jeden Punkt der Gesamtzugehörigkeitsgrad bestimmt werden. Aus der Summe aller Punkte der Trainingsgebiete "Watt" bzw. "Wasser" berechnet man nachfolgend den zugehörigen Mittelwert sowie die Standardabweichung. Daraus können – unter der Annahme des Vorliegens der Normalverteilung – die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des Gesamtzugehörigkeitsgrades der Klassen "Wasser" und "Watt" gebildet werden. Der Wasserschwellwert entspricht dem Zugehörigkeitsgrad, für den die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Wasser und Watt identisch ist. Der Schnittpunkt beider Verteilungen markiert diesen Punkt (siehe Abb. 7).

 $<sup>^4</sup>$  Das Signifikanzniveau  $\gamma$  ergibt sich durch Subtraktion der Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  von dem Wert 1.



Abb. 7: Ableitung des Klassifizierungsschwellwertes aus den Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des Gesamtzugehörigkeitsgrades

Bemerkung: Generell kann ein Zugehörigkeitsgrad nur im Bereich von 0 bis 1 liegen. Deshalb werden die Schwellwerte  $T_{H_{Llow}}, T_{H_{Llow}}, T_{I_{Llow}}(\beta), T_{I_{Lhigh}}(\beta), T_{P_{low}}(\beta)$  und  $T_{P_{Lhigh}}(\beta)$  ermittelt, um die jeweilige Zugehörigkeitsfunktion zu begrenzen. Alle Punkte mit einem Merkmalswert außerhalb dieses Bereiches erhalten im Falle der Klassifikation je nach Lage einen Zugehörigkeitsgrad von 0 oder 1. Im Rahmen der Bestimmung der Klassifikationsparameter jedoch wird die Zugehörigkeitsfunktion nicht durch die beiden korrespondierenden Schwellwerte begrenzt. Somit ergeben sich außerhalb dieses Bereiches Zugehörigkeitsgrade größer 1 bzw. kleiner 0. Dies ist notwendig, um Mittelwert und Standardabweichung der beiden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen des Gesamtzugehörigkeitsgrades korrekt zu bestimmen.

#### 2.1.5 Verwendung mehrerer Trainingsets

Je nach Größe des Untersuchungsgebietes kann die Länge eines Flugstreifens mehrere Kilometer betragen. Dabei können sich die Ausprägungen der Merkmale Höhe, Intensität sowie 2D-Punktdichte aufgrund der Variabilität des Wasserstandes, der chemischen Zusammensetzung des Watts, der Einflüsse äußerer Kräfte (z.B. Wind) ändern. Somit sinkt mit steigendem Abstand der zu klassifizierenden Punkte von den Trainingsgebieten deren Repräsentativität für beide Klassen, wodurch sich ebenfalls die Klassifikationsgüte verschlechtert. Deshalb besteht die Möglichkeit, mehrere so genannte Trainingsets über den Flugstreifen zu verteilen. Jedes Trainingset besteht jeweils aus mindestens einem Trainingsgebiet pro Klasse und ist repräsentativ für die nähere Umgebung.

Prinzipiell ergeben sich verschiedene mögliche Varianten der Verkettung, wobei zwei Ansätze favorisiert werden. Im ersten Fall verwendet man nur das jeweils am dichtesten gelegene Trainingset für die Klassifizierung. Nach Bestimmung der Klassifikationsparameter für alle definierten Trainingsets ermittelt man für jede Laserzeile das jeweils nächste Trainingset und nutzt dieses für die Klassifikation. Im zweiten Fall verwendet man jeweils die beiden dichtesten Trainingsets, sofern die aktuelle Zeile zwischen diesen liegt. Dabei wird die Zeile jeweils mit beiden Sets klassifiziert. Dadurch erhält man für jeden Punkt zwei Zugehörigkeitsgrade zur Klasse "Wasser". Diese werden nun mit Hilfe des jeweiligen Abstandes zu ihren Trainingsets gewichtet gemittelt. Analog erfolgt die Ableitung des Klassifizierungsschwellwertes. Im Folgenden kann jeder Punkt der Zeile mit Hilfe des abstandsgewichteten Schwellwertes klassifiziert werden. Für den Anfangs- sowie Endbereich des Flugstreifens wird nur je ein Set verwendet.

#### 2.1.6 Plausibilisierung

Als Ergebnis der Klassifizierung liegt für jeden Punkt eine Entscheidung hinsichtlich der Klassenzugehörigkeit vor. In der Regel ist die Zuordnung (z.B. abhängig von der Auswahl der Trainingsgebiete sowie Rauschen in den Daten) jedoch nicht zu 100 % richtig. Um möglichst viele Fehlklassifizierungen aufzudecken und zu korrigieren, wurden mehrere Arbeitsschritte unter dem Oberbegriff "Plausibilisierung" zusammengefasst.

Zuerst wird in jeder Scanzeile überprüft, ob ein Klassenwechsel auftritt. Werden ein oder mehrere Wechsel festgestellt, so wird überprüft, ob der jeweilige Wasserpunkt eine geringere Höhe aufweist als der benachbarte Wattpunkt. Ist dies nicht der Fall, tritt ein Klassifizierungswiderspruch auf. Dann werden die jeweiligen Gesamtzugehörigkeitsgrade zur Klasse "Wasser" beider Punkte gemittelt und eine einheitliche Klassifikation für beide Punkte anhand des Mittelwertes durchgeführt. Das gleiche Prinzip wird ebenfalls für Profile in Flugrichtung angewendet. Im Gegensatz zu der jeweiligen Laserscanzeile liegen aber a priori keine Profile in Flugachsenrichtung vor. Diese müssen erst gebildet werden.

Da es sich bei dem vorgeschlagenen Algorithmus um eine Einzelpunktklassifizierung handelt, treten besonders an Klassengrenzen sowie in schwierig zu klassifizierenden Bereichen wie bei Wellen oder stark durchfeuchteten Wattflächen vermehrt kleinräumige Wechsel der Zuordnung auf. Um ein homogenes Ergebnis zu erhalten, werden deshalb abschließend hochfrequente Klassenwechsel durch eine Tiefpassfilterung unterdrückt.

## 2.2 Extraktion von Strukturlinien

Der im Rahmen der Arbeit vorgestellte Algorithmus zur Extraktion von Strukturlinien basiert auf einer Weiterentwicklung der Flächenrekonstruktionsansätze von BRZANK (2001) und BRIESE (2004). Die Methode geht von der Annahme aus, dass Strukturlinien in den Watten immer paarweise vorkommen. So treten an Prielen, Vorlandgräben und Dünen je Seite jeweils eine Böschungsober- und eine Böschungsunterkante auf.

Die Geländeoberfläche wird in der Umgebung paarweise auftretender Strukturlinien durch die Tangens hyperbolicus Funktion stückweise rekonstruiert. Je nach Verlauf des Linienpaares wird entweder eine geradlinige oder eine kreisförmige Realisierung verwendet. Aus den Parametern der jeweiligen Funktion können anschließend für jede Recheneinheit je ein Punkt auf jeder Linie entnommen werden. Durch eine Splineinterpolation verknüpft man anschließend die Punkte zu vollständigen Linien. Der Algorithmus benötigt eine 2D-Näherung der Mittelachse zwischen den zugehörigen Strukturlinien, die durch Anwendung von aus der Bildverarbeitung bekannten Kantenoperatoren gewonnen wird (siehe Abb. 8).


Abb. 8: Flussdiagramm des Algorithmus zur Extraktion von Strukturlinien

# 2.2.1 1D-tanh-Funktion und Ableitung der Strukturlinienpunkte

Im Wattbereich treten die Strukturlinien wie bereits erwähnt generell paarweise auf. Das Profil einer Grabenseite lässt sich im Allgemeinen hinreichend genau durch eine Tangens hyperbolicus Funktion<sup>5</sup> approximieren (Gl. 4 und Abb. 9).

$$z(v) = s \tanh(f(v+p)) + k$$
(4)

mit:

S	Skalierungsfaktor - entspricht dem zweifachen Höhenunterschied zwischen dem
	oberen und dem unteren Plateau
f	bestimmt den Abstand der Krümmungsmaxima im Grundriss – je größer der Wert
	umso geringer der Abstand
р	Verschiebung der tanh-Funktion in horizontaler Richtung (quer zur Bruchkanten-
	richtung)
k	Verschiebung der tanh-Funktion in vertikaler Richtung

 $<sup>^5</sup>$  NALWA und BINFORD (1986) nutzten diese Funktion, um in digitalen Bildern lineare Kantenstrukturen zu detektieren.



Abb. 9: 1D-Tangens hyperbolicus Funktion (Die Strukturlinien laufen senkrecht zur tanh-Funktion aus der Darstellungsebene heraus)

Sofern die vier Parameter der Funktion bekannt sind, kann je ein Strukturlinienpunkt für jede Linie ermittelt werden. Der Nutzer muss dafür a priori ein Kantenmodell vorgeben. Zur Auswahl stehen: Formlinienpaar, Rampenkante und Stufenkante (Abb. 10 links, mitte, rechts). Das Formlinienpaar entspricht zwei korrespondierenden Formlinien, die durch Bestimmung der Krümmungsmaxima ermittelt werden. Die Krümmung eines Wertes z(v) ergibt sich aus der Gleichung 5.

$$\kappa(v) = \left| \frac{z''(v)}{\left(1 + z'(v)^2\right)^{3/2}} \right|$$
(5)

Die Rampenkante wird durch die Konstruktion dreier Geraden gebildet. Dazu werden horizontale Linien durch die Plateaus h<sub>u</sub> sowie h<sub>o</sub> gelegt und mit einer Geraden durch den Wendepunkt mit dem Anstieg der Tangens hyperbolicus Funktion in diesem Punkt geschnitten. Sofern die Stufenkante angesetzt wird, schneidet man die beiden Plateaus mit einer senkrechten Linie durch den Wendepunkt.



Abb. 10: Ableitung der Strukturlinienpunkte: Formlinienpaar (links), Rampenkante (mitte), Stufenkante (rechts)

# 2.2.2 2D-Flächentypen der tanh-Funktion

Im Kap. 2.2.1 wurde die Ableitung von Strukturlinienpunkten in Abhängigkeit vom angesetzten Kantenmodell nur eindimensional betrachtet. Da jedoch nicht nur Punkte, sondern Linien extrahiert werden sollen, muss das Modell um eine Dimension erweitert werden. Diesbezüglich sind die Richtung des Linienpaares sowie ihre Richtungsänderung zu berücksichtigen. Dabei sollen identische 1D-tanh-Profile entsprechend der Ausbreitungsrichtung aneinander gereiht werden. 106

Der Ansatz stützt sich auf zwei 2D-Flächentypen, wobei sowohl gerade als auch gekrümmte Linienstücke approximiert werden können. Die Basisversion (Abb. 11) ist geeignet, um gerade Strukturen zu rekonstruieren. Sie besitzt sechs Parameter (Gleichungen 6a–c). Neben den vier Parametern s, f, k und p sind zusätzlich der Verdrehungswinkel  $\alpha$  sowie der Anstiegsfaktor t integriert.  $\alpha$  entspricht der Verdrehung zwischen dem übergeordneten (x, y)-Koordinatensystem KS (x, y) sowie dem strukturlinienbezogenen (u, v)-Koordinatensystem KS (u, v). Der Parameter t modelliert einen linearen Anstieg der Höhe in Ausbreitungsrichtung. Die aneinander gereihten Profile setzen sich in eine feste Azimutrichtung fort. Aufeinanderfolgende Strukturpunkte einer Linie bilden dabei eine Gerade.



Abb. 11: Tangens hyperbolicus Funktion (2D-Basis)

$$z(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \operatorname{s} \tanh\left(\operatorname{f}\left(\operatorname{v} + \operatorname{p}\right)\right) + \operatorname{k} + \operatorname{tu}$$
(6a)

$$u = \cos(\alpha) x + \sin(\alpha) y$$
(6b)

$$v = -\sin(\alpha) x + \cos(\alpha) y$$
(6c)

mit:

α Verdrehungswinkel zwischen dem Referenz-KS (x, y) und dem lokalen KS (u, v)
 t Anstiegsfaktor der Kante in Strukturlinienrichtung

Der zweite Flächentyp (Abb. 12) ist geeignet, um einen im Grundriss gekrümmten Verlauf der Strukturlinien zu approximieren. Die 1D-Profile setzen sich dabei nicht linear sondern kreisförmig fort. Die abgeleiteten Strukturlinienlösungen für jede einzelne Recheneinheit entsprechen den Teilstücken zweier konzentrischer Kreise.



Abb. 12: Tangens hyperbolicus Funktion (2D-Kreis)

Die Kreis-Variante besitzt sieben Parameter (Gl. 7a–c). Analog zur Basisversion bleiben die Parameter s, f, k und t bestehen. Hinzu kommen die Variabeln  $u_{shift}$ ,  $v_{shift}$  sowie der Radius. Die Parameter  $u_{shift}$  und  $v_{shift}$  markieren den Mittelpunkt des Kreises im (u,v)-Koordinatensystem. Der Radius bestimmt die Stärke der Richtungsänderung, welche die beiden Strukturlinien erfahren. Die Variable  $\alpha$  ist im Gegensatz zur Basisversion keine Unbekannte. Sie ergibt sich aus den Punkten innerhalb der jeweiligen Recheneinheit (siehe Kap. 2.2.6). Der Parameter p entfällt.

$$z(u,v) = s \tanh[f(\sqrt{(u-u_{shift})^2 + (v-v_{shift})^2} - Radius)] + k + a\cos\left[\frac{u-u_{shift}}{\sqrt{(u-u_{shift})^2 + (v-v_{shift})^2}}\right]t$$
(7a)

$$u = \cos(\alpha) x + \sin(\alpha) y$$
(7b)

 $v = \sin(\alpha) x + \cos(\alpha) y$ (7c)

#### 2.2.3 Ableitung der Näherungslösung

Um die Parameter der jeweiligen Flächenfunktion zu bestimmen, wird prinzipiell eine 2D-Approximation beider zusammengehörender Strukturlinien benötigt. Zum einen können so die Näherungswerte der gesuchten Parameter bestimmt werden, die Voraussetzung für die durchzuführende Ausgleichung einer nicht linearen Flächenfunktion nach der Methode der kleinsten Quadrate sind. Zum anderen müssen zur Berechnung der Unbekannten die verwendeten Laserpunkte auf eine definierte Strukturlinienumgebung begrenzt werden (siehe Kap. 2.2.4).

Die Approximationen liegen im Allgemeinen a priori nicht vor, sondern müssen aus den Laserdaten abgeleitet werden. Dafür verwendet man gewöhnlich Operatoren der Bildverarbeitung. Die Bestimmung der Näherungen gestaltet sich jedoch häufig schwierig, wenn Operatoren der zweiten Ableitung eingesetzt werden. Aufgrund der höheren Rauschanfälligkeit sinken Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Extraktion. Größere Schwierigkeiten bereitet zusätzlich die Verknüpfung korrespondierender Strukturlinien zu einem Paar. Die Bestimmung scheitert gänzlich, wenn der Abstand des Strukturlinienpaares (z.B. bei schmalen Prielen) im Vergleich zur Fensterbreite des Operators sehr klein ist.

Grundsätzlich lassen sich die Näherungswerte aller Parameter mit Ausnahme von f<sup>6</sup> auch aus der Mittellinie zwischen beiden zusammenhängenden Strukturlinien ableiten. Diese Linie entspricht der Verbindung aller Punkte, die in den 1D-Profilen maximale Neigung aufweisen, und kann durch Kantenoperatoren der 1. Ableitung bestimmt werden. Diese Näherung lässt sich genauer und zuverlässiger ermitteln. Zudem entfällt die Verknüpfung korrespondierender Strukturlinien.

Deshalb werden für diesen Ansatz die Mittellinien verwendet. Durch den Einsatz von Standardkantenoperatoren der 1. Ableitung (z.B. Canny) wird ein Kantenbild erzeugt. Anschließend erfolgt eine Ausdünnung möglicher Kantenpunkte durch eine Non-Maxima-Unterdrückung. Nachfolgend werden durch die Methode Hysteresis Threshold im Kantenbild Pixelketten gebildet, die der Mittelachsennäherung entsprechen.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Das Verfahren zur Ableitung des Parameters f anhand der Mittellinie sowie der umgebenden Punkte wird in BRZANK (2008) beschrieben.

#### 2.2.4 Bestimmung der Umringgrenzen

Berechnet man Flächenfunktionen aus gemessenen Stützpunkten, so dürfen nur die Punkte verwendet werden, die in der direkten Umgebung der gesuchten Strukturlinien liegen. Je weiter ein Punkt von der Mittelachse entfernt ist, umso wahrscheinlicher ist es, dass dieser Punkt nicht mit der verwendeten Flächenfunktion harmoniert.

Es bestehen mehrere Möglichkeiten zur Bestimmung der Umringgrenzen. So können sie anhand des unterlegten DGM manuell digitalisiert werden. Auf diese Weise ist eine sinnvolle Begrenzung in Abhängigkeit der näheren Umgebung gegeben. Leider ist die manuelle Erfassung zeitaufwändig und auf die Dauer unbefriedigend. Die Umringgrenzen können ebenfalls automatisch generiert werden. Dazu wird ein Korridor um die jeweilige Mittelachse mit einer fixen Breite gebildet. Diese Variante ist schnell, kann jedoch bei bestimmten Situationen (sich stark ändernde Grabenbreite, weitere Strukturlinienpaare in unmittelbarer Umgebung) zu fehlerhaften Umringen führen. Deshalb ist eine visuelle Kontrolle des Polygons durch einen menschlichen Operateur sinnvoll.

# 2.2.5 Festlegung und Kontrolle der Recheneinheiten

Der Nutzer definiert die Länge einer Recheneinheit sowie die Überlappungsrate. Da die Gesamtlänge der Näherungslösung bekannt ist, können die eingegebenen Parameter so (geringfügig) modifiziert werden, dass der Anfang der ersten Recheneinheit mit dem Startpunkt und das Ende der letzten Recheneinheit mit dem Endpunkt der Mittelachse übereinstimmen. Nun können jeder Recheneinheit die jeweiligen Laserpunkte hinzugefügt werden.

Anschließend wird für jedes Teilstück die geeignete Flächenfunktion ausgewählt. Dazu untersucht man den Verlauf der Mittelachse in der Recheneinheit. Sofern die Mittelachse keine Richtungsänderung erfährt, wird die Basisversion verwendet. Ändert die Mittelachse jedoch ihre Richtung stärker als ein vorgegebener Schwellwert, so wird die Kreisversion herangezogen. Treten innerhalb einer Recheneinheit sowohl positive als auch negative Richtungsänderungen auf, so wird die Berechnung der Recheneinheit nicht durchgeführt, wenn die Änderungen jeweils größer als der Schwellwert sind. Andernfalls wird die Summe aus allen Richtungsänderungen gebildet und diese mit dem Schwellwert verglichen. Nachfolgend wird kontrolliert, ob jede Recheneinheit genügend Punkte für eine Berechnung beinhaltet und wie diese verteilt sind. Dazu gibt der Nutzer die Mindestanzahl an Punkten je Seite bezüglich der Mittelachse vor. Nur wenn die Punktanzahl je Recheneinheit ausreichend hoch ist und für beide Seiten – insbesondere in den Bereichen außerhalb beider Strukturlinien – genügend Punkte vorhanden sind, werden für die Recheneinheit die Parameter bestimmt.

# 2.2.6 Berechnung der Startwerte, Ausgleichung und Ableitung der Strukturlinienpunkte

Nachdem die Recheneinheiten festgelegt und kontrolliert sind, müssen die Startwerte für die Unbekannten bestimmt werden. Die Startwerte werden benötigt, um die Beobachtungsgleichungen zu linearisieren. Je nach ausgewähltem Flächentyp unterscheidet sich der Berechnungsvorgang. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in BRZANK (2008).

Für jede Recheneinheit werden innerhalb einer vermittelnden Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate die gesuchten Parameter bestimmt. Weiterhin können zusätzliche Pseudobeobachtungen eingeführt werden, um die Ausgleichung zu stützen. Sie beziehen sich jeweils auf einen ermittelten Startwert.

Nachfolgend werden die ermittelten Parameter s und f der Recheneinheiten plausibilisiert. Sofern Vorwissen über den minimalen und maximalen Abstand der gesuchten Strukturlinien bekannt ist, können unter Angabe des Strukturlinientyps die berechneten Lösungen der Recheneinheiten auf Einhaltung dieser Forderung kontrolliert werden. Gleiches gilt für den minimalen und maximalen Höhenunterschied zwischen den Linien. Im Zuge dieser Kontrolle der Ergebnisse werden unplausible Lösungen entfernt. Anschließend werden die Strukturlinien berechnet. Dazu wird in jeder Recheneinheit eine Ebene definiert. Diese verläuft durch den Schwerpunkt der Laserpunkte im Teilstück und steht senkrecht auf den beiden Lösungsgeraden (Basisversion) bzw. den konzentrischen Kreisen (Kreisversion). Auf diese Weise erhält man je einen Punkt der Böschungsoberkante und Böschungsunterkante. In der ersten und letzten Recheneinheit werden die beiden Geraden/Kreise zusätzlich noch mit einer senkrechten Ebene durch den Startpunkt beziehungsweise Endpunkt der Mittelachse geschnitten. Durch eine Besselsplineinterpolation (siehe KRAUS, 2000) können nachfolgend alle Punkte beider Strukturlinien zu geschlossenen Linienzügen verknüpft werden.

# 3. Praktische Tests

# 3.1 Klassifikation der Wasserflächen

Das hier dargestellte Beispiel umfasst eine Wattfläche im Bereich der Außenelbe, die im Rahmen der Befliegung "Friedrichskoog 2005" mit einem Scanner vom Typ Falcon II erfasst wurde. Es enthält drei große Wasserflächen. Am nördlichen und südlichen Ende befindet sich jeweils eine weitläufige Senke. Zudem verläuft im mittleren Bereich ein Priel, der in die südliche Senke mündet (siehe Abb. 13 links). Der aufgenommene Bereich hat eine Länge von 3.300 m sowie eine Breite von 310 m (siehe Abb. 13 rechts) und enthält 3.334.785 Punkte. Deutlich lässt sich das Abfallen der Intensitätswerte von der Streifenmitte zu den Randbe-



Abb. 13: Orthophoto der Befliegung "Friedrichskoog 2005" mit der Begrenzung des prozessierten Flugstreifens (weiß) sowie der festgelegten Trainingsets A, B und C: Wasser – hellblau, Watt – rot (links); zu klassifizierende Punktwolke intensitätscodiert: hell – geringe Intensität, dunkel – hohe Intensität (rechts)

reichen auch bei gleich bleibender Klassenzugehörigkeit erkennen. Ferner offenbart sich, dass sich die Intensitätswerte beider Klassen in der Nähe der Mittelachse unterscheiden, im Randbereich aber nahezu identisch sind. Innerhalb der Wasserflächen sind keine Punktlücken festzustellen. Das Scanmuster ist wie im Wattbereich vollständig besetzt.

Da das Beispiel für die Befliegung "Friedrichskoog 2005" drei voneinander unabhängige Wasserbereiche enthält, wurde für jedes ein eigenes Trainingset festgelegt (siehe Abb. 13 links). Ihre Auswertung ergab, dass die signifikante Unterscheidbarkeit zwischen beiden Klassen anhand der Intensität mit steigendem Auslenkwinkel sinkt (siehe Abb. 14 links). Während in der Streifenmitte eine hohe Trennbarkeit über alle Trainingsets hinweg gegeben ist, kann die Intensität für Auslenkwinkel im Bereich von ca. 4 Grad und größer nicht mehr verwendet werden. Da das Scanmuster sowohl im Wasser- als auch Wattbereich vollständig besetzt ist, lässt sich für alle drei Trainingsets über den gesamten Winkelbereich keine signifikante Unterscheidung anhand der 2D-Punktdichte feststellen (siehe Abb. 14 rechts). Die Klassifikation stützt sich somit nur auf die Höhe sowie im Mittelbereich des Flugstreifens zusätzlich auf die Intensität. Diese Tatsache spiegelt sich im Klassifikationsergebnis wieder



Abb. 14: Befliegung "Friedrichskoog 2005" – geschätzte Abhängigkeit der Intensität (links) und der 2D-Punktdichte (rechts) vom Auslenkwinkel mit zugehöriger Standardabweichung der Verbesserungen: Watt – braun/ocker, Wasser – dunkelblau/hellblau, Trainingset A – oben, Trainingset B – mitte, Trainingset C – unten



Abb. 15: Befliegung "Friedrichskoog 2005" – Ergebnis der Klassifikation (links) und Ergebnis der Plausibilisierung (rechts). Die gelbe Farbe kennzeichnet Punkte, die als Watt klassifiziert wurden. Die blaue Farbe kennzeichnet Punkte, die als Wasser klassifiziert wurden



Abb. 16: Befliegung "Friedrichskoog 2005" – nördlicher Abschnitt des Flugstreifens – Ergebnis der Klassifikation (links) und Ergebnis der Plausibilisierung (rechts). Die gelbe Farbe kennzeichnet Punkte, die als Watt klassifiziert wurden. Die blaue Farbe kennzeichnet Punkte, die als Wasser klassifiziert wurden

(siehe Abb. 15 links und Abb. 16 links). Während die Punkte in dem mittleren Bereich des Flugstreifens wenige Fehler aufweisen, treten in den östlichen Randbereichen der beiden Senken vermehrt Fehlklassifikationen auf. Diese ergeben sich durch das Auftreten von Höhenunterschieden innerhalb der Wasserfläche. Weitere Fehlklassifikationen sind im Bereich schäumender Wellen zu beobachten. Diese reflektieren das Signal stärker und zeichnen sich deshalb durch größere Intensitätswerte als umgebende Wasserbereiche aus. Sie werden, sofern das Merkmal Intensität innerhalb der jeweiligen Klassifikation signifikant ist, oftmals fehlerhaft als Watt klassifiziert. Eine solche Fehlklassifikation tritt am südlichen Ufer der Wasserfläche der nördlichen Senke auf (Abb. 16 links). Aufgrund des Einflusses der Intensität auf die Klassifikation in der Streifenmitte wird der schäumende Wellenbereich als Watt klassifiziert, während die gleiche Welle im westlichen Randbereich als Wasser erkannt wird. Durch die nachfolgend ausgeführte Plausibilisierung können jedoch die Wasserflächen homogen extrahiert werden (siehe Abb. 15 rechts und Abb. 16 rechts).

# 3.2 Extraktion von Strukturlinien

Das zweite Beispiel umfasst einen Ausschnitt eines Priels im Bereich der Außenweser nahe Bremerhaven (siehe Abb. 17 links). Er erstreckt sich vom Hafen des Seebades Wremen bis zum Mündungsbereich der Weser. Der umgebende Bereich verläuft eben und besteht aus Schlickwatt. Die Böschungen sind aufgrund ihrer im Vergleich zur Höhenänderung großen horizontalen Ausdehnung eher schwach ausgeprägt. Die Höhe fällt von der Umgebung zum Prielbett langsam ab. Es treten keine abrupten Neigungswechsel auf.

Der Priel wurde innerhalb einer Laserscanbefliegung der Firma Toposys im Zeitraum August/September des Jahres 2004 erfasst. Zum Einsatz kam ebenfalls ein Scanner des Typs Falcon II. Die Punktdichte der Laserscannerdaten beträgt ca. 4 Punkte/m<sup>2</sup>. Zudem wurden zeitgleich Farbinfrarotaufnahmen der abgetasteten Oberfläche mit einer digitalen Zeilenkamera erhoben. Da der Priel während der Befliegung teilweise noch Wasser führte, wurden im Anschluss Fächerecholotdaten mit einer Dichte von mehr als 40 Punkten pro m<sup>2</sup> erfasst. Für die Kontrolle der extrahierten Strukturlinien stehen GPS-RTK-Messungen vom 08.09.2004 über eine Länge von knapp 500 m (siehe Abb. 17 rechts) zur Verfügung. Da das Prielbett sowie Teile der Böschung durch Wasser bedeckt waren, konnte die Böschungsunterkante nicht gemessen werden. Stattdessen wurde die Wasserliniengrenze bestimmt.



Abb. 17: Befliegung "Außenweser 2004" – Orthophoto des Priels in der Nähe des Hafens "Wremen" (links), GPS-RTK-Referenzmessungen eines Teils des Priels (rechts). Die gelben Punkte entsprechen der Böschungsoberkante. Die grünen Punkte kennzeichnen die Wasserliniengrenze zum Zeitpunkt der Erhebung der Kontrollmessungen

Zum Zeitpunkt der Befliegung enthielt der Priel eine zusammenhängende Wasserfläche. Um Einflüsse auf die Qualität der Extraktion durch eine fehlerhafte Klassifikation des Wassers auszuschließen, erfolgte die Trennung der Laserdaten durch Digitalisierung der Wasserflächen aus den zeitgleich erhobenen Orthophotos. Da die Fächerecholotdaten im Vergleich zu der Laserscanneraufnahme eine sehr hohe Punktdichte aufweisen, wurde im Vorfeld ein DGM aus den Echolotpunkten mit der Rasterweite 0,5 m berechnet und anstelle der originären Punkte wurden die Gitterelemente im Wasserbereich verwendet. Aus dem vereinigten DGM wurden die Mittelachsen des Priels durch Bildverarbeitung abgeleitet, die Teilstücke verbunden und die Umringe bestimmt (siehe Abb. 18). Nachfolgend wurde für jede Recheneinheit kontrolliert, ob genügend Punkte der vereinigten Laser-Echolot-Punktwolke für die Parameterschätzung zur Verfügung stehen, sowie die vermittelnde Ausgleichung nach der



Abb. 18: Befliegung "Außenweser 2004" – Näherungslösung sowie Umringpolygon für die nördliche (links) und südliche Böschung (rechts). Die Mittelachsen sind in weiß und die Umringe in schwarz dargestellt

Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt. Aus diesen Recheneinheiten wurden dann die Strukturlinienpunkte mit den Krümmungsmaxima (siehe Gl. 5) abgeleitet (siehe Abb. 19). Nachfolgend wurden auftretende Lücken durch eine Besselsplineinterpolation geschlossen (siehe Abb. 20).



Abb. 19: Befliegung "Außenweser 2004" – extrahierte Formlinienpunkte. Die Böschungsunterkanten sind in grün und die Böschungsoberkanten in gelb dargestellt



Abb. 20: Befliegung "Außenweser 2004" – interpolierte Strukturlinienpunkte. Die Böschungsunterkanten sind in grün und die Böschungsoberkanten in gelb dargestellt

# 3.3 Ableitung eines Digitalen Geländemodells

In der Außenweser wurde ein  $2 \times 2$  km großes repräsentatives Gebiet ausgewählt, um anhand des neuen Arbeitsablaufes ein DGM abzuleiten. Es ist durch ein zusammenhängendes System mehrerer Priele, deren Hauptrichtung von Nord nach Süd verläuft (siehe Abb. 21 links), geprägt. Ferner enthält das Beispiel mehrere östlich und westlich angrenzende Wattbereiche, die zum Zeitpunkt des Tideniedrigwassers trocken fallen. Während insbesondere die Seitenarme nur geringe Tiefen von 1 bis 2 m bezüglich der angrenzenden Watten besitzen, befindet sich im Zentrum des Hauptpriels eine Senke, die ca. 10 m unterhalb der umgebenden Wattflächen liegt. Der Bereich wurde im Rahmen der jährlichen Befliegung im August und September 2005 durch die Firma Toposys gescannt. Insgesamt zwölf parallel zueinander liegende Flugstreifen (siehe Abb. 21 links) enthalten Laserpunkte des Untersuchungsgebietes. Die Anzahl der zu klassifizierenden Punkte beläuft sich auf ca. 16,6 Millionen. Zeitnah zur Befliegung erhob das Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven Fächerecholotdaten dieses Gebietes (siehe Abb. 21 rechts). Dabei wurde darauf geachtet, dass insbesondere der sicher überflutete Bereich durch die hydrographischen Vermessungen abgedeckt wird. In den Randbereichen steigt hingegen der Abstand zwischen den einzelnen Spuren auf bis zu 100 m, so dass größere Lücken verbleiben. Insgesamt umfasst der Echolotdatensatz ca. 20,4 Millionen gemessene Punkte.

Im Rahmen der Klassifikation in die Gruppen "Wasser" und "Watt" anhand des neuen Algorithmus erfolgte eine Analyse der Laserpunkte. Dabei zeigte sich, dass analog zum Beispiel aus der Befliegung "Friedrichskoog 2005" (siehe Kap. 3.1) das Scanmuster auch im Bereich der Wasserflächen nahezu keine Lücken enthält (siehe Abb. 22 links). Die Intensitätswerte weisen für viele Streifen die typische Abhängigkeit vom Auslenkwinkel auf. Diese





Abb. 21: Befliegung "Außenweser 2005" – Digitales Oberflächenmodell des Untersuchungsgebietes aus den Laserscannerdaten mit Umringen der Flugstreifen (links), gemessene Echolotpunkte (rechts): Umringe – grün und braun, Echolotpunkte – rot

ist für Wasser und Watt unterschiedlich ausgeprägt. Im Bereich des Hauptpriels sind die Intensitätswerte starken hochfrequenten Schwankungen unterworfen. Diese werden hauptsächlich durch auftretende Wellen verursacht. Zu den Rändern des jeweiligen Streifens nehmen die Intensitätswerte langsam ab. Auf den trockenen Wattflächen finden sich in der Streifenmitte hohe Intensitätswerte, die sehr stark zu den Seiten abfallen. Dadurch sind die durchschnittlichen Intensitäten im Übergangsbereich zwischen Streifenmitte und -rand im Watt oft geringer als im Wasser. Ferner sind hochfrequente Streuungen im Watt kaum anzutreffen. Die nassen Wattflächen wiederum weisen in der Streifenmitte signifikant geringere Intensitätswerte auf. Diese liegen teilweise deutlich unterhalb der Werte auf dem Wasser.

Danach erfolgte die Festlegung der Trainingsgebiete. Für alle Streifen wurde jeweils ein Set digitalisiert. Dabei wurden das Watttrainingsgebiet jeweils im prielnahen nassen Sandbereich und das Wassertrainingsgebiet im Hauptpriel definiert. Die visuelle Analyse konnte



Abb. 22: Befliegung "Außenweser 2005" – zu klassifizierende Laserpunktwolke intensitätscodiert: hell – geringe Intensität, dunkel – hohe Intensität (links), Ergebnis der Plausibilisierung (rechts): Wasser – blau, Watt – gelb

innerhalb der Auswertung der Trainingsgebiete bestätigt werden. Für alle Streifen können die Klassen signifikant anhand des Merkmals Höhe unterschieden werden. Hingegen ermöglicht das Merkmal 2D-Punktdichte keine Trennung. Das Merkmal Intensität ist nur teilweise nutzbar. Im Randbereich unterscheiden sich die Verteilungen für Wasser und Watt generell kaum. In der Streifenmitte ist für mehrere Streifen die Intensität signifikant. Für andere Streifen konnte über den gesamten Winkelbereich keine Trennbarkeit anhand der Intensität festgestellt werden.

Basierend auf der Auswertung der Trainingsgebiete wurden nachfolgend die Klassifikation sowie die Plausibilisierung der Streifen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 22 rechts farblich dargestellt. Von den 16,6 Millionen Laserpunkten wurden ca. 4,7 Millionen als Wasser und 11,9 Millionen als Watt klassifiziert. Teilweise sind an den Grenzen benachbarter Flugstreifen deutliche Klassifikationsunterschiede zu erkennen, die durch den unterschiedlichen Befliegungszeitpunkt und den dadurch unterschiedlichen Wasserstand begründet sind.

Nachdem die Wasserpunkte aus der weiteren Berechnung ausgeschlossen wurden, erfolgte die Fusion der Laserscanner- und Fächerecholotdaten. Da die Lotungen teilweise größere Lücken aufwiesen, wurden diese durch eine Interpolation mittels Delaunay-Triangulierung (SHEWCHUK, 1997) geschlossen. Im Anschluss konnten elf Strukturlinienpaare an den Prielrändern bestimmt werden (siehe Abb. 23). Die Berechnung stützte sich dabei auf das Formlinienmodell.



Abb. 23: Befliegung "Außenweser 2005" – extrahierte Strukturlinienpunkte (links), interpolierte Strukturlinienpunkte (rechts)

Im Anschluss erfolgte die Interpolation des DGM durch Delaunay-Triangulation unter Berücksichtigung der ermittelten Formlinien. Abb. 24 illustriert das berechnete DGM. Deutlich prägen sich die Senke im Hauptpriel sowie die Neigungsänderungen im Bereich der Strukturlinien am Übergang zwischen horizontaler Wattfläche und dem Prielsystem aus.



Abb. 24: Befliegung "Außenweser 2005" – Modelliertes DGM aus Laserscanner- und Fächerecholotdaten sowie extrahierten Strukturlinien in einer 2,5D-Schrägdarstellung – Überhöhungsfaktor: 35

Die Abb. 25 visualisiert das Differenzmodell aus dem Laser-DOM (siehe Abb. 21 links) sowie dem aus den vereinigten Datensatz unter Berücksichtigung der Formlinien abgeleiteten DGM (siehe Abb. 24). Für die Gebiete, die als Watt innerhalb der Laserscannerbefliegung klassifiziert wurden, verschwinden die Differenzen, abgesehen von geringen Abweichungen aufgrund der jeweiligen Interpolation. Signifikante Differenzen treten jedoch für die als Wasser klassifizierten Bereiche auf. Innerhalb der Senke im Hauptpriel wachsen diese auf einen Betrag von bis zu 10 m an. Deutlich zeigt sich an diesem Beispiel, dass die Verwen-



Abb. 25: Befliegung "Außenweser 2005" – Differenzmodell aus dem Laser-DOM sowie dem modellierten DGM aus Laserscanner- und Fächerecholotdaten sowie extrahierten Strukturlinien

dung des Laser-DOM als DGM in Abhängigkeit von der Wassertiefe grob fehlerhaft sein kann und dadurch die nachfolgende Nutzung sehr stark einschränkt. Deshalb ist die Kombination von Laserscanner- und Echolotdaten in Form des eingeführten Arbeitsflusses durchzuführen, um ein hochgenaues DGM zu erhalten.

# 4. Bewertung und Ausblick

Der vorgestellte neue Arbeitsfluss ermöglicht die Bestimmung hochgenauer DGM im Wattenmeer aus luftgestützten Laserscannerdaten. Dieser berücksichtigt die spezifischen Eigenschaften der Laserpunktwolke im Wattenmeer (Auftreten von Wasser) sowie die Geländemorphologie (Strukturlinien). Er benötigt zusätzliche Höhendaten für wasserbedeckte Gebiete, die im Allgemeinen durch Echolotungen erhoben werden.

Die Genauigkeit des ermittelten DGM ist insbesondere von der Qualität der Ergebnisse der Teilschritte abhängig, wobei aufgrund des sequenziellen Ablaufes auftretende Fehler in einem Teilbereich negative Auswirkungen auf die nachfolgenden Schritte ausüben. Eine falsche Klassifikation der Laserpunkte in Wasser und Watt (insbesondere die Deklarierung von Wasserpunkten als Watt) kann die Genauigkeit des DGM nachhaltig verschlechtern und eine Bestimmung der Strukturlinien verhindern. Bisherige Analysen der erzielten Genauigkeit und Zuverlässigkeit zeigen, dass die Fehlklassifikationsrate sehr gering ist, sofern eine Trennbarkeit der Klassen anhand der Merkmale gegeben ist (BRZANK, 2008). Ebenfalls können die Strukturlinien mit hoher Genauigkeit abgeleitet werden, wenn die impliziten Modellannahmen hinreichend erfüllt sind.

Beide Methoden besitzen weiterhin Verbesserungspotentiale, welche eine noch höhere Genauigkeit und Zuverlässigkeit ermöglichen. So sind die Unterschiede im Rahmen der Klassifikation von Wasser und Watt hinsichtlich der Ausprägung der Merkmale Intensität und 2D-Punktdichte zwischen Wasser und Watt häufig nicht signifikant. In diesen Fällen beruht die Unterscheidung nur auf der Höhe. Zusätzliche Merkmale könnten die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Klassifikation steigern. Das sind zum einen Merkmale, die sich analog zu den bisher verwendeten physikalisch begründbar zwischen beiden Klassen unterscheiden sollten. Denkbar sind beispielsweise Texturmerkmale der Höhenwerte, die insbesondere eine Identifikation von Punkten in Wellenbereichen verbessern könnten. Zum anderen sind Merkmale einsetzbar, die sich zwar zwischen beiden Klassen nicht signifikant unterscheiden aber die Bestimmung der Land-Wasser-Grenze exakter ermöglichen. Erste Tests wurden diesbezüglich mit einem Punktdichtequotienten durchgeführt. Dieser wird aus der maximalen und minimalen 2D-Punktdichte durch Drehung eines Kreisstücks um den jeweiligen Laserpunkt gebildet. Unter der Annahme, dass im Wasser die 2D-Punktdichte signifikant geringer als im Watt ist, erreicht der Quotient an der Land-Wasser-Grenze signifikant größere Werte als innerhalb einer Klasse. Eine weitere Steigerung der Klassifikationsgüte kann durch Integration parallel erhobener optischer Daten erreicht werden. Dazu könnten die einzelnen Farbkanäle als weitere Merkmale in die Methode einfließen, die bei entsprechender Signifikanz für die Berechnung des Gesamtzugehörigkeitsgrades verwendet werden. Der so erweiterte Algorithmus wäre in der Lage, sowohl Laserdaten alleine als auch im Verbund mit optischen Daten zu klassifizieren.

Innerhalb der Strukturlinienextraktion sind insbesondere die Gewinnung der Näherungslösung als auch die Erstellung der Umringe wichtige Elemente, die bei einer Erweiterung des Ansatzes berücksichtigt werden müssen. In beiden Bereichen ist bisher ein interaktives Eingreifen notwendig. So erhält man als Ergebnis des eingesetzten Kantenoperators häufig nur Teilstücke zusammengehörender Mittelachsen, die nachfolgend manuell verbunden werden müssen. Der Umring muss ebenfalls häufig per Hand digitalisiert werden, um keine Punkte in der Flächenrekonstruktion zu berücksichtigen, die nicht zur Strukturlinienumgebung zählen. Die Integration von neuen Verfahren eröffnet die Möglichkeit, die Extraktion nicht mehr semi-automatisch sondern vollständig ohne manuelle Eingriffe ablaufen zu lassen. Denkbar ist die Verwendung eines Linienverknüpfungsalgorithmus basierend auf den Ausprägungen der extrahierten Teilstücke (wie zum Beispiel: Richtung, Länge, räumliche Nachbarschaft) sowie dem zugrunde liegenden DGM. Die automatische Umringgenerierung könnte auf der Analyse der räumlichen Nachbarschaft angrenzender Mittelachsen sowie der Übereinstimmung der an den Umringrändern befindlichen Stützpunkte zur angesetzten Oberflächenform beruhen.

# 5. Danksagung

Diese Untersuchungen wurden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Projektnummer 03KIS050 gefördert. Zusätzlich bedanken wir uns bei unseren Projektpartnern: dem Amt für ländliche Räume Husum (ALR), der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest (WSD) und dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz Norden-Norderney (NLWKN) für die fachliche und infrastrukturelle Unterstützung.

# 6. Schriftenverzeichnis

- AARUP, T.: Transparency of the North Sea and Baltic Sea a Secchi depth data mining study. Oceanologia, Vol. 44 (3), 2002.
- BALTSAVIAS, E.: Airborne laser scanning: basic relations and formulas. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54 (2–3), 1999.
- BRIESE, C.: Breakline modelling from airborne laser scanner data. Dissertation, TU Wien, 2004. BRÜGELMANN, R.: Automatic breakline detection from airborne laser range data. International
- Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIII, B3, Amsterdam, 2000.
- BRZANK, A.: Automatische Ableitung von Bruchlinien aus Laserscannerdaten. Diplomarbeit, TU Dresden, unveröffentlicht, 2001.
- BRZANK, A.: Bestimmung Digitaler Geländemodelle in Wattgebieten aus Laserscannerdaten. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2008.
- BRZANK, A. and HEIPKE, C.: Classification of Lidar Data into water and land points in coastal areas. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI/3, Bonn, 2006.
- IRISH, J. L. and LILLYCROP, W. J.: Scanning laser mapping of the coastal zone: the SHOALS system. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54 (2–3), 1999.
- JANZA, F. J.: Manual of Remote Sensing Theory, Instruments and Techniques, The American Society of Photogrammetry, 1975.
- KRAUS, K.: Photogrammetrie Topographische Informationssysteme, Band 3. Dümmler, 2000.
- KRAUS, K. and PFEIFER, N.: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 53 (4), 1998.
- KRAUS, K. and PFEIFER, N.: Advanced DTM generation form LIDAR data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XX-XIV, 3/W4, Annapolis, Maryland, 2001.
- KUCHLING, H.: Taschenbuch der Physik, Median-Verlag, 2004.
- NALWA, V. S. and BINFORD, T. O.: On Detecting Edges. IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 8 (6), 1986.

- NIEMEIER, W.: Ausgleichungsrechnung Eine Einführung für Studierende und Praktiker des Vermessungs- und Geoinformationswesens. De Gruyter, 2002.
- PRANDLE, D.; HARGREAVES, J. C.; MCMANUS, J. P.; CAMPBELL, A. R.; DUWE, K.; LANE, A.; MAHNKE, P.; SHIMWELL, S. and WOLF, J.: Tide, wave and suspended sediment modelling on an open coast — Holderness. Coastal Engineering Vol. 41 (1–3), 2000.
- SHEWCHUK, J. R.: Delaunay Refinement Mesh Generation. Dissertation, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 1997.
- ZISSIS, G. J.: The Infrared and Elctro-Optical Systems Handbook. Vol. 1, Sources of Radiation. Environmental Research Institute of Michigan, 1993.

# Bestimmung von Höhenänderungen im Küstenbereich durch Kombination geodätischer Messtechniken

Von Lambert Wanninger, Christian Rost, Astrid Sudau, Robert Weiss, Wolfgang Niemeier, Dieter Tengen, Michaela Heinert, Cord-Hinrich Jahn, Sebastian Horst und Alexander Schenk

Zusammenfassung

Für die Analyse von Wasserständen, die durch Küstenpegel beobachtet werden, sind Informationen über Höhenänderungen dieser Pegel aufgrund von vertikalen Bewegungen der Erdoberfläche unverzichtbar. Lokale, regionale und auch großräumige Bewegungen der Erdoberfläche werden durch geodätische Messtechniken bestimmt. Wiederholte Präzisionsnivellements werden dafür seit über 100 Jahren eingesetzt, satellitengestützte Positionsbestimmung und Absolutschweremessungen seit etwa 15 Jahren. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurden die Messergebnisse geodätischer Messverfahren aus dem nordwestdeutschen Raum, die z. T. viele Jahrzehnte zurückreichen, neu aufbereitet und so kombiniert, dass ein gemeinsames Höhen-Geschwindigkeitsfeld für die deutsche Nordseeküste berechnet werden konnte.

Der flächenhafte Modellierungsansatz für das Höhen-Geschwindigkeitsfeld basiert auf radialen Basisfunktionen. Die Kombination dieses Höhen-Geschwindigkeitsfeldes mit den Wasserstandsregistrierungen der Küstenpegel ermöglicht es, genauere und zuverlässigere Wasserstandsänderungen zu ermitteln. Zusätzlich werden Probleme der präzisen Höhenbestimmung, die sich aus der Weiterentwicklung geodätischer Messtechniken ergeben, behandelt.

Schlagwörter

Nivellement, GNSS, Pegel, Schwere, Höhenänderungen

#### Summary

The analysis of sea-level changes observed by tide-gauge measurements requires information of height changes of these gauges caused by vertical land movements. Such local, regional, or large-scale vertical land movements are monitored by geodetic observation techniques. In Germany precise geometric levelling campaigns have been performed for more than 100 years, whereas satellite based positioning and absolute gravity observations are available for time spans of about 15 years. This paper provides results of the combination of the various geodetic observations of height changes being available for the north-west German region for a time span of several decades. The results include a combined height velocity field for the German North Sea coast line. The mathematical model of the height changes is based on radial basic functions. Correcting the tide-gauge measurements with this velocity field of vertical land movements allows a more precise and a more reliable determination of sea-level changes. The paper also discusses several future challenges in precise geodetic observations of height differences which are the result of the ongoing development of the observation techniques.

#### Keywords

Levelling, GNSS, gauge, gravity, height variations

# Inhalt

1.	Einleitung	122
2.	Nivellement	124
	2.1 Analyse und Aufbereitung historischer und aktueller Nivellementdaten	125
	2.2 Validierung zukünftiger Netzstrukturen	129
3.	Global Navigation Satellite System (GNSS)	132
	3.1 Auswertung der GNSS-Beobachtungen	132
	3.2 Entwicklung einer mehrwegeresistenten Referenzstation	137
	3.3 Erfassung von Mehrwegeänderungen infolge von Antennenwechseln	139
4.	Pegel	142
	4.1 Geodätische Arbeiten der Bundesanstalt für Gewässerkunde	142
	4.2 Analyse und Aufbereitung der Wasserstandsregistrierungen	152
	4.3 Zukünftiges Pegelmonitoring	153
5.	Schwere	155
	5.1 Schweremessungen zur Überführung nivellitischer Höhenunterschiede	
	in geopotentielle Koten	155
	5.2 Höhenveränderungen aus Schweremessungen	155
6.	Datenbank	157
	6.1 Datenbankstruktur	158
	6.2 Zugriffskonzent	161
7.	Kombination der geodätischen Messtechniken	162
	71 Grundgedanken	162
	72 Entwicklung des kinematischen Modells	163
	7 3 Realisierung	169
	74 Ausgleichung	171
	75 IKÜS-Software	172
	7.6 Freebnic	174
8	Casamtaraahnissa	174
0.	81 Aufbereitete Messdeten	176
	8.2 IKÜS Datonbank	170
	0.2 IKUS-Datchoank	170
Q	Danksagung	170
7. 10	Dalliksagulig	1/9
10.	Schintenverzeichnis	1/9

## 1. Einleitung

Wasserstände werden an den Küsten durch Pegel erfasst. Zur Erkennung von langfristigen Wasserstandsänderungen werden Pegelmesszeitreihen verwendet. Bei deren Analyse sind präzise Angaben zur Höhenlage der Pegel erforderlich. Die Höhen der Pegel sind vielfach nicht konstant, sondern unterliegen tektonischen und anthropogenen Einflüssen (z. B. durch Rohstoffentnahmen), die eine vertikale Bewegung der Erdoberfläche und damit auch der Pegel bewirken können. Diese vertikalen Bewegungen erreichen in Teilbereichen der deutschen Nordseeküste bis zu einigen Millimetern pro Jahr.

Häufig überlagern sich reale Wasserstandsänderungen und vertikale Bewegungen der Erdoberfläche (Abb. 1). Werden letztere nicht berücksichtigt, ergeben sich systematisch verfälschte Wasserstandsänderungen, die eine korrekte Interpretation der hydrologischen oder klimabedingten Ursachen der Wasserstandsänderungen nicht erlauben. Vertikale Bewegungen der Erdoberfläche wurden mit geodätischen Messtechniken bestimmt, wodurch die Geodäsie einen unverzichtbaren Beitrag zur Erfassung von Wasserstandsänderungen liefert (z. B. BAKER, 1993; TEFERLE et al. 2006).

Das Verbundprojekt IKÜS (2005–2008) – Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik – be-



Abb. 1: Zusammenhang von Höhenänderungen, Meeresspiegeländerungen und Pegelinformationen

stand aus vier eng verwobenen Teilprojekten mit eigenen Arbeitsschwerpunkten IKÜS (2009).

Hauptaufgaben des Geodätischen Instituts der Technischen Universität Dresden (GI TUD) waren die Gesamtprojektkoordination und die homogene Reprozessierung der Beobachtungsdaten aus der satellitengestützten Positionsbestimmung. Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) befasste sich im Schwerpunkt mit der Aufarbeitung der Anschlussmessungen, der Höhenkontrollmessungen und der Wasserstandsregistrierungen ausgewählter Küstenpegel im Bereich der deutschen Nordseeküste. Hauptaufgaben der Landesvermessung und Geoinformation Niedersachsen (LGN) waren die Aufbereitung der Nivellementdaten, die Bereitstellung der Satellitendaten sowie die Entwicklung der IKÜS-Datenbank.

Das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der Technischen Universität Braunschweig (IGP TU BS) führte die Kombination der hybriden Messinformationen durch. Ziel des IKÜS-Projektes war die Kombination der höhenrelevanten geodätischen Messverfahren Nivellement, satellitengestützte Positionsbestimmung (*Global Navigation Satellite System* – GNSS) und Schweremessungen auf der Grundlage der z. T. viele Jahrzehnte zurückreichenden Messungen im deutschen Nordseeküstenbereich. Als Ergebnis sollten Informationen über Höhenänderungen (Höhen-Geschwindigkeitsfeld) mit verbesserter räumlicher und zeitlicher Auflösung, sowie höherer Zuverlässigkeit und Genauigkeit entstehen. Die Kombination dieser Informationen mit den Wasserständen bewirkt eine Qualitätsverbesserung der abgeleiteten Wasserstandtrends. Zusätzlich sollten Werkzeuge (IKÜS-Datenbank, IKÜS-Software) entwickelt werden, die es auch zukünftig erlauben werden, neue Ergebnisse der unterschiedlichen geodätischen Messverfahren einzubeziehen und verbesserte Gesamtlösungen zu berechnen.

In einem ersten Schritt wurden die vorhandenen höhenrelevanten Datenquellen, Nivellement (Kap. 2 und 4), *Global Navigation Satellite System* (GNSS) (Kap. 3) und Schweremessungen (Kap. 5) zusammengetragen und unter Beachtung ihrer sensorspezifischen Besonderheiten analysiert und für die Kombination aufbereitet. In einem weiteren Schritt erfolgten die Entwicklung und der Aufbau einer geeigneten Datenbankstruktur (Kap. 6). Die für die Integration und Kombination der hybriden Höheninformationen notwendigen Werkzeuge wurden konzeptionell entwickelt und programmtechnisch realisiert, erprobt und angewandt (Kap. 7).

