

KFKI-Projekt MOSES
Der Windatlas für
deutsche Küstenseegebiete der Nordsee

Fördernummer KFKI 80

A. Ganske, G. Rosenhagen und H. Schmidt
Deutscher Wetterdienst, Hamburg

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Windatlas Berechnung	3
2.1	Das Windmodell MKW	3
2.1.1	Das Initial-Windfeld	3
2.1.2	Rauigkeiten über See	4
2.1.3	Das divergenzfreie Windfeld	4
2.2	Nesten der Windfelder	5
3	Windatlas Eingangsgrößen	6
3.1	Windgeschwindigkeit	6
3.1.1	Wertebereich	6
3.1.2	Klassenbreite	7
3.2	Windrichtung	7
3.3	Wasserstand	8
3.3.1	Wertebereich	8
3.3.2	Klassenbreite	9
3.4	Einschränkung der Windrichtungen bei extremen Wasserständen	9
4	Windatlas Anwendung	11
4.1	Wahl der Eingabewerte	11
4.2	Geeignete Messstationen	12
5	Verifikation der Windatlas-Ergebnisse	14
5.1	Vergleich mit Messdaten	14
5.1.1	Norderney Gebiet	14
5.1.2	Dithmarscher Bucht Gebiet	16
5.2	Vergleich mit Modelldaten	18
5.2.1	PRISMA-Daten	19
5.2.2	HIPOCAS-Daten	20
5.3	Verwendung von PRISMA-Daten als Eingabedaten	21
5.4	Fallstudie: Die Sturmflut von 1976	24
5.4.1	Die Wetterlage vom 30.12.1975 bis 4.1.1976	24
5.4.2	Vergleich zwischen gemessenen und mit dem Windatlas bestimmten Windgeschwindigkeiten	24
6	Zusammenfassung	26
7	Danksagung	27
8	Anhang	28
9	Literatur	30
10	Liste der verwendeten Symbole	32

1 Einleitung

Für viele Projekte im Bereich des Küsteningenieurwesens und des Küstenschutzes werden lange, in sich konsistente Zeitreihen von Windfeldern über See und in Küstennähe benötigt. Frühere Projekte, wie z.B. HIPOCAS (Weiss et al., 2003), stellen diese Windfelder in einer groben Auflösung von z.B. 50 km zur Verfügung. Für Untersuchungen im Flachwasser und zwischen den Inseln des Küstenvorfeldes werden jedoch räumlich höher aufgelöste Windfelder benötigt.

Im Rahmen des Projektes MOSES (Modellierungen des mittelfristigen Seegangsklimas im Nordseeküstengebiet) des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) wurde bei der Abteilung Seeschifffahrt des DWD in Hamburg ein digitaler Windatlas für die südliche Nordsee sowie die genesteten Gebiete Norderney und Dithmarscher Bucht (siehe Abb. 1) erstellt. Der Windatlas liefert den Projektpartnern Forschungsstelle Küste Norderney, CORELAB der Uni Kiel und GKSS Geesthacht hochaufgelöste Windfelder für statistische Untersuchungen mit Seegangs- und Strömungsmodellen. Deshalb waren die Anforderungen an die Lage der Untersuchungsgebiete und die Genauigkeit der Windfelder von den Projektpartnern bestimmt.

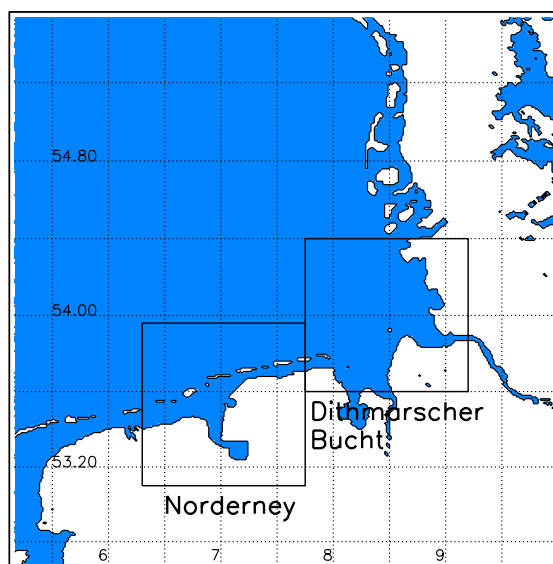


Abbildung 1: Das Untersuchungsgebiet Südliche Nordsee mit den Teilgebieten Norderney und Dithmarscher Bucht.

Da im Bereich der deutschen Nordseeküste die örtlichen Unterschiede im Wind im Wesentlichen durch die unterschiedlichen Rauigkeitsverhältnisse der Erdoberfläche und der Seeoberfläche bestimmt sind, konnte zur Berechnung der Windfelder ein einfaches, diagnostisches Atmosphärenmodell verwendet werden, das Windmodell MKW (**M**assen**k**onsistentes **W**indmodell) des Seewetteramts Hamburg. Dieses hat sich bereits bei derartigen Fragestellungen in verschiedenen Untersuchungen bewährt, siehe z.B. (Schmidt und Pätsch, 1992).

Der Windatlas besteht aus einer Vielzahl von mit dem MKW berechneten Feldern der Windgeschwindigkeit, die durch systematische Variation der antreibenden Windgeschwindigkeit und der Windrichtung in 800 m Höhe unter Berücksichtigung der Land-/Seeverteilung und der dazugehörigen Bodenrauigkeit sowie repräsentativen Wasserständen berechnet wurden. Dabei wurde

die mit der Windgeschwindigkeit wachsende Rauigkeit der Meeresoberfläche approximativ aus einem Gleichgewicht zwischen dem Windfeld und dem Rauigkeitsfeld berechnet. Die Rauigkeit der Landoberflächen blieb dagegen örtlich konstant.

Bei der Nutzung des Windatlas müssen für einen beliebigen Punkt in einem dieser drei Gebiete als Eingangsgrößen Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit und Windrichtung in 10 m Höhe und ein zugehöriger repräsentativer Wasserstand vorgegeben werden. Mit Hilfe eines Interpolationsprogramms wird aus diesen Eingangswerten für das gewählte Gebiet aus dem Windatlas das zugehörige meteorologisch konsistente Windfeld berechnet.

In diesem Bericht wird zuerst kurz das Windmodell MKW erläutert. Danach wird gezeigt, welche Wertebereiche und Klassenbreiten zur Berechnung der Felder des Windatlas gewählt wurden, damit daraus jedes gewünschte Windfeld mit genügender Genauigkeit für Seegangs- und Strömungsberechnungen interpoliert werden kann.

Anschließend werden Untersuchungen vorgestellt, bei denen an bestimmten Punkten in den zwei Gebieten Dithmarscher Bucht und Norderney Windatlas-Ergebnisse mit Messungen statistisch verglichen werden. Hieraus ergeben sich die Empfehlungen für geeignete Eingangsgrößen für Windatlas-Rechnungen.

2 Windatlas Berechnung

Der Windatlas besteht aus einer Vielzahl von Feldern der Windgeschwindigkeit, die mit dem Windmodell MKW (**M**assen**k**onsistentes Windmodell) bestimmt wurden. Das statische (nicht zeitabhängige) Modell wurde aus dem NOAA Atmospheric Boundary Layer Model (NOABL: Sherman, 1976 und Traci, 1978) vom DWD weiterentwickelt und bereits in mehreren Projekten erfolgreich verwendet, um Windfelder in Küstennähe zu berechnen, siehe (Schmidt et al., 1994), (Schmidt und Pätsch, 1992), sowie (Füg und Schmidt, 2001).

2.1 Das Windmodell MKW

Das Windmodell MKW besteht aus zwei Teilen, wobei im ersten ein sogenanntes Initial-Windfeld berechnet wird, das durch den zweiten Teil in ein divergenzfreies, massenkonsistentes Windfeld umgewandelt wird. Das MKW weist ein dreidimensionales Rechengitter auf, das in der Horizontalen gleichabständig ist. Die geländefolgende vertikale Koordinate hat dagegen mit der Höhe wachsende Gitterabstände.

2.1.1 Das Initial-Windfeld

Beim Initialisierungsverfahren wird die Topographie und die Oberflächenrauigkeit für jeden Gitterpunkt und ein Referenzwert für die Windgeschwindigkeit und Windrichtung am Modelloberrand in 800 m Höhe vorgegeben. Meteorologisch gesehen ist dies gleich mit der Annahme, dass dort ein konstanter geostrophischer Wind herrscht und dass damit der Gradient des Luftdrucks innerhalb des vorgegebenen Gebiets in guter Näherung konstant ist. In der Natur ist dies nur über kleinen Gebieten gegeben.

Unter der Voraussetzung eines homogenen Rauigkeitsfeldes mit entsprechenden Randbedingungen stellt sich in der bodennahen Luftschicht (über See in den unteren 800 m) näherungsweise

ein logarithmisches Windprofil ein:

$$\frac{u(z_1)}{u(z_2)} = \frac{\ln(z_1) - \ln(z_0)}{\ln(z_2) - \ln(z_0)} \quad (1)$$

Dabei sind z_1 und z_2 zwei beliebige Höhen innerhalb der Grenzschicht und z_0 ist die sogenannte Rauigkeitslänge, die über Land an jedem Gitterpunkt anhand der CORINE Landnutzungsdaten (Stand 2004) bestimmt wurden. Hierbei wird angenommen, dass sich die Windrichtung nicht mit der Höhe ändert. Die Berechnung von Rauigkeiten über See wird im folgenden Unterkapitel näher erläutert.

Das logarithmische Windprofil ist nur innerhalb der unteren 80 - 100 m (Prandtl-Schicht) gültig, da hier die Drehung des Windes mit der Höhe auf Grund der Corioliskraft vernachlässigt werden kann. Da bei diesem Projekt nur die Windrichtungen und -geschwindigkeiten in 10 m Höhe über Grund bzw. NN berechnet werden, kann die vertikale Änderung der Windrichtung vernachlässigt werden. Die vertikale Änderung der Windgeschwindigkeit oberhalb der Prandtl-Schicht wird durch das logarithmische Profil mit genügender Genauigkeit wiedergegeben.

Die Berechnung des drei-dimensionalen Windfeldes wird auf eine quasi-Lagrange Weise approximativ vorgenommen, indem der Wind, der auf der luvseitigen Berandung in ein Gitterelement einströmt, durch die zwischen den benachbarten Gitterelementen wechselnde Bodenrauigkeit strömungsfolgend modifiziert wird. Damit kann in erster Näherung die Bildung von internen Grenzschichten, z.B. bei der Überströmung von glattem Untergrund auf rauheren Untergrund, beschrieben werden.

2.1.2 Rauigkeiten über See

Über Land sind die Rauigkeitslängen z_0 konstant und hängen von der Landnutzung ab. Über See sind die Rauigkeiten eine Funktion der Wellenhöhe und des Wellenalters, die wiederum von der Windgeschwindigkeit, dem Fetch und der Wassertiefe abhängen. Das Gleichgewicht zwischen Wind- und Wellenfeld lässt sich in einem iterativen Prozess aus einer modifizierten Charnock Formel (Charnock, 1955) bestimmen, siehe Anhang. Die aus der Iteration bestimmten Rauigkeitslängen z_0 als Funktion der Windgeschwindigkeit u_{10} in 10 m Höhe über Grund bzw. NN, des Fetch x und der Wassertiefe D sind in Abb. 2 dargestellt.

