

---

# GRÜNDUNGEN VON OFFSHORE- WINDENERGIEANLAGEN

## - Ein Systemvergleich -

*Dr.-Ing. Kerstin Lesny*

### **EINLEITUNG**

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von Offshore-Windenergieanlagen haben gezeigt, dass gerade die Kosten für die Gründungsstrukturen einen hohen Anteil der Gesamtkosten ausmachen. Grund dafür ist, dass die Gründung an die jeweiligen Standortrandbedingungen angepasst werden muss. Eine serielle Vorfertigung ist nur bedingt möglich und ihre Errichtung vor Ort erfordert einen hohen logistischen und technischen Aufwand. Der Bau ausreichend wirtschaftlicher Gründungen ist also dringend erforderlich, wenn die Offshore-Windenergie in Deutschland erfolgreich etabliert werden soll.

Grundsätzlich sind Gründungsstrukturen für Offshore-Windenergieanlagen so zu dimensionieren und konstruktiv auszulegen, dass sie die Bauwerks- und Betriebslasten sicher in den Baugrund einleiten. Die nach dem derzeitigen Stand der Technik zur Verfügung stehenden Gründungsvarianten wie z. B. Jackets oder Tripods, Monopiles oder Schwergewichtsgründungen sind aus dem klassischen Offshore-Ingenieurwesen übernommen worden und haben sich zum Teil bereits für Offshore-Windenergieanlagen bewährt. Die bisherigen Erfahrungen haben aber auch gezeigt, dass nicht jede Bauform für jeden Standort gleichermaßen geeignet ist. Mitunter scheiden bestimmte Gründungsvarianten aus technischen und wirtschaftlichen Erwägungen von vornherein aus. In anderen Fällen sind alle Gründungsvarianten technisch gleichwertig, unterscheiden sich aber hinsichtlich ihrer Planungssicherheit und der Ausführungsrisiken.

Im vorliegenden Betrag werden praktisch bewährte Gründungskonzepte für Offshore-Windenergieanlagen in einem Systemvergleich einander gegenübergestellt. Dabei werden aus einer Analyse des jeweiligen Lastabtragungsverhaltens die Anforderungen an den Baugrund und die im Rahmen der Planung zu führenden Nachweise abgeleitet. Für typische Standortbedingungen in Nord- und Ostsee wird anschließend die Auswahl einer geeigneten Gründung diskutiert.

### **KLASSISCHE GRÜNDUNGSKONZEPTE**

Abb. 1 zeigt die nach dem derzeitigen Stand der Technik für Offshore-Windenergieanlagen geeigneten Gründungskonzepte. Dazu gehören das Schwergewichtsfundament, der Monopile und aufgelöste Strukturen wie Jackets oder Tripods, aber auch Saugrohrgründungen, die sich nach ihrer Installation je nach Auslegung und Abmessungen grundsätzlich wie ein Schwergewichtsfundament, ein Pfahl bzw. ein Zuganker verhalten.

Der vorliegende Beitrag beschränkt sich auf die Gründungsdimensionierung für das maßgebende Extremereignis und dabei vorrangig auf den Grenzzustand der Tragfähigkeit. Weitere Details zu den einzelnen Gründungsstrukturen und zu ihrer Bemessung sind z. B. in Lesny (2007) erläutert.

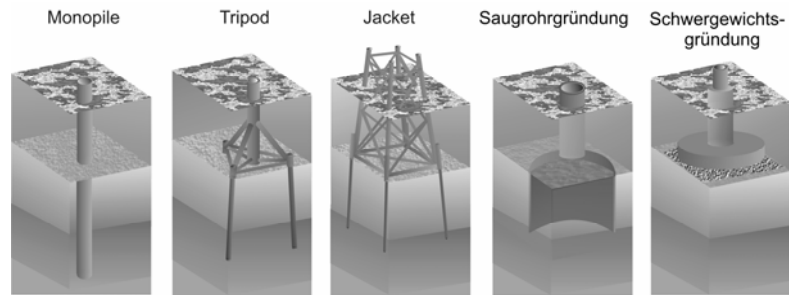


Abb. 1: Klassische Gründungskonzepte für Offshore-Windenergieanlagen

### Schwergewichtsgründungen

Bei Schwergewichtsgründungen werden die Bauwerkslasten über Normalspannungen  $\sigma_0$  und Schubspannungen  $\tau_0$  in der Sohlfläche auf den Baugrund abgetragen (Abb. 2). Der lastabtragende Bereich reicht bis in eine Tiefe, die dem ein- bis zweifachen Fundamentdurchmesser entspricht. Dies erfordert einen oberflächennah anstehenden, ausreichend tragfähigen Baugrund sowie eine gleichmäßige und ebene Aufstandsfläche, um einen kraftschlüssigen Verbund zwischen Fundament und Boden herstellen zu können.

