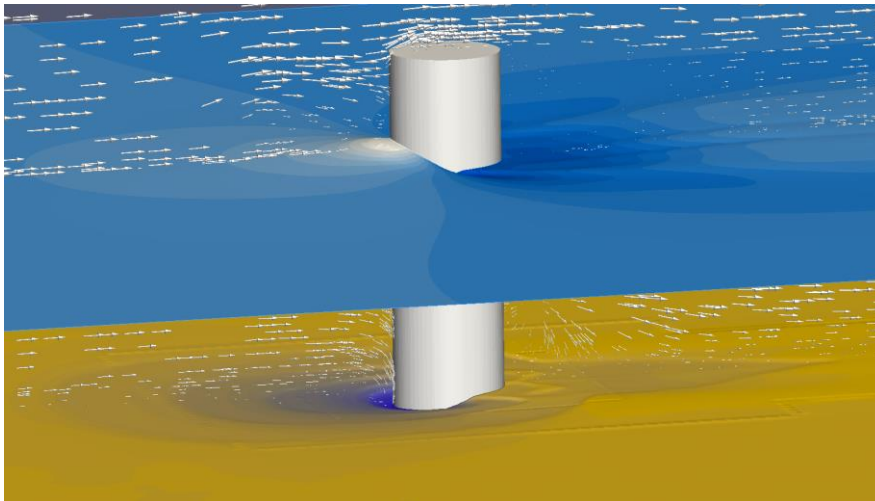


Simulation von Auskolkungsvorgängen an den Gründungsstrukturen von FINO 3 und FINO 1



Abschlussbericht

Kiel, 30.1.2018

Dr.-Ing. K. Graf, M. Eng. J. Meyer, M. Eng. U. Bruchmann



Forschungs- und Entwicklungszentrum der FH Kiel GmbH
Schwentinestraße 24, 24149 Kiel

Kurzfassung

Der hier vorliegende Bericht beschreibt Inhalte und Ergebnisse der vom *F&E-Zentrum der FH Kiel GmbH* durchgeführten Studie „Simulation von Auskolkungsvorgängen an den Gründungsstrukturen von FINO1 und FINO3“. Als Auskolkung wird das Auswaschen des Meeresbodens im unmittelbaren Nahbereich der Pfahlgründungen von Offshore-Bauwerken bezeichnet. Auskolkung am Meeresboden reduziert die Standfestigkeit der betroffenen Offshore-Bauwerke. Um ihr zu begegnen, werden üblicherweise Pfahlgründungen tiefer verankert (gerammt) und/oder es wird ein Kolkenschutz appliziert. Beide Maßnahmen sind erhebliche Kostentreiber bei der Errichtung von Offshore-Bauwerken. Es ist daher von Interesse, den Umfang der Auskolkung genauer als bisher vorherzusagen. Diesem Thema widmet sich die hier beschriebene Studie.

Die Untersuchungsmethode der Studie basiert zum einen auf einer Auswertung vorliegender Kolkmessungen der Forschungsplattformen FINO1 und FINO3. Zum zweiten wurden Simulationsverfahren entwickelt und angewendet, mit denen das Phänomen der Auskolkung rechnerisch nachvollzogen wird. Diese Simulationen gliedern sich im Wesentlichen in zwei Teilbereiche: Ermittlung der Kolkursachen und Ermittlung des Umfanges der Auskolkung. Die oben erwähnten Kolkvermessungen dienen in diesem Zusammenhang als Validierung der rechnerischen Ansätze.

Als Ergebnis der Untersuchung der Kolkursachen konnte ermittelt werden, dass Kolk durch eine Mischung aus stationärer Strömung und Seegang verursacht wird. Kolk verursachender Seegang konnte eindeutig identifiziert und quantifiziert werden. Es wurde gezeigt, warum an der FINO 1 - Plattform erheblicher Kolk auftritt, an der FINO 3 jedoch nicht. Es wurde zudem allgemein gezeigt, dass das Risiko der Auskolkung mit zunehmendem Pfahldurchmesser abnimmt.

Die Simulation des Auskolkungsvorganges verlangte die Implementation eines neuen, komplexen Simulationsverfahrens und es wurden hier nicht alle gesteckten Ziele erreicht. Es wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem der für die Auskolkung ursächliche Transport von Bodensediment beschrieben werden kann. Der Aufwand hierfür ist jedoch erheblich. Er verlangte die Implementation dedizierter numerischer Ansätze, die mittels des Frameworks *OpenFOAM* umgesetzt wurden. Auch mit einem leistungsstarken Compute-Cluster sind die erforderlichen Rechenzeiten erheblich. Mit diesem Verfahren konnte erfolgreich die Auskolkung von Monopile-Pfahlgründungen nachvollzogen werden. Auskolkungsphänomene an komplexeren Pfahlgründungen wie die der Jacket-Plattform FINO 1 jedoch sind wegen des erheblichen Aufwandes im Rahmen dieser Studie nicht zum Abschluss gebracht worden.

Kiel, 30.1.2018, K. Graf

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Problemstellung	1
2	Technische Voraussetzungen.....	3
3	Messwerterfassung & Auswertung.....	4
	3.1 Messwerterfassung	4
	3.2 Ergebnis	11
	3.2.1 FINO 1	11
	3.2.2 FINO 3	19
	3.3 Meeresbodenvermessung FINO 1.....	22
4	Korrosions-Monitoring.....	25
	4.1 Einleitung.....	25
	4.2 Monitoring.....	26
	4.2.1 Intrusive Verfahren.....	26
	4.2.2 Elektrochemische Verfahren.....	27
	4.2.3 Physikalische Verfahren	27
	4.3 Monitoring auf FINO3	28
	4.3.1 KKS-Fremdstromanlage	28
	4.3.2 Geräte zur Untersuchung einflussnehmender Faktoren	31
	4.4 Messdaten.....	32
	4.4.1 Potentialmessung 2016/2017	33
	4.5 Unterschiede und Entwicklungen der Messungen 2016 gegenüber 2014 ...	35
	4.5.1 Messreihen der Multiparametersonde	38
5	Simulation von Auskolkungsvorgängen	41
	5.1 Theoretische Grundlagen	41
	5.2 Simulation von Kolkursachen.....	44
	5.2.1 Grundlagen.....	44
	5.2.2 Simulationsmodell für die Plattform FINO 1	46
	5.2.3 Ergebnisse.....	49
	5.2.4 Zusammenfassung.....	59
	5.3 Simulation von Kolkvorgängen	59
	5.3.1 Ansatz 2: SedFoam.....	61
	5.3.2 Entwicklung eines eigenen Simulationskonzepts.....	64
	5.3.3 Simulationsergebnisse des neu entwickelten Verfahrens	70
	5.3.4 Bewertung des Simulationsverfahrens	75
6	Aktivitäten	77
7	Zusammenfassung & Ausblick	79
8	Literaturverzeichnis.....	81

1 Motivation und Problemstellung

Als Auskolkung bei maritimen Bauwerken wie Offshore-Windenergieanlagen bezeichnet man die Erosion von Sediment am Gewässerboden im Nahbereich der Gründungsstrukturen. Abbildung 1 zeigt beispielhaft Kolkbildung an einem Offshore Monopile. Um sicherzustellen, dass Auskolkung die Standsicherheit von Offshore-Bauwerken nicht schwächt, ist die Rammtiefe der Gründungspfähle entsprechend zu erhöhen oder ein Kolkenschutz zu applizieren. Da beide Maßnahmen mit erheblichen Kosten verbunden sind, ist eine Vorhersage, ob und in welchem Umfang Auskolkung zu erwarten ist, von großem Interesse. So liegen die Kosten für das Fundament einer Offshore Windenergieanlage nach James und Ros (2015) bei knapp 30% der Investitionsausgaben der Gesamtanlage. Einsparungen wirken sich daher direkt auf die gesamten Investitionsausgaben aus. Derzeit genutzte Kolk-Prognose-Ansätze beruhen auf einfachen Formeln und sorgen größtenteils für eine erhebliche Überdimensionierung der Gründungsstruktur. So ist die vorhergesagte Kolktiefe an der FINO 3 Plattform mit empirischen Formel zwischen 2.68 m bis 11.88 m Tiefe berechnet, während sich während des Betriebs ergibt, dass kein Kolk entsteht.

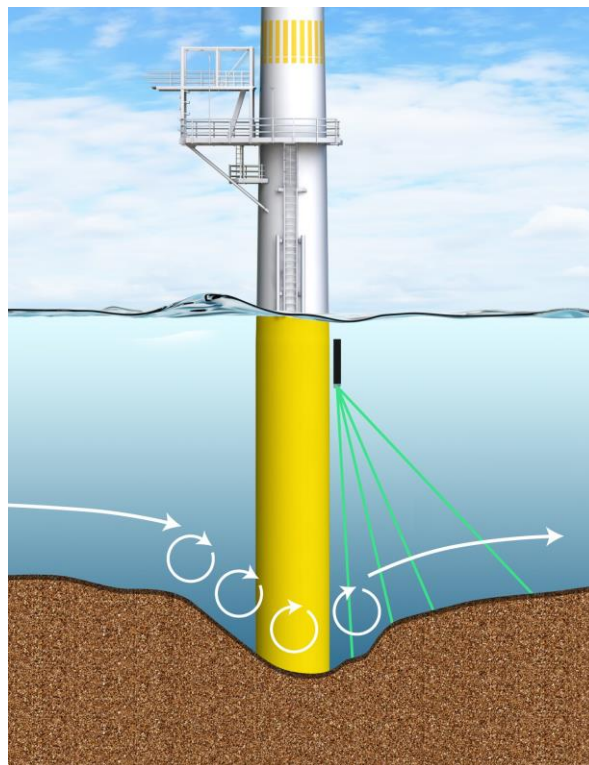


Abbildung 1: Kolkbildung an einer Offshore Gründungsstruktur nach Nortek AS (2016)

Die empirischen Formeln basieren dabei bisher vor allem auf Untersuchungen unter Laborbedingungen im Modellmaßstab für Bauwerke in strömenden Gewässern. Wegen der hohen Kosten und der begrenzten Aussagefähigkeit von Experimenten hat man in den letzten Jahren begonnen, erste Verfahren zur rechnerischen Simulation von Kolkvorgängen zu entwickeln.

Numerische Simulationsverfahren werden allgemein in der Strömungsmechanik zunehmend als Alternative zum Experiment eingesetzt. Für die Simulation von Sedimentbewegungen gibt es bislang allerdings erst wenige akademische Ansätze. Sie eignen sich nur bedingt für praktische Anwendung unter realen Strömungsbedingungen und mit realen Bauwerken. Es existiert somit noch kein wirtschaftlich nutzbares Gesamtkonzept mit ausreichender Genauigkeit bei akzeptablem Rechenaufwand. Auch fehlen belastbare Auskolkungsvermessungen an realen Bauwerken, die der Validierung von Simulationen dienen.

Die hier dokumentierte Studie hat zum Ziel, diese Defizite zu beheben. Es wurde ein numerisches Verfahren entwickelt, mit dem es möglich ist, die Auskolkungsvorgänge an den Plattformen FINO 1 und FINO 3 zu untersuchen und rechnerisch nachzuvollziehen. Mit den Ergebnissen umfassender Kolkvermessungen an den genannten Plattformen sollen die Simulationsergebnisse validiert werden.

