

# **Besondere Anforderungen an die Gründungsplanung von Bauten im Offshore-Bereich**

PD Dr.-Ing. Kerstin Lesny, Fachgebiet Geotechnik, Universität Duisburg-Essen

Dr.-Ing. Jens Wiemann, Hamburg

## **Zusammenfassung**

Der vorliegende Beitrag erläutert die besonderen Anforderungen, die bei der Gründungsplanung und –bemessung von Offshore-Bauwerken zu berücksichtigen sind. Diese resultieren im Wesentlichen aus der komplexen Lastsituation, denen die Gründungsstrukturen in unterschiedlicher Weise ausgesetzt sind und die das Lastabtragungsverhalten des Baugrundes maßgebend beeinflussen. Von entscheidender Bedeutung für die Gründungsbemessung ist damit eine möglichst zutreffende Beschreibung des Bemessungslastkollektivs, die Durchführung umfassender und aussagekräftiger Baugrunderkundungen und –untersuchungen zur Ermittlung der maßgebenden Bodenkennwerte sowie die Implementierung dieser Informationen in eine geeignete Bemessungsstrategie für die zu untersuchenden Gründungsvarianten, die wiederum auf die offshore-relevanten Planungs- und Genehmigungsprozesse abzustimmen ist.

## **1. Einleitung**

Die Gründungsplanung für Offshore-Bauwerke unterliegt besonderen Randbedingungen, die in erster Linie aus der zusätzlichen Belastung infolge Seegangs und ggf. Eis, bei Windenergieanlagen zusätzlich aus den windinduzierten Rotorlasten, resultieren. Diese Einwirkungen verursachen einen hohen Anteil an transienten Horizontallasten und Biegemomenten an der Gesamtbelastung, die über die Gründung in den Baugrund eingeleitet werden muss. Die Seegangbelastung wirkt zudem direkt auf den Baugrund, da variierende Wasserstände bzw. Wellen und Strömung mit dem Porenwasserdruck im

Boden kommunizieren. Bei der bodenmechanischen Analyse des Gründungsverhaltens können aufgrund der geringen Frequenz insbesondere des Seegangs Trägheitskräfte in der Regel vernachlässigt werden, d.h. die Lasteinwirkungen sind zyklischer Natur.

Der Anteil zyklischer Belastung beeinflusst das Gründungsverhalten jedoch in komplexer Weise und muss bei Offshore-Bauwerken in der Regel im Rahmen der Gründungsplanung und -bemessung in angemessener Weise berücksichtigt werden. Die Akkumulation plastischer Formänderungen sowie von Porenwasserüberdrücken im lastabtragenden Bereich sowie eine geänderte postzyklische Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Gründungssystems sind Aspekte, die dabei untersucht werden müssen (vgl. z.B. TRIANTAFYLLIDIS, 2004). Wie groß der Einfluss der zyklischen Belastung auf das Gründungsverhalten letztendlich ist, hängt zunächst von der Bauwerksart, der dafür gewählten Gründungsvariante und der resultierenden Belastung in der Gründungsebene ab.

Offshore-Plattformen z.B. sind Bauwerke mit großen Massen und einem damit hohen Anteil statischer Lasten. Zyklische Lasteinwirkungen werden zu einem gewissen Grad „überdrückt“. Dementsprechend ist ihr Anteil begrenzt, aber immer noch höher als für Bauwerke an Land. Offshore-Windenergieanlagen sind im Gegensatz dazu hohe, schlanke Bauwerke mit vergleichsweise geringen Massen. Gerade bei diesen Bauwerken ist der aus den oben genannten Einwirkungen resultierende zyklische Lastanteil extrem hoch (Abb. 1).

Eine große Schwierigkeit besteht in diesem Zusammenhang hinsichtlich der Definition der für die Gründungsbemessung maßgebenden Belastung. Ein Aspekt ist dabei die Ermittlung der durch das Bauwerk bis hin zur Gründungsebene weitergeleiteten Belastung. Ein anderer Aspekt ist die rechnerische Berücksichtigung der eigentlich hochgradig stochastischen Belastung. Diese erfordert eine aufgabenorientierte Klassifizierung, wobei oft zwischen einer Extrembelastung mit begrenzter Lastzyklenzahl (Sturm) und der Belastung im Betrieb mit kleinerer Lastamplitude bei deutlich größerer Zyklenzahl unterschieden wird.

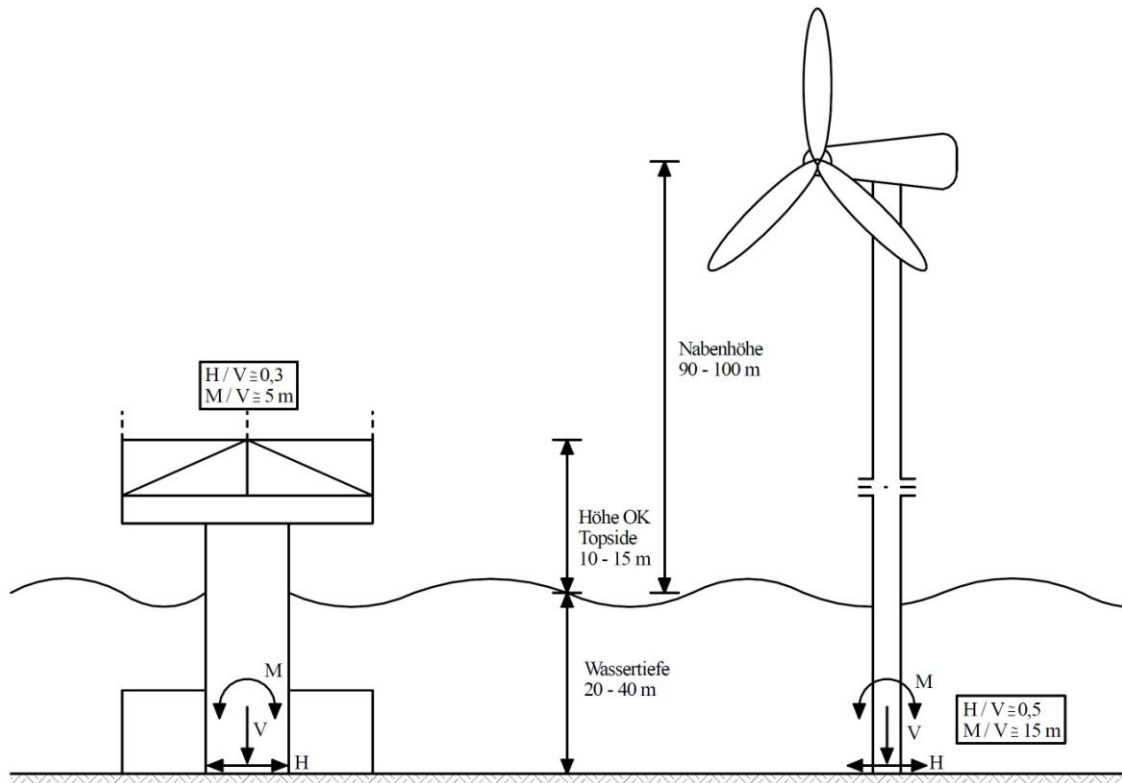


Abb. 1: Vergleich der Belastungssituation einer Offshore-Plattform mit einer Offshore-Windenergieanlage

Für das Tragverhalten der Gründung und damit des gesamten Bauwerks ist jedoch entscheidend, was in Abhängigkeit von der gewählten Gründungsvariante im lastabtragenden Bereich des Bodens ankommt, d.h. wie hoch insbesondere die zyklische Spannungsamplitude im Vergleich zur Bodenfestigkeit unter statischer Belastung ist (dazu z.B. ANDERSEN, 1988; MOSES ET AL., 2003). In Abhängigkeit davon zeigen unterschiedliche Bodenarten ein jeweils typisches Verhalten, was zu den bereits oben angesprochenen Konsequenzen führt. Eine umfassende und detaillierte Baugrunderkundung und –untersuchung ist damit unerlässlich, um alle für die Gründungsbemessung erforderlichen Informationen hinsichtlich des zu beurteilenden Baugrundverhaltens zu gewinnen. Auf Basis der gewonnenen Baugrundinformationen werden sodann ein oder mehrere Baugrundmodelle entwickelt, die Grundlage für die Bemessung sind. Die Prognose des Gründungsverhaltens unter zyklischer Belastung selbst ist jedoch eng verknüpft mit der Wahl eines geeigneten Bemessungsverfahrens, das letztendlich vorgibt, welche Baugrundinformationen in welcher Form benötigt werden.

