

# Numerische 3-D-Modellierung von Offshore-Pfählen unter horizontaler Belastung mit verschiedenen Einwirkungsrichtungen

K. Abdel-Rahman<sup>1</sup>

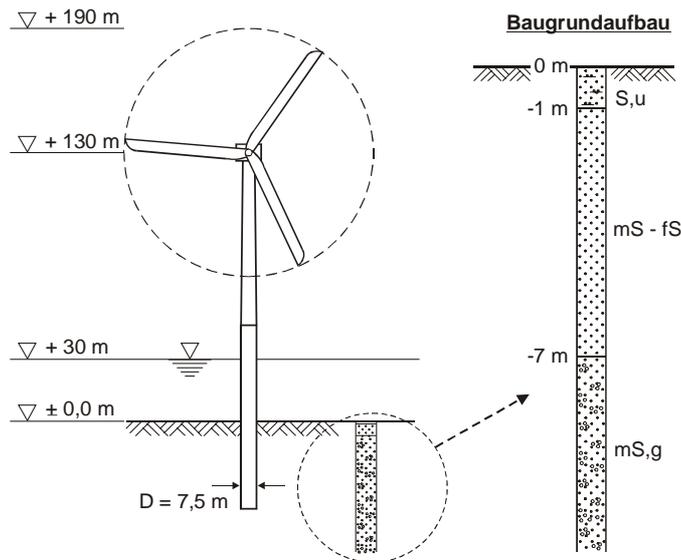
## 1. Einführung

Pfähle als Gründungselemente haben besonders günstige Trageigenschaften bei rein axialer Beanspruchung. Sie können aber durchaus auch für die Abtragung lateraler Belastungen herangezogen werden. Pfähle relativ großer Durchmesser werden häufig für laterale Lasten bemessen. In der Offshoretechnik spielt die Abtragung horizontaler Lasten durch vertikale oder annähernd vertikale Pfähle eine besonders große Rolle. Zur Zeit werden in der Nord- und Ostsee mehrere Offshore-Windparks für Wassertiefen von 30 bis zu 40 m geplant. Als mögliche Gründungsvarianten kommen zum Beispiel für solche Offshore-Windenergieanlagen ein sehr großer Einzelpfahl (Monopile, s. Abb. 1) sowie aufgelöste Stahlkonstruktionen mit in den Ecken angeordneten Pfählen (Tripod, Jacket) in Frage. Als Folge der Wind- und der Wellenbelastung werden die Pfähle durch horizontale Belastungen aus verschiedenen Einwirkungsrichtungen beansprucht.

Eine Beeinflussung des Tragverhaltens durch eine vorhergehende Belastung in anderer Richtung wird bei der Bemessung bislang nicht berücksichtigt. Da für die genannten Gründungskonstruktionen bislang keine durch Messungen oder Erfahrungen abgesicherten Bemessungsverfahren vorliegen, ist eine rechnerische Prognose des Tragverhaltens – verbunden mit der messtechnischen Kontrolle des Bauwerks- bzw. Bodenverhaltens (Beobachtungsmethode) – erforderlich. Zur Prognose des Tragverhaltens unter horizontaler Belastungen wurden numerische Berechnungen mit dem Programmsystem ABAQUS (2006) durchgeführt.

---

<sup>1</sup> Dr.-Ing., Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau,  
Leibniz Universität Hannover, Appelstr. 9A, D-30167 Hannover, Tel. ++49 511-762 2273;  
[khalid@igbe.uni-hannover.de](mailto:khalid@igbe.uni-hannover.de)