Der vorliegende Bericht ist so aufgeteilt, dass er zunächst die Messwerverfassung von Kolk-, Strom- und Seegangdaten behandelt. Es wird beschrieben, welche Messdaten vorliegen, wie diese zu relevanten Informationen verarbeitet werden und welche Ergebnisse sich daraus ergeben. Anschließend wird vorgestellt, wie, basierend auf bestehenden Software-Lösungen, die Simulationsumgebung für Bauwerke im Seegang implementiert wurde. Zunächst werden damit Untersuchungen zu den Kolkursachen durchgeführt. Im nächsten Schritt wird beschrieben, wie die zusätzlichen Sedimentbewegungen in die Simulationsumgebung implementiert wurde und schließlich werden Untersuchungen für die komplexen Kolkvorgänge durchgeführt.

Der hier vorliegende Bericht ist ein Tätigkeits- und Ergebnisbericht. Zwei weitere wissenschaftliche Publikationen sind aus dieser Studie hervorgegangen, die in einschlägigen wissenschaftlichen Journalen publiziert sind bzw. deren Publikation in Vorbereitung (im Peer-Review-Prozess) ist.

2 Technische Voraussetzungen

Wesentliche Inhalte dieser Studie bestehen in der Durchführung von Strömungssimulationen. Hierzu bedarf es einer leistungsstarken Rechnerumgebung, einem sogenannten *Computational Environment*. Für die vorliegende Studie wurde dazu ein Compute-Cluster erweitert und Workstations beschafft, dies teilweise aus Mitteln des vorliegenden Förderprojektes.

Die für die Simulationen verwendete Software basiert auf dem OpenFOAM-Framework (Open Source Field Operation And Manipulation). OpenFOAM ist ein in C++ geschriebenes und unter der GNU General Public License (GNU GPL) veröffentlichtes System zur Manipulation von Feldern und zur Lösung von Feldproblemen in Kontinua. OpenFOAM wird in der akademischen Welt wie auch in der Industrie gern für Strömungssimulationen eingesetzt. Für die vorliegende Studie lag der besondere Vorteil von OpenFOAM darin, dass dieses System erweiterbar ist und somit eigene Algorithmen implementiert werden können. Dies war im vorliegenden Fall notwendig, da fertige Programmpakete, mit denen Strömungssimulationen unter Berücksichtigung von Kolk nicht marktverfügbar sind und daher selbst entwickelt werden müssen.

Für die Vorbereitung (*engl. preprocessing*) der Simulationsmodelle wird ein sogenannter Gittergenerator benötigt. Als Gittergenerator wurden verschiedene Programme getestet und schließlich der ANSA Pre-Processor eingesetzt, ein Programmsystem, das in der maritimen Technologie recht unbekannt, im Automobilbau aber weit verbreitet ist.

Als Compute-Cluster wurde ein Verbund von acht bis zwölf Rechnern mit insgesamt etwa 150 Cores eingesetzt. Es wurde speziell für die vorliegende Studie mit einem schnellen Rechner-Interconnect ausgerüstet (Infiniband). Das Ergebnis ist ein hocheffizienter Rechnerverbund, der auch die geplanten aufwendigen Berechnungen in akzeptabler Zeit durchführen kann.

Für die Messkampagnen auf den Plattformen FINO 1 und FINO 3 konnte im Wesentlichen auf dort vorhandene Mess-Sensorik zurückgegriffen werden (Strom-, Seegang- und Kolkensoren). Lediglich für eine Fernfeld-Bodenvermessung wurde ein neues Multi Beam Echolot (WASSP S3i) verwendet, das aus Projektmitteln beschafft wurde. Die Fernfeld-Messungen sind notwendig, um Kolk, der sich in einiger Entfernung von der Pfahlgründung eingestellt hat, zu vermessen. Für die Simulation des Sedimenttransportes werden aktuelle Tiefendaten unter der gesamten Plattform und in einem Umkreis von etwa 50m um die Plattform zumindest als Eingangsdatensatz benötigt.

3 Messwerterfassung & Auswertung

Die Messwerterfassung und Auswertung von Kolk- und Seegangsdaten und die Untersuchung potentieller Zusammenhänge zwischen beiden ist eine zentrale Aufgabe im vorliegenden Projekt. Der zentrale Unterschied zu der Erfassung und Auswertung bisheriger Felddaten im Bereich Kolk, wie beispielsweise für Fundamente von Offshore Windkraftanlagen in Whitehouse, Harris, Sutherland und Rees (2008), besteht darin, dass nicht nur die langfristige Veränderung der Kolkentiefe durch gelegentliche Messungen, sondern auch die kurzfristigen Veränderungen im Viertelstundentakt durch eine kontinuierliche Datenerfassung abgedeckt sind. Außerdem liegt eine dreidimensionale Abtastung des Meeresbodens mit Hilfe eines Multi Beam Echolotes vor, das es ermöglicht einen Eindruck der Kolkbildung außerhalb der Sensoren Reichweite zu gewinnen.

3.1 Messwerterfassung

Die Messwerte werden an den Strukturen der FINO 1 und FINO 3 Plattformen in der Nordsee erfasst. FINO 3 befindet sich ca. 80 Kilometer westlich vor der Insel Sylt und steht in 22 Meter Wassertiefe auf einem einzelnen Pfahl, einem sogenannten Monopile. FINO 1 liegt ca. 45 Kilometer nördlich von Borkum und ist auf einer Fachwerksstruktur mit vier Rammpfählen, dem sogenannten Jacket, auf dem 30 Meter tiefen Meeresgrund verankert. Tabelle 1 enthält einen Überblick über die wichtigsten Plattformdaten und die grundsätzliche zeitliche Datenverfügbarkeit der wichtigsten Messdaten. Während des Messwerterfassungszeitraumes gibt es allerdings Ausfälle der einzelnen Systeme, die in dieser Tabelle nicht explizit erwähnt sind.

Tabelle 1: FINO Plattformen

	FINO 1	FINO 3
Koordinaten	N 54° 00' O 6°35'	N55° 11,7' O 7° 09,5'
Gründungsstruktur	Fachwerk	Monopile
Meeresgrund	Feiner Sand	Feiner Sand
Wassertiefe	30m	22m
In Betrieb seit	Oktober 2003	September 2009
Wellenerhebungsdaten*	10/2014 – 03/2017	07/2015 – 09/2016
Kolkdaten*	10/2014 – 07/2017	07/2012 – 07/2017
* = Datenlücken vorhanden		

Die Datenerfassung gliedert sich in zwei Hauptgruppen von Daten: Kolkdaten und Seegang- und Stromdaten. Die Erfassung in ein System, das vom *Forschungs- und Entwicklungszentrum der FH Kiel GmbH (FEZ)*, dem Förderungsempfänger dieser Studie, betrieben wird, und ein zweites System des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH). Abbildung 2 gibt einen Überblick über die Messsysteme der beiden FINO Plattformen. Sowohl die Systeme des BSH als auch die Systeme des FEZ sind bei Projektbeginn bereits installiert und liefern Daten, die im Rahmen der Verfügbarkeit uneingeschränkt genutzt werden können.

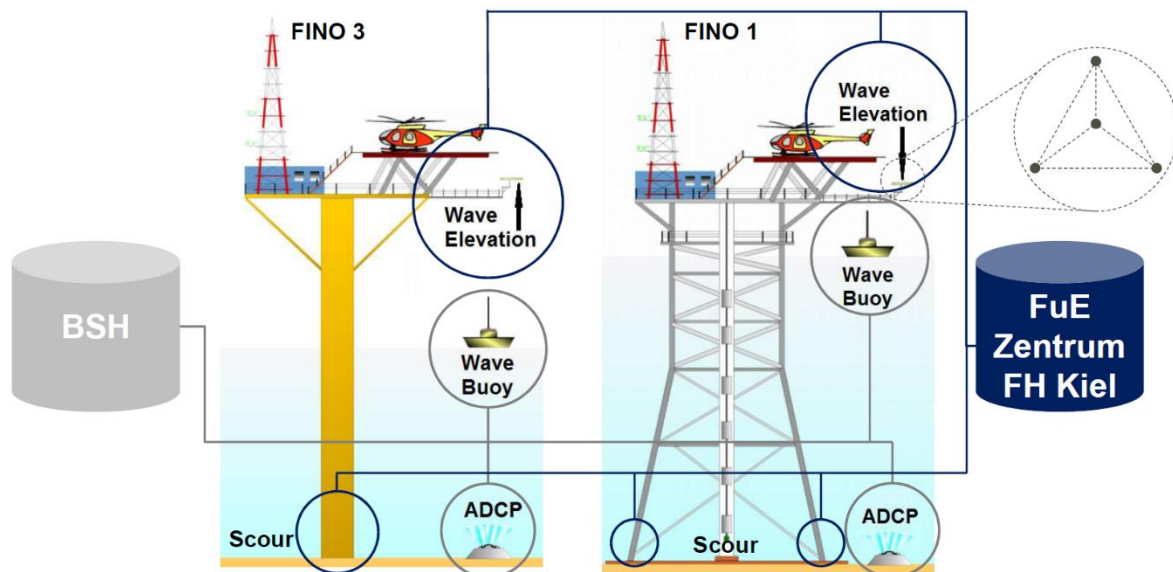


Abbildung 2: Datenerfassung von BSH und FEZ

Das BSH erfasst Seegangsdaten mit jeweils einer Seegangsboje und einem Ultraschall-Doppler-Profil-Strömungsmesser (ADCP) in direkter Umgebung zu den beiden FINO Plattformen. Beide Systeme liefern Daten über die Wellenhöhe, Wellenperiode und Wellenrichtung. Zusätzlich liefert der ADCP noch Daten zur Strömungsrichtung bzw. Strömungsgeschwindigkeit in Tiefenabständen von zwei Metern zwischen Meeresboden und Wasseroberfläche. Die Daten werden an eine Datenbank des BSH weitergegeben und sind während der Projektphase in vorverarbeiteter Form für die Projektbeteiligten in einer zugangsgeschützten Online Datenbank verfügbar. Für die Auswertung werden die nachfolgenden Parameter genutzt:

- Signifikante Wellenhöhe in 30 bzw. 60 Minuten Mittelwerten
- Wellenperiode als größte Periode während 30 bzw. 60 Minuten
- Wellenrichtung in 30 bzw. 60 Minuten Mittelwerten
- Strömungsgeschwindigkeit in drei Tiefen (Bodennah, Mitte der Wassersäule, Oberflächennah)

- Strömungsrichtung in drei Tiefen (Bodennah, Mitte der Wassersäule, Oberflächennah)

Direkt auf den beiden Plattformen, installiert vom FEZ, sind Sensoren sowohl für Seegangdaten als auch Kolkdaten. Die Kolkentiefe wird direkt mit vom FEZ entwickelten Echoloten unter Wasser alle 15 Minuten mit einer Auflösung von 0.1 Meter erfasst. An FINO 3 geschieht dies mit acht Sensoren rund um den Monopile, die sich in einem halben Meter Abstand vom Pfahl und zwei Meter oberhalb des ursprünglichen Meeresbodens befinden. An FINO 1 wird die Kolkentiefe seit Oktober 2014 mit vier Sensoren am südlichen Bein der Plattform ermittelt, während seit Sommer 2016 jeweils zwei weitere Sensoren an dem nördlichen und östlichen Bein installiert sind. Abbildung 3 zeigt die Sensorpositionen an der FINO 1 Plattform. Die Sensoren sind jeweils in unmittelbarer Nähe des ursprünglichen Meeresbodens direkt an der Struktur angebracht.

