



Schlussbericht des Instituts für Geotechnik, Universität Stuttgart



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zuwendungsempfänger	Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart
Verbundvorhaben	VISSKA - Messung, Modellierung und Bewertung der Vibrationsrammung in Bezug auf Installation, Schallemissionen und Auswirkungen auf Schweinswale im Offshore-Windpark „KASKASI II“
Teilvorhaben	Numerische geotechnische und akustische Analyse
Förderkennzeichen	03EE3043A
Projektpartner	RWE Offshore Wind GmbH BioConsult SH GmbH & Co. KG Itap GmbH Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen
Laufzeit des Vorhabens	01.01.2021 – 30.09.2023
Ansprechpartner	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann (Christian.Moormann@igs.uni-stuttgart.de)
Datum	30.06.2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren



Inhalt

Abbildungsverzeichnis	3
1 Kurzdarstellung.....	4
1.1 Aufgabenstellung	4
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	7
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
2 Eingehende Darstellung	12
2.1 Erzielte Ergebnisse	12
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	30
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	30
2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses	31
2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	31
2.6 Veröffentlichungen	32
Literaturverzeichnis	33



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: CPT-Daten.....	6
Abbildung 2: CPT Evaluation	7
Abbildung 3: Representative Volume Element (RVE) von flüssigkeitsgesättigtem Sand und makroskopische Approximation des erhaltenen Modells durch einen volumetrischen Homogenisierungsprozess	8
Abbildung 4: CPT Daten	9
Abbildung 5: Kelvin-Voigt Element	10
Abbildung 6: Partikel- und Hintergrundnetz	13
Abbildung 7: UBCSAND Class A-Simulation	15
Abbildung 8: Hypoplastisches Stoffgesetz Class A-Simulation	15
Abbildung 9: UBCSAND Modell - Pfahlkopf-Beschleunigung	16
Abbildung 10: Hypoplastisches Stoffgesetz - Pfahlkopf-Beschleunigung	17
Abbildung 11: UBCSAND Modell - Reduzierte relative Dichte	18
Abbildung 12: Hypoplastisches Stoffgesetz - Reduzierte relative Dichte	18
Abbildung 13: UBCSAND Modell - Zwei-Sichten Modell Simulation	20
Abbildung 14: Hypoplastisches Stoffgesetz - Zwei-Sichten Modell Simulation.....	20
Abbildung 15: Verlauf der Hook-Load über die Zeit	21
Abbildung 16: UBCSAND Modell - Pfahl Installationsverlauf unter Berücksichtigung der Hook-Load	22
Abbildung 17: UBCSAND Modell - Einfluss der Frequenz auf den Installationsverlauf	23
Abbildung 18: Hypoplastisches Stoffgesetz - Einfluss der Frequenz auf den Installationsverlauf.....	23
Abbildung 19: UBCSAND Modell - Installationskurve - mit und ohne freies Wasser	24
Abbildung 20: Schalldruckpegel – Feldmessungen	25
Abbildung 21: UBCSAND-Modell: Porenwasserdruckberechnung im Vergleich zu Felddaten	26
Abbildung 22: UBCSAND-Modell: Porenwasserüberdruck im Boden	27
Abbildung 23: Simulation mit UBCSAND Modell: Bodenbeschleunigung.....	28
Abbildung 24: Simulation mit Hypoplastischen Stoffgesetz: Bodengeschwindigkeit.....	28

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Die derzeit gebräuchlichste Methode zur Installation von Monopiles oder allgemein von offenen Stahlrohrpfählen mit kleinerem Durchmesser unter Offshore-Bedingungen ist die Impulsrammung. Dabei werden die Pfähle mit einem Hydraulikhammer schlagend in den Meeresboden eingebracht. Unter Onshore-Bedingungen werden Fertigpfähle in der Regel durch Schlagrammung mit entsprechend dimensionierten Rambahren eingebracht. Die Impulsrammung ist seit vielen Jahrzehnten das Standardverfahren zum Einbringen von Fertigpfählen aus Stahl, Stahl-/Spannbeton oder Holz. Die meisten Bemessungsansätze und Prognosewerkzeuge zum Einbringverhalten (Rammanalyse) und zur späteren Tragfähigkeit solcher Pfähle beruhen daher auf der Impulsrammung. Auch die „Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle“ der DGGT (kurz „EA Pfähle“) basieren auf dieser Methode.

Die Vibrationsrammung ist als alternative Methode aus dem Bereich des Grundbaus bekannt. Sie bietet besondere Vorteile wie kürzere Installationszeiten, geringere Geräuschemissionen und geringere Ermüdungsbelastung von Stahlpfählen während der Installation im Vergleich zur Schlagrammung. Der Einsatz der Vibrationsrammung verspricht daher deutliche wirtschaftliche und ökologische Vorteile, da Lärmquellen reduziert und eine schnellere, materialschonendere Herstellung ermöglicht wird.

Die bodenmechanischen Vorgänge und die Wechselwirkung zwischen Pfahl und Boden während der Vibrationsrammung sind komplex. Durch die zyklische Bewegung der Bodenpartikel infolge der induzierten Beschleunigung und der Entstehung von Porenwasserüberdrücken, gegebenenfalls in Kombination mit Liquefaction-Effekten, kommt es vorübergehend zu einer Verringerung von Mantelreibung und Spitzendruck. Gleichzeitig wird der umgebende Boden durch die hohen Beschleunigungsamplituden stark beansprucht, sodass die Pfähle im Vergleich zu anderen Verfahren mit relativ geringer statischer Auflast und hoher Eindringgeschwindigkeit eingebracht werden können.

Erfahrungen und experimentelle Untersuchungen im Modell- und Realmaßstab haben gezeigt, dass das Eindringverhalten der Pfähle während der Installation sowie das spätere Tragverhalten und der Widerstand von axial und lateral belasteten Pfählen, die durch Vibrationsrammung eingebracht werden, wesentlich durch die Herstellparameter (wie Frequenz, Herstellzeit, statisches Moment, statische Auflast) beeinflusst werden können. Eine wichtige Entwicklungsmöglichkeit besteht daher darin, die Herstellparameter so zu optimieren, dass der betrachtete Pfahl unter den gegebenen geotechnischen Randbedingungen (häufig dicht und sehr dicht gelagerte, wassergesättigte Sande) sowohl vollständig auf Zieltiefe eingebracht werden kann als auch ein Tragverhalten aufweist, das dem von gerammten Pfählen entspricht.

Das in diesem Projekt verwendete numerische Vorhersagemodell basiert auf der Methode der Convected Particle Domain Interpolation (CPDI), einer weiterentwickelten Formulierung der Material-Point-Methode (MPM). MPM ist eine netzbasierte Partikelmethode, die die Simulation großer Verformungen in der Geotechnik ermöglicht. Sie erlaubt eine physikalisch begründete Simulation des Rammvorgangs in gesättigtem Sand unter Berücksichtigung der gewählten Einbauparameter und erfasst das Mehrphasenverhalten des Bodenmaterials als volldynamischen Prozess. Eine ausführliche Erläuterung des einphasigen und des zweiphasigen MPM findet sich in den Referenzen Kafaji (2013) und Giridharan (2022). Weitere Informationen über CPDI finden sich u.a. bei Sadeghirad et al. (2011).

Das Forschungsprojekt VISSKA zielt darauf ab, diese Herausforderungen anzugehen. Das Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart (IGS) hat sich vorrangig auf das Arbeitspaket AP 5 „Numerische geotechnische und akustische Analyse“ konzentriert, aber auch bei den Arbeitspaketen AP 2 „Installationsmonitoring“ und AP 6 „Empirische akustische Modellierung“ bei der Planung der Feldmessungen und der Auswertung der Messdaten zum Installationsvorgang und zu den Schallmessungen eng mit den Projektpartnern zusammengearbeitet. Durch das Arbeitspaket 5 sollen die zuvor

entwickelten analytischen und numerischen Prognosemodelle für vibrierte Monopiles anhand messtechnisch begleiteter Einbringvorgänge in dicht bis sehr dicht gelagerten Sanden, wie sie im Baufeld OWP "KASKASI II" anstehen, erstmalig im Realmaßstab validiert werden. Gleichzeitig sollen die numerischen Modelle erweitert werden, um die Abbildung des Einphasenbereichs des freien Wassers und dessen Kopplung mit dem wassergesättigten Boden und dem eindringenden Pfahl zu ermöglichen, um eine rechnerische Simulation der Schallausbreitung im Wasser zu ermöglichen. Dadurch soll ein umfassend validiertes Prognosewerkzeug sowohl für den Einbringvorgang von Monopiles durch die Vibrationsrammung als auch für die begleitende Unterwasserschallausbreitung geschaffen werden.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde unter Berücksichtigung der folgenden Aspekte durchgeführt:

1. Das in früheren Forschungsprojekten am Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart (IGS) entwickelte, auf einer fortgeschriebenen CPDI-Formulierung beruhende numerische Prognosemodelle wurde um die Implementierung des freien Wassers und seiner Kopplung mit dem gesättigten Boden ergänzt.
2. Die im Baufeld OWP „KASKASI II“ gegebenen Anfangs-, Rand- und Herstellungsbedingungen wurden von allen beteiligten Projektpartnern vollständig übermittelt. Nicht nur die wichtigen Parameter wie die Abmessungen des Pfahls, die Tiefe des Meeresbodens, die Eigenschaften des Vibrators, die Einbaumethode und der geplante Einbauort wurden mit ihren geotechnischen Daten dem IGS zur Verfügung gestellt, sondern auch die Informationen über die durchgeführten Messungen und deren Ergebnisse nebst den Angaben zu Art, Eigenschaften und Standort der für die Messungen eingesetzten Sensoren.
3. Es wurde mit den Projektpartnern vereinbart, wann die Prognosesimulation (‘Class A-Prediction’) des ersten Pfahls von der IGS geliefert wird. Die für die Simulation verwendeten Parameter wurden von allen Partnern vereinbart und für den Rest des Projekts festgelegt. Vom IGS vorzunehmende Änderungen wurden begründet und allen Beteiligten mitgeteilt.
4. Sobald die Monopiles installiert waren, wurden die Installationsdaten dem IGS zur Verfügung gestellt und mit der numerischen Simulation verglichen. Es wurde eine Studie durchgeführt, um zu ermitteln, warum es anfänglich Unterschiede zwischen den Feldmessungen und den Ergebnissen der numerischen Studie gab.
5. Es wurde eine Parameterstudie mit dem validierten numerischen Simulationsmodell durchgeführt, wobei die geotechnischen und die Installationsparameter variiert werden. Seitens des IGS wurde eine Testmatrix vorgeschlagen und allen Partnern zur Verfügung stellen. Individuelle Anforderungen der Projektpartner wurden ebenfalls berücksichtigt, sofern dies technisch durchführbar war und im Rahmen des Projekts lag.
6. Die Simulation des freien Wassers wurde vom IGS in den CPDI-Code implementiert. Mit diesem Code wird nicht nur die Installation des Monopiles simuliert, sondern auch die Entstehung und Ausbreitung von Schallwellen im freien Wasser während der Installation.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für AP5.1 (Pfahlinstallation-Modellierung) wurde die Pfahlinstallation mit einem zweiphasigen Bodenkontinuum und der Convected Particle Domain Interpolation (CPDI) Method modelliert. Zwei konstitutive Modelle wurden für die Prognose der Pfahlinstallation angewendet, i.e. das hypoplastische Stoffmodell und das UBCSAND-Modell. Beide Modelle wurden zusammen mit dem zweiphasigen Code eigens für dieses Projekt implementiert und angepasst. Auch der neuartige Kontaktalgorithmus, der am IGS entwickelt wurde, wurde für dieses Projekt verbessert. Der Code wurde generell so optimiert, dass auch größere Zeitskalen (größer als 5 Minuten) erfolgreich simuliert werden

können. Der am Institut entwickelte CPDI-Code wurde bereits erfolgreich für frühere Monopile-Simulationen verwendet (Moormann et al., 2018), (Giridharan et al., 2020).

In Vorbereitung auf AP5.2 wurden die relevanten Parameter für das Stoffgesetz aus verfügbaren experimentellen Ergebnissen (oedometrische und triaxiale Versuche, reale CPT und synthetische CPT) ermittelt. Diese Parameter wurden gemeinsam mit den Projektpartnern der TU Berlin diskutiert und festgelegt. Die Parameter für Cuxhavener Sand wurden sowohl für das Hypoplastic Soil Model als auch für das UBCSAND Model gewählt. Die Eigenschaften des Bodenkontinuums wurden homogenisiert und die Parameter zwischen IGS und TUB abgestimmt, so dass die Simulationsergebnisse später verglichen werden können. Darüber hinaus wurden die relevanten dynamischen Parameter wie die dynamische Schwingungsanregung, die Geometrie des Pfahls und die vorab gewünschte Einbindetiefe ermittelt. Kurzfristig von RWE kommunizierte Änderungen bezüglich des Standortes, der Installationsreihfolge etc. wurden ebenfalls berücksichtigt.

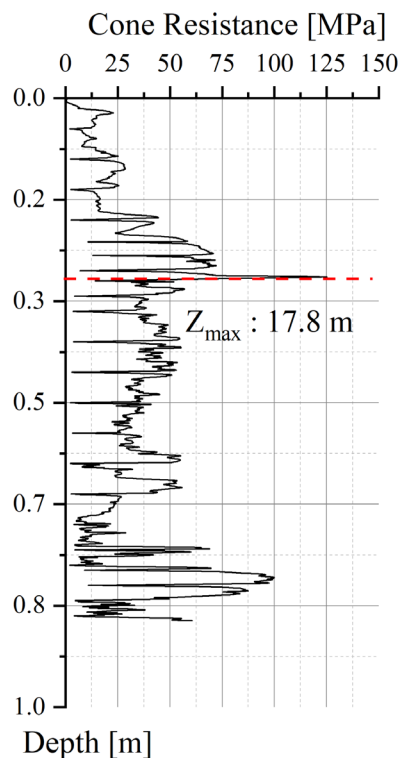


Abbildung 1: CPT-Daten

Die Ermittlung der Parameter begann mit der Auswahl eines Monopiles, der im Laufe des Projekts verglichen werden sollte. Zu diesem Zweck wurde ein Monopile ausgewählt und die CPT-Daten rund um den Installationsbereich des Pfahls wurden ausgewertet, wie in Abbildung 1 dargestellt.

