

Ein Windatlas für die deutsche Ostseeküste

Von ANETTE GANSKE, GUDRUN ROSENHAGEN und HEINER SCHMIDT

Z u s a m m e n f a s s u n g

Für das Projekt MUSTOK wurden für lange Zeitabschnitte räumlich hoch aufgelöste Windfelder in See- und in Küstengebieten benötigt. Um diese bereitzustellen, wurde je ein Windatlas für die Gebiete Westliche Ostsee, Kiel, Mecklenburger Bucht, Warnemünde, Rügen und Pommersche Bucht erstellt.

Ein Windatlas besteht aus einer Vielzahl von berechneten Feldern der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Grund bzw. NN, die mit einem massenkonsistenten Windmodell bestimmt wurden. Die Berechnung dieser Windfelder erfolgte durch systematische Variation der antreibenden Windgeschwindigkeit und der Windrichtung am Modelloberrand in 800 m Höhe unter Berücksichtigung der Land-/Meerverteilung und der zugehörigen Bodenrauigkeit für repräsentative Wasserstände. Bei der Anwendung dieses Windatlases gibt man für eine frei wählbare Position in einem der sechs Windatlas-Gebiete als Eingangsgrößen Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung in 10 m Höhe und einen zugehörigen repräsentativen Wasserstand vor. Ein Interpolationsprogramm berechnet aus diesen Eingangswerten für das gewählte Untersuchungsgebiet das zugehörige meteorologisch konsistente Windfeld.

Zur Verifikation der Windatlas-Ergebnisse mit Messergebnissen wurden Zeitreihen von Messstationen als Eingabewerte für die Windatlas-Rechnungen verwendet und die Ergebnisse an ausgewählten Punkten der Windfelder mit Zeitreihen nahegelegener Messstationen verglichen.

S c h l a g w ö r t e r

Windfelder, Windgeschwindigkeiten, Windmessungen, Zeitreihen, Ostsee

S u m m a r y

For the project MUSTOK highly spatial resolved wind fields over long periods are needed over sea and in coastal areas. These wind fields were calculated with wind-atlases for the areas Western Baltic Sea, Kiel, Mecklenburg Bight, Warnemünde, Rügen and Pommern Bight.

A wind-atlas is composed of a variety of calculated wind fields for heights of 10 m above ground or NN, which are calculated with a mass consistent wind model. These wind fields are calculated by systematic variations of the driving wind speed and wind direction at top of the model at a height of 800 m, under consideration of the land-sea-distribution and the corresponding roughness for representative water levels.

For the application of the wind-atlas, hourly means of wind speed and wind direction at a height of 10 m for an arbitrary position in one of the six wind-atlas regions and a corresponding representative water level have to be provided as input data. With these values an interpolation program calculates the appropriate and meteorologically consistent wind field.

For the verification of wind-atlas results, time series of measured wind speeds are used as input values for the wind-atlas calculations. The results at chosen points of the calculated wind fields are then compared to the time series of nearby measuring stations.

K e y w o r d s

Wind field, wind velocity, wind data, time series, Baltic Sea

I n h a l t

1. Einführung	38
2. Berechnung von Windfeldern	39
3. Windatlas-Berechnung	39
4. Windatlas-Anwendung	41
4.1 Wahl der Eingabewerte	43
4.2 Verifikation der Windatlas-Ergebnisse	44
4.2.1 Gebiet Kiel	44
4.2.2 Gebiet Warnemünde	46
5. Zusammenfassung	48
6. Danksagung	49
7. Schriftenverzeichnis	49

1. E i n f ü h r u n g

Für viele Untersuchungen im Bereich des Küsteningenieurwesens und des Küstenschutzes werden für Zeitabschnitte von mehreren Jahren räumlich hoch aufgelöste Windfelder für See- und Küstengebiete benötigt. Derartige Windfelder liegen bisher jedoch meist nur in einer groben Auflösung vor, wie z.B. die Windfelder des Wettervorhersagemodells COSMO-EU des Deutschen Wetterdienstes (Auflösung rund 7 km, siehe DOMS u. SCHÄTTLER, 1999) oder die des HIPOCAS-Projekts (Auflösung ca. 50 km, siehe WEISS et al., 2003).

Die erforderlichen Reihen müssen deshalb speziell berechnet werden. Hierzu bietet sich das sogenannte Windatlasverfahren an. Solche Windatlanten für die Ostsee wurden bereits für die Region um Darss und Zingst von HINNEBURG, RAABE u. TETZLAFF (1997) und für den Greifswalder Bodden von RUDOLPH u. GAYER (1995) bestimmt. Da diese Windatlanten jedoch nur einen kleinen Teil der für das Projekt MUSTOK relevanten Untersuchungsgebiete abdecken, war die Berechnung eines neuen, bedarfsgerechten Windatlas erforderlich.

Im Bereich der deutschen Küsten sind die örtlichen Unterschiede im Wind im Wesentlichen durch die unterschiedlichen Rauigkeitsverhältnisse von Land- und Meeresoberfläche bestimmt. Deshalb reicht zur Berechnung der Windfelder das Windmodell MKW (Massenkonsistentes Windmodell) des Seewetteramts Hamburg aus, bei dem es sich um ein einfaches, diagnostisches Atmosphärenmodell handelt. Dieses hat sich bereits bei ähnlichen Problemstellungen in verschiedenen Untersuchungen bewährt, siehe z.B. (GANSKE, ROSENHAGEN u. SCHMIDT, 2006) oder (SCHMIDT u. 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-/Meerverteilung sowie der zugehörigen Bodenrauigkeit für repräsentative Wasserstände berechnet wurden. Dabei wurde die mit der Windgeschwindigkeit wachsende Rauigkeit der Meeresoberfläche approximativ aus einem Gleichgewicht zwischen dem Windfeld und dem Rauigkeitsfeld bestimmt, während die Rauigkeit der Landoberflächen als zeitlich konstant angenommen werden kann.