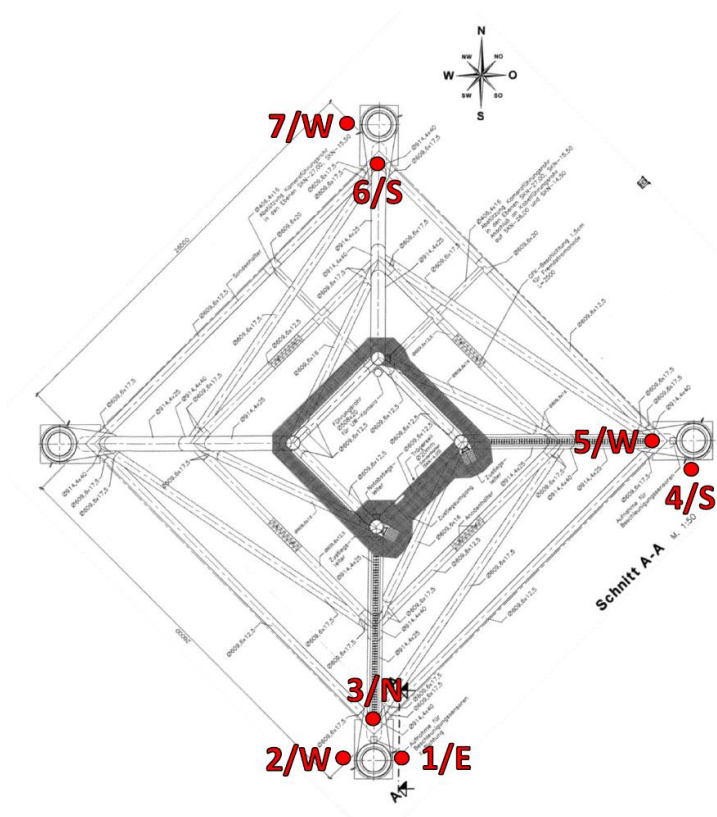


Abbildung 3: Kolkensoren an FINO 1

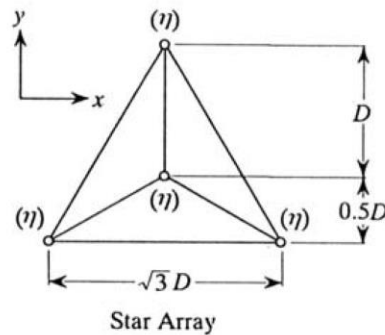


Abbildung 4: Sternanordnung zur Messung der Wellenerhebung mit Distanz D

Der Seegang wird mit vier Radarsensoren gemessen, die sich, wie in Abbildung 2 (siehe Wave Elevation, englisch für Wellenerhebung) zu sehen, oberhalb der Wasseroberfläche auf der begehbaren Plattform befinden. Die Sensoren sind, wie exemplarisch in Abbildung 4 dargestellt, in einem sternförmigen Sensorarray mit einer Distanz D von ca. 3.65m angeordnet. Sie messen im Wesentlichen den momentanen Abstand zur Wasseroberfläche hochauflösend mit einer Abtastrate von 1.5 Hertz ($T = 0.66s$). Sensoren, die mit hohen Abtastraten Seegang über einen langen Zeitraum erheben, sind selten, für die vorliegende Studie aber von besonderem Wert. Denn anders als bei den BSH-Wellendaten werden diese hochauflösenden Wellenerhebungsdaten dazu verwendet, sowohl das Seegangshöhen-Spektrum als auch das Richtungsspektrum zu ermitteln. Aus den hochauflösenden Daten des Sensorfeldes werden anschließend folgende Informationen gewonnen:

- Signifikante Wellenhöhe in 10 Minuten Mittelwerten
- Gezeitenverlauf
- Wellenaufrichtung
- Frequenzspektrum oder Spektraldichte
- Richtungsspektrum

Für die Berechnung der oben genannten Parameter wurde im Rahmen dieser Studie ein Software Tool basierend auf MathWorks® MATLAB entwickelt (Bruchmann (2016)).

Im ersten Schritt werden dabei die Rohdaten bereinigt:

- Beseitigung von Ausreißern mit einer sogenannten Hampel Filtermethode
- Beseitigung von Gezeiteinflüssen mit einem Fourier Filter für niedrige Frequenzen
- Überführen der zeitlich minimal abweichenden Signale der einzelnen Sensoren zu einer absolut äquidistanten Abtastrate von 2 Hertz ($T = 0.5s$) mit Hilfe eines kubisch hermetischen Splines als Interpolation

Die signifikante Wellenhöhe wird anschließend über den Mittelwert der ein Drittel größten Wellen im Zeitintervall von 10 Minuten berechnet. Zur Bestimmung der Wellenaufrichtung wird zunächst das Frequenzspektrum (oder auch die Spektraldichte) des Seeganges durch eine schnelle Fourier Transformation (FFT) bestimmt. Die FFT ordnet jeder Frequenz des Seeganges eine Dichte bzw. Amplitude zu. Die Wellenaufrichtung und die Phasenverschiebung wird anschließend mittels der geometrischen Anordnung der Sensoren berechnet. Da die Wellenaufrichtung nur eine Richtung für den gesamten Seegang ergibt, wurde zusätzlich noch ein Verfahren zur Bestimmung des Richtungsspektrums nach Benoit, Frigaard und Schäfer (1997), Goda (2000) bzw. Hauser (2005) implementiert. Dabei wurde auf eine bereits bestehende und frei verfügbare Datenbank für MATLAB, entwickelt von dem *Centre for Water Research at the University of Western Australia* nach Johnson (2002), zurückgegriffen. Der Quellcode wurde ausführlich analysiert, angepasst und in das Softwaretool integriert.

Die Benutzerschnittstelle des Softwaretools besteht aus einer einfachen grafischen Oberfläche (GUI), die eine Auswahl der Plattform und des Datums zur Datenanalyse ermöglicht, Abbildung 5. Die Gründe für die Auswahl von jeweils einem Datum plus bzw. minus einen Tag, werden in Kapitel 3.2.1 erläutert.

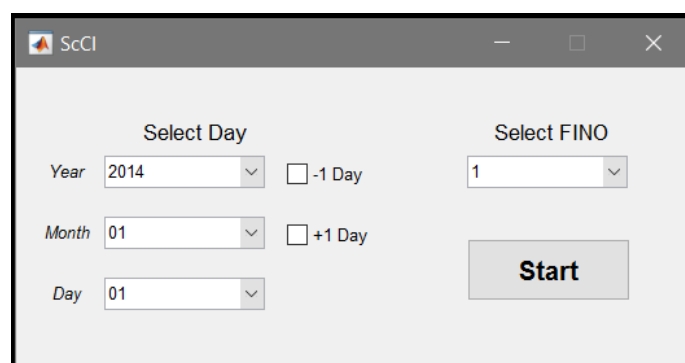


Abbildung 5: GUI des Software Tools

Das Auswerteverfahren greift auf die Datenbank der erhobenen Messdaten der Plattformen zu und extrahiert diese für den angegebenen Zeitraum. Das Ergebnis sind drei separate Diagramme. Im ersten, siehe Abbildung 6, erscheint das Frequenzspektrum und das Richtungsspektrum. Im zweiten Fenster, siehe Abbildung 7, werden Zeitreihenverläufe der Strömungsgeschwindigkeit, Strömungsrichtung, Kolkentiefe, signifikante Wellenhöhe und der Gezeitenverlauf gezeigt. Das dritte Fenster, siehe Abbildung 8, enthält zusammenfassend Parameter zum direkten Vergleich zu anderen Zeitintervallen. Zusätzlich zu den bisher genannten Parametern werden hier noch die Keulegan Carpenter Zahl (KC), die Kolkveränderung (*Scour Change* - SC_{change})

und die Kolkspannweite (*Scour Change Spread* - SC_{spread}) berechnet. Die Keulegan Carpenter Zahl beschreibt das Verhältnis zwischen der Amplitude der ungestörten Strömungsgeschwindigkeit (U) multipliziert mit der Wellenperiode (T) und dem Kehrwert einer charakteristischen Länge des umströmten Objektes (L):

$$KC = \frac{U * T}{L}$$

Nach Untersuchungen von Sumer und Fredsøe (2002) entsteht Kolk in Strömung und Wellen nur, wenn die Keulegan Carpenter Zahl (KC) größer als sechs ist, $KC > 6$. Die Effekte die zu diesem Ergebnis führen, werden in Kapitel 5.2.1 genauer beschrieben.

Die Parameter *Scour Change* und *Scour Change Spread* sind eigens für die Auswertung definiert worden. *Scour Change* beinhaltet im Wesentlichen die Veränderung der Kolktiefe, gemittelt über alle Sensoren, von Anfang bis Ende des untersuchten Zeitintervalls. *Scour Change Spread* bezeichnet die maximale Kolkspannweite, also den Unterschied zwischen der geringsten und der maximalsten Kolktiefe in dem jeweiligen Zeitintervall.

Stehen einzelne vom FEZ aufgezeichnete Daten durch Systemausfälle nicht zur Verfügung, werden diese bestmöglich durch Daten des BSH Systems ersetzt. Die Kolkdaten sind jedoch essentiell für eine Auswertung. Bei Ausfall des Wellenerhebungsradars kann lediglich auf Wellenrichtungs- und Wellenhöhendaten der Boje bzw. des ADCP zurückgegriffen werden.

