

Numerische Modellierung des Tragverhaltens von Offshore-Tripod-Gründungen

K. Abdel-Rahman¹, M. Achmus²

1. Einführung

Die Windenergie bietet ein sehr großes Potential für die Expansion der erneuerbaren Energie in Deutschland an. Zur Zeit werden in der Nord- und Ostsee mehrere Offshore-Windparks für Wassertiefen von 30 bis zu 40 m geplant. Die Gründungskonstruktion solcher Offshore-Windparks ist eine entscheidende Komponente bei der Errichtung der Windparks. Die meisten der in der Nordsee bereits installierten Windenergieanlagen sind in flacherem Wasser auf Monopiles gegründet. Eine Alternative dazu könnte für die größeren Wassertiefen die Tripod-Gründung darstellen (Abb. 1).

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 von Tripods unter Horizontalkraft- und Momentenbelastung wurden numerische Berechnungen mit dem Programmsystem ABAQUS (2005) durchgeführt.

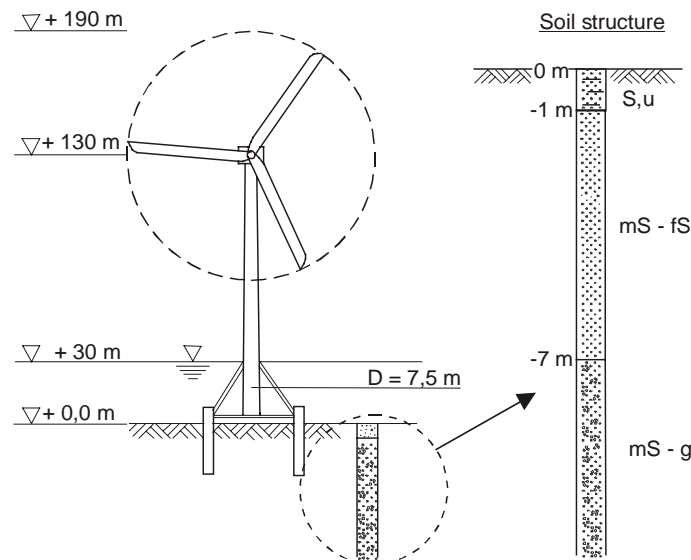


Abbildung 1: Tripod-Gründung

¹ Dr.-Ing., Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Universität Hannover, Appelstr. 9A, D-30167 Hannover, Tel. ++49 511-762 2273; khalid@igbe.uni-hannover.de

² Prof. Dr.-Ing., Vorstand des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Universität Hannover, Appelstr. 9A, D-30167 Hannover, Tel. ++49 511-762-4155; achmus@igbe.uni-hannover.de

2. Tripod-Gründungen

Das Dreibeinfundament (Tripod) besteht meist aus einem zentralen Hauptzylinder, das den WEA-Turm trägt, und einem räumlichen Stahlfachwerk, das die Kräfte und Momente auf den Turm in die Gründungspfähle in den drei Ecken der Struktur überträgt. Die drei Gründungspfähle, die deutlich kleinere Dimensionen im Vergleich zu den mächtigen Monopiles aufweisen, übertragen hauptsächlich Zug- und Druckkräfte in den Seeboden.

Nach Abschluß der Rammarbeiten werden sie durch Vergußmörtel in den Pfahlhülsen an den Ecken des Tripods (Fuße) fixiert. Die Eindringtiefe der Gründungspfähle beträgt, wie auch bei den Monopile-Gründungen, etwa 15,0 – 25,0 m je nach den Eigenschaften des örtlichen Untergrunds.

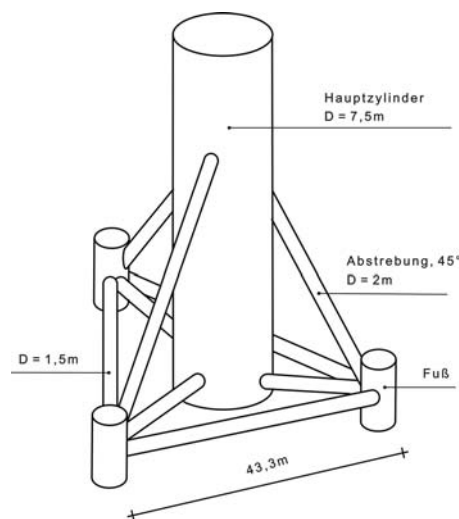


Abbildung 2: Tripod-Konstruktion

Die folgende Tabelle (Tab. 1) fasst die gesamten Abmessungen zusammen:

Tabelle 1: Abmessungen der Tripod-Konstruktion

Element	Durchmesser [m]	Wanddicke [cm]
Hauptzylinder	7,50	9,0
Streben (diagonal)	2,0	4,0
Streben (horizontal)	1,50	3,0
Pfähle	3,50	6,0

3. Numerische Modellierung des Tragverhaltens unter statischer Belastung

Für die Berechnung des Tragverhaltens unter Berücksichtigung der komplexen Interaktionen zwischen dem Tripod und dem Baugrund sind in der Regel numerische Berechnungsverfahren einzusetzen, die allerdings einen erheblichen Zeit- und Rechenaufwand sowie Erfahrung mit derartigen Methoden erfordern.