Im vorliegenden Beitrag werden die hier angesprochenen Aspekte der Gründungsplanung und -bemessung für Offshore-Bauwerke näher erläutert. Zum besseren Verständnis gibt der folgende Abschnitt zunächst einen kurzen Einblick in die rechtlichen Rahmenbedingungen, innerhalb dessen diese Aufgaben einzuordnen sind.

## **2. Rechtliche Rahmenbedingungen**

### **2.1 Genehmigung von Offshore-Bauwerken**

Die Genehmigung für den Bau von Offshore-Bauwerken in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Bundesrepublik Deutschland und damit in weiten Teilen der deutschen Nord- und Ostsee wird durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie in Hamburg (BSH) erteilt. Für Offshore-Windparks im Speziellen muss dafür auf Grundlage der Seeanlagenverordnung ein Planfeststellungsverfahren durchgeführt werden. Im Bereich des Küstenmeeres (d.h. innerhalb der 12-sm Zone) sind die jeweiligen Bundesländer zuständig.

Das BSH fordert in seiner Genehmigung die verbindliche Einhaltung der von ihm herausgegebenen Standards. Diese Standards dienen vorrangig der Rechts- und Investitionssicherheit, in dem sie u.a. Mindestanforderungen an die konstruktive Ausführung von Offshore-Bauwerken (kurz: *Standard Konstruktion*) sowie Mindestanforderungen an die Baugrunderkundung und –untersuchung für Offshore-Windenergieanlagen, Offshore-Stationen und Stromkabel (kurz: *Standard Baugrund*) definieren.

Mit dem STANDARD KONSTRUKTION (2007), der in Kürze in einer vollständig überarbeiteten Fassung erscheinen wird, wurde ein System gestufter Freigaben eingeführt, das an die üblichen Projektphasen eines Bauvorhabens angelehnt ist (siehe Tab. 1). Für die Freigaben ist je nach Projektphase die Vorlage geprüfter Unterlagen erforderlich. Im Zuge der Freigaben erteilt das BSH Konformitätsbescheinigungen für das jeweilige Bauwerk und seine Komponenten. Grundlage dieser Bescheinigungen ist die formale Vollständigkeit und die inhaltliche Plausibilität der Unterlagen. Bei seiner Beurteilung

wird das BSH durch die Bundesanstalt für Materialprüfung sowie die Bundesanstalt für Wasserbau fachlich beraten.

Tab. 1: Phasen der Realisierung von Offshore-Bauwerken und zugehörige Freigaben nach BSH-Standard Konstruktion

Projektphase	Freigaben
<b>Entwicklung</b> (u.a. Festlegung der Entwurfsgrundlagen, Vorentwurf)	1. Freigabe
<b>Konstruktion</b> (weiterführende Festlegung der Entwurfsgrundlagen, Ausführungsplanung) (Planung von Errichtung, Betrieb und Rückbau)	2. Freigabe 3. Freigabe
<b>Ausführung</b> (u.a. Fertigung, Transport, Errichtung, Installation, Inbetriebnahme)	Betriebsfreigabe
<b>Betrieb</b> (Betrieb, Unterhaltung und Überwachung)	Überprüfung der Betriebsfreigabe
<b>Rückbau</b> Rückbauplanung Rückbaudurchführung	Rückbaugenehmigung Erklärung des Abschlusses der Maßnahme

## 2.2 Maßgebende Normen und andere Regelwerke

Nationale und internationale Normen und Regelwerke sind in der AWZ nicht automatisch anwendbar. Das BSH hat jedoch mit seinen Standards Konstruktion und Baugrund von Beginn an die verbindliche Anwendung einschlägiger europäischer und nationaler Normen für Bauvorhaben in seinem Zuständigkeitsbereich vorgeschrieben. So veröffentlichte das BSH Anfang 2012 ergänzende Anwendungshinweise zum STANDARD KONSTRUKTION (2007), in denen bereits vor offizieller Einführung des Eurocode 7 die damit verbundene Normenhierarchie für die geotechnische Bemessung verbindlich festgelegt wurde (BSH, 2012). Diese Anwendungshinweise wurden in der in Kürze erscheinenden vollständigen Überarbeitung des Standards Konstruktion inhaltlich vollständig übernommen.

Demnach sind für die Gründungsplanung für Offshore-Bauten in der AWZ verbindlich:

- DIN EN 1997-1:2009-09 mit Nationalem Anhang
- DIN 1054:2010-12

Nach BSH (2012) gelten zusätzlich für den Entwurf von Pfahlgründungen die Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle, die in ihrer 2. Auflage um das Kapitel 13 erweitert wurden, das sich mit dem Tragverhalten von Pfählen unter zyklischen Lasteinwirkungen befasst (EAP, 2012). Für den Entwurf von Flachgründungen sind die Empfehlungen des Arbeitskreises Baugrunderkundung (AK BAUGRUNDDYNAMIK, 2002) maßgebend.

Analog dazu ist im STANDARD BAUGRUND (2014) folgendes Normenwerk für die Durchführung von Baugrunderkundungen verbindlich festgelegt:

- DIN EN 1997-2:2010-10 mit Nationalem Anhang
- DIN 4020:2010-12

Ergänzend dazu können mit Zustimmung des BSH Regelwerke hinzugezogen werden, die offshore- bzw. windenergiespezifische Regelungen enthalten (z.B. GL, 2012; DNV, 2013; DIBT, 2012), sofern die geotechnischen Normen keine Regelungen enthalten bzw. deren Anwendbarkeit für Offshore-Windparks nicht zweckmäßig ist.

Derzeit erarbeitet der Normenausschuss Bauwesen des Deutschen Instituts für Normung e.V. eine Norm, die als ergänzende Regelung zu Eurocode 7 (Teile 1 und 2) sowie zu DIN 1054:2010-12 und DIN 4020:2010-12 die spezifischen Belange von On- und Offshore-Windenergieanlagen berücksichtigen wird.

### **3. Anforderungen an die Durchführung von Baugrunderkundungen und –untersuchungen**

#### **3.1 Baugrundbedingungen in deutschen Planungsgebieten**

Durch die Erfahrungen aus bisherigen Baugrunderkundungskampagnen im Zuge des Ausbaus der Offshore-Windenergie sind die allgemeinen Baugrundverhältnisse in Nord- und Ostsee mittlerweile recht gut bekannt. Danach ergibt sich das in Abb. 2 vereinfacht dargestellte, aber typische Bild.

So ist im Bereich der südlichen Nordsee in der Regel ein tragfähiger Baugrund zu erwarten. Es handelt sich um eiszeitlich vorbelastete Böden mit eingelagerten Findlingen, vornehmlich um Fein- bis Mittelsande und kiesige Sande mit gelegentlichen schluffigen oder tonigen Zwischenlagen. Örtlich ist Geschiebelehm oder –mergel anzutreffen. Diese Böden haben eine dichte bis sehr dichte Lagerung bzw. eine hohe Konsistenz. Typisches Merkmal des Meeresbodens in der Nordsee sind pleistozäne Rinnensysteme, die in der Regel mit wenig tragfähigen Sedimenten des Holozäns verfüllt sind. Die Oberflächensedimente in der südlichen Nordsee bestehen überwiegend aus locker bis mitteldicht gelagerten, enggestuften Fein- bis Mittelsanden. Diese gelten als kolkgefährdet.

Die Baugrundverhältnisse in der Ostsee sind demgegenüber gebietsweise sehr unterschiedlich und auch lokal heterogen. Ein markantes Merkmal sind z.B. weiträumige Schlickfelder von teilweise großer Mächtigkeit (wie in der Mecklenburger Bucht), die eine lockere Lagerung bzw. sehr geringe Konsistenz aufweisen. Darunter stehen örtlich sandig-kiesige oder tonig-schluffige Sedimente an. Der tragfähige Baugrund besteht häufig aus stark überkonsolidiertem, hochfestem Geschiebemergel. U.a. im Bereich des Arkona-Beckens steht typischerweise in größeren Tiefen unverfestigte oder verfestigte Kreide mit eingelagerten Flintsteinen oder Flintsteinbändern und stark variierender Konsistenz an, deren bodenmechanische Beschreibung im Rahmen der Gründungsplanung sehr anspruchsvoll ist (z.B. DÜHRKOP & GEDUHN, 2014).