**Abbildung 1: Monopilegründung (exemplarisch)**

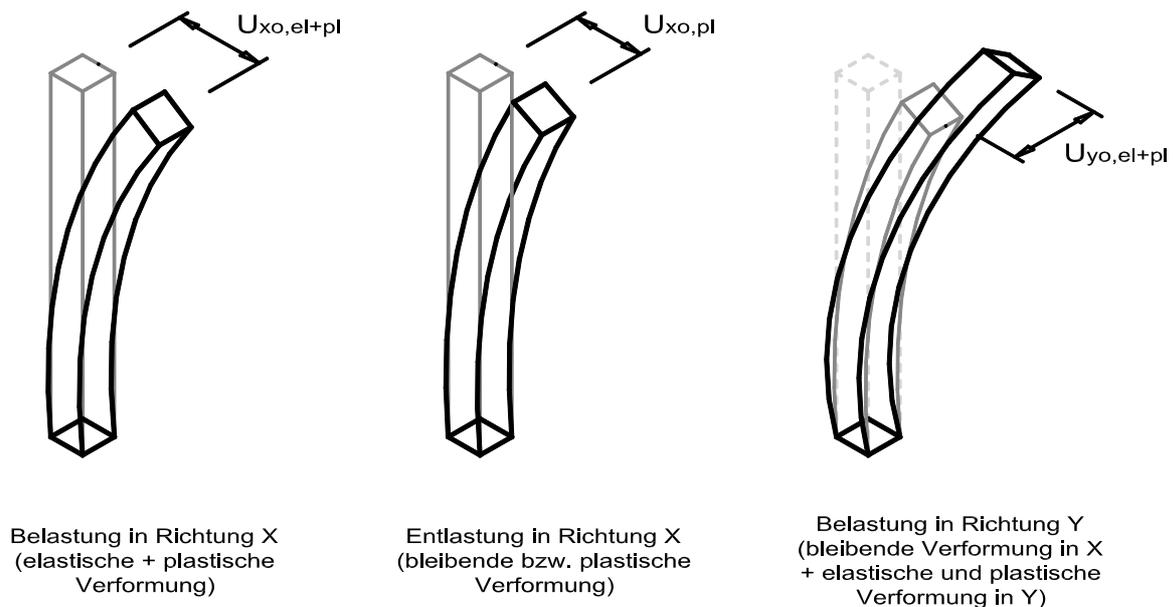
## 2. Problemdefinition

Das Verhalten von Pfählen unter statischer horizontaler Belastung wurde bereits ausführlich untersucht (Abdel-Rahman & Achmus 2005). Bei dieser Untersuchung wurde die Einwirkungsrichtung konstant gehalten. In der Wirklichkeit werden Pfähle häufig aus veränderlichen Richtungen belastet. Bis heute wird das Problem meistens so vereinfacht, dass das Pfahltragverhalten als unabhängig von einer vorhergehenden Belastung angenommen wird.

Wenn ein Pfahl in einer Richtung belastet wird, treten in Abhängigkeit von der Größe der Kraft ein Anteil an elastischer Verformung und ein Anteil an plastischer bzw. bleibender Verformung auf. Im Boden wird entsprechend nach Entlastung eine Spannungsänderung gegenüber dem Ausgangszustand induziert. Dieser veränderte Ausgangszustand wirkt sich auf das Tragverhalten bei einer Folgeb Belastung aus.

Mit diesem Thema haben sich bereits einige Autoren in jüngerer Zeit befasst. Untersuchungen von Mayoral et al. (2005) und Levy et al. (2006) zeigen unter anderem, dass der Boden sich um so steifer verhält, je kleiner der Winkel zwischen zwei unterschiedlichen Einwirkungsrichtungen ist. Von daher sind die Effekte der vorherigen Lastvorgänge (Recent Load History) nicht immer zu vernachlässigen. Welchen quantitativen Einfluss die bleibende Verformung und die bleibenden Spannungen auf das Pfahlverhalten in der neuen Einwirkungsrichtung haben, ist aber bis heute nicht geklärt (Abb. 2).

Nachfolgend werden die ersten Ergebnisse einer numerischen Simulation des Problems für Stahlrohrpfähle in Sandboden dargestellt. Die Lastrichtung wurde dabei zunächst um  $90^\circ$  verändert.