124

Auch die Ergebnisse der Kombination – Höhenänderungen höchster Genauigkeit und Zuverlässigkeit – wurden in der IKÜS-Datenbank gespeichert, um sie ausgewählten Nutzern wie z. B. dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) zur Verfügung zu stellen. In Kombination mit den Zeitreihen der Wasserstandsregistrierungen (Kap. 4) im Küstenbereich wird es somit möglich, genauere und zuverlässigere Wasserstandsänderungen zu ermitteln.

Innerhalb des IKÜS-Projektes wurden die Zukunftsaspekte der Höhenbestimmung im Küstenbereich betrachtet. Es wurden Anforderungen definiert und validiert, die sicherstellen sollen, dass auch ausgedünnte Nivellement-Netzstrukturen ihrer Aufgabe bei der Höhenüberwachung der Küstenregionen gerecht werden (Abschnitt 2.2). Es wurden Untersuchungen hinsichtlich einer mehrwegeresistenten GNSS-Referenzstation durchgeführt. Ziel hierbei war die Steigerung der Höhengenauigkeit bei der höhenmäßigen Anbindung der Küstenpegel, aber auch beim Einsatz permanenter GNSS-Referenzstationen (Abschnitt 3.2). Der Übergang beim Pegelmonitoring vom Präzisionsnivellement bzw. Einsatz der Präzisionsschlauchwaage zur satellitengestützten Höhenbestimmung bedarf weiterer Entwicklung. Basierend auf den Erfahrungen, welche im Laufe des Projektes gewonnen werden konnten, wurde ein Konzept für das künftige GNSS-gestützte Höhenmonitoring von Küstenpegeln erarbeitet (Abschnitt 4.3).

Ein Hauptbestandteil des Projektes war die Erschließung und Erfassung der verschiedenen höhenrelevanten Messdaten (Nivellement, GNSS, Pegel und Schwere). Der Großteil der Messdaten stammt von der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). Ein Teil der Mess- und Metadaten sind Datenbestand weiterer Behörden des Bundes und der Länder, insbesondere dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), dem Landesvermessungsamt Schleswig-Holstein (Kiel), dem Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung Hamburg, der Geo-Information Bremen, den Wasser- und Schifffahrtsdirektionen Nord und Nordwest, den Wasser- und Schifffahrtsämtern (WSA) Cuxhaven, Tönning, Wilhelmshaven, Bremerhaven und Emden, dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN).

# 2. Nivellement

Beim Nivellement werden Höhendifferenzen zwischen vermarkten Punkten bestimmt. Die Angabe einer absoluten Höhe für diese Punkte gelingt nur in Bezug auf einen oder mehrere Referenzpunkte, denen eine Höhe, z. B. aus Anschlussmessungen zu einem Pegel, zugewiesen wurde. Die Ableitung von Höhenänderungen aus Wiederholungsmessungen ist möglich, sofern jeweils die gleichen Referenzpunkte gewählt wurden. Die festgestellten Höhenänderungen zeigen nur dann wirkliche Veränderungen der Höhenlage der Festpunkte, wenn der Referenzpunkt als stabil angenommen werden kann. 2.1 Analyse und Aufbereitung historischer und aktueller Nivellementdaten

Für die deutsche Nordseeküste im Bereich der Bundesländer Bremen, Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein liegen insgesamt 10 Messepochen vor. Die Epochen reichen bis zum Ende des 19. Jahrhunderts. Abb. 2 gibt einen Überblick über die vorhandenen Messkampagnen im Untersuchungsgebiet. Weitere Informationen sind IKÜS (2009) zu entnehmen.

Die ersten Nivellementmessungen wurden im Rahmen des Urnivellement durchgeführt. Aufgrund der schlechten Vermarkung der Festpunkte, die sich als nicht standsicher erwies, wurde im Zuge der preußischen Landesaufnahme ein neues Nivellementnetz geschaffen. Es wird als Reichshöhennetz (RHN) bzw. als Deutsches Haupthöhennetz 1912 (DHHN 12) bezeichnet.

Dem Reichsamt für Landesaufnahme (1932) ist zu entnehmen, dass es schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts Diskussionen über die Frage der Senkung der deutschen Nordseeküste gab, die zur Einrichtung eines Nivellement-Sondernetzes zu wissenschaftlichen Zwecken – dem Nordseeküstennivellement (NKN) – führten. Bei den durchgeführten Beobachtungen erfolgte gleichzeitig auch der Anschluss der Pegelfestpunkte an das DHHN 12, was die Voraussetzung für die Verknüpfung von Nivellement und Wasserstandsregistrierung ist. Das NKN wurde bisher zweimal wiederholt. Es stellt für die bisherigen Höhenuntersuchungen im Nordwestdeutschen Raum (z. B. LEONHARD 1987) die wichtigste Grundlage dar. Die Wiederholungen des NKN gingen gleichzeitig mit Erneuerungsarbeiten und Wiederholungsmessungen im DHHN einher. Die Abb. 3 zeigt Netzbilder des Nordseeküstennivellement und seiner ersten Wiederholungsmessung.

Die Nivellementnetze Niv-Netz 60 und DHHN 92 entsprangen den Bestrebungen, die bis dahin in Teilnetzen vorliegenden Höhenangaben zusammenzuführen. Für die Teilnetze vor 1960 wurde auf dem Gebiet der alten Bundesländer das Niv-Netz 60 eingerichtet. Der Horizont 74 (Hz 74) wurde nur in Niedersachsen eingeführt. Er entstand auf Grundlage neuer Messungen in Nordwestniedersachsen und zurückliegender Beobachtungen des Niv-Netzes 60. Nach der Wiedervereinigung 1990 wurde ein einheitliches Höhennetz – das DHHN 92 – für Gesamtdeutschland geschaffen. Da bei der Berechnung der Höhen nur Beobachtungsmaterial vorheriger Messkampagnen benutzt wurde, enthalten diese Höhenangaben keine neuen Informationen zu Höhenänderungen und werden daher im Projekt nicht berücksichtigt. Die erste einheitliche gesamtdeutsche Wiederholung des DHHN 12 wird gegenwärtig durch die Messkampagne DHHN 2006–2011 geschaffen (ADV 2008b).

Die im Projekt zur Verfügung stehenden Nivellementdaten wurden bezüglich des Datenformates in Höhen und Höhenunterschieden (= Beobachtungen) unterteilt (IKÜS, 2009). Höhen stellen einen absoluten Wert dar, der aus Beobachtungen (Höhenunterschieden) abgeleitet wird. Die Beobachtungen werden in der Regel korrigiert (z. B. Temperaturkorrektion) und reduziert wie in diesem Fall mittels der Normalorthometrische Reduktion (NOR) und Normalhöhen Reduktion (NHR). Die verbleibenden Schleifenwidersprüche werden bei einer Ausgleichung mit Bedingungsgleichungen auf die Beobachtungen entfernungsabhängig verteilt. 126



Abb. 2: Übersicht über die im Untersuchungsgebiet vorliegenden Höhennetze

Für die kombinierte Auswertung bestand grundsätzlich die Möglichkeit, Höhen oder Höhenunterschiede als Eingangsgrößen in einer Datenbank zu speichern. Der Höhenbezug der einzelnen Nivellementnetze wurde in den Jahren unterschiedlich realisiert (Tab. 1). Die Nivellementnetze unterscheiden sich hinsichtlich des gewählten Datumspunktes, des Höhenniveaus (Anschlusspegel), der Bezugsfläche und des Maßstabes. Weiterhin gibt es Unterschiede bezüglich der verwendeten Ausgleichungsverfahren, der Netzanschlussbedingungen und der verwendeten Korrektionen.



(a) NKN Grundnetz

(b) NKN Küstenlinien

Abb. 3: Netzbilder des Nordseeküstennivellement I und II (ADV, 1960)

Werden Höhen verschiedener Epochen miteinander verglichen und ausgewertet, ergibt sich das Problem, dass sich Höhen bereits aufgrund verschiedener Berechnungsmethoden unterscheiden können. Dies hat zur Folge, dass bei der Ableitung von Höhenänderungen aus den Höhen der verschiedenen Nivellementnetze im Ergebnis Höhenänderungen berechnet werden, die jedoch auf systembedingte Unterschiede zurückzuführen sind. Eine Gegenüberstellung von Höhen verschiedener Messepochen würde als Höhenänderung fehlinterpretiert werden und zu falschen Aussagen führen. Um dies zu vermeiden und nicht die angebrachten Korrektionen, Reduktionen und Ausgleichungsverbesserungen zusätzlich in der Datenbank zu speichern, wurde im Projekt beim Nivellement auf die gemessenen Größen zurückgegriffen. Dies sind die relativen Höhenunterschiede, die als Rohbeobachtungen bezeichnet werden. Daten von abgeleiteten Höhenbezugssystemen konnten nicht für IKÜS-Untersuchungen verwendet werden, da sie Höhenangaben andersartig repräsentieren ohne zusätzliche Informationen bezüglich vertikaler Bewegungen im Untersuchungsgebiet zu liefern.

Entsprechend dieser Zielsetzung erfolgten die Aufbereitungsarbeiten der Nivellementdaten. Sofern die Nivellementdaten nur als abgeleitete Größen (Höhen) vorlagen, wurden diese mithilfe zusätzlicher Informationen, wie z. B. angebrachten Korrektionen und Verbesserungen, in relative Höhenunterschiede überführt. Relative Höhenunterschiede in digitaler Form lagen für Teile des DHHN 12, für das NKN I und II und für das NKN III als Anteil vom DHHN 85 vor. Jedoch waren auch für die aufbereiteten Beobachtungen des DHHN 12, des NKN I und II weitere Bearbeitungsschritte notwendig, um Rohbeobachtungen zu erzeugen. Neben Formatierungsarbeiten wurden hauptsächlich angebrachte Reduktionen berücksichtigt (siehe unten).

Bezeichnung	Datumspunkt	Anschlusspegel	Höhenbezugsfläche	Maßstab
Urnivellement	Berliner Sternwarte = NH 1879	Neufahrwasser u. Flutmesser HH; seit 1879 Amsterdam	keine Reduktion	Legales Meter (bis 1893)
RHN/DHHN12	Hoppegarten = NH 1912	Amsterdam	NN-Fläche/NOR	International
NKN 1, NKN II	Wallenhorst	Amsterdam	NN-Fläche/NOR	International
Hz 55	ausgewählte Anschlusspunkte	Amsterdam	NN-Fläche/NOR	International
Niv-Netz 60, Hz 74, NKN III/ DHHN 85	Wallenhorst	Amsterdam	NN-Fläche/NOR	International
DHHN 92	Wallenhorst	Amsterdam	Quasigeoid/NHR	International

Tab. 1: Angaben zum Höhenbezug der Nivellementnetze

Für die Nivellementnetze ohne vorliegende Rohbeobachtungen mussten diese zum Teil aus vorliegenden Höhen aufwendig erzeugt werden. Hierzu wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- 1. Bildung der Höhendifferenzen von benachbarten Nivellementpunkten,
- 2. Rückrechnung der angebrachten Ausgleichungsverbesserungen,
- 3. Rückrechnung der angebrachten Reduktionen,
- 4. Rückrechnung der angebrachten Korrektionen (außer instrumenteller und nivellierlattenabhängiger Korrektionen).

Lagen für Messepochen keine Rohbeobachtungen, sondern nur ausgeglichene Höhen vor, wurden nach der Erfassung aus den ausgeglichenen Höhen Höhenunterschiede gebildet. Konnte für diesen Schritt nicht auf vorhandene Linienverzeichnisse zurückgegriffen werden, so wurden diese nachträglich erzeugt. Anhand der Punktnummerierung und der Messdokumentationen in ADV (1960) und REICHSAMT FÜR LANDESAUFNAHME (1927) wurden die alten Linienverläufe rekonstruiert. Anschließend wurden entlang der Linie ausgeglichene, reduzierte und korrigierte Höhenunterschiede berechnet.

Im nächsten Schritt wurden die angebrachten Ausgleichungsverbesserungen zurückgerechnet. Dafür waren Angaben bezüglich der durchgeführten Ausgleichungsrechnung notwendig. In ADV (1960) wird beschrieben, wie in den aufzubereitenden Messepochen aus den einzelnen Linien, begrenzt durch jeweils zwei Knotenpunkte, Schleifen gebildet wurden. Für jede Schleife wurde eine Bedingungsgleichung aufgestellt. Als Ergebnis der Ausgleichung erhielten die Knotenpunkte ausgeglichene Höhenwerte, während Nivellementpunkte zwischen den Knotenpunkten eingerechnet wurden. Dazu wurde die Differenz zwischen dem aufsummierten Höhenunterschied der Beobachtungen einer Linie und dem Unterschied der benachbarten Knotenpunkte auf die einzelnen Beobachtungen verteilt. Diese Linienverbesserung konnte für die Aufbereitungsarbeiten des IKÜS-Projektes verschiedenen Veröffentlichungen entnommen werden. Durch die Verteilung nachgewiesener bzw. errechneter Verbesserungen auf die aufzubereitenden Beobachtungen, konnten reduzierte und korrigierte Höhenunterschiede gebildet werden. In der Veröffentlichung der ADV (1960) wird geschildert, dass Nebenlinien, wie z. B. Küstenlinien, an Punkte des Grundnetzes mit ausgeglichenen Höhenwerten unter Zwang angeschlossen wurden. Insofern diese angebrachten Linienverbesserungen der Literatur entnommen werden konnten, wurden die Ausgleichungsverbesserungen aus den Beobachtungen entsprechend dem Grundnetz "herausgerechnet".

Zur Erzeugung von Rohdaten wurden abschließend die angebrachten Reduktionen bestimmt und berücksichtigt. Bei den im Untersuchungsgebiet aufzubereitenden Daten wurde bis auf das Urnivellement immer die normalorthometrische Reduktion (NOR) angebracht. Da diese angebrachte Reduktion zu einem Großteil nicht mehr für die aufzubereitenden Beobachtungen zur Verfügung stand, wurden sie mithilfe der verwendeten Formeln erneut berechnet. Hierzu wurde die Lage und Näherungshöhe der Nivellementpunkte benötigt.

Nach der Rückrechnung der NOR lagen korrigierte Höhenunterschiede vor. Beobachtungen bei denen Instrumenten- und Lattenkorrekturen berücksichtigt wurden, konnten nicht verwendet werden, da die Korrektionen nicht im erforderlichen Umfang dokumentiert wurden. Durch ihre Herleitung und erneute Berücksichtigung war kein Genauigkeitsgewinn zu erwarten. Weitere Korrekturen, die an den zur Verfügung stehenden Daten angebracht wurden, sind nicht bekannt.

Beim Aufbereitungsprozess sollte gewährleistet werden, dass Punktidentitäten der erfassten Daten über die Punktnummer erkennbar sind. Da sich die Nummerierung der Nivellementpunkte im Laufe der Jahre zwischen den verschiedenen Messkampagnen geändert hat, wurden zur Herstellung von Punktidentitäten ggf. vorhandene Lagekoordinaten oder Lagebeschreibungen genutzt. Bestanden unterschiedliche Punktnummern für ein und denselben Punkt, wurden Identitätslisten angelegt. Da in den Daten des Weiteren Widersprüche vermutet wurden, die auf früheren Erfassungsfehlern oder falschen Punktidentitäten beruhen bzw. bei der Eingabe der zu erfassenden Daten entstanden, wurden im gesamten Aufbereitungsprozess Plausibilitätskontrollen eingebaut. Abschließend wurden alle Punktkennzeichen in einer Identitätsliste erfasst und einer einheitlichen IKÜS-Punktnummer zugeordnet.

Ein Großteil der Aufbereitungsarbeiten nahm die Erfassung notwendiger Lageinformationen der Nivellementdaten in Anspruch, da für viele heute zerstörte Nivellementpunkte keine Koordinaten existierten. Mithilfe alter und nachträglich erstellter Linienverzeichnisse konnten sowohl die vorliegenden koordinierten Nivellementpunkte als auch die Nivellementpunkte ohne Lageinformation einer gemeinsamen Linie zugeordnet werden. Mittels Darstellung der bekannten Koordinaten in Kombination mit topografischen Kartenwerken in einem Geoinformationssystem war es möglich, anhand von Straßenverläufen und bekannten Punktabständen fehlende Koordinaten nachträglich zu konstruieren. Als weiteres Hilfsmittel der Digitalisierung dienten analoge Lagebeschreibungen.

# 2.2 Validierung zukünftiger Netzstrukturen

Im klassischen Sinn werden Nivellementnetze zur Realisierung eines festgelegten, definierten Höhenstatus genutzt. Das Nivellementnetz ermöglicht dazu durch geschlossene Linienbeobachtungen die Höhenübertragung auf alle Teile des Landes. Für hohe Genauigkeitsanforderungen, für die Möglichkeit weiterer Verdichtung sowie für eine langfristige Nutzung von Nivellementnetzen ist die Auswahl von Nivellementlinien mit möglichst geringen zeitlichen Höhenänderungen von grundlegender Bedeutung. Die Stabilität der Linien stellt somit ein wichtiges Kriterium zur Auswahl der Nivellementlinien dar, die im Rahmen von Wiederholungsnivellements beobachtet werden sollen.

Die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (ADV) hat im April 2005 die Erneuerung des DHHN beschlossen. Erstmals werden neben modernen Präzisionsnivellements epochengleiche GNSS- und Absolutschweremessungen auf ausgewählten Punkten durchgeführt. In der Umsetzungsphase von 2006 bis 2011 werden ca. 21.000 km Nivellementlinien des Höhennetzes 1. Ordnung neu gemessen (Abb. 4). Im Jahr 2008 fand zudem eine bundesweite GNSS-Messkampagne mit 250 Bodenpunkten unter Einbeziehung der Referenzstationen verschiedener GNSS-Netze nämlich *International GNSS Service* (IGS), *EUREF Permanent GPS Network* (EPN), Geodätisches Referenznetz (GREF), Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS) statt. Schließlich werden auf 100 der am Nivellementnetz orientierten Repräsentativpunkte Absolutschweremessungen durchgeführt. Die Kombination aller Messungen in einer Epoche ergibt somit für die Zukunft eine für Deutschland bislang einmalige Arbeitsgrundlage für eine mögliche integrative Zusammenführung der Festpunktfelder sowie interdisziplinärer Aufgabenstellungen im Bereich der Geowissenschaften.

Im Gegensatz zu der klassischen Anwendung können Nivellementnetze auch für die Untersuchung von Boden- bzw. Krustenbewegungen über lange Zeiträume herangezogen werden. Für diese speziellen Zielsetzungen werden die vermeintlich stabilen Netze mittels Linien niederer Ordnung weiter verdichtet. Als Hauptanforderung für Verdichtungsnetze ist die Beobachtung möglichst vieler mit vorhergehenden Epochen identischer Punkte zu nennen. Weiterhin sollten die Nivellementlinien die vermuteten Bewegungsgebiete kreuzen. Vor diesem Hintergrund legt Niedersachsen aus Gründen der Daseinsvorsorge und des Küstenschutzes während der aktuellen Erneuerungskampagne des DHHN besonderen Wert auf die Beobachtung von möglichst vielen identischen Repräsentativpunkten des NKN.

Eine Betrachtung zukünftiger Nivellementnetzstrukturen und eine entsprechende Validierung im IKÜS-Projekt musste sowohl den Anforderungen eines Nivellementnetzes entsprechen, als auch die Gesichtspunkte der kombinierten IKÜS-Auswertung berücksichtigen. Dem im Kap. 7 geschilderten Konzept der Nivellementauswertung liegen keine Linien zu Grunde, sondern es basiert auf der Bildung von Doppeldifferenzen. Dazu werden wie beschrieben aus Nivellementmessungen eines Jahres einzelne Messepochen gebildet. Statt der Einführung der in den Nivellementmessungen bestimmten  $\Delta h$  werden doppelte Höhendifferenzen  $\nabla \Delta h$  gebildet. Diese doppelten Differenzen entsprechen Höhendifferenzänderungen zwischen zwei Messepochen und können somit einfacher in das Modell integriert werden. Die doppelten Differenzen kommen dem Produkt aus der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Punkten und der Zeitspanne zwischen den Messepochen gleich.

Diese Auswertemethode wird durch die Tatsache charakterisiert, dass keine zusammenhängenden Netze pro Messepoche vorliegen müssen. Ausgehend von identischen Punkten zwischen zwei Messepochen werden in beiden Epochen Züge zwischen den identischen Punkten gebildet und passende Höhendifferenzen zu doppelten Differenzen zusammengefasst.

Eine auf IKÜS-Ergebnissen basierende Untersuchung verschiedener Netzcharakteristiken ist demnach nur bedingt sinnvoll, da die Güte der Auswertung direkt von der Informationsdichte, nicht aber vom Netzdesign abhängt. Grundsätzlich kann jedoch festgehalten werden, dass für eine kinematische Analyse des Bewegungsverhaltens der Nordseeküste möglichst viele identische Punkte auch in zukünftigen Epochen vorhanden sein müssen. Nur



Abb. 4: Übersicht über die Erneuerungskampagne des DHHN 2006–2011

durch einen Vergleich von Messdaten mehrerer Epochen können relative Oberflächenbewegungen ermittelt werden. Die Aufbereitung der vorliegenden Daten hat gezeigt, dass gerade hier große Defizite vorliegen.

Durch zusätzliche Informationen über bekannte Bodenbewegungsgebiete und ihre Ausdehnung können in Zukunft gezielt Verdichtungsmessungen durchgeführt werden. Im Bezug auf das IKÜS-Auswertemodell bieten sich radiale Messrichtungen zum Zentrum des Bodenbewegungsgebietes an. Diese ermöglichen eine optimale Schätzung der Parameter der "Radialen Basisfunktion".

Die bevorstehende Einführung des neuen Bezugssystems *European Terrestrial Reference System* 1989 (ETRS, 89), die Veränderungen in der Netztopologie und in der Anwendung technischer Verfahren sowie die Nutzung des Satellitenpositionierungsdienstes SAPOS führten dazu, dass starke Veränderungen innerhalb der Arbeitsprozesse des Raumbezugs stattfanden. Die Kernpunkte bilden die aus wirtschaftlichen Gründen geforderte Neustrukturierung des Festpunktfeldes, aber auch die gleichzeitig steigenden Genauigkeitsanforderungen bzw. die höhere Auflösung und Genauigkeit von Geobasisdaten, z. B. für den Hochwasser- und Küstenschutz.

Die rechtlich beabsichtigte und wirtschaftlich notwendige Verringerung der Anzahl der Vermessungspunkte des Raumbezugs von über 100 000 auf wenige Tausend Punkte erschwert die Möglichkeit, Bodenbewegungen zu erkennen und zu dokumentieren. Dies beeinträchtigt den gesetzlichen Auftrag zur Daseinsvorsorge, zur Eigentumssicherung durch das Liegenschaftskataster und erschwert die Bereitstellung des Landesbezugssystems, z. B. für Ingenieurbauprojekte (Jade-Weser-Port, Bahn-Trassen, Hochwasser- und Küstenschutz).

# 132

Um trotz der unklaren Zukunft des Festpunktfeldes ein Küstenmonitoring zu gewährleisten, müssen besonders in Bodenbewegungsgebieten vermarkte Vermessungspunkte in höherer Dichte erhalten bzw. neu angelegt werden. Das Einbeziehen von weiteren GNSS-Stationen in die SAPOS-Vernetzung ermöglicht die Ausweitung des bestehenden Monitoringsystem der Referenzstationen auf ein allgemeines Küstenmonitoring. Mittels grafischer und numerischer Darstellung von Informationen könnte ein Monitoringdienst permanent Angaben zum Bewegungsverhalten der Referenzstationen liefern.

Eine zusätzliche Ausweitung des SAPOS-Netzes in der Küstenregion würde zudem die Qualität des Küstenmonitorings beträchtlich steigern. Hierbei spielt die aktuelle Ausrüstung von mehreren Pegelstationen mit moderner GNSS-Technologie eine tragende Rolle (IKÜS 2009).

Die in den SAPOS-Daten weiterhin enthaltenen tageszeitlichen Variationen durch Bewegungen des Trägergebäudes werden im Forschungsprojekt "Qualitätssicherung für permanente GNSS-Stationen" in enger Zusammenarbeit mit der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) untersucht (LINDENTHAL et al., 2009). Durch diese Analysen soll die Qualität der Referenzstationsdaten aufgezeigt werden, um eine weitere Steigerung der für die Genauigkeit der Höhenkomponente maßgebenden Parameter zu erreichen.

# 3. Global Navigation Satellite System (GNSS)

# 3.1 Auswertung der GNSS-Beobachtungen

Das Geodätische Institut der Technischen Universität Dresden war für die Auswertung der GNSS-Beobachtungen (GNSS – *Global Navigation Satellite System*) verantwortlich. Schwerpunkt war die homogene (Neu-)Ausgleichung der zur Verfügung gestellten GNSS-Beobachtungen der letzten Jahre. Die homogene Reprozessierung sollte mit dem aktuellen Wissensstand bzgl. Ausgleichung regionaler GNSS-Netze durchgeführt werden.

# Datengrundlage

Die von den Landesvermessungsämtern zur Verfügung gestellten GPS-Beobachtungen (GPS – *Global Positioning System*) von SAPOS-Stationen umfassten im Wesentlichen einen Zeitraum von 1998 bis 2006 (GPS-Woche 967–1408). Die Daten vor 1998 wurden nicht für die Auswertung verwendet, da die Datenqualität nach einer Analyse als nicht ausreichend eingestuft wurde. Zusätzlich wurden weitere Stationen nationaler und internationaler Netze für die Auswertung herangezogen. Das Datenmaterial wurde für eine automatisierte Berechnung entsprechend aufgearbeitet (z. B. Anpassung der Antennenbezeichnungen).

#### Auswertung

Die Auswertung erfolgte in drei Stufen. Der erste Schritt umfasste fünf SAPOS-Stationen mit der bis dato längsten "Laufzeit". Anhand dieses minimalen Netzes wurde die automatisierte Prozessierung der Daten mit WaSoft/Netz Version 3.33 getestet. Dadurch sollten Probleme bei der Berechnung und der Bereitstellung zusätzlicher Informationen aufgedeckt werden. Im zweiten Schritt wurden 27 Stationen (westliches Niedersachsen) ausgewertet. Im letzten Schritt wurden 38 GPS-Stationen:

- 3 IGS-Stationen
- 4 EPN-Stationen
- 1 GREF-Station
- 30 SAPOS-Stationen

ausgewertet. Details zur Laufzeit, verwendeten Empfängern und Antennen der einzelnen Stationen sind in IKÜS (2009) zusammengefasst.

Die Prozessierung der GPS-Daten wurde unter Verwendung der Software WaSoft/Netz Version 3.33 durchgeführt. Zur Erzielung höchster Genauigkeiten wurden präzise Bahndaten der Satelliten (Ephemeriden) und Antennenkorrektionen in die Auswertung einbezogen. Die Elevationsmaske wurde auf fünf Grad festgelegt.

Das Ergebnis sind Session- bzw. Tageslösungen in Form von Koordinaten mit vollständiger Kovarianzmatrix. Die Session- bzw. Tageslösungen wurden zu Wochenlösungen, unter Berücksichtigung aller Kovarianzinformationen, zusammengefasst. Im Rahmen des IKÜS-Projektes wurde sich darauf geeinigt, existierende Datenformate für den Austausch bzw. als Schnittstelle für die IKÜS-Datenbank zu verwenden. Im Bereich der GNSS-Auswertung wurde das bereits existierende SINEX-Format (SINEX – *Solution [Software/technique] Independent Exchange*, [SINEX WORKING GROUP, 1996]) für die Weitergabe der Wochenlösungen verwendet. Die Berechnung der Tages- und Wochenlösungen für das Gesamtnetz (38 Stationen) wurde auf einem handelsüblichen PC – Core 2 Duo mit 2 GHz und 2 GB RAM (*Random access memory*) – durchgeführt und benötigte ca. 180 Stunden (ca. 7,5 Tage). Es wurden 441 Wochenlösungen im SINEX-Format erzeugt und in der IKÜS-Datenbank (Kap. 6) für die Kombination der hybriden Messinformationen abgelegt.

#### Analyse und Interpretation

Im Zuge der Reprozessierung der GPS-Daten wurde auf eine strenge Datumsfestlegung verzichtet. Die absolute Lagerung des GPS-Netzes soll in der kombinierten Auswertung aller Messinformationen (GPS, Nivellement, Schwere) erfolgen. Um im Vorfeld Aussagen bezüglich der horizontalen und vertikalen Stabilität der verwendeten GPS-Stationen treffen zu können, erfolgte eine relative Lagerung des Netzes bezüglich einer einzelnen "stabilen" Station –Wilhelmshaven (0648). Zu dieser Station wurden Residuen, getrennt für die Nord-, Ost- und Höhenkomponente (dN, dE, dH) gebildet. Zusätzlich wurden Veränderungen der GPS-Station durch Antennen- oder Empfängerwechsel sowie sonstige Veränderungen (Höhenänderung, Aktualisierung der Empfängersoftware usw.) berücksichtigt. Ein eventuell vorhandener Trend wird durch eine gegenüber der Horizontalen geneigten Linie in den graphischen Darstellungen gekennzeichnet.

Abb. 5 zeigt dies am Beispiel der SAPOS-Station 0647 (Emden). Die jahreszeitlichen Koordinatenveränderungen der Station können ggf. auf Temperatureffekte im Zusammenhang mit Gebäudebewegungen zurückgeführt werden. Eine mögliche Ursache für den negativen Trend der Höhenkomponente ist die Gasentnahme im Groninger Gasfeld. Zeitreihen weiterer GPS-Stationen sind in IKÜS (2009) dargestellt.

Die Trendberechnung wurde, falls das Datenmaterial für eine solche Schätzung ausreichend war, für alle beteiligten Stationen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 6 dargestellt. Die Stationen im Bereich der Ems weisen einen negativen Trend in der Höhenkomponente auf. Dies kann auf die Gasentnahme im Groninger Gasfeld zurückgeführt werden.

134



Abb. 5: Stationsresiduen der GPS-Station 0647 (Emden), relativ zur Station 0648 (Wilhelmshaven) nach der WaSoft/Netz-Ausgleichung getrennt für die Nordkomponente (oben), Ostkomponente (mitte) und Höhenkomponente (unten). Die vertikalen Striche repräsentieren Stationsveränderungen, wie zum Beispiel durch Antennen- oder Empfängerwechsel bzw. sonstiger Veränderungen (Höhenänderung, Aktualisierung der Empfängersoftware usw.)

Ursachen für die Höhenänderung (positiv/negativ) der anderen Stationen konnten nicht gefunden werden. Nur für die Station Emden (0647) konnte eine Lageänderung festgestellt werden.

Neben der Ableitung von Lage- und Höhentrends aus den relativen Residuen bzgl. der Station Wilhelmshaven (0648) wurden jahreszeitliche Effekte in den Residuen festgestellt – vgl. Abb. 5. Diese "jahreszeitlichen Schwankungen" konnten beim überwiegenden Teil der Stationen, in der Höhenkomponente und bei einigen Stationen in der Lage erkannt werden (Abb. 7). Zum großen Teil sind diese Effekte auf Gebäudebewegungen infolge von jahreszeitlichen Temperaturänderungen zurückzuführen.



Abb. 6: Änderungen der GPS-Stationen (Trend in Lage und Höhe) auf der Grundlage der relativen Residuen (zur Station 0648). Durchgestrichene Stationsnamen kennzeichnen Stationen, für die eine Schätzung aufgrund der Datengrundlage nicht möglich war

136



Abb. 7: Jahreszeitliche Änderungen der GPS-Stationen auf der Grundlage der relativen Residuen (zur Station 0648). Durchgestrichene Stationsnamen kennzeichnen Stationen, für die eine Schätzung aufgrund der Datengrundlage nicht möglich war

Zwei Beispiele für jahreszeitliche Perioden in der Lagekomponente sind in Abb. 8 dargestellt. Die berechnete Änderung zwischen Sommer und Winter wurde mit der Gebäudeausrichtung verglichen. Es wird deutlich, dass es sich bei den jahreszeitlichen Schwankungen größtenteils um Effekte durch Temperaturänderungen zwischen Sommer und Winter handelt. Zwei weitere Beispiele sind in IKÜS (2009) dargestellt.



1 mm Lageänderung (Amplitude Sommer-Winter)

Abb. 8: Jahreszeitliche Schwankungen in der Lagekomponente für die SAPOS-Stationen 0652 (Alfeld) und 0658 (Nordhorn) aufgrund von Temperatureinwirkungen auf das Gebäude (Bildquelle: Luftbild-NAVIGATOR Niedersachsen)

# 3.2 Entwicklung einer mehrwegeresistenten Referenzstation

Gegenstand der Untersuchungen war die Entwicklung und Validierung einer mehrwegeresistenten Referenzstation. Mehrwegeausbreitung bedeutet, dass nicht nur das Satellitensignal direkt die Empfangsantenne erreicht, sondern auch in der Empfangsantennenumgebung reflektierte Signale, die sich dem direkten Signal überlagern.

Der Einfluss auf die L1- und L2-Phasenmessungen liegt im Bereich Millimeter bis wenige Zentimeter. Er verstärkt sich aber in der ionosphärenfreien Linearkombination L0 im statistischen Mittel um den Faktor drei. Aufgrund der sich mit der Satellitenbewegung ändernden Umweglängen haben die Mehrwegeeffekte einen stark periodischen Charakter. Für statische Empfänger ergeben sich typische Perioden von Stunden bei einem Abstand von Reflektor zu Antenne von weniger als einem Meter. Bei größerem Abstand ergeben sich kürzere Perioden (GEORGIADOU und KLEUSBERG, 1988).

Dementsprechend mitteln sich große Anteile der Mehrwegeeffekte aufgrund weit entfernter Reflektoren bei längerer Messdauer heraus. Restabweichungen auf Millimeterniveau sind aber trotzdem möglich (WANNINGER, 2003). Noch problematischer sind die sehr langperiodischen Mehrwegeeinflüsse aus dem direkten Nahfeld der Antenne (z. B. durch Pfeileroder Stativoberkante [WÜBBENA et al., 2003]). Sie lassen sich kaum durch verlängerte Messdauer minimieren und wirken direkt auf die Koordinaten. Die Höhenkomponente der Koordinaten ist davon besonders betroffen. Zur Verringerung des Mehrwegeeinflusses wurde ein Antennenprototyp entwickelt, der sich aus drei Septentrio PolaNt-Antennen auf einer gemeinsamen Grundplatte zusammensetzt (Abb. 9). Es wird davon ausgegangen, dass die Antennen durch denselben Reflektor, aber aufgrund der Geometrie zeitlich versetzt, beeinflusst werden. Zudem wurde eine Software entwickelt, die es ermöglicht, die RINEX-

0652



Abb. 9: Entwickelter Antennenprototyp zur Verringerung des Mehrwegeeinflusses auf Referenzstationen

Beobachtungen (*Receiver Independent Exchange* [GURTNER, 2002]) der Einzelantennen im Nachgang zu einer einzelnen RINEX-Beobachtungsdatei zusammenzufassen.

Das Ziel der Zusammenfassung der einzelnen Beobachtungsdateien ist die Verringerung des Mehrwegeeinflusses in der resultierenden Beobachtungsdatei. Für diesen Zweck wurde ein Gewichtungsansatz entwickelt, der auf den Messungen der (normierten) Signalqualität Signal-Rausch-Verhältnis  $(S/N_0)$  bzw. Träger-Rausch-Verhältnis  $(C/N_0)$  – beruht. Unter bestimmten Voraussetzungen (einzelner horizontaler Reflektor, erste Frequenz) ist es möglich, den Phasenmehrwegefehler anhand der gemessenen Signalqualität zu berechnen (ROST und WANNINGER, 2009). Abb. 10 zeigt den Vergleich berechneter Doppeldifferenzen einer kurzen Basislinie (26 m), die zum einen mit L1-Phasenbeobachtungen und zum anderen mit dem geschätzten Phasenmehrwegefehler (abgeleitet von der Signalqualität) berechnet wurden. Die Residuen der Doppeldifferenzen aus L1-Phasenbeobachtungen beinhalten im Wesentlichen den Phasenmehrwegefehler und können für einen Vergleich herangezogen werden.



DOY08:121 GPS-Sekunde

Abb. 10: Vergleich berechneter Doppeldifferenzen, die zum Einen aus L1-Phasenbeobachtungen und zum Anderen anhand des aus der Signalqualität geschätzten Phasenmehrwegfehlers

Durch das Zusammenfassen der drei Beobachtungsdateien mittels Gewichtung, basierend auf der Signalqualität, kann der Einfluss des Phasenmehrwegefehlers in der resultierenden Beobachtungsdatei verringert werden. Dadurch kommt es zu einer Verbesserung der Positionslösung, was anhand von Einzelepochenresiduen nachgewiesen werden konnte (Abb. 11).



Abb. 11: Gegenüberstellung der Standardabweichung der Einzelepochenlösungen für die Höhenkomponente der "Einzelstationen" (3049, 3052, 3077) und der zusammengefassten Station (merg)

Die Standardabweichung der Höhenkomponente der Einzelepochenlösung konnte für die zusammengefasste Station (merg) verringert werden. Allerdings ist die Verbesserung gegenüber der "besten" Einzelstation vergleichsweise gering. Dies kann auf die Komplexität der Stationsmehrwege zurückgeführt werde. Wie zuvor beschrieben wird bei der Gewichtung von einem dominanten Mehrwegesignal ausgegangen. Dies ist aber in den seltensten Fällen zutreffend. Häufig findet eine Überlagerung mehrerer indirekter Signale, die an verschiedenen Reflektoren erzeugt wurden, mit dem direkten Signal statt. Diese Komplexität kann in dem entwickelten Ansatz nicht berücksichtigt werden.

# 3.3 Erfassung von Mehrwegeänderungen infolge von Antennenwechseln

Bei GNSS-Messungen treten systematische Messabweichungen durch Mehrwegeeinflüsse (und Restabweichungen der Antennenkalibrierungen) auf, die in ihrer Wirkung auf die Höhenkoordinate die Größenordnung 1 cm erreichen können. Sie werden insbesondere bei Antennenwechseln auf Referenzstationen offensichtlich. Solange keine Technik angewendet wird, mit der der Einfluss von Mehrwegeeinflüssen auf GNSS-Phasenmessungen von Referenzstationen deutlich vermindert werden kann, ist ein Verfahren zur Erfassung der Mehrwegeveränderungen bei einem Antennenwechsel sinnvoll. Bei den meisten Antennenwechseln auf GNSS-Referenzstationen verändern sich die Mehrwegeeinflüsse auf die Beobachtungsgrößen, da Antennen unterschiedlicher geometrischer Dimensionen (insbesondere unterschiedliche Durchmesser der Grundplatten, Antennen mit und ohne Choke Ringe) eingesetzt werden. Weiterhin ändern sich vielfach auch die Antennenhöhe und der Antennenunterbau. Hinzu kommt, dass Antennen aufgrund ihrer Signalempfangseigenschaften auch unterschiedlich mehrwegeempfindlich sein können.

Alle auf den ersten Blick auch noch so kleinen Veränderungen an der Antenne ziehen nach sich, dass die Mehrwegeeinflüsse unterschiedlich auf die Beobachtungsgrößen und damit auch auf die Koordinatenergebnisse wirken. Da Mehrwegeeffekte von der Signalfre-
quenz abhängig sind, müssen die Einflüsse getrennt nach Frequenzen betrachtet werden. Bei dem hier vorgeschlagenen Ansatz wird davon ausgegangen, dass alte und neue Antennen vertikal über derselben Vermarkung positioniert sind. Eine Veränderung der Position des Antennenphasenzentrums wird dann im Wesentlichen auf geometrische Veränderungen der unterschiedlichen Antennenkonstruktionen und ggf. auf eine Änderung der unterschiedlichen Antennenkonstruktionen und ggf. auf eine Änderung der Antennenhöhe (vertikale Strecke Vermarkung–Antennenreferenzpunkt) zurückzuführen sein und sich nur auf die vertikale Koordinatenkomponente beziehen. Es sind zusätzliche Messungen einer temporären Station notwendig, die für einige Tage vor und nach dem Antennenwechsel in geringer Entfernung (1–100 m) zur Referenzstation betrieben werden muss (Abb. 12).

Aus den Beobachtungsdaten der kurzen Basislinien von der temporären Station zur Referenzstation mit alter Antenne bzw. zur Referenzstation mit neuer Antenne können dann Beobachtungskorrektionen berechnet werden, die die Auswirkungen des Antennenwechsels exakt erfassen (WANNINGER, 2009).

Die Basislinienresiduen der Messsignale L1 und L2 der kurzen Basislinien vor und nach dem Antennenwechsel werden getrennt modelliert. Anschließend wird die Differenz der beiden Modelle bestimmt. Als mathematischer Ansatz dienen Kugelfunktionsentwicklungen von z. B. Grad 8 und Ordnung 5. Damit werden ganz bewusst nur großräumigere, d. h. langperiodische Anteile der Mehrwegeeinflüsse erfasst, also insbesondere die Anteile aus dem Antennennahfeld, die auf die langzeitige Koordinatenbestimmung wirken. Ein Beispiel zeigt Abb. 13, bei der die Mehrwegeveränderungen (und auch Differenzen der Antennenkorrektionsrestfehler) eines Antennenwechsels der Referenzstation DRES im Jahr 2003 dargestellt werden. Bei diesem Antennenwechsel lagen – eher zufällig – die zur Modellierung notwendigen zusätzlichen lokalen Messungen vor. Die Modellierung erfolgt in Abhängigkeit des Einfallswinkels der Satellitensignale getrennt nach L1 und L2.

Die Korrektionen aus Abb. 13 wurden auf die Beobachtungsdaten von vor dem Antennenwechsel angewendet. Ihre Wirkung ist in Abb. 14 dargestellt. Die scheinbare Veränderung der Stationshöhe aufgrund des Antennenwechsels von 3,7 cm konnte durch diesen Modellierungsansatz praktisch vollständig beseitigt werden.



Abb. 12: Messaufbau zur Erfassung von scheinbaren Positionsänderungen bei einem GNSS-Antennenwechsel



Abb. 13: Beobachtungskorrektionen für GPS-Signale L1 und L2 für die alte Antenne Dresden in Bezug auf die neue Antenne



Abb. 14: Wochenpositionslösungen für Dresden im Netz umliegender Referenzstationen, ohne (links) und mit (rechts) Berücksichtigung von Beobachtungskorrektionen

4. Pegel

## 4.1 Geodätische Arbeiten der Bundesanstalt für Gewässerkunde

## Hauptnivellements der BfG und Punktidentitäten

Viele Arbeiten der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), wie z. B. Neubau- und Unterhaltungsmaßnahmen, setzen einwandfreie Höhen- und Lagebestimmungen voraus.

Mit der Entwicklung verbesserter technischer Möglichkeiten im Wasserbau zu Beginn des 19. Jahrhunderts wurden zur Schaffung gleichmäßiger Fahrwassertiefen für die Schifffahrt, zum Schutz der Niederungen gegen Hochwasser, zum ungehinderten Hochwasserabfluss und den damit verbundenen hydraulischen Berechnungen und der Vergleichbarkeit von Wasserständen verschiedener Pegel, Forderungen nach genauen Höhen in einem einheitlichen Referenzsystem gestellt.

Aus dieser Notwendigkeit heraus wurde 1891 das (Preußische) Büro für Hauptnivellements und Wasserstandsbeobachtungen gegründet, welches 1928 in der (Preußischen) Landesanstalt für Gewässerkunde und Hauptnivellements aufging und aus dem sich nach dem 2. Weltkrieg schließlich die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) entwickelt hat.

Eine Kernaufgabe des Referates Geodäsie der BfG besteht in der Durchführung von Hauptnivellements entlang der Bundeswasserstraßen und im Küstenbereich. Die Hauptnivellements werden in Form von Feinnivellements durchgeführt und unterscheiden sich in technischer Hinsicht nicht von denen der Landesvermessung. Prinzipiell werden die Hauptnivellements an die amtlichen Höhennetze der Landesvermessung angeschlossen. Aus diesem Grund wurden alle verfügbaren Nivellementkampagnen der BfG im Küstenbereich aufbereitet und in die IKÜS-Datenbank (IKÜS-DB) eingearbeitet. Je nach Zeitpunkt der Messepochen wurden dafür z. T. analoge Messblätter digitalisiert oder bereits digital verfügbare Daten mit Metadaten versehen.

Um eventuell auftretende Digitalisierungsfehler zu minimieren, wurden die originalen Feldbuchbezeichnungen übernommen. Je nach Kampagne, Zeitpunkt und beobachtender Behörde verfügen die bestimmten Punkte über verschiedene Feldbuchbezeichnungen. Weiterhin wurden die Pegelnull- und Pegelfestpunkte mit in die Datenbank aufgenommen. Aus diesem Grund wurden zehn unterschiedliche Bezeichnungsschlüssel festgelegt. Alle verschiedenen Punktbezeichnungen sind nach bestimmten Schemata zusammengestellt (IKÜS, 2009).

## Das System Pegel und Kontrollen der Höhenlagen

Die von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und dem Bundesministerium für Verkehr (BMV) herausgegebene Pegelvorschrift (PV, [LAWA und BMV, 1997]) versteht unter dem Begriff Pegel eine Einrichtung zum Messen von Wasserständen. Die maßgebenden Teile eines Pegels sind laut PV ein Lattenpegel und mindestens drei zugehörige Pegelfestpunkte (PFP). Der Nullpunkt der Pegellatte wird als Pegelnullpunkt (PNP) bezeichnet.

Bauliche Einrichtungen und Geräte für die kontinuierliche Erfassung und Registrierung, Anzeige und Fernübertragung der Wasserstände sowie Einrichtungen zur Erfassung weiterer hydrologischer Größen gelten als ergänzende Einrichtungen der Pegel (LAWA und BMV, 1997). Sollhöhenunterschiede  $dH_{Soll}$  sind definiert als Höhendifferenzen zwischen Pegelfestund Pegelnullpunkten, die bei einer erstmaligen Einrichtung des Pegels festgelegt werden. Die Pegelfestpunkte sollen die Vertikalbewegungen der näheren Umgebung und damit auch des Pegels repräsentieren. In der Realität führen die PFP z. T. unterschiedliche Vertikalbewegungen aus. Aufgrund von Erfahrungen und lokalen Gegebenheiten ist in solchen Fällen mindestens ein PFP als repräsentativ festzulegen. In Abb. 15 ist der prinzipielle Aufbau einer Pegelanlage dargestellt.

Der Begriff "Prüfung der Höhenlage" wird in der Pegelvorschrift (LAWA und BMV, 1997, Anlage C) definiert. Nach dieser Vorgabe sollen aller zwei Jahre, oder bei vermuteter Änderung wie etwa durch Beschädigung oder nach starker Vereisung auch umgehend die Höhenunterschiede zwischen mindestens zwei Pegelfestpunkten und den Pegelnullpunkten bestimmt und mit den Sollhöhenunterschieden  $dH_{Soll}$  verglichen werden. Mit einer Prüfung der Höhenlage wird demnach die innere Geometrie der Pegelfest- und Pegelnullpunkte überprüft. Überschreiten die Abweichungen zwischen real gemessenen Höhendifferenzen und festgelegten Sollhöhenunterschieden  $dH_{Soll}$  10 mm, ist die Pegellatte zu korrigieren.

Im Küstenbereich beträgt die zulässige Abweichung in besonderen Fällen (exponierte Pegel) 20 mm (LAWA und BMV 1997). Im Rahmen von IKÜS wurden die Daten der in Abb. 16 dargestellten Pegelanlagen aufbereitet und die tatsächliche Höhenlage der Pegelnullpunkte in Bezug auf die Pegelfestpunkte zum jeweiligen Zeitpunkt erfasst. Hierzu wurden Messprotokolle, amtlichen Niederschriften bzw., sofern keine anderen Informationen vorhanden, die gebundenen Pegelstammbücher genutzt. In alten Stammbüchern sind lediglich die Widersprüche zwischen gemessenen Höhendifferenzen und den Sollhöhenunterschieden  $dH_{Soll}$  protokolliert. Existieren im gleichen Pegelstammbuch auch Informationen über die zu diesem Zeitpunkt gültigen Sollhöhenunterschiede  $dH_{Soll}$ , lassen sich gemessene Höhendifferenzen ableiten.

Aufzeichnungen über regelmäßige Kontrollen der Höhenlage existieren seit ca. 1935. Je nach Wichtigkeit des Pegels und dem verantwortlichen Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) wurden die Kontrollen in unterschiedlichen Zeitabständen durchgeführt. Wichtige Pegel (Pegelgruppe a) wurden jährlich kontrolliert, während bei Pegeln der Gruppe b ein zweijähriges Intervall die Regel war.

### Anschlussmessungen der Pegel

Durch einen Anschluss an ein amtliches Höhenreferenzsystem wird ein Pegelnullpunkt georeferenziert, also dessen Höhenlage in Relation zu einem übergeordneten Höhenreferenzsystem bestimmt. Erst mit einer entsprechenden Georeferenzierung ist die Vergleichbarkeit verschiedener Pegel möglich. Eine Analyse langfristiger Wasserstandsänderungen (z. B. als ein Indikator für Klimaänderungen [JENSEN und MUDERSBACH, 2004]) setzt voraus, dass die Höhenlagen der Pegel und damit auch der Pegelnullpunkte während der gesamten Beobachtungsdauer konstant bzw. bekannt sind. Tektonische und anthropogene Einflüsse (z. B. Gasentnahmen) bewirken eine vertikale Bewegung der Erdoberfläche (rezente Krustenbewegungen), wodurch auch die auf der Erdoberfläche installierten Pegel diese Bewegung mit ausführen. Häufig überlagern sich reale Wasserstandsänderungen und rezente Krustenbewegungen, die in Teilbereichen der Nordseeküste eine Größenordnung von einigen Millimetern pro Jahr annehmen können. Die unerkannten oder nicht berücksichtigten Vertikalbewegungen der Pegel führen zu scheinbaren Wasserstandsänderungen und kausal hydrologisch bzw. klimabedingte Wasserstandsänderungen können nicht nachgewiesen werden. Die Pegelvor-



Abb. 15: Prinzipieller Aufbau einer Pegelanlage



Abb. 16: Pegelanlagen, deren Daten im Rahmen von IKÜS aufbereitet wurden

schrift trägt diesem Sachverhalt mit der Forderung nach regelmäßigen Anschlussnivellements der Pegel an die übergeordneten Nivellementnetze der Landesvermessung Rechnung (LAWA und BMV, 1997).

Historisch bedingt existieren verschiedene Realisierungen entsprechender amtlicher Höhenreferenzsysteme, die sich in Größenordnungen einiger Zentimeter unterscheiden können und somit nicht direkt kombinierbar sind. Aufgrund der Anschlüsse an die jeweils gültigen Höhenreferenzsysteme liegen Höhenangaben der Pegel in verschiedenen Höhenreferenzsystemen bzw. Realisierungen vor. Derzeit findet eine Erneuerungsmessung des Deutschen Haupthöhennetzes DHHN statt, die erstmals nach einheitlichen Kriterien für Gesamtdeutschland durchgeführt wird (ADV, 2007). Nach 2011 werden aktuelle Höhen der Anschlusspunkte und in Verbindung mit erneut ausgeführten Anschlussnivellements auch aktuelle Höhenangaben von Pegelfestpunkten verfügbar sein. Da Zeitreihenanalysen der Wasserstandsdaten nur in einem einheitlichen Höhensystem möglich sind, müssen die historischen und aktuellen Höhenangaben der Pegelfest- und damit auch der Pegelnullpunkte, in ein zeitlich und örtlich homogenes Höhenreferenzsystem überführt werden.

Die Auswirkungen eines Systemwechsels lassen sich am Pegel Helgoland verdeutlichen. Aufgrund seiner Hochseelage war es bis vor einigen Jahren nicht möglich, eine Höhenübertragung zwischen dem damals amtlichen Höhenreferenzsystem (Normalnull - NN) des Festlandes und der Insel Helgoland zu realisieren. Aus diesem Grund wurde ein als Helgoländer Null (HN) bezeichnetes Höhenreferenzsystem als Insellösung eingeführt und der PNP des Pegels Helgoland auf HN -5,000 m festgesetzt. Vor wenigen Jahren erfolgte eine satellitengestützte Höhenübertragung des amtlichen Höhenreferenzsystems Normalnull (NN) nach Helgoland, in deren Folge allen Landespunkten und Pegelfestpunkten neue Höhen, bezogen auf NN, zugewiesen wurden. Vom zuständigen Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) wurde 2001 die Höhenlage des PNP von HN -5,000 m auf NN -5,000 m geändert. Die Höhenangaben im System HN liegen 0,27 m über den Höhenangaben im System NN, was eine Absenkung der Pegellatte um 0,27 m zur Folge hatte. Die am Pegel erfassten Wasserstände weisen daher ab dem Verschiebedatum (16.9.2001) einen Sprung von 0,27 m auf. Die Auswirkung auf die erfassten Wasserstände ist in der Abb. 17 dargestellt. Im Fall des Pegels Helgoland ist die Verschiebung der Pegellatte aufgrund der Größenordnung der Verschiebung innerhalb der Wasserstandszeitreihen eindeutig. Die Mehrzahl der sich aus Änderungen der Höhenreferenzsysteme ergebenden Anderungen bewirken eine systematische Verschiebung der Pegelnullpunkte von einigen Zentimetern, die innerhalb der Wasserstandszeitreihen aufgrund der großen Streuung nicht sichtbar sind, aber dennoch berücksichtigt werden müssen. Neben der Vorgabe, dass im Küstenbereich bei der erstmaligen Festlegung der PNP eine Höhenlage von NN -5,000 m aufzuweisen hat, schreibt die Pegelvorschrift weiterhin vor, dass die Sollhöhenunterschiede  $dH_{Soll}$  und somit auch die geometrischen Beziehungen innerhalb der Pegel möglichst erhalten bleiben sollen. Bei Höhenänderungen der PFP führt dies zwangsläufig zu einem Widerspruch. In dessen Folge kam es zu unterschiedlichen Interpretationen der Pegelvorschrift bezüglich der Erhaltung der Höhenlage des PNP und dem Umgang mit wechselnden Höhenreferenzsystemen. Die bisherigen Vorgehensweisen bei festgestellten Höhenänderungen bestehen einerseits in einem mechanischen Verschieben der Pegellatte und damit verbundenen Änderungen der Sollhöhenunterschiede dH<sub>Soll</sub> und andererseits in einer Änderung von Höhenangaben der PNP bei gleichzeitiger Beibehaltung der Sollhöhenunterschiede  $dH_{Soll}$ . Im Laufe der Zeit wurden am selben Pegel beide Verfahren praktiziert. Die Folge sind heterogene Datenbestände, die aus geodätischer Sicht, nicht für den Nachweis säkularer Wasserstandsänderungen geeignet sind.