Bei der Anwendung des Windatlases gibt man für eine frei wählbare Position in einem der drei Windatlas-Gebiete als Eingangsgrößen Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung in 10 m Höhe und einen zugehörigen repräsentativen Wasserstand vor. Ein Interpolationsprogramm berechnet aus diesen Eingangswerten für das gewählte Untersuchungsgebiet das zugehörige meteorologisch konsistente Windfeld.

In den folgenden Kapiteln wird zunächst kurz das Windmodell MKW erläutert. Danach wird ein Überblick gegeben über die Wertebereiche und Klassenbreiten, die zur Berechnung der Felder des Windatlasses verwendet wurden, um mit genügender Genauigkeit die für Seegangs- und Strömungsberechnungen benötigten Windfelder interpolieren zu können. Es folgt für zwei der fünf Teilgebiete ein statistischer Vergleich zwischen Windatlas-Ergebnissen und Messungen.

2. Berechnung von Windfeldern

Alle Felder der Windgeschwindigkeit wurden mit dem Windmodell MKW (Massenkonsistentes Windmodell) bestimmt. Das statische (nicht zeitabhängige) Modell wurde aus dem NOAA Atmospheric Boundary Layer Model (NOABL: SHERMAN, 1976 u. TRACI, 1978) vom DWD weiterentwickelt und bereits in mehreren Projekten erfolgreich verwendet, um Windfelder in Küstennähe zu berechnen, siehe (GANSKE, ROSENHAGEN u. SCHMIDT, 2006), (SCHMIDT et al., 1994), (SCHMIDT u. PÄTSCH, 1992), sowie (FÜG u. SCHMIDT, 2001).

Das Windmodell MKW besteht aus zwei Teilen, wobei im ersten ein sogenanntes Initial-Windfeld berechnet wird, das im 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.

Beim Initialisierungsverfahren wird für jeden Gitterpunkt ein logarithmisches Windprofil bestimmt. Dazu werden Topographie und Oberflächenrauigkeit vorgegeben, wobei die Topographiedaten aus dem IOW-Datensatz (SEIFERT et al. 2001) interpoliert wurden. Die Rauigkeitslänge wurden über Land für jeden Gitterpunkt anhand der GLC2000-Landnutzungsdaten (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2000) festgelegt. Die Berechnung von Rauigkeiten über See hängt sowohl iterativ von der Windgeschwindigkeit als auch von der Wassertiefe ab. Andere Einflüsse auf die Rauigkeiten, wie z.B. die Stabilität der Atmosphäre, werden nicht berücksichtigt. Eine ausführliche Beschreibung des MWK findet man in GANSKE, ROSENHAGEN u. SCHMIDT (2006).

3. Windatlas-Berechnung

Für den Windatlas wurde zuerst eine Vielzahl von Feldern der Windgeschwindigkeit für das Gebiet Westliche Ostsee auf einem Gitter mit einer Maschenweite von 1000 m berechnet. Die so erhaltenen Windwerte werden als Randwerte der Windfelder am luvseitigen Rand der höher aufgelösten Windfelder für die Teilgebiete Kiel, Mecklenburger Bucht, Warnemünde, Rügen und Pommersche Bucht (Maschenweite 250 m) verwendet. Die Lage der Teilgebiete ist in Abb. 1 dargestellt. Zusätzlich werden an den Rändern die Rauigkeiten und Windwirklängen des Gebiets Westliche Ostsee als Randwerte zur Berechnung der Rauigkeiten im genesteten Gebiet vorgegeben. Dabei ist im Allgemeinen für die relativ kleinen Modellgebiete die Windwirklänge bzw. der Fetch gleich dem in Gegenwindrichtung gemessenen Abstand eines Ostseepunkts von der Küste.

Die Teilgebiete wurden so festgelegt, dass sie einerseits zusammen die deutsche Ostseeküste abdecken und dass andererseits die Untersuchungsgebiete der Projektpartner von den Universitäten Kiel und Rostock darin voll enthalten sind und nicht am Rand eines Gebiets liegen.

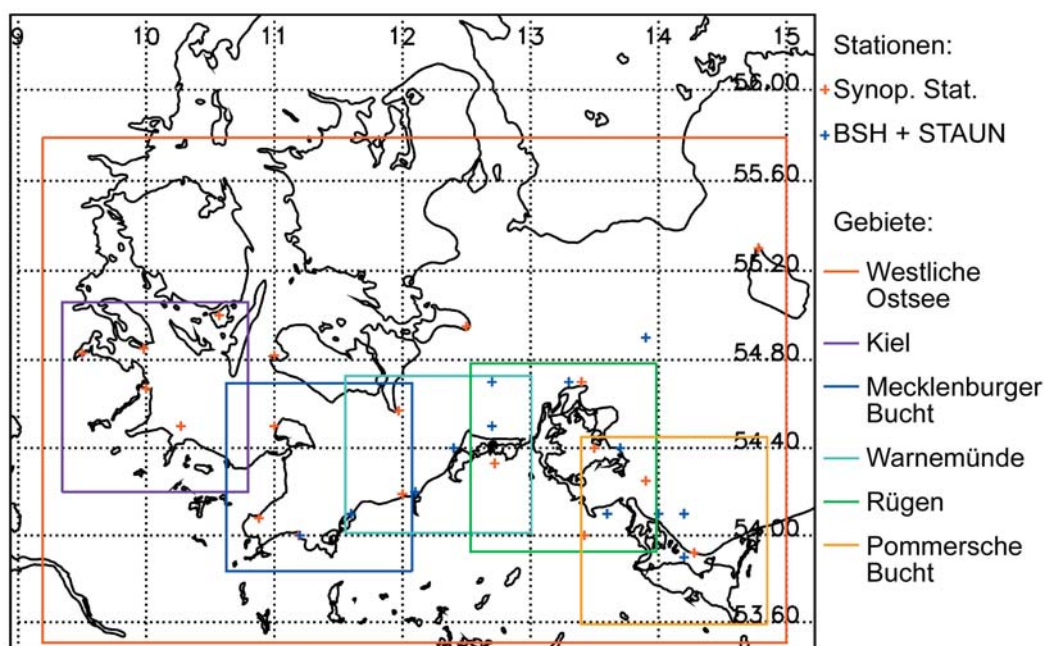


Abb. 1: Das Untersuchungsgebiet Westliche Ostsee mit den Teilgebieten Kiel, Mecklenburger Bucht, Warnemünde, Rügen und Pommersche Bucht. Die roten Kreuze bezeichnen die an den Küsten liegenden synoptischen Stationen des Deutschen, Dänischen und Schwedischen Wetterdienstes, die blauen Kreuze die Orte der Stationen des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und des Staatlichen Amtes für Umwelt und Naturschutz (STAUN)

Die Berechnung der Windfelder des Windatlasses 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, siehe GANSKE, ROSENHAGEN u. SCHMIDT (2007).