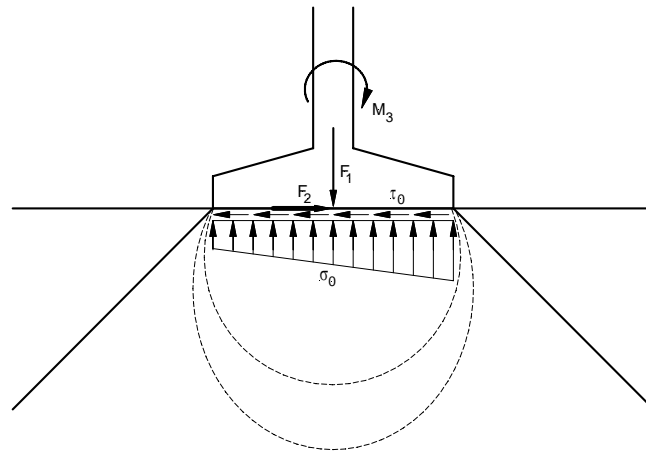


Abb. 2: Prinzip der Lastabtragung bei Schwergewichtsfundamenten

Bemessungsparameter sind der Durchmesser und die Höhe des Fundaments. Aufgrund der flächenartigen Lastabtragung beeinflusst die Fundamentfläche die Tragfähigkeit der Gründung in besonderem Maße. Schwergewichtsgründungen von Offshore-Windenergieanlagen sind Fundamente unter kombinierter Belastung, die neben geringen Vertikallasten hohe Horizontallasten und

Biegemomente, aber auch Torsionsmomente abtragen müssen. Im Vergleich zu konventionellen Bauwerken an Land resultiert daraus eine große Lastneigung, vor allem aber eine große Lastausmitte. Insbesondere große Lastausmitten führen dazu, dass nur ein begrenzter Teil der Fundamentfläche durch Druckspannungen belastet wird und damit effektiv an der Lastabtragung beteiligt ist. Eine ausreichende Tragfähigkeit der Gründung kann daher nur durch einen entsprechend großen Durchmesser gewährleistet werden. Die Lastausmitte lässt sich aber auch durch ein größeres Eigengewicht der Gründung reduzieren. Ein ausreichendes Eigengewicht ist außerdem erforderlich, um die mit zunehmender Wassertiefe steigenden Auftriebskräfte zu überdrücken. Aus diesem Grund korrespondiert der Fundamentdurchmesser immer mit einer bestimmten Fundamenthöhe, um eine ausreichende Standsicherheit der Gründung zu gewährleisten.

Aufgrund der kombinierten Belastung eines Schwergewichtsfundaments sind im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach GL (2005) in Verbindung mit DIN 1054 (2005) die Nachweise der Grundbruchsicherheit, der Gleitsicherheit, der Nachweis der Kippsicherheit sowie ggf. der Nachweis der Auftriebssicherheit zu führen.

Nach GL (2005) ist der Kippsicherheitsnachweis deutlich enger gefasst als nach DIN 1054 (2005). Danach ist bei einem Fundament ohne umlaufende Schürzen die Lastausmitte so zu begrenzen, dass nur Druckspannungen auf den Baugrund übertragen werden. Dadurch soll eine Unterspülung der Sohlfläche vermieden werden. Durch Anordnung von Schürzen kann aber neben dem reinen Erosionsschutz auch eine wirtschaftlichere Bemessung der Gründung erzielt werden, da eine größere Lastausmitte zulässig ist und durch den Einfluss der Einbindetiefe die Tragfähigkeit der Gründung erhöht wird.

### **Monopiles**

Bei einer Monopile-Gründung trägt ein einzelner Pfahl, in der Regel ein Stahlrohrpfahl, die gesamte Belastung in den Baugrund ab. Für die typischen, auf eine Offshore-Windenergieanlage einwirkenden Lasten heißt das, dass der Monopile überwiegend horizontal und auf Biegung beansprucht wird, da der Anteil der Vertikallasten an der Gesamtbelastung gering ist.

Horizontallasten und Biegemomente werden über seitliche Bettung in den Baugrund abgetragen, die in dem in Abb. 3 dargestellten Baugrundmodell durch Federn modelliert wird.