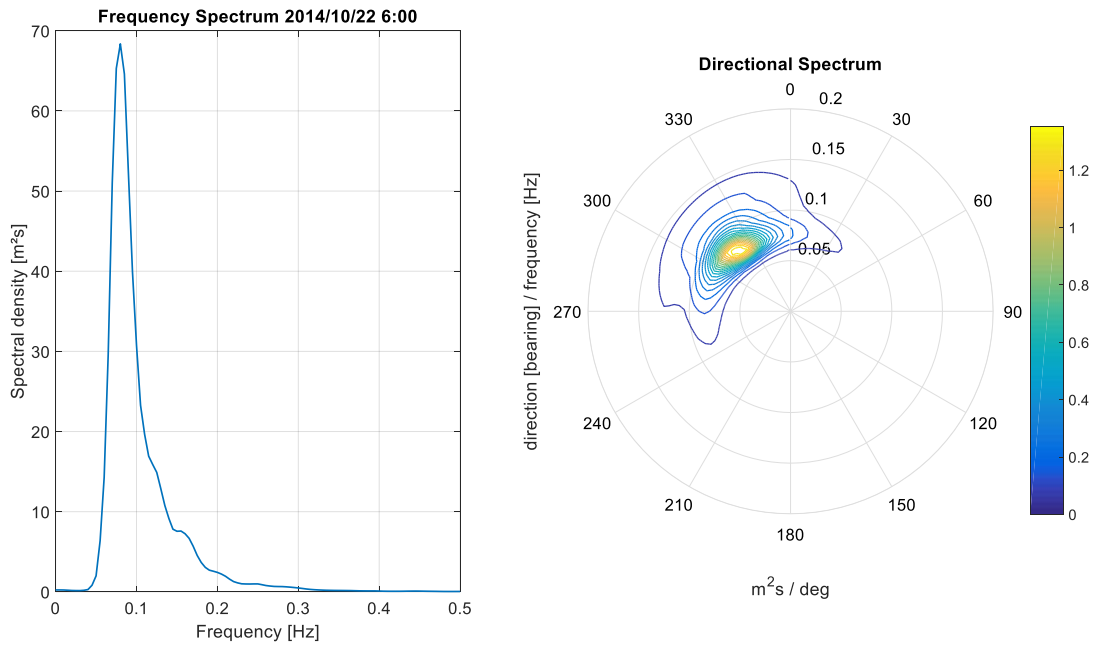


Abbildung 6: Spektralinformationen

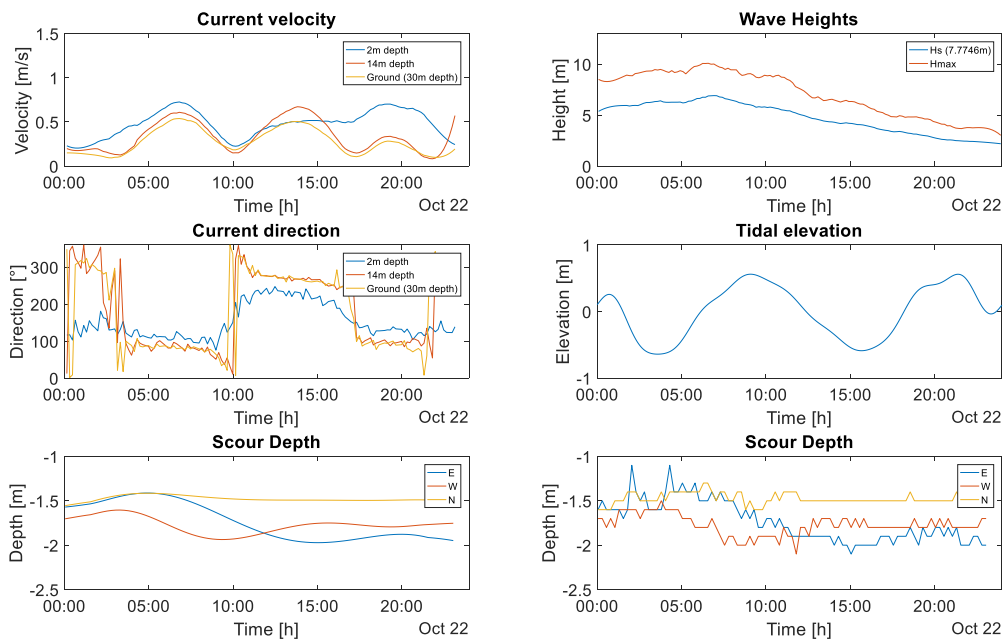


Abbildung 7: Zeitreiheninformationen

FINO 1 2014/10/22	Unit	Value
Hs	[m]	7.7746
Hmax	[m]	12.4019
Current near bed velocity	[m/s]	0.5800
Dominant Wave Direction	[°]	320
Peak Wave Frequency	[Hz]	0.0800
Keulegan Carpenter	[-]	20.7222
Keulegan Carpenter wave + current	[-]	19.0131
Ratio of current to wave velocity	[-]	0.1867
Scour Change	[m]	-0.2200
Scour Change Spread	[m]	0.3800
Scour Change East	[m]	-0.3718
Scour Change West	[m]	-0.0669
Scour Change North	[m]	0.0509
Scour Spread East	[m]	0.5589
Scour Spread West	[m]	0.3322
Scour Spread North	[m]	0.1396

Abbildung 8: Vergleichsdaten

Mit Hilfe des entwickelten Softwaretools wurden nach Fertigstellung zunächst die bisher erhobenen Daten ausgewertet. Anschließend wurden die Messdaten zeitnah für jeweils einen Monat, oder bei besonderen Ereignissen (bekanntes Sturmevent) ausgewertet. Jede dieser Auswertungen benötigt, auf Grund der verschiedenen Datenbanken und einer notwendigen Vorbereitung der Daten, etwa einen Arbeitstag pro Monat.

3.2 Ergebnis

3.2.1 FINO 1

Der Blick auf die Langzeitkurve der Kolkentwicklung an FINO 1, siehe Abbildung 9, seit Inbetriebnahme der Plattform im Jahr 2003 zeigt, dass die Kolkentiefe bereits in einer Art Gleichgewicht liegt. Dieses Verhalten ist bereits aus anderen Quellen bekannt und wird in Sumer und Fredsøe (2002, S. 8–9) beschrieben. Zu beachten ist, dass vor Inbetriebnahme der Kolkensoren im Oktober 2014 nur stichprobenartige Kolkiefenmessungen von Tauchern durchgeführt wurden. Der chronologische Verlauf der Kolkentstehung kann daher nicht untersucht werden. Sprunghafte Veränderungen der Kolkentiefe nach Herbst 2014 können dadurch zu erklären sein, dass die Messmethode zwischen Tauchern und den Sensoren unterschiedlich ist. Vor allem messen die Sensoren nur einen Punkt. Es ist durchaus vorstellbar, dass dies nicht der tiefste Punkt eines Kolkloches ist. Wichtig in der Abbildung ist vor allem der

Trendverlauf zwischen Inbetriebnahme der Plattform und Inbetriebnahme der Kolkensoren.

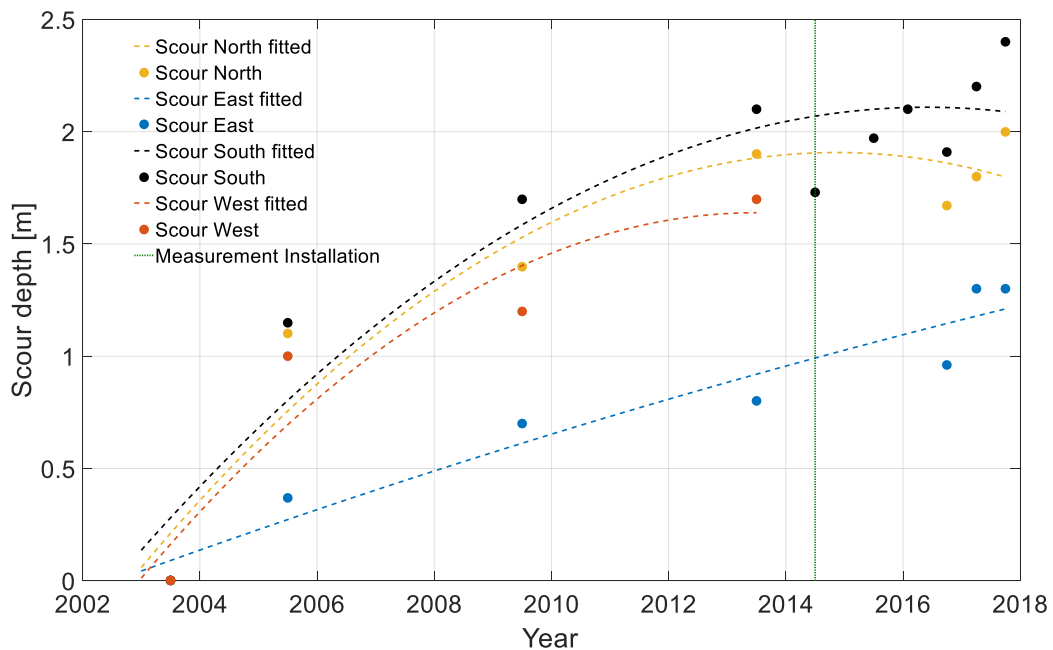


Abbildung 9: Kolkentwicklung an FINO 1

Der Blick auf die Kolkentwicklung im Messzeitraum der Kolkensoren in Abbildung 10 zeigt, dass deutliche Kolkveränderungen nur sporadisch und in kurzen Zeiträumen, innerhalb von ein bis drei Tagen, auftreten. Diese kurzfristigen Veränderungen werden im nachfolgenden als Kolkevent bezeichnet. Stellt man den zeitlichen Verlauf der Kolkentiefe, siehe Abbildung 10, dem zeitlichen Verlauf der signifikanten Wellenhöhe, siehe Abbildung 11, gegenüber, fällt auf, dass die Kolkevents hauptsächlich bei einer erhöhten signifikanten Wellenhöhe, also im Rahmen eines Sturmes, auftreten. Ebenfalls zu sehen ist bereits jetzt, dass die Kolkentiefe während eines Kolkevents nicht immer zunimmt (Erosion), sondern auch durchaus Phasen der Kolkverfüllung (Akkumulation) stattfinden. Zusätzlich treten auch Langzeitphänomene, wie ein Wiederverfüllen des Sedimentes, das sogenannte *Backfilling*, wie in Sumer et al. (2013) beschrieben, auf. Beispielhaft ist dies zwischen April 2015 und September 2015 zu beobachten. Es findet zwar kein Event statt, aber im gesamten Zeitraum vermindert sich die Kolkentiefe um ca.

0.1 – 0.2 Meter. Zu beachten ist in diesem Intervall, dass die Veränderung sehr nah an der Auflösung der Sensoren liegt.

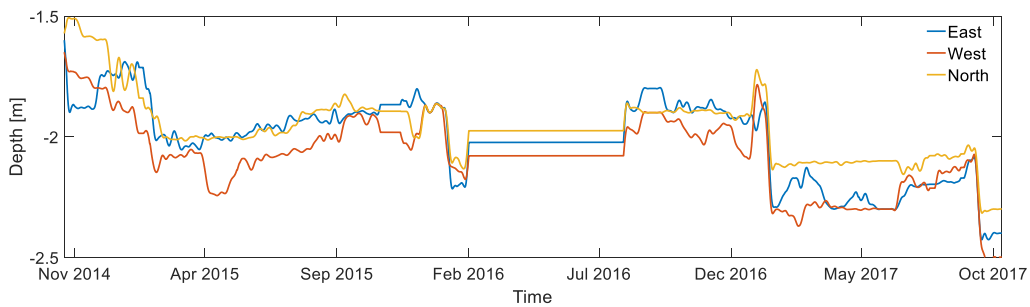


Abbildung 10: Zeitreihe der Kolktiefe im Messzeitraum an FINO 1 (10/2014 – 10/2017)

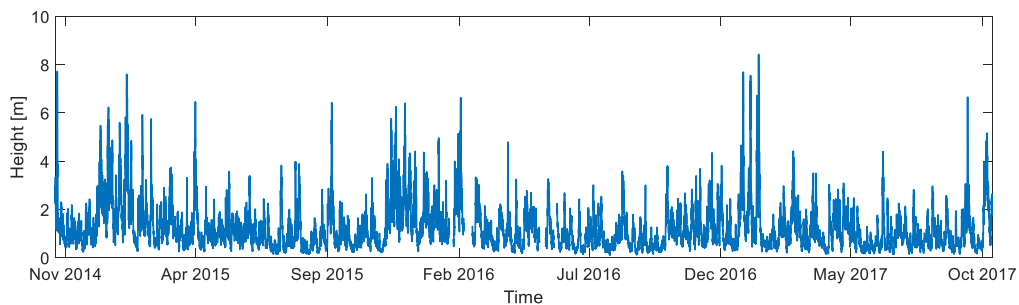


Abbildung 11: Zeitreihe der signifikanten Wellenhöhe an FINO 1 (10/2014 – 10/2017)

Insgesamt ergeben sich im Messzeitraum, zwischen Oktober 2014 und Oktober 2017, 20 solcher Kolkevents. Auf Basis der berechneten Kolkveränderung wurden diese Events, wie in Tabelle 2 ersichtlich, kategorisiert. Es ergeben sich sechs Events mit Sedimenterosion bzw. Kolkbildung, drei Events mit Sedimentakkumulation bzw. Kolkverfüllung und elf Events ohne kategorisierbare Sedimentveränderung.

Tabelle 2: Kategorisierung der Kolkevents

Kategorie	Markierung	SC _{change}
Akkumulation	+	SC _{change} > 0.1
Neutral	± 0	-0.1 < SC _{change} < 0.1
Erosion	-	SC _{change} < -0.1

Vergleicht man alle Kolkevents miteinander fällt auf, dass einige Parameter immer im gleichen Rahmen liegen. Die einzige Ausnahme bildet ein Kolkevent Ende 2014 bei dem am Ostsensor eine Anlagerung von Sediment stattfand. Für alle anderen Events gelten folgende Gemeinsamkeiten:

- Signifikante Wellenhöhe $H_s > 4.8\text{m}$
- Frequenz des Seeganges $f = 0.08 - 0.10\text{ Hz}$
- Periode des Seeganges $T = 10.0 - 12.5\text{ s}$
- Keulegan Carpenter Zahl $KC = 10 - 20 (>6)$
- Wellenaufrichtung = 250° (WSW) – 345° (NW)

Da die Periode bzw. Frequenz des Seeganges sich mit der Wellenhöhe verändert und auch die Keulegan Carpenter Zahl somit auf die Wellenhöhe zurückzuführen ist, lässt sich zusammenfassend feststellen, dass sich die Kolktiefe an FINO 1 im momentanen Zustand nur verändert, wenn die signifikante Wellenhöhe über einem kritischen Wert von ungefähr 4.8m liegt. Die Wellenaufrichtung spielt dabei auch eine entscheidende Rolle, da solch hohe Wellenbedingungen bedingt durch die Lage der Plattform im Prinzip nur bei Richtungen zwischen WSW und NW auftreten können.