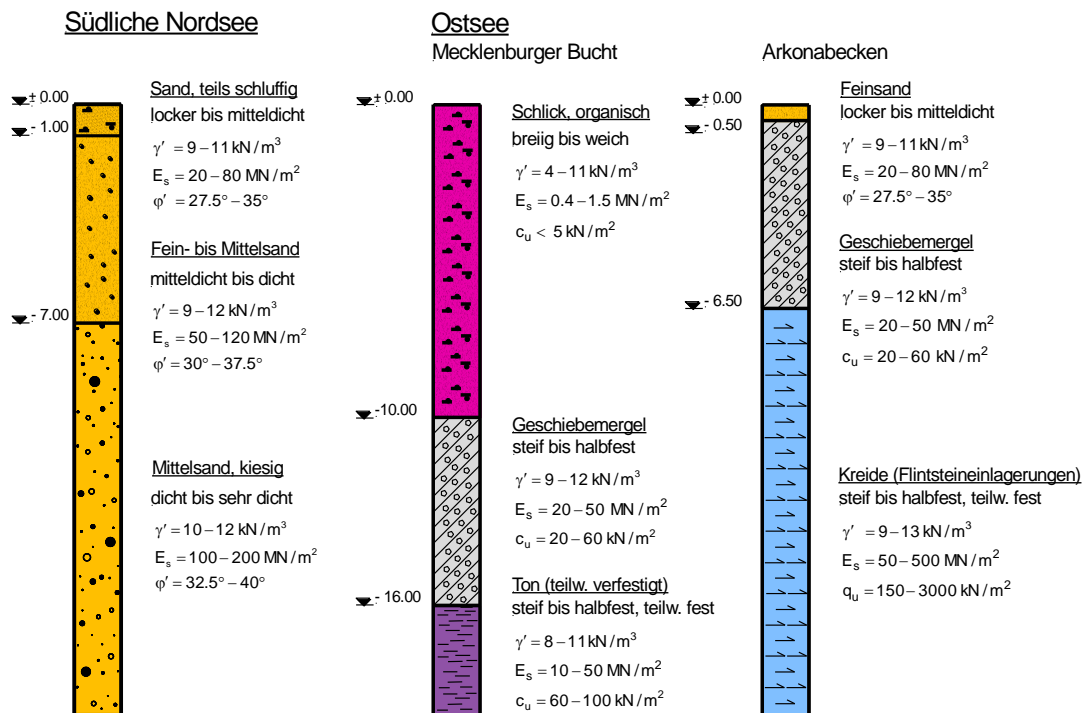


Abb. 2: Typischer Baugrundaufbau in Nord- und Ostsee mit Angabe repräsentativer Bodenkennwerte (LESNY, 2010)

Diese grundsätzlich unterschiedliche Baugrundsituation in Nord- und Ostsee muss im Rahmen der Gründungsplanung bereits frühzeitig, spätestens aber bei Planung der Baugrunderkundungen und –untersuchungen berücksichtigt werden, da sie sehr unterschiedliche Anforderungen an die einzusetzenden Verfahren und die Gerätetechnik stellt.

## 3.2 Konzept der Baugrunderkundung und -untersuchung

### 3.2.1 Gestuftes Verfahren

Im Zuständigkeitsbereich des BSH orientiert sich das Konzept der Baugrunderkundung und –untersuchung für Offshore-Bauwerke gemäß STANDARD BAUGRUND (2014) an dem Freigabesystem des STANDARDS KONSTRUKTION (2007) nach Tab. 1 und beinhaltet die in Tab. 2 dargestellte, gestufte Vorgehensweise.



Tab. 2: Konzept der Baugrunderkundungen nach STANDARD BAUGRUND (2014)

Phase	Stufe	Geologische Erkundung	Geotechnische Erkundung	Bericht
Entwicklung	1	Desk Study		
	2	Geophysikalische Untersuchungen		Geologischer Vorbericht
	3		Geotechnische Vorerkundung	Baugrundvoruntersuchungsbericht, Baugrund- und Gründungsgutachten (Entwicklungsphase)
	4	Geophysikalische Nachinterpretation auf Basis der Ergebnisse der geotechnischen Vorerkundung		Geologischer Bericht
Konstruktion	5		Geotechnische Haupterkundung	Baugrundhauptuntersuchungsbericht, Baugrund- und Gründungsgutachten (Konstruktionsphase)

Danach sind in der Entwicklungsphase zunächst eine geologische Erkundung und darauf aufbauend eine geotechnische Vorerkundung durchzuführen. Die Ergebnisse der geotechnischen Vorerkundung werden in der nächsten Stufe zur geophysikalischen Nachinterpretation herangezogen.

Die bis zu diesem Punkt gewonnenen Ergebnisse sind Bestandteil der so genannten Design Basis und damit Grundlage für den Vorentwurf der Bauwerke, für die das BSH nach Abschluss der Entwicklungsphase die 1. Freigabe erteilt (vgl. Tab. 1). Die geotechnische Haupterkundung ist der Konstruktionsphase zugeordnet. Sie basiert auf den Erkenntnissen aus der geologischen Erkundung sowie der geotechnischen Vorerkundung. Ihre Ergebnisse sind Bestandteil des Basic Design und damit Voraussetzung für die 2. Freigabe durch das BSH (vgl. Tab. 1). Liefert die geotechnische Haupterkundung neue Erkenntnisse, so muss die Design Basis überarbeitet werden.

### **3.2.2 Der Sachverständige für Geotechnik**

Offshore-Bauwerke werden aufgrund ihrer komplexen Bauwerk-Boden Interaktion regelmäßig in die Geotechnische Kategorie 3 gemäß DIN 1054:2010-12 eingestuft. Damit ist nach DIN 4020:2010-12 für die Gründungsplanung und –bemessung zwingend ein Sachverständiger für Geotechnik einzuschalten. Der Sachverständige muss hinreichend qualifiziert sein und ausreichende Erfahrungen mit entsprechend schwierigen Baumaßnahmen nachweisen.

Aufgrund einschlägiger Erfahrungen in diversen Offshore-Windpark Projekten wurde diese bereits in der Normung definierte Rolle des Sachverständigen für Geotechnik in den Fortschreibungen des Standards Baugrund fortlaufend präzisiert. Ziel war es, insbesondere seine fachliche und wirtschaftliche Unabhängigkeit gegenüber den am Prozess beteiligten Parteien sicherzustellen. Dazu zählt der Bohrunternehmer, dem gegenüber der Sachverständige für Geotechnik weisungsbefugt sein muss, um die Qualität der Baugrunderkundungen sicherzustellen zu können. Dies setzt voraus, dass der Sachverständige für Geotechnik gegenüber dem Bohrunternehmer wirtschaftlich unabhängig ist, was gerade wegen der hohen Kosten für Baugrunderkundungen auf hoher See und dem erheblichen Wetterrisiko von entscheidender Bedeutung ist. Der Sachverständige für Geotechnik ist daher durch den Bauherrn bzw. Antragsteller durch gesonderten Auftrag und frühzeitig einzubinden. Andererseits muss auch die fachliche und die wirtschaftliche Unabhängigkeit gegenüber dem Bauherrn bzw. Antragsteller sichergestellt werden. Letzteres kann problematisch sein, wenn der Sachverständige für Geotechnik in einem Abhängigkeitsverhältnis zum Bauherrn bzw. Antragsteller steht.

In diesem Sinne definiert der STANDARD BAUGRUND (2014) explizit die Befugnisse und Aufgaben des Sachverständigen für Geotechnik insbesondere im Rahmen der geotechnischen Baugrunderkundung und –untersuchung (vgl. Abschnitt 3.4) und grenzt dessen Zuständigkeiten gegenüber dem Entwurfsverfasser sowie weiteren Gutachtern ab.