Im Rahmen des bekannten p-y Verfahrens (GL, 2005; Wiemann, 2007) wird die Federsteifigkeit durch eine nichtlineare Beziehung zwischen Bettungsspannung  $p$  und horizontaler Pfahlverschiebung  $y$  in Abhängigkeit von der Pfahlgeometrie, den Baugrundeigenschaften und der Tiefe unterhalb der Meeresbodenoberfläche definiert. Dieses Modell des elastisch gebetteten Balkens setzt voraus, dass der Pfahl im Boden ausreichend eingespannt ist, also keine Starrkörperverschiebungen auftreten. Die Bemessung eines Monopiles ist dann ein Gebrauchstauglichkeitsproblem, d. h. auch der Grenzzustand der Tragfähigkeit wird über ein Verformungskriterium definiert, da das Erreichen eines plastischen Grenzzustands über die gesamte Einbindelänge extreme Pfahlkopfverformungen zur Folge hätte. Bemessungsparameter sind der Pfahldurchmesser, seine Einbindelänge sowie die Wandstärke.

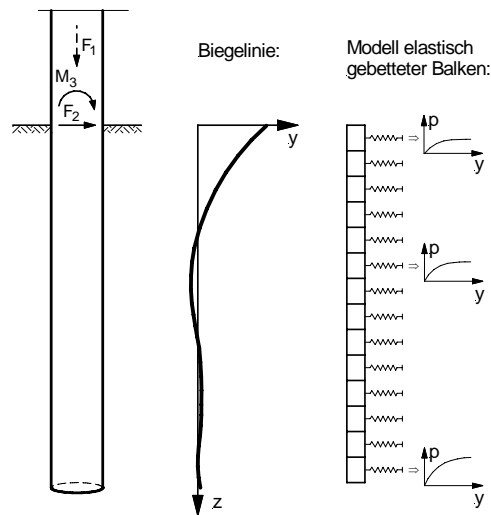


Abb. 3: Prinzip der Lastabtragung bei Monopiles

Das durch dieses Modell abgebildete Tragverhalten erfordert eine ausreichende Tragfähigkeit der oberflächennahen Schichten, die überwiegend an der Lastabtragung beteiligt sind. Sind diese Schichten kolkgefährdet, so ist ein ausreichender Kolkenschutz dringend erforderlich, da ein Kolk einer Reduzierung der Einbindelänge entspricht und sich das Tragverhalten damit deutlich verschlechtert.

### Tripods/Jackets

Im Gegensatz zu den vorgenannten Gründungsstrukturen wird bei Jackets oder Tripods durch Auflösung der Struktur eine Lastverteilung und damit eine Reduzierung der auf die einzelnen Gründungselemente einwirkenden Lasten bei hoher Steifigkeit der Gründungsstruktur (vor allem bei Jackets) erreicht. Auf diese Weise können die Gründungselemente so angepasst werden, dass ihre Abmessungen im Bereich bisheriger Erfahrungen liegen. Die Verankerung von Jackets oder Tripods im Boden erfolgt in der Regel über Pfähle, die die Belastung in größere Tiefen abtragen. Aus diesen Gründen sind sie auch für Standorte geeignet, an denen oberflächennah nur wenig tragfähige Bodenschichten anstehen.

Das Tragverhalten der Gründungselemente wird im Wesentlichen durch die axiale Druck-Zug Wechselbelastung charakterisiert (vgl. Abb. 4). Bemessungsrelevant wird dabei in der Regel die Zugtragfähigkeit, da der mobilisierbare Zugwiderstand des Bodens geringer ist als der Widerstand unter Druckbelastung. Eine fortlaufende Wechselbeanspruchung ist jedoch problematisch, da sie die Steifigkeit und letztendlich auch die Tragfähigkeit des Bodens beeinträchtigt. Es ist daher sinnvoll, Zuglasten durch entsprechenden Ballast zu überdrücken.

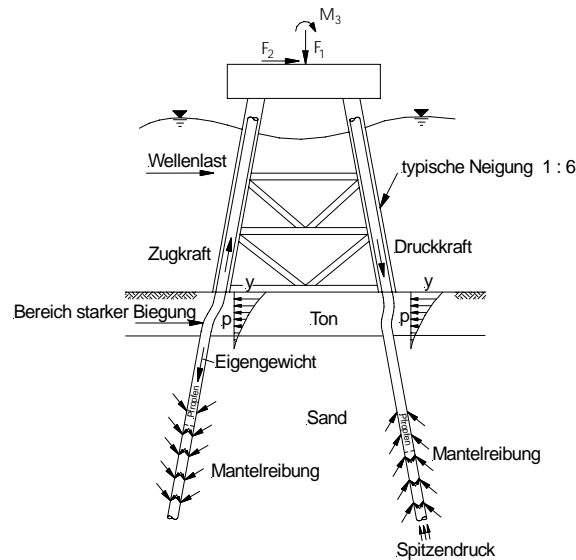


Abb. 4: Prinzip der Lastabtragung bei aufgelösten Strukturen

Die Lasteinleitung in den Baugrund erfolgt bei Druckpfählen über Spitzendruck und Mantelreibung bzw. nur über Mantelreibung bei Zugpfählen. Je nach konstruktiver Auslegung treten aber auch Horizontallasten und Biegemomente auf, die entweder über Schrägstellung der Pfähle oder über seitliche Bettung in den Baugrund eingeleitet werden müssen (vgl. Abb. 4). Aufgrund der relativ geringen Durchmesser der Pfähle bei großer Pfahlschlankheit ist aber die axiale Tragfähigkeit in der Regel bemessungsrelevant.