Ziel der Auswertung der CPT-Daten war es, einen Wert für die relative Dichte zu ermitteln, der für die Bodenmodelle verwendet werden kann. Hier wurden zwei Ansätze getestet: i) die Methode nach DIN 4020:2012-12 und ii) die Methode nach Referenz (Jamiolkowski et al., 2003). Die CPT wurde für die Bewertung in 5 Zonen unterteilt. Diese Einteilung basiert auf der Beobachtung der Variation des Spitzendrucks über die Tiefe variiert. Die relative Dichte wurde berechnet und über die Tiefe innerhalb der Zonen homogenisiert. Ein einziger homogenisierter Parameter wurde durch Mittelwertbildung der Werte der homogenisierten relativen Dichte ausgewählt. Dieses Verfahren wahrte nicht nur die wissenschaftliche Integrität der Auswertung der CPT-Daten, sondern vereinfachte auch den Prozess und lieferte einen einzigen relativen Dichteparameter, der für die Berechnung verwendet werden konnte. Die Auswertung der CPT-Daten ist in Abbildung 2 dargestellt.

Layer	Depth [-] (normalized to max. depth)		Average Cone Penetration Resistance [MPa]	Average Unit Weight [kN/m³]	Vertical Stress at Mid-Point [kPa]	DIN Method [%]	DIN Method Average [%]	Relative Density [%]	Average Relative Density [%]	Homogenised Relative Density [%]
	From	To								
				submerged						
1	0.00	0.02	25	8.5	4.25	71.85	71.85	136.70	111.71	
	0.02	0.03	25	8.5	8.50	71.85		125.52		
	0.03	0.05	25	8.5	12.75	71.85		118.98		
	0.05	0.07	25	8.5	17.00	71.85		114.34		
	0.07	0.08	25	9.5	21.75	71.85		110.37		
	0.08	0.10	25	10	26.75	71.85		107.03		
	0.10	0.12	25	10	31.75	71.85		104.27		
	0.12	0.13	25	10	36.75	71.85		101.91		
	0.13	0.15	25	10	41.75	71.85		99.85		
	0.15	0.17	25	9.5	46.50	71.85	98.11			
2	0.17	0.18	70	9.5	51.25	105.38	105.38	129.76	125.06	
	0.18	0.20	70	10.5	56.50	105.38		128.18		
	0.20	0.22	70	10.5	61.75	105.38		126.75		
	0.22	0.23	70	10.5	67.00	105.38		125.43		
	0.23	0.25	70	10.5	72.25	105.38		124.22		
	0.25	0.27	70	10.5	77.50	105.38		123.09		
	0.27	0.28	70	10.5	82.75	105.38		122.03		
	0.28	0.30	70	10.5	88.00	105.38		121.04		
3	0.30	0.32	38	10.5	93.25	85.48	85.48	100.40	93.33	109.46
	0.32	0.33	38	10.5	98.50	85.48		99.51		
	0.33	0.35	38	10.5	103.75	85.48		98.67		
	0.35	0.37	38	10.5	109.00	85.48		97.88		
	0.37	0.38	38	10.5	114.25	85.48		97.12		
	0.38	0.40	38	10.5	119.50	85.48		96.40		
	0.40	0.42	38	10.5	124.75	85.48		95.70		
	0.42	0.43	38	10.5	130.00	85.48		95.04		
	0.43	0.45	38	10.5	135.25	85.48		94.40		
	0.45	0.47	38	9	139.75	85.48		93.87		
	0.47	0.48	38	9	144.25	85.48		93.36		
	0.48	0.50	38	9	148.75	85.48		92.86		
	0.50	0.52	38	9	153.25	85.48		92.38		
	0.52	0.53	38	9	157.75	85.48		91.92		
	0.53	0.55	38	9	162.25	85.48		91.46		
	0.55	0.57	38	9	166.75	85.48		91.02		
	0.57	0.58	38	9	171.25	85.48		90.59		
	0.58	0.60	38	10	176.25	85.48		90.13		
0.60	0.62	38	10	181.25	85.48	89.68				
0.62	0.63	38	10	186.25	85.48	89.24				
0.63	0.65	38	10.5	191.50	85.48	88.79				
0.65	0.67	38	10.5	196.75	85.48	88.35				
0.67	0.68	38	10.5	202.00	85.48	87.93				
4	0.68	0.70	75	10	207.00	107.63	107.63	109.47	107.74	
	0.70	0.72	75	10	212.00	107.63		109.08		
	0.72	0.73	75	10	217.00	107.63		108.71		
	0.73	0.75	75	10	222.00	107.63		108.34		
	0.75	0.77	75	10	227.00	107.63		107.98		
	0.77	0.78	75	12	233.00	107.63		107.56		
	0.78	0.80	75	12	239.00	107.63		107.15		
	0.80	0.82	75	12	245.00	107.63		106.75		
	0.82	0.83	75	12	251.00	107.63		106.36		
	0.83	0.85	75	11	256.50	107.63		106.01		

Abbildung 2: CPT Evaluation

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

1.4.1 Implementierung der Kopplung von freiem Wasser und gesättigtem Boden

Um die vollständig gesättigten Eigenschaften des Bodens richtig zu erfassen, wurde das Zweiphasensystem in den CPDI-Code implementiert.

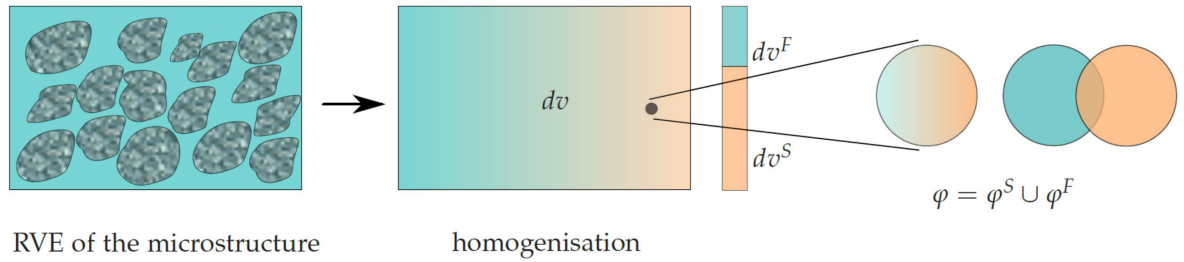


Abbildung 3: Repräsentative Volume Element (RVE) von flüssigkeitsgesättigtem Sand und makroskopische Approximation des erhaltenen Modells durch einen volumetrischen Homogenisierungsprozess

Die Implementierung der hydro-mechanischen Kräfte, die die Wechselwirkung zwischen dem Porenwasser (d. h. der flüssigen Phase) und dem festen Skelett erfassen, ist für die numerische Simulation gesättigter Böden erforderlich. In (Kafaji, 2013) wird die Formulierung, auf der die mehrphasige Implementierung beruht, ausführlich beschrieben. Im Sinne eines Überblicks werden nachfolgend nur die wichtigsten Gleichungen zur Beschreibung zweiphasiger Medien dargestellt.

Die Massenerhaltung der festen Phase wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$\frac{d}{dt} [(1 - n) \rho_s] + \frac{\partial}{\partial x_j} [(1 - n) \rho_s \hat{v}_j] = 0, \quad (1)$$

wobei \hat{v}_j der Geschwindigkeitsvektor der festen Phase ist. Die Massenerhaltungsbeziehung für die Wasserphase lautet wie folgt:

$$\frac{d}{dt} [n \rho_w] + \frac{\partial}{\partial x_j} [n \rho_w \hat{w}_j] = 0, \quad (2)$$

wobei \hat{w}_j der Vektor der wahren Geschwindigkeit der Wasserphase ist. Die Variablen n , ρ_w und ρ_s sind die Porosität sowie die Dichte des Wassers bzw. der festen Körner. Im Folgenden werden zwei Annahmen getroffen: i) die Körner werden als inkompressibel betrachtet, und ii) die räumliche Variation der Porosität und Dichte der Kontrollmasse wird vernachlässigt. Geht man davon aus, dass Wasser linear komprimierbar ist, und stellt die obigen Gleichungen um, so erhält man die Speicher- gleichung bzw. die konstitutive Beziehung für die Porenflüssigkeit wie folgt:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{K_w}{n} \left[(1 - n) \frac{\partial \hat{v}_j}{\partial x_j} + n \frac{\partial \hat{w}_j}{\partial x_j} \right], \quad (3)$$

wobei p der Porendruck und K_w der Volumenmodul von Wasser ist.

1.4.2 Implementierung des zweischichtigen Bodenmodells

Der Spitzendruck wird als Ausgangspunkt für die Abschätzung der Tiefenschichtung verwendet. Während das Einschichtmodell für die Abschätzung der Eindringtiefe für die Class A-Prediction ausreichend war, war eine verfeinerte Darstellung des Bodens erforderlich, um ausreichend genaue Ergebnisse zu erhalten, die mit den Felddaten verglichen werden können.

Zu diesem Zweck wurden im CPDI-Code in einem ersten Schritt zwei Bodenschichten modelliert. Die Notwendigkeit, mehr als eine Schicht zu modellieren, wurde durch die Tatsache untermauert, dass im Verlauf der Monopile-Vibrationen im Feld eine maximale Eindringtiefe festgestellt wurde. Die Tiefe deckt sich ungefähr mit der Zone, in der ein erhöhter Spitzendruck erkundet worden war. Unter Bezugnahme auf die Auswertung der CPT-Daten in Abbildung 4 wurden zwei Schichten mit relativen Dichten von 75 % bzw. 100 % identifiziert.

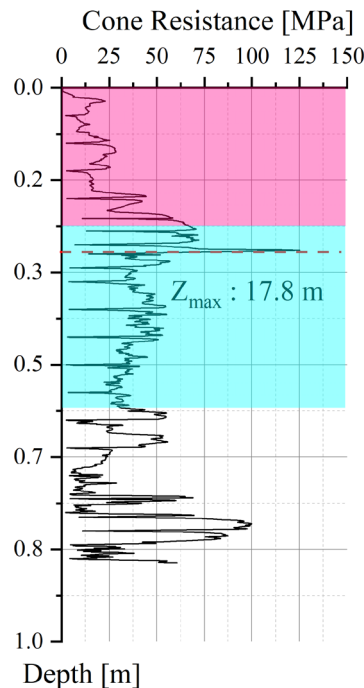


Abbildung 4: CPT Daten

Das Zweischichtenmodell wurde umgesetzt, indem den Schichten unterschiedliche Materialien mit unterschiedlichen relativen Dichten zugewiesen wurden. Dies gilt sowohl für die stoffliche Modellierung mit dem Hypoplastischen Modell als auch für das Modell UBCSAND. Während des Berechnungsschritts zur Ermittlung der effektiven Spannungen wurde ein alternativer Parametersatz für eine relative Lagerungsdichte $I_d = 75\%$ der Berechnung verwendet. Dies war ein erster Schritt zur genauen Modellierung des unterirdischen Bodenprofils.

Die Rechtfertigung für die Verwendung eines anderen Parametersatzes ergibt sich aus der Tatsache, dass die Verwendung eines homogenen Parametersatzes für den Boden nicht der Realität entspricht. Während das Ziel dieser zusätzlichen Verbesserung darin besteht, die Verwerfung während der Pfahlgründung zu modellieren, besteht der zusätzliche Nutzen darin, eine bessere Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Felddaten zu erreichen, indem nicht die Bodenparameter, sondern die relative Dichte kalibriert werden.

1.4.3 Erweiterung der MPM Methode – Absorbierende Ränder

Während der dynamischen Installation von Monopiles werden Spannungswellen erzeugt, die sich im Bodenkontinuum ausbreiten. Bei festen Begrenzungen an den Rändern des Simulationsbereichs werden diese Spannungswellen vollständig ins Kontinuum zurückreflektiert. In Abwesenheit von Dämpfung, sowohl materieller als auch künstlicher, akkumulieren sich die reflektierten Spannungswellen und liefern somit inkorrekte Werte für die Spannungen. Obwohl diese Wellen durch den Einsatz künstlicher Dämpfung reduziert werden können, führt dies insbesondere in einem dynamischen Umfeld zu falschen Ergebnissen. Eine sauberere Methode, um diese unerwünschten Spannungswellen zu eliminieren, besteht darin, absorbierende Grenzen zu implementieren. Die Umsetzung absorbierender Grenzen im CPDI-Code besteht aus zwei Teilen: i) einem Dämpfer, der dazu dient, die Spannungswellen zu absorbieren, und ii) einer Feder, die das Kriechen des Bereichs verhindert. Durch die Prüfung der zugrunde liegenden Gleichungen der absorbierenden Grenzen wurde festgestellt, dass ein Bereich, der ausschließlich von Dämpfern getragen wird, dazu neigt, sich kontinuierlich zu verformen, insbesondere unter anhaltender Belastung. Die Federkoeffizienten wurden so gewählt, dass sie eine virtuelle viskose Schicht bereitstellen, die über die Grenzen des Netzes hinausgeht. Die Steifigkeit dieser virtuellen Schicht wird vom Material neben dem Kelvin-Voigt-Element übernommen. Die Steifigkeit der Feder wird aus dem Dicken der virtuellen viskosen Schicht abgeleitet. Abbildung 5 zeigt die kontinuumsmechanische Darstellung des in CPDI implementierten Kelvin-Voigt-Elements.