## Aufbereitung der geodätischen Pegelinformationen

Die Pegelfestpunkte sind laut Pegelvorschrift repräsentativ für die Vertikalbewegungen des Pegels. Wie bereits beschrieben, ist bei unterschiedlichen Vertikalbewegungen ein Pegelfestpunkt als repräsentativ festzulegen (im Allgemeinen handelt es sich dabei um einen tief gegründeten Rohrfestpunkt). Aufgrund von Fehlinterpretationen der Pegelvorschrift wur-

146



Abb. 17: Auswirkung des Systemsprungs von HN zu NN auf die ermittelten Wasserstände am Beispiel des Pegel Helgoland (MMThw = mittleres monatliches Tidehochwasser, MMTnw = mittleres monatliches Tideniedrigwasser)

den z. T. Pegelnullpunkthöhen trotz Höhenänderungen der Pegelfestpunkte (z. B. durch neue Messkampagnen) durch Verschieben der Pegellatte auf NN –5,000 m gehalten, wodurch sich die Sollhöhenunterschiede *dH*<sub>Soll</sub> änderten. Hinzu kommt, dass auch bei Standortverlagerungen bzw. Umbauten an Pegeln die Pegelnullpunkte häufig wieder auf eine Höhenlage von NN –5,000 m eingestellt wurden.

Im Rahmen von IKÜS wurden die geodätischen Pegelinformationen soweit aufbereitet, dass die Forderung nach einer konstanten geometrischen Beziehung zwischen repräsentativen Pegelfest- und Pegelnullpunkten (konst. Sollhöhenunterschiede  $dH_{Soll}$ ) erfüllt ist und gleichzeitig die realen Höhenlagen der Pegelnullpunkte abgebildet werden. Praktisch bedeutet dies Korrekturen von Lattenverschiebungen über Offsets, die zu den erfassten Wasserständen zu addieren sind. Für den Fall einer nach unten verschobenen Pegellatte bedeutet dies, dass die erfassten Wasserstände über dem Pegelnullpunkt nach der Lattenverschiebung zu groß sind und daher die Offsets negative Beträge aufweisen (Wasserstand wird verkleinert). Die Kombination der konstant gehaltenen Sollhöhenunterschiede und der Offsets bilden die reale Höhenlage der Pegelnullpunkte gegenüber den Pegelfestpunkten ab.

In Tab. 2 ist die Situation für den Pegel Norderney exemplarisch dargestellt, wobei die Höhenangaben des Pegelfestpunktes 1 in dieser Tabelle den amtlichen Höhen entsprechen.

Im Verlauf der Zeit wurden auf Norderney Pegel am Standort Hafen und Riffgat (Abb. 18) betrieben. Beim Aufbau des Pegels Norderney Riffgat wurde dessen Nullpunkt auf eine Höhenlage von NN –5,000 m festgelegt, obwohl zeitgleich die Höhenlage des Pegelnullpunktes Hafen eine Höhenlage von NN –5,015 m aufwies. Zwangsläufig müssen daher die am Pegel Riffgat erfassten Wasserstände um 15 mm von den am Pegel Hafen erfassten Wasserstände abweichen (dessen Pegelnullpunkt liegt mit NN –5,015 m tiefer). Für eine Auswertung der gesamten Zeitreihe des Pegels Norderney (Hafen und Riffgat) müssen die Pegelnullpunkte in Bezug auf den Pegelfestpunkt 1 auf dem gleichen Niveau liegen und damit die entsprechenden Sollhöhenunterschiede konstant bleiben. Werden die Sollhöhenunterschiede  $dH_{Soll}$  zwischen den Pegelnullpunkten am Standort Hafen bzw. Riffgat und dem Pegelfestpunkt 1 konstant gehalten, ergeben sich die in Tab. 2 dargestellten Pegelnullpunkte.

Über die alle zwei Jahre durchgeführten Kontrollen der Höhenlagen werden zusätzlich die Fehllagen der Pegellatten erfasst. Sofern die Fehllagen der Pegellatten und damit die Abweichungen real gemessener Höhenunterschiede gegenüber den amtlich festgelegten Soll-

Datum	Standort	Höhe der	WSA	IKÜS		Offset	
	Pegellatte	Landesverm.	$dH_{\rm Soll}$	PNP	$dH_{\rm Soll}$	PNP	
		in m	in m	in m	in m	in m	in m
1935	Hafen	5,014	-10,014	-5,000	-10,014	-5,000	0,000
1957	Hafen	4,999	-10,014	-5,015	-10,014	-5,015	0,000
1957	Riffgat	4,999	-9,999	-5,000	-10,014	-5,015	0,015
1984	Riffgat	4,968	-9,968	-5,000	-10,014	-5,046	0,046
1994	Riffgat	4,981	-9,968	-4,987	-10,014	-5,033	0,046

Tab. 2: Höhen- und Sollhöhenunterschiede des Pegelfestpunktes 1 am Pegel Norderney

höhenunterschieden  $dH_{\rm Soll}$  einen Betrag von 20 mm nicht überschreiten, werden die Pegellatten nicht korrigiert (LAWA und BMV, 1997). Die im Rahmen der Prüfungen der Höhenlage festgestellten Fehllagen sind Bestandteil der an die erfassten Wasserstände anzubringenden Offsets. Sofern ein Pegel über mehrere Pegellatten (Hauptwasser- und Niedrigwasserpegel) verfügt, wurden entsprechende Offsets für jede einzelne Pegellatte erstellt. In der Tab. 3 sind die Ergebnisse für den Pegel Norderney exemplarisch dargestellt. Entsprechende Informationen wurden für alle in der Abb. 16 dargestellten Pegel erstellt.

Mit diesen Informationen wird die innere Geometrie des Systems Pegel in IKÜS abgebildet. Die entsprechend aufbereiteten Daten erlauben eine Zeitreihenanalyse von Wasserstandsregistrierungen einzelner Pegel. Für eine Vergleichbarkeit verschiedener Pegel wurden im Rahmen der Auswertung geodätischer Pegelinformationen die Anschlussnivellements zwischen Punkten der Landesvermessung, deren Höhen und Höhenänderungen IKÜS-Ergebnis sind, und den Pegelfest- bzw. Pegelnullpunkten aufbereitet. Sofern der Pegelfestpunkt



Abb. 18: Lage der Pegel und Pegelfestpunkte auf Norderney (Bildquelle: LuftbildNAVIGATOR Niedersachsen)

PFP	Staffel	Datum	$dH_{ m Soll}$		Fehllage	Offset		Mittel
			gem. in m	amtl. in m	in m	lt. Tab. 2 in m	gesamt in m	in m
1	HWP	28.06.1973	-10,006	-9,999	-0,007	0,015	0,008	
55	HWP	28.06.1973	-8,604	-8,600	-0,004	0,015	0,011	0,010
1	NWP	28.06.1973	-10,008	-9,999	-0,009	0,015	0,006	
55	NWP	28.06.1973	-8,606	-8,600	-0,006	0,015	0,009	0,008
1	HWP	15.08.1974	-10,005	-9,999	-0,006	0,015	0,009	
57	HWP	15.08.1974	-8,501	-8,486	-0,015	0,015	0,000	0,005
1	NWP	15.08.1974	-10,000	-9,999	-0,001	0,015	0,014	
57	NWP	15.08.1974	-8,488	-8,486	-0,002	0,015	0,013	0,014

Tab. 3: Abweichungen von der Solllage bzw. den Sollhöhenunterschieden  $dH_{Soll}$  infolge von Kontrollen der Höhenlage (HWP = Hauptwasserpegel, NWP = Niedrigwasserpegel)

Tab. 4: Änderung der Höhe (hier 2,2 mm/a) des Pegelfestpunktes 1 (= Punktnr. 2209/9/601 = IKÜS-8348) basierend auf dem Höhen-Geschwindigkeitsfeld und deren Auswirkung auf den Pegelnullpunkt Norderney

Datum	Höhe in m	$dH_{ m Soll}$ in m	Höhe PNP in m
16.12.1957	5,063	-10,014	-4,951
01.06.1958	5,062	-10,014	-4,952
:	:	•	:
01.06.1983	5,007	-10,014	-5,007
25.04.1984	5,005	-10,014	-5,009

zugleich ein Nivellementpunkt der Landesvermessung war, ist dieser direkt in die Kombinationslösung (Kap. 7) mit eingeflossen. Ein Beispiel hierfür ist der Pegel Norderney, für dessen repräsentativen Pegelfestpunkt 1 basierend auf dem Höhen-Geschwindigkeitsfeld Höhenänderungen abgeleitet wurden. Daraus resultierende Pegelnullpunkthöhen sind in der Tab. 4 dargestellt. Sofern die repräsentativen Pegelfestpunkte kein Teil der IKÜS-Kombinationslösung sind, wurden zusätzlich die Anschlussnivellements zwischen einem Anschlusspunkt der Kombinationslösung aufbereitet. Als Beispiel sind in Tab. 5 die Anschlussmessungen des Pegels Bremerhaven dargestellt. Der repräsentative Pegelfestpunkt 6622 wurde nach 2000



Abb. 19: Interpolierte und nicht-interpolierte Pegelnullpunkte am Pegel Knock und deren Auswirkungen auf den Trend des monatlich mittleren Tidehochwassers (MMThw)

Tab. 5: Höhenänderungen (0,9 mm/a) des Punktes 2419/9/26 (= IKÜS-12058) aus der ggf. auch den Anschlussnivellements ergeben sich Wasserstände, die in einem zeitlich und örtlich homogenen Referenzsystem vorliegen (siehe Anhang IKÜS, 2009)

Datum	Höhe	dH			Höhe
		26-PFP	PFP-PNP	26-PNP	PNP
	in m	in m	in m	in m	in m
13.09.1976	5,835	-1,346	-9,455	-10,801	-4,966
23.10.1989	5,824	-1,338	-9,455	-10,793	-4,969
	:	•	÷		
07.11.2000	5,814	-1,333	-9,455	-10,778	-4,975
08.05.2006	5,809	-0,146	-10,637	-10,783	-4,974

zerstört, wodurch ein anderer Pegelfestpunkt (18) als repräsentativ angehalten werden musste. Alle ausgewerteten geodätischen Beobachtungen wurden zu einem bestimmten Zeitpunkt ausgeführt und sind streng genommen auch nur für diesen Zeitraum gültig. Da z. T. zwischen den Anschlussnivellements viele Jahre liegen und die Ergebnisse zwischen zwei Messepochen aufgrund von vertikalen Krustenbewegungen (tektonisch oder anthropogen verursacht) sehr stark von einander abweichen, müssen dennoch Aussagen über die Höhenlage der Pegelfest- bzw. Pegelnullpunkte zu verschiedenen Zeitpunkten getroffen werden.

Insbesondere bei Trendanalysen ist die Interpolation wichtig, da die sonst resultierenden Ungenauigkeiten das Ergebnis sehr stark verfälschen (Abb. 19). Im Projekt IKÜS wurde zwischen den Anschlussmessungen linear interpoliert und bekannte Brüche der Zeitreihe entsprechend berücksichtigt.

Ein Beispiel für anthropogen verursachte vertikale Krustenbewegungen ist der Bereich von Groningen (Niederlande). Die Ursachen sind die in der Zeit seit 1957 durchgeführten Erdgasförderungen. Die Auswirkungen erstrecken sich auch auf das Gebiet zwischen Borkum und Emden, wobei die Senkungsraten z. T. mehr als 2 mm/a betragen. Davon betroffen sind auch Pegel in diesem Bereich (z. B. Pegel Knock). Für diesen Pegel liegen zwei Anschlussmessungen (1975 und 1999) vor, wobei zwischen beiden Messungen eine Senkung Kombination und damit verbundene Änderungen der Anschlussnivellements bzw. Pegelnullpunkthöhen des Pegels Bremerhaven. Der repräsentative Pegelfestpunkt 6622 wurde nach 2000 zerstört und stattdessen der PFP 18 als repräsentativ festgelegt.



Abb. 20: Amtliche Angaben für monatlich gemittelte Tidehoch- und Tideniedrigwasser über PNP mit Lattenbewegungen

Aussagen über das zeitliche Verhalten von Höhenpunkten (und damit auch von Pegelfest- bzw. Pegelnullpunkten) liefert das Höhen-Geschwindigkeitsfeld (Kap. 7). In Verbindung mit den oben genannten konstanten Sollhöhenunterschieden, den Offsets und des PNP um 5,3 cm festgestellt wurde. In Abb. 19 sind die linearen Trends des monatlichen mittleren Tidehochwassers (MMThw) unter Nutzung des vom WSA festgestellten Pegelnullpunktes und eines realen (Landsenkung durch Interpolation berücksichtigt) Pegelnullpunktes dargestellt. Der scheinbare Wasserspiegelanstieg korrespondiert erkennbar mit den aufgetretenen Senkungsraten. Diese Phänomene sind in Deutschland sowohl im Küsten- als auch im Binnenbereich mehrfach anzutreffen (z. B. Pegel Norderney aufgrund von Setzungen oder Pegel Mainz aufgrund von Grundwasserentnahme).

Abb. 20 zeigt die monatlichen Mittelwerte der vom WSA herausgegebenen Wasserstände über Pegelnull. Diese wurden in die IKÜS-DB eingearbeitet.

Die Abb. 21 stellt Wasserstände über Pegelnull dar, bei denen die Lattenverschiebungen über Offsets (in IKÜS-DB hinterlegt) kompensiert wurden. Diese entsprechen Wasserständen, die sich ergeben würden, wenn die Sollhöhenunterschiede zwischen dem Pegelfestpunkt 1 und den Pegelnullpunkten (Hafen und Riffgat) konstant gehalten werden.

Werden sowohl aus den vom WSA herausgegebenen als auch aus den um die Lattenverschiebungen korrigierten Wasserstandsdaten Trends abgeleitet, ist festzustellen, dass der Trend der um die Lattenverschiebung korrigierten Wasserstandsdaten einen größeren Betrag annimmt. In diesem Fall wurde die Pegellatte mehrfach angehoben, wodurch die am Pegel erfassten Wasserstände geringer waren und daraus ein kleinerer Trend resultiert. Der Verschiebungsbetrag der Pegellatte ist abhängig von der Wahl des repräsentativen Pegelfestpunktes. Dieser Sachverhalt ist insbesondere bei Küstenschutzbauwerken von sehr großem Interesse, da für entsprechende Anwendungen die relativen Wasserstandsänderungen gegenüber der unmittelbaren Umgebung entscheidend sind.

Wird zusätzlich noch die Vertikalbewegung des Pegelfestpunktes 1 aus dem Höhen-Geschwindigkeitsfeld berücksichtigt (Abb. 22), ergibt sich gegenüber der NN-Bezugsfläche ein wesentlich geringerer Anstieg des Meeresspiegels. Dies ist damit zu begründen, dass der Pegelfestpunkt 1 und damit auch der Pegel an sich absinken und sich diese Bewegung mit langwelligen Veränderungen des Meeresspiegels überlagert. In Abb. 23 erfolgte eine Glättung der MMThw bzw. MMTnw mithilfe eines dreißigjährigen gleitenden Mittels. Anhand dieser Grafik wird der Einfluss der Landsenkung auf den Wasserstand ersichtlich. Unter Nutzung des Höhen-Geschwindigkeitsfeldes für die Höhenangaben und den korrigierten Wasserständen ergibt sich ein für das MMThw ein Trend von 1,0 mm/a. Das MMTnw weist mit 0,0 mm/a keinen Trend auf.



Abb. 21: Amtliche Angaben für monatlich gemittelte Tidehoch- und Tideniedrigwasser über PNP ohne Lattenbewegungen



Abb. 22: Angaben für monatlich gemittelte Tidehoch- und Tideniedrigwasser ohne Lattenbewegungen über NN (Höhen-Geschwindigkeitsfeld berücksichtigt)



Abb. 23: Dreißigjähriges gleitendes Mittel für Tidehoch- und Tideniedrigwasser über NN (amtliche Angaben und Höhen-Geschwindigkeitsfeld)

## 4.2 Analyse und Aufbereitung der Wasserstandsregistrierungen

Innerhalb des IKÜS-Projektes wurden die an den für das Projekt ausgewählten Pegeln erfassten Wasserstandsregistrierungen aufbereitet. Neben dem Zusammentragen aller Wasserstandsdaten war das Erfassen von Metainformationen sehr wichtig. Für die in Abb. 16 dargestellten IKÜS-Pegel wurden alle verfügbaren Scheitelwerte in die Datenbank eingepflegt. Weiterhin sind die Pegelstammdaten in der IKÜS-Datenbank hinterlegt, wobei diese den Stammdaten aus den Pegelstammbüchern (ohne den vermessungstechnischen Teil) entsprechen bzw. diese nachrichtlich übernommen wurden.

Bei den erfassten Wasserständen handelt es sich um vom WSA festgelegte Scheitelwerte über den jeweiligen Pegelnullpunkten, wobei der Bezugspegelnullpunkt (z. B. Norderney Riffgat Hauptwasserpegel [HWP]) neben anderen Informationen ebenfalls bei dem jeweiligen Scheitelwert mit gespeichert wurde. Die Scheitelwerte sind im Allgemeinen ab dem Beginn einer kontinuierlichen Datenerfassung, d. h. ab 1935, vorhanden. Neben den Scheitelwerten, dem Eintrittszeitpunkt und dem Bezugspegelnullpunkt werden auch Angaben über die Art des erfassten Wasserstandes gespeichert. Dies beinhaltet in erster Linie die folgenden Angaben:

- Art des Wasserstandssensors (Druckpegel, Schwimmpegel, Radarpegel)
- Art der Wasserstandserfassung (analog oder digital)
- kontinuierliche Ablesung oder diskrete Lattenablesungen zum Zeitpunkt der Tidehoch- bzw. Tideniedrigwassers
- Herkunft der Wasserstände
- Tidehoch-, Tideniedrig- oder Tidemittelwasser
- Monatsmittelwert, maximaler oder minimaler Wert für Tideniedrig- oder Tidehochwasser.

Die Registriergeräte erfassen den Wasserstand über einen Wasserstandssensor und speichern die erfassten Wasserstände digital oder analog (in Form von Pegelbögen). Als Wasserstandssensoren werden innerhalb der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes in erster Linie Drucksensoren und Schwimmersysteme verwendet. Während früher häufig Drucksensoren Verwendung fanden, wurden diese zum Großteil durch Schwimmersysteme ersetzt. Beiden Systeme haben verschiedene Vor- und Nachteile, und es treten auch sensorspezifische Fehlereinflüsse auf.

Frühere Registriereinrichtungen bestanden aus analogen Schreibgeräten (z. B. Trommelschreiber Abb. 24), die eine maßstäblich (im Allgemeinen 1:15) verkleinerte Tidekurve auf Papier zeichneten. Bei einer späteren Auswertung der Pegelbögen muss daher berücksichtigt werden, dass zum einen die Digitalisiergenauigkeit beschränkt ist und zum anderen die an den Schreibgeräten auftretenden systematischen Fehler maßstäblich vergrößert in den Daten enthalten sind. Seit Ende der neunziger Jahre werden die analogen Schreibgeräte durch digitale Datensammler ersetzt, wobei teilweise analoge Aufzeichnungen parallel weiter betrieben werden. Digitale Datensammler bilden den Wasserstand im Maßstab 1:1 ab und sind damit weniger Fehlereinflüssen unterworfen als analoge Schreibgeräte.

Die erfassten Scheitelwerte wurden früher aus den Pegelbögen manuell abgeleitet. Seit einigen Jahren können die Scheitelwerte innerhalb der WSV über ein semiautomatisches Verfahren (KUNZ und KÖVES, 1991) bestimmt werden. Bei diesem Verfahren wird ein Teil der Tidekurve als ausgleichendes Polynom variablen Grades dargestellt. Der Scheitel des Polynoms stellt dann den Scheitelwert der Tidekurve dar. Je nach Polynomgrad, der in die Berechnung einfließenden Zeitreihe (Fensterbreite) und der Form der Tidekurve variieren die Ergebnisse des Verfahrens. Aus diesem Grund ist eine manuelle Nachbearbeitung nötig. Alternativ zu diesem Verfahren können die hochfrequenten Variationen der Wasserstandsdaten durch Filterungen im Orts- oder Frequenzbereich gedämpft und anschließend Scheitelwerte ermittelt werden. Weitere Informationen sind in IKÜS (2009) dargestellt.

Im Rahmen von IKÜS wurden Untersuchungen zur Einbeziehung von Beobachtungsdaten der FINO-1 (Forschungsplattform Nord- und Ostsee Nr. 1) hinsichtlich der Qualität der erfassten Wasserstände und der Georeferenzierung durchgeführt. Die auf FINO-1 er fassten Wasserstände sind für die Ableitung von langwelligen Trends zurzeit nicht geeignet. Nähere Ausführungen sind in IKÜS (2009) dargestellt.



Abb. 24: Analoger Trommelschreiber

### 4.3 Zukünftiges Pegelmonitoring

Insbesondere bei Offshore-Pegeln sind die Pegelfestpunkte und die Pegellatten am selben Bauwerk befestigt. Bei diesen "gekoppelten" Pegeln entsprechen Anschlussmessungen zugleich den Kontrollen der Höhenlagen. In der Vergangenheit wurden für die Anschlüsse an amtliche Höhensysteme hydrostatische bzw. geometrische Nivellements durchgeführt (BRUSSEL, 2000). Da die hydrostatische Messausrüstung des Niederländischen Rijkswaterstaates nicht mehr zur Verfügung steht, bleibt im Küstenvorfeld als einzige Möglichkeit eine satellitengestützte Höhenüberwachung der Pegel mit GNSS, wobei zur Zeit nur GPS und dessen russisches Pendant GLONASS (*Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) zur Verfügung stehen.

Eine Kernaufgabe der BfG besteht in der Unterstützung der örtlichen Wasser- und Schifffahrtsämter bei den Anschlussmessungen zu exponierten Pegeln. In den letzten 10 Jahren ist dies durch GNSS-Kampagnen geschehen. Die Beobachtungsdauer lag zwischen ein und zwei Wochen. Aufgrund neuer Erkenntnisse bezüglich der Mehrwegeeffekte in der unmittelbaren Antennenumgebung, der Antennenempfangseigenschaften und daraus resultierenden Ungenauigkeiten bei großräumigen Netzen hat sich in den letzten Jahren die Erkenntnis durchgesetzt, dass für hochgenaue Höhenüberwachungen einzelne Messkampagnen nicht ausreichend sind. Aus diesem Grund sieht das im Rahmen von IKÜS entwickelte Konzept eine permanente GNSS-Überwachung der Pegelsysteme vor, wobei die Datenübertragung und die anschließende Datenauswertung weitestgehend automatisiert sein sollen. Eine permanente Überwachung bietet zudem den Vorteil, dass kontinuierlich Höhen beobachtet werden und Trends viel schneller und aufgrund der verfügbaren Beobachtungsdaten auch sicherer abgeleitet werden können.

Gegenüber Kampagnenmessungen ist das Anforderungsspektrum bei permanent betriebenen Systemen wesentlich erweitert. Die Anforderungen bestehen darin, dass die GNSS-Systeme

- über L1/L2 Code/Phasen-Empfänger (GPS/GLONASS) mit Choke-Ring-Antennen verfügen
- möglichst wartungsfrei sind und von einer zentralen Stelle aus administriert werden
- eine selbstständige Datenübertragung zur Zentrale realisieren
- immer über ausreichende Energie verfügen bzw. die Energieversorgung autark realisiert wird (Photovoltaikelemente und/oder Windräder).

Im Rahmen von IKÜS wurde in Verbindung mit der Informationstechnik-Abteilung der BfG und dem DWD (Deutscher Wetterdienst) ein System entwickelt, das allen Anforderungen gerecht wird. Die von der BfG beschafften GNSS-Empfänger des Typs Leica GRX1200GG PRO, wurden zusätzlich mit einem GPRS-Modul (*General Packet Radio Service*) des Typs Leica GFU24 ausgerüstet. Zusätzlich wurden GNSS-Antennen mir Choke-Ring-Elementen und passender Wetterschutzhaube (Radom) beschafft. Die Antennen wurden bei der Firma Geo++ in Garbsen mit Radom und Dreifuß und somit in dem Zustand kalibriert, in dem diese auf den Leuchttürmen installiert werden.

Die Datenkommunikation (Administrierung und Datenübertragung) erfolgt über den IKÜS (2009) beschriebenen Kommunikationsweg. Kernstück ist ein Dienst des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und eines Mobilfunkbetreibers, der eine Datenkommunikation zwischen dem Intranet der BfG und dem GNSS-Empfänger über Mobilfunk ermöglicht. Die Beobachtungsdaten werden von den GNSS-Empfängern automatisch in ein offenes Datenformat überführt und zur BfG übertragen.

Die Energieversorgung kann auf exponiert stehenden Pegelanlagen, die nicht über eine Netzstromversorgung verfügen, über Photovoltaikelemente und/oder Windräder realisiert werden. Im Rahmen von IKÜS wurden dazu keine weiteren Untersuchungen durchgeführt, da entsprechende Lösungen im Rahmen anderer Projekte realisiert werden. Im Rahmen von IKÜS wurden drei Offshore-Stationen mit entsprechenden GNSS-Ausrüstungen ausgestattet. Es handelt sich dabei um die Pegelstationen Knock, das Unterfeuer Dwarsgat (Abb. 25) und den Leuchtturm Alte Weser.

Die Auswertestrategie der GNSS-Beobachtungen muss sowohl administrativen als auch wissenschaftlichen Ansprüchen gerecht werden. Aus diesem Grund wird eine Auswertung im übergeordneten *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) mit einer anschließenden Überführung in das amtliche Referenzsystem DHHN92 angestrebt. Die Ergebnisse (Höhen und Höhenänderungen) und die aufbereiteten GNSS-Beobachtungen werden den administrativen und wissenschaftlichen Einrichtungen zur Verfügung gestellt.

### 5. Schwere

# 5.1 Schweremessungen zur Überführung nivellitischer Höhenunterschiede in geopotentielle Koten

Die relativen Schwerewerte wurden zur Umrechnung von Höhendifferenzen in Potentialdifferenzen verwendet. Hierbei werden die Schwerewerte als zeitlich invariant angesehen. Aus den unregelmäßig verteilten Schweremessungen im Auswertegebiet wurde ein "Schweregitter" berechnet. In diesem Schweregitter können für beliebige Stationen entsprechende Schwerewerte interpoliert werden.



(a) Unterfeuer Dwarsgat. (b) GNSS-Station. Abb. 25: Durch GNSS überwachte Pegelstation Dwarsgat

#### 5.2 Höhenveränderungen aus Schweremessungen

### Relativschweremessungen

Relativmessungen sind nur innerhalb kleiner Netze hochgenau möglich (KEYSERS, 2001). Küstenregionen sind ungeeignete Messgebiete auf Grund schwer modellierbarer Meereseffekte und fehlendem stabilen felsigen Untergrund. Grundwasserstandsmessungen an jedem Schweremesspunkt sind wegen einzurichtender Zusatzsensoren äußerst teuer, aber bei Genauigkeitsforderungen, wie sie zur Ableitung kleiner Vertikalbewegungen der Erdkruste notwendig sind, unabdingbar.

Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass für die vorhandenen historischen Schweremessungen bis ca. 1975 (entspricht dem Deutschen Schwerenetz [DSN], 1962) keine meteorologischen und hydrologischen Daten vorliegen. Ab 1976 (entspricht den Daten des Deutschen Hauptschwerenetzes [DHSN], 1996) sind Luftdruck und Temperatur erfasst worden. Die Erfassung hydrologischer Daten ist im EDBS-Format (Einheitliche Datenbankschnittstelle) vorgesehen, jedoch wurden bei den Gravimetermessungen keine entsprechenden Werte erfasst. Somit muss davon ausgegangen werden, dass hier Standard-Reduktionsmodelle eingesetzt wurden, die nicht alle Störsignale erfassen können.

Die Genauigkeiten der vorliegenden relativen Schweremessungen sind somit nicht ausreichend, um Höhenveränderungen zu bestimmen.

### Absolutschweremessungen

Für einige Punkte im Auswertegebiet (Abb. 26) liegen Absolutschweremessungen vor, die dem IKÜS-Projekt vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) zur Verfügung gestellt wurden. Basierend auf dem vertikalen Schweregradienten (dg/dz) können Schwereänderungen (Differenz zwischen zwei Absolutschweremessungen) als Höhenänderung interpretiert werden. Allerdings ist die Anzahl der Messepochen nicht auf allen Messpunkten groß genug, um eindeutige Aussagen im Bezug auf Höhenänderungen treffen zu können.



Abb. 26: Stationen für Absolutschweremessungen im Bereich der deutschen Nordseeküste. Die Anzahl der durchgeführten Messepochen ist den Klammern hinter dem Stationsnamen zu entnehmen

Abb. 27 zeigt die Höhenänderung abgeleitet aus Absolutschwereänderungen für Stationen mit mindestens zwei Messepochen. Zu diesem Zweck wurde die Differenz zwischen erster Messepoche (Nullepoche) und den folgenden Messepochen gebildet.



Abb. 27: Ableitung von Höhenänderungen ausgewählter Stationen aus Differenzen gemessener Absolutschwerewerte zur jeweiligen "Nullepoche" (erste gemessene Epoche der Station)

### Fazit

Auf Grund dieser Rahmenbedingungen muss festgestellt werden, dass im IKÜS-Untersuchungsgebiet selbst mit absoluten gravimetrischen Verfahren unter optimalen Bedingungen vertikale Krustenbewegungen bestenfalls ab einer Größe von wenigen Zentimetern bestimmbar sind.

Vertikale Krustenbewegungen erreichen Beträge von ca. 1 bis 3 mm/a im IKÚS-Untersuchungsgebiet (siehe Abschnitt 7.4). Wird davon ausgegangen, dass es sich dabei um nichtperiodische rezente Krustenbewegungen handelt, bei denen sich die Jahresbeträge aufsummieren, können Schwereänderungen frühestens nach ca. 20–40 Jahren signifikant nachgewiesen werden.

### 6. Datenbank

Die wesentliche Aufgabe einer Datenbank besteht in der widerspruchsfreien und dauerhaften Speicherung von Datenmengen. Benötigte Teilmengen der Daten können weiterhin in unterschiedlichen, bedarfsgerechten Darstellungsformen für Benutzer und Anwendungsprogramme bereitgestellt werden. Das Datenbanksystem bietet zudem den Vorteil, dass die darin enthaltenen Datensätze zentral gepflegt und aktualisiert werden können. In einer relationalen Datenbank werden die Datensätze in Relationen verwaltet, d. h. in zweidimensionalen Tabellen die durch so genannte Schlüssel (Identfelder) miteinander verknüpft sind.

Bei der Entwicklung einer zukunftsorientierten Datenbank ist die Datenunabhängigkeit ein zentrales Thema. Wenn bspw. in Zukunft unterschiedliche Anwendungen auf dieselbe Datenbank zugreifen, werden jeweils auch unterschiedliche Anforderungen an diese gestellt.

Neben den Softwareanforderungen existieren auch unterschiedliche Betrachtungsweisen der Anwender. Das Konzept der Datenunabhängigkeit soll eine Abkopplung der Datenbank von notwendigen Änderungen der Anwendung ermöglichen. Diese Datenunabhängig-

keit wird nach UNILOG INTEGRATA TRAINING AG (2006) durch ein Drei-Ebenen-Schema erreicht:

- Die konzeptionelle Ebene gibt den grundlegenden Aufbau der Datenstruktur wieder. Sie beschreibt eine von der Hardware oder Datenbank unabhängige Gesamtsicht auf den zu speichernden Datenbestand.
- Auf der internen Ebene wird mit Hilfe einer geeigneten physischen Datenstruktur festgehalten, wie die Daten zu speichern sind.
- Die externe Ebene beinhaltet im Allgemeinen nur einen Teilbereich der konzeptionellen Ebene. Nur der Teil, der für die jeweilige Anwendung bzw. Anforderung relevant ist, wird beschrieben. Es werden z. B. anwendungsspezifische Sichten auf die Datenbank festgelegt, über die ein Datenbankzugriff erfolgt.

Durch ihr relativ einfaches Datenmodell verbunden mit einer standardisierten Abfragesprache unterstützen relationale Datenbankmanagementsysteme (RDBMS) in hohem Maß das Konzept der Datenunabhängigkeit. Ihre Stabilität und die automatische Optimierung ermöglichen eine zentrale Verwaltung von Massendaten in klassischen Anwendungen. Aus diesem Grund basiert die Entwicklung der IKÜS-Datenbank auf einem relationellen Datenbankmodell.

## 6.1 Datenbankstruktur

Das relationale Datenbankmodell speichert Daten in Tabellen, die als Relationen bezeichnet werden. Dabei entspricht jedes Objekt und jede Beziehung zwischen Objekten einer zweidimensionalen Tabelle. Jede Spalte einer Tabelle steht für ein Attribut des Objekts oder der Beziehung. Eine Zeile enthält jeweils alle Attribute, die ein Objekt oder eine Beziehung charakterisieren. Dabei muss jede Zeile eindeutig identifizierbar sein, d. h. es darf nie zwei identische Zeilen in einer Tabelle geben.

Um die Daten wieder auszulesen, hat der Benutzer die Möglichkeit, mit Hilfe von Datenbanksprachen direkt auf die gewünschten Informationen zuzugreifen. Dabei hat sich mit der *Structured Query Language* (SQL) eine internationale, vom *American National Standards Institute* (ANSI) und der Internationalen Organisation für Normung (ISO), standardisierte Sprache für relationale Datenbanken etabliert. Ein weiterer Vorteil des relationalen Modells ist die einfache Umsetzbarkeit auf physikalische Speicherstrukturen. So lässt sich z. B. jede Tabelle als einzelne Datei speichern.

Mit diesen Vorteilen erreichte das relationale Modell eine marktbeherrschende Stellung. Typische RDBMS sind bspw. der Microsoft SQL Server, MySQL, Microsoft Access oder die im IKÜS-Projekt eingesetzte Datenbank der Firma Oracle.

Analog zum so genannten Phasenmodell der Software-Entwicklung wurde auch bei der Entwicklung der IKÜS-Datenbank (IKÜS-DB) zwischen einzelnen Projektphasen unterschieden.

Die wichtigsten Phasen lauten:

- Anforderungsanalyse
- Konzeptioneller Entwurf
- Logischer Entwurf
- Physischer Entwurf
- Implementierung.

Die Entwicklung der IKÜS-Datenbank begann, wie jede Softwareentwicklung, mit einer gründlichen Anforderungsanalyse. Dabei musste für eine optimale Nutzbarkeit der Datenbank die Frage beantwortet werden, welche Daten mit welchen Zusammenhängen in der Datenbank verwaltet werden sollen.

Um grundsätzlich eine Einbindung der IKÜS-Datenbank in die Geodateninfrastruktur Niedersachsen (GDI-NI) zu ermöglichen, orientierte sich die Entwicklung der IKÜS-Datenbankstruktur am AAA-Basisschema. Das AAA-Basisschema umfasst das Amtliche Festpunktinformationssystem (AFIS), das Amtliche Liegenschaftskataster-Informationssystem (ALKIS) sowie das Amtliche Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS). Dabei wurden vor allem die in ADV (2008a) definierten grundlegenden Strukturen bei der Verwaltung des Raumbezuges übernommen. Die weiteren Strukturen wurden dagegen von speziellen Anforderungen des IKÜS-Projektes vorgegeben und individuell modelliert.

Bei der Anforderungsanalyse wurde festgelegt, dass möglichst Rohdaten abgelegt werden sollten. Die Routinen zur Aufbereitung der Daten werden dabei ausschließlich im IKÜS-Programm bereitgestellt. Dies hat den Vorteil, dass bei einem späteren Import von Daten immer eine einheitliche Aufbereitung gewährleistet wird. Weiterhin ist es möglich die Rohdaten bei Bedarf erneut aufzubereiten, falls bessere Algorithmen zur Verfügung stehen.

Da die Bezeichnung identischer Punkte nicht einheitlich war und identische Punkte mit verschiedenen Punktnummern auftraten, gewährleistet der Datenbankentwurf die Speicherung der originalen Punktnummern. Gleichzeitig wurde eine Tabelle mit Zuordnungen der originären Punktnummer zu einer globalen, eindeutigen IKÜS-Punktnummer erstellt. Beim Auslesen der Rohdaten wird so die originäre Punktnummer durch die globale Punktnummer dynamisch ersetzt. Diese Art der Modellierung ermöglicht auch nachträgliche Änderungen der Identitätszuordnung.

Die Speicherung der Kovarianzinformationen für GPS-Epochen erfolgt durch die Verwendung von *Binary Large Objects* (BLOB), da ein direkter Zugriff auf einzelne Werte oder auch  $3 \times 3$  Submatrizen pro Punkt als zu langsam eingestuft wurde. BLOBs sind große binäre und damit für die Datenbank nicht weiter strukturierte Objekte. Diese Datenpakete können wie andere Datensätze direkt in der Datenbanktabelle abgelegt werden (LONEY, 2005). Eine Speicherung der gesamten Kovarianzmatrix ( $Q_{xx}$ ) als BLOB ermöglicht zwar nur einen Zugriff auf die gesamte Matrix, ist jedoch deutlich schneller als ein individueller Zugriff auf einzelne Koeffizienten.

Als globales IKUS-Koordinatensystem wurde das ETRS 89 festgelegt. Die Verwendung von geografischen Koordinaten garantiert einen einheitlichen Raumbezug ohne Fehlinterpretationen. Um jederzeit die im Feld geführten Koordinaten zu rekonstruieren, wurden die verwendeten Transformationsparameter zusätzlich in der Datenbank abgelegt.

Im nächsten Schritt erfolgte die Umsetzung der gewonnenen Anforderungen in einem konzeptionellen Entwurf. Dazu wurde ein *Entity-Relationship-Modell* (ERM) erstellt, das die Objekte und Beziehungen als Entitäten (*Entities*) und Beziehungen (*Relationships*) abstrahiert. Das ERM ist das bekannteste und meist verwendete grafische Hilfsmittel für den Datenbankentwurf. Der Entwurf ist dabei vollkommen unabhängig von dem späteren Datenbanksystem. Für die Erarbeitung des ERM konnte spezielle Software eingesetzt werden. Mit der Definition von Attributen und Schlüsselelementen wurde das erstellte ERM anschließend in ein relationales Datenbankmodell überführt. Dieser Schritt wird als logischer Entwurf bezeichnet.

Während des logischen Entwurfes wurde auch die so genannte Normalisierung der Datenbankstruktur durchgeführt. Ziel der Normalisierung ist, dass jeder Datensatz nur ein einziges mal vorkommt. Redundanzen sollen beseitigt werden und die Datenkonsistenz erhalten bleiben. Weiterhin ermöglicht die Normalisierung, dass Abhängigkeiten zwischen den Spalten einer Tabelle beseitigt werden, um später eine einfache Erweiterung der Datenbank zu gewährleisten (LOCKMAN et al., 2002).

Grundsätzlich wurde eine Datenspeicherung ohne jegliche Redundanzen angestrebt.

Lediglich in abgegrenzten Teilbereichen wurden Redundanzen zugelassen und damit die Normalisierung aufgebrochen, um Einleseroutinen und die spätere Abfrage der Elemente zu beschleunigen. Zur Sicherung der Datenintegrität wurden die Haupttabellen mit Protokoll-Spalten versehen. Entsprechende Datenbankmodule (Trigger) tragen dabei automatisch in diese Spalten ein, wann und durch wen ein Datensatz eingetragen bzw. geändert wurde.

Auf Grund der Anforderungen durch die umfangreiche Datenbasis und die geforderte Möglichkeit zur Erweiterung und Internetanbindung wurde für den physischen Entwurf eine Oracle-Datenbank gewählt. Entsprechend dieser Entscheidung wurde aus dem relationalen Datenbankmodell die endgültige physische Struktur der IKÜS-Datenbank in Form von SQL-Befehlen abgeleitet. Auf einem hausinternen Oracle 10g Datenbankserver der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen LGN wurde die IKÜS-Datenbank eingerichtet und die vorgesehenen Tabellen und deren Attribute erstellt. Dabei festgelegte Schlüsselbedingungen und Beziehungen von Objekten werden durch entwickelte Trigger erfüllt. Des Weiteren wurden häufig genutzte Abfragen als so genannte Sichten (*View*) in der Datenbank abgelegt, um so die Zugriffsgeschwindigkeit zu steigern.

Auf eine detaillierte Darstellung der entwickelten Datenbankstruktur und der darin festgelegten Tabellen wird an dieser Stelle aus Platzgründen verzichtet und auf die Dokumentation verwiesen. Für die abschließende Datenbanknutzung wurde eine ausführliche Online-Dokumentation erstellt, die Inhaltsinformationen zu allen Datenbanktabellen enthält. Die Einheitendefinitionen der verschiedenen Tabellenfelder wurden ebenfalls in der Dokumentation festgehalten. Eine beigefügte grafische Übersicht der Datenbanktabellen ermöglicht zudem ein schnelles Auffinden gesuchter Informationen.

Um die im Projekt aufbereiteten Daten in der IKÜS-Datenbank abzulegen bzw. eine nachhaltige Fortführung der Datenbank zu ermöglichen, musste die Datenbank entsprechend festgelegter Austauschdatenformate strukturiert werden. Diese Austauschformate sollten zudem eine geeignete Schnittstelle zwischen den Projektpartnern schaffen. Für die einzelnen Daten der höhenrelevanten Sensoren wurden dazu standardisierte Austauschformate festgelegt, sofern diese für die IKÜS-relevanten Informationen existieren (z. B. SINEX für GNSS-Ergebnisse). Andernfalls wurden Datenformate um weitere Informationen ergänzt oder neu als IKÜS-Format definiert.

Im Rahmen der Erneuerungskampagne des DHHN 2006–2011 wird eine eigene Nivellementmessdaten-Datenbank (NIMEDA) aufgebaut. Als Schnittstelle zu dieser Messdatenbank wird das so genannte NIMEDA-Format eingeführt (ADV 2007). Die hohe Bedeutung der Kampagne impliziert, dass dieses Format die bisherige einheitliche Datenbankschnittstelle (EDBS) auch in Zukunft ablösen wird. Durch die Verwendung des NIMEDA-Formates als IKÜS-Austauschschnittstelle für Nivellementdaten wird eine langfristige Aktualisierung der Datengrundlage erheblich erleichtert.

Entsprechend der festgelegten Schnittstelle wurden sowohl die im EDBS-Format als auch die in freier tabellarischer Datenstruktur vorgehaltenen Nivellementdaten angepasst. Für die im EDBS-Format genutzten Kennzahlen wurde eine Schlüsseltabelle entwickelt, nach dessen Vorgabe die vorhandenen Beobachtungen in die Definitionen des NIMEDA-Formates überführt wurden.



Abb. 28: Zugriffskonzept der IKÜS-Datenbank basierend auf einem Client-/Serversystem

### 6.2 Zugriffskonzept

Datenbankmanagementsysteme (DBMS) werden in Desktop- und Client-/Serversysteme unterschieden. Bei einem Desktopsystem befinden sich die Datenbank, das Datenbankmanagementsystem und die Datenbankanwendung auf dem Rechner des Anwenders. Bei Client-/Serversystemen läuft das Datenbanksystem auf einem eigenen Server, der exklusiven Zugriff auf die Datenbank besitzt. Die Anwendungsprogramme befinden sich auf den Clientrechnern und beziehen ihre Daten vom DBMS des Servers. Ein typisches Client-/ Serversystem ist die auch im IKÜS-Projekt eingesetzte Oracle-Datenbank.

Die zentrale Datenbankeinrichtung auf einem Server der LGN bildet damit die Grundlage des Zugriffkonzeptes im IKÜS-Projekt (Abb. 28). Diese Regelung ermöglicht eine Nutzung bereits vorhandener Hard- und Softwarearchitektur und stellt damit die wirtschaftlichste Lösung dar. Weiterhin werden Aktualisierung und Pflege des Datenbestandes durch die zentrale Datenverwaltung erheblich erleichtert.

Da der Aufbau eines standardisierten Online-Angebots für IKÜS und die Einbindung in die Geodateninfrastruktur Niedersachsen (GDI-NI) sehr aufwendig ist, empfahl sich für das IKÜS-Projekt der Aufbau eines proprietären Internetangebotes. Für die Bereitstellung der Produkte und Daten des IKÜS-Projektes wurde eine Benutzerverwaltung mit Authentifikationsapplikation auf einem Webserver der LGN eingerichtet. Nach erfolgreicher Anmeldung des Nutzers gelangt dieser auf das "IKÜS-Portal" (Abb. 29). Hier steht neben »Download-Links« zu aktuellen Produkten auch ein Echtzeit-Onlinezugriff auf den Datenbankserver zur Verfügung.



Abb. 29: Das "IKÜS-Portal" (www.lgnapp.niedersachsen.de/ikues) zur Bereitstellung der Ergebnisse des Projektes

7. Kombination der geodätischen Messtechniken

### 7.1 Grundgedanken

Änderungen von Koordinaten sind immer nur "relativ" zu einem Bezugsrahmen bestimmbar. Der Bezugsrahmen, innerhalb dessen die Analyse durchgeführt werden muss, wird durch Referenzpunkte realisiert, während das Objekt durch Objektpunkte diskretisiert wird. Im Idealfall sind die Referenzpunkte über den "gesamten" Überwachungszeitraum stabil. Durch eine Transformation wird jede Messepoche in das System der Referenzpunkte eingefügt, so dass sich die Objektpunkte auf ein einheitliches geodätisches Datum beziehen und somit direkt vergleichbar sind.

Die Referenzpunkte werden so gewählt, dass geringe Änderungen in den Referenzpunkten nur einen begrenzten Einfluss auf die Objektpunkte ausüben. Optimal ist eine ringförmige Anordnung der Referenzpunkte um das Objekt, da somit fehleranfällige Extrapolationen vermieden werden.

Falls keine stabilen Referenzpunkte zur Verfügung stehen, können auch Punkte verwendet werden, deren Bewegungsverhalten als funktional approximierbare Bewegung schätzbar ist. Die Bewegung der Referenzpunkte kann von einem übergeordneten Bezugsrahmen vorgegeben (VESTØL, 2006) oder in der Auswertung geschätzt werden.

Für die deutsche Nordseeküste ist eine ringförmige Anordnung der Referenzpunkte kaum möglich. Es werden fünf "Referenzstationen" im Süden des Auswertegebietes gewählt. Diese Punkte liegen im Bereich des als stabil angenommenen Berglandes. Alle detektierten Bewegungen beziehen sich auf diese Referenzpunkte.

Grundlage ist ein lineares Geschwindigkeitsmodell für "jeden" Objektpunkt. Die Koordinate eines Punktes  $x^t$  zum Zeitpunkt t ist eine lineare Funktion ausgehend von der Koordinate zum Referenzzeitpunkt  $x^{t_{ref}}$  mit der Geschwindigkeit des Punktes  $\dot{x}$  und dem Zeitpunkt t.

$$x^{t} = x^{t_{\text{ref}}} + \dot{x} \cdot (t - t_{\text{ref}}) \tag{1}$$

Es wird jedoch nicht jeder Punkt einzeln betrachtet, sondern die Geschwindigkeit benachbarter Punkte wird als korreliert betrachtet (Prinzip der Nachbarschaft). Die Geschwindigkeiten werden durch ein Geschwindigkeitsfeld approximiert, das aus radialen Basisfunktionen gebildet wird. Ziel ist eine hybride Auswertung von Höhendifferenzen und GPS-Koordinatensätzen zur Bestimmung des Geschwindigkeitsmodells. Für aufwändigere Bewegungsmodelle, z. B. eine beschleunigte Bewegung, ist im vorliegenden Fall die Datendichte unzureichend (Nivellement) oder die Zeitbasis zu kurz (GPS-Daten).

Es sollen "keine" Höhen in einem einheitlichen System bestimmt werden. Diese Restriktion ergibt sich, da keine direkten Messungen zwischen den GPS-Punkten und den Nivellementpunkten existieren.

## 7.2 Entwicklung des kinematischen Modells

Für die Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes werden Höhendifferenzen und GPS-Koordinatensätze verwendet.

#### Nivellementdaten

Ausgehend von der Höhe  $H_i^{t_{ref}}$  des Punktes  $P_i$  zum Zeitpunkt  $t_{ref}$  kann unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit  $H_i$  die Höhe  $H_i^t$  des Punktes  $P_i$  zum Zeitpunkt t bestimmt werden. Die Differenz der Punkthöhen  $H_j^t - H_i^t$  entspricht der gemessenen Höhendifferenz  $\Delta H_{i,j}^t$ :

$$\Delta H_{i,j}^{t} = \underbrace{\left(H_{j}^{t_{\text{ref}}} + \dot{H}_{j} \cdot \left(t - t_{\text{ref}}\right)\right)}_{H_{j}^{t}} - \underbrace{\left(H_{i}^{t_{\text{ref}}} + \dot{H}_{i} \cdot \left(t - t_{\text{ref}}\right)\right)}_{H_{i}^{t}}$$
(2)

Die Bestimmung der Höhe eines Punktes  $H^{t_{ref}}$  zum Referenzzeitpunkt  $t_{ref}$  ist problematisch, da nicht alle Punkte gemeinsam ausgewertet werden können. Die Nivellementbeobachtungen zerfallen in Teilnetze. Diese müssen entsprechende Verknüpfungen aufweisen, um einen Konfigurationsdefekt zu vermeiden (LEONHARD, 1987). Das Problem kann vermieden werden, wenn Differenzen von Höhendifferenzen gebildet werden. Die Werte  $H^{t_{ref}}$  werden somit eliminiert:

$$\Delta H_{i,j}^{t_{\iota,\kappa}} = \Delta H_{i,j}^{t_{\kappa}} - \Delta H_{i,j}^{t_{\iota}}$$

$$\Delta H_{i,j}^{t_{\iota,\kappa}} = \left( \left( H_{j}^{t_{ref}} + \dot{H}_{j} \cdot (t_{\kappa} - t_{ref}) \right) - \left( H_{i}^{t_{ref}} + \dot{H}_{i} \cdot (t_{\kappa} - t_{ref}) \right) \right)$$

$$- \left( \left( H_{j}^{t_{ref}} + \dot{H}_{j} \cdot (t_{\iota} - t_{ref}) \right) - \left( H_{i}^{t_{ref}} + \dot{H}_{i} \cdot (t_{\iota} - t_{ref}) \right) \right)$$

$$\Delta H_{i,j}^{t_{\iota,\kappa}} = H_{j}^{t_{ref}} + \dot{H}_{j} \cdot (t_{\kappa} - t_{ref}) - H_{i}^{t_{ref}} - \dot{H}_{i} \cdot (t_{\kappa} - t_{ref})$$

$$- H_{j}^{t_{ref}} - \dot{H}_{j} \cdot (t_{\iota} - t_{ref}) + H_{i}^{t_{ref}} + \dot{H}_{i} \cdot (t_{\iota} - t_{ref})$$

$$\Delta H_{i,j}^{t_{\iota,\kappa}} = \dot{H}_{j} \cdot (t_{\kappa} - t_{\iota}) - \dot{H}_{i} \cdot (t_{\kappa} - t_{\iota})$$

$$(4)$$

Der Term  $\dot{H_j} - \dot{H_i}$  entspricht der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Punkten  $P_j$ und  $P_i$  und und ist der Quotient aus der doppelten Differenz und dem Zeitintervall zwischen den Messungen.

$$\dot{H}_j - \dot{H}_i = \frac{\Delta H_{i,j}^{t_{\iota,\kappa}}}{(t_\kappa - t_\iota)} \tag{5}$$

Die Verwendung von Geschwindigkeitsdifferenzen in Verbindung mit einem Geschwindigkeitsfeld ist in HOHDAHL (1975), GUBLER (1984) beschrieben.

Bei der Verwendung von Geschwindigkeitsdifferenzen kann das Schwerefeld unberücksichtigt bleiben, da bei der Differenzbildung der Einfluss der Schwere eliminiert wird (GUB-LER, 1984).

In einem linearen Modell werden die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen zwei Punkten als konstant angenommen.

Wird eine Höhendifferenz in zwei Geschwindigkeitsdifferenzen referenziert, so sind die Beobachtungen korreliert, diese Korrelation wird z. Z. nicht berücksichtigt.