Zur Untersuchung des Tragverhaltens von Tripod-Gründungen wurden dreidimensionale Finite-Elemente-Berechnungen mit dem Programmsystem ABAQUS (2005) durchgeführt.

Es wurden folgende Systeme modelliert:

- i) Ein Tripod mit einem Turmdurchmesser von $D = 7,50$ m und einer Wanddicke von $t_w = 9$ cm, wobei die Einbindetiefe der Pfähle in homogenen, mitteldicht gelagerten Sand 20,0 m beträgt;
- ii) Ein Tripod mit einem Turmdurchmesser von $D = 7,50$ m und einer Wanddicke von $t_w = 9$ cm, wobei die Einbindetiefe der Pfähle in homogenen, mitteldicht gelagerten Sand 25,0 m beträgt.

Eine Ansicht des Finite Elemente-Netzes ist in Abb. 3 dargestellt. Das diskretisierte Modell besteht aus drei Zylindern jeweils mit einem Radius von 20 m, was etwa dem Sechsfachen des Pfahldurchmessers entspricht. Die untere Grenze des Modells wurde 15 m unterhalb des Pfahlfußes angenommen. Mit diesen Modellabmessungen werden die Randeinflüsse aus den Modellrändern minimiert.

Die folgende Tabelle fasst die numerischen Eigenschaften für die beiden Modelle zusammen:

Modell Nr.	Anzahl der Knoten	Anzahl der Elementen	Anzahl der Freiheitsgrade
i	43.857	40.164	120.960
ii	50.367	46.665	138.330

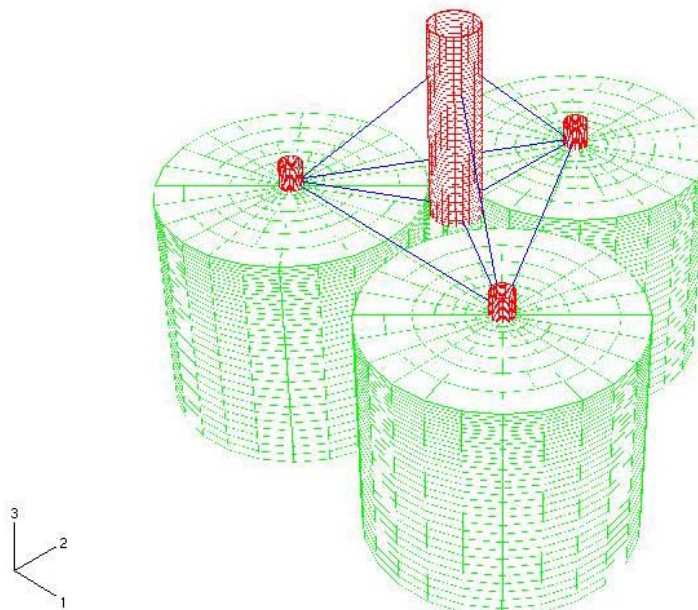


Abbildung 3: Ansicht des Finite-Elemente-Netzes

In einer schrittweise Berechnung wurden zunächst der Initialspannungszustand für homogenen Sandboden generiert und danach die Bodenelemente im Bereich der Pfähle durch Pfahl-Elemente ersetzt. Danach wurde die Vertikallast zur Berücksichtigung des Eigengewichts der Windenergieanlage aufgebracht. Abschließend wurde die Horizontalbelastung stufenweise aufgebracht. Dabei wurde die Angriffshöhe der Belastung über Seeboden auf 30,0 m angesetzt.

Boden und Pfahl wurden mit 8-knotigen Kontinuumelementen (C3D6&C3D8) modelliert, wobei die Streben als 3-Knoten Balkenelemente (B32) modelliert wurden. Das

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

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 2: Verwendete Stoffparameter

Stoffgesetz	Stoffparameter
Mohr-Coulomb	$E_s = 100 \text{ MN/m}^2$, $\nu = 0,25$ $\phi' = 35^\circ$, $\psi = 5^\circ$, $c' = 0,1 \text{ kN/m}^2$

Die Elemente des Tripods (Streben und 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.