Für ein festes u_{10} nimmt z_0 bei geringem Fetch zunächst zu und erreicht je nach Windgeschwindigkeit ein Maximum bei einem Fetch von ca 30 m bis ca. 2000 m. Mit wachsendem Fetch wird z_0 dann wieder geringer und geht schließlich in den konstanten, vom Fetch unabhängigen Tiefwasserwert nach Charnock über.

Die Wassertiefe im Untersuchungsgebiet reicht zumindest für hohe und sehr hohe Windgeschwindigkeiten in einigen Gebieten nicht zur vollen Ausreifung des Seegang wie im Tiefwasser aus. Es wird sich daher meist um tiefenbegrenzten Seegang handeln. Die Tiefenbegrenzung wird über den Fetch vorgenommen. Der Fetch wird je nach Tiefe D durch x_d begrenzt. x_d und das zugehörige z_0 ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Linien für konstantes D und denen für konstantes u_{10} (ausgezogen). Für einen Fetch $x > x_d$ ist x_d zu nehmen, andernfalls x selbst.

2.1.3 Das divergenzfreie Windfeld

Im zweiten Programmteil des MKW wird aus dem Initial-Windfeld das massenkonsistente (divergenzfreie) Windfeld berechnet. Das Feld wird iterativ so lange modifiziert, dass in je-

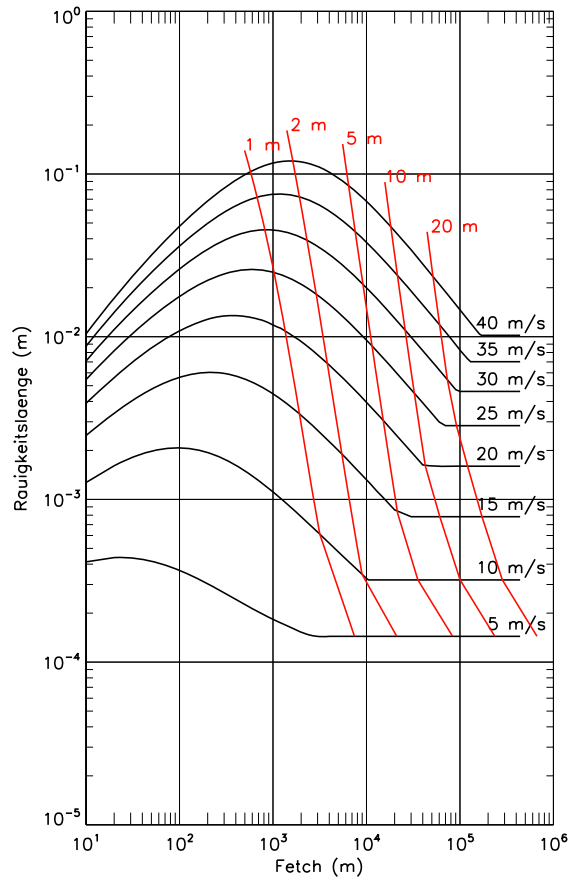


Abbildung 2: Rauigkeitslänge z_0 der Seeoberfläche als approximative Funktion der Windgeschwindigkeit u_{10} (m/s) in 10 m Höhe und des Fetches x (m), begrenzt durch die Wassertiefe D (m).

dem Volumenelement ebensoviel Luft ein- wie ausströmt und dabei gleichzeitig die Unterschiede zum Initial-Windfeld minimal bleiben. Die dazu erforderliche Lösung einer Poisson-Differentialgleichung wird mit einem Mehrgitterverfahren vorgenommen. Durch diesen Potentialströmungsausgleich ergeben sich auch Effekte wie seitliche Umströmung von Hindernissen, die Strömungsüberhöhung über Kuppen sowie Vorstau- und Leeeffekte. Rauere Gebiete in einer aerodynamisch glatten Umgebung wirken ähnlich wie orographische Hindernisse.

2.2 Nesten der Windfelder

Bei diesem Projekt wurden für drei Gebiete, deren geographische Lage in Abb. 1 zu sehen ist, Windfelder berechnet. Die Felder im Gebiet Südliche Nordsee wurden auf einem Gitter mit einer Maschenweite von 1000 m bestimmt. Durch eine während des Projekts entwickelte sogenannte Nestversion des Modells MKW war es möglich, die in diesem Gebiet berechneten Windwerte als Randwerte der Windfelder am luv-seitigen Rand der höher aufgelösten Windfelder der Teilgebiete Norderney und Dithmarscher Bucht (Maschenweite 250 m) zu verwenden. Zusätzlich wurden

an diesen Rändern die Rauigkeiten und Fetchlängen des Gebiets Südliche Nordsee als Randwerte zur Berechnung der Rauigkeiten im genesteten Gebiet vorgegeben. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass die Windfelder der Teilgebiete in geringerem Maße von numerischen Randeinflüssen gestört sind, als dies ohne das Nesten (Einbetten) der Fall wäre.

Das Gebiet Norderney deckt das Untersuchungsgebiet des Projektpartners Forschungsstelle Küste Norderney ab, das Gebiet Dithmarscher Bucht die Gebiete der anderen zwei Projektpartner CORELAB, Uni Kiel und GKSS Geesthacht. Das Gebiet Südliche Nordsee wurde zusätzlich auf Wunsch des ALR Husum im Norden vergrößert, um auch für andere Anwendungen in diesem Untersuchungsgebiet Windfelder berechnen zu können.

3 Windatlas Eingangsgrößen

Die Berechnung der Windfelder des Windatlas erfordert als Eingangsgrößen je einen Wasserstand sowie am Modelloberrand eine Windgeschwindigkeit und eine Windrichtung. Um für anschließende Seegangs- und Strömungsberechnungen jedes gewünschte Windfeld mit genügender Genauigkeit interpolieren zu können, mussten die Klassenbreiten und Wertebereiche zur Berechnung der Felder entsprechend gewählt werden. Die Wertebereiche und Klassenbreiten dieser Größen lassen sich weitestgehend durch physikalische Überlegungen und durch gemessene Extremwerte einschränken bzw. festlegen. Die gewählten Klassenbreiten und Wertebereiche werden im folgenden Kapitel diskutiert.

3.1 Windgeschwindigkeit

Das Windmodell benötigt zur Berechnung der Windfelder Angaben des Windes am Modelloberrand in 800 m Höhe. Für die praktische Anwendung des Windatlas werden jedoch die Wertebereiche in 10 m Höhe über Grund bzw. NN festgelegt, da nur in dieser Höhe die Windfelder für die anschließenden Modelle der Küstenforschung gebraucht werden. Bei der Umsetzung des Wertebereichs für die Windgeschwindigkeit am Modelloberrand aus den Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe über NN besteht das Problem, dass in dieser Höhe die berechneten Windgeschwindigkeiten in den einzelnen Gebieten stark variieren. Deshalb wurde ein Referenzpunkt in der Nähe von Helgoland und eine Referenzwindrichtung von 270° gewählt. Für diesen Referenzpunkt werden dann aus den 10 m Windwerten die am Modelloberrand entsprechenden Windgeschwindigkeiten bestimmt.

Bei der Berechnung der Windfelder wurde eine neutrale thermische Schichtung der Atmosphäre vorausgesetzt. Bei hohen Windgeschwindigkeiten ist die bodennahe Grenzschicht der Atmosphäre gut durchmischt und damit die Voraussetzung der thermisch neutralen Schichtung meist erfüllt. Dies gilt jedoch nicht für geringe Windgeschwindigkeiten, weshalb die berechneten Windfelder in diesen Fällen stark von den tatsächlichen Windfeldern abweichen können. Dadurch ergibt sich bereits, dass der Wertebereich der Windgeschwindigkeit eingeschränkt werden sollte.

3.1.1 Wertebereich

Der Wertebereich für die Eingangswindgeschwindigkeiten unterliegt folgenden Einschränkungen:

- Erfahrungen haben gezeigt, dass Stundenmittel der Windgeschwindigkeiten größer 35 m/s (Windstärke 12 Bft) im Gebiet der südlichen Nordsee bisher nicht gemessen wurden.

- Die Voraussetzungen zur Berechnung der Rauigkeit über See sind bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten nicht mehr erfüllt.
- Bei geringen Windgeschwindigkeiten kann keine neutrale Schichtung der atmosphärischen Grenzschicht vorausgesetzt werden.

Wir wählten deshalb für die Windgeschwindigkeiten u in 10 m Höhe über See einen Wertebereich zwischen 10 m/s und 35 m/s. Am Modelloberrand entspricht dies einem Wertebereich zwischen 15 m/s und 60 m/s.

Wird ein Ausgangsergebnis für eine Windgeschwindigkeit kleiner 10 m/s benötigt, weil z.B. innerhalb einer vorgegebenen Zeitreihe Werte kleiner 10 m/s auftreten, so ist eine Interpolation zwischen dem Windfeld bei 10 m/s und dem Feld bei 0 m/s, wo alle Windgeschwindigkeiten gleich Null sind, vorgesehen. Windfelder, die für Eingangswindgeschwindigkeiten größer 35 m/s bestimmt werden sollen, werden extrapoliert.

3.1.2 Klassenbreite

Als Klassenbreite der Windgeschwindigkeit u_{10} in 10 m Höhe über Grund, mit der die Windfelder berechnet werden, wurde 5 m/s gewählt. Mit dieser Klassenbreite kann i. A. eine lineare Interpolation zwischen zwei Windfeldern erfolgen.

Bei Gitterpunkten über Land ist eine solche Interpolation ohne weiteres möglich. Dort wird die Geschwindigkeit u in der Höhe z_1 aus der am Modelloberrand in Höhe $z_2 = 800$ m vorgegebenen Windgeschwindigkeit u_M mit Hilfe des logarithmischen Windprofils in Gleichung (1) berechnet. Damit ändert sich die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe linear mit der Windgeschwindigkeit am oberen Modellrand.

An Gitterpunkten innerhalb des Seegebietes wechselwirken Windgeschwindigkeit und Rauigkeitsfeld, da die Rauigkeit von der Wellenhöhe und dem Wellenalter abhängt, die eine nichtlineare Funktion der Windgeschwindigkeit, des Fetches und der Wassertiefe sind. Dabei wird jegliche Dünung vernachlässigt. Es kann davon ausgegangen werden, dass auch an Gitterpunkten über See die Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe bei deutlicher Erhöhung der Windgeschwindigkeit am Modelloberrand (z.B. um 5 m/s) anwachsen. Bestimmt man zwischen 10 m/s und 35 m/s entsprechend der Klassenbreite aus den Werten der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe am Referenzpunkt die Werte der Windgeschwindigkeit am Modelloberrand, so erhält man die Werte 15 m/s, 22 m/s, 30 m/s, 40 m/s, 50 m/s und 60 m/s.

3.2 Windrichtung

Eine Drehung der Windrichtung mit der Höhe wird bei der Initialisierung der Windfelder mit dem Windmodell MKW nicht berücksichtigt. Die am Modelloberrand vorgegebene Windrichtung ist identisch mit der Windrichtung in 10 m Höhe und wird erst bei der Berechnung der divergenzfreien Windfelder geringfügig verändert. Frühere Projekte (z.B. Füg und Schmidt, 2001) haben gezeigt, dass sich die mit dem Windmodell MKW berechnete Windrichtung in 10 m Höhe nur um wenige Grad ($< 5^\circ$) von der vorgegebenen Windrichtung am Modelloberrand unterscheidet und dass man im Rahmen der Genauigkeit der berechneten Windfelder diese Änderungen vernachlässigen kann. Deshalb werden die Windrichtungen in 10 m Höhe mit der vorgegebenen Windrichtung gleichgesetzt und nicht an jedem Gitterpunkt ausgegeben.