Die Bemessung von Pfahlgründungen unter axialer Belastung erfolgt nach GL (2005) nach den in API (2000) angegebenen Verfahren zur Berechnung der Pfahlwiderstände aus Spitzendruck und Mantelreibung. Die Anwendung dieser Verfahren auf den Offshore-Bereich mit in der Regel größeren Pfahlabmessungen ist jedoch mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Vor diesem Hintergrund erlangt die Forderung der DIN 1054 (2005), den Pfahlwiderstand aus Pfahlprobelastungen zu ermitteln, eine besondere Bedeutung, auch wenn damit entsprechende Kosten verbunden sind.

## SYSTEMVERGLEICH

### Planungsrandbedingungen in Nord- und Ostsee

Grundlage für den nachfolgenden Systemvergleich sind die Planungsrandbedingungen in den deutschen Eignungsgebieten für Offshore-Windparks in Nord- und Ostsee. Über die Baugrundbedingungen an diesen Standorten wurde an anderer Stelle bereits ausführlich berichtet (z. B. Richwien et al., 2002; Lesny et Wiemann, 2005; Lesny et al., 2007). Danach besteht der Baugrund in der südlichen Nordsee überwiegend aus Sanden bzw. kiesigen

Sanden von lockerer bis mitteldichter Lagerung im oberflächennahen Bereich bis hin zu dichter oder sehr dichter Lagerung in größeren Tiefen.

Die Baugrundverhältnisse in der Ostsee sind demgegenüber deutlich heterogener. Ein markantes Merkmal sind weiträumige Schlickfelder von lockerer Lagerung bzw. geringer Konsistenz, die gerade im Bereich der Mecklenburger Bucht eine große Mächtigkeit haben. Darunter stehen sandig-kiesige oder tonig-schluffige Sedimente und Geschiebemergel an. Der Geschiebemergel ist stark überkonsolidiert, hochfest und enthält zahlreiche Geschiebe. Charakteristisch für den Bereich des Arkona-Beckens ist die in größeren Tiefen anstehende unverfestigte, stellenweise verfestigte Kreide mit eingelagerten Flintsteinen oder Flintsteinbändern.

Abb. 5 zeigt für die angesprochenen Bereiche typische, aber fiktive Baugrundprofile mit Erfahrungswerten für die wichtigsten Bodenkennwerte, die Grundlage der nachfolgenden Auswertungen sind. Für die Lastermittlung einer 5 MW Offshore-Windenergieanlage wurde eine 50-Jahrextrembelastung zugrunde gelegt. Einzelheiten dazu sind in Lesny und Wiemann (2005) angegeben.



Abb. 5: Typische Baugrundprofile in Nord- und Ostsee

### Bewertung der Gründungsvarianten

Nach Abb. 5 kann in der südlichen Nordsee mit einem ausreichend tragfähigen Baugrund in erreichbarer Tiefe gerechnet werden, der grundsätzlich für jede der vorgestellten Gründungsarten geeignet ist. Bei der Planung sind jedoch im Boden eingelagerte Findlinge und eine bisweilen sehr dichte Lagerung der Böden zu berücksichtigen, die das Einbringen von Pfählen oder Schürzen von Saugrohr- oder Schwergewichtsrundungen erschweren. Zudem sind die Oberflächensedimente extrem kolkgefährdet, was bei der Bemessung und

konstruktiven Auslegung aller Gründungsvarianten beachtet werden muss. Die folgenden Ausführungen gehen daher davon aus, dass ein ausreichender Kolksschutz vorgehalten wird.