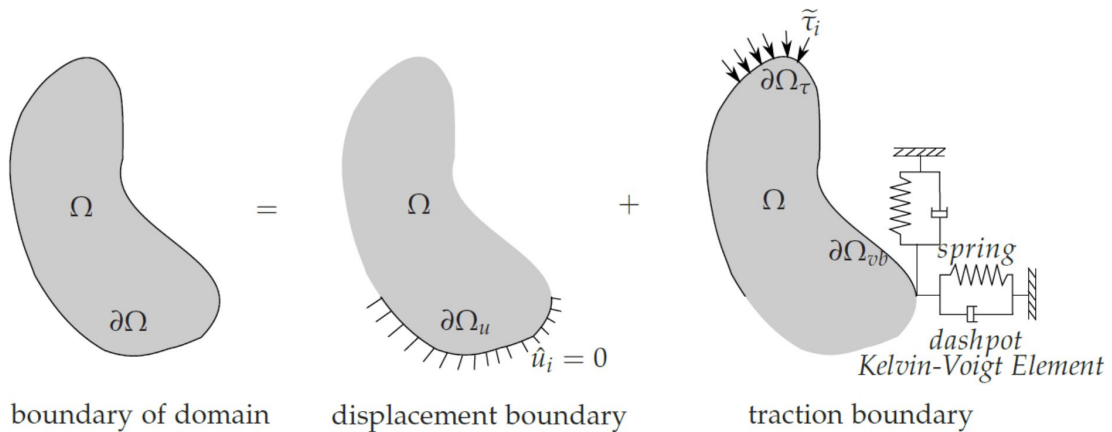


Abbildung 5: Kelvin-Voigt Element

Um die Anwesenheit von Wasser im gesättigten Boden zu berücksichtigen, ist es notwendig, zwei Zusammenhänge für das Kelvin-Voigt-Element zu definieren, einen für die feste und einen für die flüssige Phase. Die Beziehung stellt die Verbindung des Elements dar:

$$p^{vb} = -k_w u_w - \eta_w w, \tag{4}$$

Für die feste Phase lautet die Beziehung:

$$\tau^{vb} = -k_s u_s - \eta_s v. \tag{5}$$

Dabei sind k und η die Federkonstante bzw. die Dashpot-Konstante. Die Matrizen η_w und k_w können durch die folgende Beziehung beschrieben werden

$$\eta_w = \begin{bmatrix} a\rho_w c_w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ und } k_w = \begin{bmatrix} \frac{\rho_w c_w^2}{\delta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Die Beziehungen von η_s und k_s sind durch die Beziehungen gegeben:

$$\eta_s = \begin{bmatrix} a\rho_s c_p & 0 & 0 \\ 0 & b\rho_s c_s & 0 \\ 0 & 0 & b\rho_s c_s \end{bmatrix}, \text{ und } k_s = \begin{bmatrix} k_p & 0 & 0 \\ 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & k_s \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Dabei stehen, c_w , c_p und c_s für die Geschwindigkeit der reinen Wellen in der Flüssigkeit, der Primärwellen im Boden bzw. der Sekundärwellen im Festkörper. Die Parameter a und b sind dimensionslose Parameter, die auf der Grundlage des Einfallswinkels der Welle gewählt werden, um die Absorption zu maximieren. In diesem Projekt wurden sie auf 1 gesetzt, da dies als effizient und angemessen für eine maximale Absorption angesehen wird. Die Koeffizienten k_p und k_s sind durch die folgenden Beziehungen gegeben:

$$k_p = \frac{E^c}{\delta}, \text{ und } k_s = \frac{G}{\delta}, \quad (8)$$

wobei $E^c = \rho_s c_p^2$ und $G = \rho_s c_s^2$. Der Term δ ist die virtuelle Schichtdicke.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das IGS arbeitete im Laufe des Projekts kontinuierlich intensiv mit den Industriepartnern itap, Bio-Consult und RWE sowie mit dem wissenschaftlichen Partner TU Berlin zusammen.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

Es wurde ein Hintergrundnetz, wie in Abbildung 6 dargestellt, für die CPDI-Simulation zur Pfahleinbringung generiert. Um einen möglichen Einfluss aus variationsbedingten Netzunterschieden in den endgültigen Installationsergebnissen zu eliminieren, wurde während des gesamten Projekts nur ein Netz verwendet. Dies gilt nicht nur für die beiden verwendeten konstitutiven Modelle, nämlich das Hypoplastische Modell und das UBCSAND-Modell, sondern auch für die anschließenden Parametertests, die im Rahmen des Projekts durchgeführt wurden. Dies ermöglicht auch einen direkten Vergleich der Ergebnisse zwischen den beiden verschiedenen konstitutiven Modellen.

Im Fall des CPDI-Codes muss nicht nur das Kontinuum mit LAGRANGE-Partikeln diskretisiert werden, sondern es muss auch zusätzlich ein EULER'sches Hintergrundrechengitter für die Partikel bereitgestellt werden, durch das sich die Partikel bewegen können. Die inkrementelle Lösung der Impuls-Gleichung wird auf dem Euler'schen Hintergrundgitter ausgewertet, während es selbst während des Berechnungsprozesses nicht verformt wird. In der CPDI-Simulation wird, im Gegensatz zu anderen Methoden wie CEL und ALE, bei denen der Pfahl normalerweise als starre Struktur modelliert wird, wird der Pfahl als elastisches Kontinuum modelliert. In Anbetracht dessen wurden insgesamt etwa 24.000 Partikel für das Bodenkontinuum vernetzt und weitere 3.200 Partikel dem Pfahl zugeordnet. Sowohl für das Boden- als auch für das Pfahlkontinuum wurden die Partikel zunächst aus regelmäßigen Rechtecken vernetzt. Für das Hintergrundnetz wurde jedoch ein Tartan-Verteilungsansatz gewählt.

Für die Simulation der Interfaces wurde eine Penalty-Kontaktmethode eingeführt. Für weitere Einzelheiten zur Implementierung wird u.a. auf Hamad et al. (2017) verwiesen. Etwa 1.200 eindimensionale, zweiknotige Kontaktelemente wurden der Oberfläche des Pfahls und des Bodens an Stellen zugeordnet, an denen Kontakt erwartet wird. Die mechanischen Eigenschaften von Stahl wurden dem Pfahl zugewiesen, d. h. der Wert des Elastizitätsmoduls wurde mit 200 GPa festgelegt und der Wert des Poisson-Zahl betrug 0,3. Ein Reibungskoeffizient von 0,3 wurde den Kontaktelementen zugewiesen, die die Wechselwirkung zwischen Boden und Struktur beschreiben. Es wurde angenommen, dass das Bodenkontinuum vollständig gesättigt ist und dass das Wasser während der Simulation nicht aus dem abgebildeten Gebiet austreten kann. Für die Simulation wurde ein achsensymmetrisches Modell vernetzt. Die Erweiterung des CPDI-Codes zur Modellierung achsensymmetrischer Randwertprobleme wurde nach Hamad (2016) implementiert.

Die Simulation bestand aus zwei Phasen: i) einer Nullbelastungsphase, bei der keine dynamische Last auf das System aufgebracht wurde, und ii) dynamischen Belastungsschritten. Die Nullbelastungsphase wurde konzipiert, um einen stationären Zustand im Modell zu erreichen, bevor die dynamische Last aufgebracht wurde. Dieser Schritt war auch wichtig, um die Initialisierung der Zustandsparameter im Modell zu ermöglichen. In der Phase der dynamischen Belastung wurde die statische und die dynamische Last auf den Kopf des Pfahls aufgebracht. Da die Anwendung einer Last das Festlegen einer Randbedingung in CPDI beinhaltet, muss die Last (in [kN]) in einen Spannungswert umgerechnet werden, der auf die Oberfläche des Pfahls aufgebracht werden kann (in [kN/m²]). Für die statische und dynamische Belastung wurden die Parameter entsprechend Tabelle 1 angenommen:

Statische Belastung durch die Hammermasse	3.000 kPa (4.266 kN)
Dynamische Belastung durch Vibrator	21.000 kPa (30.319 kN)
Vibrator Frequenz (Anfangskonfiguration)	20 Hz

Tabelle 1: Parameter der Vibrationsrammung im VISSKA-Projekt

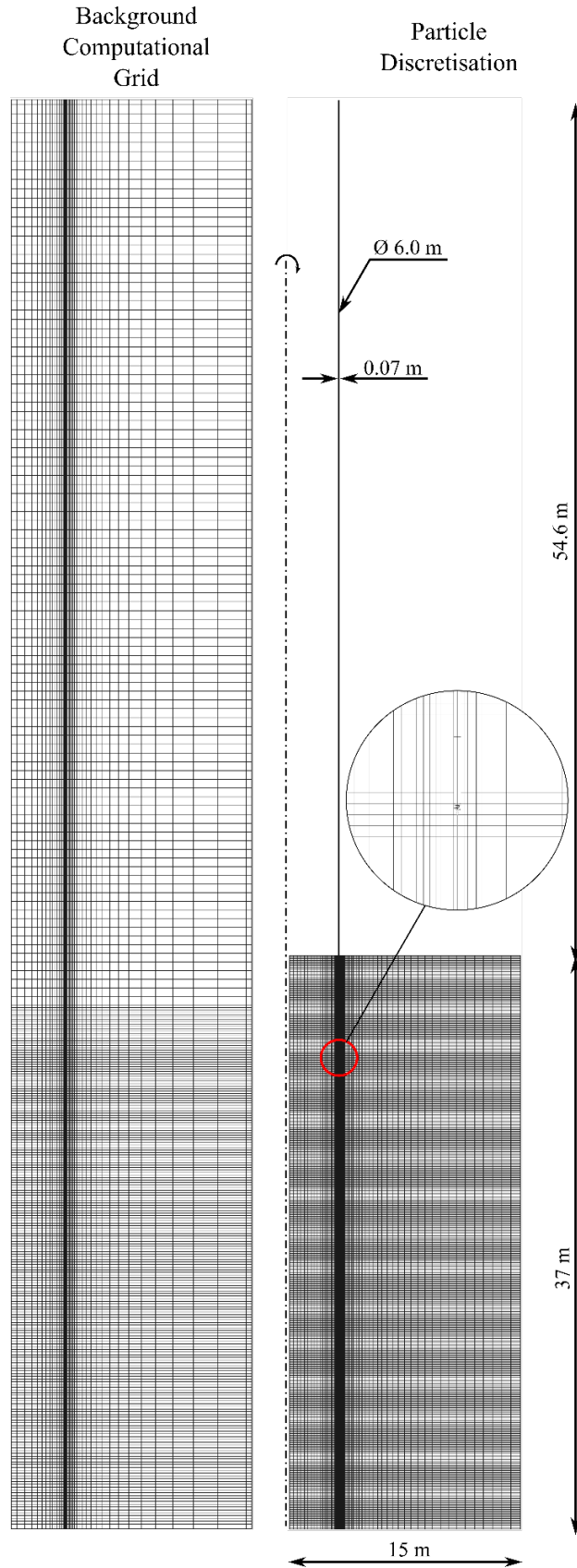


Abbildung 6: Partikel- und Hintergrundnetz

Die folgenden Bodenparameter werden für die im Projekt verwendeten konstitutiven Gesetze für die Hypoplastizität und UBCSAND verwendet. Weitere Einzelheiten zu den Parametern für das UBCSAND- bzw. das hypoplastische Stoffgesetz finden sich in Giridharan (2022) und Zachert (2014).

$N1_{60}[-]$	$m_e[-]$	$n_e[-]$	$n_p[-]$	$K_G^e[-]$	$K_B^e[-]$
42.6	0.5	0.5	0.95	1432	854
$K_G^p[-]$	$\phi_{pt}[\circ]$	$\phi_f[\circ]$	$c[kPa]$	$Pa[kPa]$	$\sigma_t[kPa]$
820	32.6	37.9	0	100	0
$hfac_1[-]$	$hfac_2[-]$	$hfac_3[-]$	$hfac_4[-]$	$hfac_5[-]$	$hfac_6[-]$
0.65	0.85	1.0	0.6	1.0	0.95

Tabelle 2: Parameter für den Sand im UBCSAND-Modell

$\phi_c[\circ]$	$p_t[-]$	$h_s[MPa]$	$n[-]$	$e_{d0}[-]$
32.6	-	4030	0.289	0.612
$e_{c0}[-]$	$e_{i0}[-]$	$\alpha[-]$	$\beta[-]$	$m_R[-]$
0.948	1.090	0.125	0.400	6.800
$m_T[-]$	$R[-]$	$\beta_r[-]$	$\chi[-]$	$e_0[-]$
3.4	$1e - 4$	0.1	6	-

Tabelle 3: Parameter für den Sand im Hypoplastischen Stoffmodell

2.1.1 Ergebnisse der Klasse-A-Prognose für die Einbringung von Pfählen

Im Vorfeld der Offshore-Installation wurde die numerische Simulation der Monopile-Installation abgeschlossen. Dabei wurde ein homogenes Bodenkontinuum mit einer relativen Dichte (I_d) von 100 % betrachtet. Die zuvor genannten Belastungsparameter wurden berücksichtigt. Um sicherzustellen, dass die Ergebnisse der CPDI-Simulationen mit den in der TU Berlin durchgeführten MMALE-Simulationen vergleichbar sind, wurden die viskosen absorbierenden Grenzen ausgeschaltet. Der Boden wurde als vollständig gesättigt betrachtet, und Veränderungen der Porosität wurden ignoriert. Zwei Simulationen wurden mit dem gleichen Berechnungsnetz durchgeführt, eine unter Verwendung des UBCSAND-Modells und die andere unter Verwendung des Hypoplastischen Modells.