Der besondere Kolkevent Ende 2014 liegt in einer längeren Phase von östlichen Winden und Seegang bei einer signifikanten Wellenhöhe von nur rund 2.5 Metern. Es wird davon ausgegangen, dass für diesen Event die gleichen Mechanismen ausschlaggebend sind. Die, für diese Richtung, hohen Wellen treffen direkt auf das sonst wenig betroffene östliche Bein. Bei dieser seltenen Konstellation scheint die kritische Wellenhöhe niedriger zu liegen als bei den normalerweise vorherrschenden westlichen Seegangs Richtungen.

Im nächsten Schritt wurde untersucht wie es dazu kommt, dass Kolkevents bei ganz ähnlichen Parametern einen so unterschiedlichen Ausgang haben. Die Auswertung ergibt, dass zwar die Kolkspannweite mit zunehmender Wellenhöhe im Mittel zunimmt, die Kolkveränderung jedoch keinem einheitlichen Trend folgt. Abbildung 12 zeigt beide Parameter in Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhe. Bei dem Scour Change kann es wie in der Grafik ersichtlich durchaus passieren, dass Events mit ähnlicher signifikanter Wellenhöhe sowohl einen positiven, negativen oder ausgeglichenen Ausgang haben können. Der in der Abbildung grau schraffierte Bereich liegt zwischen - 0.1 und + 0.1 Meter Scour Change und damit in dem Bereich der positiven bzw.

negativen Sensorauflösung. Events in diesem Bereich werden, wie zuvor erwähnt, als neutral kategorisiert.

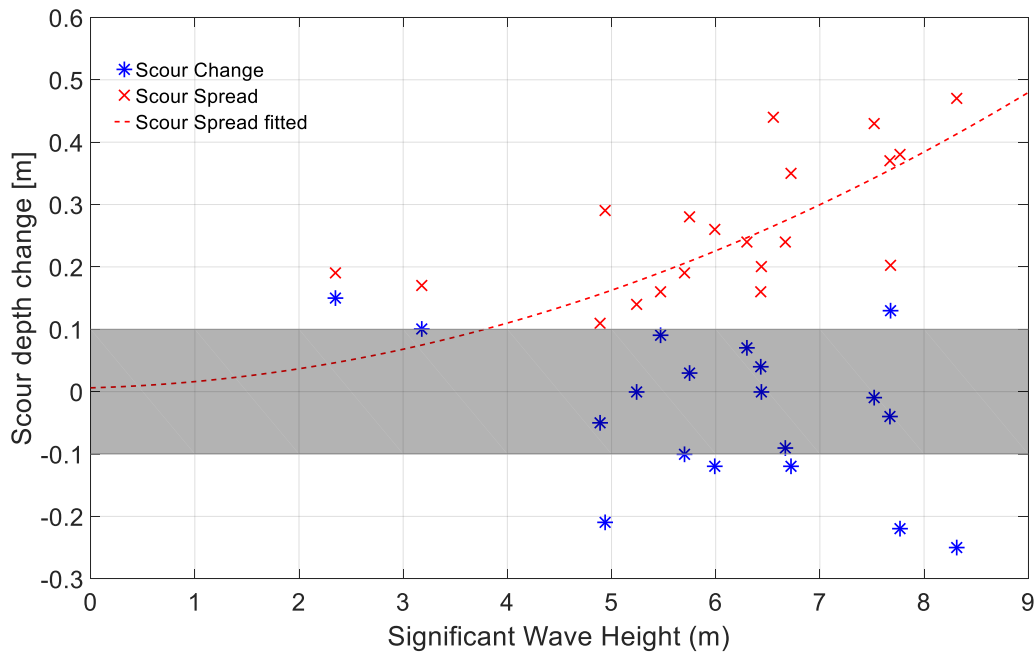


Abbildung 12: Kolkveränderung in Abhängigkeit der Wellenhöhe

Beispielhaft zeigt Abbildung 13 den Kolkverlauf für einen positiv kategorisierten Event, während Abbildung 14 einen deutlich negativ kategorisierten Event zeigt. Abbildung 14 beschreibt den ersten großen Herbststurm des Jahres 2017, „Sebastian“ im September 2017. Beide Events haben signifikante Wellenhöhen von ungefähr 8m bei einer Wellenlaufrichtung zwischen 260° (WSW) und 320° (WNW). Vergleicht man den Kolkverlauf mit der Kurve der Gezeitenveränderung fällt auf, dass die Zunahme bzw. Abnahme der Kolktiefe innerhalb der Events mit etwa der gleichen Periode wie die Tide stattfindet. Das Abflauen bzw. Auflaufen des Wassers im Gezeitenstrom findet um FINO 1 grundsätzlich in West- bzw. Ostrichtung (90° bzw. 270°) statt. Es scheint also, als ob

die momentane Strömungsrichtung, bzw. Strömungsgeschwindigkeit einen Einfluss auf den einzelnen Event hat.

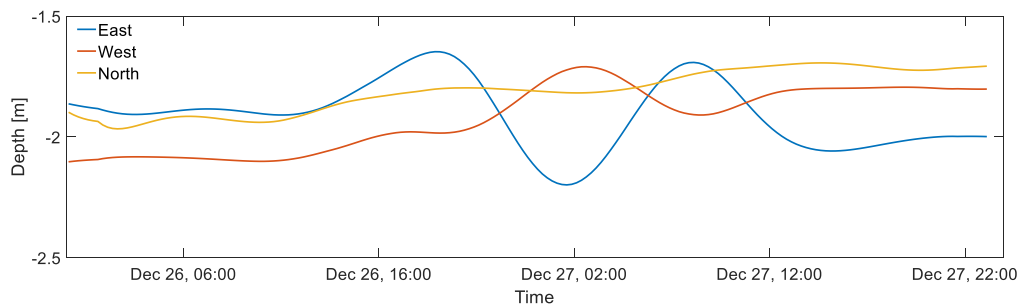


Abbildung 13: Kolkverlauf positiver Event am 26.12.2016

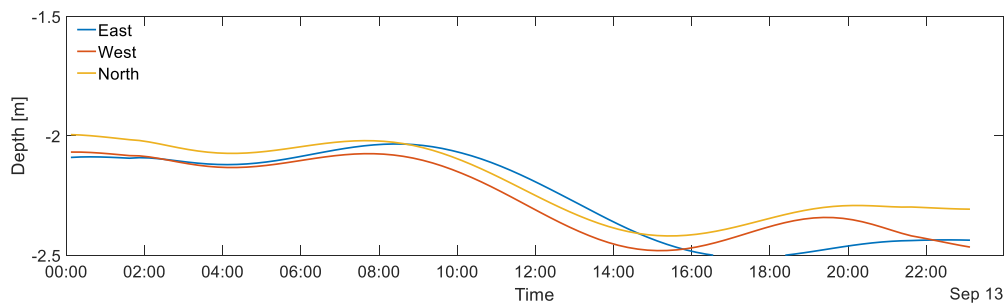


Abbildung 14: Kolkverlauf negativer Event am 13.09.2017, Sturm "Sebastian"

Bei genauerer Betrachtung und Mittelung durch alle aufgetretenen Events ergibt sich, dass die Zunahme bzw. Abnahme der Kolktiefe im Mittel mit der Gezeitenveränderung in Korrelation zu bringen ist. Dabei fällt auch auf, dass diese Korrelation bereits für unterschiedliche Sensoren, in diesem Fall an der Ost- bzw. Westseite des südlichen Beines unterschiedlich ist. Der nördliche Sensor ist grundsätzlich weniger beeinflusst als die anderen beiden Sensoren, was wahrscheinlich daran liegt, dass der Sensor zum einen unter der Struktur und zum anderen doppelt so weit vom Rammpfahl entfernt ist als an den anderen Beinen.

Die Korrelation von Kolkveränderung und Gezeitenveränderung am östlichen und westlichen Sensor ist in Abbildung 15 dargestellt. Die Abbildung basiert darauf, dass während der gesamten gezeigten 24 Stunden die signifikante Wellenhöhe oberhalb des kritischen Wertes von ungefähr 4.8m liegt. Ist dies der Fall, verändert sich das Kolkverhalten periodisch mit den Gezeiten wie dargestellt. Ähnliche Ergebnisse erzielten auch Ricklefs, Ruser und Mayerle (2011), die Kolk an einem Pfahl im norddeutschen Wattenmeer untersucht haben. In Ihrem Abschlussbericht erklären sie, „dass es im Verlauf des Sturmes zu einem Wechsel von Akkumulation und Erosion

kommt.“ (Ricklefs et al., 2011, S. 20). Allerdings ist der Zusammenhang zwischen Gezeiten und Kolk in diesem Fall unterschiedlich.

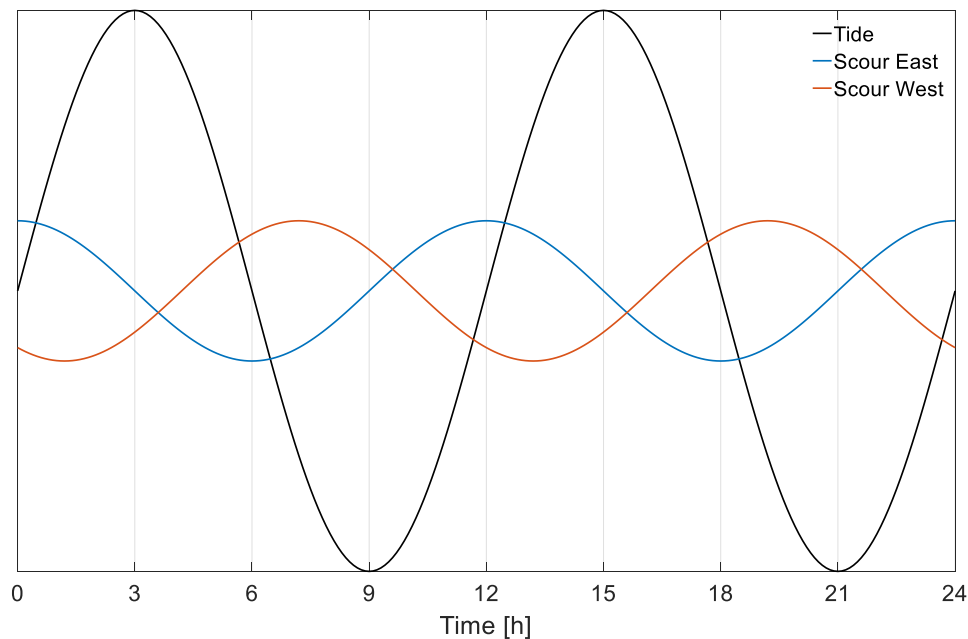


Abbildung 15: Theoretisches Verhalten der Kolkbildung mit einer unendlichen Langen Periode von großen HS

