

# Entwurf einer Caisson-Schwergewichtsgründung für einen Offshorewindpark in der Nordsee

U. Pfeiffer, M. Voß

## Einleitung

Die meisten der bisher innerhalb Europas erstellten Offshore-Windenergieanlagen sind durch ihre Nähe zur Küste und die damit verbundenen geringen Wassertiefen von weniger als 20 m gekennzeichnet. Im Gegensatz dazu werden die gegenwärtig in Deutschland geplanten Windparks in der Nord- und Ostsee bis zu 90 km von der Küste entfernt in Wassertiefen von 20 m bis zu 50 m liegen. Die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen kann nur dann gewährleistet werden, wenn eine Optimierung von Entwurf, Herstellung, Transport und Installation der Anlagen verbunden mit einem möglichst hohen Grad der seriellen Vorfertigung gelingt. Dies gilt insbesondere für den Gründungskörper als eine der wesentlichen standortabhängigen Komponenten einer Offshore-Windenergieanlage.

Die zusätzlich zu den Windlasten zu berücksichtigenden hydrodynamischen Einwirkungen aus Seegang, Meeresströmung und Eisdruck erfordern robuste und an die gestiegenen Beanspruchungen angepasste Gründungskörper. Für den Einsatz in der Nord- und Ostsee werden zurzeit im Wesentlichen sechs unterschiedliche Gründungstypen diskutiert:

- Tripile
- Tripod
- Jacket
- Monopile
- Schwergewicht, selbstschwimmend (Caisson)
- Schwergewicht, nicht selbstschwimmend

Monopile-Gründungen stoßen bei den genannten Randbedingungen hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und Ausführbarkeit bereits an ihre Grenzen. Ungeklärt ist, ob Tripod-, Jacket- und Schwergewichtgründungen für die hohen Beanspruchungen aus den gegenwärtig diskutierten 5 MW-Anlagen für oben skizzierte Wassertiefen mit angemessenen finanziellen Mitteln realisierbar sind.

Um zur Klärung dieser Frage beizutragen,

werden im Folgenden zunächst die beim Bau einer Schwerkraftgründung für eine 5 MW-Windenergieanlage zu beachtenden technischen Aspekte dargestellt und darauf aufbauend die zu erwartenden Kosten und die damit eng verbundenen baubetrieblichen bzw. logistischen Aspekte beleuchtet.

Die Kernpunkte der vorgestellten Schwergewichtsgründung sind:

- Fundamentkörper (kreisförmig oder polygonal) aus Stahlbeton / Spannbeton mit  $\varnothing$  30 bis 33 m,  $h = 7$  bis 9 m
- Zentralschaft aus Stahl mit ca.  $\varnothing$  6,0 m und variabler Wandstärke
- Herstellung des Fundamentes an der Kai-kante auf einem Ponton, wahlweise auch im Trockendock oder Baudock
- Fundament ist selbstschwimmend und kann entweder per Ponton oder per Schlepper (selbstschwimmend) zur Lokation gebracht werden
- Absenkung des Fundamentes an der Lokation erfolgt mittels Schwimmkörpern, Schwimmkran oder anderweitiger Offshore-Technik
- Ballastierung des Fundamentes durch Einpumpen von Sand und Installation eines Kolkschutzes

Die wesentlichen Erkenntnisse, aber auch zusätzliche Fragestellungen, die sich aus der Entwurfsbearbeitung ergeben, sollen nachfolgend diskutiert werden.

Der Beitrag in diesem Heft beschäftigt sich vorwiegend mit dem Entwurf des genannten Fundamenttyps. In einem zweiten Teil in einer der folgenden Ausgaben dieser Zeitschrift werden schwerpunktmäßig die baubetrieblichen und logistischen Herausforderungen beleuchtet.

## Eingangswerte

### Baugrund

Der weitaus größte Teil der von den Autoren bearbeiteten Windparks befindet sich in der Nordsee in der AWZ, aber auch innerhalb der 12 sm-Zone. Daher fokussieren sich die Untersuchungen auf Standorte innerhalb der Deutschen Bucht, deren Baugrundverhältnisse sich häufig wie folgt idealisieren lassen:

- Vorzugsweise holozäne und pleistozäne Sandablagerungen (Fein- und Mittel-

sande), teilweise schluffige Einlagen, in tieferen Lagen auch Grobsande oder Kiese, teilweise Geschiebe

- Gebiete häufig durch eiszeitliche oder postglaziale Rinnen durchzogen, Verfüllung der Rinnenstrukturen mit Sanden deutlich geringerer Lagerungsdichte als die der umliegenden Schichten, teilweise Verfüllung mit bindigen Ablagerungen
- Teilweise mehrere Meter mächtige Ablagerungen bindiger Schichten (z.B. Lauenburger Ton)
- Marine Deckschicht, bis zu 3 m dick, aus locker gelagerten Sanden mit Beimengungen aus dem Benthos

Werden unterschiedliche Standorte sowie Schichten mit variierender Lagerungsdichte berücksichtigt, so ergeben sich im Mittel Scherfestigkeiten zwischen  $\phi = 32,5^\circ$  und  $\phi = 37,5^\circ$ , die für eine Flachgründung vergleichsweise gute Voraussetzungen bieten.