### G P S - / G N S S - D a t e n

Eine wichtige Basis für die Auswertung sind die GPS-Koordinatensätze, da diese kontinuierlich bzw. als Wochenlösung vorliegen. GPS-Koordinatensätze liefern vollständige 3D-Koordinaten in einem globalen geozentrischen System mit vollständiger Kovarianzmatrix. Es ist deshalb sinnvoll, das Auswertesystem entsprechend als 3D-Modell auszulegen und die Höhenänderungen als Teilsystem zu definieren. Basis ist eine lineare Bewegung des Punktes im Horizontsystem:

$$x^{t} = x^{t_{\text{ref}}} + \dot{x} \cdot \left(t - t_{\text{ref}}\right) \tag{6}$$

Aufgrund von Antennenwechseln treten regelmäßig Sprünge in der Höhe auf, diese werden durch das Einführen von zeitabhängigen Offsets ot zur Höhe modelliert. Offsets gelten ab Zeitpunkt der Einführung bis zur Definition eines neuen Offsets.

$$x^{t} = x^{t_{\text{ref}}} + \underbrace{\dot{x} \cdot (t - t_{\text{ref}})}_{\text{lineare Punktbewegung}} + \underbrace{o^{t}}_{\text{Offset}}$$
(7)

GPS-Punkte sind häufig auf Gebäuden installiert, die jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen. In Form von Sinusschwingungen können diese saisonalen Bewegungen modelliert werden. Die Parameter einer Sinusschwingung sind die Amplitude c, die Kreisfrequenz  $\omega$  sowie die Phasenverschiebung  $\phi$ 

$$c \cdot \sin(\omega + \phi) = c \cdot (\sin\omega\cos\phi + \cos\omega\sin\phi) \quad \text{(Additionstheorem)}$$
$$= \underbrace{c \cdot \cos\phi}_{a} \sin\omega + \underbrace{c \cdot \sin\phi}_{b} \cos\omega$$
$$\phi = \arctan\left(\frac{b}{a}\right)$$
$$c = \sqrt{(a^2 + b^2)}$$

Für die Änderung der Koordinaten im lokalen kartesischen System folgt unter Verwendung der Koeffizienten a und b der Sinusschwingung:

$$x^{t} = x^{t_{\text{ref}}} + \underbrace{\dot{x}(t - t_{\text{ref}})}_{\text{lineare Punktbewegung}} + \underbrace{o^{t}}_{\text{Offset}} + \underbrace{\sum_{k=1}^{n} \left( a_{k} \sin\left(2\pi f_{k}(t - t_{\text{ref}})\right) + b_{k} \cos\left(2\pi f_{k}(t - t_{\text{ref}})\right) \right)}_{\text{saisonale Punktbewegung}} = x^{t_{\text{ref}}} + \Delta x^{t}$$
(8)

Die Koordinaten der Punkte (Rechts-, Hochwert sowie die ellipsoidische Höhe) zum Referenzzeitpunkt t<sub>ref</sub> werden vorausgesetzt. Die Punktbewegungen sind in einem lokalen kartesischen System definiert, während die GPS-Koordinaten in einem globalen kartesischen System vorliegen. Die Änderungen im lokalen System werden in das globale System durch die Rotation:

$$\Delta X^t = A \cdot \Delta x^t \tag{9}$$

übertragen. Die Rotationsmatrix A ist eine Funktion der geographischen Länge  $\Lambda$  und Breite  $\Phi$  des Punktes (SEEBER, 1989) und kann bei den geringen Änderungen als zeitinvariant be-

(8)

trachtet werden. Es werden nur geringe Positionsänderungen erwartet, so dass die physikalische Lotrichtung durch die Ellipsoidnormale ersetzt wird.

$$A = \begin{bmatrix} -\sin\Phi\cos\Lambda & -\sin\Lambda & \cos\Phi\cos\Lambda \\ -\sin\Phi\sin\Lambda & +\cos\Lambda & \cos\Phi\sin\Lambda \\ \cos\Phi & 0 & \sin\Phi \end{bmatrix}$$
(10)

Über längere Zeiträume kann das Bezugssystem des GPS variieren und zu systematischen Abweichungen in den Koordinaten zwischen zwei Epochen führen. Um diesen Effekt zu minimieren, wird eine Transformation in das Auswertemodell integriert: für jede GPS-Epoche werden sechs Parameter einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation (je drei Translationen  $T^t$  und drei Rotationen  $R^t$ , der Maßstab wird nicht bestimmt) geschätzt. Es werden somit keine absoluten Datumsinformationen, d. h. absolute Koordinaten, sondern nur relative Informationen bzw. die innere Geometrie des Koordinatensatzes genutzt. Auch das Importieren neuer GPS-Koordinatensätze wird vereinfacht, da kein einheitliches Datum für alle Koordinatensätze vorausgesetzt wird.

Definition der Helmert-Transformation für den Übergang geozentrischer Koordinaten  $X^t$  in das System der GPS-Epoche  $\bar{X}^t$ :

$$\bar{X}^t = T^t + R^t \cdot X^t \tag{11}$$

Die Rotationsmatrix hat folgenden Aufbau (SEEBER 1989):

$$R^{t} = \begin{bmatrix} +\cos\beta\cos\gamma & \cos\alpha\sin\gamma + \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma & \sin\alpha\sin\gamma - \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma \\ -\cos\beta\sin\gamma & \cos\alpha\cos\gamma - \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & \sin\beta\cos\gamma + \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma \\ \sin\beta & -\sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix}$$
(12)

Wird die lineare Geschwindigkeitsänderung im lokalen kartesischen System berücksichtigt ergibt sich für die Transformation:

$$\bar{X}^{t} = T^{t} + R^{t} \left( X^{t_{ref}} + A(\Delta x^{t}) \right)$$

$$\bar{X}^{t} = T^{t} + R^{t} \left( X^{t_{ref}} \right)_{\text{globale Transformation}}$$

$$+ A \left( \underbrace{\dot{x}(t - t_{ref})}_{\text{lineare Punktbewegung}} + \underbrace{o^{t}}_{\text{Offset}} \right)$$

$$+ \underbrace{\sum_{k=1}^{n} \left( a_{k} \sin \left( 2\pi f_{k} \left( t - t_{ref} \right) \right) + b_{k} \cos \left( 2\pi f_{k} \left( t - t_{ref} \right) \right) \right)}_{\text{IIII}} \right) \right)$$

$$(13)$$

saisonale Punktbewegung

Da das Auswertegebiet nur einen kleinen Teil der Erdoberfläche umfasst, sind lokale und globale Parameter hochgradig korreliert, für die Auswertung der GPS-Daten wird deshalb ein zweistufiges Vorgehen gewählt:

- Bestimmung der globalen Transformationsparameter  $T^t$  und  $R^t$ ,
- Bestimmung der lokalen Parameter *x*, *o<sup>t</sup>*, *a* und *b* unter Berücksichtigung der globalen Transformationsparameter.

## Radiale Basisfunktion (RBF)

Das Geschwindigkeitsfeld wird durch eine Linearkombination von radialen Basisfunktionen approximiert (BUHMANN, 2003; MARESCH, 2006). Vorteile gegenüber anderen Flächendarstellungen, z. B. *Non-Uniform Rational B-Splines* (NURBS) oder Polynomflächen sind:

- einfach zu berechnen,
- kein Ausschwingen an den Rändern wie bei Polynomflächen,
- einfache Integration von Zusatzinformationen in Form von Layern.

Als Basisfunktion wird eine Gaußsche Glockenkurve verwendet:

$$f(x,y) = c \cdot e^{-\left((x-x_f)^2 + (y-y_f)^2\right)/\alpha^2}$$
(14)

Die Höhe *c* entspricht im Modell der Geschwindigkeit. Der Parameter  $\alpha$  beschreibt den Wirkbereich der Funktion. Der Quotient –  $((x - xf)^2 + (y - yf)^2)/\alpha^2$  kann als Quadrat des normierten Abstandes vom Zentrum der Funktion interpretiert werden. Die Parameter *xf* und *yf* definieren das Zentrum der radialen Basisfunktion. Der Wert der Funktion f(x, y) ist nur abhängig vom Abstand des Punktes vom Zentrum der radialen Basisfunktion, die Funktion, die Funktion ist isotrop. Die Verwendung von Glockenkurven bei der Approximation ergibt eine glatte Oberfläche.

Die Abb. 30 zeigt eine räumliche radiale Basisfunktion mit den Parametern c = 1 und  $\alpha = \sqrt{2}$ . Die Position des Zentrums der radialen Basisfunktion ist durch xf = 0 und yf = 0 gegeben. Den Einfluss der Parameter c und  $\alpha$  auf die Form einer ebenen radialen Basisfunk-



Abb. 30: Beispiel einer 3D-radialen Basisfunktion 1,  $0 \cdot e^{-(x^2 + y^2)/\alpha^2}$ 

168



Abb. 31: Beispiele von 2D-radialen Basisfunktionen mit unterschiedlicher Höhe und Steilheit

tion wird in Abb. 31 gezeigt. Die Steilheit der Kurve ist umgekehrt proportional zum Parameter α. Die Geschwindigkeit ergibt sich aus der Summe der Anteile aller radialen Basisfunktionen, siehe Abb. 32. Die Summe weist einen harmonischen und glatten Verlauf auf.

Durch die Wahl der geeigneten Parameter c,  $\alpha$  sowie xf und yf für jede Glockenkurve, können durch Punkte definierte Kurven approximiert werden.

Für die Ausgestaltung der Approximation mit mehreren radialen Basisfunktionen ist das Verhältnis zwischen dem Parameter  $\alpha$  und dem Abstand der Zentren wichtig. In der Abb. 33 sind jeweils zwei radiale Basisfunktionen mit konstantem Abstand dargestellt. Der Parameter  $\alpha$  wird variiert. Des Weiteren wird dieser auf 75 % des mittleren Punktabstandes festgelegt. Kriterium für die Wahl von  $\alpha$  ist, dass die Kurve nur ein Maximum im Bereich einer Stützstelle aufweisen soll und der Verlauf monoton fallend ist. Ist  $\alpha$  zu klein, ergeben sich mehrere Maxima und ist  $\alpha$  zu groß, entfernt sich das Maximum von der Stützstelle.



Abb. 32: Summation der Anteile zweier radialer Basisfunktionen





Abb. 33: Beispiele von 2D-radialen Basisfunktionen mit unterschiedlicher Steilheit und konstantem Abstand

Das Geschwindigkeitsfeld wird jedoch nicht durch eine einzelne radiale Basisfunktion dargestellt, sondern durch mehrere Funktionen, deren Geschwindigkeiten zur Gesamtgeschwindigkeit aufsummiert werden. Die optimalen Parameter für die Geschwindigkeit, für und für die Position der radialen Basisfunktion können durch eine Ausgleichung bestimmt werden, sofern ausreichende Messpunkte zur Verfügung stehen.

## 7.3 Realisierung

Das Auswertegebiet umfasst den Bereich von der niedersächsischen Nordseeküste im Norden bis in das Leinebergland/TeuteburgerWald im Süden. Es werden nur Bereiche betrachtet, in denen Nivellement und GPS-Daten vorliegen, so dass eine gegenseitige Kontrolle der Daten möglich ist.

# Nivellement

Als Ausgangsdaten für die Berechnungen werden rohe Höhendifferenzen verwendet. Eventuell bereits angebrachte Korrekturen, z. B. normalorthometrische Korrekturen, sind entfernt. Alle instrumentellen und meteorologischen Korrekturen (z. B. Lattentemperatur) wurden, soweit die dafür notwendigen Informationen vorlagen, angebracht. Jeder Messung wird ein Datum zugeordnet (Mittel aus Anfang und Ende der Messung).

Die Nivellementbeobachtungen können folgenden Fehlereinflüssen unterliegen:

- unzureichende Zeiterfassung:
  - Für die frühen Jahrgänge ist das Jahr der Messung bekannt. Da in der Regel vom Frühjahr bis in den Herbst gemessen wird, beträgt der Fehler maximal ein viertel Jahr, da das Messdatum auf Jahresmitte gesetzt ist.
- ungenaue Lagekoordinaten: Die Koordinaten der Nivellementpunkte sind teilweise ungenau, da diese aus Karten abgegriffen wurden.
- Punktverwechslungen, Punktidentitäten:

Es können Punktverwechslungen aufgetreten sein.

Für die Berechnung der doppelten Differenzen müssen jeweils zwei Nivellementstrecken mit identischem Anfangs- und Endpunkt zu unterschiedlichen Zeitpunkten vorliegen.

Die Aufbereitung der Höhendifferenzen umfasst folgende Schritte:

- Bildung homogener Messepochen:
   Alle Messungen eines Jahres werden zu einer Mes
  - Alle Messungen eines Jahres werden zu einer Messepoche zusammengefasst. Jeweils zwei benachbarte Epochen werden auf identische Strecken getestet. Der zeitliche Abstand der Epochen muss mindestens zehn Jahre betragen. Durch diese Zeitspanne wird ein eventueller Fehler in der Datumserfassung auf fünf Prozent reduziert.
- Erfassung identischer Punkte:

Es werden die identischen Punkte zwischen beiden Epochen bestimmt.

- Besteht eine direkte Verbindung zwischen den Punkten, so wird diese gespeichert.
- Besteht keine direkte Verbindung, so wird f
  ür jede Epoche ein Graph aufgebaut und der k
  ürzeste Weg zwischen den Punkten gesucht. Dabei wird der Dijkstra-Algorithmus verwendet, als Gewichtung der Kanten im Graph dient die Nivellementwegl
  änge.

• Zusammenfassung zusammenhängender Strecken:

Zusammenhängende Strecken werden zu längeren Einheiten zusammengefasst. Um Geschwindigkeitsdifferenzen von 1 mm/km pro zehn Jahre aufdecken zu können, sollten die doppelten Differenzen eine Länge von ca. 4,5 km aufweisen. Dieser Wert wird durch die Vorgabe einer Standardabweichung von 0,5 mm/km<sup>-1/2</sup> für eine Höhendifferenz und einem Signal-Rausch-Verhältnis von 3 bestimmt. Durch den Aufbau längerer Strecken verringert sich auch der relative Fehler aufgrund ungenauer Koordinaten.

Die Bildung von doppelten Differenzen mit einem Zeitabstand von zehn Jahren und einer Länge von 4,5 km wirkt als Tiefpassfilter. Lokale Störungen werden gefiltert, die Auflösung des Modells entsprechend verringert. Dies ist kein Nachteil, da nur großräumige Bewegungen detektiert werden sollen.

#### GPS/GNSS

Die GPS-Koordinatensätze sind Wochenlösungen, die vom Programm WaSoft/Netz erzeugt wurden. Für die Datumsfestlegung wurde ein "weiches" Datum gewählt. Neben den Koordinaten steht auch die Kovarianzmatrix zur Verfügung.

### Radiale Basisfunktionen

Der Parameter  $\alpha$  und der Ort ( $x_f$ ,  $y_f$ ) sind individuell für jede RBF vorgegeben.  $\alpha$  wird auf ca. 75 % des mittleren Punktabstandes zwischen den SAPOS-Stationen festgelegt, dies entspricht einem Abstand von ca. 20 km.

Für die Auswertung der GPS-Daten werden die Zentren der radialen Basisfunktionen auf die SAPOS-Stationen mit den GPS-Messungen positioniert. Beim Auswerten von Nivellementdaten werden die Zentren in den Bereich der maximalen Geschwindigkeitsänderung platziert. Bei der Kombination aller Beobachtungen werden die Zentren der radialen Basisfunktionen aus beiden Auswertungen übernommen, bei zwei benachbarten Basisfunktionen wird die GPS-Station beibehalten. Die Geschwindigkeiten der radialen Basisfunktionen werden in der Ausgleichung geschätzt.

## 7.4 Ausgleichung

Es erfolgt eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen (NIEMEIER, 2002; JÄGER et al., 2005) in zwei Stufen:

- 1. Bestimmung der Transformationsparameter aller GPS-Epochen in Bezug zu den Referenzpunkten.
- 2. Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes auf Basis der mit in Stufe 1 bestimmten Parametern transformierten Punkte.

Die Beobachtungen werden als Funktion der unbekannten Parameter definiert. Die Ausgleichung erfolgt iterativ, die Parameter werden schrittweise verbessert und grobe Beobachtungsfehler werden abgewichtet. Dabei wird auch die Gruppengenauigkeit angepasst. Jede GPS-Epoche und alle doppelten Differenzen bilden jeweils eine Gruppe.

## Bestimmung der Transformationsparameter

Es liegen insgesamt 327 GPS-Epochen für den Zeitraum vom 26. 9. 2000 bis zum 3. 1. 2007 vor. Die Beobachtungen werden als unkorreliert betrachtet, die Genauigkeit wird mit 1 mm angenommen. Die sechs identischen Punkte für die Transformation sind:

- 0640 SAPOS, Dach der LGN, Podbielskistraße 331, 30659 Hannover
- 0642 SAPOS, Dach des Katasteramtes, Mercatorstraße 4 und 6, 49080 Osnabrück
- 0652 SAPOS, Dach des Katasteramtes, Neue Wiese 11, 31061 Alfeld
- 0658 SAPOS, Dach des Katasteramtes, Schilfstraße 6, 48529 Nordhorn
- 0668 SAPOS, Dach des Rathauses, Mühlenstraße 18, 49401 Damme
- PTBB IGS, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig.

Pro Epoche werden sechs Parameter (3 Translationen, 3 Rotationen) für jede GPS-Epoche geschätzt. Die Rotationen beziehen sich auf den Schwerpunkt des Netzes, somit sind Translation und Rotation nicht korreliert. Für jeden Punkt können mehrere zeitabhängige Offsets geschätzt werden. Die Offsets basieren auf bekannten Antennenwechseln und erkennbaren Sprüngen in den Zeitreihen der Punktkoordinaten. Es wird jeweils auf die GPS-Koordinaten der Epoche  $t_{ref}$  transformiert. Die Epoche  $t_{ref}$  entspricht der ersten GPS-Epoche vom 26. 9. 2000.

## Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes

Im Auswertegebiet liegen insgesamt 39.861 Nivellementbeobachtungen vor. Davon sind 1215 Mehrfachmessungen und 12.622 Hin- und Rückmessungen. Somit verbleiben noch 26.024 Nivellementbeobachtungen. Aus diesen Nivellementbeobachtungen werden 555 doppelte Differenzen mit einer Länge von minimal 4 km abgeleitet. Für den Übergang zwischen den Ostfriesischen Inseln wurden drei doppelte Differenzen manuell berechnet und eingetragen. Um doppelte Differenzen bilden zu können, wurden die Jahre 1954/1956 und 1957 zum Jahr 1956 und 1984 und 1985 zum Jahr 1984 zusammengefasst.

Für die Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes werden die GPS-Epochen aus Kap. 7.4 verwendet. Aus Antennenwechseln und Sprüngen in den Zeitreihen der Punktkoordinaten werden Offsets abgeleitet. Für ausgewählte Punkte werden saisonale Bewegungen in Form von Sinusschwingungen im Jahresrhythmus zugelassen.

Abb. 34 zeigt das Bewegungsverhalten des Punktes 0647 (Emden). Auffällig sind die Senkung des Punktes sowie die ausgeprägte saisonale Bewegung in der *y*-Komponente und die etwas verrauschte Höhe.

## 7.5 IKÜS-Software

In der IKÜS-Software wird das im Kap. 7.2 beschriebene Modell realisiert. Für diesen Zweck wurden die Konsolenprogramme niv beo und ikues entwickelt. Die Programmierung erfolgte in der Programmiersprache C++ in einer Microsoft Visual Studio 2005-Umgebung und baut auf dem bereits bestehenden Programmsystem Panda der Firma GEOTEC GmbH auf. Weiterhin wurden Funktionen des frei verfügbaren *GPS-Toolkits* (http://www.gpstk.org) und der quelloffenen *Boost Library* (http://www.boost.org) verwendet.

Das Programm n i v b e o dient der Aufbereitung der zur Verfügung stehenden Nivellementbeobachtungen:

Aufbereiten der Höhendifferenzen:

- Lesen der Höhendifferenzen aus der IKÜS-Datenbank,
- Ersetzen der Punktbezeichnung durch die IKÜS-Punktnummer,
- alle Beobachtungen zwischen identischen Punkten werden in einem Vektor gespeichert,
- Sortieren der Beobachtungen zwischen zwei Punkten nach dem Beobachtungsdatum,
- Mitteln von Wiederholungsmessungen,
- Mitteln von Hin- und Rückmessungen,
- Kontrolle auf grobe Fehler.

Berechnen der doppelten Differenzen:

• Beobachtungen eines Jahres werden zu einer Epoche zusammengefasst



Abb. 34: Zeitreihe des Punktes 0647 (Emden)

- Vergleich von zwei Epochen, deren zeitlicher Abstand mindestens 10 Jahre beträgt:
  - Suchen identischer Punkte in den zu vergleichenden Epochen,
  - in jeder Epoche werden die k
    ürzesten Verbindungen zwischen den identischen Punkten bestimmt,
  - Berechnen der doppelten Differenzen zwischen den identischen Punkten aus den Höhendifferenzen beider Epochen,
  - Bilden von Linien doppelter Differenzen mit Längen von mindestens 4 km,
  - Markieren der verwendeten Beobachtungen um eine Mehrfachnutzung zu vermeiden. Eine Beobachtung wird maximal in zwei Vergleichen verwendet.
- Speichern der berechneten doppelten Differenzen in der IKÜS-Datenbank.

Das Programm-Modul ik u es berechnet das in Abschnitt 7.2 beschriebene Geschwindigkeitsmodell. Die Eingangsdaten (GPS-Epochen und doppelte Differenzen der Nivellementbeobachtungen) und die Zusatzinformationen (zu bestimmende Parameter der SAPOS-Stationen und die Positionen der Radialen Basisfunktionen) werden der IKÜS-Datenbank entnommen. Als Ergebnis wird ein Protokoll mit den berechneten Offsets, den saisonalen Bewegungen der SAPOS-Stationen und den Parametern der Radialen Basisfunktionen erzeugt. Für die Generierung der Graphik mit GMT (*Generic Mapping Tools*) wird eine Datei mit entsprechenden Gitterdaten erzeugt.

Die Lösung wird nach vermittelnden Beobachtungen unter Minimierung der Verbesserungsquadratsumme (L2-Norm) ermittelt. Das Programm verwendet eine Profilspeichertechnik und berechnet die inverse Normalgleichungsmatrix basierend auf dem Cholesky-Algorithmus. Um grobe Beobachtungsfehler zu eliminieren und die Genauigkeiten im Rahmen einer Varianzkomponentenschätzung zu korrigieren, wird eine iterative Ausgleichung mit Fehlersuche durchgeführt.

Folgende Schritte werden vom Programm ik u es durchgeführt:

- (1) Berechnung der Transformationsparameter für die GPS-Epochen bezogen auf die Referenzpunkte:
  - Lesen der GPS-Epochen aus der IKÜS-Datenbank,
  - Bestimmen der Unbekannten (Transformationsparameter für jede GPS-Epoche und Offsets in den SAPOS-Stationen),
  - iterative Ausgleichung zur Bestimmung der Parameter,
  - Speichern der bestimmten Transformationsparameter in der IKÜS-Datenbank.
- (2) Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes:
  - Lesen der GPS-Epochen und der doppelten Differenzen aus der IKÜS-Datenbank,
  - Transformation der GPS-Koordinaten entsprechend der in Stufe 1 ermittelten Transformationsparameter
  - Bestimmen der Unbekannten (Parameter der Radialen Basisfunktionen, Offsets und saisonale Parameter der SAPOS-Stationen),
  - iterative Ausgleichung zur Bestimmung der Parameter,
  - Erzeugen der Graphiken mittels GMT,
  - Erstellen der Protokolldatei.

## 7.6 Ergebnis

Die Abb. 35 und 36 zeigen die Ergebnisse des Geschwindigkeitsfeldes, welche zum einen aus Nivellementdaten und zum anderen aus GPS-Daten abgeleitet wurden. Die Abb. 37 zeigt das Ergebnis des Geschwindigkeitsfeldes aus der Kombination der Nivellement- und GPS-Daten.

Im Bereich des Dollarts, im Westen des Jadebusens sowie an der Elbmündung in der Nähe von Cuxhaven ergibt sich übereinstimmend aus den Nivellement- und GPS-Daten eine Senkung des Gebietes mit einer vergleichbaren Geschwindigkeit. Im Bereich der Ostfriesischen Inseln liegen in der Regel nur GPS-Informationen vor. Die Senkung ist begründet durch die gleichartigen Bewegungen der Punkte 0670 und 0701. Im Bereich der Punkte 0671 und 0655 ist in den Nivellementdaten keine Senkung abzulesen.

Aus den linienhaften Informationen des Nivellements und den punktbezogenen Daten der SAPOS-Stationen wird ein flächenhaftes Geschwindigkeitsfeld abgeleitet. Das Ergebnis basiert somit auf einer Extrapolation, dies ist bei einer Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Es wird eine lineare Geschwindigkeit über den gesamten Bearbeitungszeitraum angenommen, für bestimmte Gebiete, z. B. im Bereich des Dollarts mit der Gasentnahme im Groninger Gasfeld, ist diese Annahme problematisch.



Abb. 35: Geschwindigkeitsfeld als Ergebnis der Auswertung der Nivellementdaten. Die Positionen der radialen Basisfunktionen sind durch einen Punkt gekennzeichnet



Abb. 36: Geschwindigkeitsfeld als Ergebnis der Auswertung der GPS-Daten. Die Positionen der radialen Basisfunktionen sind durch einen Punkt gekennzeichnet und entsprechen den SAPOS-Stationen. Rot sind jeweils die Referenzstationen für die Transformation der GPS-Epochen dargestellt


Abb. 37: Geschwindigkeitsfeld als Ergebnis der Kombination von Nivellement- und GPS-Daten. Die Positionen der radialen Basisfunktionen sind durch einen Punkt gekennzeichnet und entsprechen den SAPOS-Stationen. Rot sind jeweils die Referenzstationen für die Transformation der GPS-Epochen dargestellt

#### 8. Gesamtergebnisse

## 8.1 Aufbereitete Messdaten

In Vorbereitung auf eine gemeinsame Auswertung der höhenrelevanten, geodätischen Messungen mussten diese analysiert und aufbereitet werden.

Es wurden sämtliche Nivellementsdaten der Landesvermessungsämter, die für Nordwestdeutschland vorliegen, für IKÜS bearbeitet. Dies sind insbesondere die Messkampagne zum DHHN 12, NKN I, NKN II, DHHN 85, NKN III und DHHN 92. Zielsetzung war es, Höhenunterschiede zwischen Nivellementpunkten zur Verfügung zu stellen. Lagen nur ausgeglichene Höhen vor, so wurden diese in "Rohbeobachtungen" unter Berücksichtigung von Ausgleichungsverbesserungen, Reduktionen und Korrektionen zurückgerechnet.

Zusätzlich wurden alle verfügbaren Nivellements der BfG und WSV im Küstenbereich aufbereitet. Dabei wurden originale Feldbuchaufzeichnungen genutzt, um eventuell auftretende Digitalisierungsfehler zu minimieren. Da viele Nivellementpunkte über die Jahre mehr als eine Punktbezeichnung bekommen haben, wurden Punktidentitäten mit großem Aufwand identifiziert und diese Informationen mit den Messdaten in der IKÜS-Datenbank gespeichert.

Die GPS/GNSS-Beobachtungen aus dem nordwestdeutschen Bereich reichen bis etwa 1995 zurück. Die Beobachtungsdaten vor 1998 waren aber von vergleichsweiser schlechter Qualität, so dass sich die homogene Gesamtauswertung nur auf den Zeitraum von 1998 bis 2007 bezieht. Vertikale (und auch horizontale) Stationsbewegungen konnten auf der Basis von Wochenlösungen analysiert werden. Insgesamt wurden 441 GPS-Wochenlösungen in die IKÜS-Datenbank übernommen, wobei aufgrund von Verbesserungen in der GPS-Antennen- und -Empfängertechnik vielfach erst ab dem Jahr 2000 eine ausreichend hohe Ergebnisqualität erzielbar war.

Nur solche absolute Schwerewerte, die ab Mitte der 1990er Jahre gemessen wurden, weisen eine Qualität auf, die eine Bestimmung kleiner Höhenänderungen aus Schwereänderungen ermöglichen könnte. Die entsprechenden vom BKG zur Verfügung gestellten Absolutschweremessungen wurden in die IKÜS-Datenbank aufgenommen. Aufgrund der geringen Datengrundlage konnten sie aber keinen Beitrag zur Berechnung des Höhen-Geschwindigkeitsfeldes liefern.

Bei den Messungen an den Pegeln konzentrierte sich die Analyse und Aufbereitung insbesondere auf die geodätischen Pegelinformationen, also auf die nivellitischen Verbindungsmessungen zwischen Pegeln und Landeshöhennetz einerseits und den lokalen Nivellements zwischen Pegelfestpunkten und dem Pegelnullpunkt andererseits. Die Messungen wurden aufbereitet und in die IKÜS-Datenbank übernommen. Die zugehörigen Wasserstände wurden analysiert und mit zugehörigen Metainformationen in die Datenbank eingearbeitet.

## 8.2 IKÜS-Datenbank

Um Daten, die aus verschiedenen Quellen stammen und unterschiedliche Eigenschaften haben, in einem mathematischen Modell zu kombinieren, ist ein einheitlicher Datenzugriff eine grundlegende Voraussetzung. Dafür wurde im Projekt eine Datenbank entwickelt und mit den Beobachtungen der verschiedenen Sensoren gefüllt. Als Ergebnis entstand eine einmalig konsistente Datenbasis von homogenen höhenrelevanten Zeitreihen für das Gebiet der Nordseeküste. Diese diente dem IKÜS-Projekt als Grundlage aller Untersuchungen und sie wird auch für zukünftige wissenschaftliche Analysen zur Verfügung stehen.

Bei der Entwicklung der IKÜS-Datenbank wurden für die einzelnen Datentypen der höhenrelevanten Sensoren standardisierte Austauschformate festgelegt, sofern diese für die IKÜS-relevanten Informationen existieren. Alternativ wurden Datenformate um weitere Informationen ergänzt oder neu als IKÜS-Format definiert. Auf diese Weise konnte eine offene Datenbank realisiert werden, die auch für zukünftige Messdaten offen ist. So wird es auch in Zukunft möglich sein, regelmäßig neue Höhenbestimmungen der unterschiedlichen Sensoren in die Datenbank einzufügen und so aktuelle und verbesserte Gesamtlösungen zu rechnen. Durch die Speicherung aller originalen Rohbeobachtungen in der Datenbank, wird zudem eine spätere, verbesserte Nachbearbeitung und Analyse der Daten ermöglicht.

Eine zugehörige Online-Dokumentation der Datenbank enthält Inhaltsbeschreibungen und Einheitenangaben aller Datenfelder und erleichtert damit die Navigation innerhalb der Datenbank. Die verwendeten Kommentarfelder in den Datenbanktabellen ermöglichen eine Interpretation der Datensätze ohne vorheriges Studium der Dokumentation.

Für den Aufbau der Datenbank wurden bestehende Hard- und Softwarestrukturen der LGN genutzt, die eine optimale Pflege der Datenbank gewährleisten sollen und gleichzeitig eine besonders wirtschaftliche Lösung bieten. Das im LGN-Netz integrierte "IKUES-Portal" ermöglicht einen aktuellen Zugriff auf die Produkte des Projektes sowie dynamische Zugriffe auf definierte Datenbankinhalte (www.lgnapp.niedersachsen.de/ikues).

## 8.3 IKÜS-Software und Höhen-Geschwindigkeitsfeld

Mathematische Basis für die Erzeugung eines Höhen-Geschwindigkeitsfeld sind radiale Basisfunktionen in Gestalt von Gaußschen Glockenkurven. Dieser Modellansatz zur gemeinsamen Auswertung der höhenrelevanten Messungen wurde softwaretechnisch in der IKÜS-Software realisiert.

Die Anwendung der IKÜS-Software, also die eigentliche IKÜS-Auswertung, beschränkte sich dabei weitestgehend auf Gebiete, für die sowohl Nivellement- als auch GPS-Daten vorlagen, so dass eine gegenseitige Kontrolle möglich war. Die Höhenänderungen beziehen sich auf Referenzpunkte im südlichen Bergland von Niedersachsen, die als stabil angenommen werden. Es werden nicht Bewegungen einzelner Punkte geschätzt, sondern es wird ein lineares Höhen-Geschwindigkeitsfeld unter Berücksichtigung der Nachbarschaft generiert.

Aus nivellitischen Höhendifferenzen, die zwischen 1919 und 2001 gemessen wurden, wurden Geschwindigkeitsdifferenzen (doppelte Differenzen) abgeleitet und in das Modell integriert. Für die Berechnung von Geschwindigkeitsdifferenzen wurden Messungen zwischen identischen Punkten verwendet. Der Abstand zwischen den Punkten beträgt mindestens vier Kilometer, die Zeitdifferenz zwischen den Messungen mindestens zehn Jahre.

Aus den kontinuierlich vorliegenden Messungen der einzelnen GPS-Stationen wurden Wochenlösungen (GPS-Epochen) berechnet (siehe Abschnitt 3.1). Für jede GPS-Station können Zusatzparameter (Offsets oder saisonale Bewegungen) eingeführt werden. Da die aus GPS abgeleiteten Punktkoordinaten als 3D-Daten vorliegen, wird das Auswertesystem auch in 3D definiert. Die Geschwindigkeiten und eventuelle Zusatzparameter werden im Horizontsystem bestimmt. Da die GPS-Punkte im globalen kartesischen Koordinaten vorliegen, werden die Änderungen vom Horizontsystem in das global kartesische System gedreht und durch eine Transformation in das System der GPS-Wochenlösung transformiert. Durch die Transformation wird nur die innere Geometrie der GPS-Wochenlösungen verwendet.

Die Zentren und die Steilheit der radialen Basisfunktionen werden vorgegeben, die Höhe wird in der Ausgleichung bestimmt. Die Zentren wurden bei den bisherigen Auswertungen in den GPS-Punkten angesiedelt. In Gebieten, in denen nur Nivellementdaten vorlagen, wurden die radialen Basisfunktionen im Bereich großer Geschwindigkeitsänderungen positioniert. Ihre Steilheit wurde so gewählt, dass die radialen Basisfunktionen als Tiefpassfilter wirkten und somit nur großräumige Bewegungen detektiert wurden. Um den Bezug zu den Referenzpunkten herzustellen, wurden in einer Ausgleichung die Transformationsparameter der GPS-Epochen bezogen auf die Referenzpunkte bestimmt.

In einer anschließenden kombinierten Ausgleichung von Nivellementdaten und den transformierten GPS-Epochen wurden das Geschwindigkeitsfeld und die Zusatzparameter der GPS-Punkte bestimmt.

Im Bereich des Dollarts, im Westen des Jadebusens sowie an der Elbmündung in der Nähe von Cuxhaven ergab sich übereinstimmend aus den Nivellement- und GPS-Daten eine Senkung des Gebietes mit einer vergleichbaren Geschwindigkeit.

Aus den linienhaften Informationen des Nivellements und den punktbezogenen Daten der GPS-Stationen wird ein flächenhaftes Geschwindigkeitsfeld abgeleitet. Das Ergebnis basiert somit auf einer Extrapolation, dies ist bei einer Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Es wird eine lineare Geschwindigkeit über den gesamten Bearbeitungszeitraum angenommen, für bestimmte Gebiete, z. B. im Bereich des Dollarts mit der Gasentnahme im Groninger Gasfeld, ist diese Annahme problematisch.

## 9. Danksagung

Das diesem Artikel zugrundeliegende Vorhaben IKÜS wurde als Verbund-Projekt des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter den Förderkennzeichen 03KIS055 – 03KIS058 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den 9. Danksagung

Das diesem Artikel zugrundeliegende Vorhaben IKÜS wurde als Verbund-Projekt des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter den Förderkennzeichen 03KIS055 – 03KIS058 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Autoren.

## 10. Schriftenverzeichnis

- ADV: Die Wiederholung des deutschen Nordseeküstennivellements in den Jahren 1949 bis 1955 (1959) und der Vergleich mit der ersten Messung in den Jahren 1928 bis 1931 (1937). Forschungsbericht, 1960.
- ADV: Feldanweisung für die Präzisionsnivellements zur Erneuerung und Wiederholung des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN) im Zeitraum 2006 bis 2011. Forschungsbericht, 2007.
- ADV: Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (GeoInfoDok). (6.0). Forschungsbericht, 2008.
- ADV: Webseite der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland. URL http://www.adv-online.de, 2008.
- BAKER, T. F.: Absolute sea level measurements, climate change and vertical crustal movements. In: Global and Planetary Change 8, 149–159, 1993.
- BRUSSEL, G.: Endbericht des hydrostatischen Nivellements im Emsbereich/Rijkswaterstaat. Abschlussbericht, 2000.
- BUHMANN, M. D.: Radial Basis Functions. Cambridge University Press, 2003.
- GEORGIADOU, Y. and KLEUSBERG, A.: On Carrier Phase Multipath Effects in Relative GPS Positioning. In: Manuscripta Geodaetica 13, 172–179, 1988.
- GUBLER, E.: Die Bestimmung rezenter Krustenbewegungen mit Hilfe von Präzisionsnivellements – Ein Überblick. In: Vermessungswesen und Raumordnung 46, Nr. 2, 97–106, 1984.
- GURTNER, W.: RINEX: The Receiver Independent Exchange Format. URL ftp://ftp.unibe.ch/ aiub/rinex/, 2002.
- HOHDAHL, S. R.: Models and Strategies for Computing Vertical Crustal Movement in the United States. International Symposium on Crustal Movements, Grenoble, 1975.
- IKÜS: Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik (IKÜS)/Technische Universität Dresden, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Technische Universität Braunschweig, Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen. Abschlussbericht des BMBF Förderprojektes 03KIS55–58, 2009.
- JENSEN, J. und MUDERSBACH, C.: Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. In: Tagungsband Workshop: Klimaänderung und Küstenschutz. Hamburg, S. 115–128, 2004.
- JÄGER, R.; MÜLLER, T.; SALER, H. und SCHWÄBLE, R.: Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2005.
- KEYSERS, C. J.: Erfassung von Schwereänderungen in zwei lokalen Netzen in der Niederrheinischen Bucht von 1998 bis 2000. Shaker Verlag, Aachen, 2001.
- KUNZ; KÖVES: ATSE Automatische Tidescheitelwerterkennung / Wasser- und Schifffahrtsamt Cuxhaven. 1991. – Programmbeschreibung LAWA UND BMV (Hrsg.): Pegelvorschrift. Berlin und Bonn, 1997.

- LEONHARD, T.: Zur Berechnung von Höhenänderungen in Norddeutschland Modelldiskussion, Lösbarkeitsanalyse und numerische Ergebnisse. Hannover, Universität Hannover, Fachrichtung Vermessungswesen, Dissertation, 1987.
- LINDENTHAL, N.; SCHÖN, S.; NEUNER, H.; KUTTERER, H. and JAHN, C.-H.: On the Monitoring Of GNSS References Stations With Independent Geodetic Techniques. 2nd International Colloquium – Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, Padua, Italy, 14. 10.–16. 10. 2009.
- LOCKMAN, D.; DEBES, N.; CZARSKI, C. und MENGE, J.: Oracle 9i Datenbankentwicklung. Markt+Technik Verlag, München, 2002.
- LONEY, K.: Oracle Database 10g Die umfassende Referenz. Carl Hanser Verlag München Wien, 2005.
- MARESCH, T.: Mathematik-Verknüpfung von 2D- und 3D-Punktwolken. Gießen, Justus-Liebig-Universität Gießen, Dissertation, 2006.
- NIEMEIER, W.: Ausgleichungsrechnung: Eine Einführung für Studierende und Praktiker des Vermessungs- und Geoinformationswesens. De Gruyter, Berlin, 2002.
- REICHSAMT FÜR LANDESAUFNAHME: Die Nivellements von hoher Genauigkeit, Höhen über N.N. im neuen System der Trigonometrischen Abteilung des Reichsamts für Landesaufnahme. Selbstverlag, 1927.
- REICHSAMT FÜR LANDESAUFNAHME: Die Feineinwägungen zur Beobachtung säkularer Bodenbewegungen im Gebiet der deutschen Nordseeküste, Nordseeküstennivellement 1928 bis 1931. Selbstverlag, 1932.
- ROST, C. and WANNINGER, L.: Carrier phase multipath mitigation based on GNSS signal quality measurements. In: Journal of Applied Geodesy 3(2009), Juni, Nr. 2, 81–87 DOI 10.1515/ JAG.2009.009.
- SEEBER, G.: Satellitengeodäsie. De Gruyter, Berlin, 1989.
- SINEX WORKING GROUP: SINEX Solution (Software/technique) INdependent EXchange Format (Version 1.00). 1996.
- TEFERLE, F.; BINGLEY, R.; WILLIAMS, S.; BAKER, T. and DODSON, A.: Using continuous GPS and absolute gravity to separate vertical land movements and changes in sea-level at tidegauges in the UK. In: Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 364 (2006), Nr. 1841, 917–930. – ISSN 1364-503X (Paper).
- UNILOG INTEGRATA TRAINING AG: Oracle Datenbankmodellierung und Datenbankdesign. Seminarunterlagen. 2006.
- VESTØL, O.: Determination of Postglacial Land Uplift in Fennoscandia from Leveling, Tidegauges and Continuous GPS Stations using Least Squares Collocation. In: Journal of Geodesy 80, Nr. 5, 248–258, 2006.
- WANNINGER, L.: Detailanalyse der Mehrwegeverhältnisse auf dem Dach einer GPS-Referenzstation. In: 5. GPS-Antennenworkshop. Frankfurt/Main, 2003.
- WANNINGER, L.: Correction of apparent position shifts caused by GNSS antenna changes. In: GPS Solution, 2009. DOI 10.1007/s10291-008-0106-z, 2009.
- WÜBBENA, G.; SCHMITZ, M. und BOETTCHER, G.: Zum Einfluss des Antennennahfeldes. In: 5. GPS-Antennenworkshop. Frankfurt/Main, 2003.

# Modellierung morphodynamischer Prozesse an sandigen Brandungsküsten

Von DIRK VAN RIESEN und DAGMAR MUCH

# Zusammenfassung

Mathematische Modelle werden im Bereich des Küstenschutzes und der Küstenforschung vermehrt eingesetzt. Hydrodynamisch-numerische mit Seegang und Strömung gekoppelte Tidemodelle gelten dabei als äußerst etabliert. Seit einigen Jahren werden ebenso gekoppelte morphodynamische Modelle mit Seegang und Sedimenttransport eingesetzt.

Die vom BMBF geförderte Pilotphase zum KFKI-Projekt "MorphoSylt" (03KIS064) hatte zur Aufgabe, die Möglichkeiten der morphodynamischen Modellierung für die Westküste Sylts über eine vergleichende Bewertung von weltweit eingesetzten numerischen Modellen und eine Einschätzung der Modellleistung und -eignung zu prüfen.

Aus den Erfahrungen dieser Literaturrecherche resultiert eine Modellvorauswahl für den Bereich der Westküste Sylts. Die Pilotphase stellt dabei auch die Herausforderungen und Grenzen bei der morphodynamischen Modellierung und der Beurteilung von Modellergebnissen heraus.

#### Schlagwörter

Numerische Modellierung, Morphodynamik, sandige Küste, Brandungsküste, Sandersatzmaßnahmen, Sandaufspülung, Sylt

#### Summary

Mathematical models are increased used for coastal protection and coastal research. Thereby, hydrodynamic-numerical tidal models coupling swell and current are considered as extremely established. For some years morphodynamic models coupling swell and sediment transport are used as well.

Main issue of the pilot phase of the KFKI project "MorphoSylt" (03KIS064), sponsored by the German Ministry of Education and Research (BMBF), was to examine the possibilities of the morphodynamical modelling for the west coast of the North Frisian Island called Sylt. This takes place by a comparative evaluation from world-wide used numerical models and by an estimate of the model achievement and model suitability.

From these experiences a preselection of models for possible resuming investigations of the model achievement for the west coast of Sylt resulted. Thereby, the pilot phase refers to the challenges by modelling morphodynamics and the evaluation of model results generally.

## Keywords

Numerical Modelling, morphodynamics, sandy coastline, high-energy coastline, nourishments, Sylt

## Inhalt

1.	Einleitung	182
2.	Situation	182
	2.1 Untersuchungsgebiet	183
	2.2 Aktueller wissenschaftlicher Stand	184
3.	Herausforderungen in der morphodynamischen Modellierung	184
4.	Modellanforderungen.	185
5.	Modellbeurteilungen	186
6.	Datengrundlage und Messkonzept	189
7.	Fazit und Ausblick	189
8.	Danksagung	190
9.	Schriftenverzeichnis	191

## 1. Einleitung

Die Insel Sylt stellt aufgrund der hydrographischen und hydrologischen Bedingungen insgesamt ein offenes System mit einer negativen Sandbilanz dar. Bei Sturmflut erodieren Kliff und Dünen. Durch wellen- bzw. tideinduzierte Längsströmungen wird das Material anschließend küstenparallel nach Norden und Süden verfrachtet, bis es schließlich an den Inselenden in den großen Tiderinnen für das Inselsystem verlorengeht. Dieser Sandverlust beträgt im Jahresmittel ungefähr 1 Mio. m<sup>3</sup>, was langfristig einen jährlichen Küstenrückgang von rund einem Meter bedeutet. Da für die Standsicherheit von Deckwerken und Ufermauern bzw. für den Erhalt von Dünen und Kliff gewisse Strandbreiten nicht unterschritten werden dürfen, werden seit 1972 an der Westküste regelmäßig Sandersatzmaßnahmen vorgenommen (ALW HUSUM, 1997). Dadurch konnte ein weiterer Küstenrückgang an Düne und Kliff sowie die Zerstörung vorhandener Küstenschutzanlagen weitgehend verhindert werden. An den Inselenden sind dagegen Erosionen im Vorstrandbereich festzustellen.

Durch die regelmäßig auf dem trockenen Strand durchgeführten Sandaufspülungen wurden umfangreiche Vordünen geschaffen, wobei die im Vorstrandbereich auftretenden Erosionen nicht immer ausgeglichen werden konnten. Das hat zur Folge, dass sich dort der Eintrag der Seegangsenergie auf den Strand erhöht. Zum Schutz der bestehenden Strände, Dünen und Kliffs wird daher auch eine Versorgung der strandnahen Brandungszone durch das Einbringen von Sand seeseitig des Riffes als sogenannte Vorstrandaufspülung durchgeführt.

Um die bei der Planung von Sandersatzmaßnahmen geforderte Prognose der Wirksamkeit zu ermöglichen, sollen morphodynamische Simulationsmodelle zum Einsatz kommen.

#### 2. Situation

Die Beurteilung der morphodynamischen Veränderungen im Strand- und Vorstrandbereich in Abhängigkeit der hydrologischen Randbedingungen ist eine wesentliche Voraussetzung für eine effiziente Planung von Strand- und Vorstrandaufspülungen.

Bisher ist im Bereich der Westküste Sylts eine solche Beurteilung nur im Rückblick (Hindcast) durch eine Analyse der gewonnenen Vermessungsdaten möglich. Zur Kontrolle der Maßnahmen und zur Dokumentation der Sandumlagerungen während der Bauphase erfolgen baubegleitende hydrographische Vermessungen in den Aufspülbereichen. Nach Abschluss der Aufspülarbeiten wird eine Komplettvermessung analog zur Vorvermessung durchgeführt. Wiederholungsvermessungen finden rund alle drei Monate bzw. ereignisbezogen nach Sturmfluten statt, um die erfolgten Materialumlagerungen zu erfassen und zu dokumentieren.

Die Verwendung von morphodynamischen Modellsystemen ermöglicht zudem die Beurteilung von morphodynamischen Veränderungen auch in der Vorschau (Forecast). Dadurch kann zum einen das Verständnis der Prozesse im Vorstrand- und Strandbereich verbessert, zum anderen aber auch eine Optimierung des Küstenschutzes und somit eine etwaige Kostenoptimierung erzielt werden.

Voraussetzung dafür ist ein gut kalibriertes und validiertes Modellsystem sowie synoptische Daten für Hydrologie, Sedimentologie, Meteorologie sowie Daten der terrestrischen und hydrographischen Vermessung.

## 2.1 Untersuchungsgebiet

Die Westküste der Nordseeinsel Sylt zeichnet sich durch die Profilgestalt eines Riff-Rinne-Systems aus. Das ungefähr 300 Meter parallel der Insel vorgelagerte Sandriff ist charakteristisch für den Vorstrandbereich der Insel (Abb. 1). Zwischen diesem Riff und dem Strandbereich finden ständig Sedimentaustauschprozesse statt. Dieses Riff ist es auch, welches als natürlicher Wellenbrecher fungiert und die Wellenenergie bereits vor dem Strandbereich abmindert. Die Energiedissipation am Riff nimmt jedoch mit steigendem Wasserstand bei Sturmfluten ab, sodass die Wellenenergie mitunter ungebremst auf die Küste trifft. Die West-



Abb. 1: Untersuchungsgebiet "Westküste Sylt"

#### 184

küste ist hauptsächlich durch Strandbereiche mit Dünen gekennzeichnet. Vereinzelt finden sich auch feste Bauwerke wie Ufermauern, Deckwerke oder Buhnen entlang der Westküste wieder (ALR HUSUM, 1985; 1997).

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Südteil der Insel. Es erstreckt sich, wie in Abbildung 1 dargestellt, auf rund 12 km Länge und 1 km Breite von Rantum (Station 56+584) nach Hörnum (Station 68+087). Dort werden seit 1983 fortwährend Küstenschutzmaßnahmen durch Strandaufspülungen vorgenommen, zuletzt im Jahr 2007 in den Bereichen 64+287 bis 65+537 und 66+437 bis 67+587. Im Jahr 2006 fanden erstmals im Süden der Insel Vorstrandaufspülungen statt. Dabei wurde in den Bereichen von Rantum (57+585–58+084), Puan Klent (59+085–60+086) und Sansibar (61+436–62+336) Sand im Vorstrand verklappt, da dieser in den letzten Jahrzehnten fortschreitend erodierte.

# 2.2 Aktueller wissenschaftlicher Stand

Seit mehreren Jahrzehnten werden mathematische Modelle zur Simulation der Küstenund Binnengewässerprozesse eingesetzt. Zur Entwicklung der Simulationsverfahren wurden national und international erhebliche Aufwendungen erbracht. Nachdem anfangs nur einfache konzeptionelle oder empirische Modelle eingesetzt wurden und später hydrodynamisch-numerische Tidemodelle für Wasserstand und Strömung hinzukamen, werden heutzutage gekoppelte morphodynamische Modelle mit Seegang und Sedimenttransport eingesetzt.

Die Hafenbautechnische Gesellschaft (HTG) kommt bei ihrer Auflistung der prioritären Forschungs- und Entwicklungs-Schwerpunkte im Jahr 2006 zu dem Ergebnis, dass es für die Modellierung der Morphodynamik im Küsten- und Ästuarraum bisher kein von der Fachwelt anerkanntes zuverlässiges Modell für den operationellen Einsatz gibt, da es bislang an einer allgemein akzeptierten Methodik für die Erfassung der skalenübergreifenden Prozesse unter Berücksichtigung von Wind, Seegang, Strömung und Sedimenteigenschaften fehlt (DÜCKER u. OUMERACI, 2006). Die im Rahmen von KFKI-Forschungsprojekten ("Ebbdelta" und "Promorph") geförderten Arbeiten zu diesem Thema befassten sich bislang mit der Untersuchung der mittelfristigen Änderung der Küstenmorphologie und der Sedimentdynamik in den Wattgebieten Schleswig-Holsteins. Wichtige Erkenntnisse zur grundsätzlichen Eignung von morphodynamischen Modellen als Prognosewerkzeug in großräumigen Wattgebieten konnten dabei gesammelt werden (MAYERLE u. ZIELKE, 2005). Da die Bedingungen an einer sandigen Brandungsküste merklich unterschiedlich zu denen in Wattgebieten sind und an der Westküste Sylts auch kurz- und langfristige morphologische Entwicklungen untersucht werden sollen, sind die Ergebnisse aus diesen vorhergehenden Projekten nur bedingt verwendbar.

# 3. Herausforderungen in der morphodynamischen Modellierung

Eine morphologische Veränderung ist das Ergebnis verschiedener natürlicher (Abb. 2) und anthropogener Faktoren. Diese zahlreichen Faktoren treten in unterschiedlichen Raumund Zeitskalen auf. Zudem sind diese Faktoren häufig noch unterschiedlicher Art und können kontinuierlich oder zufällig sowie reversibel oder irreversibel vorkommen (EUROSION, 2004). Die gegenseitigen Wechselwirkungen sind dabei vorwiegend nichtlinear, sodass die Vorhersage der morphologischen Veränderungen umso komplexer und schwieriger wird, je größer die Zeit- und Raumskalen sind (LECHER et al., 2001).

Die daraus resultierenden Schwierigkeiten innerhalb der morphodynamischen Modellierung sind vielfältig. Mit mehreren Parametern für Tide, Seegang, Strömung, Morphologie, Meteorologie etc. kann die Realität zwar genauer nachgebildet werden, es bleiben aber die Unsicherheiten hinsichtlich Größenordnung und Relevanz der Einzelparameter in den physikalischen Prozessen, die sowohl selbst als auch in ihren Wechselbeziehungen untereinander verstanden sein müssen. Hinzu kommt, dass die Identifizierung der ausschlaggebenden Prozesse in den unterschiedlichen Zeitskalen schwierig ist. Die entscheidenden Prozesse für die Veränderungen in der Morphologie sind bei einem kurzen Zeitraum, wie etwa bei einem Sturmflutereignis, nicht dieselben wie bei einem langen Zeitraum (NEWE, 2004). Generell besteht ein schmaler Grad zwischen einer zu einfachen (z.B. CERC-Formel) und einer zu detaillierten Beschreibung der wirksamen Prozesse, wie in Black-Box-Systemen wie LIT-PACK oder MIKE21 (PILKEY u. COOPER, 2002; COOPER u. PILKEY, 2004). VAN RIJN et al. weisen zusätzlich auf die Fehlermultiplikation im Laufe der Simulationsdauer einer morphodynamischen Modelluntersuchung hin, die sich durch Fehler in den Eingangsdaten und in den Modellformulierungen sowie durch Extrapolationsfehler infolge einer Modellanwendung außerhalb der räumlichen und zeitlichen Gültigkeit ergibt.



Abb. 2: Zeit- und Raumskalen der Morphologie beeinflussenden natürlichen Faktoren (EUROSION, 2004)

## 4. Modellanforderungen

Die Modellanforderungen richten sich nach dem Untersuchungsgegenstand und den vorliegenden Randbedingungen in dem Untersuchungsgebiet.

Mit den Ergebnissen der Modellrechnung im Bereich der Westküste Sylt soll die Wirksamkeit von Sandersatzmaßnahmen im Strand- und Vorstrandbereich im Hinblick auf eine Optimierung des Küstenschutzes untersucht werden. Zusätzlich sollen mithilfe der nume186

rischen Modelle vergleichende Analysen der morphologischen Aktivität ohne und mit Küstenschutzmaßnahmen sowie aufgrund unterschiedlicher Ausführungsvarianten der geplanten Küstenschutzmaßnahme (Tetrapodenwerke, Strandmauern, Deckwerke, Sandersatzmaßnahmen) vorgenommen werden.