Die Schlussfolgerung aus den gewonnenen Erkenntnissen zu der Messwertauswertung an FINO 1 kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Kolk an FINO 1 ist bereits seit ca. 2010, 7 Jahre nach Inbetriebnahme in einem Gleichgewichtszustand
- Kolkveränderung treten weiterhin auf, allerdings nur im Rahmen von Stürmen mit einer signifikanten Wellenhöhe über 4.8 Metern
- Die Kolkspannweite innerhalb eines Sturmes ist proportional zur signifikanten Wellenhöhe
- Die Kolkveränderung im Verlauf eines Sturmes ist nicht proportional zur signifikanten Wellenhöhe
- Die Kolkveränderung hängt davon ab, in welchem Zeitintervall im Verhältnis zu der Gezeitenveränderung die signifikante Wellenhöhe über der kritischen Marke von aktuell 4.8 Metern liegt
- Im Vergleich zwischen verschiedenen Sensorpositionen und anderen Projekten zeichnet sich ab, dass die Geometrie und die geografische Lage für die Kolkveränderung ebenfalls ausschlaggebend sind

Die uneinheitliche Auswirkung von Wetterereignissen auf den Scour Change hat Auswirkungen auf die Planung der Simulationsstudie. Es war bislang davon ausgegangen, dass jedes Wetterereignis, dessen Wellenhöhe ein bestimmtes Maß überschreitet, zu einer Erhöhung der Auskolkung führt, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Die Simulationsstudie hatte das Ziel, diese Kolkveränderung durch ein Wetterereignis nachzuvollziehen. Da es sich aber gezeigt hat, dass Wetterereignisse sowohl zu einer Erhöhung der Kolkentiefe führen können wie auch zu einer Reduktion, wurde das Ziel der Simulationsstudie dahin modifiziert, Kolkursachen genauer zu untersuchen, um festzustellen welche Strömungs- und Seegangsverhältnisse Kolk erhöhen und welche das Gegenteil bewirken. Durch die neuen Erkenntnisse aus der kontinuierlichen Messung von Kolkentiefe und Seegang ergeben sich Wissenslücken über das Verhalten von Kolk in Strömung und Seegang im kurzzeitigen Rahmen, deren Ursachen genauer zu untersuchen sind.

3.2.2 FINO 3

Die Auswertung der Messdaten an FINO 3 erfolgt durchgehend parallel zu der Auswertung an FINO 1. Allerdings zeigt die Zeitreihe der Kolkentiefe während des Messzeitraumes, siehe Abbildung 16, dass die Kolkentiefe mit Extremwerten von -0.2 m bis $+0.2$ m um den Nullpunkt schwankt. Es ist also seit Inbetriebnahme der Plattform im Jahr 2009 kein Kolk entstanden. Auch eine Detail-Analyse der einzelnen Stürme, die zu Kolkevents bei FINO 1 führten, ergab bei FINO 3 keine nennenswerten kurzfristigen Kolkveränderungen.

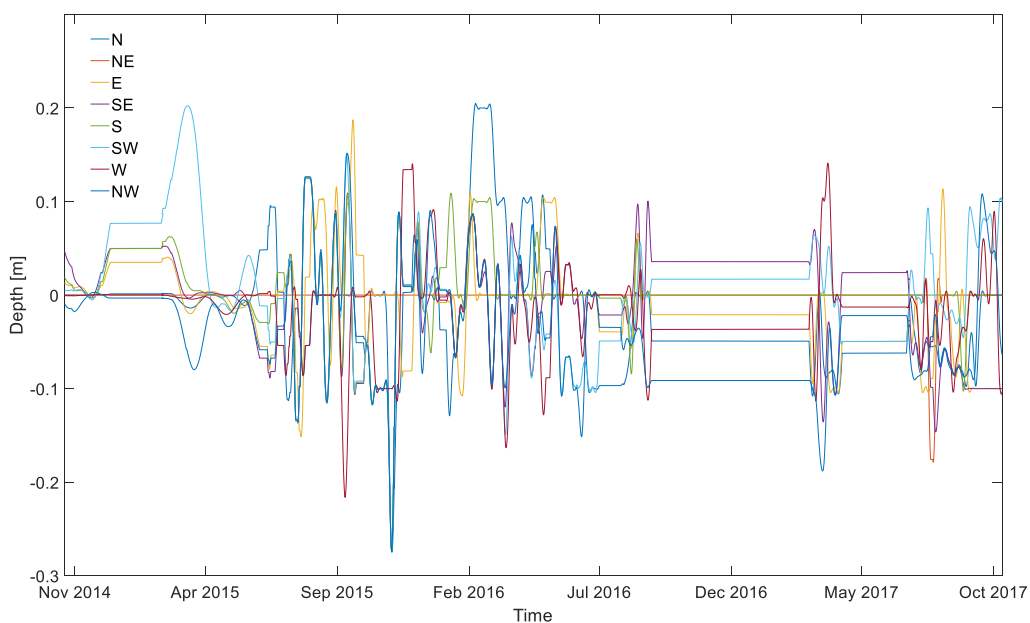


Abbildung 16: Zeitreihe der Kolkentiefe im Messzeitraum an FINO 3 (10/2014 – 10/2017)

In Hinblick auf gängige Auslegungsverfahren für zylindrische Pfähle (wie z.B. ein Monopile) aus Mayerle, Ricklefs und Rother (2008) erkennt man in Tabelle 3, dass die Auslegungskolkentiefe für den FINO 3 Monopile bei 2.68 m bis 11.88 m liegt. Für die Auslegung wurde, nach der DNV Richtlinie, eine Auslegungskolkentiefe von 6.18m berücksichtigt. Tatsächlich tritt aber kein Kolk auf. Genau an dieser Diskrepanz erkennt man deutlich den Bedarf für eine erweiterte Vorhersage der Kolkentiefe.

Tabelle 3: FINO 3 - Auslegungskolkentiefe verschiedener Autoren nach Mayerle et al. (2008)

Autor	Jahr	SC / d [m]	SC [m]
Laursen & Torch	1956	2.41	11.44
Laursen	1963	2.95	14.01
Haneu	1971	0.56	2.68

Breusers et al.	1977	2.00	9.5
Qadar	1981	0.74	3.52
Sumer et al. (DNV)	1992	1.30	6.18
Ansari & Cadar	1994	1.41	9.71
GL	2005	2.50	11.88

An dieser Stelle ist es sinnvoll und notwendig nach Ursachen dafür zu suchen, dass kein Kolk an FINO 3 entsteht. Dafür wurden die Events, sofern möglich, einzeln mit dem dafür entwickelten Software Tool ausgewertet. Aufgrund von diversen Problemen in der Datenerfassung stehen nicht für alle Events die notwendigen Daten zur Verfügung. Die hochauflösenden Seegangsdaten sind nur für drei der Events verfügbar und Kolkdaten fehlen ebenfalls für acht der Events. Fehlende Seegangsdaten werden bestmöglich durch Informationen aus der BSH Datenbank ersetzt, wodurch nur noch das hochaufgelöste Spektrum fehlt. Nach dem Vergleich der vorhandenen Daten zwischen FINO 1 und FINO 3 ergeben sich folgende Unterschiede:

Tabelle 4: Vergleich der Kolkparameter zwischen FINO 1 und FINO 3

Parameter	FINO 3	FINO 1
Strömungsgeschwindigkeit	FINO 3 = 0.58 x FINO 1	
Signifikante Wellenhöhe	FINO 3 = 0.92 x FINO 1	
Keulegan Carpenter Zahl	3.90	15.25
Pfahldurchmesser	4.75	1.50

Sowohl Strömungsgeschwindigkeit als auch signifikante Wellenhöhe sind demnach an FINO 3 kleiner als an FINO 1, vor allem aber ist die Keulegan Carpenter Zahl kleiner bei FINO 3 als bei FINO 1. Wie bereits in Kapitel 3.1 angedeutet entsteht nach Sumer und Fredsøe (2002) bei Keulegan Carpenter Zahlen unter sechs kein Kolk, was damit als Begründung dient.

Abgesehen von den Revierunterschieden ergibt sich hier ein deutlicher Indikator dafür, dass Kolk mit zunehmendem Durchmesser der Pfahlgründung eher abnimmt. Dies steht im krassen Gegensatz zu derzeit verwandten Auslegungsansätzen, bei denen die

Auskolkung in erster Näherung proportional zum Pfahldurchmesser angenommen wird.

3.3 Meeresbodenvermessung FINO 1

Um die Plattform FINO 1 wurde zusätzlich zur Kolkmessung am Pfahl eine Meeresbodenvermessung im Fernfeld mittels eines Multi-Beam-Echolotes vorgenommen. Das Echolot wurde vom FEZ zum Schutz des Gerätes in einen eigens dafür entwickelten Kasten eingebaut und an einem Motorboot befestigt. Zusätzlich ist auf dem Motorboot der GPS Kompass und der Bewegungssensor montiert. Bevor an der FINO 1 Plattform vermessen wurde, gab es bereits Kalibrierfahrten in der Kieler Förde um das Gerät korrekt einzustellen und die Auswertungssoftware kennen zu lernen. Im nächsten Schritt wurde das Boot zusammen mit den Messgeräten auf die FINO 1 gebracht. Eine erste Messfahrt wurde am 14.06.2017 durchgeführt. Hier gab es jedoch noch ein paar unvorhersehbare Probleme, sodass die finale Vermessung am 01.08.2017 vorgenommen wurde. Schwierig bei Messung um die Plattform ist, dass die Wetterbedingungen sowohl für einen Helikopterflug zur Plattform als auch für die Fahrt mit dem Boot ausreichend gut sein müssen, was einen erheblichen Organisationsaufwand bedeutet.



Abbildung 17: Motorboot mit MultiBeam Messaufbau

Die Messung selbst wurde mit der zu dem Gerät gehörenden Software WASSP-CDX durchgeführt. Um aus den Ergebnissen ein Profil für die Strömungssimulation zu bekommen wurde bereits vorab eine Datenschnittstelle mit sogenannten XYZ-Daten dazu bestellt. Eine so erstellte Ausgabedatei erhält die geographischen Koordinaten, also die geographische Länge als X-Wert, die geografische Breite als Y-Wert und die Tiefe in Metern als Z-Wert. Anschließend wurden die geografischen Koordinaten umgerechnet in eine Entfernung in Metern gegenüber dem Mittelpunkt der FINO 1 Plattform und grafisch im Open Source Programm ParaView dargestellt. Die

ausgegebenen Messdaten in XYZ-Format beschreiben für jede Messfahrt jeweils eine Punktwolke aus der sich direkt keine definierte Oberfläche des Meeresbodens erstellen lässt. Abbildung 18 zeigt den Ausschnitt der Punktwolke aus der finalen Messfahrt im Radius von 25 Metern um den Plattformmittelpunkt.