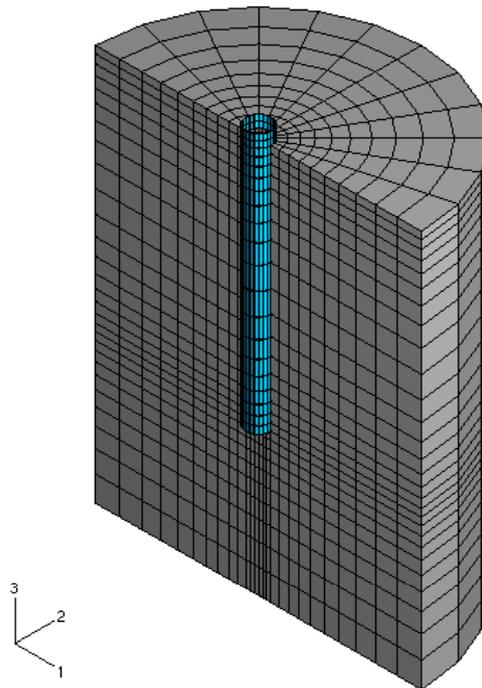
**Abbildung 2: Auswirkung der Recent Load History**

### 3. Numerische Modellierung

Zur Untersuchung des Tragverhaltens von Pfählen unter horizontaler Belastung mit verschiedenen Einwirkungsrichtungen wurden dreidimensionale Finite-Elemente-Berechnungen mit dem Programmsystem ABAQUS (2006) durchgeführt. Sowohl der Pfahl als auch der Boden wurden mit Volumenelementen (C3D6&C3D8) diskretisiert. Es wurden Pfähle mit zwei Durchmessern  $D = 2,0 \text{ m}$  &  $3,0 \text{ m}$  sowie Einbettungslängen in den Seeboden (Sand) von  $L = 20 \text{ m}$  und  $L = 30 \text{ m}$  untersucht.

Eine Ansicht des Finite Elemente-Netzes ist in Abb. 3 dargestellt. Der Boden wurde bis zu einem Abstand von der Pfahlachse von mindestens dem 6-fachen Pfahldurchmesser sowie bis zu einer Tiefe unter Pfahlfuß von mindestens dem 4-fachen Pfahldurchmesser diskretisiert, um Randeinflüsse aus den Modellrändern zu minimieren.

Das Reibungsverhalten in der Grenzfläche Pfahl/Boden wurde durch Kontaktelemente modelliert, wobei der Wandreibungswinkel mit  $\delta = 0,67 \varphi'$  angesetzt wurde.



**Abbildung 3: Ansicht des Finite-Elemente-Netzes**

Die Modellierung des Stoffverhaltens des Bodens ist für die Qualität der Berechnungsergebnisse natürlich von entscheidender Bedeutung. Es wurde das vom Abaqus-Programm bereitgestellte elastoplastische Materialgesetz mit Mohr-Coulomb'schem Fließkriterium verwendet. Dieses Stoffgesetz hat den Vorteil, dass es allgemein sowohl für nichtbindige als auch für bindige Böden verwendet werden kann. Die verwendeten Stoffparameter sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Die Wichte des Bodens wurde jeweils mit  $\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$  angesetzt.

**Tabelle 1: Verwendete Stoffparameter**

Stoffgesetz	Stoffparameter
Mohr-Coulomb	$E_S = 80 \text{ MN/m}^2$ , $\nu = 0,25$ $\varphi' = 35^\circ$ , $\psi = 5,0^\circ$ , $c' = 0,1 \text{ kN/m}^2$

Die Elemente der Pfähle wurden als linear elastisch mit einem Elastizitätsmodul von  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MN/m}^2$  und einer Querdehnzahl von  $\nu = 0,20$  modelliert.

In einer schrittweise Berechnung wurden zunächst der Initialspannungszustand für homogenen Sandboden generiert (Geostatic-step) und danach die Bodenelemente im Bereich der Pfähle durch Pfahl-Elemente ersetzt. Danach wurde die Vertikallast zur Berücksichtigung des Eigengewichts der Windenergieanlage aufgebracht.