Die Anzahl der berücksichtigten Wasserstände wurde zur Reduzierung des Rechenaufwands beschränkt. Bei der Berechnung von Windfeldern bei Niedrigwasser führt diese Beschränkung jedoch zu großen Fehlern in Gebieten mit geringer Wassertiefe, so in den Bodden, westlich von Langeland und südlich von Lolland. Der Windatlas sollte in diesen Gebieten deshalb nicht verwendet werden

Tab. 1 zeigt die verwendeten Grenzen und Schrittweiten von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Wassertiefen. Daraus ergeben sich sechs verschiedene Klassen der Windgeschwindigkeit, 16 Windrichtungen und drei Wassertiefen. Multipliziert man die Anzahl der verwendeten Wassertiefen mit der Anzahl der Windgeschwindigkeitsintervalle und der Windrichtungsintervalle, so erhält man für die Berechnung des Windatlas eine Gesamtzahl von 288 Ausgangswindfeldern für jedes der sechs Gebiete.

Tab. 1: Bei der Windatlas-Berechnung verwendete Grenzen und Schrittweiten von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Wasserstand.

Variable	Minimum	Maximum	Schrittweite
Windgeschwindigkeit*	10 m/s	35 m/s	5 m/s
Windrichtung	0 Grad	360 Grad	22,5 Grad
Wasserstand	- 2,0 m NN	3,0 m NN	2,0 m unter NN 3,0 m über NN

* Wert der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe bei einer Windrichtung von 90 Grad und einem Wasserstand von 0 m NN am Gitterpunkt nahe Darßer Schwelle

4. Windatlas - Anwendung

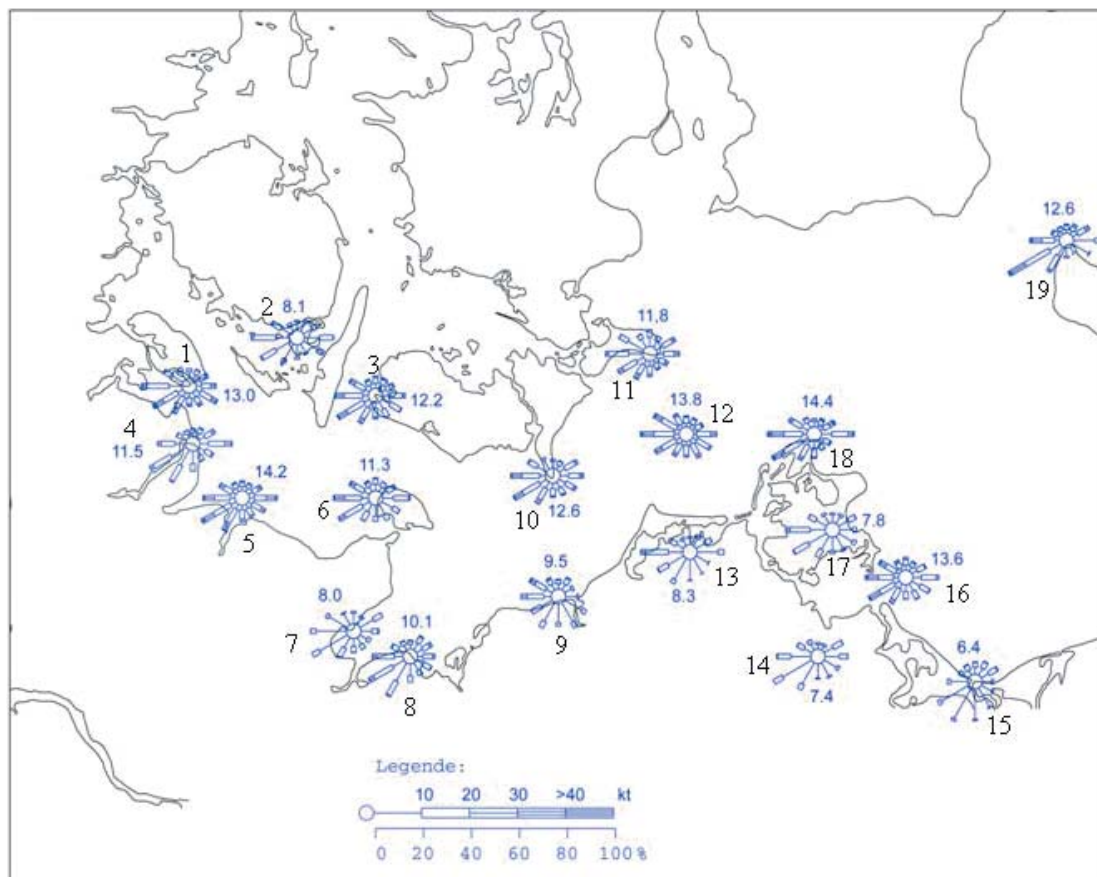
Wie vorstehend beschrieben, besteht der Windatlas aus einer Vielzahl von Windfeldern, die jeweils für die Gebiete Westliche Ostsee, Kiel, Mecklenburger Bucht, Warnemünde, Rügen und Pommersche Bucht berechnet wurden. Die Windfelder für das große Gebiet Westliche Ostsee dienen dabei vorrangig zur Bestimmung der Randbedingungen für die Teilgebiete Kiel, Mecklenburger Bucht, Warnemünde, Rügen und Pommersche Bucht. Bei der Berechnung des Initial-Windfeldes wurde ein über dem gesamten Gebiet konstanter geostrophischer Wind angenommen. Die Verwendung der Windfelder ist deshalb nur unter der Voraussetzung einer weitgehend konstanten Windrichtung im Untersuchungsgebiet sinnvoll. Großräumig trifft dies nur selten zu, so dass eine Gebietseinschränkung auf Ausschnitte mit annähernd konstanter Windrichtung notwendig ist.