Die Windrichtungsintervalle beginnen bei 11.25° und haben eine Breite von 22.5° . Die Intervallmitten stimmen mit den in der Meteorologie verwendeten Windrichtungen der 16-teiligen Windrose (NNO, NO, ONO,...NNW,N) überein, wobei $N=360^\circ$, $NNO=22.5^\circ$,... sind.

3.3 Wasserstand

Eine Berücksichtigung des Wasserstandes bei der Berechnung der Windfelder ist nötig, da die Wassertiefe einen Einfluss auf die Rauigkeit der Meeresoberfläche hat. Für seichtes Wasser erfolgt ein Brechen von Wellen und damit eine Erhöhung der Rauigkeit im Vergleich zu Wellen im tiefen Wasser.

Der Wasserstand kann bei den Rechnungen für den Windatlas nur an den Gitterpunkten verändert werden, die mit Hilfe einer sogenannten Land-See-Maske als See-Gitterpunkte definiert sind. Die vorgegebenen Seegebiete sind in Abb. 1 blau eingezeichnet. Ihre Grenzen zum Land fallen mit den Deichlinien zusammen. Die Land-See-Maske soll sicherstellen, dass nur über See die Rauigkeiten variiert werden, nicht aber in Gewässern ohne Tideeinfluss. Zudem soll bei Hochwasser nur außerhalb der Deichlinien ein Überfluten von Land möglich sein.

Veränderte Wasserstände werden derart berücksichtigt, dass die auf NN bezogenen Wasserstände zu den Wassertiefendaten hinzu addiert werden. Somit erhöhen sich bei Hochwasser die Wassertiefen, bei Niedrigwasser werden sie reduziert. Bei resultierenden negativen Tiefendaten wird angenommen, dass diese Gebiete trockengefallen sind und die Rauigkeit von Sand angesetzt werden kann. Eingedeichte Inseln werden als Landpunkte definiert, haben eine feste Rauigkeit und können nicht überflutet werden. Kleinere Inseln, wie z.B. die Inseln Trischen oder Scharhörn, sind nicht als Landgebiete gekennzeichnet, da sie bei Hochwasser z. T. überflutet werden.

Der Einfluss des Wasserstandes auf die Windfelder ist nicht linear und nicht stetig, da bei konstanter Windgeschwindigkeit, aber verändertem Wasserstand zwei verschiedene Effekte die Rauigkeit verändern:

1. Bei Flachwassergebieten sinkt mit wachsendem Wasserstand und damit größer werdender Wassertiefe die Rauigkeit ab, da die vom Wind erzeugten Wellen in tiefem Wasser weniger brechen, also glatter sind als im flacheren Wasser. Daraus folgt beim ausgereiften Seegang eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit.
2. Sind Flächen innerhalb des Seegebiets trockengefallen, so wird für diese Flächen die Rauigkeit von Sand eingesetzt. Bei hohen Windgeschwindigkeiten (ab $u > 20$ m/s in 10 m Höhe) ist diese Rauigkeit immer kleiner als die Rauigkeit der vom Wind überströmten Wasserflächen. Damit steigt bei Überflutung dieser vormals trockengefallenen Flächen die Rauigkeit an und die Windgeschwindigkeit fällt ab.

3.3.1 Wertebereich

Für den Windatlas sollte der Wasserstand äußerstenfalls innerhalb der Grenzen des höchsten Hochwassers von 5.6 m über NN und des niedrigsten Niedrigwassers von 4.4 m unter NN, die bis jetzt in der südlichen Nordsee gemessen wurden, liegen, s. Tabelle 1.

Ort	höchstes HW (m über NN)	niedrigstes NW (m über NN)
Borkum	3.8	-3.5
Norderney	4.1	-3.0
Emden	5.2	-3.8
Wilhelmshaven	5.2	-4.4
Bremerhaven	5.4	-4.2
Cuxhaven	5.1	-4.0
Büsum	5.2	-4.3
Husum	5.6	-3.2
Dagebüll	4.7	-3.7
List	4.1	-3.5
Helgoland	3.6	-3.7

Tabelle 1: Maximale und minimale Pegel in der Deutschen Bucht seit 1900 (BSH, 2004).

3.3.2 Klassenbreite

Für den Windatlas müssen für jeden einzelnen Wasserstand für alle festgelegten Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten Windfelder berechnet werden. Somit beeinflusst die Gesamtzahl der berücksichtigten Wasserstände entscheidend die Anzahl der zu berechnenden Windfelder und somit den zeitlichen Aufwand. Da die Windfelder möglichst schnell den Projektpartnern zur Verfügung gestellt werden sollten, musste der zeitliche Aufwand so gering wie möglich gehalten werden.

Testrechnungen haben gezeigt, dass bei Erhöhung des Wasserstands um jeweils 1.5 m Differenzen in der Windgeschwindigkeit von etwa 2 m/s auftreten, siehe Ganske et al. (2005). Da diese Differenzen aber nur in räumlich eng begrenzten Gebieten mit sehr geringen Wassertiefen auftraten, ist beim Wasserstand eine Klassenbreite von 1.5 m im Rahmen der Genauigkeit der berechneten Windfelder ausreichend.

Bei Hochwasser über 4.5 m über NN ist die Änderung der Windgeschwindigkeiten durch eine Erhöhung des Wasserstandes so gering, dass diese zu vernachlässigen ist.

Bei Niedrigwasser unter 3 m unter NN sind die Änderungen der Windgeschwindigkeiten mit fallendem Wasserstand über den trockenfallenden Gebieten am größten. Da diese Gebiete für Seegangs- und Strömungsrechnungen nicht relevant sind, wird auf eine Berechnung der Windfelder bei Wasserständen von weniger als 3 m unter NN verzichtet. Somit wird der Wertebereich des Wasserstands von 3.0 m unter NN bis 4.5 m über NN festgelegt.

3.4 Einschränkung der Windrichtungen bei extremen Wasserständen

In den vorigen Abschnitten wurden die gewählten Grenzen und Intervalle von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Wasserstand begründet. Extreme Hoch- und Niedrigwasser können jedoch im Untersuchungsgebiet nicht bei jeder Windrichtung vorkommen. Somit kann die Zahl der zu berechnenden Windfelder bei extremen Wasserständen für bestimmte Windrichtungen eingeschränkt werden.

Abb. 3 zeigt den Wasserstand am Pegel Cuxhaven, berechnet als Summe von Windstau, mitt-

lerer Tide von 1.5 m und einer mittleren Korrektur von 0.5 m für Hochwasser in Abhängigkeit von Windrichtung und Windgeschwindigkeit. In dieser Abbildung wird deutlich, dass Hochwasser mit 3.0 m über NN und mehr nur bei Windrichtungen zwischen 215° und 15° (SW - NNO) vorkommt.

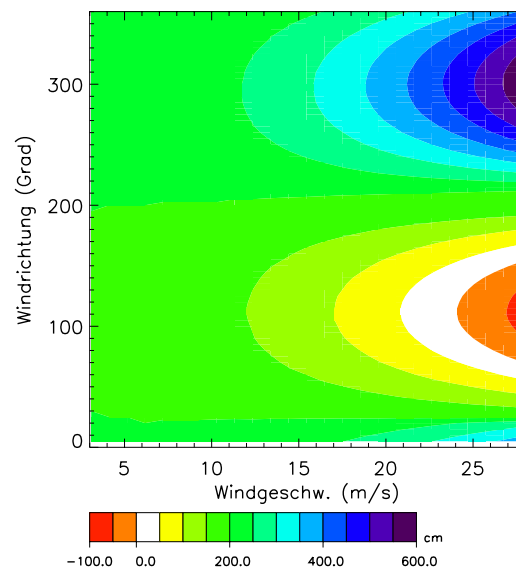


Abbildung 3: Wasserstand am Pegel Cuxhaven als Summe von Windstau, mittlerer Tidehöhe und einer mittleren Korrektur von +0.5 m für Hochwasser in Abhängigkeit von Windrichtung und Windgeschwindigkeit. (BSH, pers. Mitteilung)

Deshalb wurde angenommen, dass im Untersuchungsgebiet bei Wasserständen über 3 m über NN die Zahl der für den Windatlas zu berechnenden Felder beschränkt werden kann (siehe Ganske et al., 2005).

Multipliziert man die Gesamtzahl der Windfelder mit der Anzahl der Windgeschwindigkeitsintervalle und der Wasserstandsintervalle, so erhält man für die Berechnung des Windatlas eine Gesamtzahl von 534 Ausgangswindfeldern für jedes Gebiet.

4 Windatlas Anwendung

Der Windatlas besteht aus einer Vielzahl von Windfeldern, die jeweils für die Gebiete Südliche Nordsee, Dithmarscher Bucht oder Norderney berechnet wurden. Die Windfelder, die für das Gebiet Südliche Nordsee berechnet wurden, dienen dabei vorrangig zur Bestimmung der Randbedingungen für die Teilgebiete Norderney und Dithmarscher Bucht. Da bei der Berechnung des Initial-Windfeldes ein über dem gesamten Gebiet konstanter geostrophischer Wind angenommen wurde, siehe S. 3, ist die Verwendung der Windfelder des Gesamtgebietes Südlich Nordsee für die gesonderte Anwendung im Allgemeinen unzulässig, da dies hier i. A. nicht zutrifft. Kleinere Ausschnitte dieser Windfelder, bis zu einer Seitenlänge von maximal 100 km, können jedoch in gleicher Weise wie die genesteten Gebiete Dithmarscher Bucht und Norderney auch direkt zur Interpolation von Windfeldern verwendet werden, da hier in der Regel die Bedingung eines konstanten geostrophischen Windes erfüllt ist.

Der Windatlas bietet verschiedene Anwendungsmöglichkeiten. Es lassen sich sowohl ganze Windfelder als auch Daten von ausgewählten Zielpunkten ausgeben. So sind auch Berechnungen für Zeitreihen möglich. Dem Windatlas ist ein Fortran-Programm beigelegt, das aus der Vielzahl von Feldern für vorgegebene Eingangswerte das gewünschte Windfeld interpoliert. Die Nutzer des Windatlas geben dem mitgelieferten Interpolationsprogramm die geographischen Koordinaten eines Eingabepunkts, einen Wasserstand, sowie eine Windrichtung und eine Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe vor. Durch Interpolation wird dann aus den Feldern des Windatlas ein Windfeld für das Teilgebiet berechnet, in dem am Eingabepunkt die vorgegebene Windgeschwindigkeit und Windrichtung herrschen. Da angenommen wird, dass die Windrichtung nahezu konstant ist, wird sie nicht gesondert ausgegeben, siehe Abschnitt 3.2.

Bei der Verwendung der Windfelder gibt es zwei Möglichkeiten:

- Das numerische Feld von Windgeschwindigkeiten mit der vorgegebenen Windrichtung kann als Antrieb für ein Seegangs- oder Strömungsmodell verwendet werden.
- Nicht die gesamten interpolierten Windfelder, sondern nur die Windgeschwindigkeiten an ausgesuchten Gitterpunkten des Modellgebiets werden ausgegeben, wie wir sie z.B. bei der Verifikation verwendet haben. Dabei ist eine Ausgabe von Windgeschwindigkeit und -richtung für den Zielpunkt in eine Datei möglich.

Gibt man bei den Windatlas-Rechnungen Eingabgrößen aus Zeitreihen vor, so erhält man zu jedem entsprechenden Zeitpunkt ein Windfeld und somit eine Zeitreihe. Damit lassen sich für einzelne Gitterpunkte Wertepaare von Windgeschwindigkeit und Windrichtung als Zeitreihe bestimmen. Diese berechnete Zeitreihe kann man zum Zwecke der Verifikation z.B. mit einer am gleichen Ort gemessenen Zeitreihe vergleichen.