Abb. 6 zeigt die erforderlichen Abmessungen eines Schwergewichtsfundaments im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ohne Sicherheitsbeiwerte) für die Bandbreite der in Abb. 5 angegebenen Bodenkennwerte für verschiedene Wassertiefen. Dabei führt eine größere Wassertiefe erwartungsgemäß zu größeren Abmessungen, da die Belastung zunimmt. Die Fundamentabmessungen werden im Wesentlichen durch den Grundbruchwiderstand und die Kippsicherheit bestimmt. Dabei ist zu beachten, dass der Grundbruchwiderstand empfindlich auf Änderungen des Reibungswinkels des Bodens unterhalb der Gründungssohle reagiert. Gleiches gilt für Änderungen des Durchmessers, der überproportional in die Grundbruchgleichung eingeht. Demgegenüber wird die Kippsicherheit besonders durch das Eigengewicht und damit durch Höhe *und* Durchmesser des Fundaments bestimmt. Die Scherfestigkeit des Bodens geht hingegen in diesem Nachweis nicht ein. Damit ist in der Regel der Grundbruchwiderstand maßgebend, erst bei ausreichend großem Fundamentdurchmesser wird die Kippsicherheit relevant, die dann für ein ausreichendes Fundamenteigengewicht eine größere Fundamenthöhe erfordert als der Grundbruchwiderstand. Die Auftriebssicherheit und der Gleitwiderstand spielen hier eine untergeordnete Rolle.

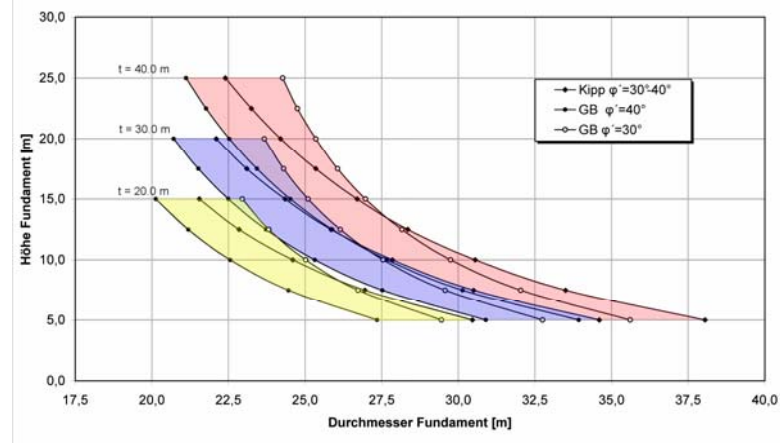


Abb. 6: Bandbreiten der erforderlichen Abmessungen eines Schwergewichtsfundaments für verschiedene Wassertiefen – Nordsee

Unter Annahme eines kreisrunden Stahlbetonfundaments mit vier Kammern, die mit dem anstehenden Boden verfüllt werden, wurde für diese Abmessungen die in Abb. 7 dargestellte Bandbreite der zu erwartenden Massen berechnet. Danach nimmt die Betonkubatur mit zunehmender Wassertiefe nur moderat zu, allerdings wird deutlich mehr Verfüllmaterial benötigt, das in den Fundamentkörper eingespült werden muss. Die Auswertungen haben zudem gezeigt, dass das Volumen durch einen entsprechend großen Durchmesser bei kleiner Höhe minimiert werden kann.

Bei der Bemessung einer Monopile-Gründung ist zu beachten, dass vor allem der Pfahldurchmesser einen erheblichen Einfluss auf die Steifigkeit des Systems Pfahl-Boden und damit auch auf das Verformungsverhalten hat. Die für einen gegebenen Pfahldurchmesser festzulegende Pfahllänge bewegt sich innerhalb zweier Grenzen: Einer Mindestpfahllänge  $\min L$  zur Gewährleistung einer ausreichenden Standsicherheit, die zu einer hohen Ausnutzung der maximalen Bettungsreaktion führt, und einer maximalen Pfahllänge  $\max L$  bei voller Einspannung im Boden, bei der die Pfahlkopfverschiebungen minimal werden. In diesem Fall können durch einen größeren Pfahldurchmesser die Pfahlkopfverformungen deutlich reduziert werden, da die Pfahlsteifigkeit die Steifigkeit des Systems dominiert, während die Steifigkeit des Bodens nur noch eine untergeordnete Rolle spielt.

Allerdings wird oft zur Gewährleistung der Standsicherheit bereits eine vertikale Tangente an die Biegelinie im Bereich des Pfahlfußes als ausreichend erachtet (vgl. GL, 2005). Für den ordnungsgemäßen Betrieb der Anlage müssen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit dann aber weitere Grenzwerte für die Pfahlkopfverschiebung oder -verdrehung eingehalten werden.