Dass diese Ausschnitte meist kleiner sind als die gewählten Teilgebiete, verdeutlicht die Abb. 2. Sie zeigt 12-teilige Windgeschwindigkeitsrosen von insgesamt 19 Stationen in der westlichen Ostsee, gemittelt für ein Jahr, basierend auf Messwerten des Zeitraums 1.8.2001–31.7.2005. Windgeschwindigkeitsrosen sind graphische Darstellungen der Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit (Klassenbreite hier 10 Knoten) in Abhängigkeit von der Windrichtung (Klassenbreite hier 30 Grad). Ergänzend sind die Jahresmittel der Windgeschwindigkeit (in Knoten) hinzugefügt. So werden im Gebiet Mecklenburger Bucht z.B. in Boltenhagen (Station Nr. 8) sehr viel häufiger Winde aus Südwest beobachtet als in Warnemünde (Station Nr. 9), wo nordwestliche Winde dominieren.

Eine DVD mit dem Windatlas kann über die Autoren des Artikels bezogen werden. Diese DVD enthält sowohl die Windfelder als auch FORTRAN-Programme zur Interpolation der Windfelder. Der Windatlas bietet verschiedene Anwendungsmöglichkeiten:

Mit einem FORTRAN-Programm lässt sich aus der Vielzahl von Feldern für vorgegebene Eingangswerte das gewünschte Windfeld interpolieren. Die Nutzer des Windatlas geben dem Interpolationsprogramm die geographischen Koordinaten eines Eingangspunkts, einen Wasserstand, sowie eine Windrichtung und eine Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe vor. Durch Interpolation wird aus den Feldern des Windatlas ein Windfeld für das Teilgebiet berechnet, in dem am Eingabepunkt die vorgegebene Windgeschwindigkeit und Windrichtung gelten. Es lassen sich sowohl ganze Windfelder als auch Daten von ausgewählten Zielpunkten ausgeben. So sind auch Berechnungen für Zeitreihen möglich.

Da bei der Berechnung der Felder des Windatlases angenommen wird, dass die Windrichtung im betrachteten Gebiet nahezu konstant ist, variieren die Windrichtungen der berechneten Windfelder um weniger als 10° innerhalb eines Gebiets und werden nicht gesondert angegeben.



- | | |
|---------------------|---------------------|
| 1 Kegnaes | 11 Møn |
| 2 Taasinge | 12 Darßer Schwelle |
| 3 Langoe | 13 Barth |
| 4 Olpenitz | 14 Greifswald |
| 5 Leuchtturm Kiel | 15 Swinemünde |
| 6 Westermarkelsdorf | 16 Greifswalder Oie |
| 7 Pelzerhaken | 17 Putbus |
| 8 Boltenhagen | 18 Arkona |
| 9 Warnemünde | 19 Hammerodde |
| 10 Gedser Odde | |

Abb. 2: 12-teilige Windgeschwindigkeitsrosen von 19 Stationen (schwarze Zahlen Stationsnummern, siehe Tabelle) in der Kieler und Mecklenburger Bucht, gemittelt für ein Jahr, sowie Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in Knoten (blaue Zahlen), Bezugszeitraum 1.8.2001–31.7.2005.

Die Windfelder können für verschiedene Anwendungen genutzt werden. Dabei gibt es, je nach Verwendungszweck zwei grundsätzlich unterschiedliche Ausgabemöglichkeiten:

- Das numerische Feld von Windgeschwindigkeiten mit der vorgegebenen Windrichtung wird komplett ausgegeben, wie es z.B. als Antrieb für ein Seegangs- oder Strömungsmodell benötigt wird.
- 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 Eingabegrößen aus Zeitreihen vor, so erhält man zu jedem entsprechenden Zeitpunkt ein Windfeld und somit eine Zeitreihe berechneter Windfelder. Damit lassen sich auch für einzelne Gitterpunkte zeitgleiche Wertepaare von Windgeschwindigkeit und Windrichtung bestimmen. Diese berechneten Zeitreihen werden insbesondere zum Zwecke der Verifikation benötigt, um z.B. Vergleiche mit einer am gleichen Ort gemessenen Zeitreihe durchführen zu können.

4.1 Wahl der Eingabewerte

Die Qualität der Zeitreihe, die das Windklima am Eingabepunkt repräsentiert, bestimmt die Qualität der Ergebnisse der berechneten Windfelder. Deshalb kommt der Wahl des Eingabepunkts und der zugehörigen Zeitreihen große Bedeutung zu. Insbesondere müssen folgende Kriterien beachtet werden:

- Repräsentative Eingabepunkte: Sowohl Eingabe- als auch Zielpunkt sollten möglichst auf See oder in unmittelbarer Küstennähe liegen und frei von lokalen Effekten sein.
- Die Wasserstände sollten von einem Pegel stammen, der repräsentativ für das gesamte Gebiet ist, für das die Windfelder berechnet werden.
- Die Mittelungszeiträume für die Windwerte sollten mindestens eine Stunde betragen.
- Wasserstände und Windwerte müssen in der gleichen zeitlichen Auflösung vorliegen.

Erfahrungen im Seewetteramt haben gezeigt, dass die Winddaten der in Tab. 2 aufgelisteten Stationen in den genannten Zeiträumen grundsätzlich die oben genannten Bedin-

Tab. 2: Für den Windatlas geeignete Eingabestationen mit geographischen Koordinaten, der Messhöhe von Windgeschwindigkeit und Windrichtung und des Zeitraums, in dem Messungen an dieser Station vorliegen.

