

# ERFAHRUNGEN BEIM BAU UND BETRIEB DES OFFSHORE-WIND-PARKS BOCKSTIGEN

Bernhard Lange<sup>o</sup>, Staffan Niklasson\*, Erik Aagaard, Anders Møller, Andreas Wickman\*, Paul-Erik Andersen

Wind World af 1997 A/S, Voerbjergvej 40, 9400 Nørresundby, Dänemark

\* Vindkompaniet Öland, Gettlinge 2081, S-38065 Degerhamn, Schweden

<sup>o</sup> jetzt bei: RISØ National Laboratory, Wind Energy and Atmospheric Physics Department, P.O.Box 49, DK-4000 Roskilde

## Zusammenfassung

Seit März 1998 ist der erste schwedische Offshore-Windpark Bockstigen vor der Küste der Insel Gotland in Betrieb gegangen. Der Park wurde als Demonstrationsprojekt von dem schwedischen Planungsbüro Vindkompaniet, dem dänischen Anlagenhersteller Wind World und der britischen Offshore-Firma Seacore mit finanzieller Unterstützung aus dem EU-THERMIE Programm errichtet. Bockstigen ist weltweit der vierte Offshore-Windpark. Während bei den vorangegangenen Projekten vor allem die technische Machbarkeit von Offshore-Windparks gezeigt werden sollte, stand in Bockstigen die Demonstration der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit im Vordergrund. Dabei wurden eine Reihe innovativer Konzepte umgesetzt: Zur Kostensenkung wurden erstmals gebohrte Monopile-Fundamente verwendet. Zur Errichtung des Windparks wurde eine neue Methode unter Verwendung einer mobilen Jack-up Plattform angewandt. Speziell entwickelte Regelungssysteme sowohl für die einzelnen Anlagen als auch für den Windpark als Ganzes wurden entwickelt. Damit können die maximale Parkleistung, der Flicker und der Blindleistungsbedarf in Abhängigkeit von Online-Messungen des tatsächlichen Netzzustandes geregelt werden. Die neu entwickelten Technologien wurden erfolgreich angewandt und führten im Vergleich mit anderen Offshore-Windparks zu einer deutlichen Kostensenkung.

## 1. Einleitung

Die Nutzung des Offshore-Potentials ist eine der wichtigsten Optionen für den zukünftigen Ausbau der Windkraftnutzung. Die Erschließung des Offshore-Potentials bedeutet einen enormen Zuwachs an Flächen mit hervorragenden Windbedingungen.

Die wesentlichen Nachteile der Offshore-Windkraftnutzung sind die hohen Kosten für Fundamente, Seekabel und für die Errichtung und Wartung. Ein weiteres Problem ist die Notwendigkeit an der Küste in ein oftmals schwaches Netz einzuspeisen.

Diese zusätzlichen Kosten müssen soweit gesenkt werden, daß sie durch die höhere Energieproduktion ausgeglichen werden, um das gleiche Preisniveau wie Windparks an

Land zu erreichen.

## 2. Der Windpark Bockstigen

Der Standort befindet sich in der Ostsee südwestlich der schwedischen Insel Gotland (siehe Abb. 1 und 2). Der Abstand zur Küste beträgt ca. 4 km und die Wassertiefe ca. 6 m. Bei der Standortwahl wurden folgende Kriterien angelegt:

- geringe Wassertiefe in möglichst großem Abstand zur Küste
- geeignete Beschaffenheit des Untergrundes für das Monopile-Fundament
- nahegelegener Hafen für Errichtung und Service
- nahegelegener Netzanschlußpunkt an Land



Abbildung 1: Windpark Bockstigen



Abbildung 2: Windpark Bockstigen - Standort und Layout

Der Windpark Bockstigen besteht aus fünf Wind World Windkraftanlagen des Typs W-3700/550 kW. Dieser Typ wurde aufgrund seiner einfachen und verlässlichen Technik und daraus resultierenden hohen Verfügbarkeit gewählt. Die Konstruktion zeichnet sich durch das integrierte Getriebe und den flanschmontierten Generator aus. Dies sichert eine lange Lebensdauer und geringe Servicekosten. Die Anlage ist mit einem Dreiblattrotor mit 37 m Durchmesser mit Blattspitzenbremsen ausgestattet. Die Leistungsbegrenzung erfolgt durch Stall-Regelung. Der Turm ist ein 38 m hoher Stahlrohrturm in zwei Sektionen. Dieser ist mittels Flansch auf dem 21 m langen Monopile-Fundament befestigt. Die Nabenhöhe der Anlage beträgt etwa 44 m über dem mittleren Wasserstand. Zwischen Fundament und Turm ermöglicht eine Arbeitsplattform den sicheren Zugang zur Anlage.