Für den Entwurf einer Schwergewichtsgründung ist die obere marine Deckschicht sehr bedeutsam, da sich diese Schicht durch die Wirkung von Wellen und Strömungen großräumig umlagern kann. Weiterhin ist es möglich, dass diese Schicht auf Grund der meist deutlich geringeren Scherfestigkeit maßgebend für den Gleitnachweis wird. Es ist daher zu prüfen, ob diese Schicht bei der Herstellung der Gründungsebene entfernt werden muss oder ob durch anderweitige Maßnahmen (z.B. Vergrößerung der Aufstandsfläche, Nutzung von Spundwandschürzen o.ä.) die möglichen ungünstigen Auswirkungen kompensiert werden können.

### Bemessungswasserstand, Wellen

Als Bemessungswasserstand ist die höchste astronomische Tide zuzüglich dem Anteil aus Windstau (Sturmflut) anzusetzen. Für typische Standorte in der Deutschen Bucht ergeben sich demnach in etwa Werte zwischen LAT +2,50 m und LAT +3,50 m.

Die maßgebende Wellenhöhe für die Bemessung der Gründung ist deutlich abhängig vom Standort (Wassertiefe, Brecherkriterium, Fetch-Länge etc.). Die Höhe der Bemessungswelle (50-Jahres-Welle) im Bereich der Nordsee liegt zumeist zwischen 14 und maximal 22 m. Für den dargestellten Entwurf wurde eine maximale Wellenhöhe

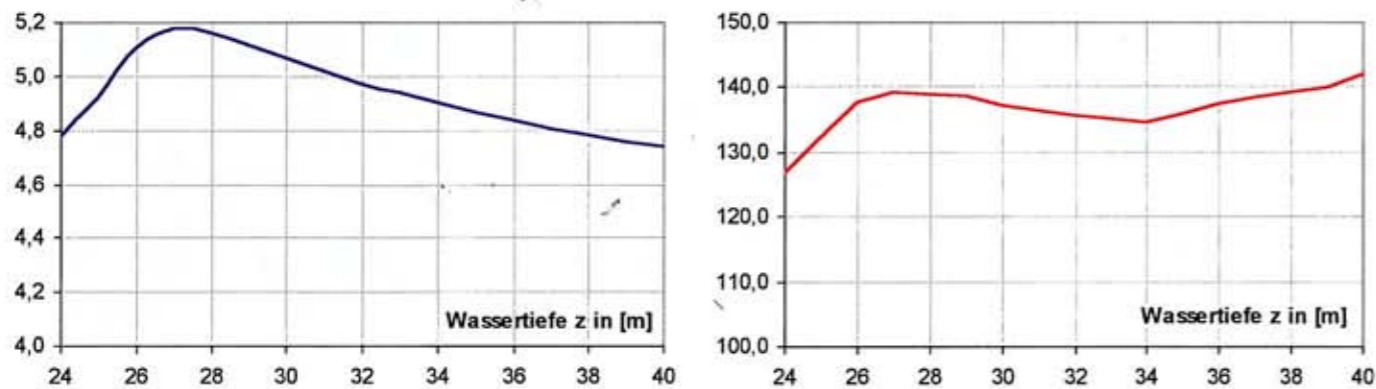


Abb. 1: Horizontalkraft und Biegemoment für Stahlschaft  $\varnothing 6,0$  m,  $H_{max} = 18$  m,  $T_p = 13,8$  s

he  $H_{max} = 18$  m bei einer Wellenperiode von  $T_p = 13,8$  s (Peak Wave Period) zu Grunde gelegt. Strömungen, vorzugsweise Tideströmungen, treten in der Größenordnung von 0,5 bis 1,5 m/s auf und können in erster Näherung bei der Dimensionierung des Fundamentes vernachlässigt werden.

**Mariner Bewuchs**

Die dauernd im Wasser bzw. innerhalb der Wasserwechselzone befindlichen Teile der Gründung werden von marinem Bewuchs überzogen, der in Abhängigkeit vom Standort Dicken von 50 bis 150 mm erreichen kann. Dadurch vergrößert sich einerseits der für die Wellenkräfte wirksame Durchmesser des Fundamentes (Stahlrohr, Gründungskörper), andererseits beeinflusst die raue Oberfläche die Strömungsverhältnisse und damit die  $C_D$ - und  $C_M$ -Beiwerte für die Ermittlung der Wellenlasten sehr deutlich. Regelungen dazu befinden sich im DNV-OS-J101 [2].