Messort	östliche Länge (°)	Nördliche Breite (°)	Messhöhe (m ü. Grund)	Zeitraum
Ahrenshoop	12.4	54.4	10	Ab 1998
Arkona	13.44	54.68	24	11.1995–10.2006
Boltenhagen	11.2	54.00	18	Ab 4.1991
Darsser Schwelle	12.7	54.7	9	Ab 1994
Gedser Odde	11.97	54.57	8	Ab 1996
Greifswalder Oie	13.91	54.25	12	Ab 2001
Kegnaes	9.98	54.85	16	Ab 1996
Leuchtt. Kiel	10.27	54.50	8	Ab 1982
Olpenitz	10.03	54.67	10	Ab 1996
Swinemünde	14.23	53.92	6	Ab 1996
Warnemünde	12.1	54.2	10	Ab 1997
Westermarkelsdorf	11.07	54.53	10	Ab 6.1996

gungen erfüllen. Dabei werden die Stationen Ahrenshoop und Warnemünde vom Staatlichen Amt für Umwelt- und Naturschutz (STAUN) des Landes Mecklenburg-Vorpommerns, Darßer Schwelle vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Gedser Odde und Kegnaes vom Dänischen Wetterdienst (Danmarks Meteorologiske Institut) und alle anderen Stationen vom Deutschen Wetterdienst betrieben.

4.2 Verifikation der Windatlas-Ergebnisse

Zur Verifikation der Windatlas-Ergebnisse mit Messergebnissen wurden Zeitreihen von Messstationen als Eingabewerte für die Windatlas-Rechnungen verwendet und die gewonnenen Gitterpunktwerte mit Zeitreihen nahegelegener Messstationen verglichen. Bei den statistischen Untersuchungen wurden nur die Daten für Zeitpunkte berücksichtigt, die sowohl von der Messstation des Eingabepunktes als auch vom Zielort vorlagen.

An Hand der Ergebnisse sind Rückschlüsse einerseits darauf möglich, wie geeignet die vorliegenden Windmessungen für die Verwendung als Inputwerte in diesem Gebiet sind und andererseits, wie gut die lokalen Verhältnisse durch den Windatlas erfasst werden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die Gebiete Kiel und Warnemünde ausführlicher dargestellt. Die Ergebnisse für die anderen Gebiete findet man in GANSKE, ROSENHAGEN u. SCHMIDT (2007).

4.2.1 Gebiet Kiel

Abb. 3 zeigt einen Korrelationsplot, basierend auf Wertepaaren der Windgeschwindigkeit von zwei verschiedenen Bezugsorten zu gleichen Zeitpunkten. Gezeigt werden in Farbdarstellung die Anzahl der Wertepaare für Klassenbreiten von 1 m/s und die Ausgleichsgerade für alle Wertepaare. Die Abbildung enthält einen Vergleich zwischen der in Olpenitz gemessenen Geschwindigkeits-Zeitreihe (Abszisse) und den mit dem Windatlas für Olpenitz berechneten Windgeschwindigkeiten (Ordinate). Dabei wurde bei den Windatlas-Rechnungen die Zeitreihe vom Leuchtturm Kiel als Eingabezeitreihe verwendet. Die Datenbasis umfasst den Zeitraum 1.11.1996 bis 31.10.2005.

An der Lage der Ausgleichsgeraden ist abzulesen, dass die in Olpenitz gemessenen Windgeschwindigkeiten im Mittel etwas kleiner sind als die mit dem Windatlas für Olpenitz berechneten. Dies zeigt sich auch in den Mittelwerten der Windgeschwindigkeiten, die 6,0 m/s für die gemessene und 6,4 m/s für die berechnete Zeitreihe betragen. Der rms-Fehler (root mean square error = Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers) zwischen der berechneten Zeitreihe und der gemessenen Zeitreihe beträgt 1,8 m/s.

Abb. 4 zeigt Darstellungen der Quotienten der Mittelwerte der Windgeschwindigkeit zweier Zeitreihen in Abhängigkeit von der Windrichtung, aufgeteilt in 16 Klassen. Sie enthält zum Einen die Treppenfunktion der Quotienten der Mittelwerte der jeweils am Leuchtturm Kiel und in Olpenitz gemessenen Windgeschwindigkeiten (schwarze Linie). Sie macht deutlich, dass für alle Windrichtungen die Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten am Leuchtturm Kiel höher sind als die von Olpenitz. Dies ist dadurch zu erklären, dass der Leuchtturm Kiel auf freier See ohne Landeinfluss liegt, Olpenitz jedoch an der Küste. Die Beeinflussung durch die Landoberfläche der in Olpenitz gemessenen Windgeschwindigkeiten ist am stärksten bei Windrichtungen zwischen 180 Grad (Süd) und 270 Grad (West), bei denen der Mit-

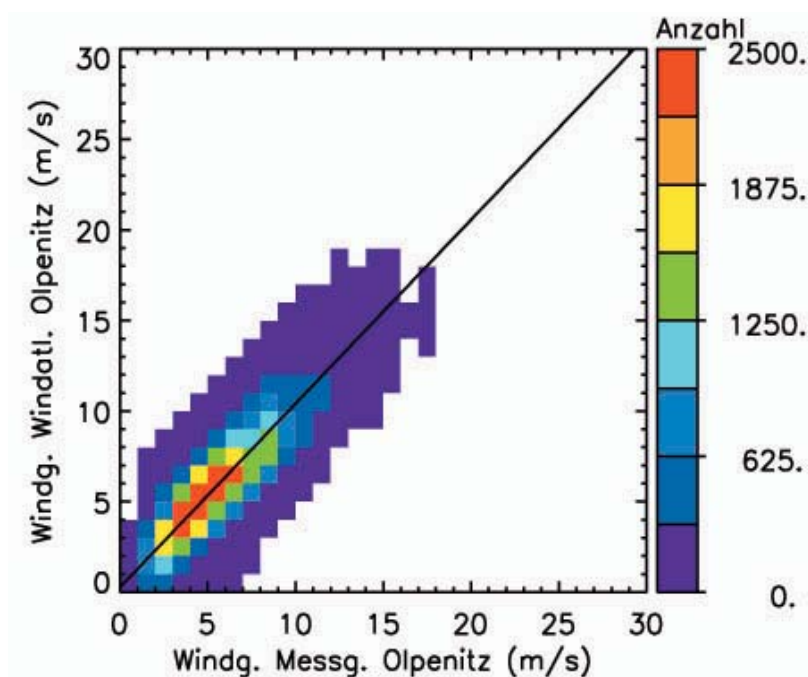


Abb. 3: Korrelation zwischen den Windgeschwindigkeiten, die in Olpenitz gemessen (Abszisse) und mit dem Windatlas für Olpenitz berechnet wurden (Ordinate). Eingabewerte für die Windatlas-Rechnungen: am Leuchtturm Kiel gemessene Windgeschwindigkeiten. Durchgezogene Linie: Ausgleichsgerade. Bezugszeitraum: 1.11.1996 bis 31.10.2005

telwert der Windgeschwindigkeit am Leuchtturm Kiel maximal 1,8-mal so groß ist wie in Olpenitz.