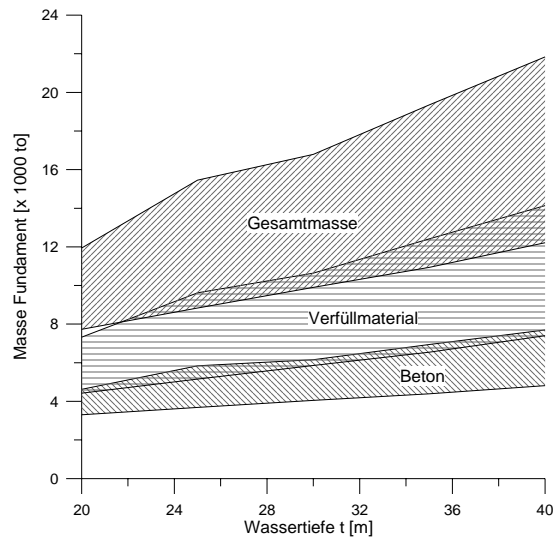


Abb. 7: Bandbreite der Massen eines Schwergewichtsfundaments – Nordsee (mittlere Bodenkennwerte)

Die Bemessung einer Monopile-Gründung für den Nordseestandort nach Abb. 5 liefert für Durchmesser zwischen 5 und 8 m Pfahleinbindelängen zwischen 32 und 42 m für eine volle Pfahleinspannung unter Minimierung der Pfahlkopfverschiebungen. Mit zunehmendem Durchmesser nimmt dabei die Einbindelänge nahezu linear zu, um die erforderliche Einspannung zu gewährleisten. Der Einfluss der Wassertiefe ist hingegen sehr gering, trotz der damit verbundenen Änderung der Belastung. Offenbar dominiert die bei voller



Pfahleinspannung gegebene Pfahl-Boden Steifigkeit das Tragverhalten, das in diesem Fall wenig sensibel auf Änderungen der Belastung reagiert. Die daraus resultierende Bandbreite der erforderlichen Massen für den Stahlpfahl und das Verfüllmaterial ist in Abb. 8 dargestellt. Da bei den hier untersuchten Durchmessern nicht von einer Pfpfenbildung bei Einbringung des Pfahls auszugehen ist, entspricht das Verfüllmaterial dem anstehenden Boden, der während des Rammvorgangs fortlaufend in den Pfahl eindringt. Daher ist die zu verbauende Masse deutlich geringer als bei einem Schwergewichtsfundament. Der geringe Einfluss der Wassertiefe spiegelt sich zudem auch hier wieder.

Die Bemessung der Gründungspfähle einer aufgelösten Struktur (hier ein Tripod) unter grober Abschätzung der maßgebenden axialen Druckkraft des am stärksten belasteten Tripodbeins liefert für den Nordseestandort bei einer Wassertiefe von rd. 30 m moderate Abmessungen für den Durchmesser D und die zugehörige Einbindelänge L im Grenzzustand der Tragfähigkeit zwischen  $D = 0,5 \text{ m}/L = 41,5 \text{ m}$  und  $D = 2,5 \text{ m}/L = 17,7 \text{ m}$ . Dieser Fall beruht auf der Annahme, dass sich bei der Pfahleinbringung kein Pfpfen ausbildet, was die größten Einbindelängen ergab. Gerade bei den kleineren Pfahldurchmessern ist aufgrund der hohen Lagerungsdichte des kiesigen Mittelsandes jedoch eine Pfpfenbildung zu erwarten. In diesem Fall wird der Pfahlspitzenruck auf der vollen Querschnittsfläche mobilisiert, was zu einem enormen Zuwachs des resultierenden Pfahlwiderstands führt. Daher wird in dem untersuchten Fall ab Durchmessern über 1,0 m nur noch eine konstruktive Einbindelänge erforderlich (Abb. 9). Auf eine Analyse der Massen wurde hier verzichtet, da die Tripodstruktur selbst dabei einen entscheidenden Anteil hat, sie hier aber nicht betrachtet wurde.

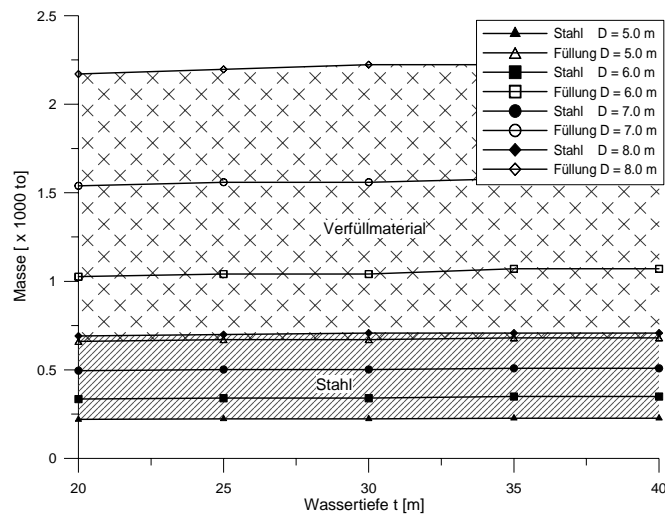


Abb. 8: Bandbreite der Massen eines Monopiles – Nordsee (mittlere Bodenkennwerte)