**Wassertiefe**

Auch wenn der Meeresboden im Allgemeinen vergleichsweise eben ist, so ergeben sich insbesondere bei größeren Windparks recht deutliche Unterschiede für die Wassertiefe. Das gezeigte Fundament wurde ursprünglich für Wassertiefen zwischen LAT -20 und LAT -32 m entwickelt, wobei aus den durchgeführten Untersuchungen abge-

leitet werden kann, dass sich keine wesentlichen Einschränkungen für noch größere Wassertiefen ergeben werden. Um die Entwurfsbearbeitung zu optimieren, kann eine Einteilung der Fundamente in einige wenige Gruppen sinnvoll sein, insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Abmessungen des Fundamentes nur sehr geringfügig an unterschiedliche Tiefen angepasst werden müssen.

**Belastungen**

Die Belastung in Höhe der Gründungsebene setzt sich aus folgenden, für den Nachweis relevanten Anteilen zusammen:

- Eigengewicht der gesamten Konstruktion (Rotor, Gondel, Stahlurm, Stahlbetongründung inkl. Sandfüllung), abzüglich Auftrieb
- Horizontalkraft aus Wind auf den Rotor und den Turmschaft
- Horizontalkraft aus der Welle auf den Turmschaft
- Horizontalkraft aus der Welle auf die Gründung
- Vertikalkraft aus der Welle auf die Gründung, teilweise exzentrisch wirkend, mit wechselndem Vorzeichen

Die Kräfte aus der Turbine werden üblicherweise vom Anlagenhersteller in umfangreichen Lasttabellen vorgegeben. Beispielsweise betragen die maßgebenden Schnittgrößen in Höhe des Transition Piece

ca.  $H_{sd} = 2$  MN und  $M_{sd} = 150$  MNm für den Grenzzustand der Tragfähigkeit für eine typische 5 MW-Anlage.

Die Ermittlung der Wellenlasten auf den Schaft sowie auf den Gründungskörper ist für einen wirtschaftlichen und sicheren Entwurf der Gründung von zentraler Bedeutung. Auf Grund der Ausprägung bzw. Form der Welle müssen meistens Wellentheorien höherer Ordnung zum Einsatz kommen. Gemäß den Richtlinien des Germanischen Lloyds oder des DNV [2] wurde für die gezeigte Gründung die Lastermittlung mittels »Stream Function Theory« (11. Ordnung) durchgeführt, was nur noch computergestützt möglich ist (z. B. mit dem Programm Waveloads [1]) oder im Einzelfall durch den Einsatz normierter Diagramme. Die Überlagerung der Widerstandskraft und der Trägheitskraft erfolgt mittels der Morison-Gleichung, die für hydrodynamisch transparente Strukturen wie den Stahlschaft gilt.

Der Gründungskörper mit einem Durchmesser von ca. 30 bis 33 m beeinflusst hingegen die Wellenform, so dass die Diffraktionstheorie zum Einsatz kommen sollte. Mit geringen Vereinfachungen können so die Kräfte in horizontaler und vertikaler Richtung sowie alle daraus resultierenden Biegemomente mit ausreichender Genauigkeit und als Funktion über die gesamte Wellenperiode ermittelt werden.

**Ausnutzungsgrade über die Wellenperiode**

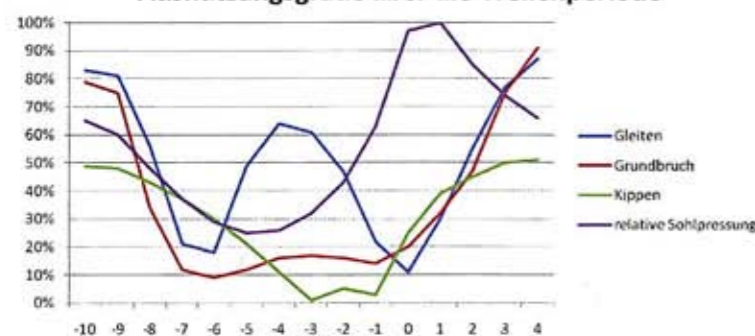


Abb. 2: Ausnutzungsgrade über die Wellenperiode für Wassertiefe  $z = 32$  m

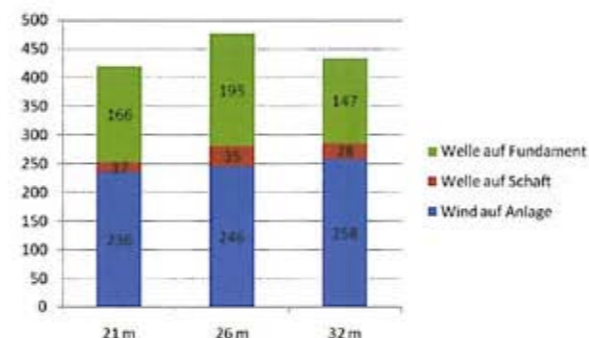


Abb. 3: Anteile am Bemessungsmoment [MNm] in der Gründungssohle aus Wind- und Wellenlasten zum maßgebenden Zeitpunkt in Abhängigkeit von der Wassertiefe