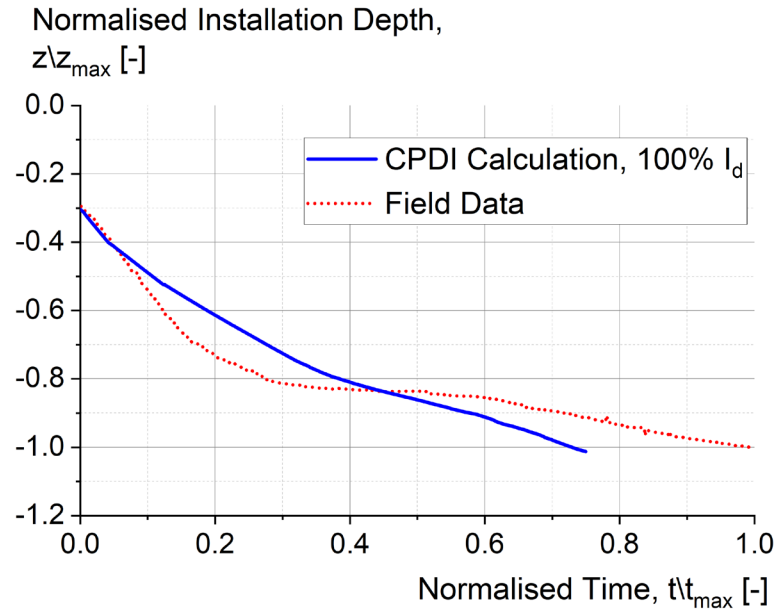


Abbildung 7: UBCSAND Class A-Simulation

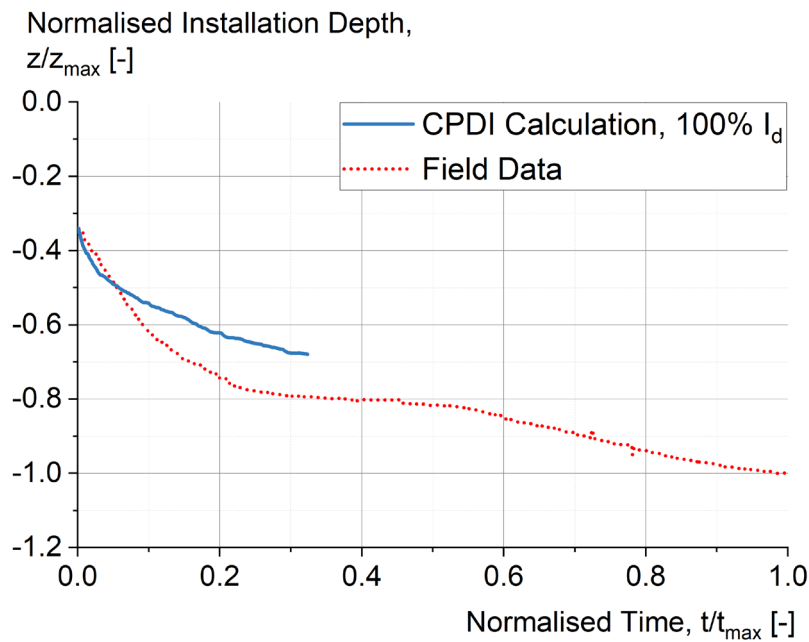


Abbildung 8: Hypoplastisches Stoffgesetz Class A-Simulation

Aus dem in Abbildung 7 dargestellten Vergleich zwischen der numerisch ermittelten und der gemessenen Eindringkurve des Monopiles lässt sich erkennen, dass die Simulation unter Verwendung des UBCSAND-Modells nicht nur in der Lage ist, den Installationsprozess qualitativ zutreffend zu erfassen, sondern auch die Installationstiefe quantitativ vergleichbar ist. Während die Installationsrate zu Beginn der Simulation mit den Felddaten vergleichbar ist, ist danach eine geringfügige Abweichung zu beobachten. Ein ähnliches Muster zeigt sich auch für die Simulation unter Verwendung des Hypoplastisches Stoffgesetzes, wie in Abbildung 8 zu sehen ist. Basierend auf den Ergebnissen beider Modelle wird nach einer normierten Zeit von $t/t_{max} = 0,5$ eine reduzierte Installationsrate festgestellt.

Dies wird auf die zunehmende Reibung an der Pfahloberfläche zurückgeführt, wenn der Pfahl tiefer eindringt, und auf die erhöhte Steifigkeit, die durch das Stoffgesetz simuliert wird, wenn der Pfahl auf ein höheres Spannungsregime trifft. Insgesamt lässt sich feststellen, dass eine gute Korrelation zwischen dem numerischen Modell und den Felddaten besteht.

2.1.2 Beschleunigung am Pfahlkopf

Im Zusammenhang mit Offshore-Monopiles bezieht sich die Pfahlkopfbeschleunigung auf die Änderungsrate der Geschwindigkeit der Monopile-Struktur an ihrem Kopf. Diese Beschleunigung ist ein entscheidender Parameter bei der Analyse des dynamischen Verhaltens von Offshore-Strukturen während der Installations- oder Betriebsphase.

Bei der Installation von Monopiles unter Offshore-Bedingungen können dynamische Kräfte, wie sie z. B. durch Ramm- oder Vibrationsverfahren hervorgerufen werden, zu Vibrationen und Beschleunigungen am Pfahlkopf führen. Die Überwachung der Pfahlkopfbeschleunigung ist für die Bewertung der strukturellen Reaktion, die Gewährleistung der Integrität des Monopiles und das Verständnis der Interaktion zwischen der Struktur und dem umgebenden Boden oder Wasser von wesentlicher Bedeutung.

Im Rahmen dieses Projekts wurde die Beschleunigung des Monopiles in einem Abstand von 13,4 m unterhalb des Pfahlkopfes gemessen. Dieser spezifische Ort wurde als Messpunkt sowohl für die experimentelle Datenerfassung als auch für die anschließenden numerischen Berechnungen gewählt.

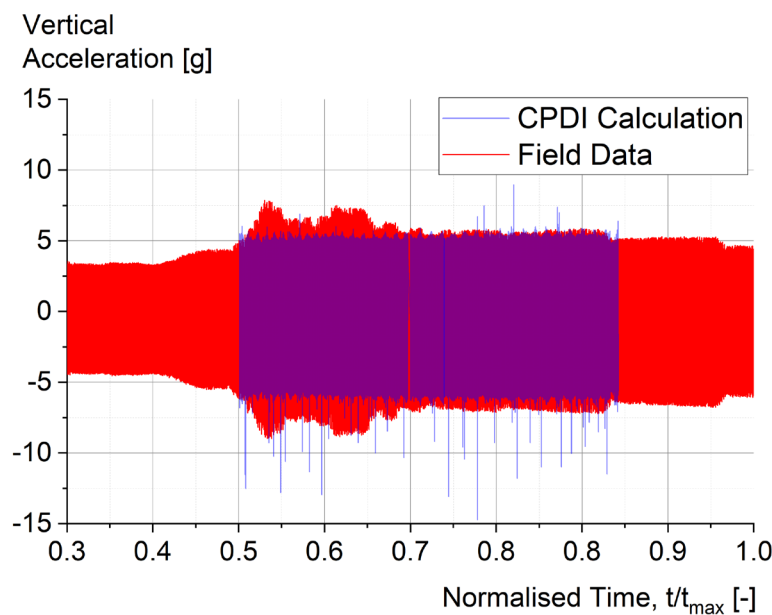


Abbildung 9: UBCSAND Modell - Pfahlkopf-Beschleunigung

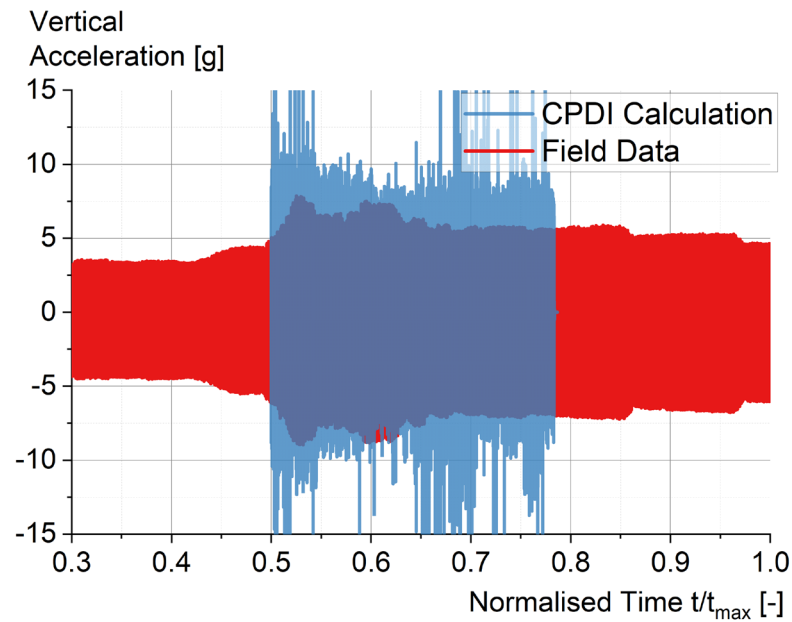


Abbildung 10: Hypoplastisches Stoffgesetz - Pfahlkopf-Beschleunigung

Da der Monopile elastisch modelliert wurde und realistische Stahlparameter für das elastische Kontinuum angenommen wurden, war es möglich, die Beschleunigungen am Pfahlkopf zu berechnen und einen Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten Werten durchzuführen. Die Beschleunigungen wurden 13,4 m unterhalb des Pfahlkopfes im Feld gemessen. Die Ergebnisse der Beschleunigungen für den UBCSAND-Stoffgesetzmodell sind in Abbildung 9 dargestellt, während die Ergebnisse, die auf einer Simulation mit dem Hypoplastischen Modell basieren, in Abbildung 10 zu sehen sind.

Aus den Felddaten geht hervor, dass die Spitzenbeschleunigung während der Aufwärtsbewegung des Pfahls etwa 7,5-g betrug und während der Abwärtsbewegung des Pfahls etwa 9-g betrug. Die durchschnittlichen Beschleunigungen während der Installation lagen jeweils bei etwa 5-g und 6,5-g. Abbildung 9 zeigt, dass das UBCSAND-Modell die durchschnittlichen Pfahlbeschleunigungen während der gesamten Installationsphase gut erfassen kann, sowohl während der Aufwärts- als auch der Abwärtsbewegung des Pfahls. Es ist jedoch zu beachten, dass der Anstieg in den Felddaten zwischen normalisierten Zeiten $t/t_{max} = 0,5$ und $0,7$ nicht vollständig vom Modell repliziert wurde. Es ist zu vermuten, dass dieser Anstieg der Beschleunigung durch die (nahezu) lineare Reduzierung der Hakenlast während der Installation verursacht wurde.

Andererseits legt Abbildung 10 nahe, dass die Beschleunigung während der Aufwärtsbewegung des Pfahls für das Kontinuum, das mit dem Hypoplastischen Stoffmodell abgebildet wurde, höher ist als die Felddaten, während demgegenüber die Beschleunigungen während der Abwärtsbewegungen im Vergleich zu den Aufwärtsbewegungen geringer sind. Vorläufig wird die Hypothese aufgestellt, dass das CPDI-Modell tatsächlich einen sogenannten kavitativen Installationsprozess simuliert, wobei weitere Forschung erforderlich ist, um diese Hypothese zu bestätigen.

2.1.3 Parameter Studie : Einfluss der Dichte auf der Einbringung

Nachdem die Feldmessdaten der Pfahleinbringung verfügbar wurden, haben sich die Untersuchungen darauf konzentriert, um die möglichen Ursachen für die identifizierten Abweichungen zwischen den numerischen und den Felddaten zu identifizieren. Eine der Hauptursachen für die Abweichung sind die für die Class A-Simulation getroffenen Vereinfachungen bei der Abbildung der Baugrundsituation. In der Simulation wurde ein homogenes Kontinuum abgebildet, wodurch die tatsächliche Variation der relativen Dichte über die Tiefe verloren geht. Aufgrund der Tatsache, dass ein Durchschnittswert der relativen Dichte über die Tiefe als homogener Parameter für das numerische Modell gewählt wurde, dominierten die tieferen Schichtpartien, die hauptsächlich aus sehr dichtem Sand ($I_d \approx 100\%$) bestehen, den Wert der relativen Dichte. Es kann aus der Auswertung der CPT-Daten beobachtet werden, dass die relative Dichte auf den ersten Metern unter dem Meeresboden etwa 75 % beträgt, während dieser Wert mit der Tiefe zunimmt.

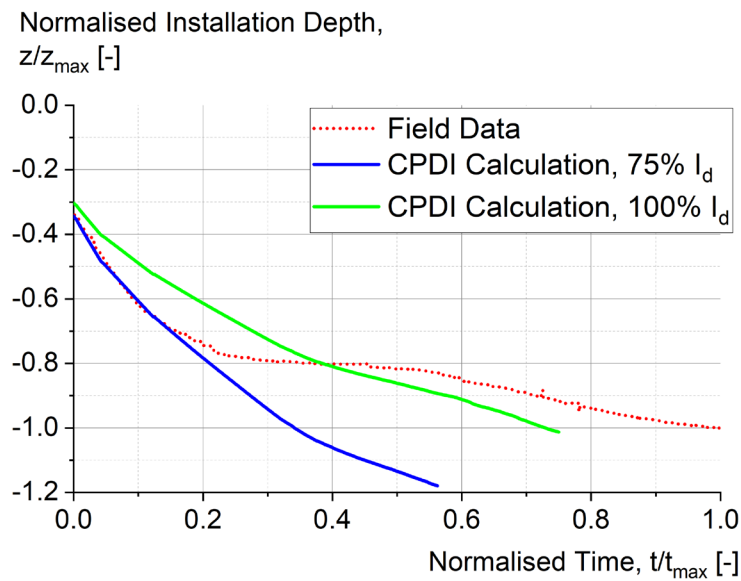


Abbildung 11: UBCSAND Modell - Reduzierte relative Dichte

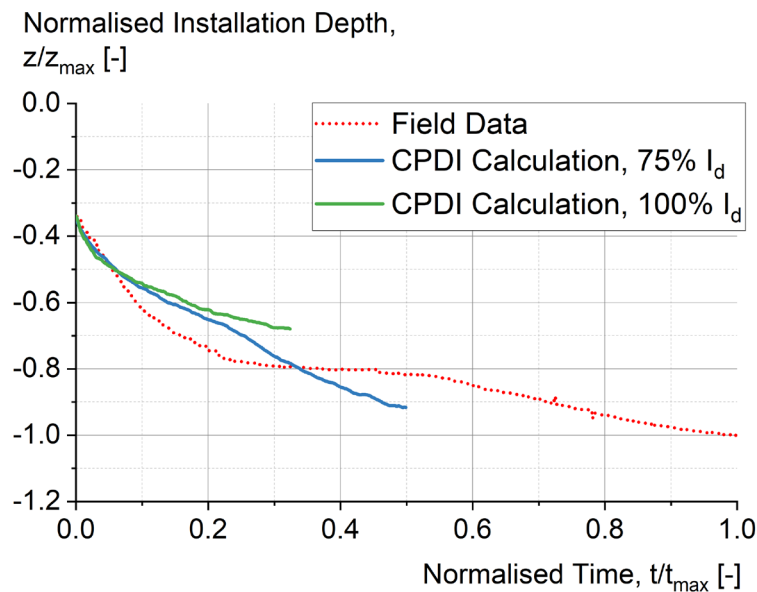


Abbildung 12: Hypoplastisches Stoffgesetz - Reduzierte relative Dichte

Um die Auswirkungen einer Verringerung der relativen Dichte auf das Eindringverhalten zu untersuchen, wurden zunächst Simulationen unter der Annahme eines verringerten Wertes der relativen Dichte über das gesamte Kontinuum durchgeführt. Es wurden sowohl das UBCSAND- als auch das Hypoplastische Modell verwendet und der resultierende Eindringvorgang wurde mit den ursprünglichen Vorhersagen auf der Grundlage von $I_d = 100\%$ verglichen, wie in den Abbildungen 11 und 12 dargestellt. Aus beiden Abbildungen ist ersichtlich, dass mit beiden Modellen eine größere endgültige Eindringtiefe erreicht wird. Dieses Ergebnis korreliert mit der Abnahme der relativen Dichte überein, die mit einer verringerten oedometrischen Steifigkeit des Materials korreliert.