4. Numerische Ergebnisse

Von besonderer Bedeutung für die Bemessung von Windkraftanlagen sind die Verformungen und dabei insbesondere die Verdrehung der Gründungskonstruktion und damit der Turmbasis, da ein störungsfreier Betrieb nur bei relativ geringen Schiefstellungen gesichert ist. Ein wesentliche Berechnungsergebnis ist daher die Horizontalverschiebung des Tripod am Anschluss zur Turmkonstruktion.

In Abb. 4 sind die Horizontalverschiebungen der Gründungskonstruktion unter einer Bemessungslast von 8,0 MN in Richtung der Symmetrieachse (2-axis) grafisch dargestellt.

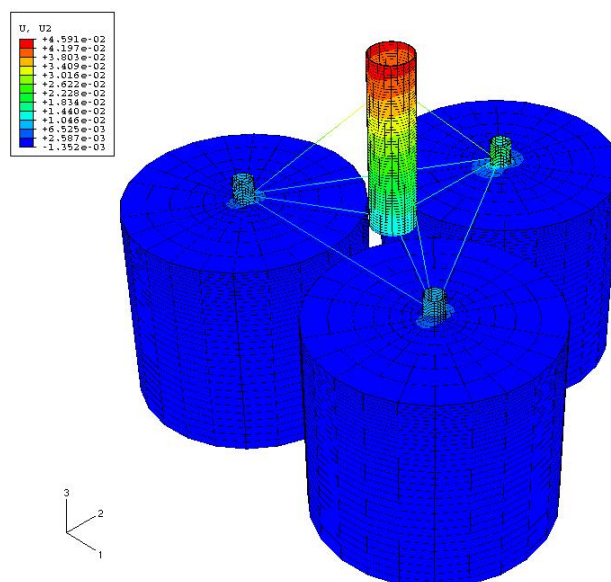


Abbildung 4: Horizontale Verschiebung (U2) in mitteldichtem Sand unter $H=8,0 \text{ MN}$, $V=10,0 \text{ MN}$ (Einbindetiefe = 20,0m)

Die maximale horizontale Turm-Verschiebung (U2) beträgt ca. 4,50 cm am Meeresspiegel, wobei die zugehörige maximale Turm-Verdrehung ca. $0,11^\circ$ ist. Ebenfalls mit Abaqus

berechnete Ergebnisse für Monopile-Gründungen ($D=7,50$ m mit Einbindetiefe $L = 20,0$ m) in mitteldichtem Sandboden ergaben unter den gleichen Lasten eine Pfahlkopf-Verschiebung von ca. 27,50 cm und eine Pfahlkopf-Verdrehung von ca. $0,441^\circ$. (Abdel-Rahman & Achmus (2005) sowie Achmus et al. (2005)).

Das Dreibeinkonzept (Tripod) ist daher ein im Vergleich zum Monopile eher steifes Gründungskonzept und lässt damit nur eine geringere Kopfverschiebung bzw. Kopfverdrehung zu.

Das charakteristische Gesamtverhalten des Tripods kann aus der Abbildung 5 entnommen werden. Dargestellt sind hier in einer Draufsicht die resultierenden Verschiebungen der Konstruktion.