4.1 Wahl der Eingabewerte

Die Qualität der Zeitreihe, die das Windklima am Eingabepunkt repräsentiert, bestimmt die Qualität der Ergebnisse für die berechneten Windfelder und damit für das Windklima im gesamten Gebiet. Deshalb müssen bei der Wahl des Eingabepunkts und der zugehörigen Zeitreihen einige Kriterien beachtet werden.

Sowohl Eingabe- als auch Zielpunkt sollten möglichst auf See oder in unmittelbarer Küstennähe liegen. Die Wasserstände sollten von einem Pegel stammen, der repräsentativ für das gesamte Gebiet ist, für das die Windfelder berechnet werden. So wurde bei den folgenden Verifika-

tionsrechnungen für das Gebiet Norderney die gemessenen Pegelstände von Borkum und für das Gebiet Dithmarscher Bucht die gemessenen Pegelstände von Cuxhaven verwendet, die uns freundlicherweise vom BSH zur Verfügung gestellt wurden.

Es sollten zusätzlich folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- die Mittelungszeiträume für die Windwerte sollten mindestens eine Stunde betragen.
- Wasserstände und Windwerte müssen in der gleichen zeitlichen Auflösung vorliegen.

Damit die Zeitreihen das Windklima am Eingabepunkt repräsentieren, sollten die Messungen an diesem Ort möglichst wenig von ihrer lokalen Umgebung beeinflusst sein. So sollte der Messmast möglichst frei stehen. Es können z.B. in der Nähe des Windmasts stehende Gebäude oder ein Wald die Windwerte so verändern, dass diese nicht mehr repräsentativ sind. Für statistische Auswertungen sollten die Zeitreihen möglichst lückenlos vorliegen und die Ausfälle sollten gleichmässig über den Tag und das Jahr verteilt sein.

Falls die Messungen nicht in 10 m Höhe erfolgten, sondern in der Höhe z_2 , können sie mit Hilfe der Formel des logarithmischen Windprofils in Gleichung (1) auf die Höhe $z_1 = 10$ m umgerechnet werden. Dabei ist z_0 die sogenannte Rauigkeitslänge, die bei den Rechnungen für den Windatlas an jedem Gitterpunkt über Land anhand der Landnutzungsdaten vorgegeben wurde und als Datensatz beim Windatlas beigefügt ist. Die Rauigkeitslängen über See hängen nichtlinear von der Windgeschwindigkeit ab und können z.B. nach den Gleichungen (2) (Charnock-Formel) und (3) im Anhang bestimmt werden.

4.2 Geeignete Messstationen

Erfahrungen im Seewetteramt haben gezeigt, dass die Winddaten der in Tab. 2 aufgelisteten und in Abb. 4 dargestellten Stationen in den genannten Zeiträumen grundsätzlich die oben genannten Bedingungen erfüllen. Bei den Diskussionen der Verifikationsergebnisse wird sich jedoch zeigen, dass nicht alle Stationen gleich gut als Eingangsdaten für den Windatlas geeignet sind.

Messort	östliche Länge(°)	nördliche Breite (°)	Messhöhe (m ü. Grund)	$\ln(z_0)$	Zeitraum
Borkum	6.75	53.56	10	-6.38	ab 1.1.1997
Büsum	8.86	54.12	11	-6.21	ab 1988
Emden	7.23	53.39	10	-0.96	ab 1997
Helgoland	7.90	54.25	10	-6.21	ab 1990
Norderney	7.15	53.71	12	-1.35	ab 1991
Scharhörn	8.43	53.97	10	-6.21	ab 1984
Spiekeroog	7.67	53.77	10	-6.21	ab 1998
St. Peter Ording	8.60	54.33	10	-0.72	1.1.1972-30.11.1999

Tabelle 2: Für den Windatlas geeignete Eingabestationen in den Gebieten Norderney und Dithmarscher Bucht.

Dabei wird die Station Scharhörn von der Hamburg Port Authority betrieben, alle anderen Stationen sind Messstationen des Deutschen Wetterdienstes. Auf Grund ihrer Lage ist Scharhörn die für diese Anwendungen in der Dithmarschen Bucht am besten geeignete Station.

Bei den in Tab. 2 gezeigten Stationen weichen die mit Formel (1) auf 10 m Höhe umgerechneten Geschwindigkeiten um maximal 5% von den gemessenen Windgeschwindigkeiten ab. Somit können bei all diesen Stationen im Rahmen der Genauigkeit die gemessenen Windgeschwindigkeiten i.A. ohne Umrechnung verwendet werden.

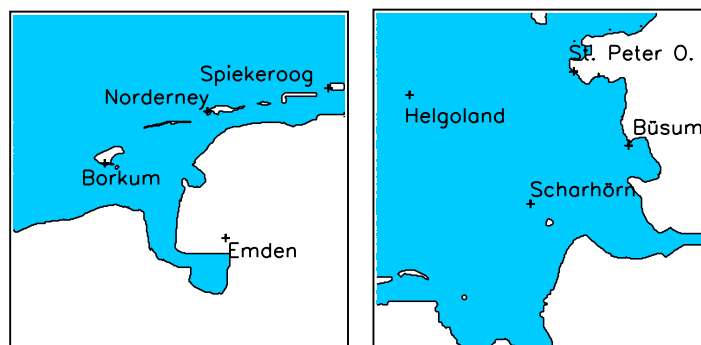


Abbildung 4: Für die Windatlas-Eingabe geeignete Messstationen in den Gebieten Norderney und Dithmarscher Bucht.

5 Verifikation der Windatlas-Ergebnisse

5.1 Vergleich mit Messdaten

Zum Vergleich der Windatlas-Ergebnisse mit Messergebnissen wurden Zeitreihen der oben genannten Messstationen als Eingabewerte für die Windatlas-Rechnungen verwendet. An Gitterpunkten des Windatlas in der Nähe der Messstationen wurden die Zeitreihen ausgegeben. Mit den berechneten Windfeldern erfolgte eine Verifikation mit gemittelten Messwerten. Für die folgenden statistischen Vergleiche wurden nur die Daten der Zeitreihen verwendet, die sowohl bei der Zeitreihe der Messstation des Eingabepunkts als auch des Zielpunkts vorlagen.

5.1.1 Norderney Gebiet

Bei allen Verifikationen im Norderney-Gebiet wurde der einheitliche Bezugszeitrahmen 1998 - 2004 verwendet. Abb. 5 zeigt einen Vergleich zwischen der in Borkum gemessenen Windgeschwindigkeits-Zeitreihe (Abszisse) und den mit dem Windatlas für Borkum berechneten Windgeschwindigkeiten (Ordinate). Dabei wurde bei den Windatlas-Rechnungen die Zeitreihe von Emden als Eingabewerte verwendet.

Für den Korrelationsplot wurden die Windgeschwindigkeiten jeweils in Klassen mit einer Breite von 1 m/s eingeteilt. Abb. 5 zeigt als Farbdarstellung, an wie vielen Zeitpunkten eine Messung in der Geschwindigkeitsklasse $i-1$ m/s und zugleich ein Windatlas-Ergebnis in der Klasse $j-1$ m/s vorliegt ($i, j=1, \dots, 30$). Dabei beträgt die Gesamtzahl der berücksichtigten Wertepaare 59341. Zusätzlich wurde dem Korrelationsplot eine Ausgleichsgerade durch alle Wertepaare beigefügt. An der Lage dieser Ausgleichsgerade und ihrer Steigung von 1.12 ist abzulesen, dass die in Borkum gemessenen Windgeschwindigkeiten im Mittel etwas kleiner sind als die mit dem Windatlas für Borkum berechneten. Die Mittelwerte der zwei Zeitreihen betragen jeweils 6.9 m/s, die Standardabweichung der gemessenen Zeitreihe 3.2 m/s und der berechneten Reihe 3.6 m/s. Der mittlere quadratische Fehler zwischen der berechneten und der gemessenen Zeitreihe beträgt 1.9 m/s und damit knapp 30 % des Mittelwerts.

Tabelle 3 zeigt einen Vergleich zwischen den Mittelwerten der Zeitreihen, die einerseits an einem Ort gemessen wurden (Windgeschwindigkeit Messung) und andererseits mit dem Windatlas für diesen Ort bestimmt wurden (Windgeschwindigkeit Windatlas). Dabei ist der für die Rechnungen verwendete Eingabepunkt in der ersten Spalte (Eingabepunkt Windatlas) und der Mess- und Zielpunkt der Windatlas-Rechnungen in der zweiten Spalte eingetragen. Der mittlere quadratische Fehler (m. q. F.) der berechneten Zeitreihe im Vergleich zur gemessenen Zeitreihe findet sich in der letzten Spalte.

Bei den ersten vier Vergleichen für Spiekeroog, Borkum und Emden weichen die Mittelwerte der mit dem Windatlas bestimmten Zeitreihen nur um max. 0.2 m/s von den gemessenen Mittelwerten ab. Dabei betragen die mittleren quadratischen Fehler zwischen 1.3 m/s und 1.9 m/s. Bei den Vergleichen für Borkum mit Eingabepunkt Norderney beträgt die Differenz zwischen den Mittelwerten zwar nur 0.3 m/s, der mittlere quadratische Fehler jedoch schon 2.0 m/s. Größere Abweichungen zwischen den Mittelwerten von 1.7 m/s treten bei den Windatlas-Rechnungen mit Zielpunkt Norderney auf. Betrachtet man zusätzlich den mittleren quadratischen Fehler von 2.6 m/s, so wird deutlich, dass Norderney wegen der starken Störung der Windmessungen durch die Umgebung als Eingabe- und Zielpunkt für die Windatlas-Rechnungen im Vergleich zu den anderen Stationen in Tabelle 2 am wenigsten geeignet ist.

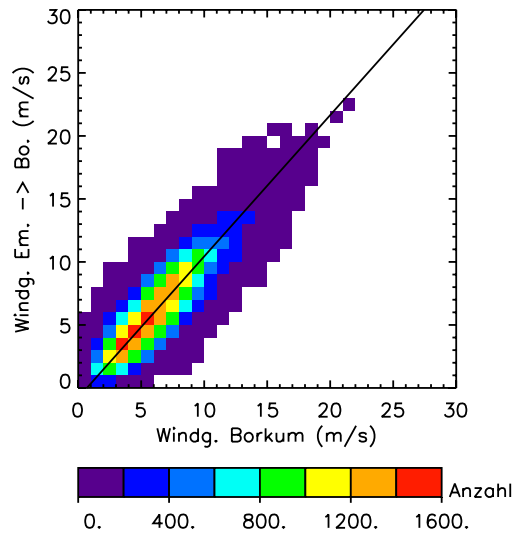


Abbildung 5: Korrelation der Zeitreihen der Windgeschwindigkeiten der Jahre 1998 - 2004, die in Borkum gemessen (Abszisse) und mit dem Windatlas für Borkum berechnet wurden (Ordinate). Dabei sind die Windgeschwindigkeiten in Klassen mit Breiten von je 1 m/s eingeteilt und ihre Anzahl farbig dargestellt. Eingabewerte für die Windatlas-Rechnungen sind die in Emden gemessenen Windgeschwindigkeiten. Die durchgezogene Linie zeigt die Ausgleichsgerade durch alle Wertepaare.