**Tabelle 2: Phasen der Berechnungen**

Step N°	Name	Besonderheiten
1	GEOSTATIC	<ul style="list-style-type: none"><li>• Definition des Initialspannungszustands</li></ul>
2	PFAHL	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pfahl und Kontaktflächen aktivieren</li><li>• Boden in der Lage des Pfahles entfernen</li></ul>
3	VLAST	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aufbringen der Vertikalkraft</li></ul>
4	HLAST 0°	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aufbringen der horizontalen Erstbelastung</li></ul>
5	ENTLASTUNG	<ul style="list-style-type: none"><li>• Horizontalkraft = 0</li></ul>
6	HLAST 90°	<ul style="list-style-type: none"><li>• Horizontalkraft in zur Erstbelastung um 90° gedrehten Richtung aufbringen</li></ul>

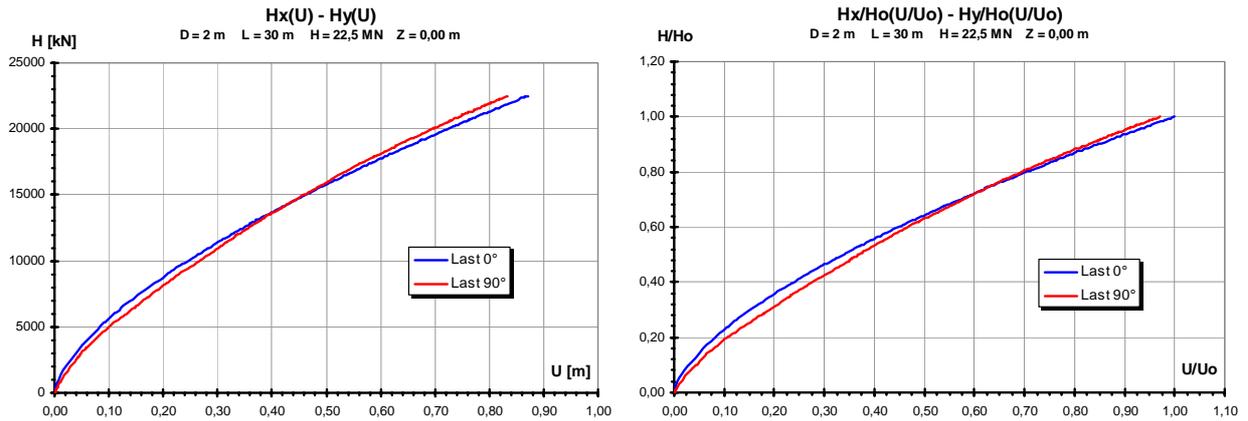
Im Rahmen dieser Untersuchungen werden nun drei weitere Phasen (Tab. 2) definiert. In der vierten Phase wird die Horizontalkraft erstmal nur in eine Richtung (Richtung 0°) aufgebracht. Anschließend wird der Pfahl entlastet. Ausgehend von diesem Zustand wird der Pfahl schließlich in einer um 90° verschwenkten Richtung belastet (6. Phase). Der Vergleich der Last-Verformungskurven für Erstbelastung und erneute Belastung ermöglicht die Beurteilung des Einflusses der Vorbeanspruchung.

