



Pfahl-Streben-Gründung Tragwerksentwurf für die Gründung einer Offshore-Windkraftanlage

■ ■ ■ von Conrad Hansen

Der geplante Bau von Offshore-Windenergieanlagen in Nord- und Ostsee erfordert von Ingenieuren und Kaufleuten die Bereitschaft, neue Wege zu gehen, denn die Windenergienutzung in deutschen Küstengewässern bedingt die Bewältigung bisher unbekannter technischer und wirtschaftlicher Aufgaben. Dazu gehört auch die Gründung bei Wassertiefen ≥ 20 m, für die im Folgenden die Pfahl-Streben-Gründung skizziert wird, die in besonderem Maß Rücksicht auf die Bedingungen der Offshore-Windkraftnutzung nimmt.



1 Übersicht

Einführung

Gegenüber den bereits realisierten Offshore-Windenergie-Projekten in europäischen Nachbarländern haben die deutschen Standorte folgende Nachteile:

- Sie weisen beträchtliche Wassertiefen > 20 m auf.
- Die Entfernungen zu den Einspeisepunkten in das Stromnetz sind groß.
- Es gelten strenge Naturschutzforderungen.
- Die Pilotprojekte werden nicht direkt subventioniert.

Aus der Energieeinspeisevergütung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) und dem Energieertrag einer Anlage lässt sich eine Baukostenobergrenze ableiten. Es folgt daraus, dass auch in der Gründungstechnik besondere Anstrengungen gemacht werden müssen, um diesem Kostendruck gerecht zu werden. Nur mit innovativen Lösungsansätzen sind die enormen Anforderungen an die Gewährleistung der Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen zu erfüllen.

Im Folgenden wird die Pfahl-Streben-Gründung skizziert, die in besonderem Maß Rücksicht auf die Bedingungen der Offshore-Windkraftnutzung nimmt.

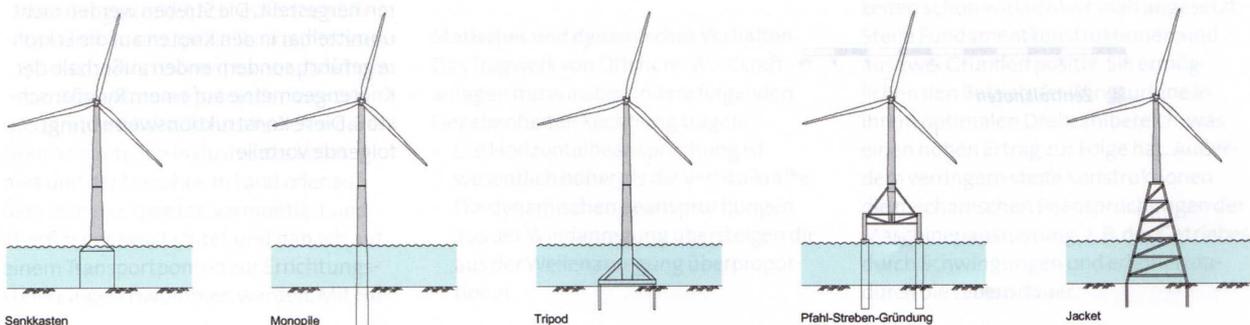
Randbedingungen

Die Pfahl-Streben-Gründung ist eine Variation des Tripods. Sie wurde auf Basis von Planungsdaten einer 3,6-MW-Anlage für eine Wassertiefe von 23 m in der Nordsee konzipiert. Die Vordimensionierung erfolgte statisch und dynamisch anhand von Entwurfsdaten für Standort und Maschine. Die Bemessungswassertiefe wurde mit 23 m und die Wellenhöhe mit 14 m für die größte Welle im Zeitraum von

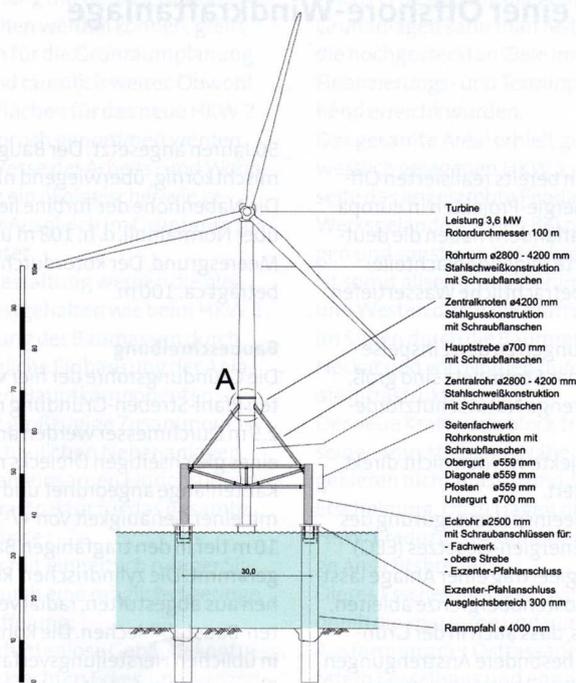
50 Jahren angesetzt. Der Baugrund ist gemischtkörnig, überwiegend nicht bindig. Die Nabenhöhe der Turbine liegt 80 m über Normalnull, d. h. 103 m über dem Meeresgrund. Der Rotordurchmesser beträgt ca. 100 m.

Baubeschreibung

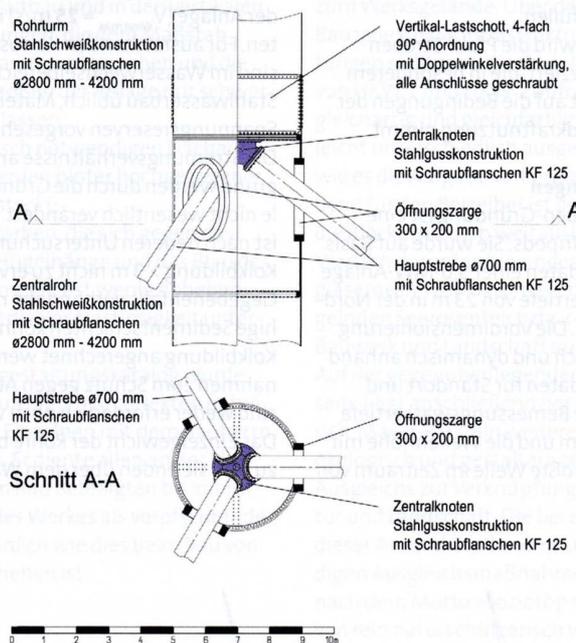
Die Gründungsrohre der hier vorgestellten Pfahl-Streben-Gründung mit ca. 2,5 m Durchmesser werden an den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks mit 30 m Kantenlänge angeordnet und senkrecht mit einer Genauigkeit von $\pm 0,30$ m ca. 10 m tief in den tragfähigen Baugrund gerammt. Die zylindrischen Rohre bestehen aus abgestuften, radial verschweißten Baustahlblechen. Die Rohre können in üblichen Herstellungsverfahren im Binnenland gefertigt und an einem Hafenstandort ausgeliefert werden. Der Abstand der Gründungsrohre ist so gewählt, dass Zugspannungen in den Bodenverankerungen während des Betriebs der Anlage ($V_{\text{Windmax}} = 25$ m/s) nicht auftreten. Für ausreichenden Korrosionsschutz sind im Wasserwechselbereich, wie im Stahlwasserbau üblich, Material- bzw. Spannungsreserven vorgesehen. Die Strömungsverhältnisse am Meeresgrund werden durch die Gründungspfähle nicht wesentlich verändert. Deswegen ist nach neueren Untersuchungen eine Kolkbildung > 3 m nicht zu erwarten. Gegebenenfalls vorhandene nichttragfähige Sedimentschichten können auf diese Kolkbildung angerechnet werden. Maßnahmen zum Schutz gegen Auskolkung sind weder erforderlich noch vorgesehen. Das Einzelgewicht der Rohre beträgt bis zu 60 t, sie enden über dem Wasserstand



2 Gründungsvarianten



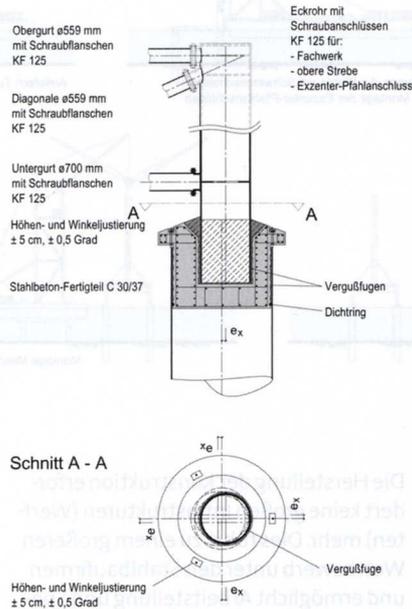
3 Hauptabmessungen



4 Zentralknoten

bei ca. 2 m über NN und werden durch Einrammen oder Bohren unter Zuhilfenahme einer schwimmenden Schablone von einem Arbeitsschiff aus platziert. Exzenterköcher aus Stahlbeton sichern die Kraftübertragung vom Strebenwerk zum Gründungsrohr. Sie gleichen die Herstellungstoleranzen aus. Die Exzenterköcher werden in die Gründungsrohre eingehängt, ausgerichtet und kraftschlüssig mit diesen vermörtelt. Das Strebenwerk wird oberhalb der Bemessungswelle angeordnet und besteht aus seitlichen Fachwerken, den Eckrohren für die Verbindung mit den Gründungsrohren, dem Zentralrohr für den Anschluss an den Rohrturm sowie den Hauptstreben, die den Rohrturm im Zentralknoten gegen die Windlasten abstützen. Ein liegendes Fachwerk in der Bodenebene mit einer schweren Drehmomentenstütze sorgt für die räumliche Tragweise. Das Strebenwerk bildet die Unterkonstruktion für die gesamte technische Ausrüstung. Das Strebenwerk aus Rohren von ca. 0,70 m Durchmesser ist mit seiner Unterkante an dem betrachteten Standort 11 m über dem Bemessungswasserstand angeordnet. Damit wird das Strebenwerk auch bei maximalem Seegang nicht von Wellenlasten getroffen. Um den Rohrturm steif auszubilden, wird dieser von den Hauptstreben in Höhe des unteren Rotorspitzendurchgangs im Zentralknoten abgestützt. Der konische Rohrturm erhält dadurch einen Durchmesser von maximal 4,20 m, um straßentransporttauglich zu bleiben. Er geht in das Zentralrohr mit gleichem Durchmesser über. Die Strebenkonstruktion wird aus geschweißten oder warmgefertigten Rohren hergestellt. Die Streben werden nicht unmittelbar in den Knoten auf die Eckrohre geführt, sondern enden außerhalb der Knotengeometrie auf einem Ringflanschstoß. Diese Konstruktionsweise bringt folgende Vorteile:

- Die Fachwerkrohre können je nach Ausführung der Flanschstöße für eine Kerbfallklasse von KF 125 bzw. KF 160 nach EC 3 ausgelegt werden. Dies ermöglicht eine Reduzierung der Rohrabmessungen, wodurch die Rohrsteifigkeit im statisch unbestimmten Fachwerk abnimmt, was zu einer Reduzierung der Fachwerknebenspannungen in den Knotenanschlüssen führt.
- Es wird eine aufwändige, handwerklich anspruchsvolle Verschneidung der (langen) Streben mit den entsprechenden Anforderungen an die Ermüdungsfestigkeit der Schweißnähte vermieden. Voll verschweißte Gründungskonstruktionen müssen unter erheblichen Schutzmaßnahmen erstellt werden. Diese Anforderungen begrenzen die Auswahl an Fertigungsstandorten und -unternehmen.
- Die Fachwerkknoten werden unabhängig von den Rohrstreben konstruiert und gefertigt. Die Dimensionierung erfolgt aus den lokalen Beanspruchungen. Schwere Schweißkonstruktionen sind bei Einzelstückfertigung genauso möglich wie Stahlgusskonstruktionen bei einer Serienfertigung. Die Einzelbauteile können im Gegensatz zu anderen Tragwerkslösungen (Tripod, Monopile) vollständig straßentransporttauglich ($d < 4,2\text{ m}$) ausgelegt werden. Dadurch stehen für die Herstellung der Einzelteile alle vorhandenen Turmbaukapazitäten im Binnenland und an entfernten Orten zur Verfügung. Es sind lediglich ein oder mehrere Montageplätze am schiffbaren Ufer erforderlich, die mit Mobilkränen ausgerüstet werden. Durch diese Maßnahme reduzieren sich die logistischen Aufwendungen erheblich, es können Unternehmen mit speziellen Kenntnissen (Gusskonstruktionen) kostengünstig in die Produktion eingebunden werden. Das Strebenwerk soll mit allen erforderlichen Anbauteilen inklusive des Rohrturmes und der Eckrohre an Land oder auf dem Transportponten vormontiert und oberflächenbeschichtet und danach auf einem Transportponten zur Errichtungsstelle eingeschwommen werden. Mit Hil-



5 Exzenterkocher

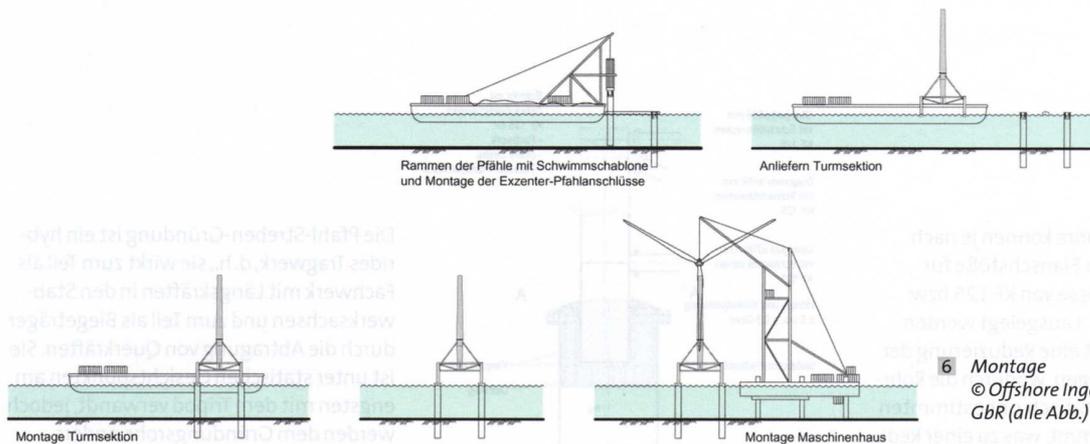
fe eines Hubtisches oder durch Fluten des Pontons werden die Fußstücke der Eckrohre in die Exzenterkocher eingeführt. Die elektrische Ausstattung (Trafo, Steuerung, Kommunikation) sowie die Nebenausrüstung werden in einem Container vormontiert und in standardisierten Aufnahmen demontierbar auf dem Strebenwerk angesetzt. Dieses Verfahren reduziert die Montagezeit. Der Zugang für Wartungspersonal erfolgt über einen Sprossengang an den Eckrohren. Zum Schutz der Konstruktion und als Anleghilfe werden hier Reibpfähle angeordnet. Laufgänge und Plattformen werden auf den Rohren des Strebenwerks angeordnet. Der Zugang in den Turm liegt im unteren Bereich des Zentralrohres, wo die statischen Beanspruchungen vergleichsweise gering sind.

Statisches und dynamisches Verhalten

Das Tragwerk von Offshore-Windkraftanlagen muss insbesondere folgenden Gegebenheiten Rechnung tragen:

- Die Horizontalbeanspruchung ist wesentlich höher als die Vertikalkräfte.
- Die dynamischen Beanspruchungen aus der Windanregung übersteigen die aus der Wellenanregung überproportional.

Die Pfahl-Streben-Gründung ist ein hybrides Tragwerk, d. h., sie wirkt zum Teil als Fachwerk mit Längskräften in den Stabwerksachsen und zum Teil als Biegeträger durch die Abtragung von Querkraften. Sie ist unter statischen Gesichtspunkten am engsten mit dem Tripod verwandt, jedoch werden dem Gründungsrohr, anders als beim Tripod, Biegemomente sowohl am Kopf als auch am Fuß zugemutet. Die Gründungsrohre erhalten ebenfalls sowohl Längskräfte (wie die Ankerpfähle beim Tripod) als auch Querkräfte und Biegemomente (wie beim Monopile). Durch die geringen Abmessungen der Gründungsrohre sind die Belastungen aus den Wellenkräften gegenüber einem Monopile bzw. dem Rohrturm oberhalb eines Tripods erheblich reduziert. Der Rohrturm der Pfahl-Streben-Gründung wird sehr weit oben abgestützt, so dass sich durch die geringe freie Länge dessen Biegebeanspruchung ebenfalls reduziert. Durch die Einführung eines Rohrstoßes an den Rohrknoten können die Knoten unmittelbar für deren Beanspruchungen bemessen werden, ohne die Dimensionierung des Stabwerks zu beeinflussen. Alle Nebenspannungen gehen wegen der dynamischen Auslegung in die Bemessung der Knotenkonstruktion ein. Die Pfahl-Streben-Gründung sind wegen des gemischten statischen Systems geringe Kopfverformungen (Verdrehungen) auf. Sie betragen im Zustand maximaler Belastung ca. 1.000 mm horizontal bzw. 0,020 rad Kopfverdrehung. Die dynamischen Voruntersuchungen ergaben große Steifigkeiten der Konstruktion (erste Eigenfrequenz ca. 0,5 Hz). Hierbei sind die elastischen Bodensteifigkeiten schon wirklichkeitsnah angesetzt. Steife Fundamentkonstruktionen sind aus zwei Gründen positiv: Sie ermöglichen den Betrieb der Windturbine in ihrem optimalen Drehzahlbereich, was einen hohen Ertrag zur Folge hat. Außerdem verringern steife Konstruktionen die mechanischen Beanspruchungen der Maschinenausrüstung, z. B. des Getriebes, durch Schwingungen und erhöhen dadurch die Lebensdauer.



6 Montage
© Offshore Ingenieurgesellschaft
GbR (alle Abb.)

Errichtungskosten

Die Kosten variieren je nach Lage des Bauplatzes, den örtlichen Bedingungen und der Anzahl der auszuführenden Anlagen, da die Bereitstellungskosten für die Baustelleneinrichtung hoch sind. Als Ansatz für die Aufwendungen dienen die erforderlichen Konstruktionsmassen:

- Gründungspfähle $3 \times 60 \text{ t} = 180 \text{ t}$
- Strebenwerk inklusive Zentralrohr ca. 240 t
- Rohrturm 120 t

Bei weiteren Untersuchungen kann die Pfahl-Streben-Gründung effektiv optimiert werden. Es besteht die Möglichkeit, preiswertes Material (Gründungsrohre) und teures Material (Strebenwerk) zu differenzieren und je nach Auslegung zu substituieren. Die Konstruktion ist voll serientauglich, da nur die Gründungsrohre den einzelnen Standorten eines Windparks angepasst werden müssen. Durch diese Möglichkeit sind nach der Untersuchung des Baugrunds an einem Einzelstandort keine umfangreichen Bauarbeiten mehr erforderlich. Dies reduziert das Ausführungsrisiko.

Die Herstellung der Konstruktion erfordert keine großen Infrastrukturen (Werften) mehr. Dies führt zu einem größeren Wettbewerb unter den Stahlbauunternehmen und ermöglicht Arbeitsteilung und Spezialisierung. Die Herstellung der Komponenten kann durch deren Transportfähigkeit unabhängig vom Bauplatz erfolgen. Die Reduzierung der Gesamtbaukosten unter Ausnutzung aller technischen und organisatorischen Möglichkeiten ist Aufgabe eines Prozesses unter Beteiligung vieler Fachleute. Dabei sind die in den gewählten Verfahren implementierten Risiken genau zu bewerten und zu minimieren. Dies gilt für Risiken in der Montage (Fehlzeiten, Wetterrisiken), in der Wartungsanfälligkeit (Reparaturhäufigkeiten) und in der Finanzierung. Je geringer die Risiken, desto geringer die Risikoauflage.

Fazit

Insgesamt kennzeichnen die hier vorgestellte Pfahl-Streben-Gründung folgende Vorteile

- keine Wellen- und Eiskräfte im Strebenwerk,
- geringes Gewicht der Überwasserkonstruktion,
- Gründungsrohre mit geringem Durchmesser und Gewicht, dadurch einfaches Einbringen durch Rammen oder Bohren,
- geringe Produktionskosten der Gründungsrohre als geschweißtes Rohr,

- straßentransporttaugliche Einzelteile ($d < 4,2 \text{ m}$), dadurch vereinfachte Logistik und große Produktionskapazität möglich,
- Arbeitsteilung und Spezialisierung in der Vorfertigung möglich,
- preiswerter Zusammenbau des Strebenwerkes mit Mobilkran am Hafendockstandort,
- Montage des Strebenwerkes ohne Hubinsel von einem Ponton aus möglich,
- Hubinsel nur für die Montage von Maschinenhaus und Rotor erforderlich,
- hohe Steifigkeit der Gesamtkonstruktion, $f_1 = 0,50 \text{ Hz}$,
- geringer Eingriff in den Meeresboden,
- unwesentliche Kolkbildung durch geringe Pfahldurchmesser,
- einfache Anpassung der Konstruktion an unterschiedliche Wassertiefen und Baugründe erlaubt günstige Serienfertigung,
- keine Unterwasserarbeiten bei Montage und Wartung.

Autor:

Dipl.-Ing. Conrad Hansen
Offshore Ingenieurgesellschaft GbR,
Kiel