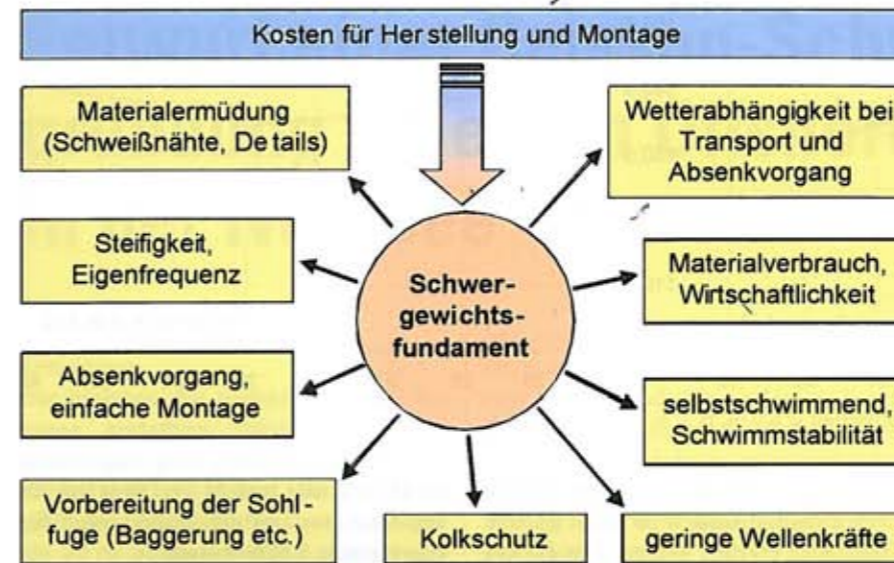


Abb. 4: Aspekte für Variantenuntersuchung

Ein weiterer sehr wesentlicher Einflussparameter ist der marine Bewuchs, da einerseits der Durchmesser vergrößert wird (beim Stahlschaft zum Beispiel von  $\varnothing 6,0$  m auf ca.  $\varnothing 6,2$  m) und sich andererseits auf Grund der höheren Rauigkeit deutlich geänderte  $C_D$ - und  $C_M$ -Beiwerte ergeben.

Die angenetzte Wellentheorie kann die reale Form der Einzelwelle bis kurz vor dem Brechen der Welle vergleichsweise gut berücksichtigen. Da die Orbitalgeschwindigkeiten und Beschleunigungen der Wasserteilchen kurz vor dem Brechen deutlich zunehmen, ergeben sich für Wassertiefen bis ca. 27 m sehr hohe Wellenkräfte, um für Standorte mit größeren Tiefen bei gleicher Wellenhöhe abzunehmen. Der gleiche Effekt ergibt sich auch für das Stahlbetonfundament, so dass das für die geotechnischen Nachweise maßgebende Biegemoment in der Sohlfuge mit zunehmender Wassertiefe nur unterproportional zunimmt bzw. für gewisse Parameter sogar geringfügig abnimmt. Daraus resultiert, dass für unterschiedliche Wassertiefen ein sehr ähnliches Fundament benutzt werden kann.

Ein weiterer Aspekt ergibt sich aus der Betrachtung der geotechnischen Nachweise Grundbruch, Gleiten und Kippen. Für diese Nachweise ist in jedem Fall das Verhältnis aus Moment und Vertikalkraft

entscheidend, wobei höhere Normalkräfte die Sohlfuge überdrücken und daher meistens günstig wirken. Demzufolge treten die maßgebenden Beanspruchungen nicht beim Durchlaufen des Wellenberges auf (max. H-Kräfte), sondern einige Sekunden später. Zu diesem Zeitpunkt ergeben sich abhebende Vertikalkräfte aus der Welle auf das Betonfundament, jedoch noch ein vergleichsweise großes Biegemoment. Daher wurden für das gezeigte Schwergewichtsfundament die Nachweise über die volle Wellenperiode in Abständen von  $\Delta t = 1$  s durchgeführt. Die Abbildungen 2 und 3 zeigen die Ausnutzungsgrade der verschiedenen geotechnischen Nachweise sowie die Anteile der Biegemomente in der Sohlfuge zum maßgebenden Zeitpunkt bei ca.  $t = 4$  s.

