

Validierung von WAsP für Offshore-Standorte in küstennahen Gewässern

Bernhard Lange, Jørgen Højstrup*

Wind Energy and Atmospheric Physics, RISØ National Laboratory, P.O. Box 49, DK-4000 Roskilde

* jetzt: NEG Micon A/S, Alsvej 21, DK-8900 Randers

Das steigende Interesse an der Windenergienutzung an Offshore-Standorten führt zu einem Bedarf an zuverlässigen Methoden zur Vorhersage der Windverhältnisse an diesen Standorten. Das Standardwerkzeug zur Windpotentialbestimmung für Onshore- als auch für Offshore-Standorte ist das Programm WAsP. Für Standorte an Land und an der Küste ist dieses Programm hervorragend validiert. Dagegen besteht wegen der geringen Anzahl vorhandener Offshore-Windmessungen noch Bedarf an der Überprüfung der Vorhersagegenauigkeit auf dem Meer. Neue Meßdaten von laufenden Messungen in der dänischen Ostsee werden zu einer weiteren Validierung von WAsP verwendet. Der Vergleich der mit WAsP prognostizierten Windpotentiale mit den Messungen zeigt eine hohe Genauigkeit. Eine geringe Abweichung wurde für zwei Standorte gefunden, die in ähnliche Entfernung zum Land liegen, aber eine sehr unterschiedliche Verteilung der Landmassen aufweisen. Hier deuten die Messungen auf eine Differenz der Windpotentiale hin, die mit WAsP nicht vorhergesagt werden kann. Zur genaueren Untersuchung wird eine windrichtungsabhängige Analyse der Messungen für 12 Windrichtungssektoren durchgeführt und mit WAsP Prognosen verglichen. Für einzelne Sektoren treten Abweichungen auf, die einen Zusammenhang zu dem zugehörigen Fetch aufweisen: Für kurzen Fetch wird die Windgeschwindigkeit mit WAsP leicht überschätzt, während bei langem Fetch von mehr als 30 km eine Unterschätzung zu erkennen ist.

1. Einleitung

In einigen Gebieten Europas sind geeignete Standorte für Windparks bereits knapp, während Offshore riesige Flächen zur Verfügung stehen. Hinzu kommt, daß das Windpotential Offshore erheblich besser ist als an Land. Daher ist das Interesse an der Erschließung des Offshore-Potentials für die Windkraftnutzung in den letzten Jahren rapide gewachsen. Es ist zu erwarten, daß ein bedeutender Teil des zukünftigen Ausbaus der Windkraftnutzung zumindest in Europa durch die Nutzung von Offshore-Standorten erreicht werden wird.

Im Vergleich mit Windparks an Land hängt die ökonomische Tragfähigkeit von Offshore-Windparks davon ab, ob die zusätzlichen Kosten durch das höhere Windangebot ausgeglichen werden. Für Projektplanung und Standortwahl ist daher eine zuverlässige Prognose des Windpotentials entscheidend.

Das Prognosemodell WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Model) [1] ist das Standardwerkzeug zur Potentialbestimmung an Land wie auch Offshore. Für Anwendungen an Land ist es bereits hervorragend validiert worden. Für Standorte an der Küste wurde eine Validierung mit Messungen von hohen meteorologischen Meßmasten vorgenommen [2]. Dabei wurden keine signifikanten Abweichungen gefunden. Für die Validierung für Offshore-Standorte sind nur wenige Messungen verfügbar. Vergleiche mit Messungen an Offshore-Plattformen zeigten eine gute Übereinstimmung [2]. Ein Vergleich mit den Meßdaten vom Windpark Vindeby zeigte eine befriedigende Übereinstimmung mit einer leichten Überschätzung der Windgeschwindigkeit [3].

In Dänemark ist vorgesehen 4000 MW Offshore-Windparks bis zum Jahre 2030 zu bauen. In der gegenwärtigen Planungsphase werden an drei der vorgesehenen Standorte Windmessungen durchgeführt. Die bisher von diesen Messungen verfügbaren Daten sowie vorhandene Daten vom Offshore-Windpark Vindeby werden analysiert.