In Abbildung 11, die die UBCSAND-Simulationsergebnisse visualisiert, entspricht die Einbaurrate während der anfänglichen Zeit $t/t_{\max} = 0,2$ genau den Felddaten, was die Hypothese stützt, dass die relative Dichte des Sandes in geringerer Tiefe tatsächlich 75% beträgt. Nach der anfänglichen Zeit $t/t_{\max} = 0,2$ übertrifft die Einbaurrate des UBCSAND-Modells jedoch die Felddaten. Dies deutet darauf hin, dass das Modell mit der reduzierten relativen Dichte zwar gut mit den Bedingungen in geringeren Tiefen übereinstimmt, der ursprüngliche Wert der relativen Dichte von 100% jedoch für das Kontinuum in größeren Tiefen realistisch ist und daher abgebildet werden muss. Dies macht eine grundlegende Verbesserung des CPDI-Codes erforderlich, um diese Anforderung zu erfüllen.

Ein ähnlicher Trend ist in Abbildung 12 zu erkennen, in der die Ergebnisse mit dem hypoplastischen Modell dargestellt sind, wobei eine deutliche Zunahme der Einbaurrate im Falle der Simulation mit reduzierter relativer Dichte zu verzeichnen ist.

2.1.4 Implementierung des 2-Schichten-Modells: Ergebnisse

Um den Schwankungen des Bodenprofils in der Tiefe Rechnung zu tragen, wurde in einem ersten Schritt ein Zweischichtenmodell in den CPDI-Code implementiert. Während beide Bodenschichten mit einem einzigen konstitutiven Gesetz modelliert wurden - entweder dem UBCSAND-Modell oder dem Modell für hypoplastischen Boden -, wurden für jede Schicht unterschiedliche Parametersätze zur Berechnung der effektiven Spannungen verwendet. Theoretisch könnten mit diesem Ansatz zahlreiche Schichten erstellt werden, aber mit der Anzahl der Schichten steigt die Komplexität der Parameterkalibrierung linear an. Für diese Simulation mit dem Zweischichtenmodell spricht, dass zwei Schichten ideal sind, da nur zwei unterschiedliche Parameter für die relative Dichte über die interessierende Tiefe identifizierbar sind.

In diesem Zusammenhang wurden für die CPDI-Simulation zwei Hauptziele definiert: i) den Eindringprozess so nah wie möglich an den Felddaten nachzubilden und ii) den in der Praxis beobachteten maximale Eindringtiefe zu simulieren.

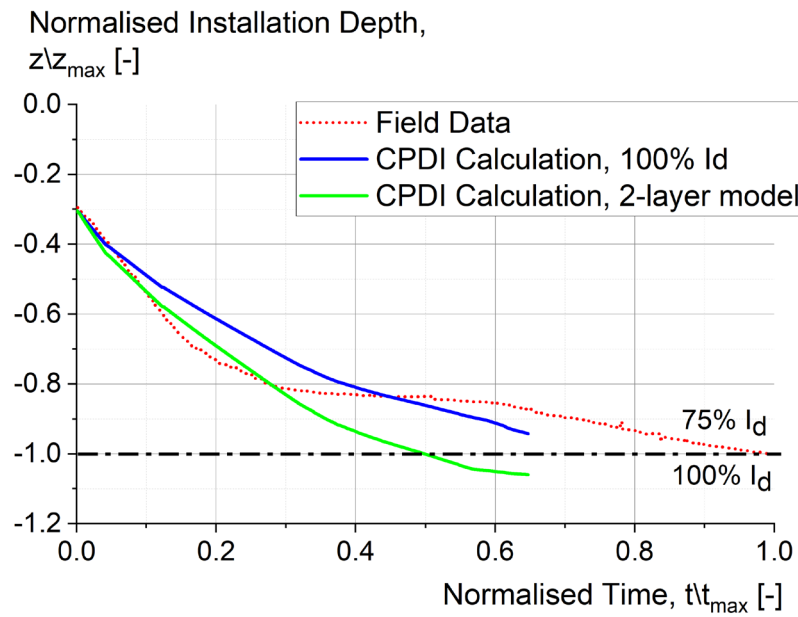


Abbildung 13: UBCSAND Modell - Zwei-Sichten Modell Simulation

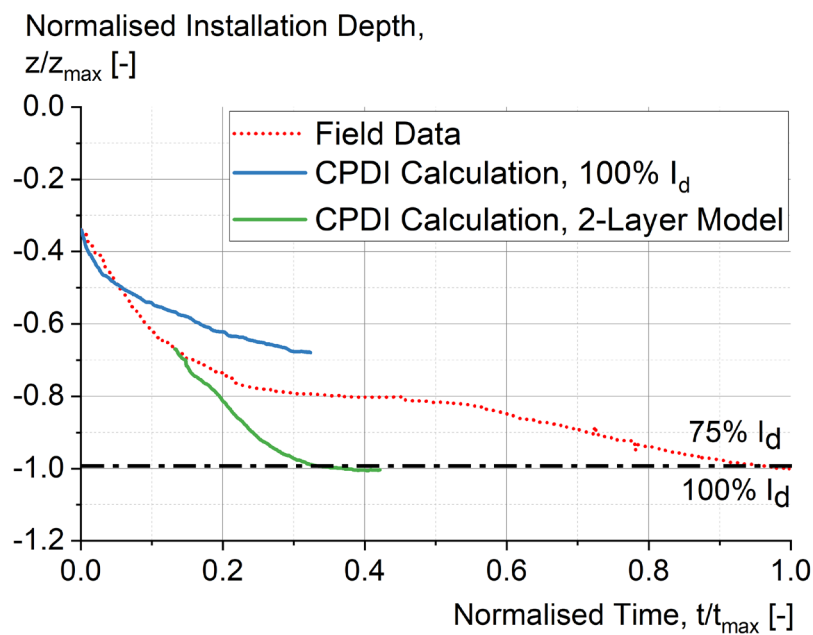


Abbildung 14: Hypoplastisches Stoffgesetz - Zwei-Sichten Modell Simulation

Die Simulationsergebnisse unter Verwendung des UBCSAND-Modells und des hypoplastischen Stoffgesetzes sind in den Abbildungen 11 bzw. 12 dargestellt. Die Untersuchung von Abbildung 11 zeigt, dass das UBCSAND-Modell im Vergleich zur Einbausimulation, die unter der Annahme von 100 % I_d durchgeführt wurde, eine erhöhte Einbaurrate bis zu einer normierten Tiefe von $z/z_{max} = 0,8$ aufweist. Bis zu dieser Tiefe wurde der Sand mit einer relativen Dichte von 75 % abgebildet. Jenseits dieser Tiefe nimmt die Einbaurrate ab. Zwei Faktoren tragen zu diesem Phänomen bei: i) eine Zunahme der Mantelreibung, wenn der Pfahl tiefer eindringt, und ii) eine erhöhte oedometrische Steifigkeit. Die erhöhte Steifigkeit ist nicht nur auf die erhöhte relative Dichte im Vergleich zur darüber

liegenden Schicht zurückzuführen, sondern auch auf die Zunahme der Steifigkeit im Verhältnis zum aktuellen Spannungszustand.

2.1.5 Berücksichtigung der Hook-Load bei der Simulation

Im Zusammenhang mit der Installation von Monopiles bezieht sich die "Hakenlast" (oder Hook-Load) auf die Kraft oder Last, die während des Anhebens und der Installation des Monopiles auf den Haken des Krans oder einer anderen Hebevorrichtung wirkt. Damit ist der Umstand zu berücksichtigen, dass der Monopile während des Vibrations- und Eindringvorgangs nicht freireitend war, sondern weiter am Kran hängend geführt wurde. Die Hakenlast stellt die aus diesem Hebemechanismus wirkende Zugkraft dar und ist ein entscheidender Parameter für den Installationsprozess.

Bei der Offshore-Installation eines Monopiles wird in der Regel ein Kran verwendet, um den Pfahl anzuheben und im Meeresboden zu positionieren. Die Hakenlast ist die Kraft, die auf den Kranhaken ausgeübt wird, wenn er das Gewicht des Monopiles beim Absenken in den Meeresboden trägt. Die Überwachung und Kontrolle der Hakenlast ist für einen sicheren und kontrollierten Installationsprozess unerlässlich.

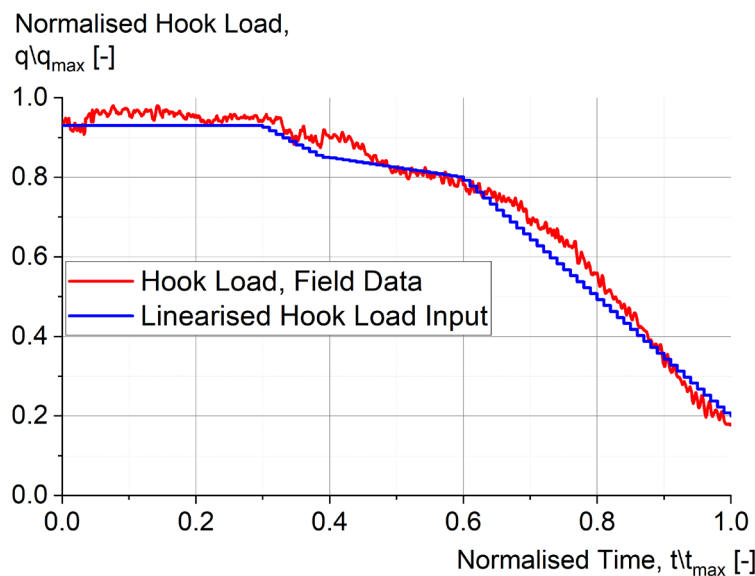


Abbildung 15: Verlauf der Hook-Load über die Zeit

Die Hook-Load ist ein Parameter, der erst nach der Messung und somit nach der Installation bekannt ist; während der Simulation vor der Installation kann dieser nur geschätzt und als Eingabewert verwendet werden. Um den Einbauprozess genau zu simulieren, muss diese Variable unbedingt berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu anderen Parametern kann die Hakenlast in der Simulation nicht als konstanter Wert vorgegeben werden. Wie in Abbildung 15 dargestellt, ist die vom Kranhaken getragene Last in den Anfangsphasen der Installation beträchtlich und nimmt mit dem Fortschreiten der Installation allmählich ab.

In Anbetracht des nicht linearen Charakters der zeitlichen Veränderung der Hakenlast wird im CPDI-Code eine Schrittfunktions-Eingabe verwendet, um die Darstellung zu linearisieren. In der Anfangsphase der Simulation wird die Hakenlast auf ihren Höchstwert gesetzt. Im weiteren Verlauf der Simulation nimmt die Hakenlast entsprechend der Schrittfunktion allmählich ab, wie in Abbildung 15 dargestellt. Bei dieser Simulation wird ein zweischichtiges Modell mit gesättigten Bodenbedingungen verwendet.

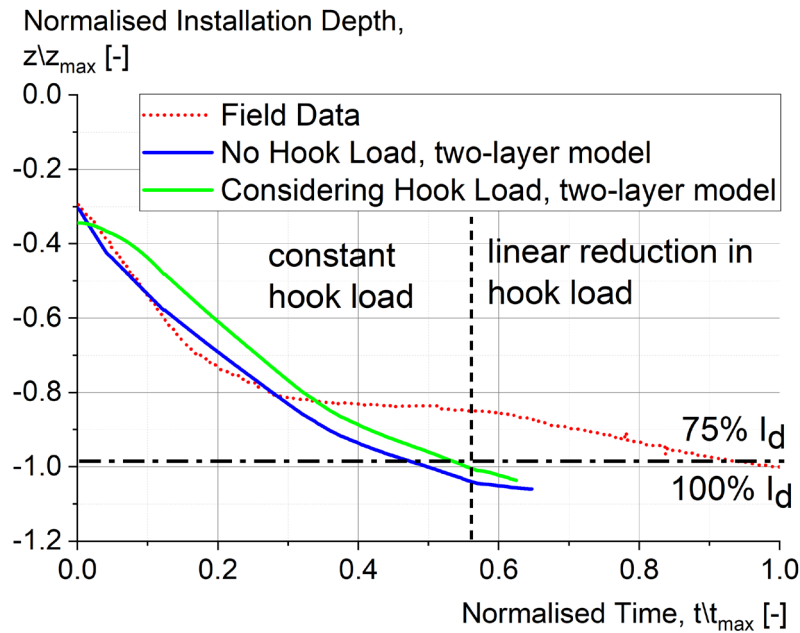


Abbildung 16: UBCSAND Modell - Pfahl Installationsverlauf unter Berücksichtigung der Hook-Load

Die Ergebnisse sind in Abbildung 16 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass in der Anfangsphase der Simulation die Einbaurrate im Vergleich zu der ohne Berücksichtigung der Hakenlast durchgeführten Simulation geringer ist. Dies ist ein nachvollziehbares Ergebnis, da die statische Last, die konstant auf den Pfahlkopf wirkt, durch den Einfluss der Hook-Load verringert wird. Im weiteren Verlauf der Simulation nimmt die Hakenlast entsprechend der Stufenfunktion allmählich ab. Durch diese Verringerung wird die dynamische Belastung des Monopiles verstärkt, was zu einer erhöhten Installationsrate führt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Installationsrate zwar von den Simulationen ohne Hook-Load abweicht, die endgültige Installationstiefe jedoch deutlich näher an den Felddaten liegt.