**Variantenuntersuchungen**

Für einen anforderungsgerechten Entwurf des Fundamentes wurden umfangreiche Variantenstudien durchgeführt, deren wesentliche Aspekte in der folgenden Grafik dargestellt werden.

Kernpunkt des vorgestellten Fundamententwurfes ist die Schwimmfähigkeit, so dass sich Zwischenlagerung, Transport und Montage deutlich vereinfachen. Daher musste eine möglichst leichte und robuste

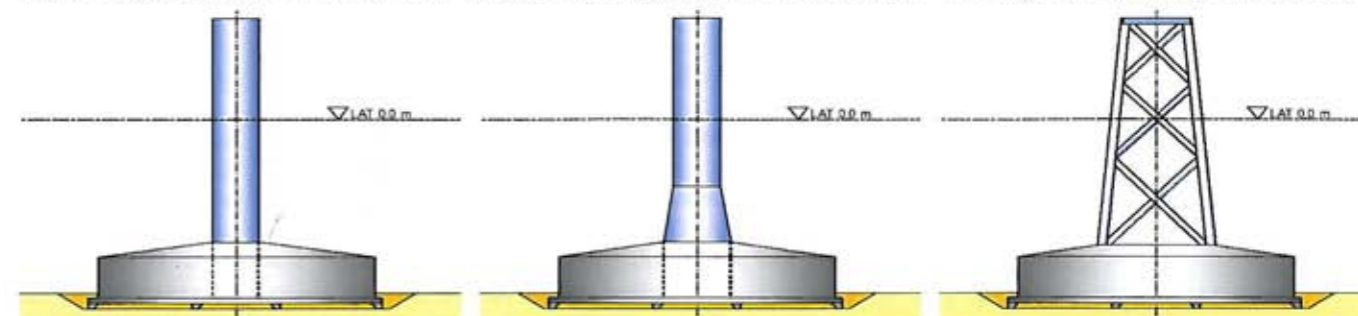


Abb. 6: Variantenstudie für Turmschaft



Abb. 5: Modell im Maßstab 1:100 mit Schwimmkörpern für Test des Absenkvorgangs

Fundamentstruktur mit Fokussierung auf die Schwimmstabilität entworfen werden. Um die dazu erforderlichen Berechnungen auf einfache Weise zu prüfen und um weitere Erkenntnisse über die Gründung und Schwimmfähigkeit zu erhalten, wurde ein Modell im Maßstab 1:100 erstellt und die Schwimmstabilität sowie mehrere Varianten für den Absenkvorgang ausführlich getestet.

Für das Fundament mit leeren Kammern ergibt sich eine Eintauchtiefe von ca. 7,0 m bei einem Freibord von ca. 1,0 m. In diesem Zustand weist das Fundament eine sehr hohe Schwimmstabilität auf, so dass bei der schwimmenden Zwischenlagerung oder beim Transport auch etwas größere Wellen (ca.  $H_{max} = 3$  bis 4 m) auftreten können.

Beim Absenkvorgang verringern sich die stabilisierenden Kräfte jedoch deutlich, so dass Absenkhilfen in Form von Schwimmkörpern, der Einsatz eines Schwimmkrans oder anderweitiger Offshore-Technik erforderlich sind.

Im Rahmen der Variantenstudie wurde die äußere Form des Fundamentes variiert, um die stabilisierenden Kräfte beim Absenkvorgang zu erhöhen. Zwar existieren Fundamentformen, die ein Absenken ohne weitere Hilfsmittel nur durch das Einpumpen von Wasser erlauben, jedoch ergeben sich auf Grund deutlicher Mehraufwendungen für Stahl und Stahlbeton keine wirtschaftlich konkurrenzfähigen Entwürfe.

Weitere Untersuchungen wurden für den aufgehenden Stahlurm durchgeführt, für den folgende Varianten geprüft wurden:

- Stahlrohr mit konstantem Außendurchmesser, variable Wandstärke (wie Monopile)
- Stahlrohr mit veränderlichem Außendurchmesser, variable Wandstärke
- Jacket-ähnliche Struktur

Grundlegend sollte der Durchmesser des Stahlrohres möglichst klein gewählt werden, um die Wellenkräfte auf die Gründung zu minimieren. Andererseits sind Wandstärken jenseits von 100 mm schwierig herzustellen und bieten ein vergleichsweise schlechtes Kosten-Nutzen-Verhältnis. Daher ist es von Vorteil, den Durchmesser des Stahlrohres im hoch beanspruchten Bereich von 6,0 auf 7,0 m (o. ä.) zu vergrößern. Die höchste Beanspruchung ergibt sich im Einspannbereich innerhalb des Betonfundamentes, da neben dem Biegemoment eine sehr hohe Querkraft aus der Einspannung resultiert und vom Stahlrohr aufgenommen werden muss. Die Wellenkräfte erhöhen sich für den gevouteten Stahlschaft nur geringfügig, da die hohen Orbitalgeschwindigkeiten am Wellenberg auftreten und damit der maßgebende Anteil der Last am oberen Teil des Schaftes (Ø 6,0 m) in der Nähe der Wasseroberfläche angreift.