Die zweite, blaue Linie der Abbildung zeigt das Verhältnis der in Kiel gemessenen Windgeschwindigkeiten zu den aus dieser Zeitreihe mit dem Windatlas für Olpenitz berechneten Windgeschwindigkeiten. Eingangspunkt der Windatlas-Rechnungen ist ebenfalls Kiel. Idealerweise sollte diese Linie parallel zur schwarzen verlaufen, jedoch ist der Anstieg der blauen mit wachsenden Windrichtungen größer 180 Grad (Süd) deutlich geringer als der der schwarzen und das relative Maximum der blauen Linie liegt bei 270 Grad (West) statt bei 225 Grad (Südwest). Dies bedeutet, dass in diesem Windrichtungsbereich die Windgeschwindigkeiten, die für Olpenitz berechnet wurden, im Vergleich zu den in Kiel gemessenen Windgeschwindigkeiten zu hoch ausfallen.

In rot ist das Verhältnis der Mittelwerte der in Olpenitz gemessenen Windgeschwindigkeit zu der für Olpenitz mit dem Windatlas berechneten dargestellt. Es zeigt sich, dass bei Windrichtungen zwischen 180 Grad (Süd) und 270 Grad (West) die in Olpenitz gemessenen Windgeschwindigkeiten kleiner sind als die mit dem Windatlas berechneten und bei den anderen Windrichtungen größer. Der Verlauf der rot und schwarz dargestellten Quotienten ist spiegelverkehrt. Daraus kann man schließen, dass bei dieser Windatlas-Rechnung die Reduktion der Windgeschwindigkeiten über Land im Vergleich zu den Geschwindigkeiten über See zu gering ist, so dass die mit dem Windatlas berechneten Windgeschwindigkeiten bei Anströmung von Land zu groß sind. Andererseits werden die mit dem Windatlas berechneten Windgeschwindigkeiten bei Anströmung von der Seeseite unterschätzt.

Die Unterschiede zwischen den Mittelwerten der in Olpenitz gemessenen Windgeschwindigkeiten und für Olpenitz berechneten Windgeschwindigkeiten (rote Linie) sind für

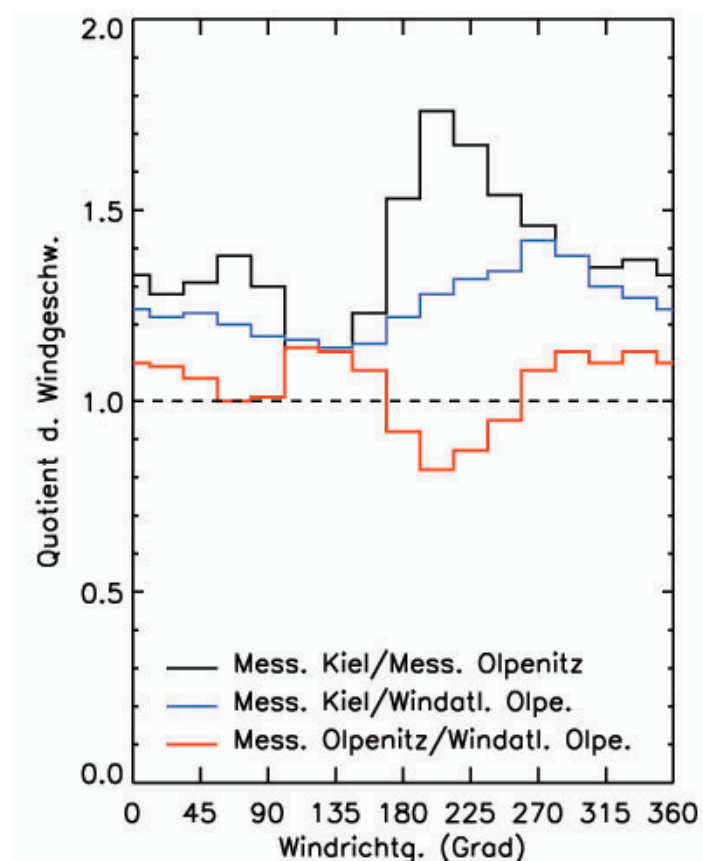


Abb. 4: Quotienten der Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten für die 16 Windrichtungsklassen für gemessene und mit dem Windatlas berechnete Zeitreihen. Eingangspunkt für Windatlasrechnungen: Kiel. Bezugszeitraum: 1.11.1996 bis 31.10.2005

alle Windrichtungen kleiner als die Unterschiede zwischen den gemessenen mittleren Windgeschwindigkeiten in Kiel und den gemessenen mittleren Windgeschwindigkeiten in Olpenitz (schwarze Linie). Das Verhältnis der beiden Kollektive liegt nahe 1, d.h. die für Olpenitz berechneten Werte geben die gemessenen insgesamt gut wieder.

4.2.2 Gebiet Warnemünde

Bei allen Stationen aus dem Gebiet Warnemünde, von denen Messdaten zur Verfügung standen, sind die Windmessungen stark von lokalen Effekten beeinflusst. Dies wird auch an den nachfolgenden Beispielen deutlich. Die Messdaten sind im Allgemeinen nicht repräsentativ für die großräumige Umgebung der Stationen und können nur bei ausgewählten, windreichen Wetterlagen zur Beurteilung der Qualität der berechneten Windfelder verwendet werden.