Eingangspkt. Windatlas	Messort u. Ziel Windatlas	mittlere Windgeschw. Messung (m/s)	mittlere Windgeschw. Windatlas (m/s)	m.q.F. (m/s)
Emden	Borkum	6.9	6.9	1.9
Borkum	Emden	4.6	4.6	1.3
Borkum	Spiekeroog	7.2	7.1	1.8
Spiekeroog	Borkum	6.9	7.1	1.8
Norderney	Borkum	7.2	6.9	2.0
Emden	Norderney	7.8	6.1	2.6

Tabelle 3: Vergleich von Windatlas-Ergebnissen mit Messergebnissen für Zeitreihen von 1998 - 2004 im Gebiet Norderney.

5.1.2 Dithmarscher Bucht Gebiet

Ein Vergleich, analog zu dem in Abb. 5, zwischen den Windatlas-Ergebnissen für Helgoland mit den Messungen in Helgoland für die Jahre 1990 - 1999 ist in Abb. 6 dargestellt. Dabei wurden bei den Windatlas-Rechnungen die gemessenen Windgeschwindigkeiten in Scharhörn als Eingabe-größen verwendet. Es wurden insges. 86027 Wertepaare berücksichtigt. Im Korrelationsplot ist zusätzlich die Ausgleichsgerade eingezeichnet, die eine Steigung von 0.99 besitzt und nahezu mit der Winkelhalbierenden übereinstimmt. Dies drückt sich auch im Vergleich der Mittelwerte der Zeitreihen aus: Die mit dem Windatlas berechnete Zeitreihe hat einen Mittelwert von 8.3 m/s und ist damit nur 0.1 m/s kleiner als der Mittelwert der gemessenen Zeitreihe von 8.4 m/s. Der mittlere quadratische Fehler zwischen der berechneten und der gemessenen Zeitreihe beträgt 1.9 m/s.

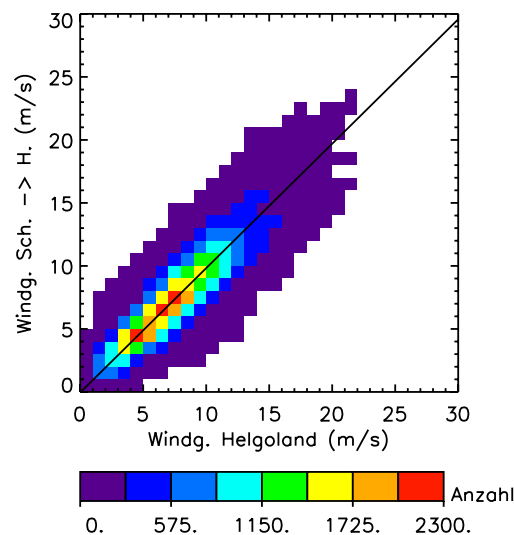


Abbildung 6: Korrelation der Zeitreihen der Windgeschwindigkeiten der Jahre 1990 - 1999, die in Helgoland gemessen (Abszisse) und mit dem Windatlas für Helgoland berechnet wurden (Ordinate). Dabei sind die Windgeschwindigkeiten in Klassen mit Breiten von je 1 m/s eingeteilt und ihre Anzahl farbig dargestellt. Eingabewerte für die Windatlas-Rechnungen sind die in Scharhörn gemessenen Windgeschwindigkeiten. Die durchgezogene Linie zeigt die Ausgleichsgerade durch alle Wertepaare.

Tabelle 4 zeigt in gleicher Weise wie Tabelle 3 den Vergleich für andere Stationen im Gebiet Dithmarscher Bucht. Dabei konnte jedoch kein einheitlicher Bezugszeitraum verwendet werden. Genau wie im letzten Vergleich in Tabelle 3 gibt es bei diesen Vergleichen Eingabepunkte und Zielpunkte, bei denen die Mittelwerte von gemessenen und berechneten Zeitreihen nur um 0.1 m/s abweichen. Bei der Kombination von Scharhörn und Büsum hingegen weichen die Mittelwerte um 0.8 m/s voneinander ab. Der mittlere quadratische Fehler beträgt jedoch

bei allen Vergleichen in Tabelle 4 zwischen 1.8 m/s und 2.1 m/s. Auf Grund der Topographie von Scharhörn und der Ergebnisse, die in früheren Projekten mit den Scharhörn-Daten erzielt wurden, ist die große Abweichung des Mittelwerts der Windatlas-Zeitreihe von der gemessenen Zeitreihe auf die Verwendung der Büsum-Daten zurückzuführen.

Eingangspkt. Windatlas	Messort u. Ziel Windatlas	mittlere Zeitraum	mittlere Windgeschw. Messung (m/s)	Windgeschw. Windatlas (m/s)	m.q.F. (m/s)
Scharhörn	Helgoland	90 - 99	8.4	8.3	1.9
Helgoland	Scharhörn	90 - 99	7.9	8.0	1.8
St. Peter-O.	Scharhörn	85 - 94	7.9	7.8	2.1
Scharhörn	St. Peter-O.	85 - 94	7.0	7.1	1.8
Büsum	Scharhörn	88 - 93	8.0	7.2	1.8
Scharhörn	Büsum	88 - 93	7.2	8.0	1.8

Tabelle 4: Vergleich von Windatlas-Ergebnissen mit Messergebnissen für Zeitreihen im Gebiet Dithmarscher Bucht.

Ergänzend wurde eine Verifikation der Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeiten durchgeführt. In Abb. 7 werden beispielhaft entsprechende Ergebnisse dargestellt. Gezeigt ist ein Vergleich der Verteilungen basierend auf den gemessenen Zeitreihen der Windgeschwindigkeit des Zeitraums 1987 bis 1992 von Scharhörn und Sankt Peter-Ording sowie auf den mit dem Windatlas berechneten Werten für Scharhörn. Als Startwerte für die Windatlas-Rechnungen wurde die gemessene Zeitreihe von Sankt Peter-Ording verwendet. An alle drei Häufigkeitsverteilungen wurden jeweils Weibull-Verteilungen angepasst und die Überschreitungswahrscheinlichkeiten für verschiedene Wiederkehrperioden bestimmt. Die Ausgleichsgeraden, die aus den in Sankt Peter-Ording und Scharhörn gemessenen Zeitreihen berechnet wurden, weichen in ihrer Steigung leicht voneinander ab. Dabei sind die Windgeschwindigkeiten in Scharhörn größer als in Sankt Peter-Ording. So beträgt die Wahrscheinlichkeit, in Sankt Peter-Ording Windgeschwindigkeiten größer 5 m/s zu messen, 67 % in Scharhörn jedoch 75 %. Die Ausgleichsgerade, die aus der mit dem Windatlas für Scharhörn berechneten Zeitreihe bestimmt wurde, liegt genau zwischen den zwei anderen Geraden. Hierbei beträgt die Überschreitungswahrscheinlichkeit für eine Windgeschwindigkeit größer 5 m/s rund 72 %

Die aus den drei Häufigkeitsverteilungen jeweils berechneten Schwellenwerte der Windgeschwindigkeit für die verschiedenen Wiederkehrperioden 1 pro Jahr, 1 pro 10 Jahre, 1 pro 20 Jahre, 1 pro 50 Jahre und 1 pro 100 Jahre sind in der Tabelle unten links in Abb. 7 aufgelistet. Die Schwellenwerte, die aus den mit dem Windatlas für Scharhörn bestimmten Zeitreihen berechnet wurden, liegen näher an den Werten der in Scharhörn gemessenen Zeitreihe als an der in Sankt Peter-Ording gemessenen Reihe. Somit lassen sich auch die statistischen Verteilungen der Windgeschwindigkeiten, die in Scharhörn gemessen wurden, mit dem Windatlas reproduzieren. Die Häufigkeitsverteilungen der berechneten Windgeschwindigkeiten stimmen mit denen der gemessenen gut überein.

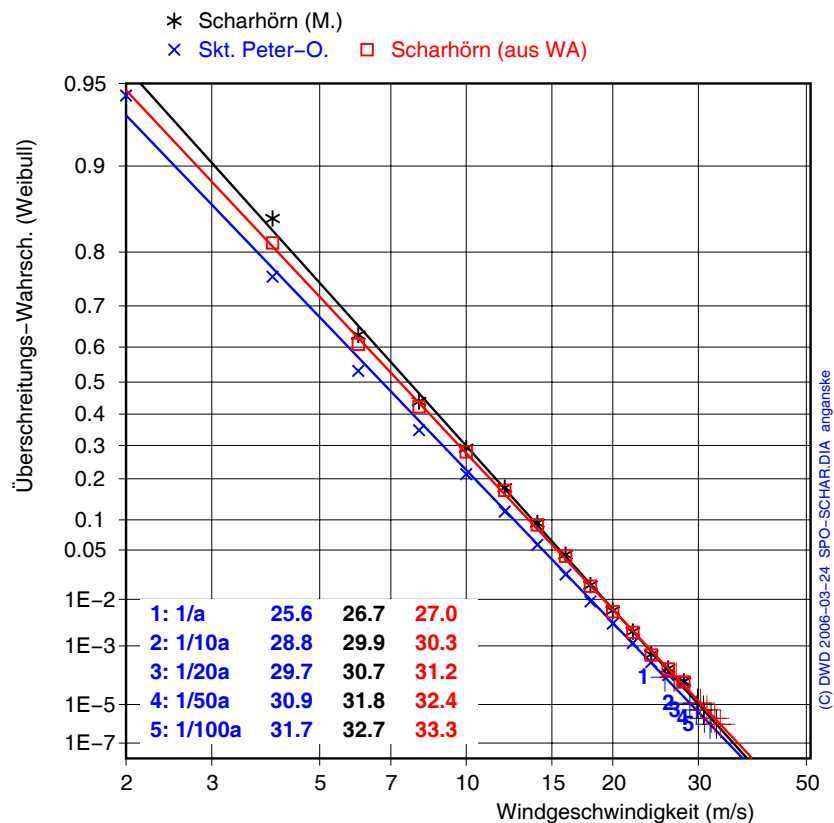


Abb. 7: Weibull-Verteilungen der Windgeschwindigkeit, berechnet aus Zeitreihen 1987 – 1992. Vergleich Sankt Peter-Ording Messwerte (blau) mit Scharhörn Messwerten (schwarz) und Scharhörn Windatlas-Rechnungen (rot).
Tabelle: Schwellenwerte der Windgeschwindigkeit für verschiedene Wiederkehrperioden.

5.2 Vergleich mit Modelldaten

Bei diesem Projekt wurden von den Projektpartnern neben den aus dem Windatlas interpolierten Feldern noch Windfelder von zwei weiteren Modellen verwendet:

- Windfelder aus dem HIPOCAS-Projekt, siehe Weiß et al. (2003)
- Windfelder aus dem PRISMA-Projekt, siehe Luthardt (1987)

Diese Modell-Windfelder unterscheiden sich durch die Berechnung und die Auflösung von 50 km (HIPOCAS) und 40 km (Prisma) von den mit dem Windatlas berechneten Feldern. Wieder wurde nur an einzelnen Punkten verglichen, wie genau die unterschiedlichen Modell-Windfelder die Messungen an diesen Orten wiedergeben. Dabei wurden wegen der geringen Auflösung bei den Windfeldern aus HIPOCAS und PRISMA die Werte an den nächstgelegenen 4 Gitterpunkten rund um den Messort linear auf die Koordinaten des Messorts interpoliert.