2.1.6 Parameterstudie: Auswirkung der Frequenz auf die Einbringungsrate

Im Zusammenhang mit der Installation von Offshore-Monopiles bezieht sich die Einbringungsfrequenz auf die Geschwindigkeit, mit der die Vibrationen während des Installationsprozesses auf den Monopile einwirken. Die Einbringungsfrequenz ist von großer Bedeutung, da sie die Effizienz und den Erfolg der Installation beeinflusst. Eine höhere Frequenz führt im Allgemeinen zu einer höheren Eindringtiefe und einer besseren Verdrängung des Bodens, wodurch der Installationsprozess effektiver wird. Die richtige Wahl der Frequenz ist entscheidend für die Optimierung des Einbauprozesses, wobei Faktoren wie Bodenbeschaffenheit, Pfahlabmessungen und Ausrüstungsmöglichkeiten zu berücksichtigen sind.

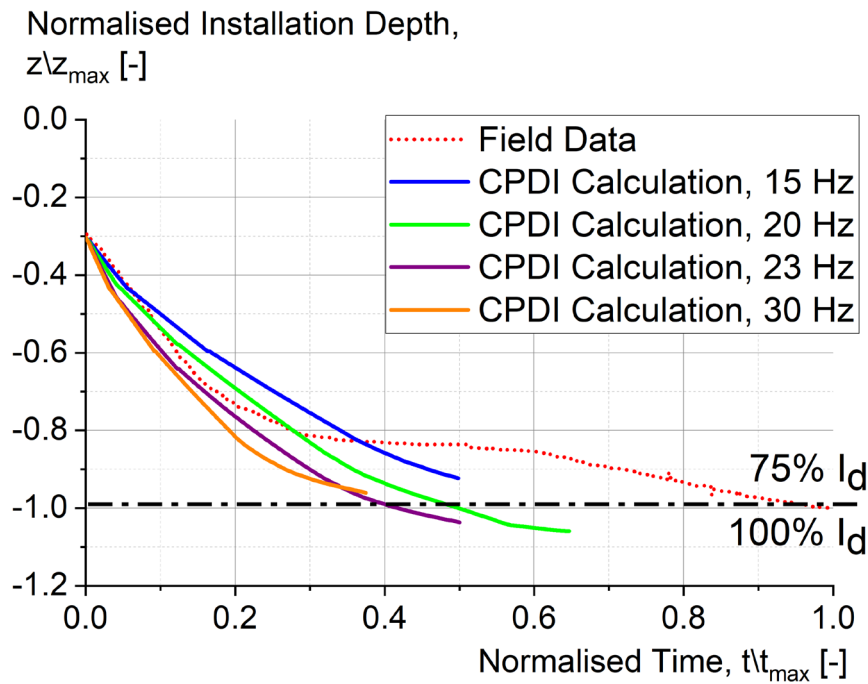


Abbildung 17: UBCSAND Modell - Einfluss der Frequenz auf den Installationsverlauf

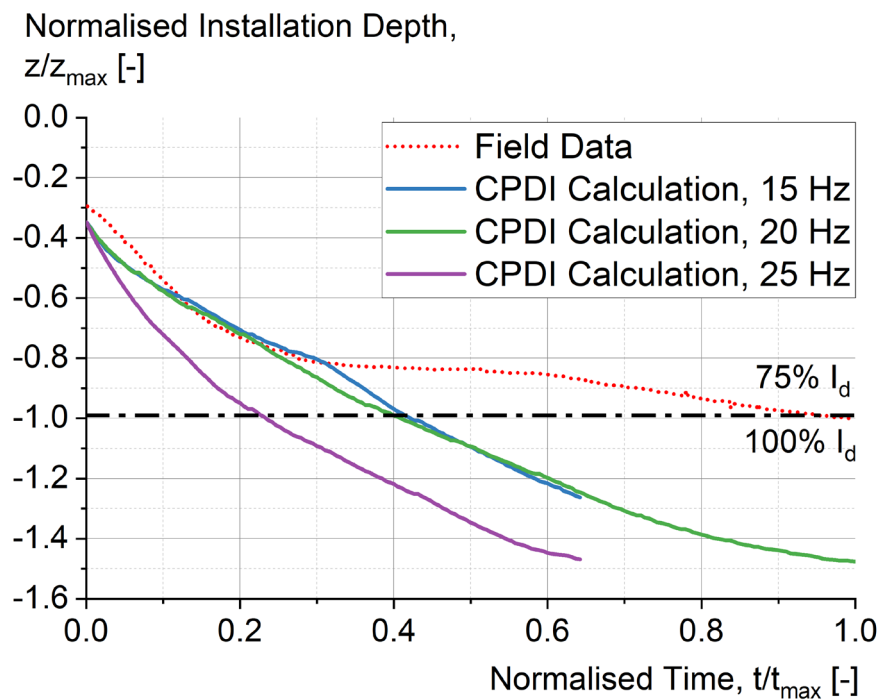


Abbildung 18: Hypoplastisches Stoffgesetz - Einfluss der Frequenz auf den Installationsverlauf

Wie in den Abbildungen 17 und 18 dargestellt, spielt die Installationsfrequenz eine wichtige Rolle. Die Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Simulationen, die mit dem UBCSAND- bzw. dem Hypoplastic-Konstitutivgesetz durchgeführt wurden. Bei den mit dem UBCSAND-Modell durchgeführten Simulationen entspricht eine Erhöhung der Einbaufrequenz einer höheren Einbaurrate, was

angesichts der direkten Proportionalität zwischen dynamischer Energie und Frequenz ein plausibles Ergebnis ist. In Abbildung 17 ist zu erkennen, dass bei einer höheren Frequenz (30 Hz) die Einbaurrate in größeren Tiefen im Vergleich zu 23 Hz abnimmt. Eine Arbeitstheorie besagt, dass in diesen Tiefen die effektive Spannung um den Monopile zu einem vorherrschenden Faktor wird, der die Einbaurrate beeinflusst. Die höhere Frequenz verstärkt die effektive Spannung und erhöht damit den Widerstand gegen den Einbau. Ähnliche Tendenzen sind bei Simulationen mit dem hypoplastischen Stoffgesetz zu beobachten, wie in Abbildung 18 dargestellt.

2.1.7 Kopplung von freiem Wasser und gesättigtem Boden: Installationsverlauf

Nach Abschluss der Simulationen mit gesättigtem Boden bestand das nächste Ziel darin, nicht nur die Installation des Pfahls im freien Wasser zu simulieren, sondern auch die Druckwellen zu erfassen, die sich während des Installationsvorgangs durch den Boden ausbreiten. Um dies zu erreichen, wurde die Kopplung von freiem Wasser und gesättigtem Boden in den CPDI-Code implementiert. Zunächst wird das freie Wasser als elastischer Körper mit den Eigenschaften von freiem Wasser modelliert. Dieser Ansatz ist zwar aufgrund der relativ einfachen Implementierung und der geringeren Fehleranfälligkeit vorteilhaft, hat aber den Nachteil, dass große Wasserbewegungen nicht genau erfasst werden. Da jedoch im Rahmen dieses Projekts keine nennenswerten Wasserbewegungen zu erwarten sind, ist dieser Ansatz für die Simulation als angemessen zu erachten.

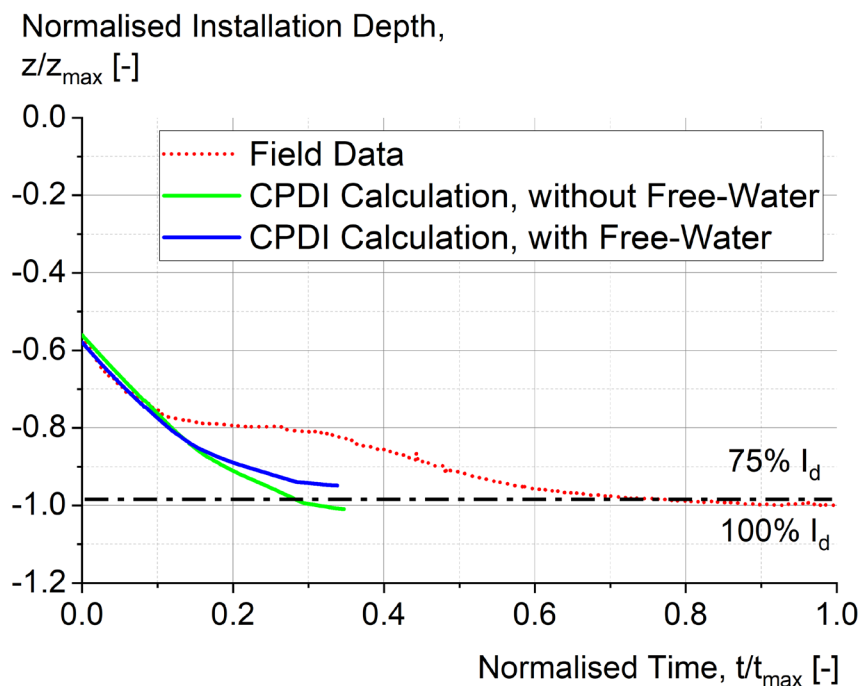


Abbildung 19: UBCSAND Modell - Installationskurve - mit und ohne freies Wasser

Nach der Implementierung der Methode wurde eine Simulation unter der Annahme durchgeführt, dass freies Wasser vorhanden ist, und die Ergebnisse mit der Simulation ohne freies Wasser verglichen. Beide Simulationen wurden unter Verwendung des konstitutiven Gesetzes UBCSAND durchgeführt, wobei von gesättigten Bodenbedingungen ausgegangen wurde. Das primäre Ziel der Simulation war es, die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu bestätigen, wobei idealerweise nur minimale Unterschiede erwartet wurden. Abbildung 19 zeigt, dass die Unterschiede zwischen den Simulationen mit und ohne freies Wasser vernachlässigbar sind. Diese Unterschiede können auf zwei Faktoren im Modell mit freiem Wasser zurückgeführt werden: i) eine Erhöhung des Porendrucks im Boden, wodurch sich der effektive Spannungszustand innerhalb des Bodenkontinuums ändert, und ii) das Vorhandensein von freiem Wasser, das eine zusätzliche Quelle für die Energiedissipation durch den

Monopile darstellt. Insgesamt besteht jedoch eine enge Übereinstimmung zwischen den Feld- und Simulationsdaten, was die Fähigkeit des CPDI-Codes unterstreicht, nicht nur das System aus gesättigtem Boden und Monopile zu modellieren, sondern auch die Anwesenheit von freiem Wasser.

2.1.8 Schalldruckpegel: Felddaten versus numerische Berechnung

Die Schalldruckpegelmessungen (Sound Pressure Level, kurz SPL) aus dem Feld werden mit den Simulationsdaten verglichen, wobei eine technische Annahme eingeführt wird. Die SPL-Messungen wurden in einer Entfernung von 90 Metern vom Installationsort vorgenommen. Die Modellierung eines 90 Meter breiten Szenarios mit sowohl gesättigtem Boden als auch Wasser wäre rechenintensiv und konnte im Zeitrahmen des Projekts nicht realisiert werden. Als Alternative wurde ein 15 Meter breites Modell mit absorbierenden Begrenzungen an den Rändern mit einem Netz versehen und für das Projekt verwendet. Folglich ist eine Korrektur der SPL-Werte erforderlich.

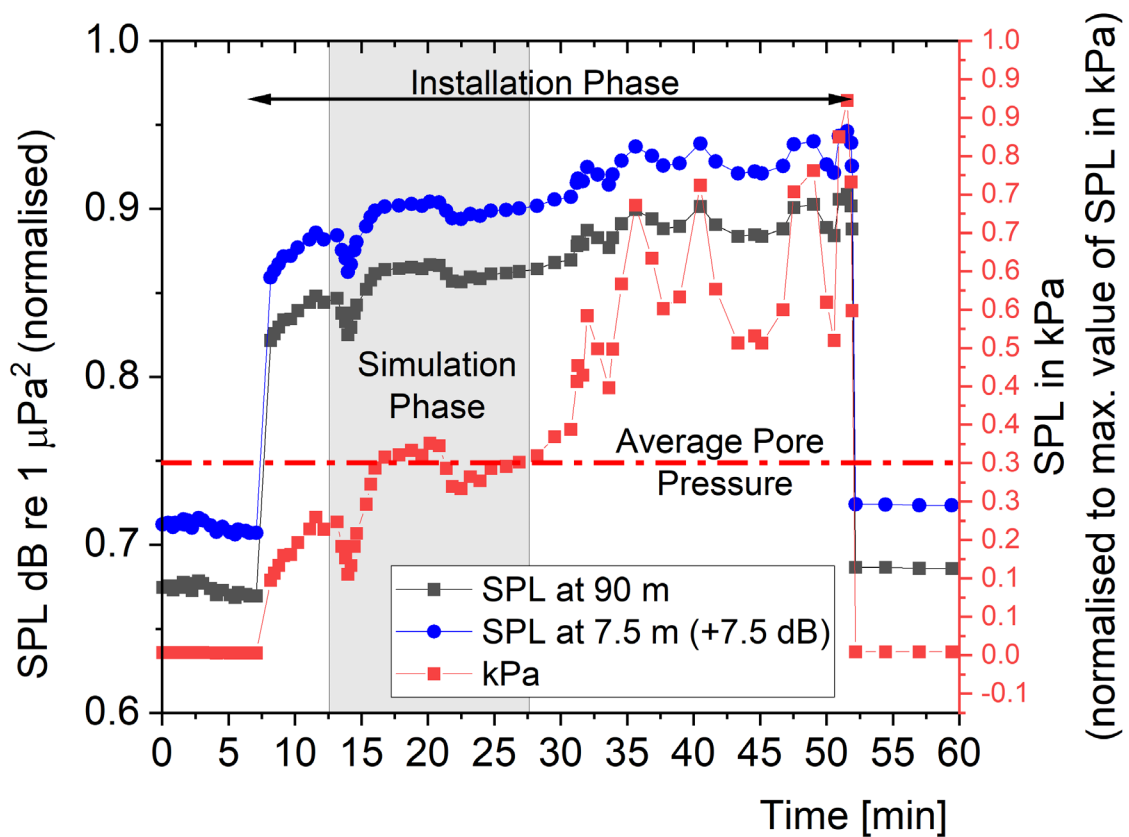


Abbildung 20: Schalldruckpegel – Feldmessungen

Um dies zu bewerkstelligen, wurden nach Angaben der itap GmbH 7,5 dB zu den ursprünglichen Messungen addiert, um die Werte von einer Distanz von 90 Metern, in der die Messdaten aufgezeichnet wurden, auf die Simulationsergebnisse in 7,5 m Entfernung zu transferieren. Die SPL-Werte wurden dann in Spannungen [kPa] umgerechnet, um einen direkten Vergleich mit den Simulationsdaten zu ermöglichen. Zur Umrechnung von [dB] in [kPa] wurde die folgende Beziehung verwendet:

$$1 \text{ kPa} = 10^{\left(\frac{L_p|dB|}{20}\right)} \times 10^{-9},$$

wobei $L_p|dB|$ der Schalldruckpegel in dB ist. Unter Verwendung der oben genannten Beziehungen und empirischen Beweise werden in Abbildung 20 die neu kalibrierten Werte dargestellt.