Abb. 5 zeigt einen zu Abb. 3 entsprechenden Korrelationsplot zwischen der an der STAUN-Station Ahrenshoop gemessenen Windgeschwindigkeitszeitreihe und der für Ahrenshoop mit dem Windatlas berechneten Zeitreihe für die Jahre 2002 bis 2005. Eingangswerte der Windatlas-Zeitreihe sind die gemessenen Windgeschwindigkeiten der STAUN-Station Warnemünde.

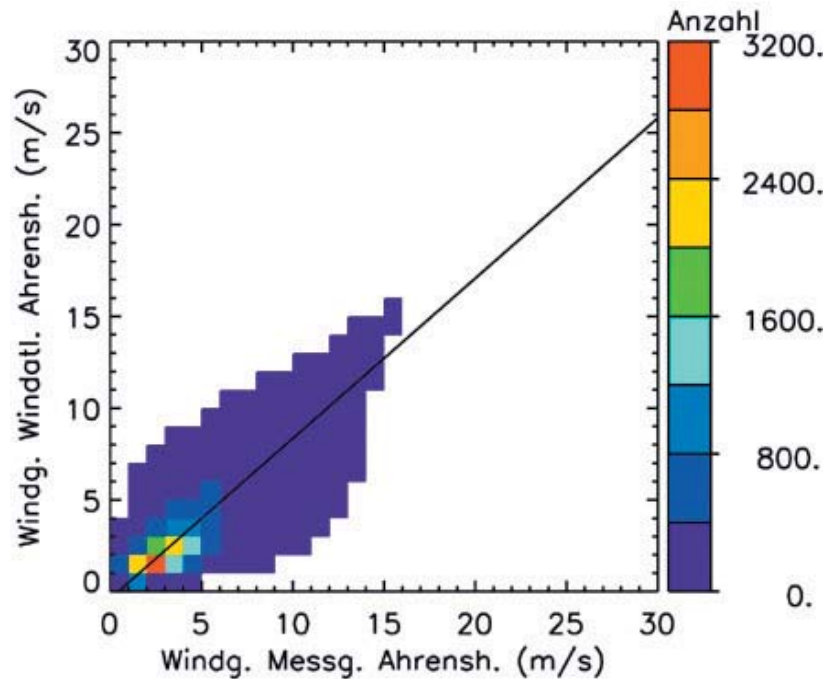


Abb. 5: Korrelation zwischen den Windgeschwindigkeiten, die in Ahrenshoop gemessen (Abszisse) und mit dem Windatlas für Ahrenshoop berechnet wurden (Ordinate). Eingabewerte für die Windatlas-Rechnungen: in Warnemünde gemessene Windgeschwindigkeiten. Durchgezogene Linie: Ausgleichsgerade. Bezugszeitraum: 1.1.2002 bis 31.12.2005

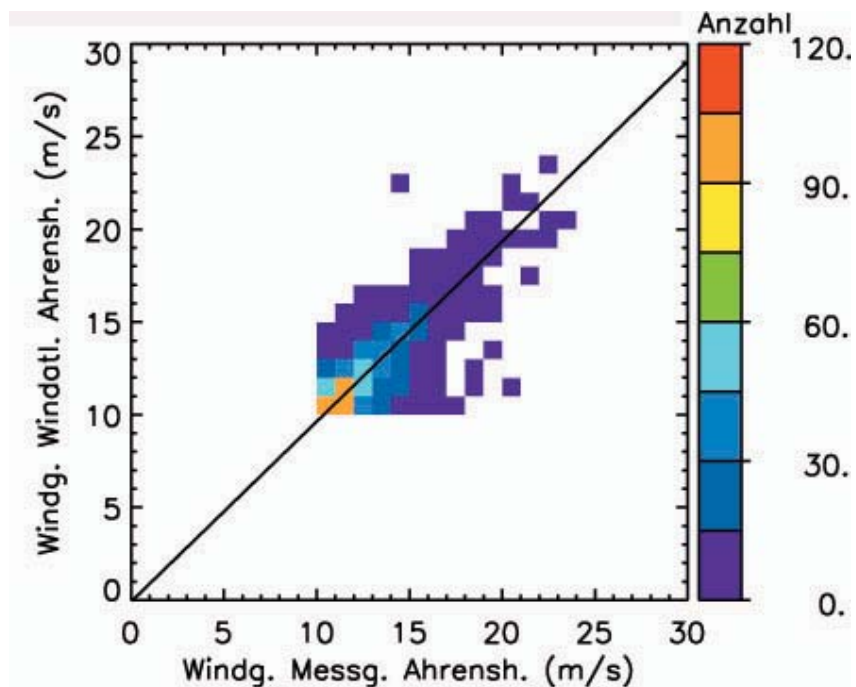


Abb. 6: Gleichartige Darstellung wie in Abb. 5, jedoch wurden hierbei nur Geschwindigkeiten größer als 10 m/s berücksichtigt

Die Mittelwerte der gemessenen Windgeschwindigkeit betragen in Warnemünde 3,5 m/s, in Ahrenshoop 4,6 m/s. Der Mittelwert der mit dem Windatlas für Ahrenshoop berechneten Zeitreihe beträgt sogar nur 3,7 m/s. Somit sind beide Stationen relativ windschwach. Die Voraussetzungen für verlässliche Windatlas-Rechnungen, nämlich hohe Windgeschwindigkeiten, werden nur an wenigen Tagen im Jahr erfüllt. Daraus resultiert im Vergleich zur mittleren Windgeschwindigkeit ein großer rms-Fehler von 2,1 m/s zwischen der gemessenen und der berechneten Zeitreihe. Auch weicht die in Abb. 5 gezeigte Ausgleichsgerade deutlich von der Winkelhalbierenden ab, da die meisten der mit dem Windatlas berechneten Windgeschwindigkeiten kleiner sind als die gemessenen.