Mit den Modelluntersuchungen sollen dabei kurz- (Tage; Sturmflutereignis), mittel-(Wochen bis Jahre) und langfristige (Dekaden) morphodynamische Veränderungen untersuchbar sein. Daher muss vor allem bekannt sein, welche physikalischen Prozesse für die morphologische Aktivität vornehmlich relevant sind und in dem Modell berücksichtigt sein müssen (HEYER et al., 2007).

Für die Charakterisierung des Systems "Westküste Sylt" gilt Folgendes:

- Tide (Mesotidenküste; Tidenhub zwischen 1,8 m und 3,6 m)
- Seegang (Brandungsküste, Wellentransformation, ind. Brandungsströmung)
- Riff-Rinne-System (Wechselwirkung Riff Rinne Strand)
- Interaktion Wellen Strömung
- Wellen- und strömungsinduzierter Küstenlängs- und -quertransport
- Windinduzierter Sedimenttransport

# 5. Modellbeurteilungen

Die Pilotphase verdeutlicht, dass es unzählige Modelle und Modellansätze für die Untersuchung morphodynamischer Entwicklungen gibt. Eine Vielzahl der Modelle ist dabei jedoch nur projektgebunden und wird nicht zur Praxisreife weiterentwickelt.

Die Erfahrungen aus der Pilotphase zeigen auch, dass es zurzeit nur wenige öffentliche Modellstudien gibt, die einen Modell-Natur-Vergleich beinhalten und eine Beurteilung der Modellfähigkeiten auch über das jeweils dargelegte Untersuchungsgebiet zulassen (COOPER et al., 2004; RUESSINK et al., 2006; SOUTHERLAND et al., 2004).

Eine genaue Beurteilung ist aus den genannten Gründen daher nur bedingt möglich.

Aus der Abschätzung der Modelleignung für eine mögliche Verwendung im Bereich der Westküste Sylts über Modellbeschreibungen, wissenschaftliche Artikel, Forschungsberichte und, sofern vorhanden, über Kalibrierungs- und Validierungsberichte resultiert die Tabelle 1. Als Beurteilungskriterien zählen neben der Qualität der Modellergebnisse zu Naturdaten, die für den Bereich der Westküste Sylts relevanten implementierten physikalischen Prozesse (siehe Kap. 4), die Möglichkeiten der Simulation von Baumaßnahmen insbesondere mit externen Sandquellen (Sandaufspülung) sowie bereits ausgewiesene Natureinsätze der Modelle.

Die Beurteilung einiger Modelle wie bspw. Asmita, Estmorf, GENESIS, NEWDUNE oder SBEACH ist aufgrund verfügbarer ausführlicher Modellbeschreibungen oder Validierungsberichten und der darin erwähnten Modelleinschränkungen eindeutig (STEETZEL et al., 1998; EUROSION, 2004; HANSON u. KRAUS, 1989; CEM-PART III, 2002; DETTE et al., 1994; LARSON u. KRAUS, 1990; WISE et al., 1996).

Für die Vielzahl der Modelle erfolgt die Bewertung durch gewonnene Erkenntnisse aus Modellstudien und wissenschaftlichen Berichten. So auch für LITPACK und COSMOS. Für die Untersuchung der morphodynamischen Entwicklung an der Brandungsküste Sylts sind diese Modelle nicht zu empfehlen, da sie Schwächen bei der Simulation unter Berücksichtigung von Küstenschutzmaßnahmen, des Wellenbrechens und für mittelfristige Untersuchungen haben (SZMYTKIEWICZ et al., 2000; VAN RIJN et al., 2000).

Modelle wie TIMOR, UNIBEST, PONTOS und CROSMOR heben sich dagegen nach

solchen Studien positiv ab. PONTOS und TIMOR werden dabei auch bereits erfolgreich für praktische Fragestellungen an sandigen Küsten und bei Sandersatzmaßnahmen angewandt (STEETZEL et al., 1998 u. 2004; ZANKE et al., 2001 u. 2002; ZANKE, 2005). UNIBEST und CROSMOR finden dagegen in unterschiedlichen Modellstudien einzelner Forschungsprojekte, aus denen Erkenntnisse zu Modelleinschränkungen gewonnen werden konnten, Erwähnung. Aus diesen Ergebnissen empfiehlt sich ein Einsatz von CROSMOR besonders im Vorstrandbereich, wohingegen eine Simulation für den unmittelbaren Strandbereich einschließlich Düne nicht zu vertrauenswürdigen Ergebnissen führt (VAN RIJN et al., 2000). UNIBEST dagegen ermöglicht auch eine Untersuchung der Küstenprofilentwicklung unter dem Einfluss von Dünenabbrüchen (VAN RIJN et al., 2000; WALSTRA, 2002).

Zur genaueren Begründung der Beurteilung einzelner Modelle siehe LKN HUSUM (2008).

Modellübergreifend bleibt die Erkenntnis, dass die Qualität von morphodynamischen Modellen momentan noch von einem nicht ausreichenden Prozessverständnis, besonders im Bereich der welleninduzierten Küstenlängs- und Küstenquerströmungen und des welleninduzierten Sandtransportes, eingeschränkt ist. Mit morphodynamischen Modellen sind nur qualitative Aussagen über die morphologische Entwicklung möglich. Die quantitative Vorhersagefähigkeit bzgl. der morphologischen Veränderung ist als niedrig einzustufen (GRAS-MEIJER, 2002; VAN RIJN et al., 2003). Prinzipiell sind prozessbasierte Modellsysteme für die Simulation von Sandaufspülungen und ihrem zukünftigen Verhalten geeignet. Die Modellierung muss allerdings unter dem Vorbehalt erfolgen, dass die physikalischen Prozesse im Küstennahbereich noch nicht hinreichend verstanden und möglicherweise nicht ausreichend im Modell implementiert sind (GRASMEIJER, 2002).

Es gibt zurzeit kein Modellsystem, dass kurzfristige und langfristige morphologische Entwicklungen für klein- und großräumige Untersuchungsgebiete an sandigen Brandungsküsten naturähnlich simulieren oder gar prognostizieren kann. Es ist fraglich, ob ein solches "Universalmodell" überhaupt umsetzbar ist, wenn unterschiedliche Prozesse für die jeweilige Veränderungen verantwortlich und nicht zwangsläufig für die Beschreibung der physikalischen Prozesse in den unterschiedlichen Skalen gleich entscheidend sind.

Ein weiterer verbesserungsbedürftiger Punkt der morphodynamischen Modellierung ist, dass die Ergebnisse stark von der Wahl des verwendeten Sedimenttransportansatzes abhängig sind und verschieden gewählte Ansätze mitunter zu großen Ergebnisbreiten führen können. Morphologische Veränderungen im Strandbereich aufgrund äolischen Sedimenttransportes können zurzeit in den Modellen ohnehin noch nicht berücksichtigt werden. Tab. 1: Übersicht der beurteilten Modelle für den operationellen Einsatz an der Westküste Sylts (LKN HUSUM, 2008)

Model	EINSALZGEDIEC	klasse	문	Mo	ST	× QW	errugparkeit	Nontakt /Hersteller	Ulmension	mogi. simulations- zeitraum	Beurteinug	Froncia
Asmita	NL	ب	8	•	×		k.A.	Stive, Delft Hydraulics, NL	ē	langfristig	0	Ausschließlich für Untersuchungen in Tidebecken und Außendelta, nicht fü offene Küstensysteme
Beachplan	I, UK	_		×	×	*	(ommerziell	HR Wallingford, UK	2D	langfristig	•	()
CCH2D	RC, USA	Ŀ	×	•	×	×	(ommerziell	Wang, Jia, Hu, NCCH, Univ. Mississippi, USA	2D, Q3D	kurz- bis mittelfristig	•	1)
COSMOS	Å	٩	×	×	×	×	commerziell	Soulby, HR Wallingford, UK	2D. Q3D	kurzfristig	0	Modelleinschränkung bei Wellenbrechen (Energiedissipation in Brandungszonen) und mittefristiger Untersuchungszeiträume
CROSMOR	UK. (NL)	e.	×	×	×	×	commerziell	Grasmeljer. Universität Utrecht. NL	2D	kurz- bis mittelfristig	•	Guter Modell-Natu-Vergleich eines Sylt-ähnlichen Untersuchungs- gebletes. bes. für den Vorstandbereich. Berückstchtigung von Transport. prozessen entlang von Riffen, Wellenbrechen und Energiedissipation im prozessen entlang von Riffen. Meilenbrechen und Energiedissipation im pereicht-von Riffen und Sambänken.
Delft3D	NL, (B), D, UK	L	×	×	×	×	commerziell	Roelvink, WL Delft Hydraulics, NL	3D	mittel- und langfristig	•/•	$^{25}$ . Unzureichende Prozessbeschreibung von Weilenverformung infolge Grundberührung und des Sedimenttransportes in Küstenquerrichtung
Estmorf	NL	(F)	×	•	×	×	k.A.	k.A.	đ	langfristig	0	Ausschließlich für Untersuchungen morphologischer Entwicklung in Ästuaren und Tidebecken
GENESIS	LT, UK, USA, (NZ)	-	×	×	×	×	commerziell	Hansen, Uni Lund, S; Kraus, USACE, USA	đ	mittel- bis langfristig	0	Keine Berücksichtigung von wechseinden Wasserständen, des Küstenquer Itransportes und küstennaher Prozesse sowie Riff-Rinne-Systemen
LITPACK	B, D, DK, E, I, UK, USA	L&P	×	×	×	×	(ommerziell	Danish Hydraulic Institute (DHI), DK	ē	langfristig	o/0	Modellvergleichsstudie mit versch. Dünenabbruchmodellen sowie Hauseigene Erfahrungen am LKN
MARINA	CDN, D	Ŀ	×	×	×	×	(ommerziell	Milbradt. TU Hannover (smile consult GmbH), D	2D	k.A.	•	1)
MIKE21	DK, D, UK, USA	LL.	×	×	×	×	commerziell	рні, рк	2D	mittelfristig	0	Modellstudle, ungenügende Berücksichtigung von Långsströmungen infolge Wellenbrechen (Transportkapazitäten), auffallend große Ergebnis schwankungen durch Korndruchmesserwahl
NEWDUNE	٥	٩	•	•		×	vorhanden	Newe, TU Braunschweig, D	đ	kurzfristig	0	Keine Berückstchitigung von Rith-Rinne-Systemen, kein Sedimentitransport seeselig des Brechuktes, keine Prozesse in der Wasserwechselzone Jund in der Brandungszone
PISCES	NL	Ŀ	×	×	×	×	(ommerziell	Chesher, Southgate, HR Wallingford, UK	2D	mittelfristig	•	1)
PONTOS	B, NL	-	×	×	×	×	commerziell	Steetzel, Alkyon, NL	2D	mittel- bis langfristig	•/•	<sup>1)</sup> : größräumige und langfristige Untersuchungen zur Küstenentwicklung fü sandige Küsten seien aber II. Modellbeschreibung möglich
SBEACH	NSA	٩	×	×	×	×	commerziell	Kraus, USACE, USA; Larson, Uni Lund, S	đ	kurzfristig	0	Keine Ansätze für Längstransport und Sedimentiaustausch, für Prozesse ir der Wasserwechsetzone und für den strömungsinduzierten Sediment- transport
SediMorph	٥	k.A.		,	,	×	k.A.	Malcherek, BAW Hamburg, D	2D, 3D		0	Validerungsbericht für Ästuare: keine Untersuchung vor Sohtformenentwicklung (Riffeln, Dünen) möglich, keine Berücksträgung von Schwebstofftransport in der Wassersäule sowie kaum von Seegangs prozessen
TIMOR	D (Entwickler)	L	×		×	×	k.A.	Zanke, Mewis, TU Darmstadt, D	2D, Q3D	mittel- bis langfristig	•/•	$^{2b}$ . Ergebnisstudien unter Wind- & Seegangsereignisse zeigen gute Nachbildung von Rinnenverlagerungen
Trim	٥	k.A.	×	×	×		k.A.	Casulli, BAW Hamburg, D	2D, 3D	k.A.	0	Validierungsbericht: Arwendungsempfehlung für tidedominante Ästuar bereiche, keine bewegliche Sohle
UNIBEST	NL, UK	L&P	×	×	×	×	commerziell	waistra, WL[Delft Hydraulics, NL: Sogreah, F	2D	kurz- bis langfristig	•/0	<sup>25</sup> : Anwendungsstudien: Untersuchung von Küstenprofilertwicklung infolge tide- und seegangsinduzierter Strömungen möglich. Anwendungs- empfehlung für Stumflutereignisse und salsonaler Untersuchungen be gandersatzmächahmen
UnTrim	٥	k.A.	×	·	×		k.A.	Casulli, BAW Hamburg, D	2D, 3D	k.A.	•	1
3DD Suite	ZN	(J	×	×	×	×	(ommerziell	Black, ASR Limited, NZ	3D	k.A.	•	1)

Erklärungen Medallidesen Dese

Modellklasse: Profilmodell, KüstenLinienmodell, Flächenmodell

Module: HydroDynamik, Wellen (Seegang), SedimentTransport, MorphoDynamik

Zeitskalen: Einordnung der Simulationsbreiten in short-, medium- und long-term ist stark subjektiv. Bei einigen Autoren sind Wochen und Monate noch mittelfristig, bei anderen schon langfristig kurzfristig: Stunden - Tage (Sturmflutereignis) hier:

mittelfristig: Wochen/ Monate - max. 1-2 Jahre (Saisonal)

langfristig: Jahre - Dekaden

Verwendbarkeit: • = (eher) JA; o = (eher) NEIN; • = vakant; • / o = vakant (Tendenz)

Pro/Kontra: <sup>1)</sup> Keine (öffentlichen) Validierungs- und Kalibrierungsdokumente oder Anwendungsstudien einsehbar; <sup>2)</sup> Keine (öffentlichen) Validierungs- und Kalibrierungsdokumente einsehbar

188

## 6. Datengrundlage und Messkonzept

Die Datengrundlage im Untersuchungsgebiet ist neben der Qualität des eingesetzten Modells entscheidend für eine erfolgreiche morphodynamisch-numerische Modellierung. Eine ausreichende Datenmenge und -qualität ist für eine sorgfältige Kalibrierung und Validierung unabdingbar. Hydrologische, sedimentologische, meteorologische und geodätische Datensätze sollten für die Kalibrierungs- und Validierungszeiträume möglichst zeitgleich erfasst vorliegen, da Strömung, Sediment und Morphologie in Wechselwirkung zueinander stehen und sich auch mit jedem anthropogenen Eingriff verändern.

Für den Bereich Sylt, insbesondere der morphodynamisch aktiven Westküste, sind nicht zuletzt durch die Brisanz des Küstenrückgangs und den kontinuierlichen Küstenschutzmaßnahmen immer wieder Messungen der Belastungsgrößen und der Morphologie durchgeführt worden. Dadurch liegt für Sylt ein großes Datenvolumen vor.

Dieses Datenvolumen beinhaltet eine Vielzahl von verwertbaren Tide-Zeitreihen und Vermessungsdaten. Für Seegang, Strömung und Sedimentologie sind die Datenbestände jedoch bisweilen stark fragmentarisch, sodass eine Anwendung von weitgehend räumlich und zeitlich geschlossenen Datensätzen für die Kalibrierung und Validierung auf unterschiedlichen Zeiträumen nicht möglich sind. Für eine morphodynamisch-numerische Modellierung sind die Datenbestände aus dem bestehenden Messkonzept insgesamt daher nicht optimal.

Im Rahmen der Pilotphase wurde eine neue Richtungswellenmessboje beschafft und etwa auf Höhe des Profils 19s (Abb. 1) vor der Küste verankert. Diese zum Messpfahl Westerland ergänzenden Seegangsmessungen für den südlichen Teil der Westküste sind ein anfänglicher Versuch, das Messkonzept zu optimieren. Durch die neu gewonnenen Datensätze ist eine kleinräumige Beschreibung des Seegangs an der Westküste Sylts möglich.

Eine viel größere Einschränkung für die Kalibrierung und Validierung auf der Grundlage des Sedimenttransportes ist das bislang nicht gelöste Problem, Geschiebefrachten zu messen. Die Wahl des Geschiebeparameters kann daher ausschließlich auf Annahmen erfolgen.

Für eine zukünftige Verwendung von morphodynamischen Modellen ist es daher wünschenswert, die Datenbestände durch Messeinsätze in einem definierten Referenzgebiet an der Westküste Sylts zu optimieren. Innerhalb dieses Referenzgebietes könnte durch kontinuierliche hydrologische Messungen sowie regelmäßige und ereignisbezogene hydrographische wie terrestrische Vermessungen und sedimentologische Messungen eine genauere Datenlage erarbeitet werden, um so eine Kalibrierung und Validierung bei zukünftigen möglichen (Probe-)Simulationen zu ermöglichen.

## 7. Fazit und Ausblick

Die Pilotphase des KFKI-Projektes "MorphoSylt" brachte die Erkenntnis, dass die Qualität von morphodynamischen Modellen durch das mangelnde physikalische Prozessverständnis einschließlich ihrer Wechselwirkungen insbesondere an sandigen Brandungsküsten noch recht eingeschränkt ist.

Die quantitative Vorhersagefähigkeit morphodynamischer Modelle ist zwar recht niedrig, qualitative Aussagen zur Abschätzung von Auswirkungen geplanter Baumaßnahmen sind aber möglich. Prinzipiell sind prozessbasierte Modellsysteme unter dem Vorbehalt, dass die physikalischen Prozesse im Küstennahbereich noch nicht hinreichend verstanden und u.U. nicht ausreichend im Modell implementiert sind, für die Simulation und Untersuchung von Sandaufspülungen daher geeignet (GRASMEIJER, 2002).

Die Vorstellung von einem Universalmodell, welches sowohl für kurz- und langfristige als auch für klein- und großräumige Untersuchungen verwendet werden kann, kann nur eine Vision sein und ist aufgrund der verschiedenen Wertigkeit der physikalischen Prozesse in den jeweiligen Skalen kaum umsetzbar.

Die Pilotphase zeigt weiterhin, dass die Verwendbarkeit von morphodynamischen Modellen an eine ausreichende Datenmenge (Hydrodynamik, Sedimenttransport, Morphodynamik) geknüpft ist. Für eine numerische Modellierung der Morphodynamik und deren vergleichende Beurteilung mit anderen Modellsystemen ist ein möglichst synoptischer Datensatz für den Modell-Natur-Vergleich notwendig. Eine Optimierung des Messkonzeptes für die morphodynamische Modellierung in einem definierten Referenzgebiet ist daher anzustreben.

Mit den Erfahrungen aus der Pilotphase ist es ausschließlich durch eine Literaturrecherche nicht möglich, eine stichhaltige und fundierte Modellwahl für die Modellierung der morphologischen Veränderungen an der Westküste Sylts zu treffen. Eine vergleichende Bewertung der Leistung von Modellen ist nur über einen Modell-Natur-Vergleich unter identischen Naturbedingungen möglich. Das Streben nach einer solchen Bewertung setzt voraus, dass Vergleiche von Modellergebnissen und Feldmessungen an repräsentativen Referenzgebieten erfolgen. Daher wurde eine Modellvorauswahl (Tab. 1) getroffen, deren Modelle in weiteren Untersuchungen näher zu untersuchen sind.

Aus diesen Untersuchungen können Stärken und Schwächen der einzelnen Modelle erkannt und so konkrete Aussagen zur Modellleistung gemacht werden. Außerdem können so Erfahrungswerte in der Modellanwendung gewonnen werden, die auch zu einer Optimierung des Messkonzeptes beitragen können.

Die Ergebnisse zukünftiger Modelluntersuchungen müssen letztendlich eine Übertragbarkeit des Modells auf verschiedene Untersuchungsgebiete gewährleisten. Erst dann unterliegt das morphodynamische Modell den Anforderungen und Voraussetzungen für einen praktischen Einsatz.

Aus den Ergebnissen dieser Modellstudien könnte schließlich eine Modellwahl explizit für die Untersuchung der morphodynamischen Prozesse im Strand- und Vorstrandbereich für den Bereich der Westküste Sylts resultieren.

Insgesamt besteht auch weiterhin ein großer Forschungsbedarf im Hinblick auf das Prozessverständnisse der küstennahen Prozesse (Welleneinwirkung auf Sedimenttransport, welleninduzierte Küstenlängs- und Querströmungen, Geschwindigkeitsfelder in der Brandungszone), auf die Beschreibung des äolischen Transportes und auf die Prozessrelevanz in den unterschiedlichen Zeitskalen.

# 8. Danksagung

Die Pilotphase zur Modellierung der morphodynamischen Prozesse im Strand- und Vorstrandbereich sandiger Brandungsküsten (MorphoSylt) wurde als Projekt des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Förderkennzeichen 03KIS064 über einen Zeitraum von acht Monaten gefördert. 9. Schriftenverzeichnis

- ALW HUSUM: Fachplan Küstenschutz Sylt, Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum, unveröffentlicht, 1985.
- ALW HUSUM: Fachplan Küstenschutz Sylt Fortschreibung, Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum, unveröffentlicht, 1997.
- CEM-PART II: CEM-Reports Chapter 2: Longshore Sediment Transport, USACE, 2002.
- COOPER J. A. G. and PILKEY, O. H.: Perspectives Longshore Drift: Trapped in an exepted universe, Journal of Sedimentary Research, Vol. 74, No. 5, 599–606, 2004.
- DETTE, H. H.; NEWE J. und PETERS, P.: Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt/Phase II – Bericht Nr. 778: Numerische Modellierung des Küstenabbruches an der Westküste der Insel Sylt, BMFT-Forschungsvorhaben, 1994.
- DÜCKER, H. P. und OUMERACI, H.: Herausforderung für die Forschung im Küsteningenieurwesen, maritimen und binnenländischen Hafen- und Verkehrswasserbau aus dem Blickwinkel der HTG, HANSA International Maritime Journal, 143. Jahrgang, Nr. 1, 2006.
- EUROSION: A guide to coastal erosion management practices in Europe: lessons learned, Service contract B4-3301/2001/329175/MAR/B3, 2004.
- GRASMEIJER, B. T.: Process-based cross-shore modelling of barred beaches, Universität Utrecht, Dissertation, 2002.
- HANSON, H. and KRAUS, N. C.: GENESIS: Generalized Model for Simulation shoreline change, Report 1: Technical Reference, USACE, 1989.
- HANSON, H. and KRAUS, N. C.: GENESIS: Generalized Model for Simulation shoreline change, Report 2: Workbook and system user's manual, USACE, 1989a.
- HEYER H.; OUMERACI, H.; MALCHEREK, A.; ZANKE, U. C. E.; STROTMANN, T.; VON STORCH, H. und MILBRADT P.: Langfristige Vorhersageverfahren und Vorhersagemodelle einschließlich Einfluss auf Baumaßnahmen, HANSA, 144. Jahrg. Nr. 1, 66–71, 2007.
- LARSON, M. and KRAUS, N. C.: SBEACH: Numerical model for storm-induced beach change, Report 2 – Numerical formulation and model tests, USAC, 1990.
- LECHER, K.; LÜHR, H.-P. und ZANKE, U. C. E: Taschenbuch der Wasserwirtschaft, 8. Auflage, Vieweg, 2001.
- LKN HUSUM: Modellierung der morphodynamischen Prozesse im Strand- und Vorstrandbereich sandiger Brandungsküsten, Schlussbericht, BMBF-Forschungsvorhaben (03KIS064), 2008.
- MAYERLE, R. und ZIELKE, W.: Vorhersage mittelskaliger Morphodynamik PROMORPH, Die Küste, 69, 2005.
- NEWE, J.: Strandprofilentwicklung unter Sturmflutseegang Methodik für großmaßstäbliche 2D-Experimente und Berechnungsansätze, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2004.
- PILKEY, O. H. and COOPER, J. A. G.: Longshore Transport Volumes: A critical view, Journal of Coastal Research, Special Issue 36, 572–580, 2002.
- RUESSINK, B. G.; KURIYAMA, Y.; RENIERS, A. J. H. M.; ROELVINK, J. A. and WALSTRA, D. J. R.: Modeling cross-shore sandbar behaviour on the time scale of weeks, Journal of Geophysical Research, 2006.
- STEETZEL, H. J.; DE VREONG, H.; VAN RIJN, L. C. and STAM, J.-M.: Morphological modelling using a modified multi-layer approach, Coastal Engineering Proceedings, 26. CEC, Vol. 2, 2368–2381, 1998.
- STEETZEL, H. J. and WANG, Z. B.: A longterm morphological model for the whole Dutch Coast – Part I: model formulation, WL|Delft Hydraulics & Alkyon, Z3334/A1000, unveröffentlicht, 2004.
- STEETZEL, H. J. and WANG, Z. B.: A longterm morphological model for the whole Dutch Coast – Part II: Application of the model, WL|Delft Hydraulics & Alkyon, Z3334/A1000, unveröffentlicht, 2004.
- SUTHERLAND, J.; PEET, A. H. and SOULSBY, R. L.: Evaluating the performance of morphological models, Coastal Engineering 51, 917–939, 2004.
- SZMYTKIEWICZ, M.; BIEGOWSKI, J.; KACZMAREK, L. M.; OKRÓJ, T.; OSTROWSKI, R.; PRUSZAK, Z.; RÓZYNSKY, G. and SKAJA, M.: Coastline changes nearby harbour structures: comparative analysis of one-line models versus field data, Coastal Engineering 40, 119–139, 2000.

- VAN RIJN, L. C.; RUESSINK, B. G. and MULDER, J. P. M. et al.: COAST3D-EGMOND, The behaviour of a straight sandy coast on the time scale of storms and seasons; Process knowledge and guide lines for coastal management, Abschlussbericht, Aqua Publications, 2000.
- VAN RIJN, L. C.; WALSTRA, D. J. R.; GRASMEIJER, B.; SUTHERLAND, J.; PAN, S. and SIERRA, J. P.: The predictability of cross-shore bed, evolution of sandy beaches at the time scale of storm and seasons using process-based Profile models, Coastal Engineering, 47, 295–327, 2003.
- VAN RIJN, L. C. et al.: Sandpit: Sand transport and morphology of offshore sand mining pits Part II: Detailed scientific and practical results, Aqua publications, 2005.
- WALSTRA, D. J. R.: Unibest-TC Userguide, WL/Delft Hydraulics, Z2897, 2002.
- WISE, R. A.; SMITH, S. J. and LARSON, M.: SBEACH: Numerical model for storm-induced beach change, Report 4 Crossshore transport under random waves and model validation with SUPERTANK and field data, USACE, 1996.
- ZANKE, U. und WITTING, M.: Entwicklungsprognose Südhiddensee Simulationen zur Problematik eines möglichen Durchbruchs, Präsentationsfolien, 2001.
- ZANKE, U. C. E. and MEWIS, P.: Morphodynamisches Simulationssystem TIMOR, Wasser & Boden 54/4, pp 14–22, 2002.
- ZANKE, U. C. E.: Langfristige Küstenveränderungen im Fachplangebiet Fischland unter dem Gesichtspunkt zusätzlicher Einbauten in See, Gutachtliche Stellungnahme, unveröffentlicht, 2005.

# Über neuere Verfahren der Wasserstandsund Sturmflutvorhersage für die deutsche Nordseeküste

### Von Sylvin H. Müller-Navarra

## Zusammenfassung

In diesem Aufsatz werden die Verfahren der Wasserstands- und Sturmflutvorhersage für die deutsche Nordseeküste beschrieben, wie sie im Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zur Erledigung der gesetzlichen Aufgaben betrieben werden. In den letzten 15 Jahren hat es dabei eine rasante Entwicklung gegeben. Mitte der 1990er Jahre, als auf meteorologischer Seite die numerische Wettervorhersage (NWV) der klassischen Synoptik bei der maritimen Windvorhersage ernsthafte Konkurrenz machte, wurden auf ozeanographischer Seite noch hauptsächlich empirische Wasserstandsvorhersageverfahren angewendet. Es gab zwar bereits numerische Wasserstandsmodelle, gespeist aus der NWV, aber die Vorhersagen erreichten noch nicht die Genauigkeit der manuellen Vorhersage. Das ist jetzt anders. Die Wasserstandsvorhersage schöpft parallel Information aus vielen Welten – Synoptik, Empirie, NWV, Wasserstandsmodelle, Statistik, Automation – und gewinnt dadurch an Qualität.

#### Schlagwörter

Wasserstandsvorhersage, Sturmflutvorhersage, Deutsche Bucht

#### Summary

This paper describes the methods used at Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH, Federal Maritime and Hydrographic Agency) to forecast water levels and storm surges for the German North Sea coast, in accordance with the agency's statutory task. There has been rapid development in this area in the past fifteen years. In the mid1990s, when numerical weather prediction in meteorology competed increasingly with the traditional synoptic approach in maritime wind forecasting, oceanographers still relied mainly on empirical water level prediction methods. Although there already existed numerical water level prediction techniques at the time which used numerical weather prediction input data, the accuracy of these predictions lagged behind that of the traditionally made predictions. The situation is different now. Today, water level forecasts are based on information from a variety of sources: synoptics, empiricism, numerical weather prediction, water level models, statistics, and automated systems – which increases their quality considerably.

#### Keywords

Water level forecast, storm surges forecast, German bight

# Inhalt

1.	Einle	eitung	194
2.	Verf	ahren und Informationsflüsse	194
	2.1	Die Atmosphärenmodelle GME und COSMO-EU	195
	2.2	Das Atmosphärenmodell GFS	196
	2.3	Gezeitenvorausberechnung	196
	2.4	Numerische Modelle, 2D-Windstaumodelle, 3D-Schelfmeermodelle	197

2.5	BSH-MOS (Model Output Statistics)	197
2.6	Wasserstandsdatenfernübertragung (WDFÜ)	198
2.7	Automatische Scheitelwerterkennung und Windstauermittlung	198
2.8	Empirisch-statistische Verfahren	199
2.9	Synoptik, Modellinterpretation	199
2.10	Mensch-Maschine-Mix (MMM), Windstauvorhersage	200
2.11	Wasserstandsvorhersage, Sturmflutwarnung	201
Weit	ere Möglichkeiten und Ausblick	201
Danl	rsagung	202
Schri	iftenverzeichnis	202
	2.5 2.6 2.7 2.8 2.9 2.10 2.11 Weit Danl Schrift	2.5BSH-MOS (Model Output Statistics)2.6Wasserstandsdatenfernübertragung (WDFÜ)2.7Automatische Scheitelwerterkennung und Windstauermittlung2.8Empirisch-statistische Verfahren2.9Synoptik, Modellinterpretation2.10Mensch-Maschine-Mix (MMM), Windstauvorhersage2.11Wasserstandsvorhersage, SturmflutwarnungWeitere Möglichkeiten und AusblickDanksagungSchriftenverzeichnis

#### 1. Einleitung

Eine die ganze deutsche Nordseeküste und die Gezeitenflüsse abdeckende, regelmäßige Wasserstandsvorhersage für die Öffentlichkeit gibt das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) bzw. seine Vorgängerorganisationen seit mehr als 80 Jahren heraus (TOMCZAK, 1954; MÜLLER-NAVARRA, 2009a). Hinzu treten bei Bedarf Sturmflutwarnungen. Diese Aufgaben sind dem BSH durch das Seeaufgabengesetz zugeschrieben (ANONYMUS, 2002/2006), wobei eine sowohl inhaltlich als auch räumlich enge Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD/Seewetteramt) in Hamburg praktiziert wird.

Die im Laufe der Jahre zur Wasserstandsvorhersage verwendeten Verfahren sind in der Literatur hinlänglich beschrieben worden (TOMCZAK, 1960; ANNUTSCH, 1976; MÜLLER-NAVARRA und GIESE, 1999; MÜLLER-NAVARRA et al., 2003). Da der astronomisch erklärbare Anteil an den Wasserstandsschwankungen – die Gezeiten – schon längere Zeit recht genau vorauszuberechnen ist, behandeln die genannten Zitate vornehmlich den Windstauanteil. Unter Windstau wird hier die Differenz zwischen Scheitelwasserstand und astronomisch vorausberechneter Hoch- bzw. Niedrigwasserhöhe verstanden. Dabei können die Eintrittszeit des Scheitelwasserstandes und die astronomische Eintrittszeit zeitlich gegeneinander verschoben sein. Für Zwecke der Windstauvorhersage wurden bis Mitte der 1990er Jahre vornehmlich empirische Verfahren eingesetzt, bei denen aus Windvorhersagen (Stärke und Richtung) für die Deutschen Bucht der örtliche Windstau aus Tabellen entnommen und dem astronomisch vorausberechneten Gezeitenwasserstand (ANONYMUS, 2009) hinzuaddiert wurde, um so den Gesamtwasserstand vorherzusagen.

Seit Anfang der 1980er Jahre werden beim BSH numerische Windstaumodelle operationell gerechnet (SOETJE und BROCKMANN, 1983), die von Wettermodellen des Deutschen Wetterdienstes angetrieben werden. Seit etwa 1995 ist deren Vorhersagegenauigkeit den bis dato benutzten rein empirischen Verfahren überlegen. Das gilt aber nicht in jedem Falle und ganz sicher nicht für jede schwere Sturmflut (MÜLLER-NAVARRA, 2008).

Dargestellt werden im Folgenden bewährte und neuere Verfahren zur Windstauermittlung, wobei hier deren automatische Verknüpfung im Vordergrund steht.

# 2. Verfahren und Informationsflüsse

In den letzten 15 Jahren haben sich die Möglichkeiten der Wasserstandsvorhersage radikal erweitert. Es stehen nicht nur erheblich mehr Wasserstandsdaten von vielen Gezeitenpegeln über die Wasserstandsdatenfernübertragung (WDFÜ) bereit, sondern auch Ergebnisse aus unterschiedlichen numerischen Modellketten mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Damit ist eine rein manuelle Bearbeitung der riesigen Datenmengen nicht mehr möglich, und es sind neue Verfahren der Informationsverknüpfung gefragt. Abb. 1 zeigt die Verfahren und Informationsflüsse, wie sie im BSH z. Zt. operationell genutzt, betrieben und angewandt werden. Im Folgenden werden diese Verfahren und deren Verknüpfung beschrieben. Wo bereits an anderer Stelle über die Einzelverfahren ausführlich berichtet wird, genügt hier eine kurze Beschreibung und der Verweis auf das entsprechende Literaturzitat. Der Übersichtlichkeit halber soll sich die Struktur dieses Aufsatzes an der Abb. 1 orientieren; die Quadrate im Flussdiagramm werden in einzelnen Abschnitten von oben (Abschn. 2.1–2.3) nach unten (Abschn. 2.11) abgehandelt.



Abb. 1: Verfahren und Informationsflüsse zur Ermittlung des Windstaus

## 2.1 Die Atmosphärenmodelle GME und COSMO-EU

Jedes numerische Wasserstandsmodell benötigt an seinen Gitterpunkten zumindest Wind- und Luftdruckvorhersagen; in aller Regel werden diese von numerischen Atmosphärenmodellen bereitgestellt. Das BSH nutzt zum Antrieb seiner Schelfmeer-Modellkette (DICK et al., 2001) ausschließlich Ergebnisse der NWV des DWD (MAJEWSKI et al., 2002; STEPPELER et al., 2003). Neben Wind- und Luftdruck erhält das 3D-Modell (BSHcmod) der BSH-Modellkette noch die Lufttemperatur, die spezifische Feuchte und die Gesamtbewölkung. Damit sind dann auch Berechnungen der Wärmeflüsse an der Meeresoberfläche möglich (MÜLLER-NAVARRA und LADWIG, 1997). 196

## 2.2 Das Atmosphärenmodell GFS

Das von der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) betriebene Global Forecast System (GFS) (KALNAY et al., 1990) kommt hier als unabhängige Alternative zur DWD-Modellkette über BSH-MOS (Abschn. 2.5) ins Spiel. Die Ergebnisse des GFS sind weltweit über Internet frei verfügbar und erfahren dadurch eine breite Anwendung. Die hier benutzte GFS-Version hat eine horizontale Auflösung von 1° meridional und longitudinal und rechnet wie GME/COSMO-EU viermal täglich. GFS liefert im BSH-MOS-Verfahren die meteorologischen Größen als Eingangsgrößen für die MOS-Prädiktoren.

## 2.3 Gezeitenvorausberechnung

Wasserstanddaten von mehr als 150 gezeitenbeeinflussten Pegeln werden im BSH analysiert und astronomische Gezeitenvorausberechnungen erstellt. Dieses geschieht jeweils für das gesamte nachfolgende Jahr im Voraus. Die Vorausberechnungen werden in den Gezeitentafeln und im Gezeitenkalender veröffentlicht (ANONYMUS, 2009) und stehen zusätzlich als digitale Daten zur Verfügung. In diesen Datensätzen enthalten sind Hoch- und Niedrigwasserhöhen sowie deren Eintrittszeiten. Diese sehr präzisen Datensätze sind das unverzichtbare Gerüst für jede Wasserstandsvorhersage, und es ist auch wegen der ausgeprägten morphodynamischen Prozesse an der deutschen Nordseeküste notwendig, dass die Analysen und Vorausberechnungen jährlich auf der Basis aktueller Messdaten erfolgen.



Abb. 2: Linien gleichen mittleren Hochwasserzeitunterschiedes gegen den Durchgang des Mondes durch den Nullmeridian. Aus: Gezeitentafeln für das Jahr 2010

Die mittleren Hochwasserintervalle – das sind die Zeiten, die zwischen einer Mondkulmination und den örtlichen Hochwasserzeiten im Mittel verstreichen – nehmen in der Deutschen Bucht Werte zwischen 9 h 46 min (Borkum, Fischerbalje) und 16 h 29 min (Geesthacht, Wehr Unterpegel) an. Das bedeutet, dass ein Hochwasserscheitel fast 7 h benötigt, um von der westlichsten ostfriesischen Insel bis zum am weitesten stromauf an der Elbe liegenden Gezeitenpegel zu laufen. Bei Sturmfluten sind die Eintrittszeiten vereinzelt um bis zu 3 h verschoben. Letzteres und die langen Laufzeiten stellen bei einer automatisierten Wasserstandsvorhersage für die deutsche Nordseeküste eine enorme Komplikation dar. Nur eine strenge astronomische Zuordnung zu den durchnummerierten Mondkulminationen schafft Abhilfe (MÜLLER-NAVARRA, 2009b).

# 2.4 Numerische Modelle – 2D-Windstaumodelle, 3D-Schelfmeermodelle

Zweidimensionale Wasserstandsmodelle haben eine sehr lange Tradition. Bereits in den 1950er Jahren standen "Nachhersageverfahren" zur Verfügung (HANSEN, 1956). Aber erst ab Mitte der 1990er Jahre erreichten sie im Vorhersagemodus (FISCHER, 1978) die Qualität von empirischen Verfahren. Das hing natürlich auch unmittelbar mit der Entwicklung in der Meteorologie zusammen, wo einige Jahre vorher die Modellverfahren eine ernsthafte Konkurrenz zur synoptischen Meteorologie geworden waren (BALZER, 2002).

Heute besteht die Modellfamilie des BSH (DICK et al., 2001) in der Version 4 aus einem dreifach geschachtelten 3D-Modell (BSHcmod) und einem zweifach geschachtelten 2D-Modell (BSHsmod). Beide Modelle erhalten als Randbedingung für den Nordrand der Nordsee bzw. den Westrand des Ärmelkanals Wasserstandsdaten aus einem 2D-Nordostatlantik-Modell mit ca. 10 km Maschenweite. BSHsmod überdeckt mit einer horizontalen Auflösung von ca. 5,5 km nur den Bereich der Nordsee, BSHcmod bei gleicher Auflösung Nord- und Ostsee. In das 3D-Modell BSHcmod ist noch ein Küstenmodell der Deutschen Bucht und Westlichen Ostsee mit einer Auflösung von 0,9 km eingebettet.

Das aufwendige 3D-Modell errechnet zwar alle wesentlichen physikalischen Größen des Meeres, benötigt dafür aber viel Rechenzeit. Effizienter im Sinne einer Wasserstandsvorhersage sind schnelle 2D-Modelle, die alsbald nach den Simulationsläufen der Atmosphärenmodelle Windstauberechnungen bieten. Im BSH läuft zur Zeit das 2D-Modell BSHsmod viermal täglich mit Antriebsdaten der Modellkette des DWD (GME/COSMO-EU), jeweils startend mit den meteorologischen Analysefeldern 0, 6, 12 und 18 Uhr. Im Falle der 0- und 12-Uhr-Läufe handelt es sich um 168-h-Vorhersagen, im Falle der 6- und 18-Uhr-Läufe um 48-h-Vorhersagen.

Weil sich die Modellfamilie des BSH so sehr in der Praxis der Wasserstandsvorhersage bewährt hat, liegt es nahe, diese durch Ästuarmodelle zu ergänzen. In einer Nachrechnung der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 in der Elbe zeigte sich bereits der Wert eines hochaufgelösten Elbemodells (MÜLLER-NAVARRA et al., 2006). Ein solches in operationeller Version, eingebettet in die bestehende BSH-Modellkette, wird zur Zeit im Rahmen des KFKI-Projekts OPTEL (Windstaustudien und Entwicklung eines operationellen TideElbemodells) entwickelt. Mit einer zunächst auf etwa 90 m festgelegten horizontalen Auflösung wird es nicht nur der Wasserstandsvorhersage von Nutzen sein, sondern auch nautische oder umweltbezogene Anwendungsmöglichkeiten bieten.

## 2.5 BSH-MOS (Model Output Statistics)

Die statistische Nachbearbeitung der Ergebnisse der numerischen Wettervorhersage (MOS) zur Verbesserung der Vorhersage einzelner Wetterelemente ist in der Meteorologie schon lange erfolgreich (GLAHN und LOWRY, 1972). BSH-MOS ist nun die erste Anwendung

## 198

eines bewährten MOS-Systems (MSWR-MOS, KNÜPFFER, 1996) auf Wasserstände in Gezeitengewässern.

In der ersten Ausbaustufe ist BSH-MOS zur Vorhersage des Windstaus am Pegelstandort Cuxhaven zu den Hoch- und Niedrigwasserzeiten eingerichtet (MÜLLER-NAVARRA und KNÜPFFER, z. Veröff. eingereicht). Als Prädiktoren gehen Wetterelemente aus dem GFS-System, bereits eingetretene Windstauwerte am Vorhersageort Cuxhaven und anderen Orten (Borkum, Aberdeen) sowie Windstauvorhersagen für Cuxhaven aus dem numerischen 2D-Modell (BSHsmod) ein. BSH-MOS läuft z. Zt. prä-operationell und wird nach erfolgreicher Erprobung voraussichtlich im Jahre 2010 in den Wirkbetrieb gehen und stündlich aktualisierte Windstauvorhersagen für Cuxhaven liefern.

In Entwicklung ist nun als zweite Ausbaustufe von BSH-MOS die Kurzfristvorhersage der Tideganglinie im Minutenabstand. Mit jedem aus der Wasserstandsdatenfernübertragung (WDFÜ, s. Abschn. 2.6) neu eintreffenden Minutenwert gibt es dann eine neue Vorhersage. Dazu werden als weitere Prädiktoren astronomische Terme und die Ganglinie selbst verwendet. Man kann dieses Vorgehen auch als Gesamtansatz bezeichnen, weil die einschränkende Annahme der <u>linearen</u> Überlagerung von astronomischen Gezeiten und Windstau nun nicht mehr nötig ist.

## 2.6 Wasserstandsdatenfernübertragung (WDFÜ)

Eine der größten Errungenschaften für die Wasserstandsvorhersage ist die zuverlässige minütliche Datenfernübertragung der Wasserspiegellage von vielen Pegelstandorten an der deutschen Küste zu den Nutzern. Als optimal haben sich bisher Schwimmerpegel mit geeigneten Querschnitten von Schacht und Zulaufrohr herausgestellt, die noch Wasserstandsänderungen mit Zeitskalen größer als Dünungsperioden zeigen. Vorbeifahrende Schiffe, Hafenseiches, die Wirkung von Böen auf den Wasserstand etc. stören Kürzestfristvorhersagen und Scheitelwerterkennung nicht.

Die Minutendaten bestehen aus der Uhrzeit (MEZ) und dem Wasserstand in Metern mit drei Stellen hinter dem Komma bezogen auf Pegelnull. Mit der letzten mitgelieferten Stelle scheinen die Daten eine Genauigkeit von einem Millimeter zu haben; Häufigkeitsverteilungen zeigen aber, dass die Null weit überdurchschnittlich oft vertreten ist und somit die WDFÜ-Daten lediglich auf einen Zentimeter genau sind. Da manche Pegel gelegentlich länger als eine halbe Stunde auf ein und demselben Pegelstand verharren, bereitet die numerische Feststellung der Scheitelwerte Schwierigkeiten. Es ist daher im Sinne weiterer Automatisierung der Pegeldatenauswertung, eine wirkliche Millimeter-Genauigkeit der übertragenen Wasserstände anzustreben.

# 2.7 Automatische Scheitelwerterkennung und Windstauermittlung

Die Scheitelwerte (Niedrigwasser und Hochwasser) in Pegelzeitreihen werden bisher noch manuell, IT-gestützt festgestellt und der für die weitere Bearbeitung benötigte Windstau durch Vergleich mit den astronomisch vorausberechneten Höhen berechnet. Die Windstauermittlung sofort nach dem Eintritt des Scheitels an möglichst vielen Pegeln ist notwendig, da sich der "Wasserstandsvorhersager" beim Vorhersageverfahren zunächst ein synoptisches Bild von der Windstaulage in der Deutschen Bucht erarbeiten muss. Auch BSH-MOS benötigt zeitnah den Windstau von denjenigen Pegeln, die in den MOS-Gleichungen auftauchen. Da eine stündliche Aktualisierung der Scheitelwertvorhersagen angestrebt wird, werden die aktuellen Pegeldaten von z. Zt. 31 Pegeln nunmehr automatisch (MÜLLER-NAVARRA, 2009b) viertelstündlich nach neuen Scheitelwerten durchsucht und der zugehörige Windstau festgestellt.

Es ist vorgesehen, ab 2010 die manuelle Methode nur noch nach Bedarf einzusetzen, wenn die aktuellen Pegeldaten aus der WDFÜ zu große Lücken aufweisen oder die Daten augenscheinlich fehlerbehaftet sind.

#### 2.8 Empirisch-statistische Verfahren

Empirische Windstauformeln können ganz einfache Zusammenhänge zwischen den Wind- und Luftdruckverhältnissen auf See und dem lokalen Windstau sein (ORTT, 1897). Mit größerem Rechenaufwand lassen sich per multipler Regression kompliziertere Zusammenhänge zwischen vielerlei (zumeist meteorologischen) Prädiktoren und dem Prädiktanden Windstau ableiten (MÜLLER-NAVARRA und GIESE, 1999). Mehr noch als bei den MOS-Verfahren, bei denen das numerische Modell überragende Bedeutung hat, besteht bei den rein messwertbasierten, statistischen Verfahren die Gefahr, dass Persistenzterme und einbezogene Wasserstände von Nachbarpegeln die Vorhersagequalität im Einzelfall – insbesondere bei schmalen Windstrichen – stark beeinträchtigen können.

Als Ergänzung zu den hier beschriebenen numerischen und anderen Verfahren eignen sich empirisch-statistische Methoden mit kleinräumiger Gültigkeit, wie für Nordfriesland herausgearbeitet und im hier vorliegenden Band geschildert (DIBBERN und MÜLLER-NA-VARRA, 2009). Damit können im Sturmflutfall bei geeigneter Wahl eines Bezugsortes regionale Stauunterschiede berechnet werden. Aber auch hier muss zunächst der Wasserstand am Bezugsort richtig vorhergesagt werden, um zu absoluten Scheitelwasserständen zu gelangen.

Heute verbleibt den empirisch-statistischen Verfahren jedenfalls die wichtige Rolle einer Rückfallposition für einen erfahrenen "Windstauer", besonders, wenn die numerischen Modellketten ausfallen oder offensichtliche Fehlvorhersagen produzieren. Letzteres zu beurteilen, erfordert die intensive Zusammenarbeit mit synoptisch versierten Meteorologen.

## 2.9 Synoptik, Modellinterpretation

Mittlerweile stehen für die Windvorhersagen an der deutschen Nordseeküste Vorhersagen aus mehreren Atmosphärenmodellen zur Verfügung. In aller Regel unterscheiden sich die Ergebnisse dieser Modelle im hier relevanten Vorhersagebereich von bis zu 3 Tagen nicht sonderlich. Durch Visualisierungswerkzeuge wie z.B. NINJO-Workstation, das im Rahmen eines internationalen Projekts mit Beteiligung des DWD entwickelt wurde, ist der Meteorologe in die Lage versetzt, die Vorhersagen mehrerer Atmosphärenmodelle (GFS, GME/ COSMO-EU, ECMWF, HIRLAM usw.) gleichzeitig mit Stationsmeldungen zu vergleichen. Ergebnis eines solchen Vergleichs kann im Einzelfall sein, dass der Meteorologe sich bei seiner Beratung des "Windstauvorhersagers" auf ein anderes Modell als GME/COSMO-EU festlegt und damit auch die beschriebene automatisierte Kette zu verwerfen ist. Im seltenen Extremfall greift die klassische Synoptik, und es kommen ausschließlich die alten Windstautabellen zur Anwendung. Meist genügt es aber schon, die numerische Vorhersage 200

des Windes in der Deutschen Bucht um wenige Knoten nach oben oder unten zu korrigieren. Letzteres ist bei Sturmflutwetterlagen gängige Praxis und hat sich bei der Zusammenarbeit zwischen BSH und DWD/Seewetteramt gut bewährt.

# 2.10 Mensch-Maschine-Mix (MMM), Windstauvorhersage

Nicht nur bei der Bewertung von Sturmflutwetterlagen wird ein Mensch-Maschine-Mix (MMM) praktiziert, sondern auch bei der täglichen Wasserstandsvorhersage. Als Maschine kommt hier das Verfahren BSHsmod in der aktuellen Version 4 zum Einsatz (DMO-2Dv4). Rechenergebnisse von numerischen Modellen werden im Kontext mit MOS-Verfahren im Englischen mit "direct model output" (DMO) bezeichnet.

Aber wie erfolgreich kann ein "Windstauvorhersager" die Vorhersage eines über viele Jahre gut kalibrierten numerischen Modells verbessern? Oder besteht die Gefahr der "Verschlimmbesserung"? Eine Statistik über die Vorhersagen von 1412 Ereignissen (HW u. NW) des Jahres 2008 zeigt ein überraschendes Ergebnis (Abb. 3). In Kenntnis des DMO gelingt es dem Menschen nur im Vorhersagezeitraum bis zu 14 Stunden, den DMO signifikant zu verbessern.



Abb. 3: Standardabweichung der Windstauvorhersage des 2D-Modells (Punkte und dazugehöriger linearer Trend) und des Mensch-Maschine-Mixes (MMM, durchgezogene fette Line) 1.1.2008 bis 31.12.2008 in Abhängigkeit der Vorhersagelänge (MMM: ~225 Fälle je Vorhersagezeit, DMO-2D: ~114 Fälle)

Es lohnt sich ein genauerer Blick auf diese Statistik. 2008 startete das Modell (DMO-2Dv4) nur zu den 0 und 12-UTC-Terminen, die Ergebnisse mit Vorhersagezeitraum von 48 h standen jeweils gut 7 Stunden später dem menschlichen Vorhersager (MMM) zur Verfügung. Dieser aktualisierte viermal täglich seine Vorhersagen für einen Zeitraum bis zu 25 h im Voraus (um 8:00, 14:00, 20:00 und 0:00 MEZ bzw. MESZ). Beim DMO ist hier mit Vorhersagezeit die Zeit zwischen dem Analysezeitpunkt und dem Zieltermin gemeint, beim MMM ist es der Zeitraum zwischen dem Termin der Vorhersage und dem Zieltermin. Der DMO erreicht einen RMSE (Standardabweichung, root mean square error) von 12 cm bei Kürzestfristvorhersagen und bis zu 17 cm bei 48-h-Vorhersagen. In den ersten 3 h der Vorhersage gibt es ein Initialisierungsproblem, welches wegen fehlender Pegelstände auf offener See nicht leicht zu lösen ist. Das Modell startet jeweils den neuen Lauf mit dem von dem vorangegangenen Lauf vorhergesagten Wasserstand zum Startzeitpunkt, also im hier betrachteten Falle mit einer 12-h-Vorhersage. Offensichtlich gelang es dem Menschen, diesen Initialisierungsfehler unter Kenntnis bereits eingetretener Pegelstände – auch von Nachbarpegeln – deutlich zu kompensieren. Zwischen 3 und 14 h Vorhersagezeitraum ist nur eine geringfügige Verbesserung der Modellvorhersagen durch MMM feststellbar. Aber beginnend mit den 15-h-Vorhersagen gelingt es dem menschlichen Bearbeiter nicht mehr, die Windstauvorhersagen des Modells zu verbessern. Es besteht sogar die Gefahr, dass im Einzelfall durch menschliche Einflussnahme ein an sich gutes Modellergebnis durch Mensch-Maschine-Mix in ein leicht schlechteres Resultat verwandelt wird.

Es kommt also ganz wesentlich darauf an, aus dem statistischen Befund zum DMO und MMM die richtigen Schlüsse zu ziehen und die Rolle des Menschen im Mensch-Maschine-Mix weiterzuentwickeln.

## 2.11 Wasserstandsvorhersage, Sturmflutwarnung

Nachdem nun die Windstauvorhersage durch Mensch-Maschine-Mix für die nächsten Hoch- und Niedrigwasserzeitpunkte für alle relevanten Küstenorte in der Deutschen Bucht und die angrenzenden Schifffahrtsreviere festgestellt wurde, werden diese Werte den astronomisch vorausberechneten Wasserständen hinzuaddiert. Im Jahre 2008 lagen am Pegel Cuxhaven 86 % der Windstauwerte im Intervall  $\pm$  50 cm, während für das gleiche Jahr der mittlere Tidenhub dort mit 2,98 m, der mittlere Nipptidenhub mit 2,49 m und der mittlere Springtidenhub mit 3,31 m vorausberechnet war. Eine auf das mittlere Hochwasser bezogene Wasserstandsvorhersage besteht also ganz wesentlich aus einer guten Gezeitenvorausberechnung!