#### 4. Numerische Ergebnisse

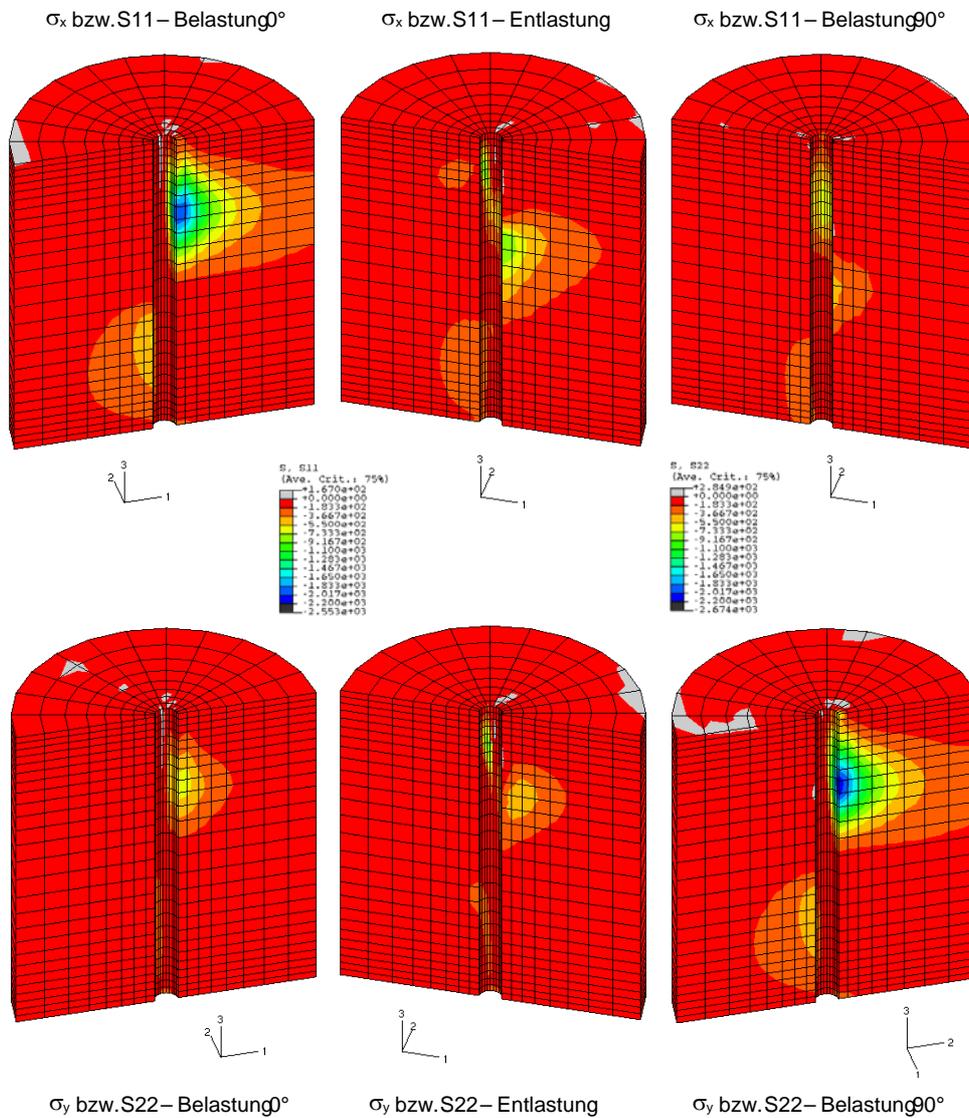
In Abb. 4 sind die Last-Verschiebungs-Diagramme für Erst- und für Wiederbelastung in um 90° verschwenkter Richtung für den Fall eines 2m-Pfahls mit 30 m Einbindelänge dargestellt. Die ermittelten Kurven weichen nur relativ geringfügig voneinander ab. Demnach hat die „recent load history“ in dem betrachteten Fall einen geringen Einfluss.

Auffällig ist eine geringfügig kleinere Anfangssteifigkeit für die wiederholte Belastung. Ab einer Wiederbelastung in der Höhe von rd. 60% der Vorbelastung ergibt sich jedoch annähernd gleiche bzw. sogar geringfügig höhere Steifigkeit.

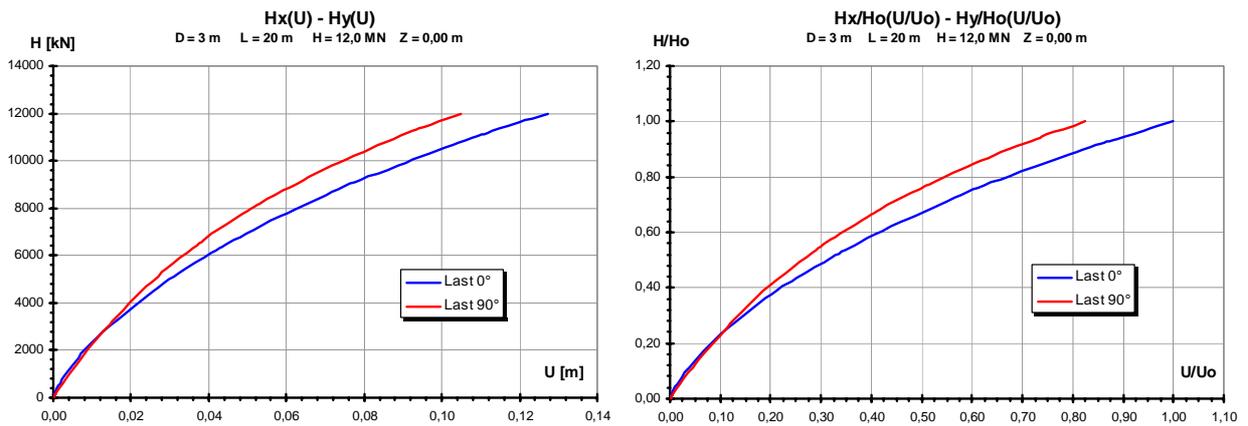
Dieses Verhalten kann anhand der Darstellung der Bodenspannungen in Abb. 5 erläutert werden. Nach Entlastung von der ersten Belastung ergibt sich ein gegenüber dem Ausgangszustand veränderter Spannungszustand im Boden. Es entsteht auch ein Lücke zwischen dem Pfahl und dem anstehenden Boden. Dies führt bei einer nachfolgenden Belastung zu einer zunächst geringeren Steifigkeit, bis die Lücke geschlossen wird und anschließend die Verdichtung des Bodens durch die vorhergehende Belastung bestimmend für das Tragverhalten wird.