Bei der gesamten Konstruktion wurde besonderes Augenmerk auf die Eigenfrequenzen der Anlage mit Monopile-Fundament und auf die zusätzlichen Lasten durch Strom, Eis und Wellen gelegt.

Die Anlagen wurden für den Offshore-Einsatz modifiziert: Hebevorrichtungen in den Gondeln ermöglichen den Austausch auch größerer Komponenten. Die elektrischen Anlagen in Monopile und Turm werden durch ein geschlossenes Lüftungssystem trocken und kühl gehalten. Für alle Komponenten wurde ein spezieller Korrosionsschutz verwendet.

#### Netzanschluß

Der Anschluß des Windparks erfolgte in Gotland-Valar an ein 10 kV Netz mit einer Kurzschlußleistung von 16,9 MVA. Damit ist das Verhältnis der Nennleistung des Windparks zur Kurzschlußleistung 15%. Einen solch hohen Anteil stillgelegter Windkraftanlagen anzuschließen erforderte eine neue, innovative Lösung: Ein neuartiges Regelungskonzept wurde entwickelt, das aus der 'Master Controller' Regelung für den Windpark als Ganzes und der 'Optimal Speed' Regelung für die einzelnen Anlagen besteht.

Die 'Optimal Speed' Regelung beruht auf dem Konzept, einen Leistungsumrichter für zwei Hauptaufgaben zu verwenden:

- Bei geringen Windgeschwindigkeiten arbeitet er als Frequenzumrichter und ermöglicht so den drehzahlvariablen Betrieb der Anlage. Dies erhöht die Energieausbeute.
- Bei höheren Windgeschwindigkeiten sind die Generatoren der Anlagen direkt netzgekoppelt. Hier wird der Umrichter als Präzisions-Blindstrom-Quelle eingesetzt. Dies ermöglicht eine schnelle und volldynamische Flicker-Kompensation und die Regelung des cos-phi.

Die Hauptaufgabe des 'Master Controller' ist es, für die Einhaltung der IEC-Richtlinien auf der Leitung vom Einspeisepunkt (EP) zur nächsten Umspannstation (10 kV auf 60 kV) zu sorgen. Die Regelungsfunktionen sind im Einzelnen:

- Durchführung einer dreiphasigen U/I Messung am EP
- Betrieb des Windparks bei cos-phi nahe eins solange die Netzspannung innerhalb der zulässigen Grenzwerte ist. Bei Erreichen der maximal zulässigen Spannung am EP wird der cos-phi zur Spannungsbegrenzung bis zu einem vorgegebenen minimalen Wert erniedrigt.
- Wenn dies nicht ausreicht wird durch Zuschalten von Dumploads ( 0-500 kW in 20 Schritten) und Ab- und Zuschalten von Anlagen die maximale Leistungsabgabe des Parks begrenzt.
- Minimierung des Flickers entlang der Leitung vom EP zur Umspannstation durch den Einsatz einer Flicker-kompensation.

Außerdem führt der 'Master Controller' die Überwachung und Steuerung des Windparks einschließlich Fernüberwachung aus.

#### Monopile-Fundament

Um die Kosten für die Fundamente zu senken, wurden in Bockstigen erstmals gebohrte Monopile-Fundamente verwendet. Die Gründung besteht aus einem 21 m langen Stahlrohr, das in einem 10 m tiefen Loch im Meeresboden festbetoniert ist. Die Eignung des Felsuntergrundes und die erforderliche Tiefe der Bohrung wurden mit Probebohrungen festgestellt.

Diese Konstruktion hat im Vergleich zu Gravitationsfundamenten folgende Vorteile:

- Das Gewicht des Fundamentes beträgt nur 43 Tonnen.
- Eis- und Wellenlasten sind durch die kurze Wasserlinie stark reduziert
- Das Fundament kann mit einem normalen Schleppkahn zur Baustelle geschleppt und mit einem Kran von nur 40 Tonnen Hubkapazität an seinen Platz gesetzt werden.

#### **3. Errichtungsmethode**

Die Anlagen und Monopile-Fundamente wurden in der Fabrik der Firma Wind World in Skagen gebaut. Der Transport der Komponenten erfolgte per Schiff direkt zum Hafen Klintehemn von wo aus der Bau stattfand. Der Weitertransport zur Baustelle erfolgte mit der Fähre der Firma Vindkompaniet sowie einem kleinen Schlepper und Schleppkahn. Die Monopile-Fundamente wurden für den Transport abgedichtet und wurden schwimmend zur Baustelle geschleppt.

Zum Bohren des Fundamentloches und Errichtung des Fundamentes wurde die Jack-up Plattform verwendet (siehe Abb. 3). Zunächst wurde das 10 m tiefe Loch mit einem Durchmesser von 2,4 m in den Kalkstein des Meeresbodens gebohrt. Dies ist in jeder Art von Meeresboden möglich, die hart genug ist, um sich selbst zu stützen. Danach wird der Monopile in das Loch gehoben und schließlich der Spalt zwischen Fundament und Fels mit Spezialbeton gefüllt.

Nach der Fertigstellung aller Fundamente wurde die Jack-up Plattform als stabiles und effizientes Werkzeug zur Errichtung der Anlagen verwendet. Für die Montage der Anlagen wurde der auf der Plattform vorhandene Kran eingesetzt. Dabei wurde auch die Fähigkeit der Plattform ausgenutzt, sich selbst an den Standbeinen anzuheben.

Die Seekabel für den Stromtransport und die Glasfaserkabel zur Kommunikation wurden mit Hilfe der Fähre verlegt und auf dem Meeresboden verankert.

#### 4. Erfahrungen beim Bau

Um den Windpark Bockstigen technisch und ökonomisch möglich zu machen wurden eine ganze Reihe neuer technischer Konzepte entwickelt und umgesetzt. Trotzdem trat nur ein einziges größeres technisches Problem auf: die Verankerung der Seekabel auf dem Meeresgrund. Die Strömung am Meeresboden ist stärker als zunächst angenommen und die Verankerung der Kabel war schwieriger als erwartet. Auf Flächen, wo der Felsuntergrund auf dem Meeresboden frei lag, mußte das Kabel nachträglich mit Stahlhaken verankert werden.

Der Zeitplan für das Projekt wurde deutlich überschritten. Eine Kombination verschiedener Gründe war hierfür verantwortlich: Zunächst führte eine Verzögerung bei der Bereitstellung der Jack-up Plattform einem verspäteten Baubeginn. Das Einsetzen der Monopile-Fundamente in die Löcher kann nur bei sehr ruhiger See erfolgen. Die



Abbildung 3: Die SEACORE Jack-up Plattform wurde zum Bohren und für die Errichtung der Anlagen verwendet

Wellen am Standort sind größer als zunächst erwartet, da sie sich beim Erreichen der flachen Gewässer sehr stark aufbauen. Dies verzögerte den Bau weiter, so daß die am Ende auftretenden Probleme mit der Verankerung der Seekabel nicht mehr vor Winteranbruch gelöst werden konnten. Die Inbetriebnahme konnte daher erst im Frühjahr 1998 erfolgen.

Trotz dieser Verzögerungen konnte das geplante Budget bis auf ca. 10% eingehalten werden, was im wesentlichen auf die Probleme mit den Seekabeln zurückzuführen ist.

Die wichtigsten Erfahrungen aus diesem Projekt kann man folgendermaßen zusammenfassen:

- Wind-, Wellen und Strömungsverhältnisse am Standort sollten sehr genau untersucht werden.
- Bei der Wahl der Methode zur Installation der Seekabel sollten die standortspezifischen Gegebenheiten berücksichtigt werden.
- Die Vorgehensweise beim Bau der Fundamente kann wetterunabhängiger gemacht werden, was Zeit und damit Kosten spart.

#### 5. Ökonomie des Projektes

Die Gesamtkosten des Projektes beliefen sich auf 7,4 Mio. DM (36 Mio. schwedische Kronen). Der Preis pro kWh geschätzter jährlicher Leistungsabgabe (d.h. Gesamtkosten geteilt durch die geschätzte Jahresproduktion) beträgt 0,93 DM/kWh/y.

Dieser Preis war bei dem ersten Offshore Windpark Vindeby ca. 1,70 DM/kWh/y und bei Tunø Knob ca. 1,40 DM/kWh/y [1,2]. Dies zeigt, daß im Vergleich mit anderen Offshore-Windparks eine erhebliche Kostenreduktion erreicht wurde. Die dänischen Windparks Vindeby und Tunø Knob waren 80% bzw. 50% teurer als Bockstigen.