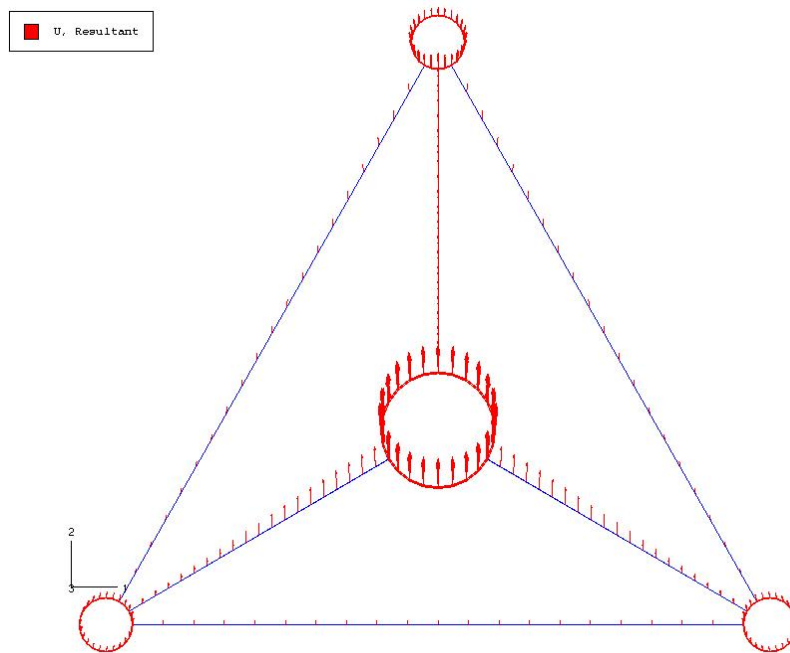


Abbildung 5: Vektor-Plot der Gesamtverschiebung des Tripods

Die folgende Tabelle (Tab. 3) zeigt die Verteilung der horizontalen und vertikalen Belastung auf die drei Gründungspfähle und die dazugehörigen Verschiebungen:

Tabelle 3: Übersicht der Belastung & der Verschiebung der Tripod-Pfähle

Pfahl Nr.	F_2 [kN]	U_2 [cm]	F_3 [kN]	U_3 [cm]
1	1800,0	0,0885	-360,0	-0,041
2	1800,0	0,0885	-360,0	-0,041
3	4400,0	1,867	-9280,0	-1,114

Um den Einfluss der Einbindetiefe der Pfähle im Untergrund zu untersuchen, wurde ein zweites Modell mit Einbindetiefe von $L = 25,0$ m modelliert. Abbildung 6 zeigt die horizontale Verschiebung (U_2) unter den gleichen Bemessungslasten ($H=8,0$ MN, $V=10,0$ MN). In diesem Fall liegt die maximale Verschiebung bei ca. 4,20 cm. Eine erhebliche Reduktion der Verschiebungen wird somit durch die Verlängerung der Pfähle nicht erreicht.

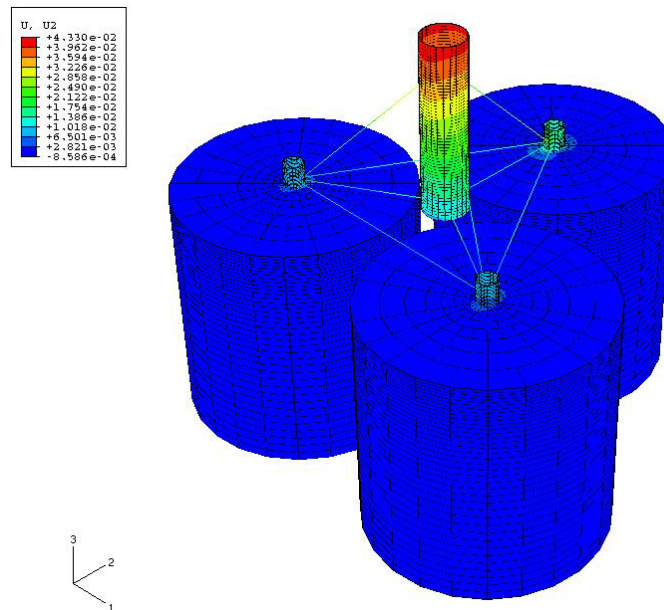


Abbildung 6: Horizontale Verschiebung (U2) in mitteldichtem Sand unter $H=8,0$ MN, $V=10,0$ MN (Einbindetiefe = 25,0m)

5. Zusammenfassung

Die Tripod-Gründungstechnik ist bisher noch nicht für die Offshore-Windenergienutzung eingesetzt worden. Sie verspricht aber ein großes Anwendungspotential bei der Erschließung küstenferner Seegebiete in der Deutschen Bucht.

Für den Tripod kann auf Basis aufwendiger numerischer Berechnungen eine Prognose des Tragverhaltens unter statischer Bemessungslast vorgenommen werden. Derartige Berechnungen sind zur Festlegung einer Gründungskonstruktion und ihrer Abmessungen notwendig. Für derzeitige Projektierungen ist die Kontrolle des Bauwerksverhaltens im Rahmen der Beobachtungsmethode vorzusehen. Dies gilt besonders im Hinblick auf die Größe der langfristig infolge zyklischer Belastungen zu erwartenden Verformungen der Gründungskonstruktionen, da diese derzeit kaum zuverlässig abgeschätzt werden können. Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen der Mitgliedschaft im FORWIND-Zentrum für Windenergieforschung der Universitäten Hannover und Oldenburg erarbeitet.

Literatur

- [1] ABAQUS 2005. User Manual, Version 6.5.
- [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] Achmus, M., Abdel-Rahman, K., and Peralta, P. "Untersuchungen zum Tragverhalten von Monopiles für die Gründung von Offshore-Windenergieanlagen", Pfahlsymposium Braunschweig, 2005.