### **3.2.3 Bedeutung der geologischen Baugrunderkundung**

Aufgrund der sehr großen Untersuchungsflächen und der besonderen Randbedingungen auf hoher See (z.B. Wassertiefe, Wetterabhängigkeit) kommt der geologischen Baugrunderkundung bei der Planung aber auch bei der späteren Überwachung von Offsho-

re-Bauwerken eine größere Bedeutung zu als dies bei vielen Bauvorhaben an Land der Fall ist. So definiert der STANDARD BAUGRUND (2014) Mindestanforderungen an die geologische Erkundung und Überwachung der Bauflächen für Offshore-Windparks einschließlich der parkexternen Plattformen und der Kabeltrassen, die im Wesentlichen auf der Anwendung geophysikalischer Verfahren beruhen, wie z.B. Echolotmessungen, seismische Verfahren oder Magnetometer-Untersuchungen.

Die Ergebnisse dieser Erkundungen sind jedoch alleine nicht aussagefähig, sondern bedürfen stets einer Nachinterpretation. Daher verlangt STANDARD BAUGRUND (2014) eine Kalibrierung der Ergebnisse anhand einer ausreichenden Anzahl von Bohrungen und Sondierungen aus der geotechnischen Vorerkundung.

### **3.3 Ausgewählte Aspekte der geotechnischen Baugrunderkundung und -untersuchung**

#### **3.3.1 Mindestanforderungen an die Vor- und Haupterkundung**

STANDARD BAUGRUND (2014) verlangt im Rahmen der geotechnischen Vorerkundung die Durchführung eines Aufschlusses an 10 % der geplanten Windenergieanlagenstandorte, wobei die Lage der Baugrundaufschlüsse anhand der Ergebnisse der geologischen Erkundung repräsentativ für die Fläche des Baufeldes durch den Sachverständigen für Geotechnik festgelegt werden muss. Der Sachverständige für Geotechnik wählt auch die in Abhängigkeit von den zu erwartenden Baugrundverhältnissen sowie der geplanten Gründungsvariante anzuwendenden Aufschlussverfahren (Bohrung, Drucksondierung, paarweise bzw. als Kombination aus Bohrung und Drucksondierung) und legt die erforderliche Aufschlusstiefe fest.

Um den grundsätzlich unterschiedlichen Baugrundverhältnissen in Nord- und Ostsee Rechnung zu tragen (vgl. Abschnitt 3.1) werden bei homogenen, eher sandigen Baugrundverhältnissen wie in der Nordsee an allen Standorten der Vorerkundung Drucksondierungen als ausreichend erachtet, wobei eine repräsentative Anzahl von Bodenproben gewonnen werden muss. Für Projektgebiete in der Ostsee werden hingegen an allen Standorten der Vorerkundung im Regelfall Bohrungen gefordert.

Im Rahmen der geotechnischen Haupterkundung muss an jedem Anlagenstandort mindestens ein Baugrundaufschluss ausgeführt werden. Bei aufgelösten oder bei großflächigen Gründungsstrukturen (z.B. Jackets oder Schwergewichtsgründungen) sowie bei inhomogenen oder anderweitig ungünstigen Baugrundverhältnissen kann jedoch eine größere Anzahl von Baugrundaufschlüssen erforderlich werden.

Alle weiteren Anforderungen (Art der Aufschlussverfahren, Anzahl und Anordnung, Aufschlusstiefe, Art und Häufigkeit der Probenentnahme) legt der Sachverständige für Geotechnik in Abhängigkeit von der vorgesehenen Gründungsart sowie der angetroffenen Baugrundsichtung fest.

Für Offshore-Plattformen innerhalb und außerhalb des Windparkbaufeldes erlaubt der STANDARD BAUGRUND (2014), die Schritte der geotechnischen Vor- und Haupterkundung formal zusammenzufassen, da die Gründungsplanung für diese Bauwerke üblicherweise unabhängig von der Gründungsplanung für die Offshore-Windenergieanlagen erfolgt. Als Mindestanforderung werden vier Baugrundaufschlüsse in den Eckbereichen der Gründungsstruktur bzw. ein Aufschluss an allen Standorten der Gründungselemente (Pfähle) verlangt.

### **3.3.2 Probenentnahme und Laborversuche**

Hinsichtlich der Auswahl geeigneter Bohrverfahren in Locker- und Festgestein verweist STANDARD BAUGRUND (2014) auf DIN EN ISO 22475-1:2007-01, die im Vergleich zu der Vorgängernorm DIN 4021:1990-10 ausdrücklich die Entnahme von Ramm- oder Druckkernen aus der Bohrlochsohle zulässt, wie es bei den auf Bohrschiffen vorgehaltenen Bohrverfahren üblich ist (dazu z.B. KRUMB & BALTHES, 2009).

Um die Gewinnung möglichst hochwertiger Proben zu gewährleisten wird für gekernte Boden- bzw. Festgesteinsproben ein Mindestprobendurchmesser von 100 mm als Richtwert definiert. Allerdings sind auch die marktüblichen Probendurchmesser offshore-spezifischer Entnahmeverfahren (z.B. Durchmesser 67mm, bei besonders dicht gelagerten Böden 46 mm) explizit zugelassen, um an dieser Stelle kein Ausschlusskriterium für entsprechende Anbieter einzuführen.

Hinsichtlich der Durchführung bodenmechanischer Standardversuche verweist der STANDARD BAUGRUND (2014) auf die einschlägigen DIN-Normen in ihrer jeweils gülti-

gen Ausgabe. Die geotechnische Baugrunderkundung und –untersuchung muss jedoch auch Aussagen zum Bodenverhalten unter zyklischer Belastung liefern (vgl. Teil C – Abschnitt 4, STANDARD BAUGRUND, 2014). Welche Art von Untersuchungen im Einzelfall erforderlich ist, richtet sich vorrangig nach dem Gründungstyp aber auch nach dem gewählten Bemessungsverfahren. Eine Standardisierung ist an dieser Stelle daher nicht möglich und auch nicht sinnvoll.

### **3.3.3 Geotechnische Dokumente**

Einhergehend mit dem gestuften Konzept der Baugrunderkundungen sieht STANDARD BAUGRUND (2014) das bereits in Tab. 2 dargestellte, ebenfalls gestufte Berichtswesen vor. Danach wird die geotechnische Vorerkundung mit einem Baugrundvoruntersuchungsbericht sowie einer Vorstufe des Baugrund- und Gründungsgutachtens abgeschlossen. Die Vorstufe des Baugrund- und Gründungsgutachtens beinhaltet eine Bewertung verschiedener infrage kommender Gründungsvarianten oder bereits einen konkreten Gründungsvorschlag sowie die Festlegung zumindest der Bandbreite der charakteristischen Bodenkenngrößen.

Die Ergebnisse der geotechnischen Haupterkundung sind zusammen mit dem ggf. überarbeiteten Geologischen Bericht in einem Baugrundhauptuntersuchungsbericht darzustellen, auf dem wiederum das Baugrund- und Gründungsgutachten als Grundlage für den Entwurf der Gründungen aufbaut. Die Anforderungen an diese Berichte sowie deren Inhalte regelt Teil C, Abschnitt 4 des STANDARDS BAUGRUND (2014).

Das Baugrund- und Gründungsgutachten muss zusätzlich Hinweise zur Berücksichtigung des Gründungsverhaltens unter zyklischer Lasteinwirkung in der weiteren Planung enthalten. Problematisch dabei ist, dass insbesondere in der Entwicklungsphase oft noch keine Details zur tatsächlich einwirkenden Gründungsbelastung vorliegen. Daher erfolgt die eigentliche Bearbeitung dieser Fragestellung erst in der Konstruktionsphase im Rahmen des Gründungsentwurfs durch den Entwurfsverfasser bzw. seinen Fachplaner für Geotechnik. Die Ergebnisse werden in einem *Ergänzungsbericht Zyklik* zusammengefasst, dem im STANDARD BAUGRUND (2014) ein eigener Abschnitt gewidmet ist.

Mit der Normengeneration des Eurocode 7 und der zugehörigen nationalen Normen wurden bekanntlich andere Bezeichnungen für die geotechnischen Dokumente und zum

Teil auch eine andere Struktur eingeführt. Diese wurden jedoch im STANDARD BAUGRUND (2014) (noch) nicht übernommen, um Unstimmigkeiten und Missverständnisse zu vermeiden. Tab. 3 stellt die Kerninhalte der einzureichenden Berichte, die Zuständigkeiten sowie die Zuordnung und Bezeichnung nach alter und neuer Normung einander gegenüber.