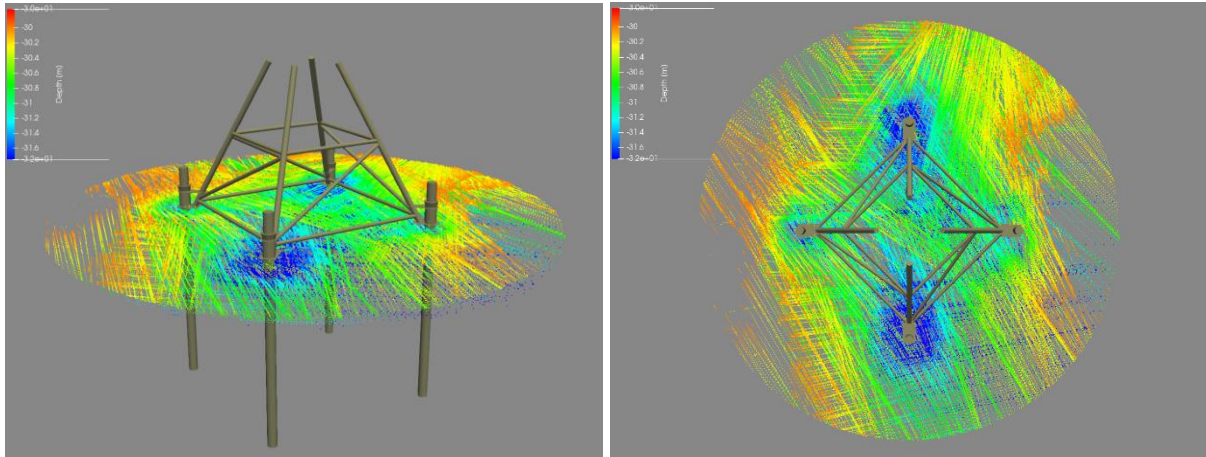


Abbildung 18: Punktwolke um FINO 1 mit 25 Meter Radius

Um aus den Messdaten eine Oberfläche für die Strömungssimulationen zu bekommen, wurden im Radius von 10 Metern um das südliche Bein eine definierte Anzahl an Messpunkten manuell aus der Punktwolke ausgelesen und mit Hilfe von ANSA Pre-Processor eine Fläche erstellt. Das Ergebnis und die Anordnung der Messpunkte sind in Abbildung 19 zu sehen. Die rot markierten Messpunkte sind jeweils in 45° in den Abständen von 1, 2, 4, 6, 8 und 10 Metern von dem Beinmittelpunkt angeordnet. Die Tiefe des Loches ist in farblichen Abstufungen, siehe Legende oben links, und Höhenlinien dargestellt. Die Gründe für die Auswahl des südlichen Beines wurden bereits im Kapitel 3.2.1 beschrieben.

Bei den im folgenden Kapitel beschriebenen Simulationsstudien dienen die Bodenerhebungsdaten dazu, das untersuchte Strömungsgebiet geometrisch zu definieren. Strömungssimulationen modellieren ein Gebiet im Umfeld der einzelnen Pfahlgründungen, wobei dieses Umfeld groß genug sein muss, um vom Strömungskörper ungestörte Randbedingungen zu definieren. Als untere Begrenzung dieses Strömungsgebietes kann nun der vermessene Meeresboden herangezogen werden.

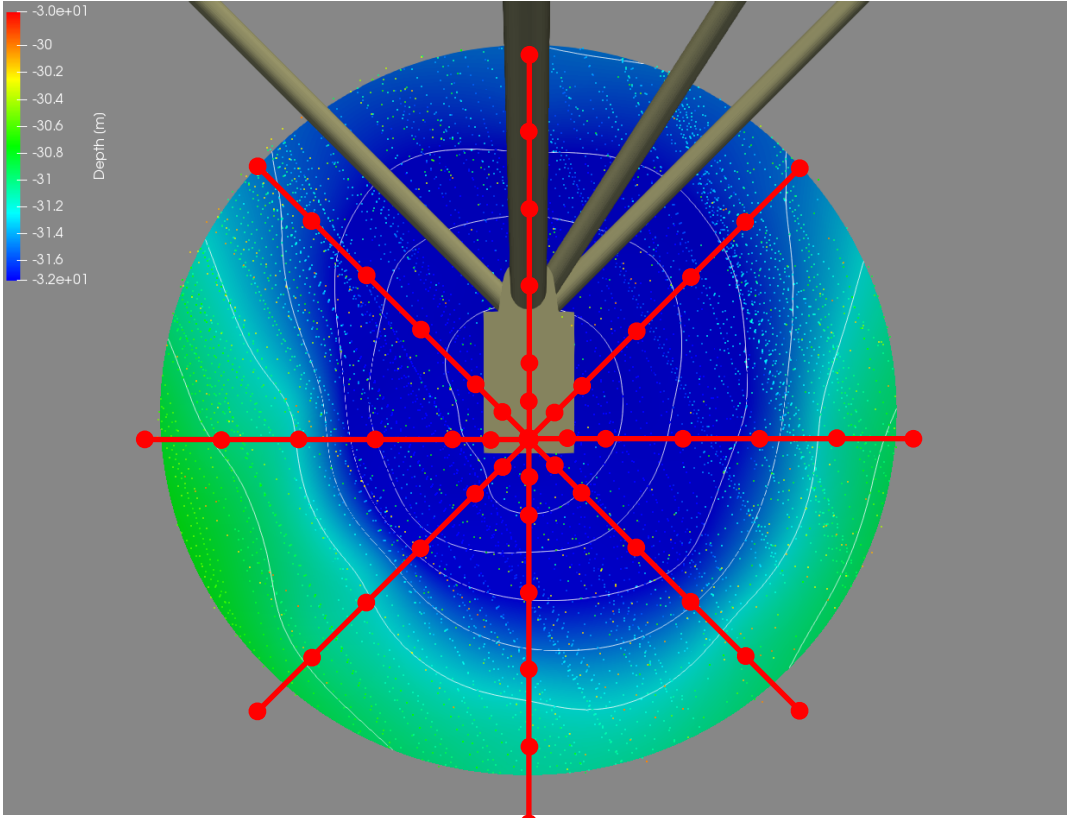


Abbildung 19: Anordnung der Messpunkte und Fläche durch die Messpunkte um das südliche Bein der FINO 1 Plattform

4 Korrosions-Monitoring

Vorbemerkung: Das Thema Korrosion und seine Beobachtung durch messtechnische Verfahren ist in der Antragsphase des vorliegenden Berichtes inkludiert worden, da zum einen Korrosion wie auch Kolkbildung einen Einfluss auf die Langzeit-Standfestigkeit einer Offshore-Gründung haben. Zum zweiten war erwartet worden, dass zwischen Kolkbildung und Korrosion eine Wechselwirkung besteht und in den durch Auskolkung freigelegten Bereichen der Gründungspfähle andere korrosive Bedingungen herrschen also in den übrigen Bereichen. In Tauchgängen hat sich allerdings gezeigt, dass dies nicht der Fall ist. Dementsprechend können Kolk- und Korrosionsuntersuchungen komplett getrennt voneinander behandelt werden. Im Zusammenhang mit den Kerninhalten dieser Studie ist das Thema Korrosion somit zweitrangig.

4.1 Einleitung

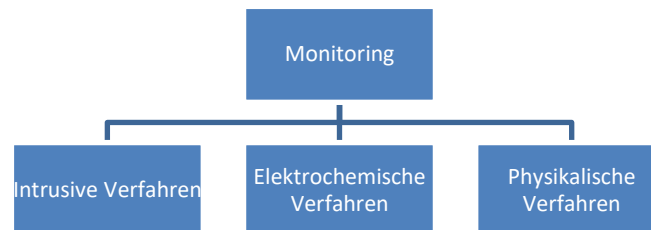
Die Korrosion ist im Offshore-Bereich ein sehr wichtiges Thema, da die meisten Bauwerke auf See aus Stahl gefertigt sind und Eisen sich durch überwiegend elektrochemische Prozesse im Meerwasser löst. Während es verschiedene Möglichkeiten gibt, der Korrosion entgegenzuwirken, wie beispielsweise die Verwendung organischer Beschichtungen oder der Einsatz kathodischer Schutzsysteme, ist es unerlässlich, den Zustand der Bauwerke hinsichtlich der Korrosion zu überwachen. Schäden an Bauteilen durch Korrosion können starken Einfluss auf die Stabilität haben und im schlimmsten Fall zum Versagen führen. Die exponierte Lage der Bauwerke sowie die meist Unterwasser liegende Struktur machen Reparaturen sehr kostspielig.

Eine der häufigsten Methoden, Eisen vor Korrosion zu schützen, ist neben dem Fernhalten von Reaktionspartnern durch Beschichten der kathodische Korrosionsschutz. Dabei wird das Bauwerk oder die Konstruktion mit Elektronen geflutet, und kathodisch gemacht, sodass die Reaktionspartner der Redoxreaktion in der Umgebung nicht mit den Valenzelektronen des Eisens, sondern eben mit den eingebrachten Elektronen reagieren. Diese Art des Schutzes erfordert die Umgebung eines Elektrolyt wie z.B. Meerwasser. Der Elektronenüberschuss wird durch galvanische Anoden, sogenannte Opferanoden, oder durch Fremdstromanlagen erreicht.

Um diese unzugänglichen oder nur schwer zugänglichen Bereiche überwachen zu können gibt es verschiedene Verfahren, die im Folgenden kurz erläutert werden.

4.2 Monitoring

Korrosionsmonitoring dient zur ständigen Überwachung (oder Überwachung in kurzen Intervallen) von Bauwerken, die der Korrosion ausgesetzt sind. Dabei ist nicht nur der Korrosionsschaden oder –fortschritt, sondern auch der aktuelle Schutz vor Korrosion und die Korrosionsgeschwindigkeit von großem Interesse, damit im Bedarfsfall rechtzeitig mit Reparaturen oder Gegenmaßnahmen reagiert werden kann. Die Verfahren lassen sich in drei Kategorien teilen:



4.2.1 Intrusive Verfahren

Als intrusive Verfahren bezeichnet man Verfahren, bei denen im Vorfeld oder im Nachhinein in das Bauwerk eingegriffen wird. Ein Beispiel dafür sind Testcoupons. Das sind Probestücke, die an prägnanten Stellen am Bauwerk platziert werden, um in regelmäßigen Abständen entnommen zu werden. Anhand dieser Probestücke kann beispielhaft der Korrosionsfortschritt beobachtet werden. Diese Art der Überwachung kann nur solange durchgeführt werden, wie Probestücke vorhanden sind.



Abbildung 20: Testcoupons AlphaVentus; Quelle: "<https://www.gigawind.de/tp3.html>"

Auch die elektrische Widerstandsmessung stellt ein intrusives Verfahren dar. An einer am Bauwerk installierten Probe (Draht oder Folie) wird der ohmsche Widerstand gemessen. Aus der Änderung des Widerstandes kann die Korrosionsgeschwindigkeit ermittelt werden. Im Vorwege der Planung dieses Projektes war eine Kooperation mit der Universität Nantes/FR vorgesehen, die ein Verfahren zur Analyse des Korrosionsfortschrittes auf der Basis von Testcoupons entwickelt haben. Die

Kooperation mit der Universität Nantes hat sich allerdings zerschlagen, konkret konnte das entsprechende Institut der Universität nicht dazu bewegt werden, Testcoupons zu liefern und hat sich auch nicht bereitgefunden, Testcoupons, die auf den Plattformen FINO 1 und FINO 3 montiert werden sollten, zu analysieren. Dieses Vorgehen zum Korrosionsmonitoring wurde daher verworfen.

4.2.2 Elektrochemische Verfahren

Die elektrochemischen Verfahren nutzen die Eigenschaften der Korrosionsreaktionen, die mit elektrischen Messmitteln erfasst werden können. Hierbei ist eine detaillierte Kenntnis der im Elektrolyt befindlichen Reaktionspartner notwendig.

Durch eine Messung der Wasserstoffentwicklung kann die Korrosionsgeschwindigkeit ermittelt werden. Bei dieser Methode wird der durch die Objektwand diffundierende Wasserstoff mittels einer externen elektrochemischen Zelle, die außen am Objekt angebracht wird bestimmt. Sie wird vornehmlich für Systeme, die neben Korrosionsvorgängen auch Wasserstoff aufnehmen, verwendet und ist bei dickwandigen Stahlbauten nicht einzusetzen.

Wird die Gesamtheit der chemischen und physikalischen Eigenschaften des Systems erfasst, also Umgebungsbedingungen, direkte und indirekte Einflüsse auf das Objekt, kann darüber ein indirektes Monitoring erfolgen, da die Korrosionsprozesse genau von diesen Bedingungen abhängen. Für die Nutzung eines solchen Verfahrens ist allerdings eine aufwändige Kalibrierung notwendig. Zur Überwachung müssen dann sämtliche Faktoren erfasst und permanent überwacht werden.