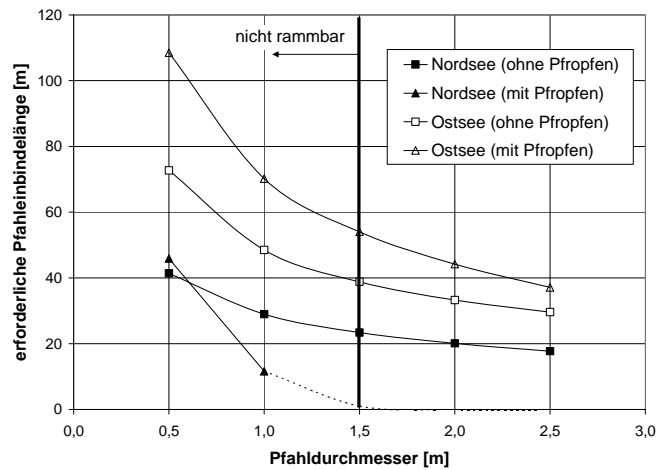


Abb. 9: Erforderliche Abmessungen des am stärksten auf Druck belasteten Gründungspfahls eines Tripod (mittlere Bodenkenwerte)

Für die Planung der Gründung stellen die Baugrundbedingungen in der Ostsee im Vergleich zu dem untersuchten Nordseestandort deutlich anspruchsvollere Randbedingungen dar. Dies gilt insbesondere für die weichen Deckschichten in der Mecklenburger Bucht und die festen bzw. verfestigten Böden im Bereich des Arkonabeckens. So kommen wegen der äußerst geringen Tragfähigkeit der mächtigen Schlickschichten Schwergewichtsgründungen oder Monopiles im Bereich der Mecklenburger Bucht nicht in Betracht.

Eine wirtschaftliche Gründung lässt sich hier allenfalls durch eine aufgelöste Struktur, also ein Jacket oder ein Tripod realisieren. Allerdings zeigt die Bemessung des am stärksten belasteten Pfahls einer Tripodgründung, dass trotz der geringeren Belastung in der Ostsee im Vergleich zum Nordseestandort wirtschaftliche Pfahlabmessungen erst ab Pfahldurchmessern von rd. 1,5 m realisiert werden können (vgl. Abb. 9). Die erforderlichen Pfahleinbindelängen liegen dann zwischen 30 und 38 m für den Fall ohne Pfropfen bzw. zwischen rd. 37 und 54 m für den Fall mit Pfropfen. Hier liefert der Pfahlwiderstand bei Pfropfenbildung die größten Einbindelängen. Ohnehin ist bei den vorliegenden Baugrundbedingungen von einer Pfropfenbildung auszugehen.

Demgegenüber erfordern Pfahldurchmesser  $\leq$  rd. 1 m sehr große Einbindelängen. In diesen Fällen ist die Pfahlschlankheit so gering, dass bei den vorhandenen Baugrundbedingungen die Rammbaarkeit in Frage zu stellen ist.

Im Bereich des Arkonabeckens können aufgrund des bereits oberflächennah anstehenden Geschiebemergels, vor allem aber aufgrund der in der Kreide eingelagerten Flintsteine Pfahlgründungen wirtschaftlich kaum hergestellt werden. Hier sind Schwergewichtsgründungen eine geeignete Alternative, da der Baugrund im lastabtragenden Bereich eine ausreichende Tragfähigkeit aufweist. Abb. 10 zeigt die Bandbreite der im Grenzzustand der Tragfähigkeit erforderlichen Fundamentabmessungen für verschiedene Wassertiefen. Aufgrund der deutlich

geringeren Belastung in der Nordsee sind die Abmessungen tendenziell kleiner als für den Nordseestandort.

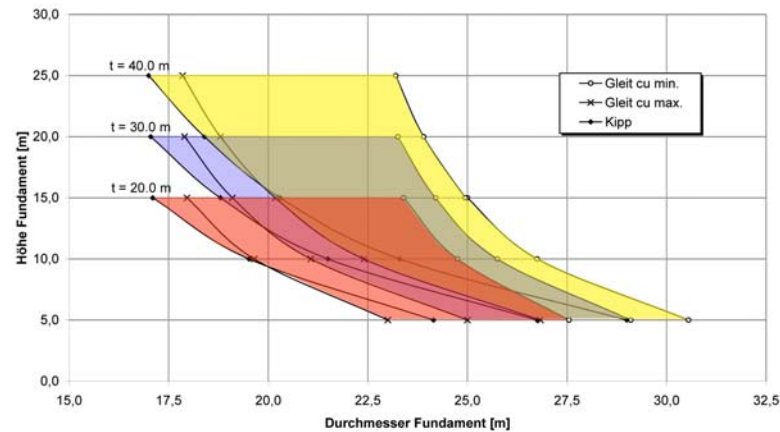


Abb. 10: Bandbreiten der erforderlichen Abmessungen eines Schwerefundaments für verschiedene Wassertiefen – Ostsee