Die Vorgehensweise des BSH bei Sturmfluten und auch das Geschäft des Warnens sind kürzlich eingehend beschrieben worden (JENSEN und MÜLLER-NAVARRA, 2008). Deshalb reicht an dieser Stelle der Hinweis darauf, dass die viermal täglich aktualisierten Wasserstandsvorhersagen nicht nur der Schifffahrt und den Behörden der Küstenländer zur Verfügung gestellt werden, sondern auch im Internet unter www.bsh.de abgerufen werden können. Bei Sturmfluten ist ein Telefondienst rund um die Uhr besetzt (Tel.: 040 3190-3190).

## 3. Weitere Möglichkeiten und Ausblick

Zwei aktuelle Themen bleiben noch offen bzw. haben noch keinen überzeugenden Weg in die Sturmflutvorhersage gefunden. Es sind Datenassimilation und Ensemble-Vorhersagen.

Umfangreiche Analysen zur Datenassimilation von Wasserständen in 2D-Modellen der Nordsee haben gezeigt, dass allenfalls eine kleine Verbesserung der Vorhersagen bis 6 h voraus durch Einbeziehung von Pegelständen im Umkreis von 200 km erwartet werden kann (VERLAAN et al., 2005). Noch ungünstigere Voraussetzungen für Datenassimilation finden sich in der Deutschen Bucht, wo der Windstau sehr lokal in den reich gegliederten Flachküsten-Gewässern entsteht. Wegen der längeren Verarbeitungszeiten von Altimeterdaten werden diese auf absehbare Zeit auch keine operationelle Verwertung bei Sturmflutwarnungen finden. Die Strategie einer nachgeschalteten Korrektur durch MOS (Model Output Statistics) erscheint erfolgversprechender, da so auch Platz für eine unabhängige Beurteilung der eingetretenen Pegelstände, Modellergebnisse und statistischen Verfahren durch den menschlichen "Sturmflutvorhersager" ist. Allerdings erfordert das vom Einzelnen auch detaillierte Kenntnisse der zur Verfügung stehenden Verfahren.

Im Forschungsprojekt MUSE ist reichlich Gebrauch von Ensemble-Verfahren der numerischen Wettervorhersage (Ensemble Prediction System, EPS) gemacht worden (JENSEN et al., 2006), dieses geschah aber ausschließlich zum Auffinden von extremen, noch nicht eingetretenen Extremsturmfluten, was für die Nordsee und speziell die Deutsche Bucht erfolgreich war. Um zu einer 2- bis 5-tägigen probabilistischen Sturmflutvorhersage zu gelangen, könnten EPS-Simulationen zukünftig durchaus von Nutzen sein (DE VRIES, 2009). Ein Vorteil solcher Verfahren ist darin zu sehen, dass damit vor Wochenenden und Feiertagen Einsatzkräfte vorgewarnt werden können. Eine öffentliche Sturmflutvorhersage der Art "Übermorgen besteht eine Sturmflutwahrscheinlichkeit von 20 %" würde wohl nur für Verwirrung sorgen.

Nach allen neueren Erfahrungen ist es letztlich am effektivsten, die Atmosphärenmodelle weiterzuentwickeln und deren Rechenzeit so weit zu reduzieren, dass nachgeschaltete Wasserstandsmodelle zeitnah versorgt werden. Besondere Obacht ist auf die Analysemodelle und auf die daraus resultierenden atmosphärischen Anfangsverteilungen zu legen, wobei hier Fernerkundungsverfahren zum vertikalen Aufbau der Atmosphäre einen weiteren Fortschritt bringen könnten. Von Seiten der Wasserstandsvorhersage wären in naher Zukunft meteorologische Vorhersageläufe zu den Terminen 0, 3, 6, ..., 21 UTC wünschenswert, da schon der Schritt von 12-stündlichen auf 6-stündliche Läufe nützlich war. Vorhersagen für 7 Tage im Voraus ausgehend von den Hauptterminen 0 und 12 UTC sind ausreichend, die Läufe dazwischen sollten mindestens 24 h Vorhersagelänge haben.

Die Weiterverarbeitung von Resultaten aus einem EPS und die Nutzung neuer Ergebnisse aus deterministischen Atmosphärenmodellen im 3-Stunden-Rhythmus stellen für eine nachgeschaltete Wasserstandsvorhersage einen gewaltigen informationstechnologischen Aufwand dar. Dem ist nur durch konsequente Automation beizukommen. So bleibt dann auch noch ausreichend Zeit für einen bei Sturmfluten unverzichtbaren Mensch-Maschine-Mix.

# 4. Danksagung

An dieser Stelle muss all jenen gedankt werden, die tagaus, tagein – auch an Feiertagen – die meteorologischen und ozeanologischen Messapparaturen in Gang halten und die Datenflüsse sicherstellen, sowie denjenigen, die sich um den zuverlässigen Betrieb der numerischen Modellketten kümmern.

## 5. Schriftenverzeichnis

ANNUTSCH, R.: Über das empirisch-statistische Sturmflutvorhersageverfahren des Deutschen Hydrographischen Instituts. Promet, 8, 12–15, 1978.

ANONYMUS: Gezeitentafeln 2010 Europäische Gewässer. BSH Hamburg, 246 S., 2009.

ANONYMUS: Seeaufgabengesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 26. Juli 2002 (BGBl. I S. 2876), zuletzt geändert durch Artikel 319 der Verordnung vom 31. Oktober 2006 (BGBl. I S. 2407).

- BALZER, K.: Zum Mensch-Maschine-Konflikt in der Wettervorhersage. Promet, 28, 46–54, 2002.
- DIBBERN, S. und MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Wasserstände bei Sturmfluten entlang der nordfriesischen Küste, Inseln und Halligen. Die Küste, 76, 2009.
- DICK, S.; KLEINE, E.; MÜLLER-NAVARRA, S. H.; KLEIN, H. and KOMO, H.: The Operational Circulation Model of BSH (BSHcmod) – Model description and validation. Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie, 29, 49 S., 2001.
- FISCHER, G.: Ergebnisse der Sturmflutvorhersage-Modellierung im SFB 94. Promet, 8, 17–21, 1978.
- GLAHN, H. R. and LOWRY, D. A.: The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting, J. Appl. Meteor., 11, 1203–1211, 1972.
- JENSEN, J.; MÜLLER-NAVARRA, S. H.; RENNER, V.; MUDERSBACH, CH.; BORK, I. und KOZIAR, CH.: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. Die Küste, 71, 123–167, 2006.
- JENSEN, J. and MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Storm surges on the German Coast. Die Küste, 74, 92–124, 2008.
- HANSEN, W.: Theorie zur Errechnung des Wasserstandes und der Strömungen in Randmeeren nebst Anwendungen. Tellus, 8, 287–300, 1956.
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M. and BAKER, W. E.: Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center. Bull. Amer. Meteor. Soc., 71, 1410–1428, 1990.
- KNÜPFFER K.: Methodical and predictability aspects of MOS systems, 13th Conference on Probability and Statistics in Atmospheric Sciences. San Francisco, USA, 190–197, 1996.
- MAJEWSKI, D.; LIERMANN, D.; PROHL, P.; RITTER, B.; BUCHHOLD, B.; HANISCH, T.; PAUL, G.; WERGEN, W. and BAUMGARDNER, J.: The Operational Global Icosahedral-Hexagonal Gridpoint Model GME: Description and High-Resolution Tests. Mon. Wea. Rev., 130, 319–338, 2002.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Zur Vorhersagbarkeit schwerer Sturmfluten an deutschen Küsten. Mitteilungen DMG, 9–10, 02/2008.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Sturmfluten in der Elbe und deren Vorhersage im Wandel der Zeiten. In: Ohlig, C.: Hamburg – die Elbe und das Wasser sowie weitere wasserhistorische Beiträge. Schriften der DWhG, 13, 77–95, 2009a.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Zur automatischen Scheitelpunktbestimmung gemessener Tidekurven in der Deutschen Bucht. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 53, 380–388, 2009b.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H. und LADWIG, N.: Über Wassertemperaturen an deutschen Küsten. Die Küste, 59, 1–26, 1997.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H. and GIESE, H.: Improvements of an Empirical Model to Forecast Wind Surge in the German Bight. Dt. hydrogr. Z., 51, 385–405, 1999.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.; LANGE, W.; DICK, S. und SOETJE, K. C.: Über die Verfahren der Wasserstands- und Sturmflutvorhersage: Hydrodynamisch-numerische Modelle der Nordund Ostsee und empirisch-statistisches Verfahren für die Deutsche Bucht. Promet, 29, 117–124, 2003.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.; BORK, I.; JENSEN, J.; KOZIAR, CH.; MUDERSBACH, CH. und RUDOLPH, E.: Modellstudien zur Sturmflut und zum Hamburg-Orkan 1962. Hansa, 143, 72–88, 12/2006.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H. and KNÜPFFER, K.: Improvement of water level forecasts for tidal harbours by means of model output statistics (MOS). (Meteorol. Z., zur Veröffentlichung eingereicht).
- ORTT, F. L.: The effect of wind and atmospheric pressure on the tides. Nature, 56, 80–84, London, 1897.
- SOETJE, K. C. and BROCKMANN, C.: An operational numerical model of the North Sea and the German Bight. In: J. Sündermann/W. Lenz (Ed.) North Sea Dynamics. Berlin u. a., 95–107, 1983.
- STEPPELER, J.; DOMS, G.; SCHÄTTLER, U.; BITZER, H. W.; GASSMANN, A.; DAMRATH, U. and GREGORIC, G.: Meso-Gamma Scale Forecasts Using the Non-hydrostatic Model LM. Meteorology and Atmospheric Physics, 82, 75–90, 2003.
- VERLAAN, M.; ZIJDERVELD, A.; DE VRIES, H. and KROOS, J.: Operational storm surge forecasting: developments in the last decade. Phil. Trans. R. Soc. A 363, 1441–1453, 2005.
- DE VRIES, H.: Probability forecasts for water levels at the coast of The Netherlands. Marine Geodesy, 32, 100–107, 2009.

Die Küste, 76 FAK (2009), 1-256

# Wasserstände bei Sturmfluten entlang der nordfriesischen Küste mit den Inseln und Halligen

Von Stefanie Dibbern und Sylvin H. Müller-Navarra

# Zusammenfassung

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass neben den Gezeiten Windrichtung und Windgeschwindigkeit in der Deutschen Bucht die maßgebenden Größen für die Entstehung einer Sturmflut sind, werden für ausgewählte Pegel an der nordfriesischen Nordseeküste Windstaukurven hergeleitet, die die regionalen Wasserstandsunterschiede bei Sturmfluten aufzeigen. Zusätzlich werden Pegeldaten ausgewertet, die bei Überflutungen der Halligen Hooge, Nordstrandischmoor und Gröde aufgezeichnet wurden.

Das mittlere Windstauverhalten in Nordfriesland spiegelt der Pegel Hooge-Anleger wider. Um diesen Bezugspegel gliedert sich Nordfriesland in sechs Regionen. Aufbauend auf diese Einteilung wird eine Realisierungsmöglichkeit für die Verwendung der ermittelten Windstaukurven im Rahmen einer regionalisierten Sturmflutvorhersage für den Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein vorgestellt.

## Schlagwörter

Schleswig-Holstein, Nordfriesland, Sturmfluten, Windstau, Halligen, Vorhersagen

## Summary

Taking into account the fact that the significant factors causing storm surges on the North Sea coast, besides the tides, are wind direction and wind speed in the German Bight, wind surge curves showing local water level differences during storm surges have been derived for selected tide gauges on the North Frisian North Sea coast. This paper additionally analyses the tide gauge data recorded during several inundations of the small islands of Hooge, Nordstrandischmoor and Gröde.

The Hooge-Anleger gauge data show the average characteristics of wind surges in North Friesland. Around this reference gauge, North Friesland is divided into six regions. Based on this regional subdivision, the paper concludes by proposing use of the results in the context of regional storm surge forecasts made by the Schleswig-Holstein Agency of Coastal Defence, National Park and Marine Conservation.

## Keywords

Schleswig-Holstein, North Frisia, storm surges, wind set-up, forecast

#### Inhalt

1.	Einleitung	206
2.	Regional differenzierte Windstauanalyse	207
	2.1 Datenbasis	207
	2.2 Windstauanalyse	209
	2.3 Validierung	217
3.	Überflutung der Halligen	218
4.	Realisierungsvorschlag	221
5.	Schriftenverzeichnis	223

# 1. Einleitung

An der Schleswig-Holsteinischen Westküste können Sturmfluten sehr unterschiedlich verlaufen. Während zum Beispiel die sehr schweren Sturmfluten am 3./4. Januar 1976 und 24. November 1981 entlang der gesamten Küste Schleswig-Holsteins zu Wasserständen größer als 3,0 m über dem Mittleren Tidehochwasser (MThw) führten, zeigen die schweren Sturmfluten am 10. Januar 1995 und am 8. Januar 2005, dass die höchsten Wasserstände auch nur im südlichen oder nördlichen Bereich auftreten können (Abb. 1). Das MThw (1996/2005) in diesem Küstenabschnitt liegt zwischen 81 cm über NN (Pegel Westerland) und 168 cm über NN (Pegel Husum).



Abb. 1: Scheitelwerte über MThw an der Schleswig-Holsteinischen Westküste der Sturmfluten am 3./4. Januar 1976, 24. November 1981, 10. Januar 1995 und 8. Januar 2005

Unter Berücksichtigung, dass neben den Gezeiten Windrichtung und Windgeschwindigkeit in der Deutschen Bucht die maßgebenden Größen für die Entstehung einer Sturmflut sind (TOMCZAK, 1952), werden im Folgenden in Anlehnung an die Verfahren von MÜLLER-NAVARRA et al. (1999) und TOMCZAK (1952) für ausgewählte Pegel an der nordfriesischen Nordseeküste Windstaukurven anhand von aktuellen Datensätzen hergeleitet, die die regionalen Wasserstandsunterschiede der geographisch stark strukturierten Region der nordfriesischen Wattenmeerküste bei Sturmfluten aufzeigen.

Zusätzlich werden Pegeldaten ausgewertet, die bei Überflutungen der Halligen Hooge, Nordstrandischmoor und Gröde aufgezeichnet wurden.

## 2. Regional differenzierte Windstauanalyse

Der meteorologische Antrieb während einer Sturmflut bildet sich in der sogenannten Windstaukurve ab, welche die Differenz zwischen eingetretener und astronomisch vorausberechneter Tideganglinie darstellt. Neben der lokalen Windrichtung und lokalen Windgeschwindigkeit zeigt eine Windstaukurve auch weitere Einflüsse wie den Luftdruck und seine Schwankungen, Fernwellen, topographische Effekte und den Seegangseinfluss (MURAWSKI, 2007).

Je größer die Windgeschwindigkeit über der Meeresoberfläche ist, desto größer ist die Windschubspannung, die auf die Meeresoberfläche wirkt und umso stärker ist die induzierte Bewegungsenergie, die bei auflandigen Winden eine Strömung in der oberflächennahen Wasserschicht in Richtung Küste bewirkt. Durch innere Reibung wird diese Bewegungsenergie in die Tiefe übertragen, wobei die Geschwindigkeit mit zunehmender Wassertiefe abnimmt. An der Küste kommt es zu einem Anstieg des Wasserstandes. Die geneigte Meeresoberfläche führt zu einem Druckgefälle im Inneren der Wassermasse und es erfolgt eine Rückströmung in den bodennahen Schichten. Wenn im Fall eines Sturms oder Orkans die gegen die Küste gerichtete winderzeugte Oberflächenströmung nur unvollständig durch eine entgegengesetzte bodennahe Kompensationsströmung ausgeglichen werden kann, kommt es zu einem erheblichen Windstau.

Die Windschubspannung  $\tau$  bestimmt sich aus der Luftdichte  $\rho_a$ , einem dimensionslosem Reibungskoeffizienten  $c_D$  und dem Quadrat der horizontalen Windgeschwindigkeit W zu

$$\tau = \rho_a c_D W^2 \tag{1}$$

Dabei kann der Reibungskoeffizient nach dem Ansatz von SMITH et al., (1975) mit

$$c_{\rm D} = (0,63 + 0,066 \text{ W}) \ 10^{-3}$$
 (2)

ermittelt werden. Dieser Ansatz ist mit Daten im Bereich von 3 m/s bis 22 m/s durch Messdaten belegt, eine Extrapolation des Ansatzes bis zu einer Windgeschwindigkeit von 26 m/s ist jedoch akzeptiert (JENSEN et al., 2006).

## 2.1 Datenbasis

Für diese Untersuchung stehen stündliche Winddaten von fünf Stationen des Deutschen Wetterdiensts (DWD), Tidescheitelwerte von insgesamt 18 Pegeln des Landesbetriebes für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN-SH) und der Wasser- und Schifffahrtsämter (WSÄ) des Bundes sowie die zugehörigen Gezeitenvorausberechnungen vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zur Verfügung (Abb. 2). Um die Ergebnisse nicht durch einen signifikanten Trend (JENSEN et al., 2007) in den Zeitreihen der Tidescheitelwerte zu verfälschen, wird die verwendete Datenbasis auf den Zeitraum vom 1. Januar 1990 bis 31. Dezember 2005 begrenzt.

208



Abb. 2: Lage der Pegel und Windmessstationen

Die Vorausberechnungen der Gezeiten für die deutsche Nordseeküste werden beim BSH mit Hilfe der harmonischen Darstellung der Ungleichheiten durchgeführt und in der Gezeitentafel und dem Gezeitenkalender veröffentlicht (ANONYMUS, 2008).

Die Gezeitenvorausberechnungen liegen für die 18 Pegelorte in dem Zeitraum vom 1. Januar 1990 bis 31. Dezember 2005 nicht digital vor und wurden daher vom BSH rückwirkend berechnet und zur Verfügung gestellt. Da aber die Gezeitengrundwerte nicht mehr für jeden Ort und jedes Jahr rückwirkend vorliegen, sind den Berechnungen die Parameter des Jahres 2006 zugrundegelegt. Dadurch kommt es zu Abweichungen zu den in den Gezeitentafeln veröffentlichten Gezeitenvorausberechnungen. Die Vorausberechnungen aus den Gezeitentafeln für den Ort Husum liegen ab dem Jahr 1995 digital vor. Die Differenz zwischen den Werten in den Gezeitentafeln und den vom BSH nachträglich berechneten Werten mit dem einheitlichen Bezugsjahr 2006 beträgt in der Höhe im Mittel 2 cm bei einer Standardabweichung von 9 cm und in der Zeit im Mittel 0,5 min bei einer Standardabweichung von 21 min. Für die weiteren Untersuchungen sind diese Unterschiede unbedeutend.

#### 2.2 Windstauanalyse

Es wird davon ausgegangen, dass sich der beobachtete Windstau  $h_i$  mit Hilfe eines konstanten Glieds  $b_0$ , den Regressionskoeffizienten  $b_i$  und den unabhängigen Variablen Windgeschwindigkeit  $W_i$  und Windrichtung  $\varphi_i$  mit

$$h_{i} = b_{0} + b_{1} W_{i}^{2} \sin(\varphi_{i}) + b_{2} W_{i}^{2} \cos(\varphi_{i}) + b_{3} W_{i}^{3} \sin(\varphi_{i}) + b_{4} W_{i}^{3} \cos(\varphi_{i}) + e_{i}$$
(3)

beschreiben lässt (BAEHRENS et al., 2003 und MÜLLER-NAVARRA et al., 1999). Mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate wird die Zielfunktion

$$\sum_{i=1}^{1} e_i^2 = \sum_{i=1}^{i} \left[ h_i - (b_0 + b_1 W_i^2 \sin(\varphi_i) + b_2 W_i^2 \cos(\varphi_i) + b_3 W_i^3 \sin(\varphi_i) + b_4 W_i^3 \cos(\varphi_i)) \right]^2 \rightarrow \min! \quad (4)$$

bestimmt. Als globales Gütemaß zur Prüfung der Regressionsfunktion wird der mit Hilfe der Residuen  $e_i$ , der Anzahl der Beobachtungen N und der Anzahl der Regressoren J zu ermittelnde Standardfehler

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i} e_{i}^{2}}{N - J - 1}}$$
(5)

herangezogen. Dieser gibt an, welcher mittlere Fehler bei Verwendung der Regressionsfunktion zur Schätzung der abhängigen Variablen *h* gemacht wird. Als Maß zur Prüfung der Regressionskoeffizienten wird der *p*-Wert verwendet. Mit dem empirischen *t*-Wert

$$t_{\rm emp} = \frac{b_{\rm i}}{s_{\rm bi}} \tag{6}$$

und dem theoretischen *t*-Wert  $t_{tab}$  der Student-Verteilung wird bei einer vorgegebenen Vertrauenswahrscheinlichkeit von 95 % und der Anzahl der Freiheitsgrade *J* der Einfluss der unabhängigen Variablen als signifikant erklärt, wenn  $|t_{emp}| > t_{tab}$ . Dabei gibt der *p*-Wert die zweiseitige Überschreitungswahrscheinlichkeit für den empirischen *t*-Wert an.

Zunächst wird untersucht, welcher Wind als repräsentativ für die Deutsche Bucht anzusehen ist und welcher Wert dabei als stauwirksam für Sturmfluten gilt. Dabei wurden bisher unterschiedliche Ansätze verfolgt. Während TOMCZAK (1952) für die Berechnung der Windstauunterschiede an der Schleswig-Holsteinischen Westküste die Wettermeldungen der Feuerschiffe Borkumriff, Außenjade, Elbe 1 und Amrumbank sowie der Station Helgoland nutzte und dabei als stauwirksam den Wind annahm, der in den letzten vier bis fünf Stunden vor dem Hochwasser an der nordfriesischen Küste herrschte, verfolgen MÜLLER-NAVARRA et al. (1999) einen empirischen Windstauansatz anhand der Feuerschiffe Ems, Elbe und Deutsche Bucht sowie der Station Helgoland, der den Wind der dritten vollen Stunde vor Eintritt des Hochwassers berücksichtigt.

Für die Windstauanalyse im Bereich Nordfriesland werden die Aufzeichnungen der Windmessstationen Ems, Unbemanntes Feuerschiff (UFS) Deutsche Bucht, Helgoland, List auf Sylt und Sankt Peter-Ording vektoriell gemittelt. Dabei wird die Station Helgoland nur berücksichtigt, wenn sowohl Ems als auch UFS Deutsche Bucht keine Werte aufgezeichnet

#### 210

haben (RÖSKE, 1997). Außerdem wird nur dann ein gültiger Wert berechnet, wenn von den drei Stationen Ems, UFS Deutsche Bucht und Helgoland und den beiden Stationen List auf Sylt und Sankt Peter-Ording jeweils mindestens eine Station einen gültigen Wert liefert. Somit ist gewährleistet, dass sowohl eine Station im Norden und Süden des Gebietes als auch eine Land- und eine Küstenstation in die Berechnung eingeht. Die Winddaten des UFS Elbe wurden nicht verwendet, da das Feuerschiff nach dem Kentern in der Nacht zum 4. Dezember 1999 aus dem Verkehr gezogen wurde.

Für die Analyse werden die Eintrittszeiten der beobachteten Windstauwerte auf volle Stunden gerundet und dem vektoriell gemittelten Wind zugeordnet. Der geringste Standardfehler *s* wird überwiegend bei der Verwendung des Mittelwindes der zweiten vollen Stunde vor Eintritt des Hochwassers erreicht. Einzig am Pegel Hörnum ist dies nicht eindeutig zu erkennen. Dabei könnte die Ursache in der sehr geschützten Lage des Pegels an der Leeseite der Insel Sylt im Hörnumer Hafen begründet sein.

Sofern die Windrichtungen der verwendeten Stationen eine sehr heterogene Verteilung zu einem bestimmten Zeitstempel aufweisen, führen entsprechende Datensätze zu einer Verschlechterung der Anpassungsgüte. Deshalb wird ein Homogenitätsindex  $I_h$  eingeführt, der anhand der Komponenten  $u_i$  und  $v_i$  der Windvektoren ermittelt wird (FELLER et al., 1997). Es gilt:

$$I_{\rm h} = \frac{\left[ (\Sigma_{\rm i} u_{\rm i})^2 + (\Sigma_{\rm i} v_{\rm i})^2 \right]^{1/2}}{\Sigma_{\rm i} (u_{\rm i}^2 + v_{\rm i}^2)^{1/2}}$$
(7)

Für die Herleitung der dargestellten Ergebnisse werden nur auflandige Windrichtungen  $\varphi$  mit 180°  $\leq \varphi \leq$  360° verwendet. Zudem werden nur die Datensätze genutzt, die einen Homogenitätsindex größer als 0,9 aufweisen. Insgesamt stehen somit für die weiteren Berechnungen in Abhängigkeit vom Pegel zwischen 4.232 und 5.956 Datensätze zur Verfügung.

Die ermittelten Regressionsgleichungen werden für die Darstellungen bis 26,0 m/s extrapoliert. Eine weitere Extrapolation ist nicht gültig, da die einleitend beschriebenen physikalischen Gesetzmäßigkeiten für größere Windgeschwindigkeiten nicht gegeben sind.

Die Regressionskoeffizienten  $b_i$  für alle Pegel sind in Tab. 2 aufgeführt. Insgesamt schwanken die Regressionskoeffizienten  $b_0$  zwischen 9,73 cm am Pegel St. Peter-Ording und -5,52 cm am Pegel Pellworm. Sie liegen damit in derselben Größenordnung wie in (MÜLLER-NAVARRA et al., 1999) und stellen eine Wasserstandssituation bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten dar. Die Regressionskoeffzienten  $b_1$  und  $b_2$  sind alle signifikant und weisen, mit Ausnahme der Pegel Husum und Süderhafen bei  $b_2$ , ein negatives Vorzeichen auf. Während die Regressionskoeffizienten  $b_3$  alle signifikant sind und ein negatives Vorzeichen besitzen, weisen die Regressionskoeffizienten  $b_4$  mit Ausnahme der Pegel Husum und Süderhafen ein positives Vorzeichen auf. Der  $p_4$ -Wert der Pegel Dagebüll, Husum, Schlüttsiel, Süderhafen und Wyk ist nicht signifikant.

Pegel	$b_{0}$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
Dagebüll	-9,23	-0,406	-0,029	-0,0038	0,0003
Gröde-Anleger	-7,81	-0,311	-0,084	-0,0076	0,0054
Hörnum	-8,11	-0,375	-0,085	-0,0035	0,0031
Hooge-Anleger	-7,33	-0,283	-0,067	-0,0086	0,0045
Hooger-Fähre	-6,85	-0,298	-0,041	-0,0086	0,0041
Husum	-9,47	-0,428	0,047	-0,0062	-0,0003
List	-8,21	-0,383	-0,116	-0,0024	0,0069
Munkmarsch	-7,16	-0,284	-0,115	-0,0073	0,0108
Nordstrandischmoor	-8,43	-0,358	-0,070	-0,0067	0,0068
Pellworm	-5,52	-0,354	-0,077	-0,0042	0,0069
Pellworm Hafen	-7,24	-0,318	-0,070	-0,0071	0,0067
Schlüttsiel	-6,90	-0,310	-0,056	-0,0077	0,0013
St. Peter-Ording	-9,73	-0,287	-0,112	-0,0093	0,0075
Strucklahnungshörn	-7,84	-0,358	-0,064	-0,0060	0,0061
Süderhafen	-7,26	-0,384	0,047	-0,0067	-0,0005
Westerland	-5,60	-0,289	-0,120	-0,0055	0,0077
Wittdün	-7,16	-0,275	-0,092	-0,0077	0,0060
Wyk	-7,91	-0,337	-0,027	-0,0063	0,0005

Tab. 2: Empirisch ermittelte Regressionskoeffizienten für alle Pegel

Abb. 3 zeigt exemplarisch die Windstaudiagramme an den Pegeln Husum und Munkmarsch. Dabei sind die für die jeweiligen Windgeschwindigkeiten stauwirksamsten Windrichtungen durch eine Linie verbunden.



Abb. 3: Windstaudiagramme für die Pegel Husum und Munkmarsch
Ein Vergleich der Windstauansätze für alle Pegel mit dem arithmetischen Mittelwert

$$\overline{\Delta h} = \frac{1}{i} \left[ \sum_{i=1}^{i} b_{0i} + \sum_{i=1}^{i} b_{1i} W^2 \sin(\varphi) + \sum_{i=1}^{i} b_{2i} W^2 \cos(\varphi) + \sum_{i=1}^{i} b_{3i} W^3 \sin(\varphi) + \sum_{i=1}^{i} b_{4i} W^3 \cos(\varphi) \right]$$
(8)

zeigt, dass der Pegel Gröde, gefolgt vom Pegel Hooge-Anleger, dem mittleren Windstauverhalten in Nordfriesland am Nächsten kommt. Da der Pegel Gröde aufgrund einer nicht vorhandenen Stromversorgung keine Daten für den operationellen Betrieb übertragen kann und eine Aufrüstung aufgrund der exponierten Lage auch nicht realisierbar ist, wird der Pegel Hooge als Bezugspegel herangezogen und für jeden Pegel die Windstaudifferenz zum Pegel Hooge gebildet. Im Ergebnis bilden sich für die Region Nordfriesland sechs Regionen heraus, die jeweils ähnliche Windstaudifferenzen zum Pegel Hooge aufzeigen (Abb. 4).



Abb. 4: Die sechs Regionen in Nordfriesland und der jeweils repräsentative Pegel

An den Pegeln Gröde und Hooger-Fähre sind die Differenzen überwiegend positiv und erreichen Werte von maximal ± 20 cm. An den Pegeln Wittdün, Westerland und List sind die Differenzen überwiegend negativ und erreichen Werte zwischen –60 cm und +20 cm. An den Pegeln Nordstrandischmoor, Strucklahnungshörn, Pellworm Hafen und St. Peter-Ording wechseln die Windstaudifferenzen bei einer Drehung der Windrichtung von Süd nach Nord ihre Vorzeichen von positiv nach negativ und erreichen dabei Werte von maximal ±40 cm. An den Pegeln Husum und Süderhafen sind die Differenzen überwiegend positiv und erreichen Windstaudifferenzen zwischen –20 cm und +60 cm, dabei nehmen die Differenzen bei einer Drehung des Windes von Nord nach Süd zunächst zu und dann wieder ab. An den Pegeln Dagebüll, Schlüttsiel, Wyk und Hörnum wechseln die Windstaudifferenzen bei einer Drehung der Windrichtung von Süd nach Nord ihre Vorzeichen von negativ nach positiv und erreichen dabei Werte von maximal  $\pm 60$  cm. Am Pegel Munkmarsch werden die höchsten Windstaudifferenzen von  $\pm 100$  cm erreicht, wobei die Differenzen bei einer Drehung des Windes von Nord nach Süd zunehmen.

Vereinfachend lassen sich die jeweiligen Regionen im Sinne einer Gefährdung durch den Pegel repräsentieren, der die höchsten Windstaudifferenzen enthält. Dies sind die Pegel Wittdün, Nordstrandischmoor, Husum, Schlüttsiel und Munkmarsch. Die Region um Hooge mit den Pegeln Gröde und Hooger-Fähre wird aufgrund der geringen Windstaudifferenzen durch den Bezugspegel Hooge selbst vertreten. Aufgrund der räumlichen Nähe der Pegel Pellworm und Pellworm Hafen wird nur der Pegel Pellworm aufgeführt.

Einen Überblick über die gesamte nordfriesische Küste ermöglicht die Abb. 5. Hier zeigt sich, welcher maximale Windstau bei gegebener Windrichtung und Windgeschwindigkeit zu erwarten ist, und in welchem Gebiet dieser eintreten wird.

So sind zum Beispiel bei einer prognostizierten Windrichtung von 280° und einer Windgeschwindigkeit von 23 m/s der maximale Windstau in Nordfriesland in der Region Husum (VI) mit circa 280 cm und gleichzeitig der minimale Windstau in der Region Wittdün (I) mit circa 210 cm zu erwarten. Bei einer Windrichtung von 330° und einer Windgeschwindigkeit von 25 m/s hingegen, sollte vor allem die Region Munkmarsch (II) aufmerksam beobachtet werden, während die Region Schlüttsiel (III) keine höheren Windstauwerte erwarten lässt.

214



Abb. 5: Windstaudifferenzen zum Pegel Hooge-Anleger in den sechs Regionen

Abb. 6 zeigt den Unterschied der Windstauentwicklung am Bezugspegel Hooge-Anleger zum Pegel Cuxhaven unter Zuhilfenahme des in (MÜLLER-NAVARRA et al., 1997) veröffentlichten Koeffizientensatzes. Während hier für die Bildung des Mittelwindes ausschließlich Windmessstationen auf der freien See verwendet werden, fließen in den in dieser Studie verwendeten Mittelwind auch die Messwerte von Küstenstationen ein. Da sich die Windgeschwindigkeit beim Übergang von See auf Land deutlich reduziert (DUENSING et al., 1985), ist die Zuordnung der Windstauhöhen zur Windgeschwindigkeit bei der Verwendung der unterschiedlichen Mittelwinde nicht vergleichbar, liefert aber gute Anhaltswerte.



Abb. 6: Windstaudifferenz zum Pegel Hooge-Anleger am Pegel Cuxhaven (links) und Windstaukurve am Pegel Cuxhaven (aus: JENSEN et al., 2008) (rechts)

Es zeigt sich, dass der Windstau am Bezugspegel Hooge-Anleger bei Windrichtungen zwischen 180° und 295° höher und zwischen 295° und 360° niedriger zu erwarten ist als am Pegel Cuxhaven. Insbesondere bei Windrichtungen zwischen 190° und 230° ist der zu erwartende Windstau am Pegel Hooge-Anleger betragsmäßig über 1,0 m höher als am Pegel Cuxhaven. Für diesen Windsektor sind jedoch nicht die sehr schweren Sturmfluten zu erwarten. Weiterhin lässt sich schließen, dass besondere Aufmerksamkeit bei Südsüdwest-Winden erforderlich ist, wenn diese Sturmstärken erreichen und überraschend sehr lokal Grenzwertwasserstände zu überschreiten drohen.

Die in dieser Studie ermittelten empirischen Windstauformeln ermöglichen einen Vergleich mit den von TOMCZAK (1952) beschriebenen Windstaudifferenzen zum Bezugsort Cuxhaven. Hierzu werden anhand der ermittelten Windstauformeln und des in (MÜLLER-NAVARRA et al., 1997) veröffentlichten Koeffizientensatzes für den Pegel Cuxhaven die Windstaudifferenzen für die Pegel Husum und List zum Pegel Cuxhaven gebildet. Für Husum zeigt der Vergleich jeweils eine positive Windstaudifferenz bei Windrichtungen zwischen 180° bis 310° und eine negative Windstaudifferenz bei Windrichtungen zwischen 310° und 360°. Während die Windstaudifferenzen für den Windsektor 310° bis 360° im Vergleich betragsmäßig nahezu identisch sind, treten im Windsektor 180° bis 310° bei heutigen Verhältnissen deutlich höhere Windstauwerte auf (Abb. 7). Mögliche Ursachen können sowohl anthropogene Einflüsse wie zum Beispiel bauliche Maßnahmen an der Nordküste von

Eiderstedt, Vertiefungen der Zufahrtsrinne nach Husum oder die Eindeichung der Nordstrander Bucht als auch natürliche Veränderungen des westlich von Husum gelegenen Heverstroms sein. Ein Vergleich der Windstaudifferenzen beider Studien für den Pegel List hingegen zeigt ungefähr die gleiche Größenordnung (Abb. 8).



Abb. 7: Vergleich der Windstaudifferenzen für den Pegel Husum. Links: Ergebnis aus dieser Studie unter Verwendung von (Müller-NAVARRA et al., 1997). Rechts: Ergebnis aus (TOMCZAK, 1952)



Abb. 8: Vergleich der Windstaudifferenzen für den Pegel List. Links: Ergebnis aus dieser Studie unter Verwendung von (Müller-NAVARRA et al., 1997). Rechts: Ergebnis aus (TOMCZAK, 1952)

Bei der Vorhersage von Sturmfluten ist neben dem zu erwartenden Scheitelwert ebenfalls die Kenntnis über die Eintrittszeit wünschenswert. Diese trifft keinesfalls immer mit der astronomisch zu erwartenden Eintrittszeit zusammen, sondern kann mehrere Stunden früher oder später eintreten. Bei der Analyse der vorliegenden Daten zeigt sich, dass mit einer Zunahme der Windgeschwindigkeit keine signifikante Zu- oder Abnahme der Zeitdifferenz verbunden ist. Die Streuung der beobachteten Zeitdifferenzen nimmt jedoch mit steigenden Windgeschwindigkeiten zu. Ab circa 12 m/s muss mit abweichenden Eintrittszeiten von mehr als 60 Minuten gerechnet werden. Bei einer Drehung der Windrichtung von Süd nach Nord nimmt die Streuung der Zeitdifferenzen geringfügig ab. Insgesamt sind die Streuungen jedoch so groß, dass sich kein anwendbarer Zusammenhang ableiten lässt.

## 2.3 Validierung

Die Validierung der ermittelten Ansätze aus dem Zeitraum 1990 bis 2005 erfolgt anhand der beobachteten Tidehochwasserscheitelwerte vom 1.1.2006 bis 31.12.2006. Dabei wird dem astronomisch zu erwartendem Tidehochwasserzeitpunkt der gemessene Mittelwind zwei Stunden zuvor zugeordnet und anhand dieser Windgeschwindigkeit und Windrichtung der zu erwartende Windstau berechnet. Als Maß für die Güte der berechneten Windstauwerte wird die Differenz zwischen dem berechneten und beobachteten Windstau berechnet. Im Mittel unterschätzt das empirische Modell die Tidehochwasser um 7 cm bei einer mittleren Standardabweichung von 19 cm. Speziell die Sturmflut am 1.11.2006 führt zu hohen maximalen Abweichungen an den einzelnen Pegeln.

Die Verteilung des Fehlers für diesen sehr kurzen Vorhersagezeitraum von circa zwei Stunden zeigt die Schranken dieses Verfahrens deutlich auf (Abb. 9). Um den Vorhersagezeitraum zu verlängern können Windprognosen genutzt werden. In Abhängigkeit von der Qualität dieser Prognosen wird sich der Vorhersagefehler für die berechneten Windstauwerte vergrößern. Insbesondere bei kleinräumigen Tiefs, die rasch von West nach Ost über die Nordsee ziehen, bereitet die Anwendung empirischer Verfahren Probleme. Bei durch langsam ziehende, großräumige Tiefs verursachten Sturmfluten ist es zuverlässig.



Abb. 9: Verteilung des Vorhersagefehlers an den Pegeln Husum und Westerland

Durch die zusätzliche Verwendung geeigneter numerischer Modelle gelingt es, den Vorhersagefehler deutlich zu reduzieren (MÜLLER-NAVARRA, 2009). Im Allgemeinen ist zudem die Form der Häufigkeitsverteilungen des absoluten Vorhersagefehlers von numerischen Windstaumodellen (MÜLLER-NAVARRA et al., 2003) deutlich schmaler als die Form der in Abb. 9 gezeigten Verteilungen.

## 3. Überflutung der Halligen

Seit den 1970er bzw. 1980er Jahren werden auf den Halligen Hooge, Gröde und Nordstrandischmoor die Überflutungen mit einem Schreibpegel analog aufgezeichnet (Tab. 3). Diese Aufzeichnungen wurden vom LKN-SH kürzlich aufbereitet und können erstmals ausgewertet werden. Bei der Aufbereitung zeigt sich, dass die zeitliche Zuordnung der Wasserstände sehr ungenau ist, da die Wasserstände mit einem vier-Wochen-Umlauf des Trommelschreibers erhoben wurden; üblich ist ein 24-Stunden-Umlauf. Das Ablesen der Höhen war deutlich genauer möglich, jedoch erwiesen sich einige Aufzeichnungen aufgrund fehlender Angaben der Wasserstände zum Zeitpunkt des Auflegens und Abnehmens der Pegelbögen oder durch offensichtlich falsches Auflegen der Pegelschreiber als sehr unzuverlässig. Einige Pegelbögen (am Pegel Gröde Hallig sogar der überwiegende Teil) fehlten komplett.

Tab. 3: Vorhandene Aufzeichnungen der Wasserstände auf den Halligen und die Höhen der beginnenden und vollständigen Überflutungen der Halligen

Hallig	Aufzei liegt	chnung : vor	Beginnende Überflutung bei	Vollständige Überflutung bei
	von	bis	[cm über NN]	[cm über NN]
Gröde	27.11.1976	13.12.2000	210	220
Hooge	24.11.1977	19.03.2007	250	270
Nordstrandischmoor	04.03.1982	08.12.2007	200	220

Alle über dem Schwellwert der beginnenden Überflutung liegenden Scheitelwerte wurden digital in Tabellenform erhoben. Die Höhe der beginnenden Überflutung wurde vom LKN-SH in Abstimmung mit den Halligbewohnern festgelegt. Diese Höhe kann aber nur einen Anhalt darstellen und nicht als feste Höhe interpretiert werden, da die Höhe der beginnenden Überflutung wesentlich von der Windangriffsrichtung und dem damit verbundenem Seegang abhängt. Die unterschiedlichen Höhen der beginnenden und vollständigen Überflutungen sind in der unterschiedlichen Topographie der Halligen begründet. Im Gegensatz zu den Halligen Gröde und Nordstrandischmoor ist die Hallig Hooge von einem Sommerdeich umgeben. Die Höhe des Sommerdeiches beträgt circa zwischen 120 cm über MThw im Osten und 180 cm über MThw im Westen der Hallig, wobei das MThw (1996/2005) am Pegel Hooge-Anleger 133 cm über NN beträgt.

Zum Vergleich und zur Plausibilisierung der Pegelaufzeichnungen auf den Halligen stehen in den in Tab. 3 genannten Zeiträumen lückenlos Scheitelwerte zur Verfügung, die an Messstellen vor den Halligen aufgezeichnet wurden. Durch eine Gegenüberstellung beider Datensätze ist festzustellen, dass in den untersuchten Zeiträumen für die Hallig Gröde nur circa 15 % aller Überflutungen, für die Hallig Hooge circa 47 % und für die Hallig Nordstrandischmoor circa 25 % aller Überflutungen anhand von Aufzeichnungen belegt sind.

Die Abb. 10 zeigt das Verhalten der Scheitelwasserstände im Vergleich der Pegel vor und auf der Hallig sowie die Lage der Pegel. Deutlich sind in den Darstellungen der Scheitelwerte auch eine Vielzahl von Ausreißern zu erkennen. Eine zeitintensive Überprüfung dieser Ausreißer anhand der Pegelbögen ist noch nicht erfolgt. Die gestrichelte Ober- und Untergrenze kennzeichnet den Bereich, der physikalisch als sinnvoll erachtet wird.



Abb. 10: Scheitelwerte im Vergleich jeweils auf und vor den Halligen sowie Lage der Pegel

Neben den Scheitelwerten wurden vom LKN-SH auch alle im Zusammenhang mit einer Sturmflut aufgezeichneten Überflutungen digitalisiert. Bei Betrachtung der aufgezeichneten Sturmflutverläufe auf den Halligen Hooge und Nordstrandischmoor zeigt sich, dass die Wasserstände auf den Halligen bei auflaufendem Wasser zeitverzögert ansteigen, bis die Scheitelwasserstände erreicht sind. Zum Teil scheint sich das Wasser auf der Hallig um bis zu 20 cm höher aufzustauen als vor der Hallig. Ob dies in den unpräzisen Aufzeichnungen begründet oder tatsächlich bei bestimmten Wetterlagen so zu beobachten ist, kann anhand der vorliegenden Daten nicht belegt werden.

Nach der Überschreitung der Scheitelwasserstände entspricht die Fallgeschwindigkeit auf den Halligen zunächst der Fallgeschwindigkeit vor den Halligen von circa 40 cm/h. Sofern eine Höhe von circa 30 cm bis 50 cm über dem Schwellwert einer beginnenden Überflutung unterschritten wird, verringert sich die Fallgeschwindigkeit auf den Halligen deutlich. Auf der Hallig Hooge sind dabei Fallgeschwindigkeiten von circa 6 cm/h bis 10 cm/h und auf der Hallig Nordstrandischmoor von circa 10 cm/h bis 30 cm/h zu beobachten (Abb. 11 und Abb. 12). Anhand der Sturmflutverläufe auf der Hallig Gröde können keine Fallge-

schwindigkeiten abgeleitet werden, da zwischen den wenigen verwertbaren Datensätzen weder parallele Aufzeichnungen zwischen dem Pegel Gröde-Hallig und Gröde-Anleger vorhanden sind, noch existieren zeitgleiche Aufzeichnungen an einem mit dem Pegel Gröde-Anleger korrelierenden Pegel.



Abb. 11: Ganglinie am Pegel Hooge-Schulwarft und Hooge-Anleger bei der Überflutung der Hallig Hooge am 29. Januar 1994



Abb. 12: Ganglinie am Pegel Nordstrandischmoor Hallig und Nordstrandischmoor bei der Überflutung der Hallig Nordstrandischmoor am 20. März 2004

Abb. 13 zeigt die Zunahme der Verweilzeit der Überflutungen auf den Halligen Hooge und Nordstrandischmoor in Abhängigkeit vom höchsten Scheitelwasserstand während der Überflutung. Während die Verweilzeit auf der Hallig Hooge bei allen Aufzeichnungen maximal circa sieben Stunden beträgt, wurden auf der Hallig Nordstrandischmoor auch schon Verweilzeiten von annähernd 24 Stunden aufgezeichnet. Hier muss ab Wasserständen größer als circa 290 cm über NN damit gerechnet werden, dass die Überflutung über zwei Tidehochwasser bestehen bleibt.



Abb. 13: Verweilzeit auf den Halligen Hooge und Nordstrandischmoor in Abhängigkeit vom höchsten Scheitelwasserstand während der Überflutung

## 4. Realisierungsvorschlag

Gemäß dem Landeskatastrophenschutzgesetz<sup>1</sup> haben an der Westküste und an der tidebeeinflussten Elbe die Landräte der Kreise Nordfriesland, Dithmarschen, Steinburg und Pinneberg sowie die Bürgermeisterin bzw. der Bürgermeister der Gemeinde Helgoland als Untere Katastrophenschutzbehörde den Katastrophenschutz für den Hochwasser-Katastrophenfall (zum Beispiel bei Sturmfluten) aufzubauen. Der LKN-SH nimmt gemäß Landeswassergesetz<sup>2</sup> die mit der Abwehr der durch den Zustand der Hochwasserschutzanlagen hervorgerufenen Gefahren für die Allgemeinheit zusammenhängenden Aufgaben war. Im Sturmflutund Katastrophenfall ist der LKN-SH zur technischen Beratung und Lagebeurteilung in die Katastrophenabwehrorganisation der Kreise integriert.

Für die Sicherstellung eines geordneten Ablaufs werden im Katastrophenfall im Dienstbezirk des LKN-SH fünf Abschnittsführungsstellen aufgebaut, die insgesamt 18 Wehrabschnitte koordinieren. Diese teilen sich in kleinere Wachabschnitte auf, die von Deichwachen kontrolliert werden. Um bei der Auslösung eines Sturmflutalarms die Abschnittsführungs-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Gesetz über den Katastrophenschutz in Schleswig-Holstein (Landeskatastrophenschutzgesetz) i.d.F.d.B. 10. Dezember 2000.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Wassergesetz des Landes Schleswig-Holstein (Landeswassergesetz) in der Fassung vom 11. Februar 2008.

stellen, Wehrabschnitte etc. aufbauen zu können, bedarf es einer Vorlaufzeit von circa einer Stunde, wobei der Aufwand als extrem hoch einzustufen ist (persönliche Mitteilung Frerk Jensen, LKN-SH). Deshalb wird die Auslösung eines Sturmflutalarms jeweils intensiv mit den Kreisen diskutiert. Dem LKN-SH obliegt es dabei, die Situation unter anderem aus hydrologischer Sicht zu bewerten und eine Einschätzung über die zu erwartende Entwicklung der Sturmflutwasserstände abzugeben.

Dafür werden unter anderem der Wasserstandsvorhersage- und Sturmflutwarndienst des BSH (JENSEN et al., 2008) genutzt, der den LKN-SH neben persönlichen Beratungen auch über einen sogenannten FACT24-Service automatisch informiert, sobald Wasserständen von 1,0 m und 1,5 m über dem mittleren Hochwasser am Pegel Husum erwartet werden. Um die geographisch stark strukturierte Region der nordfriesischen Wattenmeerküste mit den vorgelagerten Außensänden, Inseln und Halligen, differenzierter zu berücksichtigen, werden bei Sturmfluten zusätzlich manuell Windstauwerte am Pegel Husum ermittelt und die aktuelle Tideganglinie, Windgeschwindigkeit, Windrichtung sowie die aktuelle Windstaukurve mit historischen Sturmfluten verglichen.

Am Pegel Munkmarsch können bei Windrichtungen von circa 340° Windstauhöhen von bis zu 150 cm auftreten, während die Wasserstände in Husum noch unterhalb dieses Schwellwertes liegen. Dasselbe gilt für den Pegel Schlüttsiel, dort können die Wasserstände bei hohen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen von circa 200° ebenfalls höher als am Pegel Husum auflaufen (vgl. Kap. 2.2). Die Ermittlung von Windstauwerten allein am Pegel Husum ist demnach nicht für die gesamte nordfriesische Küste repräsentativ.

Im Folgenden wird eine Realisierungsmöglichkeit für die Verwendung der vorgestellten Ergebnisse im Rahmen einer regionalisierten Sturmflutvorhersage für den LKN-SH vorgestellt, um die äußerst geringe Vorlaufzeit im Falle einer Entscheidung für die Auslösung eines Sturmflutalarms durch eine Kombination von guten Vorhersagen des BSH und eigenen Kenntnissen über das Sturmflutgeschehen zu verlängern.

Eine Voraussetzung für die Anwendung der hier vorgestellten Verfahren ist die Verfügbarkeit der notwendigen Daten im operationellen Betrieb. Dies trifft insbesondere auf die Pegeldaten der als repräsentativ hervorgehobenen Pegel und die für die Berechnung des Mittelwindes notwendigen Windinformationen zu (vgl. Kap. 2.2).

Derzeit sind die Daten der Pegel Husum und Wittdün online verfügbar und die Daten der Pegel Schlüttsiel, Hooge-Anleger und Munkmarsch können im Sturmflutfall alle 15 Minuten zum LKN-SH übertragen werden. Der Pegel Nordstrandischmoor steht im operationellen Betrieb aufgrund einer nicht vorhandenen festen Stromversorgung nicht zur Verfügung, kann aber annähernd durch den mit einem ISDN- und Stromanschluss ausgestatteten Pegel Strucklahnungshörn ersetzt werden. Prinzipiell ist eine hohe Verfügbarkeit an allen repräsentativen Pegeln zu empfehlen.

Die für den Mittelwind notwendigen Winddaten der Stationen stehen im LKN-SH nur teilweise mit den Stationen List, St. Peter-Ording und Helgoland operationell zur Verfügung. Die Stationen Ems und UFS Deutsche Bucht sollten hier ebenfalls ergänzt werden. Die Winddaten sollten automatisiert in den Mittelwind umgerechnet und neben dem ebenfalls automatisch berechnetem Inhomogenitätsindex in dem vom LKN-SH genutzten Wasserstands-Informationssystem vorgehalten werden. Die Möglichkeit, graphisch aufbereitete Ergebnisse aus dem operationellen Modellsystem des BSH im Sturmflutfall zur Verfügung gestellt zu bekommen, sollte ebenfalls genutzt werden, um die eigenen punktuellen Messungen in die Fläche projizieren zu können.

Über den berechneten Mittelwert kann der LKN-SH den Windstau am Bezugspegel Hooge-Anleger bestimmen, um darüber auf die zu erwartenden Scheitelwasserstände in den einzelnen Regionen zu schließen (Abb. 5). Dabei ist zu beachten, dass die Qualität der berechneten Scheitelwasserstände in den einzelnen Regionen nur so gut sein kann, wie die Qualität des Inputs für die Berechnung der Vorhersage am Bezugsort. Beträgt der Inhomogenitätsindex < 0,9 (vgl. Kap. 2.2), so ist eine eingehende Prüfung der Winddaten und gegebenenfalls eine Rückkopplung mit dem BSH über die Windstauentwicklung zu empfehlen.

Die Vorhersagen und die Modellergebnisse des BSH sowie die Naturdaten können anschließend mit den eigenen Vorhersagen verglichen werden. Treten signifikante Differenzen zwischen den einzelnen Ergebnissen auf, so ist eine Diskussion mit dem BSH über die zu erwartenden Wasserstände anzustreben, um die Vorhersagen zu verifizieren.

Mit Hilfe dieser möglichst belastbaren Vorhersagen kann bei der Katastrophenabwehr der Fokus zunächst auf die Region gesetzt werden, bei der mit den höchsten Wasserständen zu rechnen ist. Diese Vorgänge sollten regelmäßig wiederholt werden, um die Berechnungen an die jeweils aktuelle Wetterlage anzupassen.

Die aufgetretenen Differenzen zwischen Vorhersagen und Beobachtungen sollten nach jedem Sturmflutereignis analysiert werden, um die gewonnenen Erkenntnisse wenn möglich in das Vorhersageverfahren mit einfließen zu lassen und um die Vorhersagen in einem iterativen Prozess weiter zu verbessern.

Im Allgemeinen liefern die numerischen Modelle des BSH gute Sturmflutvorhersagen für den Vorhersagezeitraum bis 24 Stunden. Sofern jedoch über die Vorhersagen des BSH hinaus kleinräumige Aussagen für Nordfriesland benötigt werden, stellt das vorgestellte empirische Verfahren eine gute Ergänzung für einen Vorhersagezeitraum bis sechs Stunden dar. Zudem kann durch die Anwendung der Windstaukurven eine klare Vorstellung über die regionale Verteilung der in Nordfriesland zu erwartenden Sturmflutwasserstände vermittelt werden.