Alternativ dazu wurde eine Jacket-ähnliche Struktur untersucht, die zwar bezüg-

lich des Materialverbrauchs günstiger ist, jedoch sehr ähnliche Wellenkräfte wie das zuvor betrachtete Rohr mit 6,0 m Durchmesser liefert und auf Grund der vielen Schweißverbindungen schwieriger in der Herstellung ist. Damit wurde diese Variante verworfen und die in der Herstellung deutlich einfachere Variante mit dem gevouteten Stahlrohr weiter ausgearbeitet.

Weitere Untersuchungen wurden hinsichtlich der optimalen Einbindetiefe des Fundamentes getätigt. Um die geringen Scherfestigkeiten der marinen Deckschicht für den Gleitnachweis zu umgehen, ist eine Einbindung in den Baugrund von mindestens 2 bis 3 m sinnvoll. Gleiches gilt auch für den Grundbruchnachweis, der bei der genannten Einbindetiefe noch gewisse Reserven aufweist. Nachteilig ist jedoch, dass in diesem Fall Baggermaßnahmen notwendig sind, die in einer Wassertiefe von teilweise mehr als 30 m durchgeführt werden müssen. Übliche Baggerschiffe für Arbeiten in Häfen oder Zufahrtskanälen weisen häufig nur Arbeitstiefen von 20 oder 25 m auf, so dass die Verfügbarkeit von entsprechendem Equipment fraglich ist. Alternativ kann das Fundament auf den unvorbereiteten Baugrund aufgesetzt werden, wobei Spundwandschürzen in den Boden eindringen

und damit die rechnerische Bauwerkssohle für die geotechnischen Nachweise tiefer legen.

#### Zielentwurf

Der vorgestellte Entwurf kann auf einem Ponton an der Kaimauer vergleichsweise einfach erstellt werden, so dass die Arbeiten nicht nur durch hoch spezialisierte Baufirmen durchgeführt werden können, sondern auch von einer Vielzahl an qualifizierten mittelständischen Unternehmen des Ingenieurbaus. Damit ist über den Wettbewerb zwischen den Bauunternehmen eine kostengünstige und damit wirtschaftliche Ausführung gewährleistet.

Folgende Baustoffe sind vorgesehen:

- Beton C35/45, evtl. C40/50
- Betonstahl BSt 500 / evtl. vorgespannt (St 1570/1770)
- Stahlturm aus S235
- Kopfbolzendübel für Verankerung des Stahlrohres im Beton

Die kreisförmige Struktur des Fundamentes bietet aus Sicht der Tragwerksplanung deutliche Vorteile, da die beim Absenken durch den allseitig einwirkenden Wasserdruck auftretenden Ringdruckkräfte praktisch ohne Bewehrung abgetragen werden könnten.

Das Stahlbetonfundament besteht im Inneren aus 8 Kammern, die nach dem Absenken mit einem Sand-Wasser-Gemisch gefüllt werden. Die Wandstärken der Zwischenwände sowie der Decken- und Bodenplatte variieren je nach statischer Beanspruchung zwischen 0,4 und 0,7 m, wobei der Absenkvorgang mit noch luftgefüllten Kammern und einem von außen wirkenden Wasserdruck die maßgebende Belastung darstellen kann.

Auf der Unterseite der Bodenplatte bzw. seitlich umlaufend wird eine Stahlbeton- oder Spundwandschürze angeordnet, die in den Boden eindringt. Der verbleibende Zwischenraum wird vergROUTET, so dass ein

havierten Schiff (Öltanker) die Auswirkungen auf Mensch und Umwelt möglichst gering zu halten, sind Gründungsstrukturen so zu planen, dass die Schiffshaut möglichst wenig Schaden nimmt, die Schiffsladung nicht in die Umwelt austreten kann und Gondel und Rotor vom Schiff weg fallen [9]. Diese Forderungen werden von der vorgestellten Gründung sehr gut erfüllt, da sich der Zentralschaft im Falle eines Anpralls ähnlich kollisionsfreundlich wie ein Monopile verhält. Vereinfachende Untersuchungen unter Berücksichtigung der Ovalisierung des Querschnitts und des nichtlinearen Materialverhaltens wurden durchgeführt.