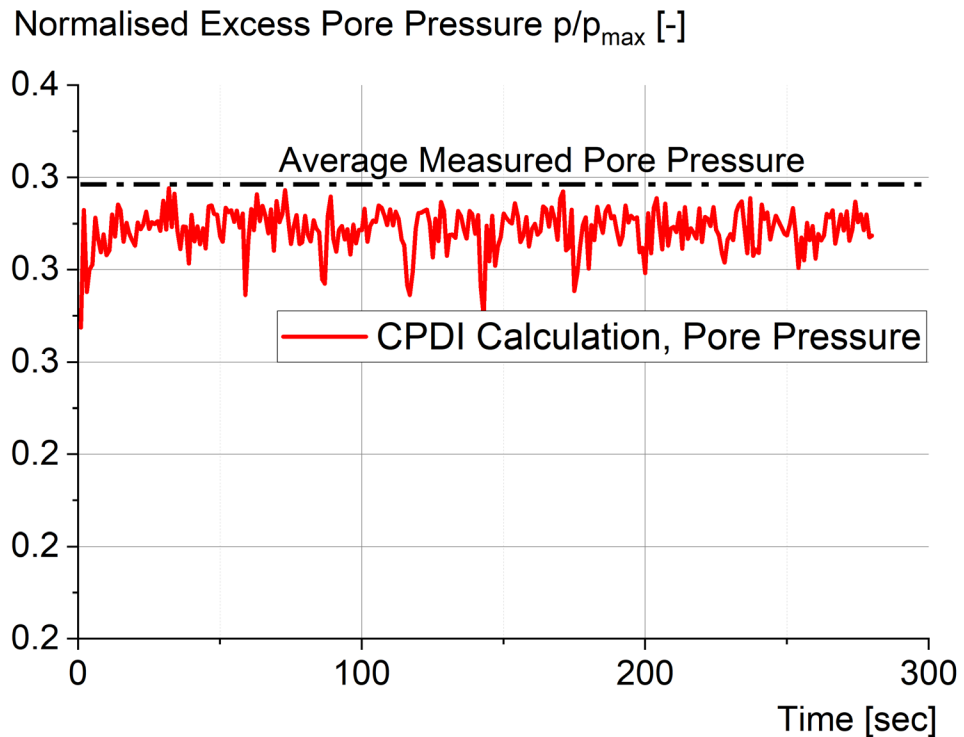


Abbildung 21: UBCSAND-Modell: Porenwasserdruckberechnung im Vergleich zu Felddaten

In Abbildung 20 wird die Simulationsphase abgegrenzt, und die Porendruckwerte werden isoliert und über diese Phase gemittelt. In Anbetracht der verschiedenen Unbekannten im Feld, wie z. B. die Position des Geophons, externe Geräusche, die Ausrichtung des Schiffs usw., die die Messungen beeinflussen können, ist es logischer, die Simulationsergebnisse mit einem gemittelten Wert zu vergleichen. Die Berechnungen aus der Simulation werden diesem gemittelten Wert gegenübergestellt, wie in Abbildung 21 dargestellt.

Trotz bestimmter technischer Annahmen zeigt das CPDI-Modell, dass es in der Lage ist, den Druckbereich, der während des Installationsprozesses entsteht, genau zu erfassen. Es ist wichtig zu beachten, dass die absorbierenden Begrenzungen die Wellenreflexion zwar abschwächen, aber nicht vollständig eliminieren können. Ein kleiner Teil der reflektierten Wellen kann sich zurück in das Boden-Wasser-Kontinuum ausbreiten. Es wird angenommen, dass die Wechselwirkungen zwischen diesen reflektierten Wellen und den vom Monopile ausgehenden Wellen zu den beobachteten Schwankungen in den Druckberechnungen beitragen.

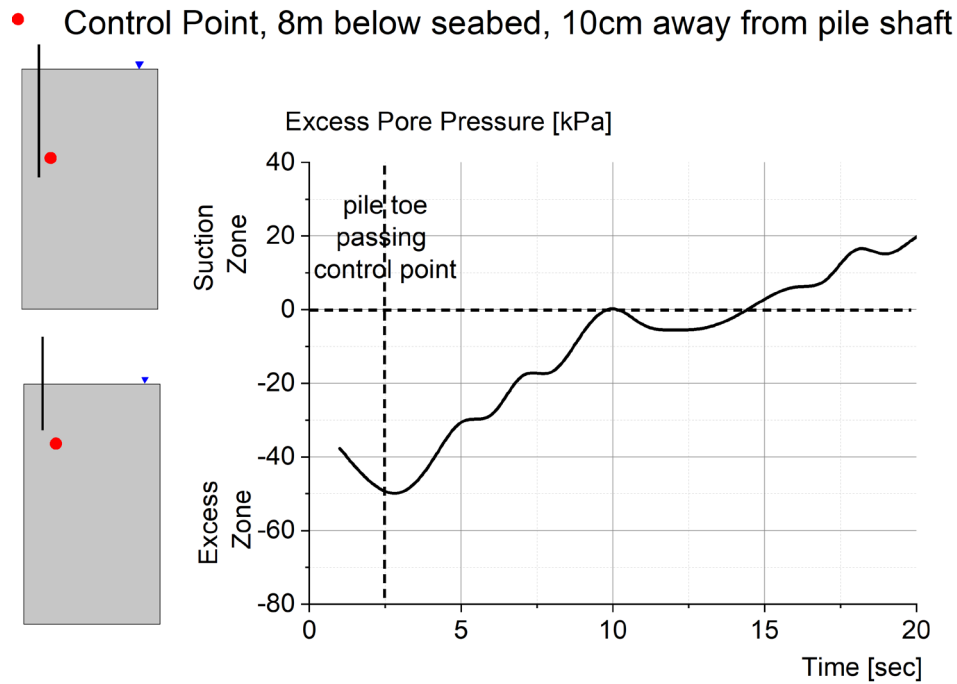


Abbildung 22: UBCSAND-Modell: Porenwasserüberdruck im Boden

Was im Feld nicht direkt gemessen werden kann, sind die Porendrücke im Boden, ein wichtiger Aspekt für die geotechnische Fachwelt im weiteren Sinne. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse gehen zwar über den ursprünglichen Rahmen des Projekts hinaus, dienen aber dazu, die Fähigkeiten des CPDI-Codes zu demonstrieren und eine Grundlage für künftige Forschungen zu schaffen. Die Porenüberdrücke im Boden wurden an einem Punkt gemessen, der 8 Meter unter dem Meeresboden und 10 Zentimeter vom Pfahlschaft entfernt liegt (siehe Abbildung 22).

Es wurden zwei unterschiedliche Zonen festgestellt: i) eine Zone mit Porenwasserüberdrücken und ii) eine mit Porenwasserunterdrücken. Wenn sich der Monopile dem Kontrollpunkt nähert, verdichtet er das darunter liegende Kontinuum, was zu einem Anstieg des Porenwasserdrucks führt. Sobald der Pfahl den Kontrollpunkt passiert, dehnt sich der Boden um den Pfahl herum aus, was zu einem negativen Porenwasserdruck innerhalb des Kontinuums führt. Diese Beobachtung deckt sich gut mit Angaben in der vorhandenen Literatur. Ein ähnlicher Verlauf des Porendrucks wurde u.a. von Caillemer (1975) und Bakroon (2020) beschrieben.

Der fortgeschriebene CPDI-Code stellt so nicht nur seine Fähigkeit unter Beweis, die Installation und die Druckwellen während des Installationsprozesses zutreffend zu modellieren, sondern auch geotechnische Aspekte detailliert zu erfassen, womit er seine Vielseitigkeit bei der Simulation komplexer geotechnischer Phänomene belegt.

2.1.9 Bodenbeschleunigung : Felddaten und numerische Studie

In der abschließenden Analyse werden die Bodenbeschleunigungen aus dem Feld mit den Simulationsdaten verglichen. Während die Bodenbeschleunigungen im Feld in einem Abstand von 100 Metern vom Monopile gemessen werden, ist die Modellierung eines so großen Bereichs durch die begrenzte Größe eingeschränkt. Daher wurde für die Simulation ein 15 Meter breites Modell vernetzt, so dass die Bodenbeschleunigungen nur in einem Abstand von 15 Metern vom Monopile aufgezeichnet werden konnten. Abbildung 21 zeigt die Bodenbeschleunigung für einen Pfahlstandort und vergleicht sie mit den Simulationsergebnissen. Außerdem wird in Abbildung 21 der Betrag des Geschwindigkeitsvektors anstelle von Geschwindigkeitsmessungen in drei verschiedenen Richtungen verwendet. Diese Wahl ist aufgrund der Unsicherheiten bei der vertikalen Installation der

Geschwindigkeitssensoren während des Einbauprozesses erforderlich, was einen direkten Vergleich mit den Simulationsdaten schwierig macht.

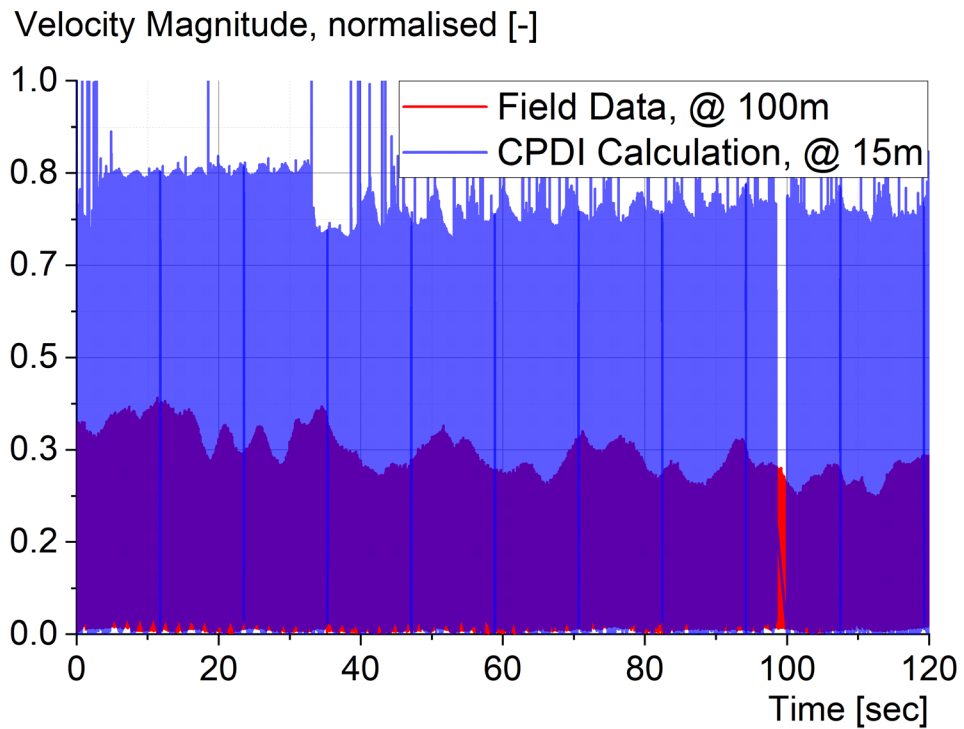


Abbildung 23: Simulation mit UBCSAND Modell: Bodenbeschleunigung

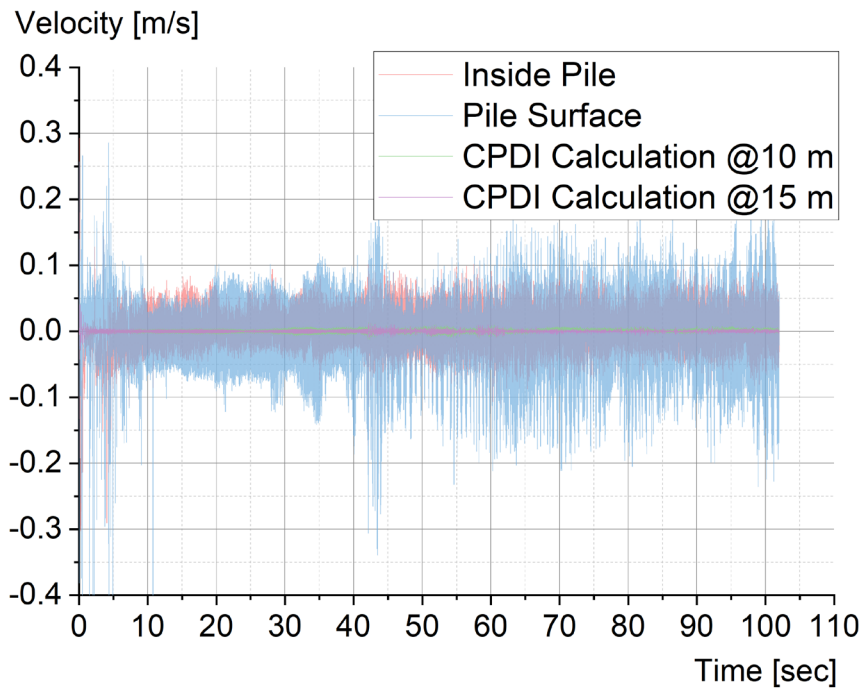


Abbildung 24: Simulation mit Hypoplastischem Stoffgesetz: Bodengeschwindigkeit

Die mit Hilfe des hypoplastischen Stoffgesetzes berechneten Bodenschwingungen sind in Abbildung 24 visuell dargestellt. Bei dieser umfassenden Analyse werden die Geschwindigkeiten an vier verschiedenen Punkten gemessen: i) im Inneren des Pfahls, was Aufschluss über die dynamische Reaktion im Kern der Struktur gibt, ii) auf der Oberfläche des Pfahls, was die unmittelbaren Auswirkungen auf den Pfahl selbst veranschaulicht, iii) 10 Meter vom Pfahl entfernt, was einen mäßig entfernten Punkt darstellt, um die räumliche Ausdehnung der Schwingungen zu bewerten, und iv) 15 Meter vom Pfahl entfernt (Modellgrenze), was ein Verständnis der Schwingungsauswirkungen in größerer Entfernung von der Quelle ermöglicht. Die Beobachtungen an diesen Messpunkten lassen einen Trend erkennen: eine beobachtbare und allmähliche Abschwächung der Schwingungen, wenn sich der Messpunkt immer weiter vom Monopile entfernt.