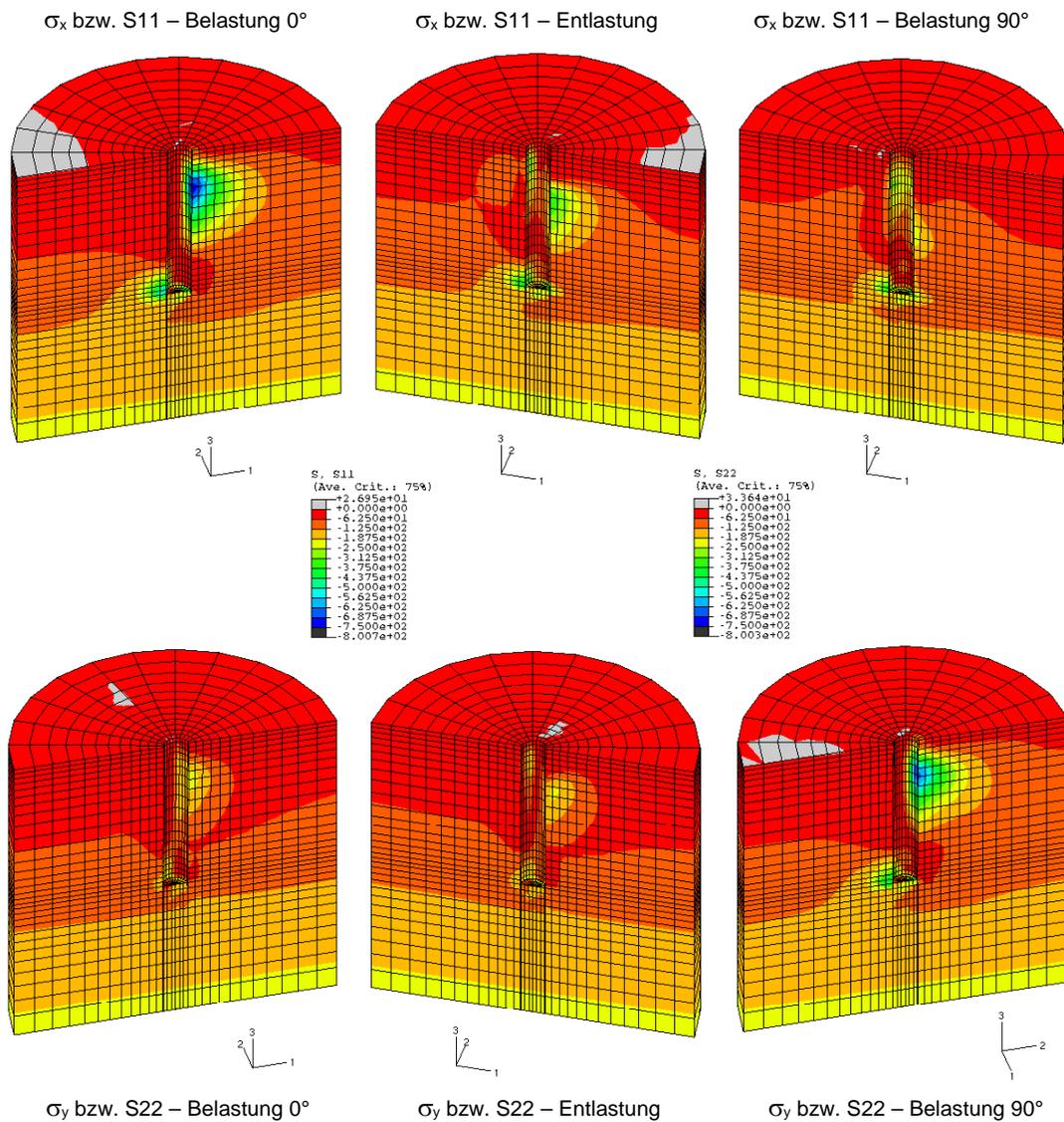
**Abbildung 4: Last-Verschiebungs-Diagramm (D=2,0m, L=30,0m) in mitteldichtem Sand (Forgoso Lara 2007)**