5.2.1 PRISMA-Daten

Abb. 8 zeigt für die Jahre 1997 - 2000 einen Vergleich der in Scharhörn gemessenen Windgeschwindigkeiten (Abszisse) mit den mit dem Windatlas für Scharhörn berechneten Windgeschwindigkeiten (Ordinate) und die berechnete Ausgleichsgerade. Die Gesamtzahl aller Wertepaare betrug 11516. Der Zeitraum war von unserem Projektpartner CORELAB, Uni Kiel vorgegeben, da mit diesen Daten weitere Rechnungen und daraus folgende Vergleiche mit Seegang- und Wasserstandsdaten durchgeführt werden sollten. Deshalb wurden entgegen der Feststellung des vorigen Abschnitts Daten von BÜsum als Eingabedaten verwendet, da die Zeitreihen der anderen Messstationen im Gebiet Dithmarscher Bucht in diesem Zeitraum große Lücken aufwiesen.

Wie die Abbildung verdeutlicht, liegt die Ausgleichsgerade mit einer Steigung von 1.0 auf der Winkelhalbierenden. Dabei beträgt der Mittelwert der gemessenen Zeitreihe 7.8 m/s, der der mit dem Windatlas berechneten Reihe 7.6 m/s. Der mittlere quadratische Fehler zwischen der berechneten und der gemessenen Zeitreihe beträgt 1.7 m/s.

Bild 9 zeigt für den gleichen Zeitraum den Vergleich zwischen den in Scharhörn gemessenen Windgeschwindigkeiten (Abszisse) und den mit PRISMA auf den Punkt Scharhörn interpolierten Werten der Windgeschwindigkeiten (Ordinate) sowie die Ausgleichsgerade. Hierbei liegt die Ausgleichsgerade mit einer Steigung von 0.95 leicht unterhalb der Winkelhalbierenden, was bedeutet, dass die mit PRISMA bestimmten Windgeschwindigkeiten insgesamt kleiner sind als die gemessenen. Dies bestätigt sich auch in den Mittelwerten, die für die gemessene Zeitreihe 7.8 m/s und der mit PRISMA bestimmten Zeitreihe 6.9 m/s betragen. Die Standardabweichungen der gemessenen Zeitreihe liegt bei 3.8 m/s, die der PRISMA-Reihe bei 3.6 m/s. Der mittlere quadratische Fehler im Vergleich zu den Messungen ist 1.7 m/s.

Vergleicht man die Ergebnisse für die Mittelwerte der Zeitreihen, die jeweils mit dem Windatlas und mit PRISMA bestimmt wurden, so kann man schliessen, dass die mit dem Windatlas berechneten Windgeschwindigkeiten am Punkt Scharhörn die Messwerte besser wiedergeben als die aus den PRISMA-Feldern bestimmten.

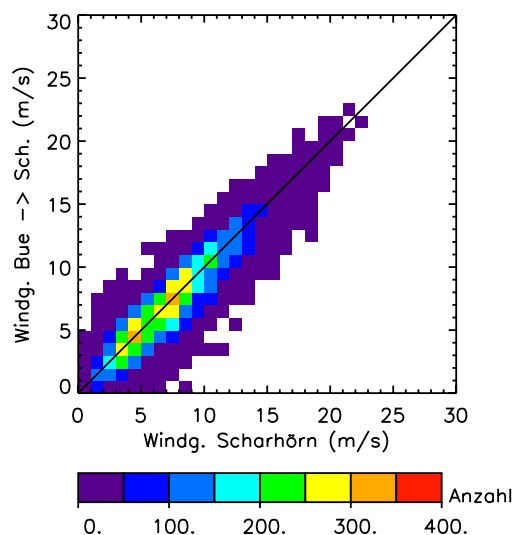


Abbildung 8: Korrelation der Zeitreihen der Windgeschwindigkeiten der Jahre 1997 - 2000, die in Scharhörn gemessen (Abszisse) und mit dem Windatlas für Scharhörn berechnet wurden (Ordinate). Dabei sind die Windgeschwindigkeiten in Klassen mit Breiten von je 1 m/s eingeteilt und ihre Anzahl farbig dargestellt. Eingabewerte für die Windatlas-Rechnungen sind die in Büsum gemessenen Windgeschwindigkeiten. Die durchgezogene Linie zeigt die Ausgleichsgerade durch alle Wertepaare.

5.2.2 HIPOCAS-Daten

Ein zum vorigen Abschnitt analoger Vergleich von HIPOCAS-Daten mit Messdaten ist in Abb. 10 für Helgoland dargestellt. Hierbei wurden Zeitreihen der Jahre 1990 - 1999 verwendet. Das Bild zeigt den Korrelationsplot zwischen den in Helgoland gemessenen Windgeschwindigkeiten (Abszisse) und den aus den HIPOCAS-Gitterpunkten interpolierten Windgeschwindigkeiten für Helgoland (Ordinate) sowie die Ausgleichsgerade, die mit einer Steigung von 0.97 leicht unterhalb der Winkelhalbierenden liegt. Dies lässt darauf schliessen, dass die mit HIPOCAS berechneten Windgeschwindigkeiten überwiegend kleiner sind als die gemessenen Windgeschwindigkeiten. Das findet sich auch in den berechneten Mittelwerten, die bei der gemessenen Zeitreihe 8.4 m/s und 7.9 m/s bei der mit HIPOCAS bestimmten Zeitreihe betragen. Die Standardabweichungen aus der gemessenen und aus der aus HIPOCAS abgeleiteten Zeitreihe stimmen mit 4.0 m/s und 3.9 m/s fast überein. Der mittlere quadratische Fehler zwischen der HIPOCAS- und der gemessenen Zeitreihe beträgt 2.6 m/s.

Vergleicht man diese Ergebnisse mit den Korrelationen aus Abb. 6 zwischen gemessenen Windgeschwindigkeiten und mit dem Windatlas berechneten Windgeschwindigkeiten, so weicht die HIPOCAS-Zeitreihe sowohl im Mittelwert mit 7.9 m/s stärker vom Wert der gemessenen Zeitreihe von 8.4 m/s ab als die Windatlas-Zeitreihe mit 8.3 m/s. Die mittleren quadratischen

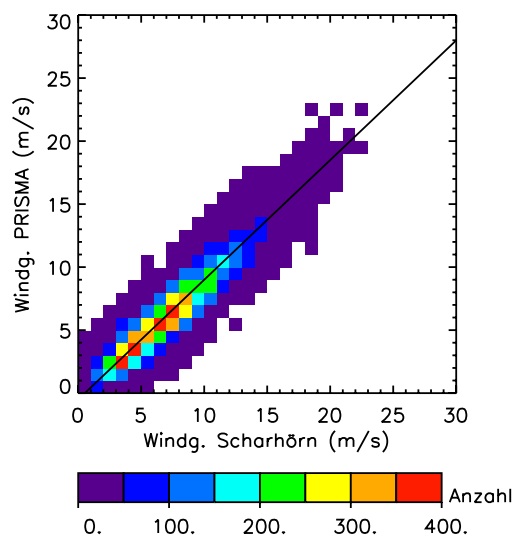


Abbildung 9: Korrelation der Zeitreihen der Windgeschwindigkeiten der Jahre 1997 - 2000, die in Scharhörn gemessen (Abszisse) und aus den PRISMA-Werten für Scharhörn berechnet wurden (Ordinate). Dabei sind die Windgeschwindigkeiten in Klassen mit Breiten von je 1 m/s eingeteilt und ihre Anzahl farbig dargestellt. Die durchgezogene Linie zeigt die Ausgleichsgerade durch alle Wertepaare.

Fehler sind bei HIPOCAS mit 2.6 m/s größer als beim Windatlas mit 1.9 m/s. Auch hier ergeben sich mit den Windatlas-Berechnungen genauere Ergebnisse.

Das in Küstennähe stark differenzierte Windfeld kann mit dem Windatlas und seiner hohen räumlichen Auflösung offenbar im Mittel genauer bestimmt werden, als aus den gröber aufgelösten Windfeldern von HIPOCAS und PRISMA.

5.3 Verwendung von PRISMA-Daten als Eingabedaten

Es soll gezeigt werden, welche Unterschiede sich in den Ergebnissen der Windatlas-Rechnungen ergeben, wenn man als Eingabedaten statt Messdaten PRISMA-Daten verwendet. Die Rechnungen wurden für die Jahre 1997 - 2000 im Gebiet Dithmarscher Bucht durchgeführt.

In diesem Gebiet gibt es auf See zwei PRISMA-Gitterpunkte, siehe Abb. 11. Dabei wurden die Zeitreihen an den zwei Gitterpunkten jeweils als Eingabedaten für die Windatlas-Rechnungen verwendet. Zielpunkt der Rechnungen war Scharhörn, da die Messungen von Scharhörn nicht in die Berechnungen der PRISMA-Felder eingehen. Der Vergleich wurde mit Windatlas-Rechnungen durchgeführt, bei denen als Eingabedaten die in BÜsum gemessene Zeitreihe verwendet wurde. Die Mittelwerte der drei berechneten Zeitreihen und der in Scharhörn gemessenen Zeitreihe findet man in Tabelle 5.

Die Mittelwerte der Zeitreihen, die mit dem Windatlas und den PRISMA-Werten berech-

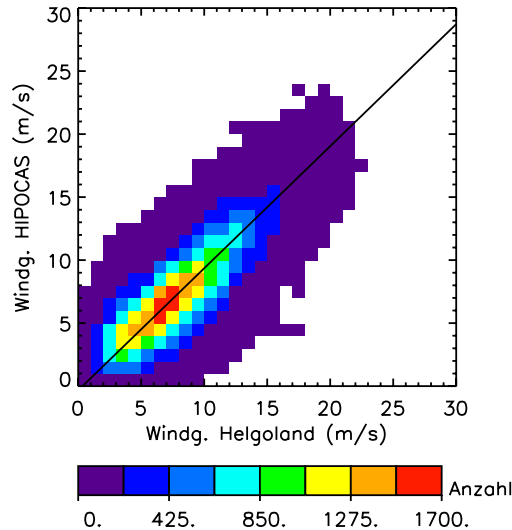


Abbildung 10: Korrelation der Zeitreihen der Windgeschwindigkeiten der Jahre 1990 - 1999, die in Helgoland gemessen (Abszisse) und aus den HIPOCAS-Werten für Helgoland berechnet wurden (Ordinate). Dabei sind die Windgeschwindigkeiten in Klassen mit Breiten von je 1 m/s eingeteilt und ihre Anzahl farbig dargestellt. Die durchgezogene Linie zeigt die Ausgleichsgerade durch alle Wertepaare.

net wurden, weichen um 0.9 m/s bzw. um 1.0 m/s vom Mittelwert der gemessenen Zeitreihe ab. Verwendet man für die Windatlas-Rechnungen hingegen die Messungen von Büsum als Eingabewerte, so weicht der Mittelwert dieser Zeitreihe nur um 0.2 m/s ab. Bei allen drei Windatlas-Rechnungen sind die mittleren quadratischen Fehler im Vergleich zur gemessenen Zeitreihe fast gleich. Da jedoch die Mittelwerte der mit PRISMA-Werten durchgeführten Windatlas-Rechnungen stärker von der Messreihe abweichen als bei den Rechnungen mit den Büsum-Messdaten, ist für zukünftige Rechnungen mit dem Windatlas eine gemessenen Zeitreihe als Eingabegröße vorzuziehen.

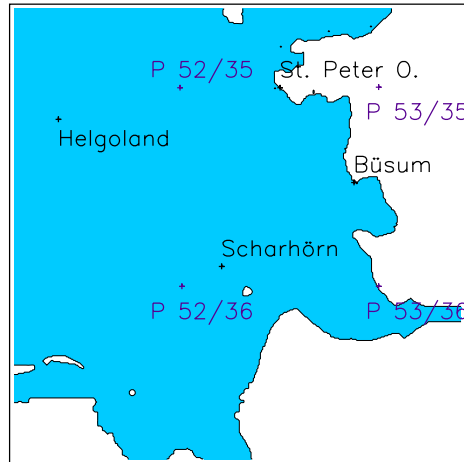


Abbildung 11: Gebiet Dithmarscher Bucht mit Lage der Messstationen und der PRISMA-Gitterpunkte.

