

# Pfahl-Boden-Systeme

## Beulverhalten von Monopiles während und nach der Installation in nichtbindige Böden

**D. Aubram, R. Daryaei, F. Rackwitz**, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik

### Kurzgefasst

- Umfassende Modellierung und Simulation der Pfahlinstallation und des gebetteten Pfahls im Boden unter Extremlasten
- Verifizierung und Validierung durch Nachrechnung von klein- und großmaßstäblichen Versuchen
- Parameterstudien als Grundlage für praxistaugliche vereinfachte Berechnungsverfahren

Durch den forcierten Ausbau der regenerativen Energien befinden sich aktuell zahlreiche Offshore-Windparkprojekte in der deutschen Nord- und Ostsee in der Planungs- oder Realisierungsphase. Monopiles zählen dabei zu den bevorzugten Gründungsvarianten. Sie bestehen aus einem einzelnen Stahlrohr, welches mittels Schlagrammung in den Meeresboden eingebracht wird. Immer leistungsstärkere Windturbinen in immer größeren Wassertiefen erfordern Monopiles mit größeren Pfahldurchmessern. Daraus ergeben sich offene Fragen u.a. im Hinblick auf das Beulen am Pfahlfuß während der Installation und andererseits das Beulen des gebetteten Pfahls im Bereich der Meeresbodenoberfläche bei Extremlasten in der Betriebsphase.

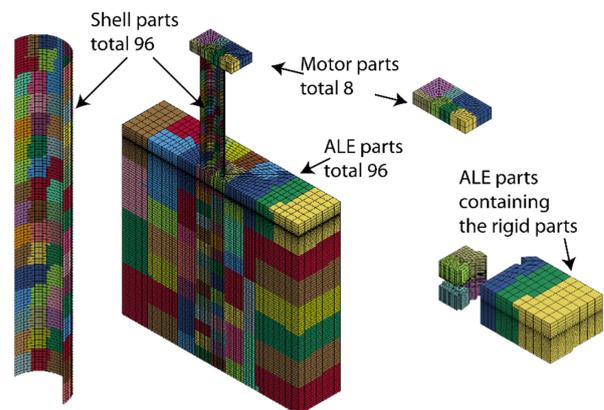
Es stehen bislang keine Berechnungsmodelle zur Verfügung, die das Problem des Pfahlbeulens unter Berücksichtigung des umgebenden Bodens ganzheitlich abbilden könnten. Auch vereinfachte ingenieurmäßige Berechnungsmethoden bzw. Nachweisverfahren werden in den einschlägigen Regelwerken nicht angegeben. Daher werden große Offshore-Monopiles momentan noch sehr konservativ ausgelegt.

Für die Entwicklung vereinfachter Berechnungsverfahren muss die Datenbasis hinreichend groß sein. Experimentelle Untersuchungen im Großmaßstab sind dafür aufgrund der hohen Kosten und des hohen Ressourceneinsatzes ungeeignet. An diesem Punkt knüpft das Forschungsprojekt an, indem es ein kontinuumsmechanisches Modell mit einer leistungsfähigen Multi-Material Arbitrary Lagrangian-Eulerian (MMALE) Methode kombiniert. Die wesentlichen Ziele sind:

1. Entwicklung eines umfassenden numerischen Modells für die Pfahlinstallation und den gebetteten Pfahl unter Extremlasten.

2. Verifizierung des Modells durch Nachrechnung von kleinmaßstäblichen Versuchen.
3. Durchführung von Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen.
4. Simulation großmaßstäblicher Versuche und Validierung des Modells.

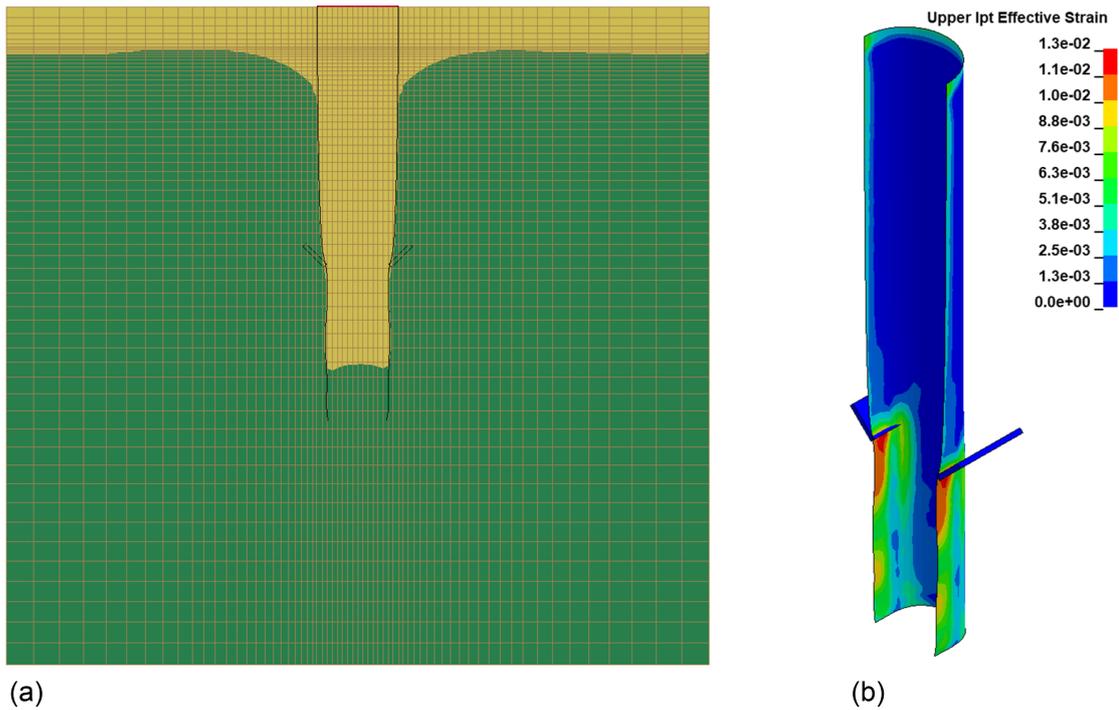
Bei der MMALE Methode sind das Netz und die Materialzonen nicht konform, d.h. Elemente können zu einem Zeitpunkt mehrere Materialien enthalten (multi-materielle Elemente) und Materialränder können sich durch das Netz hindurchbewegen (vgl. Abb. 2a). Dies ermöglicht die Simulation von beliebig großen Materialverformungen, Fließ- und Durchmischungsvorgängen, äußert sich jedoch in einem hohen Rechenaufwand dieser Methoden. Erst in jüngster Zeit wurden MMALE und verwandte Methoden auf geotechnische Problemstellungen angewandt [1–4].