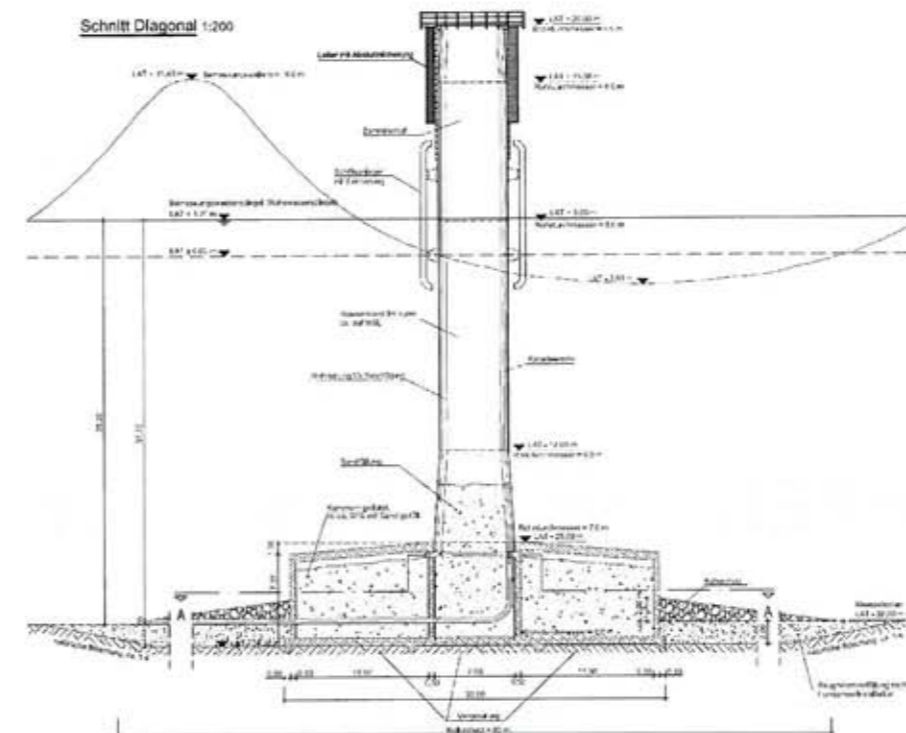


Abb. 7: Zielentwurf für Standort mit 32 m Wassertiefe

definierter Verbund zum Boden hergestellt wird. Inwieweit es möglich ist, auf die Vorbereitung des Untergrundes durch Baggern zu verzichten, ist Gegenstand weiterer Untersuchungen und hängt sehr stark von den Eigenschaften der lokal vorhandenen marinen Deckschicht ab.

Am Turmschaft werden bereits im Basishafen die wesentlichen Ausrüstungselemente montiert, so dass offshore nur noch geringe Nacharbeiten erforderlich sind. Der Ausgleich einer möglichen Schiefstellung des Fundamentes direkt nach Montage kann wahlweise durch das exakte Einmessen des oberen Flansches und spezielle Anfertigung des oberen Turmsegmentes erfolgen. Alternativ können Ausgleichsringe vorgesehen werden, die Schiefstellungen bis zu 1,0° ausgleichen.

Um im Fall einer Kollision mit einem

#### Zusammenfassung

Im vorliegenden Artikel wurde eine Schweregründung für Offshore-Windenergie-Anlagen (5 MW) und die wesentlichen Aspekte des Entwurfes vorgestellt. Die Vorteile der Gründung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- kostengünstige Herstellung auf einem Ponton an einer Kaimauer, hoher Grad der Vorfertigung
- Fundament ist für Zwischenlagerung und Transport zur Lokation schwimmfähig und auch bei größerem Wellengang schwimmstabil
- Absenkvorgang durch bewährte Offshore-Technik möglich (Schwimmkran)
- Fundamentabmessungen variieren nur sehr geringfügig mit größer werdender Tiefe

- kollisionsfreundliches Verhalten der Gründung bei Anprall Bemessungsschiff

In einer der folgenden Ausgaben dieser Zeitschrift werden in einem zweiten Teil schwerpunktmäßig die baubetrieblichen und logistischen Herausforderungen beleuchtet.

#### Literatur, Quellenangaben

- [1] Waveloads, Programm zur Ermittlung von Wellenlasten auf Rohre, Institute of Fluid Mechanics and Computer Applications in Civil Engineering, University of Hannover
- [2] DNV-OS-J101 - Offshore Standard Design of Offshore Wind Turbine Structures, Stand Oktober 2007
- [3] BSH-Standard - Konstruktive Ausführung OWEA, Stand 2007
- [4] BSH-Standard - Baugrunderkundungen, Mindestanforderungen für Gründungen für OWEA, Stand 2008
- [5] Peter Wagner: Meerestechnik - Eine Einführung für Bauingenieure, Berlin, Ernst & Sohn (1990)
- [6] Dipl.-Ing. M. Faenger: Der Rückbau der Ölplattformen Schwedeneck-See in der Ostsee, Tiefbau, Ausgabe 2/2003, Download unter (HYPERLINK <http://www.baumaschine.de/Portal/> [http://www.baumaschine.de/Portal/Tbg/2003/heft2/a066\\_072.pdf](http://www.baumaschine.de/Portal/Tbg/2003/heft2/a066_072.pdf))
- [7] Kohlhasse, S. - Ozeanographisch-seebauliche Grundlagen der Hafenplanung, Mitteilungen der Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 57 (1983)
- [8] The Offshore Installations (Safety Case) Regulations 2005
- [9] Florian Biehl: Rechnerische Bewertung von Fundamenten von Offshore Windenergieanlagen bei Kollisionen mit Schiffen, Stand 22.10.2004, TU-Harburg
- [10] Florian Biehl, Kollision Schiff - Offshore Windenergieanlage, Berechnung und Bewertung, Stand 16.04.2004, TU-Harburg
- [11] Florian Biehl, Rechnerische Bewertung des Risikos herabstürzender Gondeln von Offshore Windenergieanlagen bei Kollisionen mit Schiffen (2. überarbeitete Fassung), Stand 08.09.2008, TU-Harburg

Autoren:

Dr.-Ing. Uwe Pfeiffer  
Leiter Tragwerksplanung  
pfeiffer@sellhorn-hamburg.de  
Tel.: 040 / 36 12 01 - 74  
Dipl.-Ing. Manfred Voß  
Geschäftsführung,  
Leiter Konstruktiver Ingenieurbau  
voss@sellhorn-hamburg.de  
Tel.: 040 / 36 12 01 - 45  
Sellhorn Ingenieurgesellschaft mbH  
Teilfeld 5  
20459 Hamburg  
<http://www.sellhorn-hamburg.de>

## WERTE SCHAFFEN – WERTE HALTEN

HUESKER – Ingenieurösungen mit Geokunststoffen

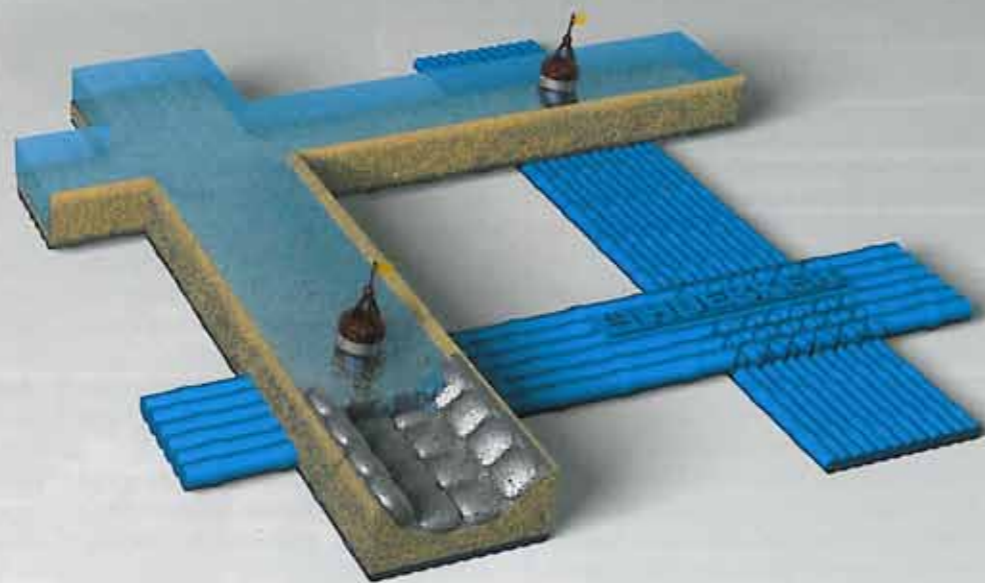
Erd- und Grundbau

Straßen- und Verkehrswegebau

Wasserbau

Der Einsatz von Geokunststoffen im Wasserbau ist vielfältig und weitverbreitet. Ob Verkehrswasserbau, Deichbau oder Insel- und Küstenschutz, die Gewebe, Vliesstoffe, Verbundstoffe oder Geogitter erfüllen je nach Anforderung unterschiedliche Aufgaben – wirtschaftlich, umweltfreundlich, sicher.

Umwelttechnik



[www.huesker.com](http://www.huesker.com)

HUESKER Ingenieure unterstützen Sie bei der Umsetzung Ihrer Bauprojekte. Verlassen Sie sich auf die Produkte und Lösungen von HUESKER.



HUESKER Synthetic GmbH · 48712 Gescher  
Tel.: + 49 (0) 25 42 / 70 11 - 0 · [info@huesker.de](mailto:info@huesker.de)

**HUESKER**