## 5. Schriftenverzeichnis

ANONYMUS: Gezeitentafeln. Europäische Gewässer. BSH Hamburg und Rostock, 2008.

- BAEHRENS, C.; BAUDLER, H.; BECKMANN, B.-R.; BIRR, H.-D.; DICK, S.; HOFSTEDE, J.; KLEINE,
  E.; LAMPE, R.; LEMKE, W.; MEINKE, I.; MEYER, M.; MÜLLER, R.; MÜLLER-NAVARRA,
  S. H.; SCHMAGER, G.; SCHWARZER, K. und ZENZ, T.: Die Wasserstände an der Ostseeküste. Die Küste, 66, 2003.
- DUENSING, G.; HÖFLICH, O.; KAUFELD, L.; SCHMIDT, H.; OLBRÜCK, G. und BRANDT, B.: Meteorologische Untersuchungen über Stürme an der deutschen Nordseeküste. Seewetteramt Hamburg: Deutscher Wetterdienst, Einzelveröffentlichung Nr. 108, 1985.
- FELLER, W. and GASSMANN, F.: Analysis of Wind and Turbulence Fields in a Region with Complex Orography. Journal of Applied Meteorology, Volume 36, Issue 9, 1133–1137, 1997.
- JENSEN, J. und MUDERSBACH, C.: Zeitliche Anderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. In: Glaser R., Schenk, W., Vogt, J., Wießner, R., Zepp, H. und Wardenga, U. (Hrsg.), Berichte zur Deutschen Landeskunde. Themenheft: Küstenszenarien, Band 81, Heft 2, 99–112, Leipzig: Selbstverlag Deutsche Akademie für Landeskunde e.V., 2007.
- JENSEN, J.; MUDERSBACH, C.; MÜLLER-NAVARRA, S.-H.; BORK, I.; KOZIAR, C. und RENNER, F.: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. Die Küste, 71, S. 123–168, 2006.
- JENSEN, J. und MÜLLER-NAVARRA, S.: Storm Surges on the German Coast. Die Küste, 74, 2008. MÜLLER-NAVARRA, S. H. und GIESE, H.: Empirische Windstauformeln für die deutsche Bucht.
- In: Deutsche IDNDR-Reihe, 7, 37–41, 1997.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H. and GIESE, H.: Improvements of an empirical model to forecast wind surge in the German Bight. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Jahrgang 51, 4, 385–405, 1999.

- MÜLLER-NAVARRA, S. H.; LANGE, W.; DICK, S. und SOETJE, K.: Über die Verfahren der Wasserstands-Sturmflutvorhersage. Promet, Jahrgang 29, Nr. 1–4, 117–124, 2003.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Über neuere Verfahren der Wasserstands- und Sturmflutvorhersage für die deutsche Nordseeküste. Die Küste, 76, 2009.
- MURAWSKI, J.: Die Wechselwirkung von Seegang und Strömung: Eine theoretische Grundlegung mit Modellanwendungen. GKSS Bericht 2007/12.
- RÖSKE, F.: Sea Level Forecasts Using Neural Networks. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Volume 49, Number 1, 71 – 99, 1997.
- SMITH, S. D. and BANKE, E. G.: Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. Quart. J. R. Met. Soc., 101, 665–673, 1975.
- TOMCZAK, G.: Der Einfluß der Küstengestalt und des vorgelagerten Meeresbodens auf den windbedingten Anstau des Wassers, betrachtet am Beispiel der Westküste Schleswig-Holsteins. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Band 5, 2/3, 114–131, 1952.

## Der Meeresspiegelanstieg Ursachen, Tendenzen und Risikobewertung

Von Gabriele Gönnert, Jürgen Jensen, Hans von Storch, Sigrid Thumm, Thomas Wahl und Ralf Weisse

## Zusammenfassung

Im Zuge der aktuellen Klimadiskussion und im Rahmen der Entwicklung von Bemessungskonzepten für Hochwasserschutzanlagen findet das Thema Meeresspiegelanstieg große Beachtung. In den letzten zehn Jahren wurden zu diesem Themengebiet verschiedenste Forschungsvorhaben auf globaler, regionaler und lokaler Ebene durchgeführt. Die vorliegende Untersuchung stellt die Bandbreite der in der Klimaforschung zum Meeresspiegelanstieg angewandten Methoden und derzeitigen Arbeiten und die sich daraus ergebenden Ansätze für die Bemessung von Hochwasserschutz- und Küstenschutzvorhaben dar.

Zunächst wird auf die Ursachen für den Meeresspiegelanstieg und seine einzelnen Komponenten eingegangen. Die Bandbreite des bisher beobachteten Meeresspiegelanstiegs, die verschiedenen Projektionsmethoden zum Ermitteln des zukünftigen Meeresspiegelanstiegs sowie deren Ergebnisse werden aufgezeigt und diskutiert. Die dieser Analyse zugrundeliegende Literatur wird in einem Exkurs detailliert dargestellt. Mit Fokus auf die Deutsche Bucht und die Metropole Hamburg erfolgt eine Auswertung der herangezogenen Arbeiten. Für diesen Bereich der Nordseeküste werden durch unterschiedliche Autoren Anstiegswerte von –5 bis 115 cm projiziert. Der mittlere relative Anstieg des MSL auf der Basis von Wasserstandsbeobachtungen beträgt für den Zeitraum seit 1900 ca. 20 cm für die deutsche Nordseeküste.

## Schlagwörter

#### Meeresspiegelanstieg, Hochwasserschutz, Küstenschutz, Risikobewertung, Sturmflut

#### Summary

In the course of the actual climate discussion and in the context of developing design level concepts for storm surge protection facility the issue of mean sea level rise is very important. During the past ten years there were many research projects on global, regional and local layer. The exploratory study presents the spectrum of methods and results of climate research to the topic of sea level rise.

First the reasons for mean sea level rise and its single components are explained. The up to today recognized mean sea level rise, the different projection methods of future mean sea level rise and their results are presented and discussed. A detailed analysis of the considered literature is described in an excursion. With focus to the German Bight and the metropolis Hamburg several authors project a sea level rise in a range of -5 to 115 cm.

## Keywords

Mean sea level rise, flood protection, coastal protection, risk value, storm surge

## Inhalt

1. Einleitung	 226
2. Ursachen für den Meeresspiegelanstieg	 227
3. Komponenten des Meeresspiegelanstiegs	 231
4. Beobachtete Änderungen des Meeresspiegels	 232
5. Projektionen zum zukünftigen Meeresspiegelanstieg	 238
5.1 Projektionen zum globalen Meeresspiegelanstieg	 238
5.2 Projektionen zum regionalen Meeresspiegelanstieg	 241
5.3 Projektionen zum lokalen Meeresspiegelanstieg	 243
6. Exkurs zur grundlegenden Literatur	 244
6.1 Die Komponenten des Meeresspiegelanstiegs und ihre Größenordnung	 244
6.2 Ergebnisse aus Analysen der beobachteten Änderungen des Meeresspiegels .	 248
6.2.1 Ergebnisse zum globalen Meeresspiegelanstieg aus Analysen von	
Beobachtungsdaten	 248
6.2.2 Ergebnisse zum regionalen Meeresspiegelanstieg aus Analysen von	
Beobachtungsdaten	 250
6.2.3 Ergebnisse zum lokalen Meeresspiegelanstieg aus Analysen von	
Beobachtungsdaten	 251
7. Zusammenfassende Auswertung der Ergebnisse	 251
8. Schriftenverzeichnis	 253

#### 1. Einleitung

Der Küstenschutz ist seit jeher geprägt durch die Frage des Meeresspiegelanstiegs. Gerade in den letzten Jahren hat hierbei die Diskussion um die zunehmende Klimaerwärmung und eine Beschleunigung des Anstiegs zugenommen. Eine Vielzahl an Informationen existiert zu diesem Thema, die häufig aufgrund der gegensätzlichen oder stark variierenden Inhalte Verwirrung stiften. Deshalb wird hier eine Zusammenfassung der neuesten Erkenntnisse vorgestellt. Zum besseren Gesamtverständnis werden zunächst die Ursachen der Meeresspiegelschwankungen und ihrer etwaigen Beschleunigung erläutert, um dann die neueste Literatur zum vergangenen Meeresspiegelanstieg und den zukünftigen Projektionen darzulegen. Sie geht mit einer kritischen Auseinandersetzung der Inhalte einher. Ein umfassender Exkurs erlaubt dem Leser die den Inhalten zu Grunde liegende Analyse von nationaler und internationaler Literatur im Detail nachzuvollziehen. Eine abschließende Auswertung der Ergebnisse dient zur Bewertung der Vielzahl an Informationen.

Eine gängige Definition des mittleren Meeresspiegels (MSL) ist das arithmetische Mittel stündlich gemessener Wasserstände an einem betrachteten Tidepegel über einen bestimmten Zeitraum (Australian Hydrographic Service). Der MSL entspricht somit nicht dem mittleren Tidehalbwasser (MT1/2w), welches sich aus der arithmetischen Mittelung von beobachteten Tidehoch- und Tideniedrigwassern über einen bestimmten Zeitraum ergibt. Abb. 1 verdeutlicht diesen Zusammenhang.



Abb. 1: Definition des Mean Sea Level und Unterschied zum mittleren Tidehalbwasser

Zukünftige Entwicklungen des MSL werden unter anderem von der Entwicklung des globalen Klimas und damit von der zukünftigen gesellschaftlichen Entwicklung beeinflusst. Letztere ist nur eingeschränkt vorhersagbar und damit unsicher. In der Klimaforschung werden deshalb so genannte Szenarien<sup>1</sup> eingesetzt, um Bandbreiten möglicher Entwicklungen aufzeigen zu können. Mit Hilfe von Modellen werden aus diesen Szenarien so genannte Projektionen abgeleitet, die die Bandbreite möglicher klimatischer Entwicklungen in der Zukunft beschreiben. Die in diesem Beitrag diskutierten Projektionen beziehen sich zumeist auf den Zeitraum bis 2100.

## 2. Ursachen für den Meeresspiegelanstieg

Langfristige Änderungen des Wasserstandes werden durch eine Vielzahl von Faktoren verursacht.

Globale MSL-Änderungen werden durch Änderungen des Volumens der Wassermassen in den Ozeanen verursacht. Auf Zeitskalen von einigen hundert Jahren spielen dabei vor allem die thermische Ausdehnung des Wassers infolge der globalen Erwärmung, sowie der Eintrag von Masse infolge des Abschmelzens von Landeismassen eine Rolle. Änderungen des Volumens der Ozeanbecken (z.B. durch tektonische Prozesse) spielen in den betrachteten Zeiträumen (einige hundert Jahre) eine eher untergeordnete Rolle.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Szenarien sind keine Vorhersagen, sondern liefern Antworten auf Fragestellungen vom Typ "Was wäre, wenn …?".

Regionale Änderungen des MSL werden durch Umverteilung von Wassermassen bei konstantem Volumen verursacht, d.h. das globale Mittel dieser Änderungen ist Null. Prozesse, die zu regionalen MSL-Änderungen beitragen sind regionale Unterschiede in der globalen Erwärmung und damit der thermischen Ausdehnung, Änderungen der mittleren Ozeanzirkulation, Änderungen im mittleren Luftdruckfeld, lokale Landhebungen oder -senkungen oder Effekte des Abschmelzens großer Eismassen auf das Schwerefeld der Erde. Lokal können Baumaßnahmen oder Änderungen des Seegrundes eine Rolle spielen.

In Zeiträumen von einigen hundert oder gar tausenden Jahren wird das MSL-Niveau im Wesentlichen durch Klimaschwankungen bestimmt. Ein anschauliches Beispiel ist die MSL-Entwicklung seit der letzten Eiszeit. Zu Beginn der Vereisung führte eine Abkühlung zur Bindung von Wassermassen in Form von Gletschern und Inlandeis und damit verbunden zu einer starken Absenkung des MSL. Zum Höhepunkt der Vereisung war das heutige Gebiet der Nordsee beinahe frei von Wasser, der heutige Bereich der Ostsee war von Gletschereismassen bedeckt. Einsetzende Schmelzvorgänge infolge der beginnenden Warmzeit führten anschließend zu einem Anstieg des MSL, wie am Beispiel der Nordsee in Abb. 2 illustriert. Dabei wird für die Nordsee näherungsweise das mittlere Tidehochwasser als MSL angenommen.



Abb. 2: Meeresspiegelschwankungen in der Nordsee über die letzten 7000 Jahre (nach JENSEN und MÜLLER-NAVARRA, 2008)

Während MSL-Änderungen sowohl die mittleren, als auch die extremen Wasserstände (Sturmflutwasserstände) beeinflussen, wirken auf letztere noch eine Reihe weiterer Faktoren, die zu zusätzlichen, langfristigen Änderungen führen können.

Änderungen im meteorologisch bedingten Anteil des Sturmflutwasserstandes werden durch Änderungen des Windklimas verursacht. Zunehmende Windgeschwindigkeiten oder Änderungen der vorherrschenden Windrichtung können dafür sorgen, dass Sturmfluten zusätzlich zu den Änderungen des mittleren Wasserstandes höher auflaufen können. Stärker ausgeprägte Tiefdruckgebiete oder Änderungen der Zuggeschwindigkeiten können über den invers barometrischen Effekt ebenfalls zu einer Erhöhung von Sturmflutwasserständen beitragen.

Änderungen der Höhe des Wellenauflaufs können ebenfalls durch Veränderungen des Windklimas oder durch Veränderungen der lokalen Topographie verursacht werden. Diese Veränderungen sind im unmittelbaren Küstenvorfeld relevant und entscheidend für die Belastung der Bauwerke.

Änderungen des Gezeitenregimes können unter anderem durch eine veränderte Ausbreitungsgeschwindigkeit der Gezeitenwelle in Folge von MSL-Änderungen auftreten. Aufgrund von Wechselwirkungen mit dem meteorologisch bedingten Anteil können solche Effekte Einfluss auf das Sturmflutklima haben. Diese sind hauptsächlich im flachen Wasser von Bedeutung.

Die Faktoren sind bisher unterschiedlich gut erforscht. Während es relativ fundierte Aussagen zu zukünftigen Änderungen im globalen MSL und im meteorologisch bedingten Anteil des Wasserstandes gibt, sind regionale/lokale MSL-Änderungen, Änderungen im Gezeitenregime sowie Änderungen im Wellenauflauf bisher nur unzureichend erforscht und verstanden.

Aussagen zu zukünftigen Entwicklungen des MSL hängen von der zukünftigen Klimaentwicklung ab und sind dementsprechend mit Unsicherheiten verbunden. Der von der UN einberufene zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) verwendet zur Abschätzung möglicher Änderungen eine Reihe von Emissionszenarien bis zum Jahr 2100, die sich jeweils in ihren Annahmen bezüglich zukünftiger gesellschaftlicher Entwicklungen (d.h. Treibhausgasemissionen) unterscheiden. Diese Emissionsszenarien werden anschließend für die Klimamodelle in Konzentrationen der Treibhausgase umgerechnet. Mit Hilfe der Klimamodelle werden dann entsprechende, zukünftige Temperaturänderungen projiziert (Abb. 3). Welches, und ob überhaupt eines dieser in Abb. 2 dargestellten und erläuterten Szenarien eintreten wird, ist unter anderem von der wirtschaftlichen Entwicklung, der Anwendung erneuerbarer Energien und der Umsetzung des Klimaschutzes abhängig (s. Erläuterung zu Abb. 3). Derzeit ist die zukünftige Entwicklung dieser Faktoren jedoch nicht genau abschätzbar. Die Szenarien bilden geschlossene und in sich plausible Annahmen, die jedoch nicht mit Eintrittswahrscheinlichkeiten belegt werden können. Solche Szenarien bilden die wissenschaftliche Grundlage für Untersuchungen zu Klimaveränderungen und deren Auswirkungen in der Zukunft.



Abb. 3: Zunahme der globalen Oberflächentemperatur bei unterschiedlichen Emissionsszenarien (IPCC, 2007)

Im IPCC Special Report on Emission Szenarios (SRES) sind eine Reihe solcher Szenarien veröffentlicht. Ein grundsätzlicher Unterschied dieser Szenarien besteht darin, ob sich die gesellschaftliche Entwicklung in Zukunft stärker an ökonomischen oder ökologischen Werten orientieren wird. Die vom IPCC verwendeten mit "A" bezeichneten Szenarien (A1Fl, A1B. A1T, A2) orientieren sich eher an einer ökonomischen, die mit "B" bezeichneten Szenarien (B1, B2) eher an einer ökologischen Entwicklung. Darüber hinaus wird zwischen eher global ausgerichteten Szenarien (Bezeichnung mit der Ziffer "1"; A1Fl, A1B, B1) und eher regional ausgerichteten Szenarien (Bezeichnung mit der Ziffer "2"; A2, B2) differenziert. Zusätzlich wurde die A1 Szenarienfamilie in drei Gruppen unterteilt, die sich aufgrund ihrer technologischen Ausrichtung unterscheiden. Dabei basiert das A1Fl Szenario auf einer intensiven Nutzung fossiler Energieträger, das A1T Szenario auf einer überwiegender Nutzung nichtfossiler Energiequellen und das A1B Szenario auf einem ausgewogenen Mix aus fossilen und regenerativen Energiequellen (KAPPAS, 2009).

Auf Grundlage dieser Emissionsszenarien, entsprechenden Klimamodellrechnungen und weiteren Quellen liefert der IPCC Abschätzungen über die zukünftige Entwicklung des globalen mittleren MSL bis 2100. In der jüngsten Vergangenheit wurde in einigen wissenschaftlichen Veröffentlichungen vermutet, dass aufgrund neuester Ergebnisse die Zahlen des IPCC bzgl. der zukünftigen Entwicklungen des globalen MSL nach oben korrigiert werden müssten. Aussagen zu regionalen Änderungen liegen bisher nicht in gleichem Umfang vor bzw. sind mit weiteren Unsicherheiten behaftet.

Im vorliegenden Beitrag werden Ergebnisse aus globalen und regionalen Studien, welche sowohl mit Hilfe numerischer Modelle als auch auf Basis der Analyse von Beobachtungsdaten erzielt wurden, vorgestellt und anschließend mit einer Risikobewertung dieser Ergebnisse beispielhaft auf die Metropolregion Hamburg übertragen. Zur Auswertung werden nur solche wissenschaftliche Arbeiten herangezogen, die seit dem Jahr 2000 zum Thema "MSL- Anstieg" erschienen sind. Die zeitliche Grenze wurde gesetzt, um die große Menge an vorhandenen Arbeiten auf ein übersichtliches Maß zu reduzieren und dabei die aktuellsten Ergebnisse einzubeziehen. Grundlage ist zunächst der IPCC-Bericht 2007, da er den in der wissenschaftlichen Gemeinschaft hergestellten Konsens verdeutlicht und eine wesentliche Basis für politische Entscheidungen liefert.

## 3. Komponenten des Meeresspiegelanstiegs

Zur Analyse des möglichen gesamten MSL-Anstiegs müssen verschiedene Komponenten untersucht und miteinander verknüpft werden. Es ist dabei zu unterscheiden zwischen Änderungen im globalen Mittel und regionalen Änderungen, die sich im Wesentlichen durch Umverteilung von Wassermassen ergeben. Letztere können regional zu Abweichungen vom globalen MSL-Anstieg führen, beeinflussen diesen in seiner Gesamtheit jedoch nicht. Schließlich werden lokale Entwicklungen des MSL betrachtet (siehe Kap. 5.3).

Als Ursachen für Änderungen im globalen MSL kommen folgende Faktoren in Betracht:

- 1. Thermische Ausdehnung: Durch Erwärmung des Meerwassers aufgrund steigender Temperaturen kommt es zu einer Zunahme des Volumens des Meerwassers bei konstanter Masse. Als Folge steigt der globale MSL an. Gegenwärtig liefert die thermische Ausdehnung den größten Beitrag zum beobachteten MSL-Anstieg.
- 2. Gletscher: Die Masse der Ozeane nimmt durch das Auftauen der auf dem Land liegenden Gletscher zu, folglich steigt auch der globale MSL an. Dieser Prozess trägt nach der thermischen Ausdehnung derzeit am stärksten zum globalen MSL-Anstieg bei.
- 3. Das Grönländische Eisschild: Durch Abschmelzen des grönländischen Eisschildes entsteht analog ein entsprechender Beitrag zum MSL-Anstieg.
- 4. Das Antarktische Eisschild: Der Beitrag des antarktischen Eisschildes zum MSL-Anstieg wird kontrovers diskutiert. Bisher wird davon ausgegangen, dass aufgrund einer projizierten Zunahme der Niederschläge in der Antarktis ein Anwachsen der dortigen Eismassen und damit ein negativer Beitrag zum MSL-Anstieg zu erwarten ist. Ein zunehmender Eismassenverlust aufgrund einer beschleunigten Eisschilddynamik könnte das Vorzeichen umkehren.
- 5. Permafrost (Dauerfrost): Auftauprozesse in Gebieten, in denen der Boden dauerhaft gefroren ist (Permafrostgebiete) führen neben einer zusätzlichen Zufuhr an Süßwasser vor allem zur Freisetzung von im Boden gespeichertem CO<sub>2</sub>, was die globale Temperaturzunahme im Sinne eines positiven Rückkopplungseffektes antreibt. Sowohl diese Prozesse als auch die Änderungen im Grundwasser oder die durch die Auftauprozesse in Gang gesetzten Sedimentationsprozesse sind noch nicht hinreichend erforscht, um fundierte Aussagen treffen zu können. Es wird jedoch auch an dieser Stelle von einem positiven Beitrag zum MSL-Anstieg ausgegangen, der bislang aufgrund der großen Unsicherheiten vom IPCC nicht bilanziert wurde.

Regional können eine Reihe weiterer Faktoren zu MSL-Änderungen führen, die vom globalen Mittel abweichen:

6. Umverteilung aufgrund von Gravitationseffekten: Große Inlandseismassen üben auf die umliegenden Ozeane eine gravitative Anziehungskraft aus. Demzufolge ist der MSL in ihrer Nähe erhöht. Schmelzen die Eismassen, nimmt die Anziehungskraft ab und der MSL sinkt im Umfeld des Gletschers lokal trotz des eustatischen MSL- Anstiegs ab. Dagegen kommt es in weiterer Entfernung vom Eisschild aufgrund dieser Gravitationsänderungen zu einem MSL-Anstieg, der über dem des eustatischen Anstiegs liegt (MITROVICA et al., 2001).

- 7. Änderungen der Ozeanzirkulation können zu Umverteilungen von Wassermassen führen.
- 8. Änderungen im mittleren Luftdruckfeld können ebenfalls zu regionalen Änderungen des mittleren MSL führen. Steigt der Luftdruck über einer Region, sinkt der Wasserstand infolge des zusätzlichen Gewichts der auf ihm lastenden Luftmassen und umgekehrt. Eine Erhöhung des mittleren Luftdrucks um etwa 1 hPa entspricht dabei in etwa einer Absenkung des MSL um 1 cm. Dieser Effekt wird als *invers barometrischer Effekt* bezeichnet.
- 9. Lokal können Änderungen im Gezeitenregime, Landhebung/-senkung (s. Kap. 6.2), Änderungen des Meeresgrundes etc. eine Rolle spielen.
  - 4. Beobachtete Änderungen des Meeresspiegels

Es gibt im Wesentlichen zwei Datenquellen, aus denen langfristige Veränderungen des MSL ermittelt werden können: Pegelmessungen und Satellitendaten. Pegelmessungen sind im Allgemeinen über längere Zeiträume verfügbar, aber ihre räumliche Abdeckung ist nicht optimal. Satellitendaten liefern ein nahezu globales (66S-66N) Bild, sind jedoch erst seit etwa 1993 verfügbar (IPCC, 2007). Beide Datenquellen haben ihre Vor- und Nachteile. Eine Diskussion findet man z.B. im 4. Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC).

Grundsätzlich wird deutlich, dass die aus Pegeldaten oder Satellitendaten ermittelten Anstiegsraten und die daraus abgeleiteten Projektionen sehr stark von der Länge und der räumlichen Zugehörigkeit der verwendeten Zeitreihe(n) abhängen. Alle Untersuchungen, die den großflächigen globalen MSL mit dem an den Küsten beobachteten MSL vergleichen, führen zu dem Ergebnis, dass die beiden Größen unterschiedliche Verhaltensmuster aufweisen. Dies muss bei entsprechend stärkerem oder schwächerem Anstieg entlang der Küsten mit berücksichtigt werden.

Für das 20. Jahrhundert ergibt sich aufgrund von Pegeldaten ein Anstieg für den globalen MSL mit geringen Schwankungen im Bereich von etwa 1,7 mm/Jahr (HOLGATE, 2007; IPCC, 2007), wohingegen für den Nordseebereich zuletzt eine Anstiegsrate von ca. 1,4 mm/a (WOODWORTH et al., 2009) ermittelt wurden. Detaillierte Analysen weiterer Autoren sind im Exkurs in Abschnitt 6.2 dargestellt.

Ein Großteil der Autoren neuester Veröffentlichungen ist bestrebt die erzielten Ergebnisse von Pegelauswertungen mit den seit 1993 verfügbaren Satellitendaten zu vergleichen. Dabei werden oft deutliche Unterschiede zwischen den Zeitreihen bzw. den daraus abgeleiteten Anstiegsraten festgestellt. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass der Zeitraum seit 1993 zu kurz ist, um klimabeeinflusste Größen wie z.B. den MSL mit großer Genauigkeit zu analysieren bzw. aus dem kurzen Zeitraum auf ein längerfristiges Verhalten zu schließen.

Für den Zeitraum 1993–2006 liefern Satellitendaten eine Rate von 3,1 mm/Jahr (CHURCH et al., 2008). Letztere wird von Pegeldaten bis etwa 1999 bestätigt. Für den Zeitraum danach wird eine Diskrepanz zwischen den Analysen aus Pegel- und Satellitendaten beobachtet, deren Ursache bisher unklar ist (DOMINGUES et al., 2008). Abb. 4 zeigt die Entwicklung des globale MSL über die letzten ca. 100 Jahre basierend auf Pegel- und Satellitendaten (CHURCH et al., 2008). Die Abb. 4 zeigt ebenfalls eine Abschätzung globaler MSL-Trends über jeweils 20-Jahre lange Perioden, deren Anfangsdatum um jeweils 1 Jahr verschoben wurde. Diese Analyse illustriert, dass der MSL-Anstieg im vergangenen Jahrhundert nicht konstant war, sondern erheblichen Schwankungen unterworfen war. Vor etwa 1930 wurden zunächst Raten von weniger als 1 mm/Jahr beobachtet. Zwischen 1930–1950 stiegen die Raten auf etwa 2–2,5 mm/Jahr an. Zwischen etwa 1963–1991 wurde ein Rückgang beobachtet, der von einigen Autoren einer Reihe von Vulkanausbrüchen zugeschrieben wird (CHURCH et al., 2008). Danach stiegen die Raten wieder an, wobei die letzten Werte die größten im gesamten Datensatz darstellen und nahe an denen aus Satellitendaten ermittelten Werten liegen.



Abb. 4: (a) Global gemittelter MSL 1870–2006 mit Fehlerabschätzung von einer Standardabweichung. (b) Lineare Trends des global gemittelten MSL über jeweils 20 Jahre mit Fehlerabschätzung von einer Standardabweichung. Die Trends sind jeweils dem mittleren Jahr der jeweiligen 20-jährigen Periode zugeordnet. Die Werte der letzten fünf 20-Jahresperioden sind in rot dargestellt. (c) Histogramm der 20-jährigen Trends innerhalb des Zeitraums 1870–2006. Der Mittelwert und eine Standardabweichung sind ebenfalls dargestellt. Die Werte der letzten fünf 20-Jahresperioden sind in rot dargestellt (nach CHURCH et al., 2008)

Regional kann es zu erheblichen Abweichungen von diesen Mittelwerten kommen. Abb. 5 verdeutlicht, dass der beobachtete MSL-Anstieg nicht einheitlich über den Globus verteilt ist. Innerhalb des betrachteten Zeitraums 1993–2006 sind dabei die größten Anstiege im Bereich des Westpazifiks zu beobachten, wogegen die Anstiege in anderen Regionen deutlich geringer ausfallen. Aufgrund des kurzen betrachteten Zeitraums (1993–2006) veranschaulicht das Bild zu einem großen Teil interne Klimavariabilität verbunden mit dem El-Nino Phänomen (CHURCH et al., 2008). Auf längeren Zeitskalen zeigt das Muster nach wie vor regionale Strukturen, diese sind zum Teil jedoch geringer ausgeprägt (CHURCH et al., 2008).



Abb. 5: Räumliche Verteilung des Meeresspiegelanstiegs 1993–2006 aus Satellitendaten. Die Daten sind dargestellt als Abweichungen vom globalen mittleren Anstieg. Rote Flächen weisen auf einen regionalen Anstieg stärker als das globale Mittel, blaue auf einen regionalen Anstieg geringer als das globale Mittel hin (nach CHURCH et al., 2008)

In Tab. 1 wird die zeitliche Entwicklung des globalen MSL dargestellt, wobei diese nach den Beiträgen einzelner Prozesse differenziert wird (IPCC, 2007). Die Tabelle zeigt, dass die Bilanz der Einzelprozesse vom beobachteten MSL-Anstieg abweicht und das Budget zumindest für den Zeitraum 1961–2003 nicht geschlossen ist.

Zudem befinden sich sowohl im IPCC-Bericht 2001 als auch im aktuellen Bericht 2007 Angaben zum aktuell beobachteten MSL-Anstieg, der in die einzelnen (Haupt-) Faktoren aufgeschlüsselt wird. Der IPCC-Bericht 2001 umfasst den Betrachtungszeitraum 1910–1990, wohingegen der aktuelle IPCC-Bericht 2007 die Zeitspanne 1961–2003 betrachtet. Diese Veränderung wird vom IPCC durch die unzureichende Datenlage in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts begründet, sodass die Ergebnisse größere Unregelmäßigkeiten aufweisen. Weiterhin wurde durch den IPCC 2001 festgestellt, dass eine signifikante Erwärmung des Weltozeans erst Ende der fünfziger Jahre des 20. Jahrhunderts auftrat, sodass im IPCC 2007 erst dieser Zeitraum als relevant angesehen wird.

Quelle	Globaler MSL-Anstieg 1961–2003 [mm/Jahr]	Globaler MSL-Anstieg 1993–2002 [mm/Jahr]			
Thermische Ausdehnung	0,30 – 0,54	$1,1-2,1^1$			
Gletscher	0,32 – 0,68	0,55 – 0,99			
Grönland	(-0,07) - 0,17	0,14 - 0,28			
Antarktis	(-0,27) - 0,55	(-0,14) - 0,56			
Gesamt	0,6 – 1,6	2,1 - 3,5			
Beobachtet	1,3 – 2,3	2,4 - 3,8			
Differenz	0 – 1,4	(-0,7) - 1,3			

Tab. 1. Entwicklung des globalen wist nach in CC (200/)	Tab. 1: Entwicklung	des globalen MSL	nach IPCC (2007)
---	---------------------	------------------	------------------

Tab.	2:	IPCC-	Angaben	zum	beobachteten	globalen	Meeress	piegelanstieg	(im	Vergleich:	IPCC,	2001
						und 20	07)					

	1910–1990 (IPCC 2001) mm/Jahr	1961–2003 (IPCC 2007) mm/Jahr
Thermische Ausdehnung	0,3 – 0,7	0,30 – 0,54
Gletscher	0,2 - 0,4	0,32 – 0,68
Grönländisches Eisschild	0,0 - 0,1	(-0,07) - 0,17
Antarktisches Eisschild	(-0,2) – 1,0	(-0,27) – 0,55
Gesamter Anstieg berechnet <sup>1</sup>	(-0,8) - 2,2	0,6 – 1,6
Gesamter Anstieg beobachtet <sup>2</sup>	1,0 – 2,0	1,3 - 2,3

1 = Ergebnis der numerischen Modellierung

2 = Beobachtungsauswertung der Pegel, keine Addition der Einzelkomponenten

Die in Tab. 1 und Tab. 2 dargestellten Angaben zeigen beide die bereits beschriebenen Abweichungen zwischen beobachteten und berechneten Angaben. Es ist hierbei zu erkennen, dass sie Addition aller Werte nicht dem Ergebnis des beobachteten gesamten Anstieges entspricht. Das deutet darauf hin, dass das System insgesamt noch nicht vollständig verstanden worden ist und es nach wie vor erhebliche Unsicherheiten und Lücken im Wissen darüber gibt, wie sich der MSL in den letzten 100 Jahren verändert hat und welche Beiträge von den einzelnen Prozessen geleistet wurden.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Diese Abschätzung wurde von DOMINGUES et al. (2008) nach unten korrigiert auf etwa 0,8 mm/Jahr.

Nach gegenwärtigem Verständnis folgt der MSL-Anstieg der Klimaerwärmung des 20. und des beginnenden 21. Jahrhunderts und ist gegenwärtig in erster Linie durch die thermische Expansion und den Verlust von Landeismassen (Gletscher) begründet (Tab. 1, Tab. 2).

CHURCH et al. (2008) bestätigen die Annahme der Dominanz der thermischen Ausdehnung im beobachteten Anstieg des globalen MSL des 20. Jahrhunderts. Zwischen 1993 und 2006 wird dieser Beitrag mit etwa 1,2–1,6 mm/Jahr angegeben (ANTONOV et al., 2005; ISHII et al., 2006; WILLIS et al., 2004). DOMINGUES et al. (2008) zeigten, dass in dem methodischen Vorgehen ein Fehler existiert, der zu einer Überschätzung der thermischen Ausdehnung führt und korrigierten den Beitrag auf 0,8 mm/Jahr für den Zeitraum 1993–2006. Werden etwas längere Zeiträume betrachtet, werden Werte von 0,3 mm/Jahr (1955–2003, ANTONOV et al., 2005), 0,4 mm/Jahr (1961–2003, IPCC, 2007) und 0,5 mm/Jahr (1960–2003, DOMIN-GUES et al., 2008) ermittelt.

Für das Abschmelzen von Landeismassen (Gebirgsgletscher unter Ausschluss der Antarktis und Grönlands) als derzeit zweitgrößter beitragender Faktor zum beobachteten globalen MSL-Anstieg liefern KASER et al. (2004) Werte von 0,4 mm/Jahr (1961–1990), IPCC (2007) von 0,5 mm/Jahr und 0,77 mm/Jahr für die Zeiträume 1961–2003 und 1993–2003.

Es wird angenommen, dass Grönland und die Antarktis bisher nur in sehr geringem Umfang zum beobachteten Anstieg des globalen MSL beigetragen haben (CHURCH et al., 2008). Sie stellen in der Zukunft jedoch potentiell die größten Quellen mit gleichzeitig den größten Unsicherheiten dar. Änderungen im Grundwasser, der Bodenfeuchte, Permafrost etc. können ebenfalls zu globalen MSL-Änderungen führen. Verlässliche Abschätzungen ihrer Beiträge sind jedoch kaum bekannt (CHURCH et al., 2008).

Angaben für lokale MSL-Anstiege können an vielen Pegeln entlang der Nordsee exemplarisch vorgestellt werden. Für die vorliegende Untersuchung wurde der Pegel Cuxhaven ausgewählt, da hier eine sehr lange Datenreihe vorliegt und die Unterschiede in der Interpretation der Ergebnisse gut illustriert werden können. Aufgrund der Auswertung dieser Datenreihe kommen verschiedene Autoren zu unterschiedlichen Aussagen.

So untersuchten WAHL et al. (2010) u.a. eine aus hochaufgelösten Pegeldaten (mind. Stundenwerte) und Scheitelwerten rekonstruierte MSL-Zeitreihe des Pegels Cuxhaven von 1844 bis 2008. Dabei wurde für den relativen MSL ein linearer Trend von 2,37 ± 0,08 mm/a für den betrachteten Zeitraum ermittelt. Außerdem findet sich in der langen Cuxhaven-Zeitreihe eine leichte negative Beschleunigung im MSL-Anstieg, was nicht konsistent mit globalen Studien, aber mit den Ergebnissen von WOODWORTH et al. (2008) für verschiedene andere Pegel aus dem europäischen Raum ist. Mit Hilfe eines Analyseverfahrens zur Glättung von Zeitreihen wird zudem eine bis heute anhaltende positive Beschleunigung am Pegel Cuxhaven seit Mitte der 1970er Jahre festgestellt, (vgl. Abb. 6). Die Glättung erfolgte durch eine Singuläre Systemanalyse (SSA), die dazu dient nichtlineare Trends aus Zeitreihen zu extrahieren und somit Zeiträume mit besonders hohen oder niedrigen Anstiegsraten zu identifizieren (z.B. MOORE und GRINSTED, 2005).



Abb. 6: Zeitreihe des lokalen mittleren MSL (Jahreswerte) am Pegel Cuxhaven mit Glättungsfunktion bzw. nicht-linearem Trend

Dagegen zeigen Untersuchungen von GÖNNERT et al. (2004 und 2007), dass das mittlere Tidehochwasser am Pegel Cuxhaven bei Auswertung der Zeitreihe seit 1842 nach Anpassung über eine lineare Funktion keine Beschleunigung in den Anstiegsraten aufweist. Für das mittlere Tidehochwasser wurde ein Anstieg von 2,45 mm/a (1842–2005, vgl. Abb. 7) festgestellt.

Diese Unsicherheiten, wie sie am Pegel Cuxhaven auftreten, wurden durch WOOD-WORTH et al. (2008) an Hand einer Untersuchung zum Vergleich der Entwicklung der Messreihen an verschiedenen Pegeln bestätigt. Während an einigen Pegeln Beschleunigungen in den Anstiegsraten zu erkennen sind, sind an anderen Pegeln noch keinerlei beschleunigte Tendenzen zu erkennen.

An dieser Stelle zeigt sich deutlich, dass die Notwendigkeit von weiteren vertiefenden Untersuchungen von großer Bedeutung ist. In dem BMBF geförderten KFKI (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen) Projekt AMSeL ("Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste") wird u.a. geprüft, wie sich die anderen deutschen Nordseepegel verhalten.



Abb. 7: Die Zeitreihe des mittleren Tidehochwassers (MThw) am Pegel Cuxhaven unter Verwendung der Jahressmittel (GÖNNERT et al., 2007)

- 5. Projektionen zum zukünftigen Meeresspiegelanstieg
  - 5.1 Projektionen zum globalen Meeresspiegelanstieg

Die gegenwärtig umfassendste und belastbarste Einschätzung zu zukünftigen Änderungen des MSL liefert der IPCC in seinem 4. Sachstandsbericht (MEEHL et al., 2007). Die Einschätzung basiert auf einer detaillierten Bewertung der thermischen Ausdehnung anhand von Klimamodellexperimenten, dem Abschmelzen von Gletschern anhand der Skalierung existierender Beobachtungen auf den zu erwartenden Temperaturanstieg, Abschätzungen von Massenbilanzänderungen und Modellen der großen Eismassen Grönlands und Antarktis, und der Extrapolation vorhandener Beobachtungen.

Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts werden vom IPCC 2007 folgende Angaben für die Entwicklung des MSL angegeben (Abb. 8):

- thermische Ausdehnung von + 10 bis + 41 cm; Beschleunigung wird im 21. Jahrhundert erfolgen;
- Gletscherschmelze: +7 bis +17 cm;
- Einfluss Grönland: +1 bis +12 cm;
- Einfluss Antarktis: -14 bis -2 cm

Unter zusätzlicher Berücksichtigung von Sedimentablagerung und einer Fortsetzung des Abschmelzens der Gletscher als Resultat der Klimaänderung seit der letzten Eiszeit wird ein Anstieg des MSL bis 2100 im Vergleich zu heute von

18 bis 59 cm

projiziert.

In jüngster Zeit gibt es jedoch vermehrt Bedenken hinsichtlich der Stabilität der beiden großen Eisschilde. In den Abschätzungen des IPCC wird dieses durch einen temperaturabhängigen Zuschlag von 10–20 cm ("scaled-up dynamical ice sheet imbalance" in Abb. 8) berücksichtigt. Dieser Zuschlag ist jedoch nicht in den angegeben Änderungen bis zum Ende des Jahrhunderts enthalten. Berücksichtigt man den Zuschlag, erhält man Werte von

## 18 bis 79 cm zum Ende des 21. Jahrhunderts.

Abb. 8 stellt die Größenordnungen der einzelnen Faktoren in einer Reihe von Szenarien sowie die Gesamtsumme des prognostizierten MSL-Anstiegs dar.



Abb. 8: Globaler Meeresspiegelanstieg bis zum Jahr 2100 (IPCC, 2007)

Für den betrachteten Zeitraum wird in allen Szenarien nach wie vor der größte Beitrag von der thermischen Ausdehnung (10–41 cm) und der zweitgrößte von den Inlandeismassen (Gletscher ohne Antarktis und Grönland) (7–17 cm) geleistet. Die Beiträge von Grönland und der Antarktis sind in der Summe nach wie vor gering, zum Teil, da eine erhöhte Akkumulation über der Antarktis Schmelzprozesse in anderen Bereichen kompensiert.

Zugleich gibt der IPCC 2007 jedoch an, dass die Unsicherheiten weiterhin sehr groß sind, da das Wissen über die sich bedingenden Effekte noch nicht ausreichend ist. Infolgedessen umfasst der Bericht weder eine beste Abschätzung noch eine obere Grenze für den MSL-Anstieg ("… nor provide a best estimate or an upper bound for sea level rise." IPCC, 2007).

Auch gibt es nach wie vor Bedenken in der wissenschaftlichen Literatur, dass die Abschätzungen zu konservativ sind. Diese basieren auf der Tatsache, dass die beobachteten globalen MSL-Änderungen von 1990 bis heute größer als der zentrale Wert der IPCC-Projektionen sind (CHURCH et al., 2008).

Auch die ausgewertete Literatur dieses Beitrages zeigt, wie im Exkurs zur grundlegenden Literatur des Textes ersichtlich, die Unterschiede zwischen den Angaben des IPCC und anderen wissenschaftlichen Untersuchungen auf. RAHMSTORF (2007) entwickelte ein einfaches statistisches Modell, das den Temperaturanstieg des 20. Jahrhunderts in Beziehung zum globalen MSL setzt. Auf Grundlage dessen kommt er zu Zahlen, die deutlich höher als jene des IPCC liegen. Es ist anzumerken, dass der von RAHMSTORF verwendete Ansatz aus physikalischen und methodischen Gründen in der Kritik steht (SCHMITH et al., 2007; HOL-GATE et al., 2007; VON STORCH et al., 2008). Im Rahmen eines Vortrages auf der Klimakonferenz in Kopenhagen 2009 gibt RAHMSTORF basierend auf diesem Ansatz Schätzungen ab, wonach ein globaler MSL-Anstieg von einem Meter bis 2100 überschritten werden wird, solange die Emissionen unvermindert ansteigen.

Das MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR METEOROLOGIE (MPI-M) gibt unter Berücksichtigung eines Temperaturanstiegs von 3°C eine globale MSL-Zunahme auf Grund der thermischen Ausdehnung von 21 bis 28 cm an. Des Weiteren müssen für den globalen MSL-Anstieg durchschnittlich weitere 8 cm Erhöhung durch Schmelzen des Inlandeises einkalkuliert werden (13 cm Schmelze des Grönlandeises, [–5] cm durch erhöhten Schneefall in der Antarktis). Das MPI-M verdeutlicht mit seinen Angaben, in diesem Fall zur thermischen Ausdehnung, wie viele weiter Untersuchungen auch, das Problem einer auftretenden räumlichen Differenzierung bei der Betrachtung eines globalen MSL-Anstiegs. Lokal kann so auf Grund veränderter Ozeanzirkulation eine geringe Absenkung oder ein weiterer Anstieg von bis zu einem Meter erfolgen.

Neueste Abschätzungen von PFEFFER et al. (2008), die die dynamischen Prozesse der Eisschilde mit abbilden, ergeben einen MSL-Anstieg von 80 cm. Angaben eines Anstiegs von bis zu 200 cm im kommenden Jahrhundert werden von ihm als physikalisch unhaltbar beschrieben, da hierbei alle äußeren Randbedingungen in kürzester Zeit ihre Extremwerte erreichen müssten. Bei ihren Modellrechnungen gehen PFEFFER et al. (2008) von einer langsamen Beschleunigung des Emissions- und Temperaturanstiegs aus.

SCHELLNHUBER, der bis zum letzten Jahr einen MSL-Anstieg von 200 cm in den kommenden 100 Jahren angab (PIK, 2007), schätzt diesen nach neuesten Untersuchungen nach Angaben eines "Focus"-Interviews mit 100 cm ab, wobei die Angaben zum verwendeten Klimaszenario nicht konkretisiert werden (SCHELLNHUBER, 2008a). Zudem weist er daraufhin, dass trotz der derzeitig beobachteten Klimaentwicklung davon ausgegangen werden kann, dass der globale Temperaturanstieg bis 2100 auf 2 °C zu begrenzen ist (SCHELLN-HUBER, 2008b).

Auf der Basis semi-empirischer Untersuchungen und unter Verwendung 4-parametrischer, physikalisch basierter Differentialgleichungen prognostizieren GRINSTED et al. (2009) einen globalen MSL-Anstieg zwischen 90 cm und 130 cm. Grundlage für diese Untersuchungen sind die A1B-Szenarien des IPCC. Auch hierbei handelt es sich um einen semiempirischen Ansatz, bei dem jedoch die maximal möglichen Bedingungen in den Vordergrund gestellt werden.

Längerfristige Angaben über das Jahr 2100 hinaus gibt beispielsweise der WBGU (WIS-SENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN, 2006). Er gibt auf der Basis von Analysen aus dem IPCC-Bericht 2001 und den Ergebnissen weiterer Wissenschaftler eine Projektion bis 2300 unter der Annahme einer Temperaturzunahme von insgesamt 3°C über einen globalen MSL-Anstieg von 2,5 bis 5,1 m an. Tab. 3 gibt die Aufteilung der Anstiegsraten eingeteilt in ihre Ursachen an.

Tab. 3: Angaben des WBGU (2006) über die Anstiegsraten der einzelnen Faktoren bis zum Jahr 2300

	Thermische	Eiskappen und	Grönländisches	Antarktisches	Gesamtanstieg		
	Ausdehnung	Gletscher	Eisschild	Eisschild	bis 2300		
40-	40–90 cm	20–40 cm	90–180 cm	100–200 cm	250–510 cm		

## 5.2 Projektionen zum regionalen Meeresspiegelanstieg

Ausgangsbasis der Betrachtung von zukünftigen Projektionen ist die globale Entwicklung. Für eine lokale MSL-Abschätzung sind neben den globalen Projektionen die regionalen von erheblicher Bedeutung.

Der IPCC-Bericht ist für die Praxis und für die politische Entscheidungsfindung eine wichtige Grundlage. In seinen zukünftigen Projektionen bezieht er sich in erster Linie auf die globale Entwicklung. Demgegenüber stehen regionale Veränderungen, die davon abweichende Werte ergeben können. Im Zuge einer Entscheidungsfindung ist es daher wichtig, die Unterschiede zwischen der regionalen Entwicklung des zu betrachtenden Raumes und der globalen Entwicklungsbewertung durch den IPCC zu erkennen und zu berücksichtigen. Um die Breite dieser Informationen auf einen Blick darzustellen, werden in Tab. 4 zunächst die globalen Ergebnisse des IPCC-Berichtes dargestellt, um im Vergleich die regionalen Projektionen herauszuarbeiten. Dabei geht es nicht um eine Bewertung sondern um die sachliche Information wie groß die Spanne der Angaben ist. Alle Angaben beziehen sich auf den Zeithorizont 2100. Alle derzeit in der Literatur vorhandenen Angaben, die sich auf Zeithorizonte größer als 2100 beziehen, werden hier nicht berücksichtigt.

Dementsprechend werden in Tab. 4 zunächst die einzelnen Faktoren, die einen Anstieg des MSL verursachen können aufgelistet. Die regionalen Unterschiede sind jedoch durch die in Kap. 2 dargestellten Ursachen zu erklären.

In Spalte 2 sind jeweils die minimalen und maximalen Werte aus der recherchierten Literatur zur regionalen Entwicklung dargestellt. Zur Erläuterung, wie diese Minima und Maxima einzuordnen sind, werden jeweils in den Spalten 3–7 die ermittelten Minima und Maxima der Autoren der in Spalte 2 genannten Extrema dargestellt. Sie werden häufig von der DELTACOMISSIE (2008a) und dem KNMI (KONINKLIJK NEDERLANDS METEOROLOGISCH INSTITUUT, 2006) genannt.

Im Zuge dieser Aufstellung wird deutlich, dass die aus der DELTACOMMISSIE (2008a) hervorgebrachten Ergebnisse, die wiederum bereits aus einer Zusammenfassung der Ergebnisse unterschiedlicher Autoren entstanden sind, Ausschlag gebend für die Angabe extrem hoher Werte sind. Dieses ist insofern plausibel, als das erklärte Ziel der Deltakommission ausdrücklich die Entwicklung von "high-end"-Szenarien war.

Am KNMI wurden in Anlehnung an die IPCC-Szenarien A1B, A2 und B1 Projektionen mit Hilfe numerischer Klimamodelle Projektion der thermischen Ausdehnung erstellt (KNMI, 2006). In der Summe geben sie einen gesamten MSL-Anstieg von 35 cm bis 85 cm an, ausgehend vom Jahr 2005 bis 2100 an (Tab. 4) und liegen damit in der Größenordnung der globalen Angaben des IPCC.

	Minima und Maxima aller vorliegenden Untersuchungen	KNMI (2006) <sup>1</sup> Min – Max bis 2100	Deltacommis- sie (2008b)* <sup>1</sup> Min – Max bis 2100	Kuhlbrodt (2007) Min – Max bis 2100	IPCC (2007) Min – Max bis 2100 (globale Angaben! )
Thermische Ausdehnung (global)	12 – 49 cm (beides Delta- commissie)	20,2 – 45,5 cm	12 – 49 cm		10 – 41 cm
Thermische Ausdehnung (regional)			(–5) – 20 cm		
Grönlän- disches Eisschild	(–55) – 33 cm (beides Delta- commissie)		(–55) – 33 cm		1 – 12 cm
Antarktisches Eisschild	(–1) – 107 cm (beides Delta- commissie)		(–1) – 107 cm		(–10) – (–3) cm
Gletscher	4,3 cm (KNMI) – 19,3 (Katsman**) cm	4,3 – 14,5 cm	6 – 14 cm		7 – 17 cm
Beide Eis- schilde	(-0,3) cm (KNMI) - 32,9 cm (Delta- commissie)	(-0,3) - 32,9 cm	17 – 57 cm		
Zusätzliche Faktoren wie Permafrost, Sedimentation etc.	0 – 4 cm (Deltacommissie/ KNMI)	0 – 4 cm	0 – 4 cm (Grundwasser- speicher)		
ТНС	bis 80 cm (Kuhlbrodt)			bis 80 cm (europ., russ. Küste)	
Insgesamt	(–5) – 115 cm (beides Delta- commissie)	35 – 85 cm	(-5) – 115 cm		18 – 59 cm

Tab. 4: Minimale und maximale Angaben zum regionalen MSL in der Nordsee

\* Berücksichtigung des Effektes der Gravitation, der durch den Verlust von Landeismassen ausgelöst wird, ausschließlich Verwendung eines high-end Szenarios.
\*\* KATSMAN et al., 2008: Untersuchung auf Grundlage des KNMI (2006).

<sup>1</sup> Angaben für die Niederländische Küste.

KUHLBRODT et al. (2007) untersuchten die Auswirkungen von Veränderungen der thermohalinen Zirkulationen (THC) auf den MSL unter der Annahme des Emissionsszenario A1Fl des IPCC. Nach diesen Untersuchungen führt ein Einbruch der THC zu einem Anstieg des MSL von 80 cm an den europäischen und russischen Küsten und bis zu 50 cm an den Küsten Grönlands und Ost-Kanadas.

Die beschriebenen Untersuchungen unterscheiden sich in ihrem Umfang von denen einzelner Autoren. Letztgenannte untersuchen in der Regel einen einzelnen Faktor und dessen Beitrag zum MSL-Anstieg. Die Deltacommissie und das KNMI dagegen gehen ebenso wie der IPCC, so vor, dass sie neben eigenen Untersuchungen diverse weitere Autoren berücksichtigen und diese Ergebnisse zu einem Gesamtwert zusammenfügen.

Die Ergebnisse der großen Anzahl zusätzlich analysierter einzelner Autoren konzentrieren sich stark im mittleren Bereich der hier aufgelisteten Ergebnisse. Dies ist von großer Bedeutung, da sie eine deutliche Gewichtung innerhalb der Gesamtheit der Ergebnisse herbeiführen. Eine Auflistung der wichtigen im Zuge der Literaturrecherche analysierten Angaben ist diesem Text in Form eines Exkurses zur grundlegenden Literatur des Textes beigefügt.

Eine zusammenfassende Betrachtung aller herangezogenen Ergebnisse ergibt eine maximale Spannweite des globalen MSL-Anstiegs von 18 cm (IPCC) bis 140 cm (RAHMSTORF, 2007) bis zum Jahr 2100. Diese extremen Werte umschließen die Angaben der weiteren Autoren der Ergebnissammlung. Die meisten Projektionen liegen dabei im mittleren Bereich von 20 bis 90 cm und bilden dort den Schwerpunkt der Ergebnisse.

#### 5.3 Projektionen zum lokalen Meeresspiegelanstieg

## Nord-Ost-Atlantik

KATSMAN et al. (2008) haben unter Berücksichtigung neuester Modellergebnisse des KNMI und den Ergebnissen verschiedener Wissenschaftler Angaben für den Nord-Ost-Atlantik gemacht (Bezugsjahr 2005). Hierbei berücksichtigen sie mit als erste Wissenschaftler die Gravitationsveränderungen nach MITROVICA (2001), indem die eustatischen Beiträge der Eisschmelze mit einem geeigneten Verhältnis des lokalen MSPL-Anstiegs zum eustatischen MSPL-Anstieg multipliziert werden. Daraus ergibt sich unter der Annahme der IPCC-Szenarien A1B, B1 und A2 ein zu erwartender gesamter MSL-Anstieg von 30 bis 80 cm.

#### Englische Küste

Das UK CLIMATE IMPACTS PROGRAMME (UKCIP, 2007) besteht aus einer wissenschaftlichen Beratergruppe, die dauerhaft vom englischen Umweltministerium (Department for Environment, Food and Rural Affairs) Anfang der 1990er Jahre eingesetzt wurde.

Auf der Basis der IPCC-Ergebnisse aus 2001 und Untersuchungen zur Landsenkung (2002) wird der MSL-Anstieg für die englischen Küsten abgeschätzt. Unter der Annahme einer globalen Temperaturerhöhung von +3 °C wird der MSL-Anstieg an der Süd- und Ostküste Englands (ohne Schottland) mit 14 bis 20 cm angegeben. Steigt die Durchschnittstemperatur um insgesamt 6 °C erwarten die Wissenschaftler an den betrachteten Küsten 70 bis 80 cm MSL-Anstieg.

## Niederländische Küste

Aus aktuellen Untersuchungen und Modellanalysen der von der niederländischen Regierung eingesetzten DELTACOMMISSIE (2008b) ergibt sich in Anlehnung an das IPCC-Szenario A1Fl (hohe Emissionen,  $\Delta T = 6$  °C) für die niederländische Küste ein lokaler MSL-Anstieg von (-5) – 115 cm. Bei diesen Untersuchungen wurde die Dynamik der Eisschilde, die Effekte durch Gravitationsveränderungen sowie die Beiträge durch Landsenkung berücksichtigt.

## Deutsche Nordseeküste

Unter der Annahme einer globalen Temperaturerhöhung von 3 °C (IPCC-Szenario A1B) projiziert das MAX-PLANCK-INSTITUT (MPI-M, 2006) für die deutsche Nordseeküste einen MSL-Anstieg von 58 cm. Diese Angabe ist 30 cm höher als ihre Angabe zur globalen MSL-Zunahme. Zum Ende des Simulationszeitraumes (2100) wird das vollständige Abschmelzen der arktischen Meereismassen in den Sommermonaten berücksichtigt (MPI-M, 2006). Zu beachten ist, dass das MPI hier keine eigenen Nordseeberechnungen erstellt sondern nur eine Abschätzung formuliert hat.

STERR (2007) schätzt anhand der vom IPCC verwendeten Modelle den globalen MSL-Anstieg von 40 cm als realistisch ein. Unter Berücksichtigung von lokalen Effekten wie Landsenkung schätzt er für die Nordseeküste Schleswig-Holsteins einen Anstieg von 40 bis 60 cm ab. Dies ist eine persönliche Abschätzung auf Basis der Entwicklung in der Nordsee und nicht Resultat einer Untersuchung.

## 6. Exkurs zur grundlegenden Literatur

In diesem Exkurs wird die dem Text zugrunde liegende Analyse der verwendeten Literatur aufgearbeitet. Dies erfolgt über eine Darstellung der Ergebnisse der einzelnen Autoren bzw. es erfolgt eine Aufstellung der unterschiedlichen Arbeiten zu demselben Faktor. Mit diesem Exkurs wird die Spannbreite der Projektionen sowohl zum globalen MSL als auch zu den einzelnen Ausschlag gebenden Faktoren dargestellt.

# 6.1 Die Komponenten des Meeresspiegelanstiegs und ihre Größenordnung

Im Folgenden werden die Ergebnisse zu den verschiedenen Faktoren des MSL-Anstiegs angegeben (siehe auch Tab. 4). Erfolgen keine weiteren Angaben, beziehen sich die angegebenen Werte immer auf das Jahr 2100. Es ist hierbei darauf hinzuweisen, dass die Aussagen auf unterschiedlichen Herangehensweisen basieren. So liegen bei der thermischen Ausdehnung quasi-realistische Modelle vor, dagegen sind bei den Eismodellierungen auch Expertenmeinungen dargelegt.

• Thermische Ausdehnung: Neben den beiden Untersuchungen von IPCC (2007) und KNMI (2006) kommt eine weitere wichtige Untersuchung von GREGORY et al. (2001), der die Auswirkung der thermischen Ausdehnung auf den jährlichen MSL-Anstieg (1990–2090) mit 2,0–3,7 mm/Jahr angibt, wobei diese Angabe aus dem Vergleich unterschiedlicher Klimamodelle entstand. Insgesamt wird die Spanne der angegebenen Werte durch den IPCC (2007) mit mindestens 10 cm und maximal 45 cm durch den KNMI (2006) begrenzt.

- Gletscher: Die Spannweite der Ergebnisse wird durch die Angaben des KNMI (2006) (4,3 cm) und der Untersuchung von KATSMAN et al. (2008) (19,3 cm) begrenzt. Eine ausschließlich Inlandeis und Gletscher umfassende Modellierung erstellten RAPER und BRAITHWAITE (2006). Sie modellierten das IPCC-Szenario A1B mit einem kleinskaligen Modell und berücksichtigten dabei die Unterschiede von Sommer- und Wintermonaten. MEIER et al. (2007) extrapolieren aus Beobachtungsdaten von 1996– 2006 die Beschleunigungsraten des Abschmelzens der Gletscher bis zum Jahr 2100. Dabei erstellen sie zwei Szenarien, ersteres mit konstanter aktueller Beschleunigung der Massenbilanz und das zweite mit konstanter aktueller Rate der Massenabnahme. Diese Werte liegen über denen des IPCC (2007), werden jedoch von anderen Autoren bestätigt.
- Grönländisches Eisschild: Die Angaben reichen von minimal 1 cm (IPCC, 2007) bis maximal 22 cm (DELTACOMMISSIE, 2008). Alle Autoren sind sich über die bevorstehende Abnahme des Grönländischen Eisschildes einig. SHEPERD und WINGHAM (2007), MITROVICA et al. (2001) und die Wissenschaftler des KNMI (2006) und des MPI-M (2006) geben unterschiedliche Verlustgrößen bei unterschiedlicher Erderwärmungsrate an. Die Autoren GREGORY und HUYBRECHTS (2006) rechnen mit einem Beitrag von 7 m zum globalen MSL-Anstieg durch das gänzliche Abschmelzen des grönländischen Eisschildes. Ein solcher Prozess würde jedoch weit über das Jahr 2100 hinaus andauern. Auch OTTO-BLIESNER et al. (2006) und RIDLEY et al. (2005) halten ein komplettes Abschmelzen des Eisschildes über das Jahr 2100 hinaus für möglich. Nach RIDLEY et al. (2005) sind im Jahr 3000 nur noch 5 % der ursprünglichen Masse erhalten. Sie bestätigen die Angabe von 7 m MSL-Anstieg nach GREGORY und HUYBRECHTS (2006), wobei unregelmäßige Anstiegsraten zu erwarten sind. Nach 850 Jahren könnte bereits die Hälfte der prognostizierten 7 m Anstieg eingetreten sein. In Bezug auf die schwankende Rate zum MSL-Anstieg geben die Autoren maximale Werte von 5 mm/Jahr an, wobei diese vorwiegend in den frühen Jahren der Simulation erreicht werden. An dieser Stelle gilt es anzumerken, dass Simulationen, die so weit in die Zukunft reichen größere Unsicherheiten aufweisen als die Simulationen bis 2100 und daher eine direkte Vergleichbarkeit nicht gegeben ist.
- Antarktisches Eisschild: Die Spannweite wird auch hier durch die Untersuchungen des IPCC (2007) (-10 cm) und der DELTACOMMISSIE (2008) (41 cm) begrenzt. Die weiteren Autoren SHEPERD und WINGHAM (2007) beziehen anders als der IPCC auch einen schnellen Zerfall des West-Antarktischen Eisschildes ein. GREGORY und HUYBRECHTS (2006) und das MPI-M (2006) beziffern den Beitrag zum globalen MSL-Anstieg als negativ und auch das KNMI (2006) geht je nach Klimaentwicklung von einem geringfügig negativen bis leicht positiven Beitrag aus.
- Grönländisches und Antarktisches Eisschild: Das KNMI (2006) veröffentlichte seine Angaben zu den Beiträgen der beiden Eisschilde in totalen Zahlen ausschließlich in Form einer zusammenfassenden Angabe beider Faktoren. Daraus resultiert eine sehr große Spannweite der Werte zwischen –0,3 und 32,9 cm.
- Permafrost und andere Beiträge: Die höchste Angabe zum globalen MSL-Anstieg durch tauende Permafrostböden ist bei CHURCH et al. (2001) mit 2,5 cm zu finden. Der IPCC (2007) erstellt keine eigenen Angaben zu diesem Faktor, betont allerdings die großen Unsicherheiten. Das KNMI (2006) fasst in der Projektion die Beiträge des

Permafrostes, der Sedimentation, der Veränderungen der terrestrischen Wasservorräte und der Antwort der Eisschilde auf vorangegangene Erwärmungsphasen in der Erdgeschichte zu einer Aussage über 0 cm bis 4 cm zusammen, weist jedoch ebenfalls auf die hohen Unsicherheiten hin.

- Gravitation: MITROVICA et al. (2001) haben durch numerische Simulationen den lokalen Einfluss der Gravitationsänderungen für die drei möglichen Eismassenverluste (Antarktis, Grönland und inländische Gletschereismassen) berechnet (Abb. 9). Für die Nordsee stellen sich die Verhältnisse wie folgt dar: Der Anteil des MSL-Anstiegs, der aufgrund des Abschmelzens antarktischer Eismassen entstünde, muss mit dem Faktor 0,9 bis 1 multipliziert werden (Abb. 9a). Das bedeutet, dass sich die Effekte des Abschmelzens in der Antarktis nahezu vollständig in der Nordsee niederschlagen werden. Für das Abschmelzen des Grönlandeises ergibt sich ein Faktor von 0,1–0,2 (Abb. 9b), was bedeutet, dass z.B. ein projizierter Anstieg aufgrund des Abschmelzen des grönländischen Eisschildes von 22 cm bis 2100 (DELTACOMMISSIE, 2008) in der Nordsee eine Wirkung von 2–4 cm haben würde. Der durch das Abschmelzen der Inlandseismassen verursachte Anteil des MSL-Anstiegs muss mit dem Faktor 0,7–0,8 multipliziert werden (Abb. 9c), d.h. es kämen von den 18 cm der DELTACOMMISSIE (2008) etwa 13 cm zur Wirkung. Andererseits weisen PLAAG und JÜTTNER (2001) darauf hin, dass sich auch deutlich hiervon abweichende Zahlen ergeben könnten.
- Thermohaline Zirkulation: KUHLBRODT et al. (2007) untersuchen in Anlehnung an das A1Fl-Szenario die Veränderungen der thermohalinen Zirkulationen (THC). Die THC ist ein Zirkulationssystem, das 4 der 5 Weltozeane über Austauschprozesse, hervorgerufen durch Temperatur- und Salzkonzentrationsunterschiede, miteinander verbindet. Der Golfstrom, als wichtiges klimasteuerndes Phänomen in Nordeuropa, ist ebenfalls Teil der THC. Nach diesen Untersuchungen führt ein Einbruch der THC zu einem Anstieg des MSL von 80 cm an den europäischen und russischen Küsten und bis zu 50 cm an den Küsten Grönlands und Ost-Kanadas. Das MPI-M betrachtet ebenfalls die Auswirkungen des Klimawandels auf die THC und kommt zu dem Urteil, das eine Reduktion der THC im Zuge der globalen Erwärmung zu erwarten ist, ein totaler Zusammenbruch im 21. Jahrhundert wird jedoch als unwahrscheinlich angesehen.

а

b

c





Abb. 9: Einfluss der Gravitation (MITROVICA et al., 2001)

Auswirkungen auf den eustatischen (Landhebung/-senkung) Anteil des Meeresspiegelanstiegs aufgrund der Gravitationsänderungen durch das Abschmelzen von a) Antarktischem Eis b) Grönländischem Eisschild c) Inländischen Eismassen und Gletschern nach MEIER (1984). Der angegebene Faktor ist mit dem Beitrag des eustatischen Meeresspiegelanstiegs zu multiplizieren.
# 6.2 Ergebnisse aus Analysen der beobachteten Änderungen des Meeresspiegels

In diesem Abschnitt sind einige Informationen zu Landhebungen/-senkungen und die Ergebnisse verschiedener Autoren zusammengetragen, welche den globalen, regionalen und lokalen MSL zum Untersuchungsgegenstand haben.

### 6.2.1 Ergebnisse zum globalen Meeresspiegelanstieg aus Analysen von Beobachtungsdaten

Ein wichtiger Aspekt, den es bei MSL-Studien jeglicher Art zu berücksichtigen gilt, sind großräumige Landsenkungen bzw. -hebungen (auch glacial isostatic adjustment, GIA), welche eine Nachwirkung der letzten Eiszeit sind. Durch das Abschmelzen der Eismassen hat sich die Auflast auf die Erdkruste signifikant verringert. Hierdurch ergeben sich Hebungs-/ Senkungseffekte (Reboundeffekte), die von verschiedenen Autoren untersucht und in globalen Modellen erfasst wurden (z.B. PELTIER, 2001; DAVIS & MITROVICA, 1996; LAMBECK und JOHNSTON, 1998). Diesen großräumigen und in der Regel über mehrere Jahrhunderte linear verlaufenden Hebungs-/Senkungserscheinungen überlagern sich lokale Senkungs- oder Hebungseffekte, die auf tektonische Bewegungen, vulkanische Aktivität oder menschliche Einflüsse (z.B. Gasförderung) zurückzuführen sind.

Während Numerische Modelle ausschließlich absolute MSL-Änderungen liefern (ohne Berücksichtigung von Landsenkungen), ergeben sich aus der Auswertung von Pegeldaten zunächst relative MSL-Änderungen. Durch Berücksichtigung entsprechender Landbewegungen können relative in absolute Werte überführt werden und umgekehrt.

Während die Modelle, die die glazialisostatischen Ausgleichsbewegungen erfassen, seit längerer Zeit Anwendung finden und wissenschaftlich anerkannt sind, lassen sich die lokalen Effekte nur schwer bzw. gar nicht über Modelle erfassen. Jüngste Ergebnisse hierzu wurden im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens IKÜS erzielt (WANNINGER et al., 2009). Es wurden Modelluntersuchungen zu Landhebungs-/senkungsraten entlang der Niedersächsischen Küste durchgeführt. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass nahezu der gesamte Küstenbereich absinkt, was zu den Ergebnissen der globalen Modelle passt. Die im IKÜS-Projekt (Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik) ermittelten Raten sind jedoch um ein vielfaches höher, was für MSL-Untersuchungen von signifikanter Bedeutung ist (IKÜS, 2009). Aus dem globalen glazialisostatischen Ausgleichsbewegungsmodell von PELTIER (2004), welches eines der am häufigsten verwendeten Modelle ist, ergibt sich für den Bereich Cuxhaven z.B. eine Senkungsrate von ca. 0,34 mm/a, aus dem IKÜS-Modell ergibt sich ein nahezu 5-fach erhöhter Wert von 1,6 mm/a. Letzteres würde z.B. bedeuten, dass im Falle Cuxhaven auf alle absoluten MSL-Projektionen aus numerischen Modellen bis zum Jahr 2100 fast 16 cm hinzuaddiert werden müssten. Da die IKÜS-Ergebnisse jedoch sehr aktuell und noch nicht hinreichend diskutiert sind, werden sie hier zunächst nicht berücksichtigt. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass für die Bemessung der relative Wert aus den Pegelmessungen von Bedeutung ist, um die zukünftige Belastung der Küstenschutzwerke zu erfassen. Insofern kann bislang auf die Daten der Pegelmessungen von Cuxhaven zurückgegriffen werden.

Im Folgenden sind die in den Augen der Autoren wichtigsten Ergebnisse aus Analysen des globalen MSL aus Beobachtungsdaten sortiert nach dem Zeitpunkt der Veröffentlichung

dargestellt. Wenn nicht anders angegeben, handelt es sich um absolute Anstiegsraten, die durch Berücksichtigung globaler GIA-Modelle oder Informationen aus geologischen Messkampagnen ermittelt wurden.

JEVREJEVA et al. (2008) finden in einer rekonstruierten Zeitreihe seit 1700 eine Beschleunigung im MSL-Anstieg, welche ihren Anfang gegen Ende des 18. Jahrhunderts hat und bis heute anhält. Der ermittelte MSL-Anstieg von 1700 bis 2000 wird mit 28 cm angegeben (20 cm davon im 20. Jahrhundert). Unter der Annahme, dass sich die beobachtete Beschleunigung bzw. die sie bedingenden Einflüsse konstant fortsetzen, wird ein MSL zwischen 1990 und 2100 von ca. 34 cm erwartet. Die geringste vom IPCC angenommene Temperaturzunahme für das 21. Jahrhundert beträgt 1,8 °C für das B1-Szenario. Aus diesem Wert, der 3-mal größer ist als die beobachtete Temperaturzunahme im 20. Jahrhundert, errechnet sich ein Anstieg von 18–38 cm. Der von JEVREJEVA et al. (2008) angegebene Wert, der keine beschleunigte Temperaturzunahme berücksichtigt, liegt somit bereits im oberen Bereich des vom IPCC angegebenen MSL-Anstieges unter Berücksichtigung einer beschleunigten Temperaturzunahme. Dies deutet darauf hin, dass die MSL-Projektionen des IPCC zu gering ausfallen könnten.

WOODWORTH et al. (2008) untersuchen verschiedene rekonstruierte Zeitreihen des MSL. Hierin zeigt sich in allen längeren Zeitreihen bis ca. 1960 eine positive, im Anschluss eine negative Beschleunigung des MSL-Anstieges. Die höchsten Anstiegsraten traten um 1930 auf.

CHURCH et al. (2008) verwenden die Rekonstruktion von CHURCH und WHITE (2006) und finden ebenfalls hohe Anstiegsraten um 1930, sowie um 1960. Die Untersuchung 20-jähriger gleitender, linearer Trends zeigt, dass die letzten fünf ermittelten Anstiegsraten gleichzeitig die höchsten fünf sind (siehe Abb. 3). Außerdem wird auf ein negatives "Sea Level Budget" zwischen 1961 und 2003 hingewiesen, was bedeutet, dass das Budget nicht geschlossen ist, d.h. eine bis heute nicht abschließend erklärbare Diskrepanz zwischen der über den Zeitraum beobachteten und simulierten MSL-Entwicklung vorhanden ist.

MATHER (2008) enthält eine tabellarische Auswertung einer umfangreichen Recherche zu bereits erfolgten Untersuchungen zum MSL. Es zeigt sich, dass ältere Untersuchungen überwiegend zu Anstiegsraten von ca. 1 mm/a und neuere (seit Mitte der 1990er Jahre) eher zu Raten von 2–3 mm/a führen.

HOLGATE (2007) ermittelt für das 20. Jahrhundert einen linearen Trend von 1,75  $\pm$  0,16 mm/a und entdeckt deutliche Periodizitäten bei der Untersuchung 10-jähriger gleitender linearer Trends.

RAHMSTORF et al. (2007) zeigen, dass sich der beobachtete MSL seit 1991 bereits am obersten Rand der Unsicherheitsbereiche der IPCC-Projektionen aus dem Jahr 2001 (1991 bis 2100) bewegt.

JEVREJEVA et al. (2006) ermitteln hohe Anstiegsraten für Ende des 19. Jahrhunderts, Mitte des 20. Jahrhunderts und die letzte Dekade.

CHURCH und WHITE (2006) geben einen linearen Trend für den Zeitraum 1870 bis 2001 von 1,7  $\pm$  0,3 mm/a an. Erstmals wird eine Beschleunigung im MSL nach 1870 festgestellt. Sollte sich diese konstant fortsetzen, erwarten die Autoren zwischen 1990 und 2100 einen MSL-Anstieg von 31 cm. Ebenso wie bei JEVREJEVA et al. (2008) wird dabei keine beschleunigte Temperaturzunahme berücksichtigt.

WHITE et al. (2005) vergleichen den beobachteten globalen MSL mit dem MSL an den Küsten bzw. 1000 m vor der Küste. Es zeigt sich, dass die beobachteten Anstiegsraten an der Küste um 1970 und in den 1990er Jahren signifikant größer sind, als im großflächigen globalen Mittel. Es zeigt sich damit, dass grundsätzlich immer zu den Modelldaten die Pegeldaten

#### 250

beobachtet werden müssen, um die natürliche Entwicklung erkennen und rechtzeitig reagieren zu können.

HOLGATE und WOODWORTH (2004) ermitteln hohe Anstiegsraten für den Zeitraum 1993 bis 2002 entlang der Küsten. Der mittlere Wert liegt bei 4 mm/a, mit Schwankungsbreiten von –6,8 bis 12,4 mm/a. Insgesamt sind die Raten stark erhöht im Vergleich zum globalen MSL (2,8 mm/a).

CHURCH et al. (2004) ermitteln für den Zeitraum 1950 bis 2000 eine Anstiegsrate von 1,8 mm/a, welche nahezu identisch mit derjenigen ist, die sie in einer späteren Arbeit (CHURCH und WHITE, 2006) für den verlängerten Zeitraum 1870 bis 2001 (1,7 mm/a) ermitteln. Sie verdeutlichen den Einfluss, den das verwendete GIA-Modell auf die Ergebnisse hat. Je nach zu Grunde liegendem Modell ermitteln sich die Anstiegraten für 1950 bis 2000 zu 1,75 mm/a, zu 1,89 mm/a oder zu 1,91 mm/a.

DOUGLAS (2001) gibt eine umfangreiche Einführung in die Thematik MSL und dessen Analyse und vergleicht Ergebnisse verschiedener Autoren zum globalen MSL, die zwischen 1989 und 1997 veröffentlicht wurden. Die dabei ermittelten Anstiegsraten schwanken zwischen 1,8 mm/a und 2,4 mm/a. Aufgrund der unterschiedlichen untersuchten Zeiträume und der unterschiedlichen Anzahl der verwendeten Pegel sind die Ergebnisse nur bedingt miteinander vergleichbar.

### 6.2.2 Ergebnisse zum regionalen Meeresspiegelanstieg aus Analysen von Beobachtungsdaten

Im Folgenden werden zunächst ausgewählte Ergebnisse aus Analysen des regionalen und im nachfolgenden Kapitel des lokalen MSL-Anstiegs aus Beobachtungsdaten sortiert nach dem Zeitpunkt ihrer Veröffentlichung dargestellt. Im Fokus stehen in erster Linie die Ergebnisse, wobei teilweise auch auf die zu Grunde liegenden Daten eingegangen wird. Auch hier handelt es sich, wenn nicht anders angegeben, um absolute Werte, wobei gerade bei lokalen Untersuchungen häufig relative Werte angegeben werden.

WOODWORTH et al. (2009) ermitteln eine synthetische MSL-Zeitreihe aus ausgewählten Pegeln rund um Großbritannien. Dabei wird zunächst festgestellt, dass die räumliche Verteilung des relativen MSL einzelner Pegel so ist, wie es auf Basis der Auswertung geologischer Informationen zu erwarten wäre. Grundsätzlich bleiben nach Einbeziehung der geologischen Daten, ermittelt aus den Pegeln nahegelegenen Stationen, 1,4 ± 0,2 mm/a an MSL-Anstieg ungeklärt und sind daher als absoluter Anstieg zu bezeichnen. Eine synthetische MSL-Zeitreihe für die deutsche Nordseeküste wird im Rahmen des AMSeL-Projektes (Ermittlung des MSL und Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen an der deutschen Nordseeküste) ermittelt und im Detail analysiert (JENSEN und MUDERSBACH, 2007; JENSEN et al., 2008; WAHL et al., 2008; WAHL et al., 2009).

WOODWORTH et al. (2008) untersuchen weltweit einzelne Pegel, u.a. eine größere Anzahl aus dem europäischen Raum. Dabei fällt auf, dass ein Großteil der letzteren im Gegensatz zu den meisten außer-europäischen Pegeln keine oder gar schwach negative Beschleunigungen im MSL-Anstieg über den gesamten betrachteten Zeitraum (unterschiedlich zwischen 1870 und 2001) aufweisen.

JENSEN und MUDERSBACH (2007) untersuchen den relativen MSL in der deutschen Bucht. Aus einer synthetischen Zeitreihe für die Inselpegel ergibt sich ein Anstieg für den Zeitraum 1894 bis 2005 von 1,25 mm/a. Für die Küstenpegel ergibt sich ein linearer Trend für den Zeitraum 1857 bis 2005 von 1,51 mm/a. Aus dem AMSeL-Projekt ist ein mit wesentlich geringeren Unsicherheiten behaftetes Update der Ergebnisse zu erwarten, da hierbei MSL-Zeitreihen für eine größere Anzahl von Pegeln unter Verwendung möglichst langer hochaufgelöster Wasserstandsbeobachtungen ermittelt und im Detail durch Anwendung innovativer Verfahren analysiert werden. Zudem werden aktuelle Erkenntnisse zu Landhebungs-/Senkungseffekten berücksichtigt, so dass neben dem relativen auch der absolute MSL abgeschätzt werden kann.

JEVREJEVA et al. (2006) analysieren MSL-Rekonstruktionen aus 12 Regionen, u.a. dem Nord-Ost-Atlantik. Letzterer zeigt zunächst Anstiegsraten, die über einen langen Zeitraum im mittleren Bereich im Vergleich zu den anderen Regionen liegen. Nach einem leichten Negativtrend nach 1940 ergeben sich einhergehend mit einer starken positiven Beschleunigung nach 1970 jedoch seit ca. 1980 höhere Anstiegsraten als in allen anderen Regionen.

WOODWORTH und HOLGATE (2004) untersuchen die Entwicklung des MSL in 13 Regionen. Eine synthetische Zeitreihe für Nordeuropa zeigt hohe Anstiegsraten nach 1970. Seit Beginn der 1990er zeigen diese Werte nochmal eine Erhöhung an.

### 6.2.3 Ergebnisse zum lokalen Meeresspiegelanstieg aus Analysen von Beobachtungsdaten

HOLGATE (2007) untersucht neun weltweit verteilte Pegel. Derjenige, welcher am ehesten die Nordsee repräsentiert ist Newlyn. Dieser Pegel zeigt nach Trieste den geringsten Langzeittrend (1,25 mm/a) und nach Key West die geringste Korrelation (r = 0,29) mit einer globalen Rekonstruktion.

WÖPPELMANN et al. (2006) untersuchen eine bis 1700 (mit Lücken) zurückreichende MSL-Rekonstruktion des Pegels Brest. Es werden nur relative Raten angegeben, da die Landhebungen/-senkungen als linear über mehrere Jahrhunderte angenommen werden und somit für die Untersuchung der MSL-Entwicklung über die Zeit an einem einzelnen Pegel vernachlässigt werden können. Folgende Anstiegsraten werden für unterschiedliche Zeiträume angegeben: 1807 bis 1890:  $-0,09 \pm 0,15$  mm/a; 1890 bis 1980:  $1,3 \pm 0,15$  mm/a; 1980 bis 2004:  $3,0 \pm 0,5$  mm/a.

DOUGLAS (2001) untersucht einzelne, weltweit verteilte Pegel und gibt relative Anstiegsraten an. Für die Pegel aus der Nordseeregion werden folgende Raten angegeben: Abeerdeen 0,7 mm/a (1900–1997); Newlyn 1,7 mm/a (1915–1997), Brest 1,3 mm/a (1990–1991).

### 7. Zusammenfassende Auswertung der Ergebnisse

Die vorliegende Untersuchung will die Bandbreite der in der Klimaforschung zum MSL-Anstieg angewandten Methoden und derzeitigen Arbeiten hierzu und die sich daraus ergebenden Ansätze für die Bemessung von Hochwasserschutz- und Küstenschutzbauvorhaben darstellen. Die Autoren sehen den zunehmenden Bedarf einer definierten Sturmflutsicherheit, die den voraussichtlichen MSL-Anstieg berücksichtigt. Die Menschen wollen wissen, welches (zusätzliche) Risiko ein Leben z.B. im sturmflutgefährdeten Gebiet an den gefährdeten Küsten und in den natürlichen Fluträumen der Ästuare wie der Elbe zukünftig bedeuten kann.

Eine Metropole wie z.B. Hamburg benötigt als Bauherr und Betreiber der Hochwasserschutzanlagen angesichts der langen Realisierungsdauer eines Bauprogramms für die kom-

### 252

plette Hochwasserschutzlinie und der hohen Nutzungsdauer dieser Infrastrukturen ein weit in die Zukunft reichendes Schutzkonzept, das ein definiertes Sicherheitsniveau garantiert. Dieses Schutzniveau wird in Zukunft im Wettbewerb der Küstenregionen ein Standortfaktor mit zunehmender Bedeutung sein. Da die Unsicherheiten in der Klimaforschung sehr groß sind, gilt es hier, die vorhandenen Ergebnisse darzustellen und in ihrer Spannbreite zu betrachten. Für eine Einschätzung und Bewertung kann von zwei Seiten argumentiert werden. Zum einen aus Sicht der definierten Sicherheit der Metropolstadt, die mit zunehmendem MSL sinkt und damit die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Sturmflut steigt. Zum anderen gilt es die Zeiträume zu erfassen, die für die Konzeptentwicklung und Umsetzung von Strategien und Küstenschutzwerken zur Erhaltung der definierten Sicherheit benötigt werden. Hierzu sind folgende Punkte und Zeiträume zu beachten:

- 1. Nutzungsdauer der Deiche ca. 100 Jahre
- 2. Nutzungsdauer von Toren und anderen Bauwerken ca. 40 Jahre
- 3. Umsetzung eines Küstenschutzes/Bauprogramms ca. 25-30 Jahre
- 4. Entwicklung und Umsetzung von zusätzlichen Strategien, d.h. die Dauer ist abhängig von der gewählten Anpassungsform.

In der vorliegenden Analyse wurden die Daten im Detail aufgelistet, die Methodik dargestellt und die Bewertung der Autoren dargelegt. Es zeigt sich, dass die Spannbreite aller zurzeit maßgebenden Faktoren aus numerischen oder semi-empirischen Betrachtungen einen globalen MSL-Anstieg von (-5) bis 140 cm bis 2100 umfasst. Analysen des MSL, die längerfristige Aussagen über das Jahr 2100 hinaus machen, sind bislang zu ungenau und werden deshalb in diese Risikobewertung nicht mit einbezogen.

Zudem überschreiten die längerfristigen Betrachtungen damit den oben definierten notwendigen Betrachtungszeitraum. Somit gilt es für eine Bemessung, die Ergebnisse von der Dauer der Herstellung des definierten Sicherheitsniveaus (etwa 30 Jahre) bis hin zu einer realistisch abschätzbaren Interpretation der Ergebnisse zu betrachten.

Der IPCC-Report fasst eine sehr große Anzahl von wissenschaftlichen Untersuchungen zusammen und bildet einen Konsens unter diesen Wissenschaftlern. Er gilt als Grundlage für politische Entscheidungen. Die maximale Angabe zum MSL-Anstieg des IPCC liegt bei 79 cm. Dieser maximale Wert entspricht etwa dem Mittelwert der hier insgesamt dargestellten Ergebnisse von (–5) bis 140 cm mit einer Häufung der Einzelangaben zwischen 20 und 90 cm. Der IPCC-Bericht gibt jedoch an, dass noch große Unsicherheiten vorliegen und die Werte durchaus nach oben korrigiert werden könnten. Auf selbiges deuten aktuelle Analysen des beobachteten MSL, ebenso wie einige numerische Analysen hin.

Für den Bereich der Nordseeküste werden durch unterschiedliche Autoren Anstiegswerte von –5 bis 115 cm projiziert. Allerdings werden in diesen Untersuchungen sowohl der Einfluss der Eisdynamik als auch der Effekte der Gravitation vernachlässigt. Aus diesem Grund müssen diese Angaben als unvollständig betrachtet werden. Zur Orientierung in Hinblick auf die vernachlässigte Höhe in den Untersuchungen zur Nordsee können die Ergebnisse der DELTACOMMISSIE (2008a, b) herangezogen werden, da dort die betreffenden Effekte berücksichtigt worden sind. Dabei stellt die DELTACOMMISSIE allerdings bewusst gewählte high-end Szenarien dar. Zudem deuten die Beobachtungen auf ein MSL-Verhalten in der Nordseeregion hin, welches in seiner Gesamtheit nicht mit den globalen Beobachtungen im Einklang steht. Grundsätzlich ist bei der Berücksichtigung eines MSL-Zuschlages immer zu beachten, dass die örtlichen Bedingungen mit in Betracht gezogen werden, da die MSL-Entwicklung eine starke regionale Differenzierung zeigt. Der mittlere relative Anstieg des MSL auf der Basis von Wasserstandsbeobachtungen beträgt für den Zeitraum seit 1900 ca. 20 cm für die Deutsche Nordseeküste (WAHL et al., 2010). Weiterhin ist für die Nordseeküste der Anstieg des Mitteltidehochwassers (MThw) in Verbindung mit dem Anstieg des MSL zu berücksichtigen. Versucht man die Ergebnisse dieser Arbeit zu bewerten, so liegt ein mittlerer Wert bei 40–80 cm MSL-Anstieg bis zum Jahr 2100. Dementsprechend kommt den Ergebnissen des IPCC mit 79 cm trotz der angegebenen Unsicherheiten als Höchstwert eine bedeutende Rolle zu.

### 8. Schriftenverzeichnis

- ANTONOV, J. I.; LEVITUS, S. and BOYER, T. P.: Steric variability of the world ocean, 1955–2003. Geophysik. Res. Lett., 32 (12), L12602, doi: 10.1029/2005GL023112, 2005.
- AUNG, T. H.: Sea Level Monitoring. http://www.abc.net.au/ra/carvingout/issues/ sealevel.htm, 2005.
- BRAY, D. and STORCH, H. VON: "Prediction" or "Projection"? The Nomenclature of Climate Science. Science Communication. doi: 10.1177/1075547009333698, 2009.
- CHURCH, J. A. and WHITE, N. J.: A twentieth century acceleration in global sea-level rise. In: Geophys. Res. Letters 33. doi: 10.1029/2005GL02482, 2001.
- CHURCH, J. A.; WHITE, N. J.; COLEMAN, R.; LAMBECK, K. and MITROVICA, J. X.: Estimates of the Regional Distribution of Sea Level Rise over the 1950–2000 Period. In: Journal of Climate, Jg. 17, 2609–2625, 2004.
- CHURCH, J. A. and WHITE, N. J.: A 20th century acceleration in global sea-level rise. In: Geophysical Research Letters, Jg. 33. L01602. doi: 10.1029/2005GL024826, 2006.
- CHURCH, JOHN A.; WHITE, NEIL J.; AARUP, THORKILD; WILSON, STANLEY W.; WOODWORTH, PHILIP L. and DOMINGUES, CATIA M. et al.: Understanding global sea levels: past, present and future. Sustainability Science, Jg. 3, H. 1, 9–22, 2008.
- DAVIS, J. L. and MITROVICA, J. X.: Glacial isostatic adjustment and the anomalous tide gauge record of eastern North America. In: Nature, 379, 331–333, 1996.
- DELTACOMMISSIE: Samen werken met water. En land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst. www. deltacommissie.com, 2008a.
- DELTACOMMISSIE: Exploring high-end climate change scenarios for flood protection of the Netherlands. International Scientific Assessment, Carried out a request of the delta commitee, 2008b.
- DKRZ: Deutsches Klimarechenzentrum. http://www.dkrz.de/dkrz/science/IPCC\_AR-4/ scenarios\_AR4\_Sealevel, 2008.
- DOMINGUES, C. M.; CHURCH, J. A.; WHITE, N. J.; GLECKLER, P. J.; WIJFFELS, S. E.; BARKER, P. M. and DUNN, J. R.: Rapid upper-ocean warming helps explain multidecadal sea level rise. Nature, 453, 1090–1093, doi: 10.1038/nature07080, 2008.
- DOUGLAS, B. C.: Sea level change in the era of the recording tide gauge. In: Douglas, B. C.; Kearney, M. S. and Leatherman, S. P. (eds.), Sea Level Rise. Int. Geophys. Ser., 75, 37–64, 2001.
- GÖNNERT, G.; ISERT, K.; GIESE, H. und PLÜSS, A.: Charakterisierung der Tidekurve. Die Küste, 68, 100–141, 2004.
- GÖNNERT, G.; NIEMEYER, H.; PROBST, B.; BUSS, T.; SCHALLER, D. und STROTMANN, T.: Bemessungssturmflut 2085A an der Elbe. Überprüfung nach 10 Jahren. Ergebnis der Länderarbeitsgruppe (unveröffentlicht), 2007.
- GREGORY, J. M.; CHURCH, J. A.; BOER, G. J.; DIXON, K. W.; FLATO, G. M.; JACKETT, D. R.; LOWE, J. A.; O'FARRELL, S. P.; ROECKNER, E.; RUSSELL, G. L.; STOUFFER, R. J. and WIN-TON, M.: Comparison of results from several AOGCMs for global and regional sea-level change 1900–2100. Climate Dynamics, 18, 241–253, 2001.
- GREGORY, J. M. and HUYBRECHTS, P.: Ice sheet contributions to future sea-level change. Phil. Trans. R. Soc. London A 364, 1709–1731. doi: 10.1098/rsta.2006.1796, 2006.
- GRINSTED, A.; MOORE, J. C. and JEVREJEVA, S.: Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. Clim Dyn. doi: 10.1007/s00382-008-0507-2, 2009.
- GROSSMANN, I.; WOTH, K. and STORCH, H. VON: Localization of global climate change: Storm surge scenarios for Hamburg in 2030 and 2085. Die Küste, 71, 2006.

- GROSSMANN et al.: QUELLE: STORCH (2008). Vortrag im Rahmen des Symposiums "Globaler Klimawandel und regionale Auswirkungen in Norddeutschland", 12. März 2007, Hamburg, 2007.
- HOLGATE, S. J. and WOODWORTH P. L.: Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s. Geophysical Research Letters, 31. L07305. doi: 10.1029/2004GL019626., 2004.
- HOLGATE S. J.: On the decadal rates of sea level change during the twentieth century, Geophys. Res. Lett., 34, L01602, doi: 10.1029/2006GL028492, 2007.
- IKÜS: Abschlussbericht des KFKI-Forschungsvorhabens IKÜS (Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik), zum download verfügbar unter: http://tu-dresden.de/die\_tu\_dresden/fakultaeten/fakultaet\_forst\_geo\_und\_hydrowissenschaften/fachrichtung\_geowissenschaften/ gi/gg/forschung/ikues, 2009.
- IPCC: http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/vol4/english/index.htm, 2001.
- IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor M.; Miller, H. L. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2007.
- ISHII, M.; KIMOTO, M.; SAKAMOTO, K. and IWASAKI, S. I.: Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinitiy analyses. J. Oceanogr., 62 (2), 155–170, 2006.
- JENSEN, J. und MUDERSBACH, C.: Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. Berichte zur deutschen Landeskunde, Band 81, Heft 2, 2007.
- JENSEN, J. and MÜLLER-NAVARRA, S.: Storm Surges on the German Coast. Die Küste, 74, 92–125, 2008.
- JENSEN, J.; WAHL, T. and MUDERSBACH, CH.: Sea Level Variations at the German North Sea and Baltic Sea Coastlines, Proceedings of the 7th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (PIANC COPEDEC VII), Dubai, 2008.
- JEVREJEVA, S.; GRINSTED, A.; MOORE, J. C. and HOLGATE, S. J.: Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records. Journal of Geophysical Research, Jg. 111. C09012. doi: 10.1029/2005JC003229, 2006.
- JEVREJEVA, S.; MOORE, J. C.; GRINSTED, A. and WOODWORTH, P. L.: Recent global sea level acceleration started over 200 years ago. Geophysical Research Letters, Jg. 35. L08715. doi: 10.1029/2008GL033611, 2008.
- KAPPA, M.: Klimatologie. Klimaforschung im 21. Jahrhundert Herausforderung für Natur- und Sozialwissenschaften. Spektrum Akademischer Verlag, 2009.
- KATSMAN, C. A.; HAZELEGER, W.; DRIJFHOUT, S. S.; VAN OLDENBORGH, G. J. and BURGERS, G.: Climate scenarios of sea level rise for the northeast Atlantic Ocean: a study including the effects of ocean dynamics and gravity changes induced by ice melt. Climatic Change, 2008.
- KNMI: VAN DEN HURK, B. J. J. M.; KLEIN TANK, A. M. G.; LENDERINK, G.; VAN ULDEN, A. P.; VAN OLDENBORGH, G. J.; KATSMAN, C. A.; VAN DEN BRINK, H. W.; KELLER, F.; BESSEM-BINDER, J. J. F.; BURGERS, G.; KOMEN, G. J.; HAZELEGER, W. and DRIJFHOUT, S. S.: KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. Technical report WR-2006-01, KNMI, www.knmi.nl/climatescenarios, 2006.
- KUHLBRODT, T.; RAHMSTORF, S.; ZICKFELD, K.; VIKEBØB, F.; SUNDBY, S.; HOFFFMAN, M.; LINK, P. M.; BONDEAU, A.; CRAMER, W. and JAEGER, C.: An Integrated Assessment of Changes in the Thermohaline Circulation. Climatic Change, 2007.
- LAMBECK, K. and JOHNSTON, P.: Sea-level change, glacial rebound and mantle viscosity for northern Europe. Geophys. J. Int., 134, 102–144, 1998.
- LASSEN, H.: Örtliche und zeitliche Variationen des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee. Die Küste, 50, 65–96, 1989.
- MATHER, A. A.: Sea Level Rise for the East Coast of Southern Africa, Proceedings of the 7th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (PIANC COPEDEC VII), Dubai, 2008.
- MEEHL, G. A.; STOCKER, T. F.; COLLINS, W. D.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GAYE, A.T.; GREOGORY, J. M.; KITOH, A.; KNUTTI, R.; MURPHY, J. M.; NODA, A.; RAPER, S. C. B.; WATTERSON, I. G.; WEAVER, A. J. and ZHAO, Z.-C.: Global Climate Projections. In: Solomon, S.;

Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marqius, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M. and Miller, H. L. (eds.) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridges University Press, Cambridge, New York, 2007.

MEIER, M. F.: Contribution of small glaciers to global sea level. Science 226, 1418–1421, 1984.

- MEIER, M. F.; DYURGEROV, M. B.; RICK, U. K.; O'NEEL, S.; PFEFFER, W. T.; ANDERSON, R. S.; ANDERSON, S. P. and GLAZOVSKY, A. F.: Glaciers dominate eustatic sea-level rise in the 21st century. Science 317, 1064–1067. doi: 10.1126/science.1143906, 2007.
- MITROVICA, J. X.; TAMISIEA, M. E.; DAVIS, J. L. and MILNE, J. L.: Recent mass balance of polar ice sheets inferred from patterns of global sea level change. Nature, 409, 1026–1029, 2001.
- MOORE, J. C. and GRINSTED, A.: New Tools for Analyzing Time Series Relationships and Trends. EOS, Vol. 86, 24, 2005.
- MPI-M: Max-Plank-Institut für Meteorologie: Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert, Hamburg, 2006.
- MPI-M: Max-Planck-Institut für Meteorologie: Klimaauswirkungen und Anpassungen in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. In: Umweltbundesamt. Climate Change, Dessau-Roßlau, 2008a.
- MPI-M: Max-Planck-Institut für Meteorologie: Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios, Hamburg, 2008b.
- NIEMEYER, H.: Datenauswertung Norderney (mündliche Auskunft), 2009.
- OTTO-BLIESNER, B. L.; MARSHALL, S. J.; MILLER, G. H. and HU, A.: Last Interglaciation Project members, 'Simulating Arctic climate warmth and ice-field retreat in the last interglaciation'. Science, 311, 1751–1753, 2006.
- PELTIER, W. R.: Global glacial isostatic adjustment and modern instrumental records of relative sea level history. In: Douglas, B. C.; Kearney, M. S. and Leatherman, S. P. (eds.) Sea Level Rise, International Geophysical Series, 75, 65–95, 2001.
- PFEFFER, W. T.; HARPER, J. T. and O'NEEL, S.: Kinematic Constrains on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise. Science Vol. 321. 1340–1343, 2008.
- PIK: Der Klimawandel Einblicke, Rückblicke, Ausblicke. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., 2007.
- PLAG, H.-P. and JUTTNER, H.-U.: Inversion of global tide gauge data for presentday ice load changes, in Proceed. Second Int. Symp. on Environmental research in the Arctic and Fifth Ny-Alesund Scientific Seminar, Yamanouchi, T. (ed.) Special Issue, No. 54 in Memoirs of the National Institute of Polar Research, 301–317, 2001.
- RAHMSTORF, S.: A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise. Science Vol. 315, 368–370, 2007.
- RAHMSTORF, S.; CAZENAVE, A.; CHURCH, J. A.; HANSEN, J. E.; KEELING, R. F.; PARKER, D. E. and SOMERVILLE, R. C. J.: Recent Climate Observations Compared to Projections. Science Vol. 316, 709, 2007.
- RAHMSTORF, S.: Sea level Rise. Vortrag im Rahmen des Klimakongresses in Kopenhagen, März 2009.
- RAPER, S. C. B. and BRAITHWAITE, R. J.: Low sea level rise projections from mountain glaciers and icecaps under global warming. Nature, 439, 311–31, 2006.
- RIDLEY, J. K.; HUYBRECHTS, P.; GREGORY, J. M. and LOWE, J. A.: Elimination of the Greenland ice sheet in a high CO2 climate. J. Climate, 17, 3409–3427, 2005.
- SCHELLNHUBER: http://www.focus.de/wissen/wissenschaft/klima/neue-warnungen-klimawandel-staerker-als-gedacht\_aid\_339322.html, 2008a.
- SCHELLNHUBER: Global warming: Stop worrying, start panicking?. PNAS 38, 14239–14240, 2008b.
- SCHMITH, T. H.; JOHANSEN, S. and THEJLL, P.: Comment on a semi-empirical approach to projecting future s ea level rise. Science, 317, 866c, 2007.
- SHEPHERD, A. and WINGHAM, D.: Recent sea-level contributions of the Antarctic and Greenland ice sheets. Science, 315, 1529–1532, 2007.
- STERR, H.: Klimawandel an der Nordsee: Was bedeutet das für die Region NF und die Inseln & Halligen? Vortrag im Rahmen der Insel- und Hallig-Konferenz vom 13.6.2007 in Dagebüll, 2007.

256

- STORCH, H. VON; ZORITA, E. and GONZÁLEZ-ROUCO, J. F.: Relationship between global mean sea-level and global mean temperature in a climate simulation of the past millennium. Ocean Dynamics, 58, 227–236, 2008.
- UKCIP: UK Climate Impacts Programme, www.ukcip.org.uk, 2007.
- VAUGHAN, D. G.: West Antarctic Ice Sheet Collapse the fall and rise of a paradigm. Climate Change (im Druck), 2008.
- WAHL,T.; JENSEN, J. and FRANK, T.: Changing Sea Level and Tidal Dynamics at the German North Sea Coastline, Proceedings of the Coastal Cities Summit 2008 – Values and Vulnerabilities, St. Petersburg, Florida, USA, 2008.
- WAHL, T.; JENSEN, J. and FRANK, T.: Combining high and low resolution sea level data for MSL computations in shallow seas. Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU General Assembly 2009, Vienna, 2009.
- WAHL, T.; JENSEN, J. and FRANK, T.: On analyzing sea level rise in the German Bight since 1844, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, 171–179, 2010.
- WANNINGER, L. et al.: Bestimmung von Höhenänderungen im Küstenbereich durch Kombination geodätischer Messtechniken, Die Küste, 76, 2009.
- WBGU: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. Die Zukunft der Meere zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten. Berlin, 2006.
- WHITE, N. J.; CHURCH, J. A. and GREGORY, J. M.: Coastal and global averaged sea level rise for 1950 to 2000, Geophys. Res. Lett., 32, L01601, doi: 10.1029/2004GL021391, 2006.
- WILLIS, J. K.; ROEMMICH, D. and CORNUELLE, B.: Interannual variability in upper ocean heat content, temperature, and thermosteric expansion on global scales. J. Geophys. Res., 109, C12036, doi: 10.1029/2003JC002260c, 2004.
- WOODWORTH, P. L.; WHITE, NEIL J.; JEVREJEVA, S.; HOLGATE, S. J. and GEHRELS, W. R.: Evidence for the accelerations of sea level on multi-decade and century timescales. International Journal of Climatology. doi: 10.1002/joc.1771, 2008.
- WOODWORTH, P. L.; TEFERLE, F. N.; BINGLEY, R. M.; SHENNAN, I. and WILLIAMS, S. D. P.: Trends in UK mean sea level revisited. Geophysical Journal International, Jg. 176, 22, 19–30, 2009.
- WÖPPELMANN, G.; POUVREAU, N. and SIMON, B.: Brest sea level record: a time series construction back to the early eighteenth century. Ocean Dynamics, 56, Issue 5–6, pp. 487–497. doi: 10.1007/s10236-005-0044-z, 2006.

# Errata

### Corrigenda "Die Küste" 74 Fehlerberichtigung "Die Küste" 74 ICCE 2008 Edition - Synoptic Overview of the German Coastal Zone

Please note the following revisions: Bitte beachten Sie folgende Korrekturen:

Page 31: The correct list of authors includes Alexander Bartholomä as third author. Die korrekte Autorenliste enthält Alexander Bartholomä als dritten Autor.

MANFRED ZEILER, KLAUS SCHWARZER, ALEXANDER BARTHOLOMÄ and KLAUS RICKLEFS Seabed Morphology and Sediment Dynamics

Page 64: The colour code is missing in Figure 4. In Abbildung 4 fehlt die Farbskala.

Fig. 4: Seasonal North Sea circulation pattern, BSHcmod model data, 4-year average based on daily residual currents. The colours give the persistence in percent

Page 104: The lower table is incorrect and is replaced by the table Warnemünde. Die untere Tabelle ist falsch und wird durch die Tabelle Warnemünde ersetzt.

Fig. 5: Time series of mean water and high water levels at the Travemünde and Warnemünde gauge stations

Page 144: The gauge Helgoland is missing in Figure 1. In der Abbildung 1 fehlt der Pegel Helgoland.

Fig. 1: The island of Helgoland and Düne ('dune') (aerical Photograph © AWI, 2003)

Page 148: The quality of Figure 4 has been improved. Die Qualität von Abbildung 4 wurde verbessert.

Fig. 4: Development of Helgoland (main island) since 1890 (after KRUMBEIN, 1975)

Die Küste, 76 FAK (2009), 1-256

## Seabed Morphology and Sediment Dynamics

By MANFRED ZEILER, KLAUS SCHWARZER, ALEXANDER BARTHOLOMÄ and KLAUS RICKLEFS

### Contents

1.	Introduction	1
2.	North Sea	1
	2.1 Offshore Waters	2
	2.2 Tidal Flats	5
	2.3 Estuaries	6
3.	Baltic Sea	7
	3.1 Offshore Waters	9
	3.2 Nearshore Zone	0
	3.3 Coast	1
4.	References	1

### 1. Introduction

The German coasts extend along two different seas, the tide-dominated North Sea and the intra-continental non-tidal Baltic Sea. While the North Sea has an open transition to the Atlantic Ocean, the Baltic Sea has its only connection to the world's oceans through the North Sea and the shallow and narrow Danish straits and sounds (Fig. 1). Both shelf seas are not only different in their hydrographic characteristics, but also in their geological development (SCHWARZER et al., 2008, this volume), their sediment conditions and their geo-morphological features.

Although the seafloor in the German sectors of North and Baltic Sea is built up mainly of loose Quarternary deposits, the driving forces leading to environmental changes are quite different. While in the North Sea the sedimentological and geomorphological development (morphodynamics) is ruled by tides and waves, waves and wind driven currents are relevant for the seafloor conditions and sediment dynamics in the Baltic Sea. In both seas, however, phases of storm-induced high water levels often lead to severe changes of the coastal geomorphological environment. For the German North Sea coast this holds especially for storms from (north-)westerly directions, which can induce water levels of up to five meters above mean sea level usually for the duration of one or two tidal cyles. For the western Baltic Sea coast, storms from north-easterly directions have the strongest influence on coastal changes. Here, high water levels and therefore hydrodynamic extremes can last for days (SCHWARZER, 2003).

### 2. North Sea

The German Bight is a meso-tidal to low macro-tidal environment with a tidal range between two and four meters. According to geo-morphological features and sedimentological environments, the German sector of the North Sea can be divided into the three zones: the offshore waters, the tidal flats of the Wadden Sea and the funnel-shaped estuarine river mouths (Fig. 2). In the meso-tidal environment, the barrier island chain of the East Frisian as



Fig. 4: Seasonal North Sea circulation pattern, BSHcmod model data, 4-year average based on daily residual currents. The colour gives the persistence in percent

In the long-term mean (1950–1986) the highest wind speeds in the German Bight occur in November (9 m/s) and decrease until February to 7 m/s. During March there is a local maximum of 8 m/s, then the values decrease rapidly to a value of about 6 m/s between May and August. Then the values increase again until they reach their maximum at the end of autumn (BSH, 1994). This seasonal cycle based on monthly means is conferrable to the sea state. At the light vessel 'German Bight' the percentage frequency distribution of both wave and wind direction shows a maximum for winds and waves from the West-south-west and a second maximum for East-south-east (LÖWE et al., 2003).



Fig. 5: Time series of mean water and high water levels at the Travemünde and Warnemünde gauge stations



Fig. 1: The island of Helgoland and Düne ('dune') (aerial photograph © AWI, 2003)

### 2. Geology

The geological history of Helgoland starts in the Upper Permian (Zechstein) approx. 255 Mio. years ago. In an arid climate, enormous salt deposits were generated by repeated evaporation over a shallow inland lake. At that time, the present Northern Germany was located close to the equator and – as a consequence of the continental drift – migrated towards its present position only during the further course of history.



Fig. 4: Development of Helgoland (main island) since 1890 (after KRUMBEIN, 1975)



Fig. 5: Design of the mega-port 'Lobster Claw (Hummerschere)' and the realized structures (Schindler and Lindemann, 1990)