

# **BEMESSUNG VON GRÜNDUNGSELEMENTEN FÜR OFFSHORE- WINDENERGIEANLAGEN – STAND DES WISSENS UND OFFENE FRAGEN**

von

Martin Achmus<sup>1</sup>

## **ABSTRACT**

In most of the wind farms which shall be erected in German sea regions piles will be used as foundation elements. The state of knowledge regarding the design of piles with respect to lateral and axial loads is presented. Concerning lateral loads, an open question is the estimation of permanent displacements due to cyclic loading. A method based on numerical simulations and cyclic triaxial tests is described, which makes the determination of cyclic permanent deformations possible. Concerning axial loads, recently developed (“CPT based”) methods to estimate the tension capacity of piles are compared with the usual approach. For that and also regarding cyclic tension loads the necessity of further research is shown.

## **1. EINLEITUNG**

In Nord- und Ostsee sind derzeit zahlreiche Offshore-Windparks in Planung. Da ein erheblicher Anteil der Baukosten für Offshore-Windenergieanlagen auf die Gründungsstruktur entfällt, gilt es, möglichst kostengünstige, aber natürlich ausreichend standsichere und insbesondere unter den hochgradig zyklischen Belastungen aus Wind und Wellen dauerhaft gebrauchstaugliche Lösungen zu realisieren.

Die verschiedenen in Frage kommenden Gründungsvarianten sind in Bild 1 dargestellt. Für Wassertiefen zwischen rd. 15 und 45 m in den deutschen Seegebieten werden derzeit hauptsächlich Pfahlösungen favorisiert, d. h. die Monopilegründung mit einem Pfahl großen Durchmessers (rd. 5 m und gegebenenfalls mehr) sowie Tripod-, Jacket- und Tripilegründungen mit drei oder vier Pfählen geringerer Durchmesser (rd. 2 bis 3,5 m). Auf die Bemessung von Pfählen unter Berücksichtigung der speziellen Bedingungen von Offshore-Windenergieanlagen wird in diesem Aufsatz eingegangen.

---

<sup>1</sup> Prof. Dr.-Ing., Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Leibniz Universität Hannover, Appelstr. 9A, 30167 Hannover

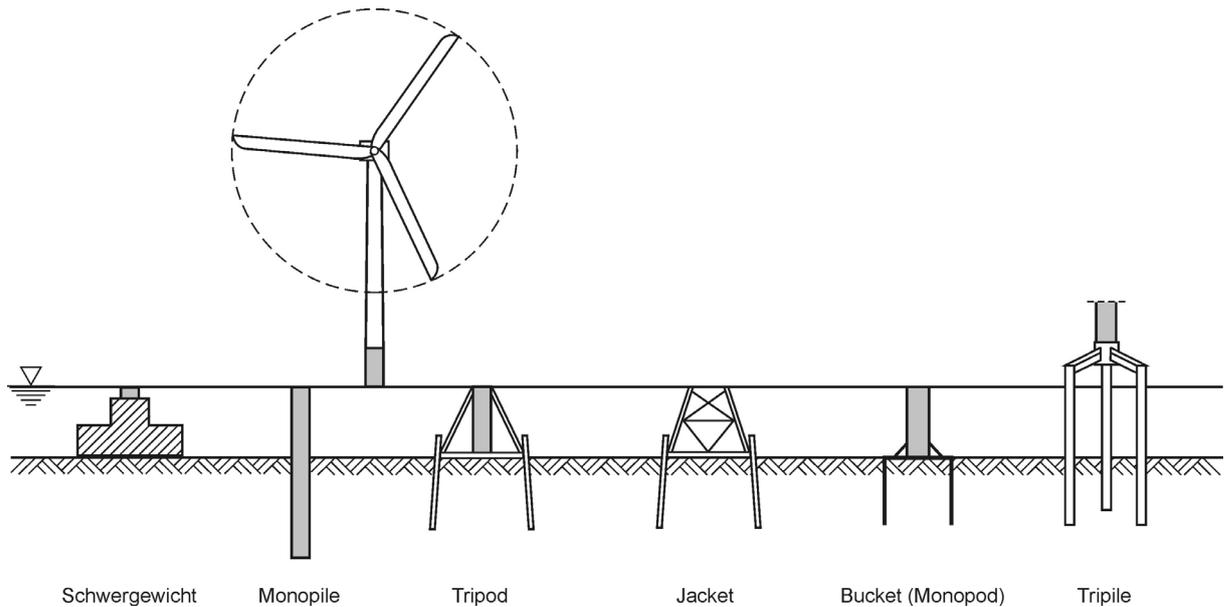


Bild 1 Gründungsvarianten für Offshore-Windenergieanlagen

## 2. PFÄHLE UNTER LATERALER BELASTUNG

Bei allen genannten Gründungsvarianten mit Pfählen werden diese horizontal beansprucht. Beim Tripod und beim Jacket greift die Horizontalkraft annähernd in Seebodenhöhe an, während bei Tripilepfählen und beim Monopile zusätzlich in Seebodenhöhe auch noch ein hohes Biegemoment angreift. Bei Monopiles ist daher und bei Tripilepfählen kann die Lateralbeanspruchung bemessungsentscheidend, d. h. bestimmend für die erforderliche Einbindelänge, sein.