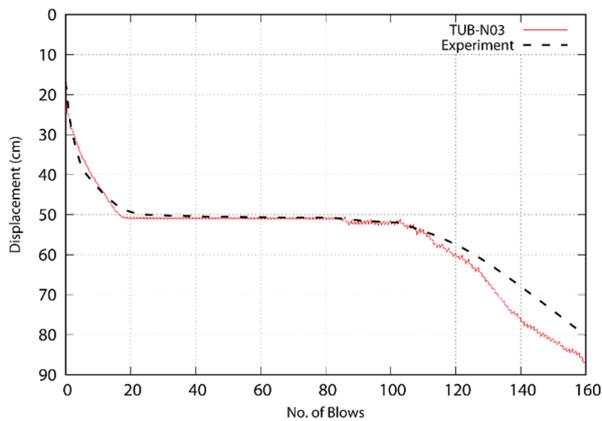
**Abbildung 1:** Elementblöcke eines Pfahl-Boden-Modells für eine parallele Berechnung auf 96 Prozessoren des HLRN.

Die von den Antragsteller in früheren Arbeiten entwickelten MMALE Modelle für das Pfahlbeulen im Boden [2] werden im Rahmen des Projekts fortentwickelt und hinsichtlich Parallelisierung und Skalierung auf die HLRN Supercomputer zugeschnitten. Abb. 1 zeigt eine getestete Domain Decomposition für ein Pfahl-Boden-Modell. Ergebnisse einer MMALE Simulation der Impulsrammung eines Pfahls in Sand mit zwei starren Störkörpern sowie die Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten Eindringkurve des Pfahls sind in Abb. 2 und Abb. 3 dargestellt.

Die Untersuchungen und Ergebnisse sollen im Anschluss an das Forschungsprojekt in die Entwicklung ingenieurmäßiger Berechnungsverfahren und



**Abbildung 2:** MMALE Simulation der Impulsrammung eines Pfahls in Sand mit zwei starren Störkörpern. (a) Materialkonfiguration (grün = Sand) im Endzustand und (b) Beulform und effektive Vergleichsdehnung des Pfahls.



**Abbildung 3:** Vergleich der Eindringkurven eines Pfahls (Pfahlkopfverschiebung vs. Anzahl der Schläge) aus Experiment und Simulation. In 50 cm Tiefe trifft der Pfahl auf starre Störkörper; vgl. Abb. 2.

Nachweisformate einfließen. Daher werden im Projekt Parametervariationen und Sensitivitätsanalysen mit großer zeitlicher und räumlicher Auflösung der Daten durchgeführt, die den Einsatz eines Supercomputers zwingend erforderlich machen.

#### WWW

<https://www.grundbau.tu-berlin.de>

#### Weitere Informationen

- [1] Bakroon, M.; Daryaei, R.; Aubram, D.; Rackwitz, F.: Multi-material arbitrary Lagrangian-

Eulerian and coupled Eulerian-Lagrangian methods for large deformation geotechnical problems. In A.S. Cardoso et al. (Hrsg.): Proceedings 9th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, S. 673-681, CRC Press, London (2018). doi: 10.1201/9780429446931

- [2] Bakroon, M.; Daryaei, R.; Aubram, D.; Rackwitz, F.: Numerical evaluation of buckling in steel pipe piles during vibratory installation. *Soil Dyn. Earthq. Engrg.* **122**:327-336 (2019). doi:10.1016/j.soildyn.2018.08.003
- [3] Daryaei, R.; Bakroon, M.; Aubram, D.; Rackwitz, F.: Numerical evaluation of the soil behavior during pipe-pile installation using impact and vibratory driving in sand. *Soil Dyn. Earthq. Engrg.* **134**:106177 (2020). doi: 10.1016/j.soildyn.2020.106177
- [4] Tho, K.K.; Leung, C.F.; Chow, Y.K.; Swaddiwudhipong, S.: Eulerian finite-element technique for analysis of jack-up spudcan penetration. *Int. J. Geomech.* **12**:64-73 (2012). doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000111

#### Förderung

PtJ/BMWi