Infolgedessen wird nur ein qualitativer Vergleich vorgenommen. Es ist zu beobachten, dass mit dem Fortschreiten der Simulation eine Verringerung der Bodengeschwindigkeit im Feld festgestellt wird, ein Trend, der auch im numerischen Modell zu beobachten ist.

2.1.10 Identifizierung der für die Installation relevanten Parameter

Bei der Untersuchung der Faktoren, die den Installationsprozess für Monopiles maßgeblich beeinflussen, haben sich mehrere Schlüsselparameter als wichtige Determinanten herausgestellt. An erster Stelle steht die Installationsfrequenz, die sich direkt auf die Effizienz und Effektivität des Einbauprozesses auswirkt. In der numerischen Simulation hat sich gezeigt, dass mit Installationsfrequenz die Eindringtiefe ansteigt. Bei einer zu hohen Frequenz ist jedoch eine Verringerung der Eindringtiefe zu erwarten.

Wichtig ist ferner die Berücksichtigung der Hakenlast, die ein entscheidender Aspekt ist, der den Eindringvorgang beeinflusst. Wenn ein Prognosemodell erstellt werden soll, muss auch die Hakenlast berücksichtigt werden. Diese zu simulieren ist jedoch eine Herausforderung, da dieser Wert, sofern der Pfahl nicht freireitend installiert wird, erst nach dem Einbau bekannt ist.

Darüber hinaus spielt die Lagerungsdichte des nichtbindigen Bodens eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung des während des Einbaus auftretenden Widerstands, was sich wiederum auf den gesamten Eindringvorgang auswirkt. Da die einzigen Daten für die Bodenkalibrierung, die im Laufe des Projekts zur Verfügung standen, die CPT-Daten waren, wurden die Lagerungsdichten auf dieser Basis ermittelt. Da nur eine homogenisierte Dichte angenommen wurde, konnte die im Feld beobachtete maximale Tiefe zunächst nicht simuliert werden. Dieses Defizit wurde jedoch im Laufe des Projekts durch die Einführung mehrerer Schichten in den CPDI-Code behoben. Darüber hinaus spiegelt die Simulation mehrerer Bodenschichten die realen Bedingungen besser wider und ist für das Verständnis der komplexen Zusammenhänge bei der Installation von Monopiles unerlässlich.

Durch die Identifizierung und umfassende Berücksichtigung dieser Parameter kann der Installationsprozess realistisch abgebildet und erforderlichenfalls optimiert werden.

2.1.11 Empfehlungen für zukünftige Offshore-Windpark-Projekte

Ausgehend von den Erkenntnissen, die aus den vorliegenden Untersuchungen gewonnen wurden, können Empfehlungen für die erfolgreiche Durchführung künftiger Projekte unter vergleichbaren Bedingungen formuliert werden.

Demnach ist die Zusammenarbeit mit Branchenexperten und Interessenvertretern sinnvoll, um einen gemeinsamen Ansatz zur Problemlösung und zum Wissensaustausch zu fördern.

Darüber hinaus kann der Einsatz fortschrittlicher Simulationstechnologien bei der Prognose und Bewältigung von Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Installationsprozess helfen.

Eine gründliche Vorabbewertung der Baugrundbedingungen, einschließlich einer detaillierten Analyse der Lagerungsdichte, trägt wesentlich zur Projektplanung und Risikominderung bei.

Die Berücksichtigung dieser Empfehlungen kann einen Beitrag für einen effizienteren, kostengünstigeren und erfolgreicherem Installationsprozess bei Projekten mit ähnlichen Randbedingungen ebnen.

2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Arbeitspaket	Personalaufwand
AP 1	1,00 PM
AP 2	0,50 PM
AP 3	0,00 PM
AP 4	0,00 PM
AP 5	31,00 PM
AP 6	0,50 PM
AP 7	0,00 PM
AP 8	0,50 PM
AP 9	0,50 PM
Summe	34,00 PM

Neben den Personalkosten (wissenschaftliches Personal) wurden die Ergebnisse des Projekts auf nationalen und internationalen Konferenzen vorgestellt und diskutiert (Reisekosten). Studentische Mitarbeiter waren eine wichtige Unterstützung bei der Projektarbeit (Präsentation und Auswertung von Mess- und Berechnungsdaten). Darüber hinaus wurde eine Workstation angeschafft (im Rahmen der vereinbarten Kosten), um eine schnellere Simulation zur Einhaltung der Projekttermine zu ermöglichen. Die genaue Auflistung der Kosten ist im zahlenmäßigen Nachweis enthalten.

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Forschungsvorhaben ist im Zusammenhang mit dem angestrebten Ausbau der Windenergie und der Notwendigkeit, die mit Offshore-Anlagen verbundenen Installationskosten zu senken, von Bedeutung.

Die Untersuchungen erlauben die Identifikation der Schlüsselparmeter, die die Installation von Monopiles mittels Vibrationsrammung beeinflussen. Auf dieser Basis können Installationsprozesse zuverlässiger geplant werden, was einen Beitrag leistet, dieses nachhaltigere Installationsverfahren zu etablieren.

Die Bedeutung dieser Forschungsarbeit wird durch ihr Potenzial unterstrichen, zu den weltweiten Bemühungen um eine Minimierung der Umweltauswirkungen von Offshore-Bauaktivitäten beizutragen. Darüber hinaus ist die Erforschung optimaler Installationsparameter nicht nur für das betreffende Projekt relevant, sondern hat auch eine breitere Anwendbarkeit. Die Festlegung optimaler Parameter ist für die Kostensenkung, die betriebliche Effizienz und die Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Bodenbedingungen weltweit von entscheidender Bedeutung.

Da Offshore-Windparks unter unterschiedlichen Baugrund- und Umweltbedingungen zu installieren sind, bieten die erzielten Ergebnisse eine Grundlage für die Anpassung von Installationsmethoden an verschiedene Terrains, wodurch die globale Relevanz und Anpassungsfähigkeit von Offshore-Installationsverfahren verbessert wird. Vor diesem Hintergrund wird die durchgeführte Forschungsarbeit als notwendig und angemessen erachtet und ebnet den Weg für nachhaltigere und wirtschaftlich tragfähige Lösungen im Bereich der Monopile-Installation.

2.4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Mit Hilfe des im Teilvorhaben entwickelten numerischen Simulationsmodells für die Vibrationsrammung und der damit verbundenen Unterwasserschallausbreitung kann die Planungssicherheit von Offshore-Windparks insgesamt erhöht werden. Diese erhöhte Planungssicherheit ergibt sich aus der Möglichkeit, standortspezifische Baugrundverhältnisse und projektspezifische Herstellparameter bei der Bewertung der technischen Umsetzbarkeit der Vibrationsrammung und der behördlichen Genehmigungsfähigkeit zu berücksichtigen und zwar sowohl hinsichtlich des Eindringvorgangs der Gründungspfähle der Windenergieanlagen als auch bei dessen Umweltauswirkungen (Unterwasserschall).

Die genauere Prognose der mechanischen und akustischen Vorgänge während der Vibrationsrammung basierend auf den verifizierten und validierten numerischen Simulationsmodellen gleicht den bei der Vibrationsrammung bestehenden Wissensrückstand gegenüber der derzeit gängigen Impulsrammung aus und ermöglicht eine gezieltere Auswahl der am besten geeigneten Methode bzw. Herstellparameter für die Pfahlinstallation. Dies führt zu einem effizienteren Ressourceneinsatz und einer Senkung der Herstellungskosten von Offshore-Windparks bzw. einzelner Windenergieanlagen.

Mit dem im Teilvorhaben entwickelten numerischen Prognosemodelle konnte in Verbindung mit den Beobachtungen im KASKASI-Projekt der Nachweis erbracht werden, dass vibrierte Pfähle schneller und teilweise aus schallärmer installiert werden können und somit mit dieser Installationsmethode signifikante ökonomische und wohl auch ökologische Vorteile gegenüber eingeschlagenen Pfählen erreicht werden können. Insoweit konnte mit dem Vorhaben VISSKA ein entscheidender Beitrag zur Etablierung der Vibrationsrammung als deutlich schonendere und wirtschaftlicher Installationsmethode im Offshore-Bereich geleistet werden. Die bei dem Projekt KASKASI beobachteten Schwierigkeiten, die Monopiles mit dem Vibrationsrammung bis auf die geplante Endteufe zu installieren wie auch die Ergebnisse der Schallmessungen zeigen aber weiteren Forschungsbedarf zur Klärung und Optimierung dieses vielversprechenden Installationsverfahrens auf.

2.5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Verlauf des Projekts wurden entscheidende Fortschritte am CPDI-Code erzielt. Dies umfasste die Optimierung des Codes, um längere Zeitskalen von mehr als 10 Minuten effizient verarbeiten zu können. Zusätzlich wurde eine mehrschichtige Bodenprofilierung innerhalb des CPDI-Codes implementiert, um eine präzisere Beschreibung des Bodens zu ermöglichen. Ein weiterer Meilenstein war die Kopplung eines Modells zur Abbildung von freiem Wasser in Interaktion mit gesättigtem Boden, was die Abbildung von Schallwellen im freien Wasser und von Druckwellen im Baugrund ermöglicht. Diese Entwicklungen tragen maßgeblich zur Verbesserung der Genauigkeit und Anwendungsbreite des CPDI-Codes bei.



2.6. Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projekts wurden die folgenden Veröffentlichungen ermöglicht:

1. Giridharan, S. (2022):
Convected Particle Domain Interpolation Method for Large Deformation Geotechnical Problems.
Dissertation, Mitteilungen des Institutes für Geotechnik, Heft 77, Universität Stuttgart, 2022
2. Giridharan, S., Stolle, D.F.E., Moormann, Ch. (2023):
Numerical prediction of the installation of vibratory monopile foundations for offshore wind energy projects. 10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2023), Imperial College London, 26-28 June 2023,
3. Giridharan, S.; Moormann, Ch. (2023):
On the application of Convected Particle Domain Interpolation method to the numerical modelling of offshore monopile installations.
Fachsektionstage 2023, DGGT, Würzburg, Germany
4. Giridharan, S., Stolle, D.F.E., Moormann, Ch.:
Contributions to the numerical modelling of vibratory monopile installation simulations using the Convected Particle Domain Interpolation Method
in-progress: Computers and Geotechnics
5. Giridharan, S., Moormann, Ch.:
Effect of the installation parameters and the installation methods on the offshore monopile installation (Vorläufiger Titel)
in-progress: Soils and Foundations

Literaturverzeichnis

- Bakroon, M. (July 2020). *Employment of a Multi-Material ALE approach using nonlinear soil models to simulate large deformation geotechnical problems*. Ph.D. dissertation, Technische Universität Berlin, Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt. doi:10.14279/depositonce-11057
- Caillemer, B. M. (1975). *An experimental study in the UF static cone test calibration chamber: Part 1, Density distribution of pluviially placed sand. Part 2, Pore pressure distribution around Fugro tip*. Ph.D. dissertation, University of Florida.
- Giridharan, S. (2022). *Convected Particle Domain Interpolation Method for Large Deformation Geotechnical Problems*. University of Stuttgart.
- Giridharan, S., Gowda, S., Stolle, D. F., & Moormann, C. (2020). Comparison of UBCSAND and Hypoplastic soil model predictions using the Material Point Method. *Soils and Foundations*, 60, 989–1000.
- Hamad, F. (2016). Formulation of the axisymmetric CPDI with application to pile driving in sand. *Computers and Geotechnics*, 74, 141–150.
- Hamad, F., Giridharan, S., & Moormann, C. (2017). A penalty function method for modelling frictional contact in MPM. *Proceedings of the 1st International Conference on the Material Point Method (MPM 2017)*. 175, S. 116–123. Elsevier.
- Jamiolkowski, M., Lo Presti, D. C., & Manassero, M. (2003). Evaluation of relative density and shear strength of sands from CPT and DMT. In *Soil behavior and soft ground construction* (S. 201–238).
- Kafaji, I. (2013). *Formulation of a dynamic material point method (MPM) for Geomechanical Problems*. Ph.D. dissertation, Institute for Geotechnical Engineering, University of Stuttgart.
- Moormann, C., Gowda, S., & Giridharan, S. (2018). Numerical simulation of pile installation in saturated soil using CPDI. *Proceedings of the 9th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, (S. 665–672).
- Sadeghirad, A., Brannon, R. M., & Burghardt, J. (2011). A convected particle domain interpolation technique to extend applicability of the material point method for problems involving massive deformations. *International Journal for numerical methods in Engineering*, 86, 1435–1456.
- Zachert, H. (2014). *Zur Gebrauchstauglichkeit von Gründungen für Offshore-Windanlagen*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT).