

Rammbegleitende Messungen am Monopile von FINO³

Der Einsatz von GEMSOGS im Offshore Bau

AOR Dr.-Ing. **Jörg Gattermann**,
Univ. Prof. Dr.-Ing. **Joachim Stahlmann**,
Dipl.-Ing. **Jörn Zahlmann**, IGB der TU Braunschweig

Kurzfassung

In der Nordsee wird zurzeit die dritte Forschungsplattform (FINO³) gebaut. Das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig hat hierbei den Auftrag, die Interaktionen des Gründungsrohres (Monopile) mit dem umgebenden Boden während der Rammung und danach durch die Belastungen aus Wind und Wellen zu bestimmen. In diesem Beitrag wird auf die Auswahl und den Einbau der Messtechnik eingegangen, sowie erste Ergebnisse der Rammung vorgestellt

1 Einleitung

Da für Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen (Offshore-WEA) mit küstenfernen Standorten derzeit kaum Erkenntnisse bezüglich des Tragverhaltens sowie der Lasteinwirkungen vorliegen, ist das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig (IGB-TUBS) mit geotechnischen in-situ Messungen und deren Auswertung am Forschungsvorhaben FINO³ (3. Forschungsplattform in Nord- und Ostsee) beteiligt. Die Interaktionen zwischen dem Gründungselement und dem dynamisch beanspruchten Untergrund sind von wesentlicher Bedeutung für die Dimensionierung und Standsicherheit einer Windenergieanlage.

Durch die hohen dynamischen Einwirkungen aus Wind- und Wellenbelastung unterscheidet sich die Interaktion zwischen Gründungselement und Boden deutlich von der an Land (Onshore) bzw. im Landnahen Bereich (Nearshore).

Als Gründungselement für FINO³ dient ein Monopile, welcher ca. 28 m tief in den Meeresgrund einbindet. Dieser hat im Bereich der Einbindung in den Boden einen Durchmesser von 4,75 m und eine Wandstärke von 4,5 cm. Oberhalb des Meeresbodens bis hin zur Wasseroberfläche verjüngt sich der Monopile auf 3,00 m bei einer gleichzeitigen Erhöhung der Wandstärke auf 7,0 cm.

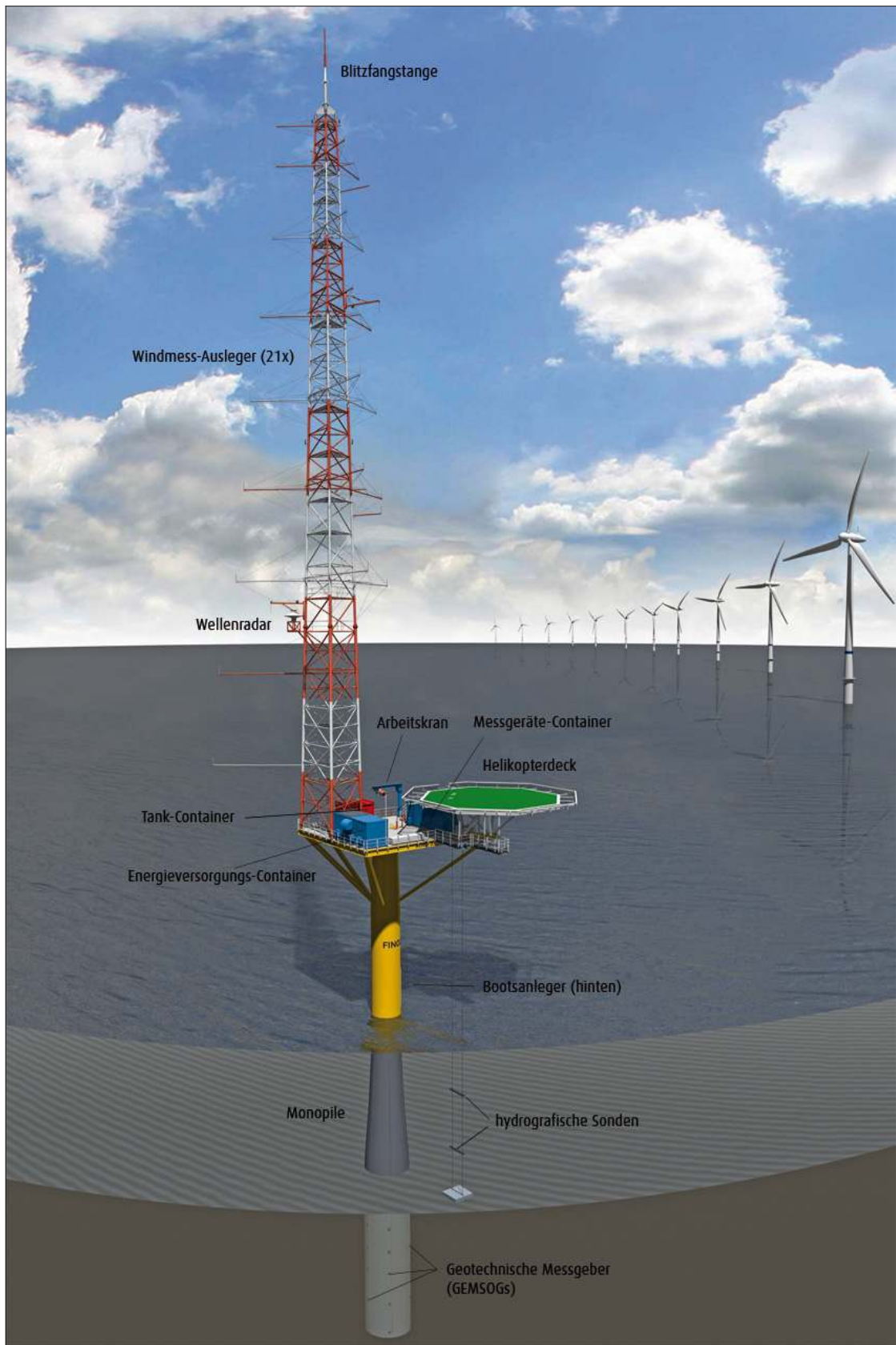


Abbildung 1: schematische Darstellung von FINO³ [3]

Der Standort der Forschungsplattform befindet sich ca. 45 sm (80 km) westlich von Sylt und liegt in unmittelbarer Nähe zu den genehmigten Offshore-Windparks Sandbank Power, Nördlicher Grund, Dan Tysk und OSB Butendiek mit insgesamt ca. 320 Windenergieanlagen.

Mit der Konzeption und Entwicklung sowie Bau, Errichtung und Betrieb der Forschungsplattform FINO³ wurde die Forschungs- und Entwicklungszentrum Fachhochschule Kiel GmbH (FuE Kiel) beauftragt. Gefördert wird das Forschungsvorhaben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit sowie durch das Land Schleswig-Holstein.

2 Messtechnik

Die vorgesehenen Messungen am Monopile FINO³, d.h. an einem Pfahl mit großem Durchmesser, sollen unbekannte Zusammenhänge im Boden und in der Grenzschicht Monopile/Boden infolge der äußeren Lasteinwirkungen erklären. Um eine möglichst gute Bewertung der geotechnischen Einflüsse auf den Pfahl zu erhalten, ist eine Vielzahl an Messungen in unterschiedlichen Tiefenlagen erforderlich. Aufgrund der Menge von Messgebern wurde vom IGB ein Konzept entwickelt wie dies am Besten zu realisieren ist. Das Hauptaugenmerk lag hierbei auf dem Schutz der Geber und Kabel vor den hohen Beanspruchungen der hohen Rammenergie von bis zu 800 kJ je Rammschlag und der Gewährleistung, dass Langzeitmessungen auch nach dem Rammvorgang möglich sind. Es mussten bei der Anbringung der Messgeber am Monopile folgende Vorgaben eingehalten werden:

- Am Schaft des Monopiles durften Messgeber nur aufgeschweißt werden. Bohrungen waren aus statischen Gründen nicht erlaubt, da zu große Kerbspannungen im Stahl entstehen würden.
- Aus Kostengründen, gerade auf hoher See, musste eine möglichst kurze Installations- und Anschlusszeit der Sensoren eingehalten werden, da die Bereitstellung der benötigten Ausrüstung (Kran, Hebebühne, Drehung des Monopiles, ...) sehr kostenintensiv ist.
- Wasserdichtigkeit der Messgeber und der Verschaltung

Auf der Grundlage dieser Anforderungen wurde am IGB-TUBS eine geotechnische Messstation für Offshoregründungsstrukturen entwickelt. Diese wurde GEMSOGS getauft [5]. Der Name ist abgeleitet von:

Geotechnische Mess-Station für Offshore Gründungs-Strukturen bzw.
Geotechnical Measurement Station for Offshore Ground Structures

Da der Monopile und damit auch die Messtechnik enormen Belastungen unterliegt, wurden besondere Forderungen an die Technik gestellt, welche im Folgenden aufgezählt sind [1]:

- Robustheit der Messgeber und Sensoren gegenüber der hohen Rammenergie
- Sorgfältige Schweißarbeiten bei den Messstationen und Kabelschutzkanälen zur Gewährleistung der Wasserdichtigkeit und Verhinderung der Zerstörung der Kabel und Sensoren
- Sehr kurze Einbauzeiten für die gesamte Messtechnik → Vorkonfektionierung
- Installation an Land → Schutz beim Transport und Einbau
- Hochfrequente Messung während der Rammung (~ 5 kHz, danach 1 Hz)
- Möglichst geringe Stromaufnahme aller Messgeber sowie Datenlogger/PC
- Wartungsarm

Ein GEMSOGS besteht bei dem Projekt FINO³ aus einer Stahlplatte (Stahlgüte S355) mit den Abmessungen von 500 mm x 250 mm x 70 mm. Der GEMSOGS ist an der beim Rammvorgang in den Boden eindringenden Seite mit einem Rammschuh versehen, welcher um 45° abgeschrägt ist. Oberhalb des Rammschuhs ist ein um 5 mm vorstehender Räumler angeordnet. Hiermit soll die Oberfläche des Totspannungsgebers beim Eindringen in den Boden vor vorbeigleitenden Steinen geschützt werden. Die dem Pfahl zugewandte Unterseite des GEMSOGS ist mit einem Radius von 237,5 cm ausgerundet. Dieser Radius entspricht dem Außenradius des Monopiles. So ist ein saftiges Anliegen des GEMSOGS am Pfahlschaft sichergestellt.

Für die Integrierung der einzelnen Messgeber in die GEMSOGS wurden für jeden Geber Aussparungen in die Stahlplatte gefräst.

Abbildung 2 zeigt einen voll instrumentierten GEMSOGS zerlegt in dessen Einzelteile. Im Einzelnen wurden in den GEMSOGS

- Totspannungsgeber,
- Porenwasserdruckaufnehmer,
- Temperaturlaufnehmer,
- Inklinometer,
- Dehnungsmessstreifen (biaxial),

und in den Kabelkanälen

- weitere Dehnungsmessstreifen (biaxial),
- sowie Beschleunigungsaufnehmer (biaxial)

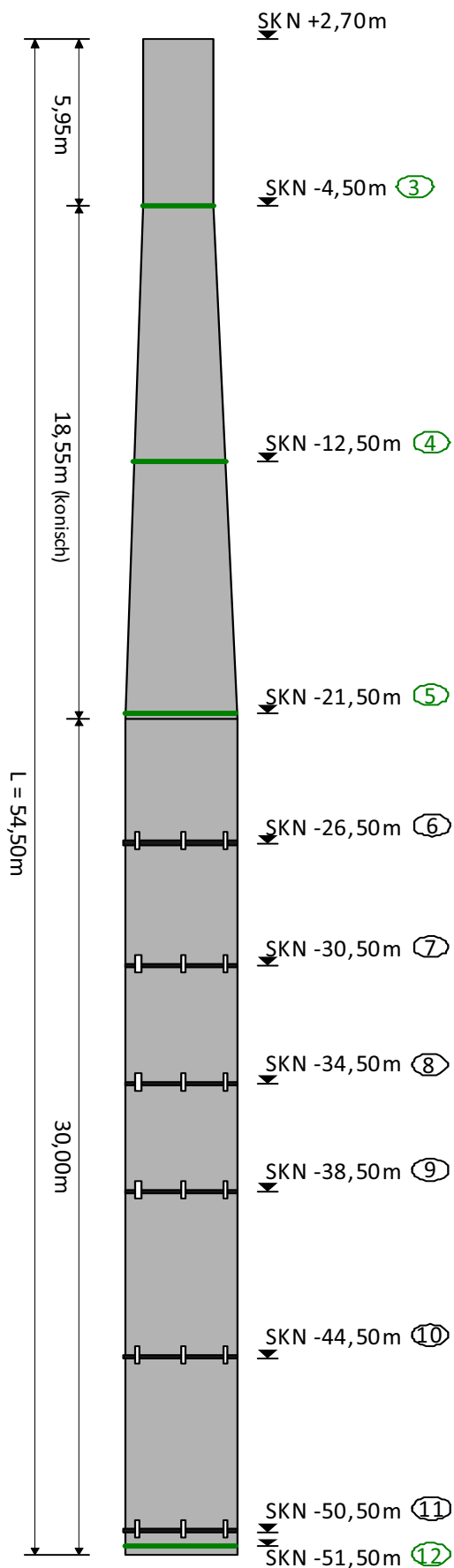
eingebaut.



Abbildung 2: GEMSOGS vor dem Zusammenbau [2]

3 Anordnung der Messgeber

Die Wahl der Höhenlage einer Messebene ist von unterschiedlichen Faktoren abhängig. Die folgenden Höhenangaben beziehen sich alle auf die geplante Absetztiefe des Monopiles am Standort von FINO³. Alle Angaben beziehen sich auf Seekarten-Null (SKN). Im Querschnitt wurde der Monopile in sechs Messachsen unterteilt (A1,A2,B1,B2,C1,C2), die jeweils im Winkel von 60° angeordnet sind. Im Bereich oberhalb des Meeresbodens sind sie vor allem nach gegebenen Zwangspunkten des Turmes ausgerichtet. Die Messebene 1 befindet sich in einer Höhe von +21,50 m an der Unterkante der Plattform. In einer Höhe von +11,37 m ist eine begehbare Zwischenebene im Monopile installiert. Die Datenloggerschränke (Messebene 2) befindet sich auf dieser Ebene. Die Durchführung der Kabel zu den Ebenen 3 bis 12 vom außen liegenden Kabelkanal ins Innere des Monopiles erfolgt durch Öffnungen im Rohr auf der Höhe von -4,00 m. Kurz unterhalb der Öffnungen bei einer Tiefe von -4,50 m ist die Messebene 3 positioniert. Bei -12,50 m befindet sich Messebene 4. Auf Höhe des Meeresbodens (-21,80 m) liegt die 5. Messebene (-21,50 m SKN). Der erwartete Kolk hat eine Tiefe von ca. 6,00 Metern. Aus diesem Grund ist die Messebene 6 in einer Höhe von -4,70 m unterhalb des Meeresbodens (-26,50 m) positioniert, um die Bildung und Veränderung eines Kolkes messen zu können. Im Bereich der rechnerisch größten ermittelten Verschiebung des Pfahles und des eintretenden großen Bodenwiderstandes wurden die



Ebenen 7-9 in einem Abstand von 4,00 m untereinander angebracht (Messebene 7 = -30,50 m, Messebene 8 = -34,50 m, Messebene 9 = -38,50 m). Die Messebenen 10 (-44,50 m) und 11 (-50,50 m) folgen mit einem Abstand von je 6,00 m. Die unterste Ebene (Messebene 12) befindet sich im Bereich des Pfahlfußes (-51,80 m) bei einer Tiefe von -51,50 m. Die Messebenen 6 – 11 wurden mit GEMSOGS bestückt.

Für die rambbegleitende Messung wurden alle Ebenen des Monopiles der Messachsen B1 und B2 mit DMS ausgestattet. Die Messachsen liegen gegenüber, um eventuelle Biegungen, hervorgerufen durch die Exzentrizität eines Rammstoßes, messtechnisch ausgleichen und kompensieren zu können. Zudem wurde an der Messachse B1 in unterschiedlichen Tiefen je ein Beschleunigungsaufnehmer angebracht. Bisher am IGB-TUBS durchgeführte, dynamische Probelastungen an Rohr-Pfählen haben gezeigt, dass auch bei einer nicht gleichmäßig verteilten Lasteinwirkung die Beschleunigungen der das Rohr durchlaufenden Welle allseitig um das Rohr in fast gleicher Größe auftreten. Deshalb wurde die Anordnung eines Beschleunigungsaufnehmers pro Messebene als ausreichend angesehen.

Abbildung 3: Messebenen am Monopile [8]

Dadurch, dass nur die Messebenen 6 bis 11 mit GEMSOGS bestückt wurden, mussten alle nicht in diesen Messebenen liegenden Messgeber (Beschleunigung und weitere DMS) im Schutze der Kabelkanäle an den Pfahlschaft appliziert werden.

4 Rammung

Bei der Rammung von FINO³ kam ein Rammbar (MHU 800S) der Firma MENCK zum Einsatz. Nach Aufstellen des Monopiles in die Rammführung und Absetzen auf dem Meeresboden konnte eine sofortige Setzung des Pfahles von 2,20 m durch sein Eigengewicht (315 t) gemessen werden. Im weiteren Verlauf wurde der Pfahl in den Baugrund mit 6364 Schlägen eingerammt.

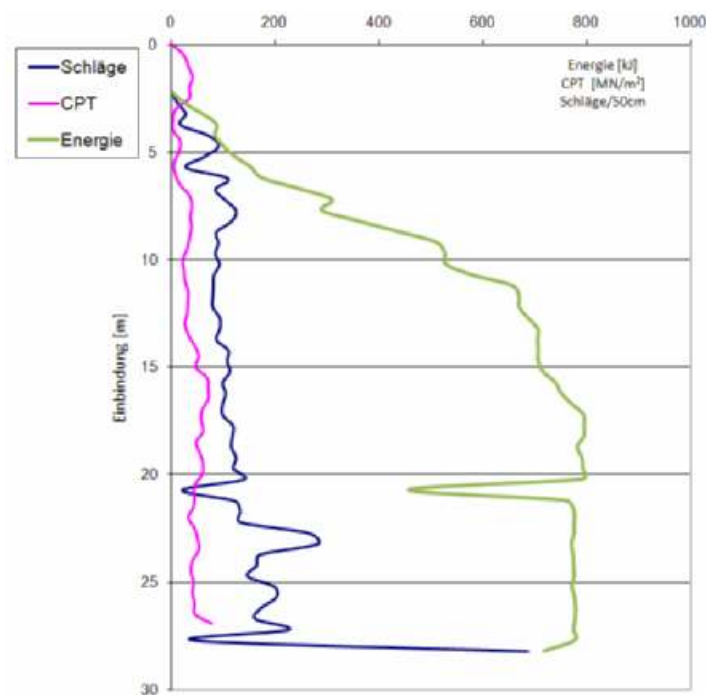


Abbildung 4: Gegenüberstellung der Rammschläge, Rammenergie und CPT

In der Abbildung 4 wurden die von MENCK aufgezeichneten Rammschläge mit deren durchschnittlicher Rammenergie [kJ] über die Einbindelänge [m] aufgetragen. Auffällig ist, dass bei einer Einbindelänge von -20,70 m eine deutliche Abnahme, und bei einer Einbindung zwischen 22,20 - 23,20 m und 27,20 - 28,20 m eine Zunahme der Rammschläge verzeichnet wurde. Wenn man diese Bereiche mit der dort durchgeführten CPT vergleicht, lassen sich keine nennenswerten Festigkeitsverluste und Veränderungen seitens Spitzendruck und Mantelreibung erkennen, womit sich die erhöhten bzw. verringerten Schlagzahlen begründen lassen.

GEMSOGS-, Schläge, Eindringung, Uhrzeit

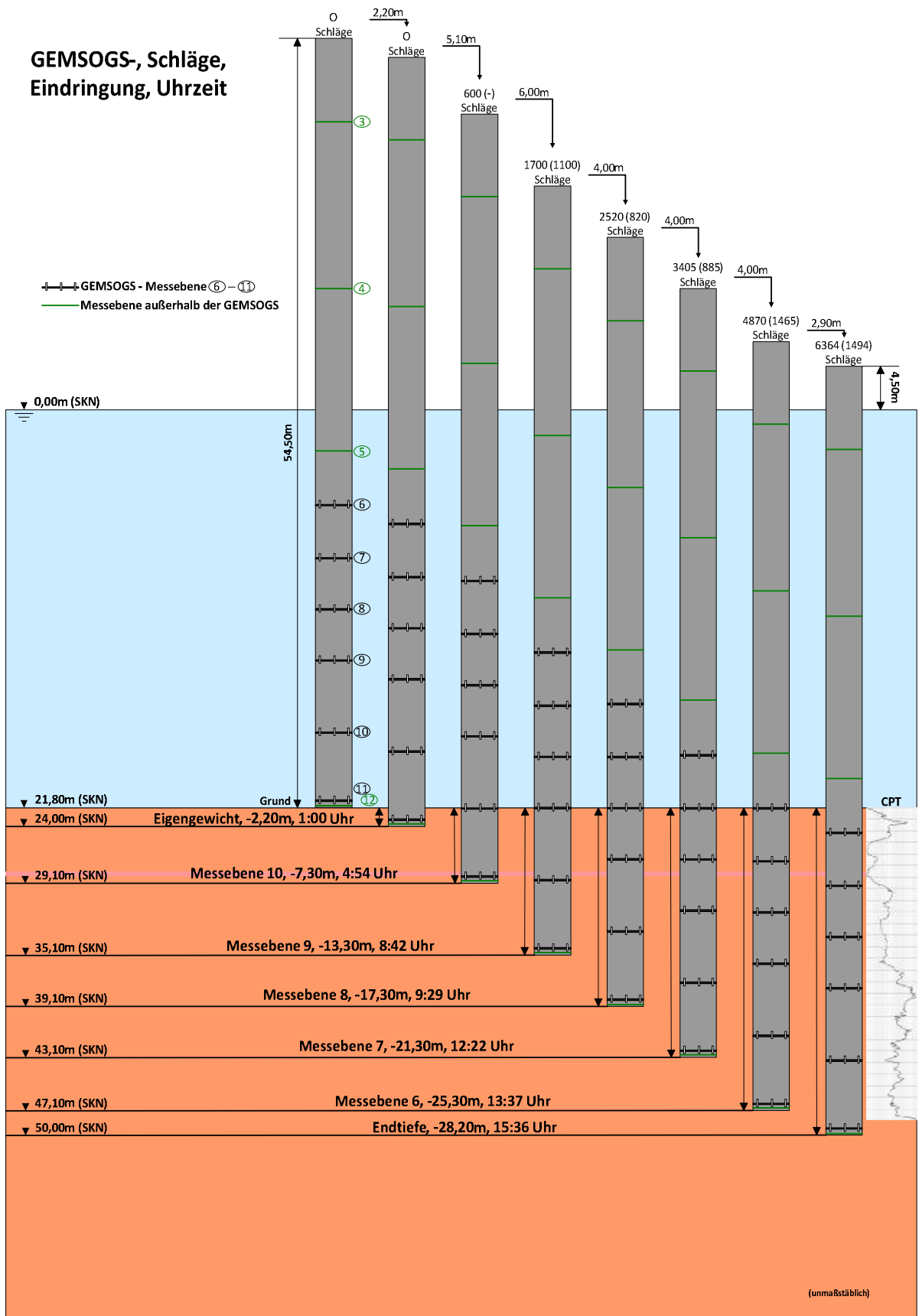


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf der Einbindung in den Baugrund [8]

Unter Berücksichtigung des Rammprotokolls und der vom IGB-TUBS aufgezeichneten Daten wurde in Abbildung 5 die Einbindung des Pfahles bis zum Erreichen der einzelnen Messebenen in den Boden dargestellt. Nach Beendigung der Rammung wurde durch Lotung von der Oberkante des Pfahles bis zum Meeresboden, die Einbindelänge des Monopiles zu 28,10 m bestimmt. Aus den Messungen am Pfahl ergibt sich eine Einbindung von 28,20 m.

5 Plausibilitätskontrolle

Um die Signale gesichert auswerten zu können, muss vorab sichergestellt werden, dass die aufgezeichneten Dehnungen plausibel sind. Da die Abstände der einzelnen Messgeber untereinander bekannt sind, können einfache Abstandsmessungen durchgeführt werden. Eine Auswertung der Abstände nur anhand der Zahlenwerte bzw. durch Ausmessen wäre relativ ungenau. Um Zeitverschiebungen von zwei unterschiedlichen Signalen festzustellen, kann in der Signalverarbeitung auf die Auto- und Kreuzkorrelation zurückgegriffen werden.

In Tabelle 1 ist die theoretische Laufzeit (Spalte 3) der Dehnwelle und der jeweilige Abstand bezogen auf die Messebene 6 dargestellt. Da der Weg und die Wellengeschwindigkeit (Stahl: $c = 5122 \text{ m/s}$) bekannt sind, kann man mit $t = L / c$ die Laufzeit zwischen den Messaufnehmern errechnen. Die dunkelgrau hinterlegten Zahlenwerte stehen für Messebenen aus einem bereits in den Boden eingebundenen Bereich. Die Messebenen der grau hinterlegten Zahlenwerte befinden sich noch im Wasser.

Tabelle 1: Ergebnisse der Kreuzkorrelation der Ebenen 6-10 [8]

Ebenen	Abstände [m]	Zeit [ms]	Kreuzkorr [ms]					
			Schlag 220	Schlag 500	Schlag 1000	Schlag 3000	Schlag 4500	Schlag 5500
6	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	4	0,8	0,6	0,8	0,6	0,4	1,4	1,4
8	8	1,6	1,4	1,4	1,4	1,2	2,4	2,6
9	12	2,3	2,4	3,0	2,6	2,4	3,8	3,8
10	18	3,5	3,8	4,6	3,6	4,2	5,8	5,8

Tabelle 2: Theoretische und gemessene Laufzeit der Geschwindigkeit [8]

Messebene	von Punkt	bis Punkt	Länge [m]	theoretische Zeit [ms]	gemessene Zeit [ms]
3	1	3	94,6	18,5	19,0
	1	5	109,0	21,3	21,2
	3	5	14,2	2,7	2,0
11	1	5	109,0	21,3	21,0
3 bis 11	1	1	46,0	9,0	9,4

Die Ergebnisse der Laufzeiten sind in Tabelle 2 dargestellt. Eine Übereinstimmung der gemessenen verglichen mit der theoretischen Laufzeit ist zu erkennen. Eine Unversehrtheit der Aufnehmer dieser Messebenen zum betrachteten Rammschlag kann daher angenommen werden.

Die weiteren Auswertungen über das Verhalten des Monopiles während der Rammung werden zurzeit durchgeführt und an geeigneter Stelle veröffentlicht.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde in diesem Beitrag aufgezeigt, welche anspruchsvollen Anforderungen an die einzusetzende Geomesstechnik bei Offshore-Bauwerken bestehen, und wie diese bewältigt werden können.

Die ersten Auswertungen ergeben bisher ein der Fachwelt bekanntes und erwartetes Verhalten eines Großrohres bei der Rammung in dicht gelagerten Sanden. Vertiefende Auswertungen hinsichtlich der möglichen Optimierungsmaßnahmen beim Rammschlag oder der Fragestellung hinsichtlich des Verhaltens des Rohres zu einer möglichen Pfopfenbildung folgen.

Durch Schlechtwetterunterbrechungen kam es nach der Rammung des Monopiles Ende Juli 2008 nicht mehr zu dem geplanten Aufsetzen des Transition Pieces, dem Übergangsstück zwischen Monopile und Plattformenschaft. Dieses wäre aber die Voraussetzung gewesen, um die dauerhafte Messanlage zu installieren und betreiben zu können. Voraussichtlich wird der Bau der FINO³ im Juni 2009 fortgesetzt, so dass dann nach Fertigstellung der Plattform mit den Langzeitmessungen begonnen werden kann.

Für die bisherige Unterstützung und Zusammenarbeit bei dem Forschungsvorhaben FINO³ gilt unserer Dank der Forschungs- und Entwicklungszentrum Fachhochschule Kiel GmbH, der EEW Special Pipe Construction GmbH Rostock und dem Generalunternehmer Ed. Züblin AG (Direktion Nord, Ingenieurbau Hamburg).

7 Literatur

- [1] Berndt, U.: Geotechnisches Messkonzept zur Bestimmung der Monopile/Boden-Interaktion bei der Forschungsplattform FINO3, Diplomarbeit am IGB-TUBS, unveröffentlicht (2008)
- [2] Berndt, U.; Bruns, B.; Gattermann, J.; Stahlmann, J.: Erfolgreicher Einsatz der GEMSOGS bei der Rammung des Monopiles von FINO3, Messen in der Geotechnik 2008, 23.-24.10.2008 in Braunschweig, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 87, S. 255-274 (2008)
- [3] Forschungs- und Entwicklungszentrum Fachhochschule Kiel GmbH: Prospekt FINO³, Eigenverlag (2008)
- [4] Gattermann, J.; Berndt, U.; Bruns, B.; Fischer, J.; Zahlmann, J.; Stahlmann, J.: Ramm-begleitende Messung des Monopiles von FINO³, Pfahl-Symposium 2009, Fachseminar am 19./20.02.09 in Braunschweig, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 88 S. 277-302 (2009)
- [5] Gattermann, J.; Bruns, B.; Fritsch, M.: FINO3 – Geotechnische Messungen am Monopile, Pfahl-Symposium 2007, Fachseminar am 22./23.02.07 in Braunschweig, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 84, S. 207-223 (2007)
- [6] Gattermann, J.; Berndt, U.; Bruns, B.; Stahlmann, J.; Bachmann, J.: FINO3 - Geotechnische in situ Messungen und ergänzende Modellversuche zu Grenzzustandsbetrachtungen für die Gründung von Offshore-Windenergieanlagen, Tagungsband des 6. Kolloquium 'Bauen in Boden und Fels', Technische Akademie Esslingen, 22.-23.01.2008, ISBN 3-924813-71-X, S. 513-524 (2008)
- [7] Stahlmann, J.; Gattermann, J.; Kluge, K.: FINO3 – Forschungsansätze für Offshore Windenergieanlagen, Pfahl-Symposium 2007, Fachseminar am 22./23.02.07 in Braunschweig, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 84, S. 225-246 (2007)
- [8] Zahlmann, J.: Untersuchungen zur Wellenausbreitung während der Rammung des Monopiles der Offshore-Forschungsplattform FINO³, Diplomarbeit am IGB-TUBS, unveröffentlicht (2008)