In der Offshoretechnik erfolgt die Bemessung lateral beanspruchter Pfähle in der Regel mit dem p-y-Verfahren, wie es z. B. in der Richtlinie API (2000) beschrieben wird. Hierbei handelt es sich um ein Bettungsmodulverfahren mit nichtlinearen, bodenart- und tiefenabhängigen Federcharakteristiken (Bild 2).

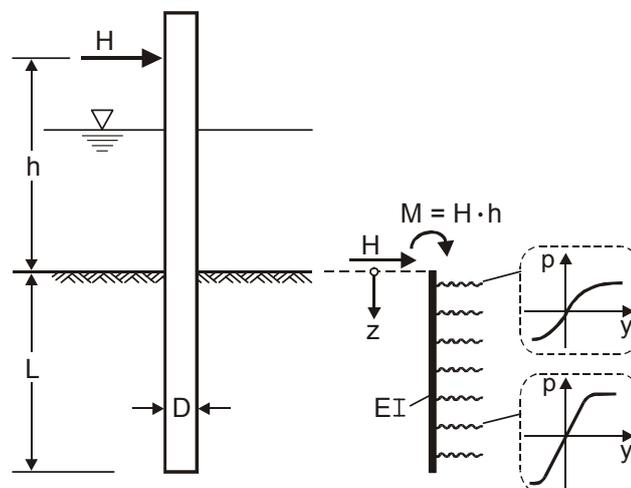


Bild 2 Berechnungsmodell mit nichtlinearen Federkennlinien (p-y-Methode)

Angaben zur Konstruktion von p-y-Kurven enthält API (2000) oder auch DNV (2004). Für Sandböden wird  $p(y)$  durch eine tanh-Funktion beschrieben, wobei sowohl die Anfangssteigung als auch die maximale Bettungsspannung von der Tiefe und vom Reibungswinkel des Bodens abhängig sind. Für steife und weiche Tonböden werden ebenfalls Ansätze angegeben, in denen die p-y-Kurven von der undrännierten Scherfestigkeit sowie einer im triaxialen UU-Versuch zu bestimmenden Dehnung bei 50% der deviatorischen Bruchspannung abhängen.

Für zyklische Beanspruchungen werden jeweils modifizierte Ansätze gegeben, durch welche Steifigkeiten der Federn und/oder Maximalbeanspruchung verringert werden. Die Anzahl der auftretenden zyklischen Lastamplituden wird hierbei nicht berücksichtigt.

In der Praxis werden folgende Nachweise geführt.

- Für den Nachweis der Tragfähigkeit werden die mit Teilsicherheitsbeiwerten ( $\gamma_E$ ) erhöhten Lasten (Bemessungslasten) aufgebracht und die p-y-Kurven mit durch Teilsicherheitsbeiwerte ( $\gamma_\phi$  bzw.  $\gamma_c$ ) abgeminderten Scherparametern ermittelt. Hieraus ergibt sich die für ausreichende Tragfähigkeit erforderliche Einbindelänge.
- Zur Ermittlung der Bemessungswerte der Schnittgrößen werden die Bemessungslasten auf das System mit p-y-Kurven für nicht abgeminderte (charakteristische) Scherfestigkeiten aufgebracht.
- Für charakteristische Extremlasten und charakteristische Scherfestigkeiten wird die Verformung des Pfahls ermittelt, um die Gebrauchstauglichkeit bzw. die Einhaltung der Verdrehungstoleranz nachzuweisen.

In allen Berechnungen werden üblicherweise die p-y-Kurven für zyklische Belastung verwendet. Eine mögliche Festigkeitsreduktion der anstehenden Böden durch der Extremlast vorhergehende zyklische und/oder dynamische Belastungen ist durch entsprechende Abminderung der Bodenparameter zu berücksichtigen.

Problematisch bzw. diskutabel ist die derzeitige Bemessungspraxis zum Einen, weil die in den einschlägigen Regelwerken angegebenen p-y-Kurven für Pfähle mit Durchmessern größer rd. 3 m nicht als abgesichert gelten können. Nach verschiedenen Untersuchungen (z. B. Achmus & Abdel-Rahman 2004, Wiemann 2007) wird die Steifigkeit des Pfahl-Bodensystems zumindest für Sandböden bei großen Pfahldurchmessern erheblich überschätzt.

Zum Anderen ist die Vorgehensweise zur Abschätzung permanenter Verdrehungen infolge zyklischer Last nicht zufriedenstellend. Die Tatsache, dass der Pfahl über seine planmäßige Lebensdauer nahezu kontinuierlich durch zyklische Wind- und Wellenlasten unterschiedlicher Amplitude und Richtung beansprucht wird, wird lediglich dadurch berücksichtigt, dass eine für zyklische Last global reduzierte Steifigkeit der Federn angesetzt wird. Alternativ wird teilweise eine Abschätzung zyklischer Verformungen durch Anwendung eines Ansatzes nach Little & Briaud (1988) vorgenommen, bei dem für alle Federn in gleicher Weise eine rein empirisch begründete, immerhin aber von der Anzahl der Lastzyklen abhängige Steifigkeitsreduktion angesetzt wird.

Besonders für Monopiles ist die möglichst genaue Berechnung der über die Lebensdauer der Gründung zu erwartenden bleibenden Schiefstellung von großer Wichtigkeit, da relativ enge

Grenzen für die tolerable Verdrehung des Turms gelten (Größenordnung rd. 0,25 bis 0,5°). Am Institut des Verfassers wurde ein Berechnungsverfahren entwickelt, welches numerische Finite Elemente-Berechnungen mit zyklischen Triaxialversuchen verknüpft und auf dieser Basis die Prognose der Verformungen eines spezifischen Pfahl-Boden-Systems unter zyklischer Belastung ermöglicht (s. Achmus et al. 2008, Kuo 2008).

Bei diesem Verfahren werden zunächst die Spannungsverhältnisse in einem Bodenelement (Anfangsspannungszustand sowie Veränderung durch die Belastung) mittels einer numerischen Berechnung analysiert. Aus dieser Erstberechnung ergibt sich auch die Verformung des Pfahls unter einmaliger (monotoner) Belastung. Das Verhalten der anstehenden Bodenarten wird im zyklischen Triaxialversuch untersucht und mittels eines Rechenansatzes parametrisiert. Die Dehnungsakkumulation unter zyklischen Lasten kann als eine Steifigkeitsänderung des Bodenelements interpretiert werden. Mit den entsprechend der Belastungszustände in den einzelnen Elementen und der Lastzyklenanzahl reduzierten Steifigkeiten wird die numerische Berechnung wiederholt, woraus sich die Pfahlverformung nach zyklischer Belastung ergibt. Einzelheiten des Verfahrens sind der o.g. Literatur zu entnehmen.

In Bild 3 sind mit diesem Verfahren erhaltene Ergebnisse für einen Monopile mit 7,5 m Durchmesser und Einbindelängen von 40 m bzw. 20 m in dichten Sand wiedergegeben. Aus den Steifigkeitsverteilungen im oberen Bildteil wird deutlich, dass die Steifigkeitsreduktion bei dem langen Pfahl weitgehend auf den oberen Bereich der Einbindelänge beschränkt ist. Beim kurzen Pfahl (unter gleicher Belastung, also größerer relativer Beanspruchung) tritt dagegen die Steifigkeitsreduktion über die gesamte Pfahllänge auf. Entsprechend weist der kürzere Pfahl ein deutlich ungünstigeres Verhalten unter zyklischer Beanspruchung auf. Die Kopfverschiebung (in Höhe des Seebodens) nach 1000 Lastzyklen beträgt etwa das 3,5-fache der bei statischer (1-maliger) Belastung. Der lange Pfahl weist dagegen nicht nur – entsprechend seiner größeren Länge und Tragfähigkeit – deutlich geringere Verschiebungen, sondern auch eine erheblich geringere Rate der Verformungszunahme auf. 1000 Lastzyklen führen zu einer etwa 50%igen Zunahme der Kopfverschiebung (Bild 3 unten). Anhand dieser Ergebnisse wird deutlich, dass das Maß der Verformungszunahme eines Monopiles abhängig ist von der relativen Größe der zyklischen Belastung. Unter einer sehr geringen Belastung wird die – ohnehin kleine – statische Verformung auch unter vielen Zyklen kaum größer, während sich bei hoher Beanspruchung eine stärkere relative Verformungszunahme ergibt. Dieses Verhalten erscheint plausibel, wird aber durch die existierenden Berechnungsansätze nicht erfasst.

Um ein ungünstiges Verhalten unter zyklischen Lasten zu vermeiden, wird in der Bemessungspraxis häufig gefordert, dass der Pfahl unter monotoner Last im Boden eingespannt ist, d. h. die Biegelinie zumindest eine vertikale Tangente aufweist (s. z. B. GL 2005). Mit dem beschriebenen Berechnungsmodell kann die Sinnhaftigkeit solcher Forderungen überprüft werden. In Bild 4 sind die berechneten Biegelinien zweier Monopiles gegenübergestellt. Die Belastung und die Einbindetiefe der Pfähle ist jeweils gleich, einmal wurde jedoch ein Pfahl mit 7,5 m Durchmesser (Bild 4 links) und einmal mit 2,5 m Durchmesser (rechts) betrachtet. Der große Monopile hat geringe Absolutverschiebungen, aber auch eine sehr geringe Verformungszunahme unter zyklischer Last. Das zyklische Tragverhalten ist daher als günstig zu bewerten. Dennoch ist für diesen Pfahl trotz seiner großen Einbindelänge von 40 m keine volle Einspannung gegeben, da sich am Pfahlfuß nicht

nur eine Verschiebung („toe kick“), sondern auch eine Verdrehung ergibt. Umgekehrt ist es beim Pfahl kleineren Durchmessers. Trotz eines ungünstigeren Verhaltens unter zyklischer Last ist für diesen Pfahl die Forderung nach voller Einspannung eindeutig erfüllt. Dieser Vergleich macht deutlich, dass die Einhaltung des Kriteriums der Pfahleinspannung im Boden nicht notwendigerweise günstiges Tragverhalten unter zyklischer Last bewirkt. Für sehr große und damit sehr steife Monopiles würde diese Forderung zu einer nicht erforderlichen bzw. nicht begründbaren Verlängerung des Pfahls und damit zu einer wirtschaftlich kaum akzeptablen Überbemessung führen.

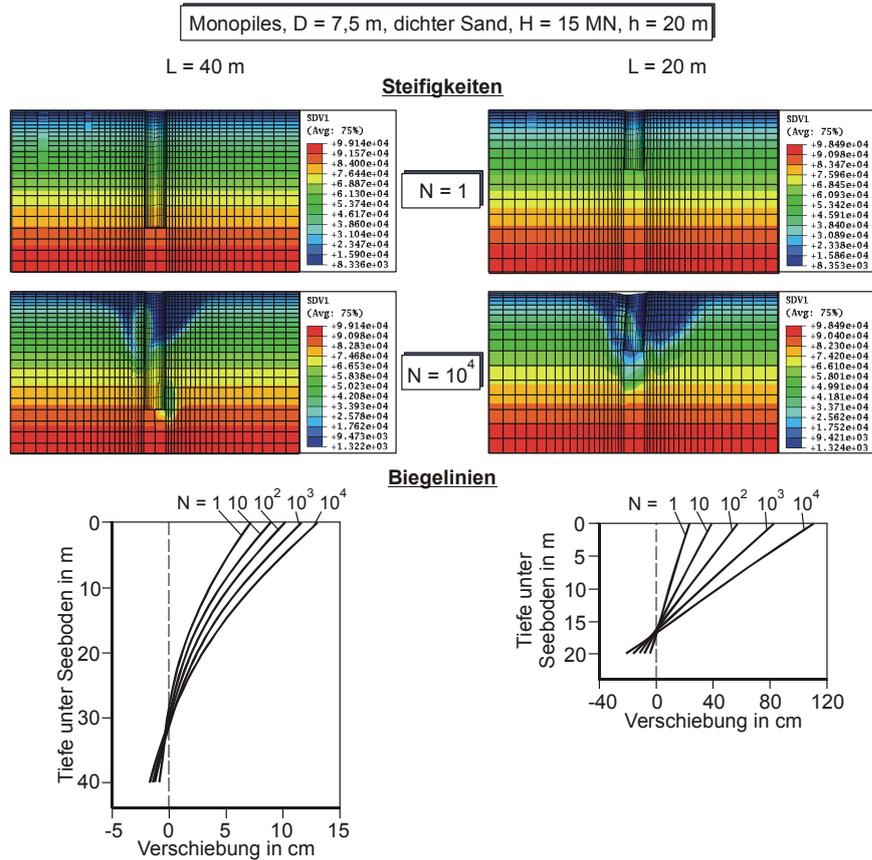


Bild 3 Zyklische Verformungen zweier Pfahlsysteme nach der Methode von Kuo (2008)

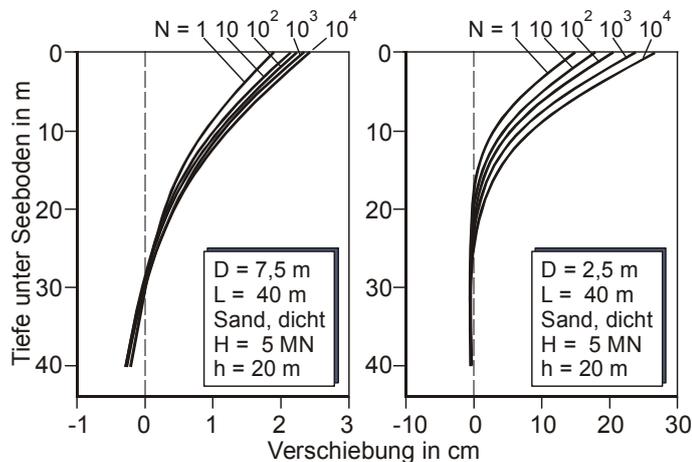


Bild 4 Vergleich der Biegelinienentwicklung für Pfähle verschiedener Durchmesser

### 3. PFÄHLE UNTER AXIALER BELASTUNG

Bei Jacket-, Tripod- und Tripilegründungen kommen zur Verankerung im Meeresgrund offene Stahlrohrrammpfähle mit Durchmessern zwischen rd. 0,8 m und rd. 3,5 m zur Anwendung. Die erforderlichen Einbindetiefen der Rammpfähle ergeben sich zumeist aus dem Bemessungslastfall für die axiale Tragfähigkeit auf Zug. In dem deutschen Bereich der südlichen Nordsee herrschen bis in die voraussichtlichen Pfahlabsetztiefen Fein- bis Grobsande mit nur vereinzelt weichen bis festen bindigen Einlagerungen vor. Nachstehende Ausführungen beziehen sich daher auf offene Stahlrohrrammpfähle in Sand.

#### 3.1 Tragfähigkeit unter monotoner Belastung

Auch die Pfahlbemessung für axial wirkende Lasten erfolgt in der Offshorepraxis im Regelfall nach den Angaben in API (2000). Hiernach errechnet sich der Mantelreibungswiderstand  $R_s$  über die Mantelreibung  $q_{s,k}$  multipliziert mit der Pfahlmantelfläche  $A_s$ . Die Mantelreibungsspannung  $q_{s,k}$  von offenen Stahlrohrrammpfählen in nicht bindigen Böden ermittelt sich nach den Richtlinien der API bodenart- und tiefenabhängig über das so genannte  $\beta$ -Verfahren:

$$q_{s,k}(z) = k \cdot \sigma'_v(z) \cdot \tan \delta = \sigma'_v(z) \cdot \beta \leq q_{s,k,max}$$

Darin ist  $\delta$  der Kontaktreibungswinkel zwischen Pfahloberfläche und Boden,  $\sigma'_v(z)$  ist die effektive Vertikalspannung in der betrachteten Tiefe  $z$  und  $k$  ist ein horizontaler Erddruckbeiwert. Aufgrund der durch die Rammung verursachten Verdichtung am Pfahlmantel wird in dem Verfahren der Beiwert  $k$  größer als der Erdruchdruckbeiwert  $k_0$  angenommen. In API (2000) und DNV (2004) werden  $k$ -Werte von 0,8 für offene und 1,0 für geschlossene Pfähle angegeben. Die empfohlenen Werte für den Kontaktreibungswinkel  $\delta$  und die maximale Grenzmantelreibung  $q_{s,k,max}$  sind in Abhängigkeit von der Bodenart und der Lagerungsdichte der Tabelle 1 zu entnehmen. Auf die ebenfalls angegebenen Ansatzwerte für den Spitzendruck bei Druckpfählen wird nachfolgend nicht näher eingegangen.

Bodenart	Mantelreibung		Spitzendruck	
	$\delta$	$q_{s,k,max}$	$N_q$	$q_{b,k,max}$
	[°]	[kN/m <sup>2</sup> ]	-	[MN/m <sup>2</sup> ]
Locker bis mitteldicht gelagerter Sand	20	67	12	2,9
Mitteldicht gelagerter Sand	25	81,3	20	4,8
Dicht bis sehr dicht gelagerter Sand	30	95,7	40	9,6

Tab. 1 Bemessungsparameter nach API (2000) für nichtbindige Böden

Aus verschiedenen Untersuchungen in den letzten Jahren ist bekannt, dass das API-Verfahren je nach vorliegenden Randbedingungen zu einer Unter- oder einer Überbemessung der Pfahllänge führen kann. Konkret kann es für kurze Pfähle in dichtem Sand zu einer starken Überbemessung und bei langen Pfählen in locker gelagertem Sand zu einer Unterbemessung der Pfähle kommen. Dies wird durch die in Bild 5 wiedergegebenen Ergebnisse von Toolan et

al. (1990) belegt. Darin ist das Verhältnis der nach API berechneten Tragfähigkeiten  $R_{API}$  zur gemessenen Tragfähigkeit  $R_{Messwert}$  für verschiedene Einbindelängen aufgetragen. Von Jardine et al. (2005), Lehane et al. (2005) und Kolk et al. (2005) wird bestätigt, dass sich über das Verfahren der API die axiale Pfahltragfähigkeit nicht zuverlässig bestimmen lässt. Kraft (1991) zeigt auf, dass insbesondere die Tragfähigkeit langer Pfähle bei großen Lagerungsdichten sensibel auf die Grenzwerte aus der API reagiert und somit nach der API unterschätzt werden kann. Clausen et al. (2005) weisen ebenfalls auf die Ungenauigkeit der API für die Bemessung in sehr dicht gelagerten Böden hin und erwähnen, dass die berechneten Tragfähigkeiten nach der API nicht mit Ergebnissen aus Probelastungen übereinstimmen.

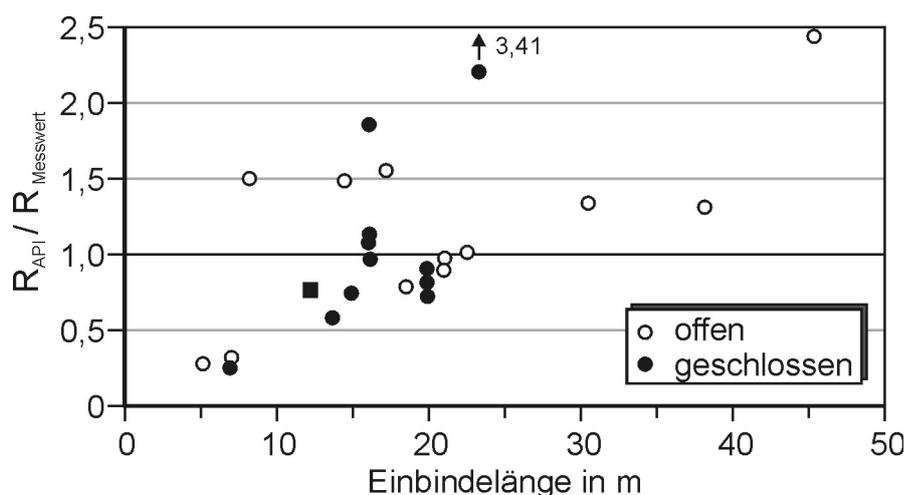


Bild 5 Vergleich gemessener mit nach API berechneten Pfahltragfähigkeiten (nach Toolan et al. 1990)

Daher ist es in den letzten Jahren zu vermehrten Anstrengungen gekommen, um alternative ebenfalls auf Erfahrungen basierende Berechnungsverfahren („CPT-basierte Verfahren“) zur Ermittlung der axialen Tragfähigkeit von Offshore- Rammspfählen zu entwickeln. Mit der Neuauflage der API im Jahr 2006, sowie der DIN EN ISO 19902 (2008) wurden diese Verfahren als alternative Bemessungsverfahren vorgestellt. Auf die Darstellung dieser Verfahren muss hier verzichtet werden, es soll lediglich ein exemplarischer Vergleich der Ergebnisse erfolgen.

Für einen offenen Stahlrohrrammpfahl mit einem Pfahldurchmesser von  $D = 2,5$  m werden in Bild 6 die Tragfähigkeiten auf Zug im Sand nach den o.a. Berechnungsverfahren dargestellt. Es handelt sich um die Tragfähigkeiten für zwei vereinfachte Spitzendruck- $(q_c)$ - Verläufe. Fall a) stellt dabei ab 10 m unter Meeresboden (TuM) einen konstanten  $q_c$ -Verlauf mit einem Endwert von  $20 \text{ kN/m}^2$  dar, während Fall b) ab 10 m TuM einen konstanten  $q_c$ -Verlauf mit einem Endwert von  $40 \text{ kN/m}^2$  aufweist. Von der Meeresbodenoberfläche bis 10 m unter Meeresboden steigt jeweils der Spitzendruck  $q_c$  linear mit der Tiefe von  $q_c = 0 \text{ kN/m}^2$  auf den jeweiligen Endwert an.

Die Berechnungsergebnisse zeigen für den  $q_c$ -Verlauf des Falls a) beim kurzen Pfahl Tragfähigkeiten nach den verschiedenen Verfahren in ähnlicher Größenordnung. Lediglich die Methode UWA-05 ermittelt eine Tragfähigkeit, die rd. 40 % unterhalb des API-Wertes liegt. Für den langen Pfahl ( $L = 45$  m) im Fall a) ist auffällig, dass die berechnete

Tragfähigkeit nach der API im Vergleich zu den anderen untersuchten Verfahren deutlich größer ausfällt. Die Abweichungen betragen hierbei rd. 30 % bis 100 %. Im Gegensatz hierzu ist für die  $q_c$ -Verteilung im Fall b) für den langen Pfahl auffällig, dass die Tragfähigkeit nach der API tendenziell kleiner ausfällt als nach den CPT-basierten Verfahren mit Ausnahme der Tragfähigkeit nach dem UWA-05 Verfahren.

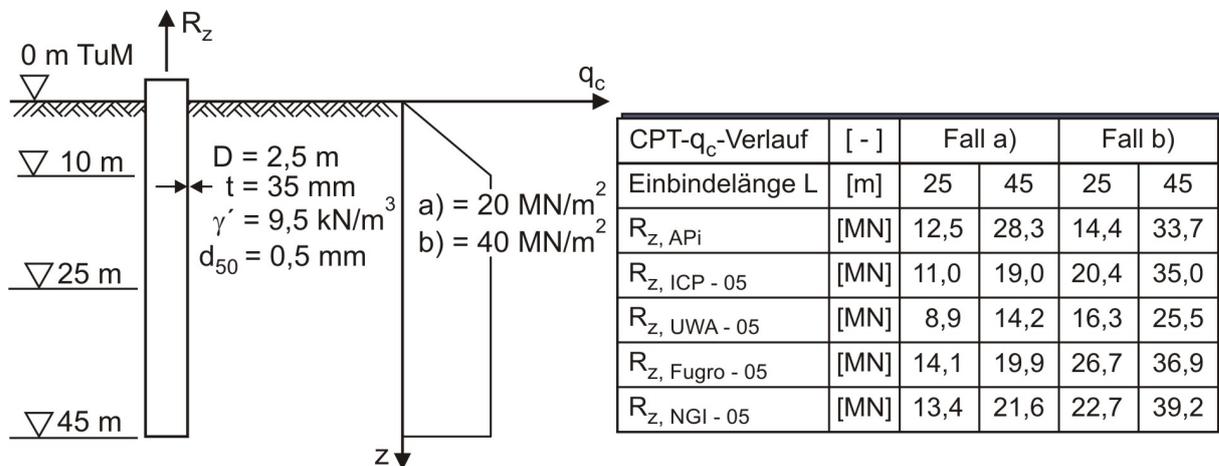


Bild 6 Gegenüberstellung der berechneten Zugtragfähigkeiten  $R_z$  nach den Verfahren API, ICP-05, UWA-05, Fugro-05 und NGI-05

Bild 7 gibt einen noch umfassenderen Ergebnisvergleich der verschiedenen Verfahren zur Berechnung der axialen Pfahltragfähigkeit. Darin wird die Zugtragfähigkeit  $R_{z, API}$  der API bezogen auf die Zugtragfähigkeit  $R_{z, CPT}$  der CPT-basierten Verfahren über die Schlankheit des Pfahles  $L/D$  aufgetragen. Untersucht wurden Pfähle mit Einbindetiefen  $L$  von 20,0 m, 35,0 m und 50,0 m und mit Durchmessern  $D$  von 1,0 m, 2,0 m und 3,0 m. Für den Vergleich wurden als Baugrund Sande mit einer  $q_c$ -Verteilung nach Fall a) bzw. Fall b) aus der vorangegangenen Beispielrechnung (Bild 6) verwendet.

Die Berechnungsergebnisse spiegeln den Trend der Messergebnisse von Toolan (1990) nach Bild 5 wider. Aus Bild 7 wird deutlich, dass die berechneten Tragfähigkeiten nach der API insbesondere für Pfähle geringer Schlankheit  $L/D$  viel geringer ausfallen als jene, die nach den CPT-basierten Verfahren berechnet worden sind. So erreicht die errechnete Tragfähigkeit nach den CPT-basierten Verfahren für gedrungene Pfähle mit  $L/D < 20$  das rd. 2- bis 2,5-fache der Tragfähigkeit nach der API. Mit zunehmender Schlankheit  $L/D$  dreht sich dieser Trend, insbesondere für kleine  $q_c$ - Werte und damit geringere Lagerungsdichten, um. Dies lässt darauf schließen, dass eine Bemessung nach der API für relativ kurze Pfähle in dicht gelagerten Böden sehr konservativ ausfällt.

Weiterhin wird aus Bild 7 der Unterschied zwischen den einzelnen Verfahren untereinander deutlich. Obwohl allen Verfahren die Auswertung zahlreicher Pfahlprobelastungen zugrunde lag, kommt es bei identischen Randbedingungen zu signifikanten Abweichungen der berechneten Zugtragfähigkeiten nach den CPT-basierten Verfahren. Dabei sind Unterschiede von bis zu 100% festzustellen. Dadurch wird die Frage nach den Anwendungsgrenzen der einzelnen Verfahren aufgeworfen.

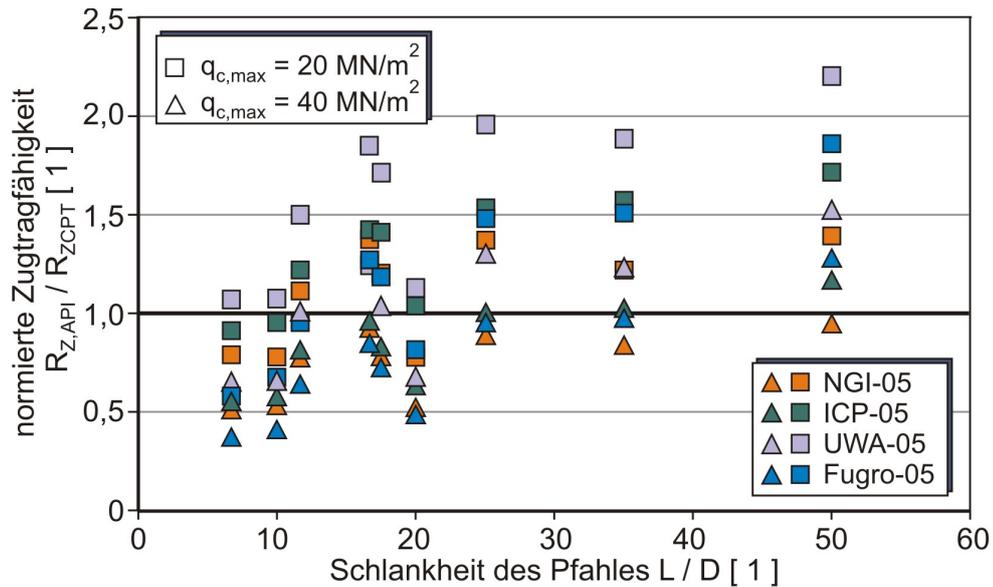


Bild 7 Vergleich der verschiedenen Bemessungsverfahren

### 3.2 Berücksichtigung zyklischer Lasten

Unter zyklischer Axialbelastung ist im allgemeinen mit einer Reduktion der Mantelreibungsspannungen zu rechnen. Insbesondere zugbeanspruchte Pfähle reagieren daher entsprechend empfindlich auf zyklische Lasten.

In Bild 8 sind Versuchsergebnisse für die auf die statische Grenzlast  $R_k$  bezogene zyklische Lastamplitude  $E_{\text{zykl}}$  abhängig von der mittleren bezogenen Last  $E_0/R_k$  und der Anzahl der Lastzyklen  $N$  angegeben. Hieraus ergibt sich, dass zyklisches Versagen ausgeschlossen werden kann, wenn die zyklische Last weniger als rd. 20% der Grenzlast beträgt. Diese Grenze eines „Dauerfestigkeitsbereichs“ wird auch als Critical Level of Repeated Loading (CLRL) bezeichnet. Entsprechend solcher Erkenntnisse wird in der Bemessungspraxis zum Beispiel zur Berücksichtigung zyklischer Lasten die Mantelreibung gegenüber dem statischen Ansatz nur zu 50% angesetzt (und damit die Globalsicherheit verdoppelt). Es liegt auf der Hand, dass dieser Ansatz im Allgemeinen sehr konservativ ist.

Mittag & Richter (2005) haben folgenden Ansatz vorgeschlagen, um die zulässige zyklische Lastamplitude abhängig von der mittleren Last, der Grenzlast und der Anzahl der Lastzyklen zu ermitteln:

$$E_{\text{zykl}} \leq R_k \cdot \kappa \cdot \left( 1 - \left( \frac{E_0}{R_k} \right)^2 \right)$$

Hierin ist der Faktor  $\kappa$  mit  $\kappa = 0,5 - 0,05 \log N \geq 0,20$  einzusetzen. Die sich hieraus ergebenden zulässigen zyklischen Lasten für  $N=10$ , 100 und 1000 sind ebenfalls in Bild 8 eingetragen.

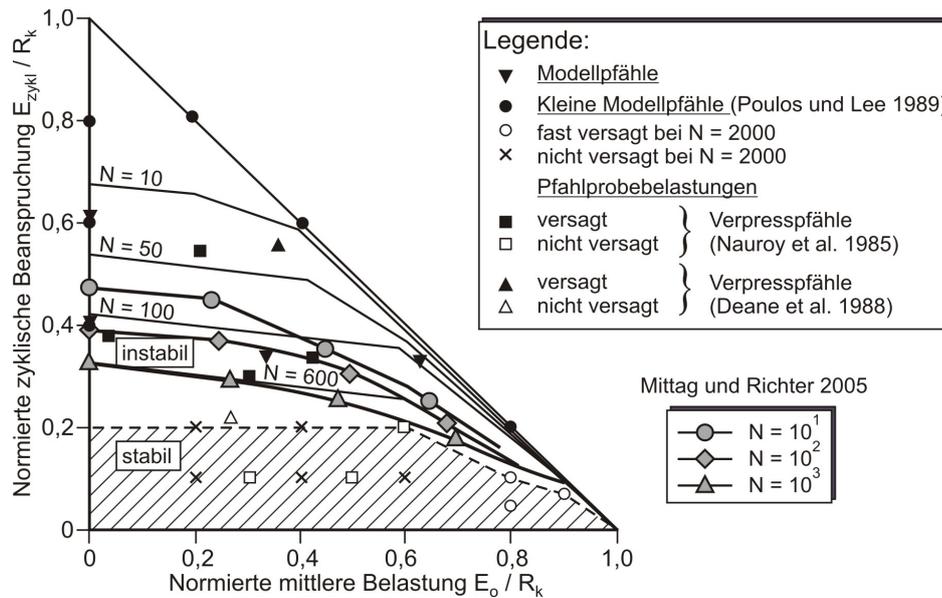


Bild 8 Versuchsergebnisse zur zyklischen Pfahltragfähigkeit (nach Schwarz 2002, mit Ergänzungen nach Mittag & Richter 2005)

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG

Bezüglich der Bemessung horizontal belasteter Pfähle stellt das p-y-Verfahren den Stand der Technik dar. Diesbezüglich offene Fragen betreffen die Übertragung üblicher Ansätze für den verschiebungsabhängigen Bodenwiderstand auf Pfähle sehr großer Durchmesser sowie die realistische Prognose permanenter Schiefstellungen infolge zyklischer Lasten. Für letzteres wird ein Berechnungsverfahren vorgestellt, das numerische Finite Elemente-Berechnungen mit zyklischen Traixialversuchen verknüpft und auf dieser Basis die Prognose der Verformungen eines spezifischen Pfahl-Boden-Systems unter zyklischer Belastung ermöglicht.

Hinsichtlich der axialen Tragfähigkeit von Offshore-Rammpfählen wurden in den letzten Jahren neue Berechnungsverfahren vorgestellt, welche auf der Auswertung von Drucksondiererergebnissen (CPT) beruhen. Durch Vergleich mit dem herkömmlichen Ansatz ergibt sich, dass insbesondere für relativ gedrungene Pfähle in dichten Sanden Optimierungspotenzial besteht. Die verschiedenen Verfahren ergeben aber zum Teil deutlich unterschiedliche Ergebnisse, sodass sie noch nicht als abgesichert gelten können. Optimierungs- und damit Forschungsbedarf besteht auch hinsichtlich der Bemessung für zyklische Pfahlzuglasten.

#### 5. SCHRIFTTUM

- Achmus, M., Kuo, Y.-S. und Abdel-Rahman, K.: Zur Bemessung von Monopiles für zyklische Lasten, *Bauingenieur*, **83**: Heft 7/8, 2008.
- Achmus, M. und Abdel-Rahman, K.: Numerische Untersuchung zum Tragverhalten horizontal belasteter Monopile-Gründungen für Offshore-Windenergieanlagen, *19. Christian Veder Kolloquium*, Graz, Österreich, 2004.

- API (American Petroleum Institute): Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design, API RP2A-WSD, 21. Auflage, 2000.
- Clausen, C., Aas, P. und Karlsrud, K.: Bearing capacity of driven piles in sand, the NGI approach. Perth: ISFOG, 2005.
- DNV (Det Norske Veritas): Offshore Standard DNV-OS-J101, Design of Offshore Wind Turbine Structures”, Fassung Juni 2004.
- GL (Germanischer Lloyd): Rules and Guidelines – IV Industrial Services – 2 Guidelines for the Certification of Offshore Wind Turbines, Germanischer Lloyd (GL) Windenergie, Hamburg, 2005.
- Jardine, R., Chow, F., Overy, R. und Standing, J.: ICP Design Methods for piles in sands and clays. London: Thomas Telford, 2005.
- Kolk, H.J. und Baaijens, A.E.: Design criteria for pipe piles in silica sands. Perth: ISFOG, 2005.
- Kuo, Y.-S.: On the behavior of large diameter piles under cyclic lateral load. *Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau*, Leibniz Universität Hannover, Heft 65, 2008.
- Lehane, B., Schneider, J. und Xu, X.: The UWA-05 method for prediction of axial capacity of driven piles in sand. Perth: ISFOG, 2005.
- Little, R.L. und Briaud, J.-L.: Full scale cyclic lateral load tests on six single piles in sand. Miscellaneous paper GL-88-27, Geotechnical Division, Texas A&M University, College Station, Texas, 1988.
- Mittag, J., und Richter, T.: Beitrag zur Bemessung von vertikal zyklisch belasteten Pfählen. In: Schriftenreihe Geotechnik Universität Kassel, Heft 18, Hg.: Raithel, M., Rudolf, M., 2005.
- Poulos, H. G.: Cyclic Stability Diagram for axially loaded piles. ASCE Journal of Geotechnical Engineering Vol. 114 No. 8 August, 1988.
- Schwarz, P.: Beitrag zum Tragverhalten von Verpresspfählen mit kleinem Durchmesser unter axialer zyklischer Belastung. Lehrstuhl und Prüfamnt für Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München, Schriftenreihe Heft 33, 2002.
- Toolan, F.E., Lings, M.L. und Mirza, U.A.: An appraisal of API RP2A recommendations for determining skin friction of piles in Sand. Houston, Texas: Proceedings of the 22nd Annual Offshore Technology Conference, 1990.
- Wiemann, J.: Bemessungsverfahren für horizontal belastete Pfähle – Untersuchungen zur Anwendbarkeit der p-y Methode, *Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik*, Universität Duisburg-Essen, Heft 33, 2007.