Windgeschwindigkeit	Messung	Eingangsort der Windatlas-Rechnungen		
		Büsum	P 52/35.	P 52/36
Mittelwert(m/s)	7.8	7.6	6.8	6.9
Standardabw. (m/s)	3.8	3.8	3.6	3.6
mittl. q. Fehler (m/s)		1.7	1.8	1.7

Tabelle 5: Vergleich von Windatlas-Ergebnissen für Scharhörn mit Messergebnissen. Eingabewerte für die Windatlas-Rechnungen waren die in Büsum gemessene Zeitreihe und die PRISMA-Werte an den zwei Gitterpunkten 52/35 und 52/36. Der mittlere quadratische Fehler bezieht sich auf die Zeitreihe der gemessenen Windgeschwindigkeiten.

5.4 Fallstudie: Die Sturmflut von 1976

Mit dieser Fallstudie soll untersucht werden, ob der Windatlas auch für kürzere Zeitreihen von Windgeschwindigkeiten geeignet ist. Zu diesem Zweck wurde beispielhaft die Sturmflut von 1976 im Gebiet Dithmarscher Bucht ausgewählt.

5.4.1 Die Wetterlage vom 30.12.1975 bis 4.1.1976

Am 30.12. verlagerte sich ein Orkantief von Island nach Nord-Norwegen. Im Laufe des 31.12. überquerte das dazugehörige Frontensystem mit Windgeschwindigkeiten bis zu Stärke 7 Bft. die Deutsche Bucht. Auf der Rückseite setzte sich sehr schnell der Einfluss eines Zwischenhochs durch, dem am 2.1.76 nach einer kleineren Störung ein schwacher Hochdruckkeil folgte. In der Nacht zum 3.1. überquerte die südliche Nordsee das Frontensystem eines Orkantiefs mit Zentrum über der mittleren Nordsee und einem Kerndruck von 970 hPa. Auf der Rückseite dieser Zyklone führten Windgeschwindigkeiten aus westlichen Richtungen zu einer schweren Sturmflut. Erst zum 4.1. erfolgte eine deutliche Abnahme der Windgeschwindigkeit bei einer Drehung auf südwestliche Windrichtungen.

5.4.2 Vergleich zwischen gemessenen und mit dem Windatlas bestimmten Windgeschwindigkeiten

Zum Vergleich von gemessenen und interpolierten Windgeschwindigkeiten wurden die Messungen der Stationen Helgoland und Scharhörn verwendet. Die Bestimmung der Windwerte mit dem Windatlas erfolgte mit den gemessenen Werten in Helgoland als Eingangsgrößen, von denen auf einen Gitterpunkt nahe Scharhörn gerechnet wurde. Ein Vergleich zwischen den in Helgoland und in Scharhörn gemessenen sowie mit den mit dem Windatlas für Scharhörn berechneten Windgeschwindigkeiten zeigt Abb. 12.

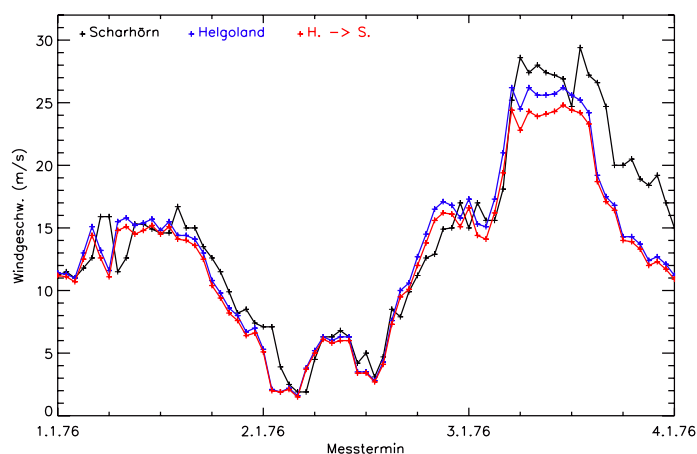


Abbildung 12: Vergleich der in Helgoland (blau) und der in Scharhörn (schwarz) gemessenen Stundenmittel der Windgeschwindigkeit zwischen dem 1.1.1976 0 MEZ und dem 4.1.1976 0 MEZ. Zusätzlich eingezeichnet sind die Ergebnisse aus den Windatlas-Rechnungen für den Gitterpunkt Scharhörn (rot).

Zwischen dem 1.1.76 0 MEZ und dem 3.1.76 0 MEZ waren die in Helgoland und Scharhörn gemessenen Stundenmittel der Windgeschwindigkeiten annähernd gleich. Zwischen dem 3.1. 0 MEZ und 11 MEZ stiegen die Kurven der gemessenen Windgeschwindigkeiten qualitativ gleich an, in Scharhörn wurden jedoch um 2-3 m/s höhere Windgeschwindigkeiten erreicht als in Helgoland. Ab 12 MEZ begann in Helgoland eine stetige Abnahme der Windgeschwindigkeit, so dass am 4.1. um 0 MEZ die Windgeschwindigkeit nur noch rund 11 m/s betrug. Im Vergleich dazu begann der Abfall der Windgeschwindigkeit in Scharhörn erst 2 Stunden später und verlief in den folgenden 9 Stunden langsamer als in Helgoland. Dadurch ergaben sich am 3.1. 15 MEZ Unterschiede in der Windgeschwindigkeit von rund 8 m/s und am 4.1. 0 MEZ von rund 4 m/s. Das lokale Minimum der Windgeschwindigkeit wurde in Scharhörn 2 Stunden später als das Minimum in Helgoland erreicht.

Aus der Beschreibung der Wetterlage wird deutlich, dass der das Windfeld bestimmende Druckgradient in diesem Zeitraum nicht homogen über dem ganzen Gebiet war, so dass sich Unterschiede im Wind zwischen Helgoland und Scharhörn einstellten. Bei der Interpretation der Windatlas-Ergebnisse muss man berücksichtigen, dass dies nicht in die Berechnungen der interpolierten Windfelder eingeht. Die mit dem Windatlas aus den Messungen in Helgoland berechneten Zeitreihen der Windgeschwindigkeiten folgen den Messwerten von Helgoland. Da die Phasenverschiebungen zwischen den Windgeschwindigkeiten von Scharhörn und Helgoland so nicht berücksichtigt werden können, erklärt sich die Phasenverschiebung zwischen den gemessenen und den berechneten Werten in Scharhörn. Am 3.1. 15 MEZ beträgt die Differenz zwischen gemessener und berechneter Windgeschwindigkeit 7.9 m/s. Die mittlere quadratische Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Werten beträgt über den gesamten Untersuchungszeitraum 3.0 m/s.

Dieses Beispiel zeigt, dass es mit dem Windatlas nicht ohne weiteres möglich ist, Einzelereignisse mit befriedigender Genauigkeit nachzurechnen. Der Windatlas ist offensichtlich nur für statistische Untersuchungen mit längeren Bezugsreihen, im Allgemeinen nicht für Untersuchungen kürzerer Zeiträume geeignet.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen des KFKI-Projekts MOSES wurde ein digitaler Windatlas für deutsche Küstenseegebiere der Nordsee erstellt. Dieser liefert für die Projektpartner hochaufgelöste Windfelder als Antrieb für statistische Untersuchungen mit Seegangs- und Strömungsmodellen. Dafür wurden mit dem Windmodell MKW Windfelder für das Gebiet Südliche Nordsee und für die Teilgebiete Norderney und Dithmarscher Bucht bestimmt. Die Windfelder im Gebiet Südliche Nordsee wurden berechnet auf einem Gitter mit einer Maschenweite von 1000 m. Sie dienen im Wesentlichen als Randfelder zur Berechnung der genesteten Felder Dithmarscher Bucht und Norderney, die Maschenweiten von 250 m besitzen.

Die einzelnen Felder des Windatlas werden durch Windgeschwindigkeit und Windrichtung am Modelloberrand und einem repräsentativen Wasserstand bestimmt, wobei jeder der drei Parameter innerhalb eines vorgegebenen Wertebereichs mit einer festen Schrittweite gewählt wurde.

Für die Berechnung des Windatlas wurde die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe zwischen 10 m/s und 35 m/s mit einer Klassenbreite von 5 m/s variiert. Bei diesen Windgeschwindigkeiten kann man davon ausgehen, dass die untere Atmosphäre gut durchmischt und damit thermisch neutral geschichtet ist und dass die Bedingungen zur Berechnung der Seerauigkeit erfüllt sind.

Der Wertebereich der Windrichtung hängt vom Wasserstand ab. Um Rechenzeit zu sparen, wurden bei Wasserständen höher als 3 m über NN Windfelder nur für diejenigen Windrichtungen bestimmt, bei denen diese Wasserstände in der Vergangenheit in der Nordsee beobachtet wurden. Die Klassenbreite der Windrichtung wurde in Übereinstimmung mit der 16-teiligen Windrose auf 22.5° festgelegt.

Der Wertebereich des Wasserstands wird anhand der seit 1900 beobachteten maximalen Wasserstandswerte in der Deutschen Bucht und von Kontrollrechnungen von 3.0 m unter NN bis 4.5 m über NN festgelegt. Testrechnungen haben gezeigt, dass bei Erhöhung des Wasserstands um jeweils 1.5 m Differenzen in der Windgeschwindigkeit von etwa 2 m/s auftreten. Da diese Differenzen aber nur in räumlich eng begrenzten Gebieten mit sehr geringen Wassertiefen auftraten, ist beim Wasserstand eine Klassenbreite von 1.5 m im Rahmen der Genauigkeit der berechneten Windfelder vertretbar. Mit den gewählten Klassenbreiten und Wertebereichen setzt sich der Windatlas aus je 534 Windfeldern in den 3 Gebieten zusammen.

Zur Verifikation des Windatlas wurden für einzelne Messstationen die nächstgelegenen Gitterpunkte ermittelt und ein Vergleich der mit dem Windatlas berechneten Windgeschwindigkeiten mit den Messwerten durchgeführt. Als Eingabedaten für die Verifikation wurden sowohl langjährige Zeitreihen von Messungen als auch Hindcast Ergebnisse von den Projekten HIPOCAS und PRISMA verwendet. Dabei wurden sowohl Statistiken über mehrere Jahre als auch Zeitreihen ausgewählter Ereignisse verglichen. Beim Vergleich langjähriger Statistiken ergaben sich unabhängig von der Datenquelle gute Übereinstimmungen. Dabei wurden jedoch die besten Ergebnisse erzielt, wenn man als Eingabewerte für den Windatlas Messreihen von ausgewählten Stationen verwendete.

Der Vergleich von Windatlas-Rechnungen mit Messergebnissen für das Einzelereignis Sturmflut 76 hat gezeigt, dass es nicht ohne weiteres möglich ist, kurzzeitige Ereignisse mit befriedigender Genauigkeit nachzurechnen. So ergaben sich im Untersuchungszeitraum Abweichungen der für Scharhörn mit dem Windatlas bestimmten Windgeschwindigkeit von der dort gemessenen Windgeschwindigkeit von bis zu 8 m/s. Die mittlere quadratische Abweichung der berechneten Zeitreihe von der gemessenen Zeitreihe war mit 3 m/s deutlich höher als die bei den statisti-

schen Untersuchungen über längere Zeiträume bestimmten Fehler. Bei dem hier vorgestellten Einzelereignis lag dies daran, dass im Untersuchungszeitraum ein Sturmtief über die Nordsee zog und der Gradient des Luftdrucks über dem Untersuchungsgebiet nicht homogen war. Dies ist aber eine Grundvoraussetzung bei der Berechnung der Windfelder mit dem MKW.