2. Besonderheiten der Windverhältnisse Offshore

Bei der Modellierung des Windpotentials für Standorte in küstennahen Gewässern müssen zwei wesentliche Unterschiede zu den Verhältnissen an Land beachtet werden:

1. Die Oberflächenrauigkeit von Wasser ist sehr viel kleiner als von Landoberflächen. Dies führt zu höheren Windgeschwindigkeiten und ist der wesentliche Grund für das höhere Windpotential Offshore. Im Gegensatz zu den Verhältnissen an Land ist die Oberflächenrauigkeit der See nicht konstant, sondern hängt von den vorhandenen Wellen ab. Diese wiederum werden von dem Impulsaustausch zwischen Wind und Wellen bestimmt, der von der Windgeschwindigkeit, der Wassertiefe und dem Abstand zur windaufwärts gelegenen Küste (dem Fetch) abhängt.

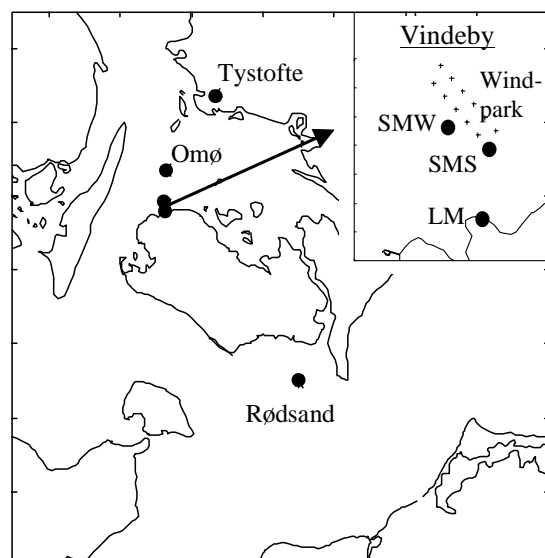


Abbildung 1: Meßstandorte in der Ostsee im südlichen Teil Dänemarks; der Ausschnitt zeigt das Gebiet des Windparks Vindeby

2. Die atmosphärische Stabilität ist der zweite Parameter, der sich für Land- und Wasserflächen deutlich unterscheidet. Dies wird durch die unterschiedlichen effektiven Wärmekapazitäten von Land und Wasser hervorgerufen, die zu einem unterschiedlichen Verhalten der Wärmeflüsse führen. Bei Wind von Land kann die atmosphärische Stabilität in einer Übergangszone ebenfalls vom Fetch abhängen. Die atmosphärische Stabilität beeinflusst die Windgeschwindigkeit:

- Das Höhenprofil der Windgeschwindigkeit ist direkt von der Stabilität abhängig.
- Bei Wind von Land entwickelt sich an der Küste eine interne Grenzschicht, die die Windgeschwindigkeit Offshore beeinflusst. Das Wachstum dieser Grenzschicht ist wiederum von der Stabilität der Atmosphäre abhängig.

3. WAsP bei Offshore-Bedingungen

Die obengenannten Effekte beeinflussen die Windgeschwindigkeit über küstennahen Gewässern. Sie werden im Programm WAsP mit vereinfachten empirischen Modellen berücksichtigt:

- Der Einfluß der atmosphärischen Stabilität auf das Höhenprofil wird als Störung des für die neutrale Schichtung verwendeten logarithmischen Profils modelliert. Die Abweichung wird mit einer empirischen Formel berechnet, die den Einfluß des mittleren Wärmeflusses und der Varianz des Wärmeflusses von der Oberfläche zur Luft berücksichtigt. Land- und Wasseroberflächen werden durch verschiedene Werte dieser Parameter unterschieden. Ein einfaches Modell für eine Übergangszone von 10 km wird berücksichtigt für Wind, der vom Land übers Wasser weht oder umgekehrt.
- Rauigkeitssprünge werden ebenfalls mit einer empirischen Formel modelliert, die die interne Grenzschicht beschreibt. Das Modell ist aber unabhängig von der atmosphärischen Stabilität.
- Für die Oberflächenrauigkeit des Wassers wird in WAsP ein konstanter Wert von 0.2 mm angenommen. Eine Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit oder Fetch wird nicht berücksichtigt.

4. Meßstationen

Momentan werden Windmessungen mit meteorologischen Masten an verschiedenen Standorten auf und um die Inseln Lolland und Falster in Dänemark durchgeführt (siehe Abb. 1). Die Messungen am Vindeby Seemast West (SMW), Vindeby Seemast Süd (SMS), Omø und Rødsand sind Offshore-Messungen. Die Messung am Vindeby Landmast (LM) ist eine begleitende Küsten-Messung des Vindeby Meßprogramms. Die Messung in Tystofte ist eine langjährige meteorologische Messung.