Tab. 3: Berichtswesen – Inhalte, Zuständigkeiten sowie Bezeichnungen nach alter und neuer Normung (STANDARD BAUGRUND, 2014)

Kerninhalte	Zuständigkeit	Bezeichnungen gemäß		
		BSH-Standards	DIN	EC-7
Geotechnischer Untersuchungsbericht	SVGt	Baugrundvoruntersuchungsbericht Baugrundhauptuntersuchungsbericht	Geotechnischer Bericht (DIN 4020)	Geotechnischer Entwurfsbericht
Charakteristische Werte, Baugrundmodell, Gründungsvorschlag	SVGt	Baugrund- und Gründungsgutachten (Entwicklungsphase) Baugrund- und Gründungsgutachten (Konstruktionsphase)		
Stand sicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise	FPGt (EV)	Geotechnischer Entwurfsbericht (mit Ergänzungsbericht Zyklik)	Geotechnischer Entwurfsbericht (DIN 1054:2005)	

SVGt Sachverständiger für Geotechnik

FPGt (EV) Fachplaner für Geotechnik auf Seiten des Entwurfsverfassers

## **4. Konzept zur Gründungsplanung und -bemessung**

### **4.1 Einbindung in den Projektablauf**

Das Konzept zur Gründungsplanung und –bemessung muss die Einhaltung der geforderten technischen Nachweise sicherstellen und einen effizienten Planungsprozess für die Projektrealisierung ermöglichen. Durch die Verknüpfungen mit weiteren Vorgängen für die Umsetzung des Bauprojekts ist die Gründungsplanung kein unabhängiger Vorgang und hat somit für das einzelne Projekt eine vorgegebene Dauer. Terminänderungen im vorgesehenen Planungsprozess hätten durch ihre Verknüpfung mit der Fertigung und der Installation durch die hohen Kosten für Offshorearbeiten eine sehr große finanzielle Hebelwirkung. Bei der Aufstellung des Bemessungskonzepts ist deshalb sorgfältig auf die benötigten Ressourcen und Baugrundinformationen sowie auf ein frühzeitiges Einvernehmen mit allen an der Planung Beteiligten zu achten. Zu den Beteiligten zählen neben dem Sachverständigen für Geotechnik und dem Entwurfsverfasser der Prüfer bzw. Zertifizierer für die fachliche Prüfung, der Fachplaner für Offshore-Plattformen für die Lastangaben aus den Plattformdecks und im Fall von Windenergieanlagen der Turbinenhersteller für die Durchführung spezieller Lastberechnungen.

### **4.2 Bemessung für einzelne Standorte und für Cluster**

In Abhängigkeit von der Art und Anzahl der zu entwerfenden Bauwerke können in der Praxis für einen effizienten Planungsprozess und eine wirtschaftliche Gründung zwei unterschiedliche Vorgehensweisen sinnvoll sein.

Für Monopiles aus Stahl wird üblicherweise für jeden Anlagenstandort ein eigenes Berechnungsmodell der Gründung erstellt. Die Bemessung dieser Gründung aus einem einzelnen Pfahl ist, abgesehen von Konstruktionsdetails, durch einfache mechanische Modelle möglich. Die für einzelne Standorte durchgeführte Bemessung mit dem Ziel einer Materialersparnis durch möglichst kleine Blechdicken und möglichst kleine Pfahldurchmesser ist für die Kostenreduktion bei der weitgehend automatisierten Fertigung

von Großrohren grundsätzlich sinnvoll. Selbstverständlich ist bei einer automatisierten Fertigung eine mögliche Kostenersparnis durch die Fertigung von Serien in Betracht zu ziehen. Eine technisch mögliche Materialeinsparung kann durch zu viele Blechdickenabstufungen und die erhöhte Anzahl von Schweißnähten gegebenenfalls kontraproduktiv wirken. Für die Nachweisführung und ihre Dokumentation ist angesichts der großen Zahl von Bemessungsstandorten ebenfalls ein weitgehend automatisiertes Vorgehen nötig, um eine effektive und fehlerfreie Bemessung sicherzustellen. Neben der Prüfung der Ergebnisse kommt vor allem der Eingangskontrolle der Standortdaten und ihrer richtigen Verknüpfung im Bemessungsalgorithmus eine große Bedeutung zu.

Für komplexere Tragwerke wie z.B. Jackets aus Stahlrohren wird dagegen nicht primär die Entwicklung individueller Konstruktionen für die einzelnen Standorte von Windenergieanlagen verfolgt. Wesentliches Ziel ist die Entwicklung von baugleichen Gründungen, die an möglichst vielen Standorten des Windparks eingesetzt werden können. Mehrere Standorte werden dafür zu einem Cluster zusammengefasst. Die Pfahlänge wird jedoch stets an die standortspezifischen Baugrundverhältnisse angepasst. Bei dieser Vorgehensweise kommt der Sensitivitätsanalyse eine besondere Bedeutung zu. Da die zu entwerfende Gründung für eine relativ große Bandbreite der Standortbedingungen wie z.B. Bathymetrie, Baugrundsichtung und Bettungssteifigkeit geeignet sein muss, ist eine sorgfältige Untersuchung dieser Standorteinflüsse auf die Einwirkungen und die Spannungsverteilung im Bauwerk erforderlich.

### **4.3 Iterative Gründungsplanung**

Bei Windenergieanlagen sind die Gründungslasten im Unterschied zu konventionellen Hochbauten von den dynamischen Eigenschaften des Bauwerks abhängig. Zur Vermeidung von Resonanz zwischen der laufenden Turbine und der Tragstruktur wird standardmäßig die erforderliche Bauwerkssteifigkeit der Offshore-Windenergieanlage vom Turbinenhersteller durch einen zulässigen Bereich für die erste Eigenfrequenz festgelegt. Es ist deshalb eine iterative Gründungsplanung nötig, die in mehreren Berechnungsschleifen, so genannten Loops, durchgeführt wird. Dabei werden die Auswirkungen einer durch die Bemessung veränderten Gründung auf die einwirkenden Lasten berücksichtigt. Die Loops werden beendet, wenn die Lasten konvergieren, d.h. eine Ver-



änderung der Gründung nur eine vernachlässigbar geringe Veränderung der einwirkenden Lasten hervorruft. Selbstverständlich sollen die Lasten im letzten Loop kleiner sein als im vorausgegangenen Loop, damit die vorhandene Gründungsbemessung auch für die aktuellen Turbinenlasten gültig ist.

Bei beiden oben genannten Vorgehensweisen zur Bemessung der Gründung, der möglichst weitgehenden Individualisierung oder der möglichst weitgehenden Zusammenfassung von Bemessungsstandorten (Clustering) wäre die Berechnung von Turbinenlasten für jeden einzelnen Anlagenstandort nicht effektiv. Eine sinnvolle Reduktion des Berechnungsaufwands kann erreicht werden, wenn die Randwerte der Bauwerkssteifigkeit innerhalb des Windparks betrachtet und entsprechende Lastberechnungen durchgeführt werden. Diese Turbinenlasten können dann konservativ auf die betrachteten Bemessungsstandorte der Gründung angesetzt werden. Je nach Bandbreite der vorhandenen rechnerischen Bauwerkssteifigkeit können bei Bedarf weitere Zwischenstandorte für eine Überprüfung der Turbinenlastberechnung einbezogen werden. Durch eine vergrößerte Anzahl von Standorten in der Turbinenlastberechnung kann eine genauere Zuordnung der Turbinenlasten zu den Bemessungsstandorten erfolgen und damit die Einwirkung auf die Gründung weniger konservativ gewählt werden. Diese Reduktion der Einwirkungen erfordert jedoch einen höheren Aufwand in der Turbinenlastberechnung und ist deshalb vor Beginn der Planung mit allen Beteiligten abzustimmen.

Bei sequentiell gekoppelten Berechnungen werden die Turbinenlasten und die Schnittgrößen in der Gründung nacheinander in getrennten Modellen berechnet. Die Turbinenlasten werden an einer vordefinierten Schnittstelle zwischen den Berechnungsmodellen ausgetauscht. Für den Austausch der Turbinenlasten hat sich der Turmfuß als Schnittstelle bewährt. Durch den Austausch von Schnittgrößen am Turmfuß ist nur eine näherungsweise Beschreibung des realen Systemverhaltens möglich. So genannte integrierte Modelle, die die vollständige Tragstruktur detailliert beschreiben und das Turbinenmodell enthalten, ermöglichen eine genauere Beschreibung der Wechselwirkung Turbine-Bauwerk-Seegang. Diese Berechnungsmodelle erfordern einen wesentlich höheren Modellierungsaufwand als sequentiell gekoppelte Systeme. Durch die Vermeidung von Schnittstellen bei der Planung, die verbesserte Prognose und auch die Möglichkeit zum Einsatz beim späteren Bauwerksmonitoring wird jedoch eine zunehmende Anwendung von integrierten Modellen bei der Planung von Offshore-Windenergieanlagen erwartet.

## 4.4 Nachweiskonzept

Das Nachweiskonzept und die für die Gründung mindestens zu erbringenden Nachweise sind im STANDARD KONSTRUKTION (2007) durch Verweis auf die geltenden technischen Regelwerke festgelegt, siehe hierzu Kapitel 2.2 dieses Beitrags. Die für Offshore-Windenergieanlagen zu untersuchenden Lastfälle, so genannte design load cases (DLC), sind in DIN EN 61400-3:2010-01 festgelegt und allgemeingültig beschrieben. Die Norm enthält ebenfalls die für die Einwirkungen anzusetzenden Teilsicherheitsbeiwerte. Die Lastfälle sind ausgehend von dieser Norm für die Standortverhältnisse zu präzisieren. Dokumentengrundlage für die Präzisierung ist die projektspezifische Design Basis bzw. das so genannte Site Assessment, das eine zusammenfassende Beschreibung der Standortbedingungen wie z.B. Wind, Seegang und Baugrund enthält (vgl. Kapitel 3.2.1).

Neben den einschlägigen Nachweisen für Pfähle und Flachgründungen umfassen die Nachweise für Offshore-Windenergieanlagen insbesondere den Nachweis der Stabilität des Meeresbodens und die Berücksichtigung der Effekte aus zyklischer Belastung.

Für den Nachweis der Stabilität des Meeresbodens sind beispielsweise die möglichen Auswirkungen von Erosion, Kolk, Porenwasserdruckakkumulation und von Arbeiten im Bereich der Gründungen durch die Abdrücke von Hubinselbeinen zu untersuchen. Zur Beurteilung der möglichen Erosion am Anlagenstandort eignen sich über einen längeren Zeitraum erhobene Bathymetriedaten aus der geologischen Erkundung und Überwachung (vgl. Kapitel 3.2.3), deren Auswertung Hinweise auf langfristige Veränderungen des Meeresbodens gibt. Die Kolkbildung kann im Regelfall nur näherungsweise mit Hilfe von Formeln abgeschätzt werden, die zumeist für einen speziellen Anwendungsbereich entwickelt wurden und nicht ohne fachkundige Bewertung auf die Verhältnisse von Offshore-Bauten übertragen werden können. Zur Untersuchung einer möglichen Porenwasserdruckakkumulation im Verlauf mehrerer Belastungszyklen eignen sich dreidimensionale Finite-Elemente-Modelle sowie aus Parameterstudien abgeleitete Bewertungsdiagramme. Als Eingangswerte für die FE-Modellierung werden neben dem zeitlichen Verlauf der Gründungslasten die Wasserdurchlässigkeit und die Porenzahl des Bodens benötigt.

## **5. Wesentliche Aspekte der Gründungsbemessung**

### **5.1 Geotechnische Modellierung**

Für die Modellbildung wird, soweit technisch angemessen, auf vereinfachte ingenieurmäßige Beschreibungen zurückgegriffen. Zur effektiven Untersuchung der großen Zahl an Lastfällen und Belastungsrichtungen für die Identifikation der relevanten Einwirkungskombinationen eignen sich vereinfachte Modelle besser als Modelle mit zahlreichen Freiheitsgraden und einer deutlich erhöhten Rechenzeit. Die Interaktion zwischen Pfahl und Baugrund wird dementsprechend durch federgebettete Balken beschrieben. Die Federn werden in axialer und lateraler Richtung zur Pfahlachse angeordnet. Sie sind nichtlinear und berücksichtigen dadurch die abnehmende Steifigkeit bei der Annäherung an den Grenzzustand der Tragfähigkeit.

Die Federmodelle sind in den einschlägigen Regelwerken, wie z.B. GL (2012) und DNV (2013) zitiert und in ihren Grundzügen beschrieben. Weit verbreitet ist die Anwendung der so genannten p-y-Modelle für den horizontalen Pfahlwiderstand und der t-z-Modelle bzw. Q-z-Modelle für den Pfahlmantel- bzw. Pfahlspitzenwiderstand. Es handelt sich hierbei um halbempirische Modelle, für deren Anwendung nur wenige Bodenkennwerte benötigt werden, die aus Standard-Laborversuchen abgeleitet werden können. Für nichtbindige Böden sind dies die Wichte und der Reibungswinkel, für bindige Böden die Wichte, die undrained Scherfestigkeit und die Stauchung der Bodenprobe im ein- oder dreiaxialen Druckversuch bei halber Bruchlast. Die weiteren Modellparameter sind empirisch aus den diesen Bemessungsverfahren zugrundeliegenden Pfahltests abgeleitet und müssen deshalb in einer sinnvollen Bandbreite bei der Modellierung variiert werden, um den Einfluss auf das Berechnungsergebnis abschätzen zu können. Häufig angewendete Modelle sind beispielsweise diejenigen nach MATLOCK (1970), REESE (1974) und REESE (1975).

Vor der Anwendung dieser in der Offshore-Industrie etablierten Verfahren auf die Pfahlabmessungen und die teils sehr komplexen Baugrundverhältnisse in den Offshore-Windparks ist eine Abstimmung zwischen dem Entwurfsverfasser und dem Sachverständigen für Geotechnik notwendig, um die für die jeweiligen Randbedingungen ge-

eigneten Modellparameter festzulegen. Es ist zu bedenken, dass diese Modelle ursprünglich für Plattformpfähle im Golf von Mexiko mit Hilfe von Testpfählen entwickelt wurden, deren Durchmesser in der Größenordnung von etwa einem halben Meter lagen.

## **5.2 Bedeutung von Sensitivitätsstudien**

Da die Turbinenlasten als wesentliche Einwirkung von der Steifigkeit der Windenergieanlage und damit auch von der Interaktion zwischen Fundament und Baugrund abhängen, wäre der alleinige Ansatz der für konventionelle Bauten an Land üblicherweise verwendeten charakteristischen Werte der Bodenkenngrößen nicht zwangsläufig konservativ. Neben der Größe der Einwirkung hängt aber auch die Schnittgrößenverteilung je nach Gründungstyp unterschiedlich stark von der Bettungssteifigkeit ab. Bei einem Monopile als Einzelpfahlgründung ist dies aus der Anschauung sofort ersichtlich. Die laterale Bettungssteifigkeit beeinflusst die Lage des maximalen Biegemoments und damit auch die Stelle der größten Querschnittsbelastung. Für statisch überbestimmte Fachwerkkonstruktionen (Jackets) mit zahlreichen Rohrknoten hat die Pfahlsteifigkeit Einfluss auf die Schnittgrößen in den einzelnen Bauteilen und Anschlüssen. Veränderte Bauteilspannungen aufgrund einer Variation der Pfahlsteifigkeit sind vor allem für den Nachweis im Grenzzustand der Ermüdung relevant. Infolge der doppelt logarithmischen Widerstandslinien von Stahl (Wöhlerlinien) wirken sich Spannungserhöhungen im Grenzzustand der Ermüdung überproportional stark auf das Bemessungsergebnis aus. Ergänzend zu den Bemessungsprofilen mit charakteristischen Werten der Bodenkenngrößen ist deshalb auch eine Abschätzung der oberen Grenzwerte der Bettungssteifigkeit erforderlich.

Für die Auslegung der Gründungen von Windenergieanlagen sind die Abschätzung der Bandbreite der zu erwartenden Bettungssteifigkeit und die Durchführung von Sensitivitätsstudien daher von größerer Bedeutung als die Festlegung von numerischen Werten einzelner Bodenkenngrößen. Es ist deshalb sinnvoll, bereits in der frühen Planungsphase die Baugrundeigenschaften und die Interaktion zwischen Bauwerk und Baugrund zumindest näherungsweise abzuschätzen und im weiteren Verlauf des iterativen Planungsprozesses enger einzugrenzen.

### **5.3 35h-Sturm zur Bewertung der Zyklizität**

Offshore-Bauten sind naturgemäß einer in Betrag und Richtung ständig veränderlichen Belastung durch Seegang und Strömung ausgesetzt. Für die Gründung einer Offshore-Windenergieanlage kommt ein maßgebender Anteil aus dem Wind hinzu, der auf den Rotor wirkt. In den Gründungslasten ist somit je nach Verhältnis zwischen der ständigen Last aus der Bauwerksmasse und den veränderlichen Einwirkungen ein unterschiedlich großer Anteil einer Schwell- oder Wechselbelastung zyklischer Natur enthalten (vgl. Kapitel 1).

Die Schwell- oder Wechselbelastung hat grundsätzlich einen umso größeren Einfluss auf das Tragverhalten der Gründung je größer ihr Anteil im Verhältnis zur Tragfähigkeit der Gründung unter statischer Belastung ist. Da Windenergieanlagen eine geringere Masse besitzen als konventionelle Offshore-Bauten und damit eine geringere statische Vertikalkraft als Gründungslast enthalten, führen die veränderlichen Einwirkungen aus Wind und Welle bei ihnen zu einem größeren Anteil an den Gründungslasten. Folglich sind für Offshore-Windenergieanlagen potentiell größere Auswirkungen der veränderlichen Einwirkungen auf das Tragverhalten der Gründungen zu erwarten als bei konventionellen Offshore-Bauten. Um der besonderen Bedeutung der veränderlichen Belastung bei der Planung und Genehmigung von Offshore-Windenergieanlagen Rechnung zu tragen, sind durch das BSH für den STANDARD KONSTRUKTION (2007) ergänzende geotechnische Hinweise mit Verweis auf die 2. Auflage der EA-Pfähle herausgegeben worden (BSH, 2012).

Die Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen werden üblicherweise für eine Betriebsdauer von 20 oder 25 Jahren ausgelegt und im Grenzzustand der Tragfähigkeit gemäß DIN EN 61400-3:2010-01 für die 50-Jahres-Extremereignisse bemessen. Umspannplattformen werden aufgrund ihrer herausgehobenen Bedeutung für 100-Jahres-Extremereignisse bemessen. Für die Abschätzung der zyklischen Einwirkung wird nach BSH (2012) ein idealisiertes 50-Jahres-Sturmereignis mit 35 Stunden Dauer angesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass diese relativ wenigen Lastzyklen durch ihre große Amplitude den relevanten Einfluss aus allen während der gesamten Betriebsdauer auftretenden Lastzyklen hervorrufen.

Rechnerisch steigen die signifikante Wellenhöhe und die Windgeschwindigkeit während der ersten Hälfte dieses 35-stündigen Sturms auf ihren jeweiligen 50-Jahres-Extremwert an und nehmen dann symmetrisch zur ersten Sturmhälfte wieder ab. Als Alternative ist für die vereinfachte Simulation ein stufenförmiger Verlauf für beide Einwirkungen möglich, sodass das Sturmereignis in fünf Stufen unterschiedlicher Dauer unterteilt werden kann.

Zur rechnerischen Erfassung der zyklischen Einwirkung ist es jedoch nicht erforderlich die Gesamtdauer des Sturms mehrfach vollständig zu simulieren. Es bietet sich beispielsweise analog zu den Regelungen nach DIN EN 61400-3:2010-01 an, für jede der idealisierten Stufen des Sturmes mehrere 10minütige Zeitreihen mit einem stochastischen Verlauf von Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe zu simulieren. Die exemplarisch simulierten 10minütigen Zeitausschnitte können dann entsprechend der Dauer der zugehörigen Sturmstufe für die Auswertung multipliziert werden.

Aus den berechneten Zeitreihen der Gründungslasten kann zunächst für jede der einzelnen Sturmstufen ein mehrstufiges Lastkollektiv gebildet werden. Für dieses Mehrstufenkollektiv kann anschließend z.B. anhand von EAP (2012) Anhang D4 ein äquivalentes Einstufenkollektiv abgeleitet werden. Das äquivalente Einstufenkollektiv repräsentiert die für die Auslegung relevante zyklische Gründungslast und dient als Eingangswert für die Durchführung von zyklischen Laborversuchen.

Für die rechnerische Erfassung des lateralen und axialen Pfahltragverhaltens sowie der Verschiebungen unter zyklischer Belastung sind in EAP (2012) im Anhang D mehrere Verfahren informativ aufgeführt. Die unterschiedlichen Verfahren basieren auf Interaktionsdiagrammen, empirischen Ansätzen oder numerischen Simulationen in Verbindung mit ausgewählten Laborversuchen. Allen Verfahren gemeinsam ist jedoch, dass sie keine allgemein anerkannten Regeln der Technik sind und ihre Anwendbarkeit für die jeweiligen Randbedingungen durch einen Sachverständigen für Geotechnik zu bestätigen ist.

## **5.4 Zeitliche Abfolge der benötigten Baugrundinformationen**

### **5.4.1 Machbarkeitsstudie**

Die Tragwerksplanung für Gründungen von Windenergieanlagen kann im idealisierten Fall in die Phasen Machbarkeitsstudie, Vorentwurf sowie zwei iterative Berechnungsschleifen unterteilt werden. Die Machbarkeitsstudie ist allerdings nicht explizit im zeitlichen Ablauf gemäß STANDARD KONSTRUKTION (2007) enthalten, der erst mit der Entwicklungsphase für den Vorentwurf beginnt (vgl. Tab. 1).

Zu Beginn der Gründungsplanung stehen nur wenige Informationen über die Standortbedingungen zur Verfügung und es liegen in der Regel nur näherungsweise Angaben zu den Turbinenlasten vor, soweit bereits eine Vorauswahl möglicher Turbinen getroffen wurde. Für den Baugrund steht zumeist keine vollständig dokumentierte Erkundung zur Verfügung, die Daten sind beispielsweise beschränkt auf Drucksondierungen und die Bathymetrie an wenigen Lokationen des Planungsgebiets. Die ersten Machbarkeitsstudien der Gründungen können daher nur ausgewählte Nachweise umfassen, um die prinzipielle Eignung einer Gründungsform zu überprüfen. Ziel ist es, die Größenordnung von Abmessungen und Massen als Eingangswerte für die weitere Planung abzuschätzen. Als Baugrunddaten werden die Bathymetrie, die Baugrundsichtung und die zugehörigen Scherparameter benötigt. Sofern in dieser Planungsphase noch keine dokumentierten Versuchsergebnisse vorliegen, können für die Wichten Erfahrungswerte verwendet werden und die Scherparameter ersatzweise anhand von Korrelationen aus Drucksondierungen abgeschätzt werden.

### **5.4.2 Vorentwurf**

Die Erstellung des Vorentwurfs in der so genannten Entwicklungsphase bildet die erste durch den STANDARD KONSTRUKTION (2007) geregelte Planungsphase. Diese Phase wird mit der Erteilung der 1. Freigabe durch das BSH abgeschlossen (Tab. 1). Der Vorentwurf enthält gegenüber der Machbarkeitsstudie ergänzende Nachweise. Konstruktive Maßnahmen zur Sicherung der Stabilität des Meeresbodens oder die Berücksichtigung einer veränderlichen Meeresbodenoberfläche bei der Dimensionierung der Gründung sind aus geotechnischer Sicht wesentliche Bestandteile der Planung zur 1. Freiga-

be ebenso wie die vorläufige Bewertung einer möglichen Porenwasserdruckakkumulation. Für diese Planung werden z.B. Angaben zur Korngrößenverteilung und zur Wasserdurchlässigkeit des Bodens benötigt. Für die Gründungsplanung von Rammpfählen ist die Rammanalyse zur Bewertung der Installation und der damit einhergehenden Schädigung der Pfähle ein wichtiger Bestandteil des Vorentwurfs. Die Schädigung aus der Pfahlrammung setzt die noch ertragbare Schädigung aus dem späteren Betrieb der Windenergieanlage sowie aus Seegangsbelastung herab. Für die Planung zur 1. Freigabe wird eine den Anforderungen des BSH entsprechende Dokumentation über die ausgeführte Erkundung und die Auswertung von Laborversuchen benötigt (siehe Kapitel 3.3.3).

Die zur Planung notwendigen Bodenkennwerte umfassen die Wichte, die Scherparameter, das Last-Verformungsverhalten, die Korngrößenverteilung, die Wasserdurchlässigkeit sowie Eingangswerte zur Bewertung der Stabilität des Meeresbodens.

### **5.4.3 Iterative Berechnungen in der Konstruktionsphase**

Nach dem Vorentwurf für den ausgewählten Gründungstyp werden die vollständigen Nachweise und Lastberechnungen in einem iterativen Planungsablauf durchgeführt. Im zeitlichen Ablauf nach STANDARD KONSTRUKTION (2007) sind diese iterativen Vorgänge in der Konstruktionsphase enthalten und dort in das Basic Design zur 2. Freigabe und die Ausführungsplanung zur 3. Freigabe unterteilt (Tab. 1). In der Konstruktionsphase nach STANDARD KONSTRUKTION (2007) werden standortbezogene Lastberechnungen für sämtliche relevanten Lastfälle aus DIN EN 61400-3:2010-01 im Zeitbereich durchgeführt. Eingangswerte für die Simulation sind die im Vorentwurf entwickelte Gründung sowie die Standortbedingungen. Zu den relevanten Standortbedingungen bezüglich des Baugrunds zählen vor allem die standortspezifischen Angaben zur Bathymetrie, zum Bemessungsprofil einschließlich zugehöriger Bodenkennwerte, zu Kolk und Erosion, zum Last-Verformungsverhalten des Baugrunds unter zyklischer Beanspruchung sowie zur Gefährdung durch mikrobiologische Korrosion.

Zu Beginn der Konstruktionsphase, d.h. zum Start der ersten Iterationsschleife, wird die vollständige Dokumentation der geotechnischen Randbedingungen benötigt. Eine Ausnahme bildet die Bewertung der zyklischen Gründungslasten und daraus resultierende Faktoren zur rechnerischen Erfassung des Widerstands und zur Abschätzung von Set-



zungen unter zyklischer Belastung. Wie zuvor erläutert, ist für die Abschätzung der zyklischen Einwirkungen und die nachfolgende Auswertung die Lastberechnung eines 35stündigen Sturmes notwendig. Es empfiehlt sich, diese Lastberechnungen möglichst zu Beginn der Konstruktionsphase durchzuführen, damit für die anschließende Auswertung und die Durchführung bodenmechanischer Laborversuche oder im Sonderfall von Pfahlprobelastungen ausreichend Zeit zur Verfügung steht. Gegebenenfalls kann im Einvernehmen mit dem Sachverständigen für Geotechnik und den Genehmigungsbehörden zunächst mit vorläufigen Erfahrungswerten für die zyklische Degradation gearbeitet werden. Diese vorläufigen Werte sind im Verlauf des Basic Designs bzw. bis zum Abschluss der Konstruktionsphase durch geeignete Untersuchungen zu bestätigen. Eine durch zyklische Belastung gegebenenfalls veränderte Steifigkeit der Gründung muss in den Lastberechnungen für das Basic Design berücksichtigt werden. Falls diese Auswirkungen erst verspätet in der nachfolgenden Iterationsschleife berücksichtigt werden, besteht die Gefahr, dass eine zusätzliche Lastiteration und damit eine verlängerte Planungsphase notwendig werden.

## **6. Fazit**

Die Gründungsplanung von Bauten im Offshore-Bereich erfordert aus technischer Sicht aufgrund der Interaktionen zwischen Einwirkungen, Bauwerk und Baugrund eine besonders enge Abstimmung zwischen den beteiligten Planern und Sachverständigen. Genauso wichtig ist aber auch die frühzeitige Einbeziehung der Fertigungsbetriebe und der Unternehmen zur Installation der Gründungen, um deren Anforderungen rechtzeitig in die Gründungsplanung einzubeziehen. Der weit entfernte Bauplatz und die Wetterabhängigkeit der Offshore-Arbeiten führen in Verbindung mit deutlich höheren Gerätekosten als für Bauwerke an Land zu einem sehr detailliert vorgegebenen Terminplan für die Gründungsplanung, dessen Zeiten für eine effektive und kostentreue Realisierung eingehalten werden müssen. Durch die Komplexität derartiger Planungsaufgaben ist ein iteratives Vorgehen notwendig, das im Verlauf der Planung sukzessive auf die detaillierten Nachweise der Gründung hinführt. Der Standardisierung von Planungs- und Genehmigungsprozessen, u.a. durch die Standards des BSH, kommt für die Sicherheit bei

der termin- und kostentreuen Realisierung eine besonders große Bedeutung zu. Der gesamte Planungsprozess muss zudem durch ein wirksames Qualitätsmanagementsystem gesteuert und seine Ergebnisse regelmäßig überprüft werden, um mögliche Verzögerungen durch eine eventuell ungenügende Planungsleistung zu vermeiden.

## Literatur

- AK BAUGRUNDDYNAMIK (2002): Empfehlungen des Arbeitskreises Baugrunddynamik der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik. 1. Auflage, Eigenverlag des Grundbau-Instituts der Technischen Universität Berlin
- ANDERSEN, K. H. (1988): Properties of Soft Clay under Static and Cyclic Loading. Norwegian Geotechnical Institute, Publication No. 176, Oslo
- BSH (2012): Geotechnische Anwendungshinweise für den Standard "Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen" des BSH
- DIBT-RILI (2012): Richtlinie für Windenergieanlagen, Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründungen. Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik, Reihe B, Heft 8, Berlin
- DIN EN 1997-1:2009-09: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln. Normenausschuss Bauwesen (NABau), Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- DIN EN 1997-2:2010-10: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds. Normenausschuss Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V., Berlin
- DIN EN 61400-3:2010-01 (VDE 0127-3:2010-01): Windenergieanlagen - Teil 3: Auslegungsanforderungen für Windenergieanlagen auf offener See (IEC 61400-3:2009); Deutsche Fassung EN 61400-3:2009. DKE/K 383 "Windenergieanlagen" der Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Frankfurt am Main
- DIN EN ISO 22475:2007-01: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Probeentnahmeverfahren und Grundwassermessungen – Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung. Normenausschuss Bauwesen (NABau), Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- DIN 1054:2010-12: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1. Normenausschuss Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.
- DIN 4020:2010-12: Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2. Normenausschuss Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.
- DIN 4021:1990-10: Aufschlüsse durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von

- Proben. Normenausschuss Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V. (zurückgezogen)
- DNV (2013): Design of Offshore Wind Turbine Structures, Offshore Standard DNV-OS-J101, Det Norske Veritas AS
- DÜHRKOP, J.; GEDUHN, M. (2014): Kreide und Kreidestein als Baugrund für Offshore-Windenergieanlagen in der Ostsee. Vorträge der 33. Baugrundtagung der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., Berlin, S. 253-260
- EAP (2012): Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik, 2. Auflage, Verlag Ernst & Sohn
- GL (2012): Rules and Guidelines, IV – Industrial Services, Part 2 – Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines, Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH
- KRUMB, J.; BALTHES, R. (2009): Methoden und Entwicklungen in der Offshore-Baugrunderkundung. Vorträge zum 5. Hans Lorenz Symposium, Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin, Heft 47, Hrsg. Prof. Dr.-Ing. S. Savidis, S. 155-165
- LESNY, K. (2010): Foundations for Offshore Wind Turbines – Tools for Planning and Design. VGE Verlag GmbH, Essen
- MATLOCK, H. (1970): Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. Second Offshore Technology Conference, Dallas, paper number OTC 1204
- MOSES, G. G.; RAO, S. N.; RAO, P. N. (2003): Undrained Strength Behaviour of a Cemented Marine Clay under Monotonic and Cyclic Loading. Ocean Engineering, Vol. 30, pp. 1765-1789
- REESE, L. C.; COX, W. R.; KOOP, F. D. (1974): Analysis of laterally loaded piles in sand. Sixth Offshore Technology Conference, Houston, Paper No. OTC 2080
- REESE, L. C.; COX, W. R.; KOOP, F. D. (1975): Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay. Seventh Offshore Technology Conference, Houston, Paper No. OTC 2312
- STANDARD BAUGRUND (2014): Standard Baugrunderkundung - Mindestanforderungen an die Baugrunderkundung und -untersuchung für Offshore-Windenergieanlagen, Offshore-Stationen und Stromkabel, zweite Fortschreibung. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock, BSH Nr. 7004
- STANDARD KONSTRUKTION (2007): Standard Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock, BSH Nr. 7005
- TRIANAFYLLIDIS, T. (Hrsg.) (2004): Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena. A. A. Balkema, Leiden