Neben der Nutzung im Projekt MOSES kann der Windatlas aber auch für alle Anwendungen eingesetzt werden, bei denen über längere Untersuchungszeiträume hochaufgelöste Windfelder über See benötigt werden. Der Windatlas wird über die Datenbank NOKIS allen interessierten Anwendern zur Verfügung gestellt. Aus den Feldern des Windatlas lässt sich jedes gewünschte Windfeld mit genügender Genauigkeit für Anwendungen der Küstenforschung interpolieren. Somit lassen sich auch aus ganzen Zeitreihen von Windgeschwindigkeiten, die z.B. an einem bestimmten Ort gemessen wurden oder aus Hindcast-Modellen stammen, die zugehörigen Windfelder für jeden Zeitpunkt berechnen. Diese Windfelder bieten für die Zwecke des Küsteningenieurwesens als meteorologischer Antrieb für Tide- und Seegangmodelle vielfältige Möglichkeiten, z.B. zur Abschätzung von Eintrittshäufigkeiten kennzeichnender Seegangparameter im Küstengebiet, für Rückschlüsse auf die Dauerbelastung von Küstenbauwerken und zur Rekonstruktion des Seegangs früherer Sturmfluten.

7 Danksagung

Wir danken der Hamburg Port Authority für die Überlassung der Messdaten von Scharhörn und dem BSH für die Bereitstellung von Pegel- und Stautabellen. Weiter danken wir Herrn Schrader vom BSH, der uns bei der Abschätzung der maximalen und minimalen Wasserstände geholfen hat.

8 Anhang

Das Gleichgewicht zwischen Wind- und Wellenfeld lässt sich aus dem folgenden iterativen Prozess bestimmen. Man geht aus von einer modifizierten Charnock-Formel (Charnock, 1955):

$$z_0 = A_c \frac{u_*^2}{g} \quad . \quad (2)$$

Dabei ist u_* die sogenannte Schubspannungsgeschwindigkeit, die mit der Windgeschwindigkeit u in der Höhe z und der Rauigkeitslänge folgendermaßen zusammenhängt:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad \text{mit} \quad \kappa = 0.4 \quad . \quad (3)$$

Hier ist κ die Karman-Konstante, g die Gravitationskonstante und A_c wird in der Arbeit von Charnock als Konstante mit Werten zwischen 0.011 und 0.015 für Rauigkeitsberechnungen auf hoher See angegeben, Wu (1982) hingegen ermittelte dafür den Wert 0.0185.

Im MKW wird A_c nicht als Konstante verwendet, sondern aus der Formulierung von Alstrup und Larsen (1999) mit Hilfe des sogenannten Wellenalters c/u_* (Verhältnis der Phasengeschwindigkeit c des Wellenfeldes zur Schubspannungsgeschwindigkeit u_*) bestimmt:

$$A_c = 1.89 \left(\frac{u_*}{c} \right)^{1.59} \left[1.0 + 47.165 \left(\frac{u_*}{c} \right)^{2.59} + 11.791 \left(\frac{u_*}{c} \right)^{4.59} \right]^{-1} \quad . \quad (4)$$

Diese Formel verbindet approximativ die Ansätze von Johnson et al. (1998) für kleine Werte von u_*/c und von Toba et al. (1990) für große Werte. Der Wert von A_c ist nach unten durch den Wert von Wu (1982) $A_c = 0.0185$ begrenzt.

Das Wellenalter wird nach den Ergebnissen des JONSWAP-Experiments (Hasselmann et al., 1973) aus dem Fetch x bestimmt:

$$\left(\frac{u_*}{c} \right) = \frac{3.5}{2\pi} \left(\frac{u_{10}^2}{xg} \right)^{\frac{1}{3}} \quad . \quad (5)$$

Dabei ist u_{10} die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe und x ist der Fetch (Windwirklänge), der im MKW festgelegt ist als die von einem Punkt auf dem Wasser entgegen der Windrichtung gemessene Distanz zum nächstgelegenen Landpunkt.

Schließlich wird noch die Tatsache berücksichtigt, dass die Wassertiefe im Untersuchungsgebiet zumindest für hohe und sehr hohe Windgeschwindigkeiten in einigen Gebieten nicht zur vollen Ausreifung des Seegangs wie im Tiefwasser ausreicht. Es wird sich daher meist um tiefenbegrenzten Seegang handeln. Im "Shore Protection Manual" (1984) ist eine Formulierung angegeben, die die Wellenhöhe für derartige Verhältnisse als Funktion der Windgeschwindigkeit, des Fetch x und der Wassertiefe D angibt. Dabei ist ein Grenzwert für den maximalen Fetch x_m in Form eines dimensionslosen Fetch X^* angegeben

$$X^* = \frac{gx_m}{u_A^2} \quad , \quad (6)$$

ab der bei einer dimensionslosen Wassertiefe D^* die Wellenhöhe einen Maximalwert erreicht. Aus dem in der Arbeit gezeigten zugehörigen Nomogramm wurde eine approximative Beziehung zwischen X^* und D^* für diesen Maximalwert ermittelt:

$$\ln(X^*) = 1.5 (\ln(D^*) + 5.8) + 3.0 \quad (7)$$

mit

$$D^* = \frac{gD}{u_A^2} \quad . \quad (8)$$

Dabei ist u_A laut Shore Protection Manual die sogenannte “adjusted wind speed“. Sie berechnet sich aus der Windgeschwindigkeit u_{10} in 10 m Höhe mit

$$u_A = 0.71(u_{10})^{1.23} \quad . \quad (9)$$

Durch die Verwendung von u_A anstelle von u_{10} soll die nichtlineare Wirkung der Schubspannung berücksichtigt werden. In diese empirische Beziehung müssen die Geschwindigkeiten in m/s eingesetzt werden.

Der maximale Fetch x_m , ab den die Flachwellen aufgrund der Tiefenbegrenzung nicht weiter wachsen können, ist mit der Wassertiefe D und der Windgeschwindigkeit u_{10} bzw. u_A aus den Gleichungen (7), (6) und (8) berechenbar. Eine merkliche Abweichung der Wellenentwicklung von den Tiefwasserverhältnissen beginnt aber wesentlich früher, bei etwa

$$x_d = 0.1x_m \quad . \quad (10)$$

Danach erfolgt nur noch eine langsame Annäherung an die maximal mögliche Wellenhöhe in begrenzter Wassertiefe. x_d wird als obere Grenze für den Fetch angenommen, um diesem Effekt zu berücksichtigen.

Insgesamt erhält man aus den Gleichungen (3) - (10) ein Gleichungssystem, das man iterativ lösen und damit z_0 für jeden Gitterpunkt über See bestimmen kann. Dabei wurden die Wechselwirkungen zwischen Wellenfeld und Windgeschwindigkeit stark vereinfacht. So wurde z.B. nicht berücksichtigt, dass der Seegang im Küstengebiet der südlichen Nordsee insbesondere im Bereich der Watten nicht rein durch den Windantrieb erfolgt, sondern durch lokale Windwirkungen modifiziert und verstärkt wird, siehe z. B. Niemeier (1983) sowie Niemeier et al. (1995).

9 Literatur

- P. Alstrup und S.E. Larsen, 1999:** WasP Engineering- Flow model for wind over land and sea. Risö report, Risö-R-1107(EN).
- BSH, 2004:** Gezeitenkalender. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.
- H. Charnock, 1955:** Wind stress over a water surface. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 81, pp. 639 - 640.
- C. Füg und H. Schmidt, 2001:** Windantrieb für Küstenseegang. Abschlußbericht zu dem meteorologischen Teilprojekt im KFKI-Forschungsvorhaben "Bemessungsseegang für Küstenschutzwerke und Randdünen. Deutscher Wetterdienst, Hamburg.
- A. Ganske, G. Rosenhagen, H. Schmidt, 2005:** Windatlas für Deutsche Küstenseegebiere der Nordsee. In: H. Niemeier, 2005: Modellierung des mittelfristigen Seegangsklimas im deutschen Nordseeküstengebiet (MOSES) - Statusbericht 2005, Anlage I, KFKI-Bericht.
- K. Hasselmann et al., 1973:** Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Reihe A, Nr. 12.
- H.K. Johnson, J. Højstrup, H.J. Vested und S.E. Larsen, 1998:** On the dependence of sea surface roughness on wind waves. J. Phys.Oceanogr. 28, pp. 1702 - 1716.
- H. Luthardt, 1987:** Analyse der wassernahen Druck- und Windfelder über der Nordsee aus Routinebeobachtungen. Dissertation, Universität Hamburg. Hamburger Geophys. Einzelschriften, Reihe A, Heft 83.
- H.D. Niemeier, 1983:** Über den Seegang an einer inselgeschützten Wattküste. BMFT-Forschungsbericht MF 0203.
- H.D. Niemeier et al., 1995:** Naturuntersuchungen von Wattseegang an der deutschen Nordseeküste. Ber. Forschungsstelle Küste, Bd. 40.
- H. Schmidt und J. Pätsch, 1992:** Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen. Die Küste, Heft 54.
- H. Schmidt, H. Günther und R. Strüfing, 1994:** Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Bühnen-Deckswerk-Systemen. Teibereich Meteorologie. Abschlussbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben MTK 0545 A, Deutscher Wetterdienst, Hamburg.
- C.A. Sherman, 1976:** A Mass-Consistent Model for Windfields over Complex Terrain. Lawrence Livermore Laboratory Report UCRL-76171, Rev. 1.
- Shore Protection Manual, 1984:** 4. Ausgabe, Vol. 1, Department of the Army, US Army corps of engineers, Washington DC.
- Y. Toba, N. Iida, H. Kawamura, N. Ebuchi and I.S.F. Jones, 1990:** Wave dependence of sea surface wind stress. J. Phys. Oceanogr. 20, pp. 705 - 721.

- R.M. Traci, G.T. Phillips und P.C. Patniak, 1978:** Wind Energy Site Methodology Development. RLO/2440-78-2.
- R. Weiß, F. Feser and H. Günther, 2003:** Wind- und Seegangsklimatologie 1958 - 2001 für die südliche Nordsee basierend auf Modellrechnungen. GKSS 2003/10.
- J. Wu, 1982:** Wind stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane. J. Geophys. Res. 87, pp. 9704 - 9706.

10 Liste der verwendeten Symbole

A_c : Charnock-Konstante, hier eine Funktion

c : Phasengeschwindigkeit des Wellenfeldes

D : Wassertiefe

D^* : dimensionslose Wassertiefe

g : Gravitationskonstante

h : Wasserstand

κ : Karman-Konstante

u_A : adjusted windspeed

u_{10} : Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe

$u(z)$: Windgeschwindigkeit in der Höhe z

u_M : Windgeschwindigkeit am Modelloberrand (800 m Höhe)

u_* : Schubspannungsgeschwindigkeit

x : Fetch (Windwirklänge)

X^* : dimensionsloser Fetch

X_d : obere Grenze für maximal wirksamen Fetch bei geringen Wassertiefen

x_m : maximal wirksamer Fetch bei geringen Wassertiefen

z_0 : Rauigkeitslänge

z_1, z_2 : Höhen