Der Vindeby Seemast West befindet sich 300 m westlich des Windparks in ca. 1.6 km Entfernung zur Küste. Der Seemast Süd liegt ca. 300 m südlich des Parks in 1.2 km Abstand zum Land. Der Landmast wurde direkt an der Küstenlinie südlich des Windparks errichtet (siehe Abb. 1). Es werden halbstündige Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten und -richtungen in verschiedenen Höhen sowie Temperaturen und Temperaturdifferenzen gemessen. Die Messungen begannen im November 1993 und umfassen gegenwärtig etwa 60000

Meßwerte. Für eine genauere Beschreibung der Messungen siehe [3].

Die Windgeschwindigkeitsmessungen in Vindeby sind für bestimmte Windrichtungsbereiche durch Wakeeffekte des Windparks gestört. Die Wakeeinflüsse wurden mit dem Windparkprogramm FCalc [4] berechnet und die gemessenen Windgeschwindigkeiten entsprechend korrigiert.

Die Standorte Omø und Rødsand liegen beide in ca. 10 km Entfernung vom Land. Omø liegt nördlich von Lolland in der Nähe von Vindeby, während sich die Station Rødsand südöstlich von Lolland befindet (siehe Abb.1). Hier werden ebenfalls halbstündige Mittelwerte von Windgeschwindigkeiten und -richtungen in verschiedenen Höhen sowie Temperaturen und Temperaturdifferenzen gesammelt. Die Messungen begannen im August 1996 und umfassen gegenwärtig eine Datenbasis von 6200 Meßwerten der Station Omø und 13200 der Station Rødsand.

5. Windpotentiale

Die Windpotentiale, d.h. die langjährigen mittleren Windgeschwindigkeiten, wurden auf der Basis der Messungen abgeschätzt. Abweichungen zwischen dem Windpotential während der Meßperiode und dem Potential im langjährigen Mittel wurden unter Verwendung der 14 Jahre umfassenden Zeitreihe der Station Tystofte korrigiert. Diese Station befindet sich nördlich von Omø auf Seeland in ca. 5 km Entfernung zum Meer (siehe Abb.1).

Zum Vergleich wurden die Windpotentiale mit WAsP prognostiziert. Dabei wurde mit zwei verschiedenen Messungen als Eingangsdaten gerechnet:

- als Küstenmessung wurde der Vindeby Landmast verwendet
 - als Landmessung wurde die Station Tystofte benutzt
- Abbildung 2 zeigt die mittleren Windgeschwindigkeiten der Standorte in 48 m Höhe (Vindeby LM 46 m) aufgetragen über ihre Abstände zur nächsten Küste, d.h. ihrem minimalen Fetch. Die mit Linien verbundenen Punkte sind die WAsP-Prognosen, die Vierecke geben die aus den Messungen abgeschätzten Werte an.

Wie erwartet steigt die mittlere Windgeschwindigkeit mit wachsendem Abstand zur Küste an. Dieser Anstieg ist für die ersten Kilometer deutlich stärker als für große

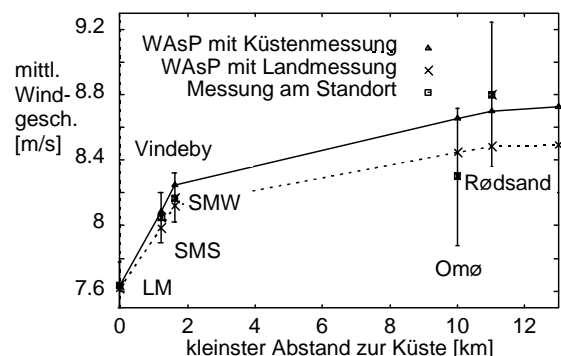


Abbildung 2: Langjährige mittlere Windgeschwindigkeiten für einen Küsten- und 4 Offshore-Standorte abgeschätzt aus Messungen am Standort (mit Schätzung der maximalen Unsicherheiten) und prognostiziert mit WAsP auf der Basis einer Küsten- und einer Landmessung

Entfernungen. Die Abweichungen der WASP-Prognosen von den Messungen sind mit maximal 4% klein und liegen in der gleichen Größenordnung wie die Unsicherheiten der aus den Messungen vor Ort abgeschätzten Werte.

Für die WASP-Prognosen wurde ein zusätzlicher Wert für die Verhältnisse für einen gedachten Standort völlig ohne Landeinfluß berechnet (bei 13 km). Es zeigt sich, daß die Prognose für die beiden Standorte Rødsand und Omø mit ca. 10 km Abstand zur Küste diesem Grenzwert bereits sehr nahe kommen. WASP modelliert also nur einen verschwindend geringen Einfluß für Land das mehr als 10 km Abstand zum Standort hat.

Im Gegensatz zu dieser Prognose zeigen die aus den Messungen gewonnenen Abschätzungen der Windpotentiale der Stationen Rødsand und Omø eine Abweichung in der mittleren Windgeschwindigkeit. Eine mögliche Erklärung hierfür ist der Unterschied in den Fetch-Verhältnissen. Während Omø in südlicher, westlicher und nordöstlicher Richtung von Land in ca. 10 km Abstand umgeben ist, findet sich bei der Station Rødsand Land in dieser Entfernung nur in nördlicher und nordöstlicher Richtung, wo die Windhäufigkeit gering ist. Außerdem hat Rødsand einen sehr langen Fetch in die windhäufigsten westlichen Richtungen (siehe Abb.1).

6. Einfluß des Fetches auf das Windpotential

Methodik

Die gemessenen und mit WASP prognostizierten Windgeschwindigkeitsquotienten wurden für 12 Windrichtungssektoren für verschiedene Stationspaare verglichen. Damit kann eine Abhängigkeit der Vorhersagequalität vom Fetch untersucht werden, da dieser für verschiedene Richtungen stark unterschiedlich ist.

Die WASP-Methode verwendet Messungen von einem Standort zur Prognose des Windpotentials an einem zweiten Standort. Dabei werden die gemessenen windrichtungsabhängigen Windgeschwindigkeitsverteilungen durch Weibull-Funktionen beschrieben. Dies erzeugt bei kurzen gemessenen Zeitreihen einen Fehler durch Abweichungen der gemessenen Verteilungen von Weibull-Funktionen. Um diesen Fehler zu umgehen wird der Vergleich von gemessenen und prognostizierten Werten nicht für die Windgeschwindigkeiten einer Station sondern für Quotienten von Windgeschwindigkeiten zweier Stationen gemacht.

Zunächst wird eine gemeinsame Zeitreihe gleichzeitiger Messungen beider Stationen gebildet. Die gemessenen Werte einer Station werden als Input für WASP verwendet um das Windklima der Station selbst und der zweiten Station zu bestimmen. Daraus werden die richtungsabhängigen Windgeschwindigkeitsquotienten der beiden Stationen berechnet. Dies wird mit den Messungen der anderen Station als Input wiederholt und der Mittelwert der Quotienten gebildet.

Die Quotienten der gemessenen Daten werden aus der gleichen Zeitreihe berechnet, die für die WASP-Berechnungen verwendet wurde. Die Windgeschwindigkeiten beider Stationen werden in 12 Windrichtungssektoren Klassen-gemittelt. Dabei werden nacheinander die gemessenen Windrichtungen der beiden Stationen verwendet und der Mittelwert der beiden Berechnungen gebildet.

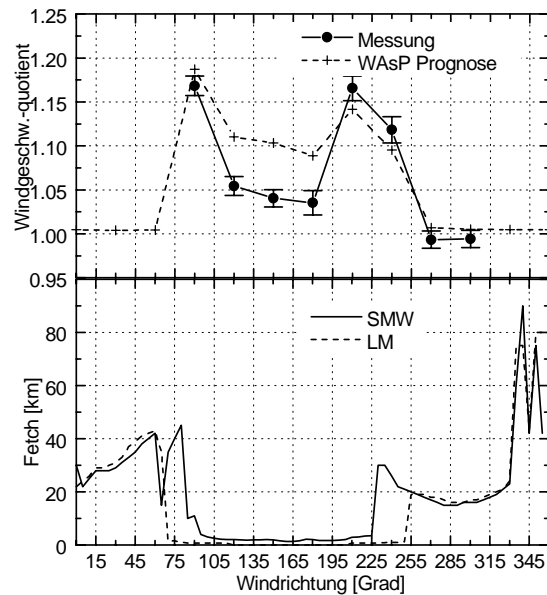


Abbildung 3: Vindeby SMW / Vindeby LM: Gemessene und mit WASP prognostizierte Windgeschwindigkeitsquotienten (oben) und Fetch der beiden Stationen (unten) über die Windrichtung

Windrichtungssektoren, bei denen die Messung durch den Windschatten des Meßmastes beeinflusst ist, werden nicht verwendet. Die Unsicherheiten der gemessenen Windgeschwindigkeitsquotienten werden abgeschätzt als mittlere Standardabweichung des Mittelwertes plus der halben Differenz zwischen den beiden berechneten Werten.

Richtungsabhängige Windgeschwindigkeitsquotienten

Abbildungen 3 und 4 zeigen Beispiele für gemessene und mit WASP prognostizierte windrichtungsabhängige Windgeschwindigkeitsquotienten. Außerdem ist der richtungsabhängige Fetch der jeweiligen Stationen aufgetragen. Die durchgezogenen Linien zeigen die gemessenen Quotienten, die gestrichelten Linien die mit WASP prognostizierten.

Abbildung 3 zeigt die Quotienten von Vindeby SMW

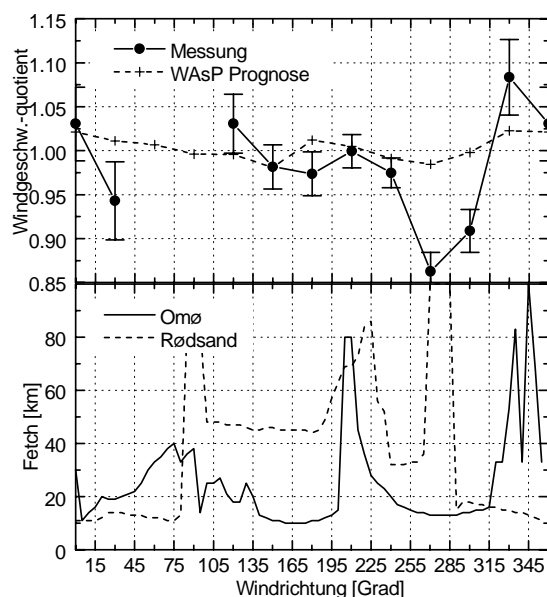


Abbildung 4: Wie oben mit Stationen Omø / Rødsand

und LM. Vindeby SMW liegt ca. 1,6 km vor der Nordküste Lollands (siehe Abb. 1). Hier kann das Verhalten von WAsP für kurzen Fetch untersucht werden.

Die Messungen zeigen zwei deutliche Maxima des Quotienten etwa in Richtung der Küstenlinie. Diese Situation führt zu einem großen Unterschied im Fetch der beiden Stationen, da hier der SMW einen langen Fetch hat, während für den LM der Wind im wesentlichen von Land kommt. Zwischen den beiden Maxima (Sektoren 120°-180°) hat der SMW einen kurzen Fetch von 1,6 bis 3 km. Für die anderen Richtungen haben beide Stationen etwa den gleichen Fetch und der Quotient ist nahezu eins.

Die WAsP-Prognosen zeigen generell das gleiche Richtungsmuster wie die Messungen. In den meisten Fällen sind die Abweichungen zwischen den gemessenen und mit WAsP prognostizierten Werten klein und das generelle Verhalten des richtungsabhängigen Windgeschwindigkeitsunterschiedes zwischen den beiden Stationen wird gut modelliert. Eine signifikante Abweichung zeigt sich nur für den Fall mit Wind von Land für den LM und kurzem Fetch für den SMW. Hier scheint die Prognose mit WAsP den Unterschied zwischen den Windgeschwindigkeiten an der Küste und auf See leicht zu überschätzen.

Abbildung 4 zeigt die Quotienten für die beiden Offshore-Stationen Omø und Rødsand. Rødsand liegt ca. 11 km südlich von Lolland, Omø ca. 10 km nördlich. Der Abstand zwischen beiden Stationen beträgt ca. 60 km (siehe Abb. 1). Ein Vergleich dieser Standorte gibt die Möglichkeit gemessene und prognostizierte Windgeschwindigkeiten an zwei Offshore-Standorten mit sehr unterschiedlicher Fetch-Situation zu vergleichen.