Vergleicht man nur Messungen mit Windgeschwindigkeiten größer als 10 m/s (siehe Abb. 6), so sinkt der rms-Fehler auf 1,6 m/s ab und die Ausgleichsgerade für alle Punkte liegt in der Nähe der Winkelhalbierenden. Somit bestätigt dieses Beispiel, dass bei geringen mittleren Windgeschwindigkeiten die Fehler der mit dem Windatlas berechneten Windfelder größer sind als bei höheren Windgeschwindigkeiten.

5. Zusammenfassung

Die mit dem Windatlas im Gebiet Kiel für Olpenitz berechneten Zeitreihen der Windgeschwindigkeit stimmen gut mit den Zeitreihen der gemessenen Windgeschwindigkeiten überein und weichen im Mittel um weniger als 2 m/s voneinander ab. Sie sind somit als Eingabefelder für Modelle der Küstenforschung geeignet.

Im Gebiet Warnemünde lagen keine Daten von Messstation an der Küste vor, deren Messungen nicht beträchtlich durch lokale Effekte beeinflusst wurden. Zudem sind die örtlichen Verhältnisse an der Küste im Gebiet Warnemünde ungünstig für Windatlas-Rechnungen, da die dort vorherrschenden mittleren Windgeschwindigkeiten mit weniger als 5 m/s sehr gering sind. Entsprechend sind die relativen Fehler der Windatlas-Ergebnisse im Vergleich zu den Messergebnissen hoch. Da diese Messungen sowohl als Eingangswerte als auch als Vergleichswerte für die Windatlas-Rechnungen verwendet werden müssen, sind die erzielten Ergebnisse für dieses Gebiet schlechter als die der anderen Gebiete.

Die Windverhältnisse an den Küstenstationen der Ostsee werden durch Steilküsten, Küstenwälder und Bebauung sowie das stark gegliederte Hinterland geprägt. Die entsprechenden Einflüsse werden durch den Windatlas, der für Wasserflächen konzipiert ist, nicht ausreichend aufgelöst. Lediglich die Daten relativ frei gelegener Messstellen, wie z.B. der Leuchtturm Kiel liefern geeignete Eingangs- und Verifikationsdaten. Hier zeigte sich eine gute Übereinstimmung. Die Vergleiche der mit dem Windatlas für einen bestimmten Punkt berechneten Windgeschwindigkeiten mit gemessenen Windgeschwindigkeiten bestätigen zudem die größere Genauigkeit der Windatlas-Rechnungen bei höheren mittleren Windgeschwindigkeiten. Dies entspricht den Erwartungen, da die Voraussetzungen, die bei der Berechnung der Windfelder gemacht wurden, nur bei höheren Windgeschwindigkeiten erfüllt sind.

In allen Gebieten werden die mit dem Windatlas berechneten Windgeschwindigkeiten bei Anströmung von Land her überschätzt und über See unterschätzt.

6. D a n k s a g u n g

Wir danken dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie sowie dem Staatlichen Amt für Umwelt und Natur Rostock für die Überlassung der Messdaten ihrer Stationen an der Ostseeküste. Weiter danken wir den Kollegen des Deutschen Wetterdienstes in Potsdam, Boltenhagen, Warnemünde und Barth für die detaillierten Informationen zu den Messstationen des Deutschen Wetterdienstes.

7. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- DOMS, G. u. SCHÄTTLER, U.: The Nonhydrostatic Limited-Area Model LM (Lokal Modell) of DWD. <http://www.cosmo-model.org>, 1999.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION: Global Landcover 2000 Database. European Commission, Joint Research Centre. www.gvm.sai.jrc.it/glc2000, 2000.
- FÜG, C. u. SCHMIDT, H.: Windantrieb für Küstenseegang. Abschlussbericht zu dem meteorologischen Teilprojekt im KFKI-Forschungsvorhaben „Bemessungsseegang für Küstenschutzwerke und Randdünen“. Deutscher Wetterdienst, Hamburg, 2001.
- GANSKE, A.; ROSENHAGEN, G. u. SCHMIDT, H.: Der Windatlas für Deutsche Küstenseegebiere der Nordsee, Abschlussbericht KFKI-Projekt MOSES, 2006.
- GANSKE, A.; ROSENHAGEN, G. u. SCHMIDT, H.: Windfelder für SEBOK Abschlussbericht KFKI-Projekt MUSTOK. http://www.uni-siegen.de/fb10/fwu/wb/forschung/projekte/mustok/Abschlussbericht_sebok_dwd_ganske.pdf, 2007.
- HINNEBURG, D.; RAABE, A. u. TETZLAFF, G.: Wind- und Seegangs atlas für das Gebiet um Darss und Zingst. Teil 1: Windatlas. Wiss. Mitt. Inst. f. Meteor. Univ. Leipzig u. Inst. f. Troposphärenforschung e.V. Leipzig, Bd. 5, 1–164, 1997.
- RUDOLPH, E. u. GAYER, G.: Atlas of GESIMA wind fields in the Greifswalder Bodden, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, 1995.
- SCHMIDT, J. H. u. PÄTSCH: Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen. Die Küste, Heft 54, 1992.
- SCHMIDT, H.; GÜNTHER, H. u. STRÜFING, R.: Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Bühnen-Deckwerk-Systemen. Teilbereich Meteorologie. Abschlussbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben MTK 0545 A, Deutscher Wetterdienst, Hamburg, 1994.
- SEIFERT, T.; TAUBER, F. u. KAYSER, B.: „A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea – 2nd edition“, Baltic Sea Science Congress, Stockholm 25.–29. November 2001, Poster #147. <http://www.io-warnemuende.de/iowtopo>, 2001.
- SHERMAN, C. A.: A Mass-Consistent Model for Windfields over Complex Terrain. Lawrence Livermore Laboratory Report UCRL-76171, Rev. 1, 1967.
- TRACI, R. M.; PHILLIPS, G. T. u. PATNIAK, P. C.: Wind Energy Site Methodology Development. RLO/2440-78-2, 1987.
- WEISS, R.; FESER, F. u. GÜNTHER, H.: Wind- und Seegangsklimatologie 1958–2001 für die südliche Nordsee basierend auf Modellrechnungen. GKSS 2003/10, 2003.