Zum Vergleich mit einem Windpark an Land kann der letzte von Vindkompaniet realisierte 10-MW Windpark in Schweden dienen, bei dem der Preis pro kWh geschätzter jährlicher Leistungsabgabe 0,77 DM/kWh/y betrug. Ein günstiger Standort an Land ist demnach nur noch etwa 15-20% billiger als der Offshore-Windpark Bockstigen.

#### 6. Messungen zur Leistungsabgabe

Auf Gotland befinden sich mehrere Anlagen des bei Bockstigen verwendeten Typs in unmittelbarer Nähe zum Offshore-Windpark an Land. Zur Untersuchung der Differenz der Leistungsabgabe zwischen Offshore-Anlagen und Anlagen an Land werden Messungen durchgeführt.

Vom 145 m hohen Meßmast Näsudden sind meteorologische Messungen verfügbar, von denen hier die 1-min. Mittelwerte von Windrichtung und -geschwindigkeit in 145 m Höhe verwendet werden. Die Leistungsabgabe der Anlagen in Bockstigen sind als 10-min. Mittelwerte verfügbar. Für eine Reihe von Anlagen an Land können die Leistungsabgaben als stündliche Mittelwerte gemessen werden. Abbildung 4 zeigt die Lage der verwendeten Messungen. In einer ersten vorläufigen Meßreihe wurden die Daten für einen Zeitraum von 2 Wochen erfaßt.

Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, befindet sich auf der Halbinsel Näsudden eine größere Anzahl Windkraftanlagen. Dies schränkt die Windrichtungen ein, bei denen die vermessenen Anlagen nicht durch andere Windkraftanlagen gestört werden. Die Anlagen Haabo an Land und Bockstigen 3 haben einen gemeinsamen Sektor freier Anströmung von 150° bis 290°. Für diese Richtungen erfolgt die Anströmung beider Anlagen von See. Dabei

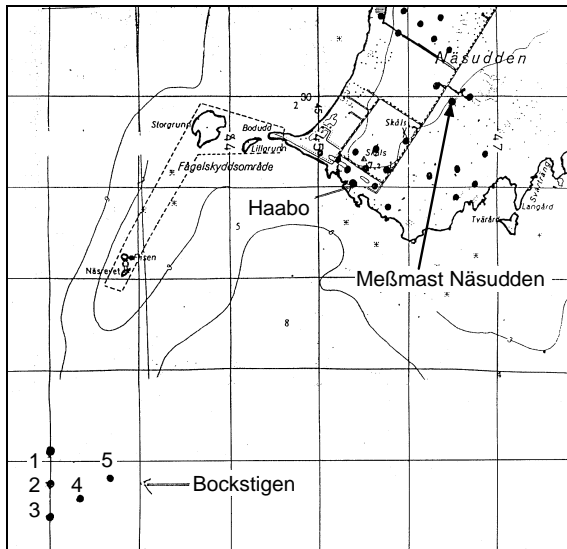


Abbildung 4: Lage der Meßstandorte

wird bis zum Winkel von  $194^\circ$  bei Haabo und  $186^\circ$  bei Bockstigen 3 die Windströmung durch den südlichen Teil Gotlands beeinflusst. Für alle anderen frei angeströmten Richtungen kommt der Wind von der offenen See.

Abbildung 5 zeigt Zeitreihen der Windgeschwindigkeit und -richtung zusammen mit den Leistungsabgaben der Anlagen Haabo und Bockstigen 3 für einen Tag.

Der Wind kommt während dieser Zeit aus südlicher Richtung (siehe Abb.5), d.h. aus der Richtung Gotlands. Bei  $180^\circ$  Windrichtung beträgt die freie Strecke über dem Wasser bis zur nächsten Küste (Fetch) 10 km für die Anlage Bockstigen 3 und 5 km für die Anlage Haabo. Aus den Zeitreihen der Leistungsabgaben (siehe Abb. 5) kann man erkennen, daß dieser Unterschied im Fetch zu einer deutlichen Differenz in der Leistungsabgabe führt. Für andere Windrichtungen, bei denen die Anströmung für beide Anlagen von der offenen See erfolgt, kann eine solche Differenz nicht gefunden werden.