Die Messungen zeigen ein Minimum in den Quotienten bei den Windrichtungen 270° und 300° und ein Maximum bei 330°. Dies deckt sich gut mit dem sehr langen Fetch bei Rødsand in Richtung 260° bis 290° und bei Omø in Richtung 330° bis 350°. Für die übrigen Richtungen weicht der Quotient nicht stark von eins ab.

Die WAsP-Prognose zeigt dagegen nur sehr geringe Abweichungen von eins. Dies führt zu signifikanten Abweichungen von den Messungen von 6-12% in den genannten Fällen. Für den 30°-Sektor zeigt sich eine kleinere Abweichung, die nicht einfach mit einem Unterschied im Fetch zu erklären ist. Für alle anderen Windrichtungen sind keine signifikanten Abweichungen zu erkennen.

Dieses Ergebnis erklärt den in den Messungen aufgetretenen Unterschied zwischen den Stationen Rødsand und Omø. Der sehr lange Fetch bei Rødsand, der außerdem in der Hauptwindrichtung liegt, führt im Vergleich zu Omø zu einem höheren Windpotential. Dieser lange Fetch bleibt bei WAsP unberücksichtigt, was zu einer leichten Unterschätzung des Windpotentials bei Rødsand führt.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die gegenwärtig verfügbaren Meßdaten von laufenden Messungen in der dänischen Ostsee wurden analysiert und mit Prognosen verglichen, die mit dem Windpotential-Prognoseprogramm WAsP gemacht wurden. Messung von einer Küsten- und einer Landstation wurden für die Vorhersagen verwendet. Es zeigt sich, daß die Prognosen des langjährigen mittleren Windpotentials in guter Übereinstimmung mit den Messungen sind. Die

Messungen deuten aber darauf hin, daß ein geringer Unterschied in den Windpotentialen der Stationen Omø und Rødsand besteht. Dieser kann mit WAsP nicht prognostiziert werden.

Die Untersuchung der windrichtungsabhängigen Windgeschwindigkeiten zeigt ebenfalls generell eine gute Übereinstimmung zwischen WAsP-Prognosen und Messungen. Allerdings wurden für einzelne Windrichtungssektoren signifikante Abweichungen gefunden. Diese zeigen einen Zusammenhang mit der Länge des windaufwärts liegenden Fetches. WAsP tendiert dazu, die Windgeschwindigkeit für Situationen mit kurzem Fetch zu überschätzen, während sie bei sehr langem Fetch unterschätzt wird. Dieser Effekt erklärt auch die gemessenen Unterschiede im Windpotential zwischen Omø und Rødsand, da in Rødsand für häufig vorkommende Windrichtungen ein langer Fetch vorhanden ist. Zur Erklärung dieser Meßergebnisse wird ein detailliertes meteorologisches Modell benötigt, welches verschiedene Effekte berücksichtigt, z.B. die Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit der See von Windgeschwindigkeit und Fetch (siehe z.B. [5]), den Einfluß der atmosphärischen Stabilität auf des Höhenprofil der Windgeschwindigkeit und die durch die Küstenlinie entstehende interne Grenzschicht (siehe z.B. [3]). Die Entwicklung eines solchen Modells ist das Ziel gegenwärtig andauernder Forschung.

Danksagung

Die Offshore-Messungen wurden von ELKRAFT, dem Dänischen Technischen Forschungsrat sowie der Europäischen Kommission in den JOULE-Programmen finanziert. B. Lange wird von der Europäischen Kommission mit einem Marie Curie Research Training Grant unterstützt.

Literatur

- [1] Mortensen, N.G., L.Landberg, I.Troen und E.L.Petersen: Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP). Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark. 1993
- [2] Petersen, E.L.: Wind Resources Part I, The European Wind Climatology, in: Proceedings of the European Wind Energy Conference, Luebeck-Travemuende; 1993; pp. 663-668
- [3] Barthelmie, R.J., M.S. Courtney, J. Højstrup und S.E. Larsen: Meteorological aspects of offshore wind energy: Observations from the Vindeby wind farm. in: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol. 62 (1996); pp. 191-211
- [4] FCalc: Farm Calculation program. Universität Oldenburg, Deutschland. 1996
- [5] Johnson, H.K., H.J. Vested, J. Højstrup, S.E. Larsen und H. Hersbach: On the Dependence of Sea Surface Roughness on Wind Waves. in: Journal of Physical Oceanography. Vol 28 (1998); pp. 1702-1716