Bei den vorliegenden Baugrundverhältnissen ist hier jedoch der Nachweis der Gleitsicherheit unter Anfangsbedingungen ( $c_u > 0$ ;  $\varphi_u = 0^\circ$ ) maßgebend, der bei ungünstigen Baugrundbedingungen (untere Bodenkennwerte) die obere Grenze der erforderlichen Abmessungen liefert. Hierbei ist zu beachten, dass der Gleitwiderstand sich auf die effektive Fundamentfläche bezieht, die infolge der großen Lastausmitte deutlich gegenüber der tatsächlichen Fundamentfläche reduziert ist. Die untere Grenze der erforderlichen Abmessungen wird bei kleinen Fundamentdurchmessern durch den Kippsicherheitsnachweis vorgegeben, der in diesen Fällen eine entsprechende Fundamenthöhe zur Erzielung eines ausreichenden Eigengewichts erfordert. Analog zu den geringeren Abmessungen im Vergleich zum Nordseestandort sind auch die resultierenden Massen entsprechend kleiner.

### FAZIT

Die im Rahmen dieses Beitrags vorgestellte Analyse verschiedener Gründungsvarianten macht deutlich, dass die Baugrundverhältnisse am jeweiligen Standort im Vergleich zu dem typischen Lastabtragungsverhalten der verschiedenen Gründungen eine entscheidende Rolle bei der Wahl eines geeigneten Gründungskonzepts spielen. Danach sind bei den bisher bekannten Baugrundbedingungen in der südlichen Nordsee zunächst alle Gründungsvarianten grundsätzlich geeignet. Für die Auswahl der Gründung müssen daher andere Kriterien herangezogen werden. Dazu gehören besonders die herstellertechnischen Randbedingungen wie die verfügbaren Baugeräte und Transportmöglichkeiten für die Installation der Gründung auf See oder die Produktions- und Lagerkapazitäten für die Herstellung an Land.

Bei den zu erwartenden Baugrundverhältnissen in der Ostsee hingegen scheiden einige Gründungsvarianten bereits von vornherein aus, da sie sich nicht

wirtschaftlich realisieren lassen. Aber auch die Anforderungen an die Herstellung und Installation der geeigneten Gründungen sind hier sehr anspruchsvoll.

Der oft als maßgebend zitierte Einfluss der Wassertiefe ist hingegen je nach Gründungsart sehr unterschiedlich zu bewerten. Zwar hängt die Belastung unmittelbar von der Wassertiefe ab, sie wirkt sich aber bei einem Monopile nur nachrangig auf die zu verbauenden Massen aus. Im Gegensatz dazu sind bei Schwergewichtsfundamenten die Massen direkt von der Wassertiefe abhängig.

Der Systemvergleich hat aber auch bestätigt, dass die Gründung jeweils im Einzelfall unter Betrachtung der gegebenen Standortbedingungen konzipiert werden muss. Pauschale Aussagen zur Eignung verschiedener Gründungsvarianten sind nur schwer möglich.

### LITERATUR

API (2000): Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms. Working Stress Design, American Petroleum Institute

DIN 1054 (2005): Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Normenausschuss Bauwesen (NABau), Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin

GL (2005): Rules and Guidelines – Industrial Services. Germanischer Lloyd Windenergie, Edition 2005

Lesny (2007): Gründung von Offshore-Windenergienlagen – Werkzeuge für Planung und Bemessung. Habilitation an der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Bauwissenschaften der Universität Duisburg-Essen (in Vorbereitung)

Lesny, K.; Wiemann, J. (2005): Design Aspects of Monopiles in German Offshore Wind Farms. In: Frontiers in Offshore Geotechnics, Hrsg. S. Gourvenec, M. Cassidy, Taylor & Francis Group, London, pp. 383-389

Lesny, K.; Richwien, W.; Hinz, P. (2007): Bemessung von Gründungen für Offshore-Windenergieanlagen. 5. Symposium Offshore-Windenergie – Bau- und Umwelttechnische Aspekte, 18.04.2007, Hannover

Richwien, W.; Lesny, K.; Wiemann, J. (2002): Baugrund – In: Bau- und umwelttechnische Aspekte von Off-shore Windenergieanlagen, Gigawind, Jahresbericht 2001, Kap. 5, S. 25-35

Wiemann, J. (2007): Bemessungsverfahren für horizontal belastete Pfähle – Untersuchungen zur Anwendbarkeit der p-y Methode. Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik der Universität Duisburg-Essen, Heft 33, Hrsg. Prof. Dr.-Ing. W. Richwien, Verlag Glückauf, Essen