**Abbildung 5: Mobilisierte horizontale Spannungen (D=2,0m, L=30,0m) in mitteldichtem Sand (Forgoso Lara 2007)**



**Abbildung 6: Last-Verschiebungs-Diagramm ( $D=3,0\text{m}$ ,  $L=20,0\text{m}$ ) in mitteldichtem Sand (Forgoso Lara 2007)**



**Abbildung 7: Mobilisierte horizontale Spannungen ( $D=3,0\text{m}$ ,  $L=20,0\text{m}$ ) in mitteldichtem Sand (Forgoso Lara 2007)**

Zum Vergleich wurden die gleichen Berechnungen für einen Pfahl mit 3 m Durchmesser und 20 m Einbindelänge durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Abb. 6 und 7 wiedergegeben. Für diesen Fall wurde ein größerer Unterschied der Last-Verformungskurven für Erstbelastung und Wiederbelastung in anderer Richtung erhalten. Der Einfluss einer „recent load history“ hängt demnach von den Randbedingungen bzw. den Eigenschaften des Pfahl-Boden-Systems ab. Im zweiten Fall (D=3,0 m, L=20,0 m) handelt es sich um einen sehr steifen Pfahl, während im ersten Fall (D=2,0 m, L=30,0m) der Pfahl deutlich biegeweicher verhält.

## 5. Zusammenfassung

Die hier vorgestellten ersten Berechnungsergebnisse zum Problem der “recent load history” für horizontal belastete Pfähle in Sandböden zeigen auf, dass der quantitative Einfluss von den Systemrandbedingungen abhängt.

Die Berechnungen werden fortgeführt. Variiert werden sollen insbesondere die Pfahlgeometrie (Pfahldurchmesser und Einbindetiefe) sowie die Größe der Erstbelastung und der Winkel, um den die Wiederbelastung verschwenkt wird.

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen der Mitgliedschaft im FORWIND-Zentrum für Windenergieforschung der Universitäten Hannover und Oldenburg erarbeitet. Die Berechnungen wurden auf dem vom Hochleistungsrechenzentrum Niedersachsen (HLRN) zur Nutzung zur Verfügung gestellten Parallelrechner ausgeführt.

## Literatur

- [1] ABAQUS 2006. User Manual, Version 6.6.
- [2] Abdel-Rahman, K. & Achmus, M., “Finite Element Modelling of horizontally loaded Monopile Foundations for Offshore Wind Energy Converters in Germany”, International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG), Perth, Australia, 2005.
- [3] Forgoso Lara, P : „Numerische Modellierung von Pfählen unter horizontaler Belastung mit verschiedenen Einwirkungsrichtungen“, Master Arbeit , IGBE, Leibniz Universität Hannover (unveröffentlicht), 2007.
- [4] Levy, N.H., Einav, I. & Randolph, M.F. : Effect of recent load history on Laterally loaded piles in normally consolidated clay (submitted for publication).
- [5] Mayoral, J.M., Pestana, J.M. & Seed , R.B.: “Determination of multidirectional p-y-curves for soft clays. Geotechnical Testing Journal, 28(3), 253-263 pp.