Um eine quantitative Aussage über diesen Effekt machen

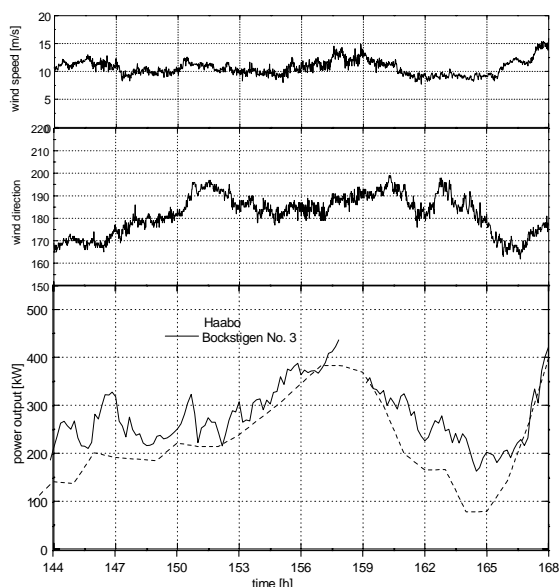


Abbildung 5: Zeitreihe vom 9.9.1998: Windgeschwindigkeit (oben), Windrichtung (mitte) und Leistungsabgaben der Anlagen Haabo und Bockstigen 3 (unten)

zu können ist eine statistische Analyse einer erheblich längeren Zeitreihe erforderlich.

## 5. Schlußfolgerung

Der erste schwedische Offshore-Windpark Bockstigen ist in der Nähe von Gotland gebaut worden und ist seit März 1998 erfolgreich in Betrieb. Der Park besteht aus 5 Wind Anlagen vom Typ W-3700/550 kW die für den Offshore-Einsatz modifiziert wurden. Es wurde eine Reihe neuer, innovativer technischer Lösungen entwickelt und angewandt, die die Windkraftnutzung Offshore technisch und ökonomisch attraktiver machen.

Erstmals wurden gebohrte Monopile-Fundamente eingesetzt. Das Bohren der Fundamentlöcher und die Errichtung der Anlagen wurden mit einer mobilen Jack-up Plattform durchgeführt. Es hat sich gezeigt, daß diese Methode die Kosten von Offshore-Installationen im Vergleich zu konventionellen Gravitationsfundamenten erheblich reduziert. Die vorangegangenen dänischen Offshore-Windparks Vindeby und Tunø Knob waren 80% bzw. 50% teurer als der Windpark Bockstigen. Ein günstiger Standort an Land ist nur noch etwa 15-20% billiger. Die maximale Leistungsabgabe des Windparks Bockstigen ist durch die Kapazität des Netzes am Einspeisepunkt begrenzt. Dies wird durch eine neuentwickelte Windpark-Regelung, den 'Master Controller' erreicht. Dieser regelt in Abhängigkeit von Online-Messungen am Netz die abgegebene Maximalleistung des Windparks sowie dessen Blindleistungsbedarf zu jedem Zeitpunkt. Dies ist möglich, da die Windkraftanlagen mit der neuentwickelten 'Optimal Speed' Steuerung ausgestattet sind. Dieses System liefert eine sehr hohe Stromqualität mit niedrigem Einschaltstrom, voller Kompensation des Blindleistungsbedarfes und sehr geringem Flicker.

Zur Untersuchung der Erhöhung der Energieausbeute durch den Offshore-Standort werden sowohl an den Anlagen in Bockstigen als auch an Anlagen gleichen Typs an Land Messungen durchgeführt. Erste Ergebnisse zeigen eine signifikante Abhängigkeit der Leistungsabgabe vom Fetch.

Während der Planung, dem Bau und dem Betrieb dieses Demonstrationsprojektes wurden von allen Partnern wertvolle Erfahrungen gesammelt. Es wird daher damit gerechnet, daß aufgrund der beim Windpark Bockstigen gesammelten Erfahrungen zukünftige Projekte mit noch geringeren Kosten realisiert werden können. Es ist geplant in Schweden weitere Windparks mit der bei Bockstigen erfolgreichen Technologie zu bauen.

## Danksagung

Der Windpark Bockstigen wurde von der Europäischen Kommission im THERMIE-Programm unterstützt. Die meteorologischen Messungen wurden freundlicherweise von Vattenfall AB zur Verfügung gestellt.

## Literatur

- [1] Olsen, F.A. und K.Rasmussen: Vindeby offshore wind farm. in: Proceedings of the European Seminar on offshore wind energy in Mediterranean and other European seas (OWEMES). Rome, Italy, 1994
- [2] Lemming, Jørgen und Maj Dang Trong: Danish investigations and plan of action for offshore wind power. in: Proceedings of the European Seminar OWEMES. La Maddalena, Italy, 1997