4.2.3 Physikalische Verfahren

Potentialmessungen, Polarisationswiderstandsmessung, Ultraschall- und Wirbelstrommessungen gehören zu den physikalischen Messverfahren.

Die Potentialmessung ist eines der am häufigsten angewandten Methoden, um den aktuellen Korrosionsschutzstatus zu ermitteln. Mit relativ einfachen und vor allem robusten Messequipment wird das Bauwerk, welches z.B. im Meerwasser stehend als elektrochemische Halbzelle angesehen werden kann, gegen eine Referenzelektrode, die ebenfalls eine Halbzelle darstellt, gemessen. Die ermittelte Spannung gibt Aufschluss über die Elektronensättigung des Bauwerks und damit den Schutz gegen den Verbrauch von Valenzelektronen des Eisens.

Der Potentialmessung sehr ähnlich ist die Polarisationswiderstandsmessung. Mit Hilfe der Polarisationswiderstandsmessung können über den Polarisationswiderstand direkt die Abtragsraten ermittelt werden. Dieses System kann wie die Potentialmessung am besten bei Flächenkorrosion eingesetzt werden.

Die Wanddickenmessung mit Ultraschall ist eine der bekanntesten Methoden, den aktuellen Zustand eines Objektes zu erfassen. Dabei werden mittels Ultraschall Grenzschichten erkannt, aus deren Entfernung die Wandstärke ermittelt wird. Dieses Verfahren findet beispielsweise bei Inspektionstauchgängen an der FINO3 Verwendung und kann neben der Messung der Wandstärke auch Risse entdecken.

Die Wirbelstrommessmethode kann ähnlich wie die Ultraschallmessung Wanddicke und ggfs. Risse erkennen, auch Sonderformen der Korrosion wie interkristalline oder Lochkorrosion können nachgewiesen werden. Statt Ultraschall wird bei dieser Messung ein elektromagnetisches Feld erzeugt, welches Grenzschichten identifizieren kann.

4.3 Monitoring auf FINO3

4.3.1 KKS-Fremdstromanlage

Zu dem vorhandenen passiven KKS-System, das aus Opferanoden besteht, wurde 2016 eine aktive Fremdstromanlage ergänzt. Der Vorteil einer solchen Anlage besteht zum einen im geringeren Wartungsaufwand (die Anlage ist im Prinzip wartungsfrei, während die Opferanoden in regelmäßigen Abständen einer Sichtprüfung unterzogen werden müssen) und zum anderen aus einer Überwachungsmöglichkeit.

Die Fremdstromanlage besteht aus zwei aktiven Anoden die über eine Anlage gesteuert werden können sowie drei Messelektroden, die eine permanente Potentialüberwachung realisieren können. Dabei ist der Anodenstrom für beide Anoden einstellbar.

In der folgenden Abbildung ist der ursprüngliche Aufbau der Anlage im Monopile zu sehen.

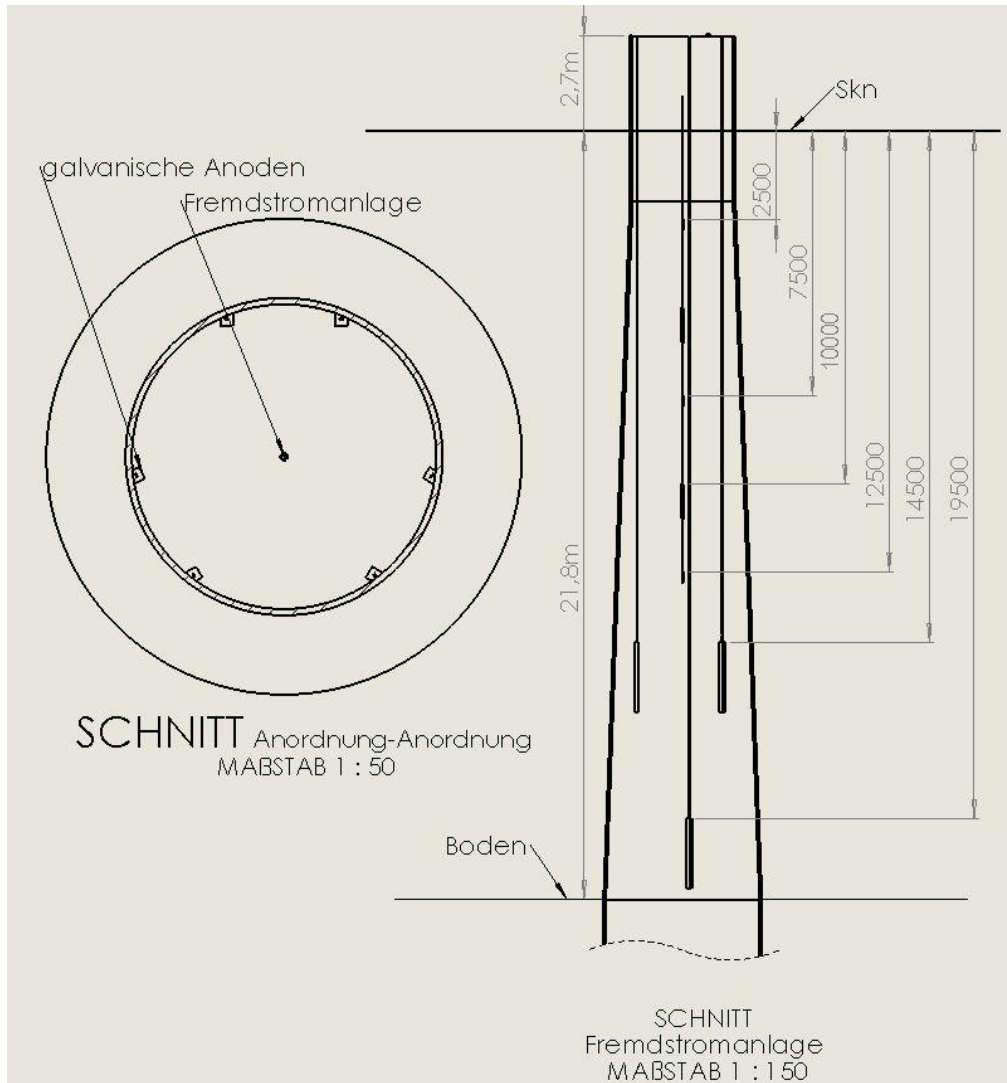


Abbildung 21: KKS-Konfiguration 2017 im Pfahlinneren FINO3

In zwei Tiefen sind jeweils drei Opferanoden bei -14,5m und bei -19,5m installiert. Die aktive Anlage ist mittig aufgehängt. Deren Anoden befinden sich bei -5m und -10m. Im gleichen Strang befinden sich die Messelektroden.

Die Anlage wurde seit September 2017 feinjustiert und besitzt aktuell nur eine Fremdstromanode, die sich in etwa -2 m dicht unter der Wasserlinie befindet. Die Messelektroden wurden referenziert und bilden insitu ein Profil des kathodischen Schutzes ab. In der Grafik ist ein Verlauf nach einer Justierung der Anlage sowie die Steuereinheit der Anlage zu sehen.

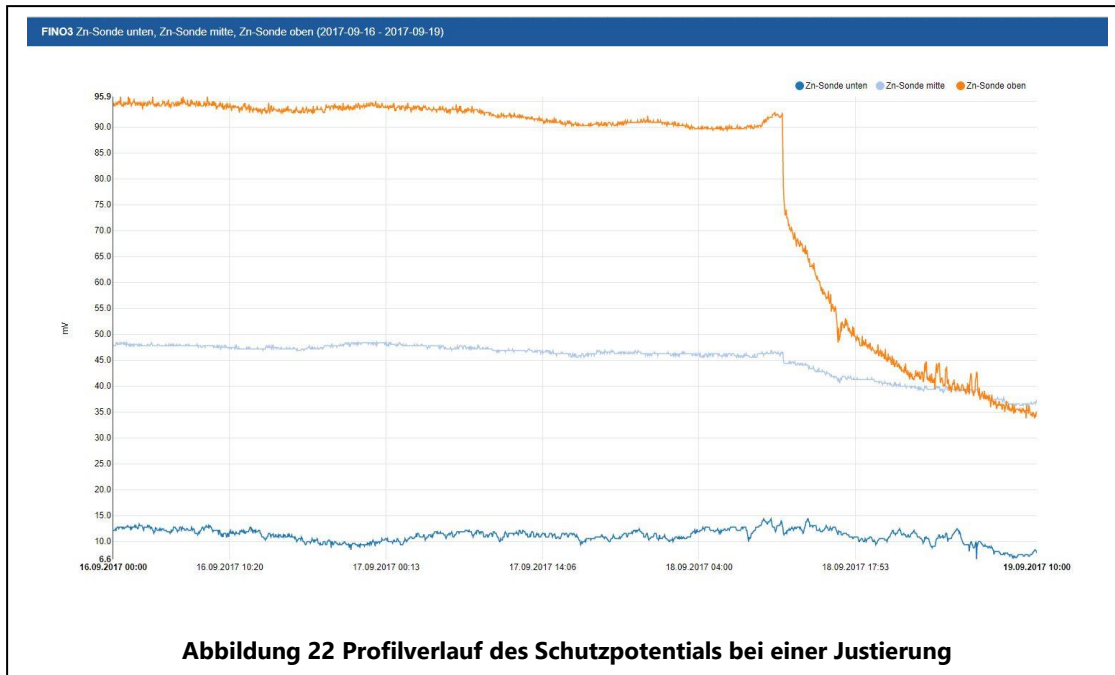


Abbildung 23: Fremdstromanlage auf FINO3

Wie oben bereits erwähnt, konnten durch Modifikation der Anlage die Messelektroden in die Gebäudeleittechnik integriert werden. Auf einer Überwachungsseite wird das Schutzpotential dargestellt und erzeugt bei Überschreiten von Grenzwerten eine Fehlermeldung, sodass eine Nachjustierung vorgenommen werden kann.



Abbildung 24: Monitoring in der Gebäudeleittechnik

4.3.2 Geräte zur Untersuchung einflussnehmender Faktoren

Die durchgeführten Messungen beschränken sich auf Wasserqualitätsmessungen und Potentialmessungen. Beides gibt Aufschluss über ablaufende Korrosionsprozesse. Die Wasserqualitätsmessung ist auf die vorhandene Sensorik beschränkt, allerdings werden die wichtigsten Parameter erfasst.

Zum Einsatz kommen:

- Multiparametersonde der Firma OTT: Serie MS5, bestückt mit Sensoren.
 - Spezifische Leitfähigkeit, Salzgehalt, gelöste Feststoffe
 - LDO Sauerstoff-Sensor
 - pH/ORP-Kombisensor mit integriertem Referenz Chlorid-Sensor S5
 - Chlorid Gehalt



Abbildung 25: Multiparametersonde MS-5 [26]

- Potentialmesssonde AG-Potentialmesssonde der Firma Silvion Typ SW100



Abbildung 26: Silvion-Potentialmesssonde (Ag/AgCl) [27]

- Multimeter der Firma EXTECH Instruments, TYP EX505
- 2,5m Markierungen auf dem Kabel für Tiefenprofil der Potentialmessung

4.4 Messdaten

Die für das Monitoring ausschlaggebenden Messwerte sind die Potentialmesswerte. Neben den Messdaten der Potentialmessung gibt die 2016 installierte aktive Korrosionsschutzanlage mit drei Messelektroden über drei Tiefen verteilt Potentialmesswerte, die allerdings erst seit Einbindung der Anlage in die Gebäudeleittechnik der FINO3 im zweiten Quartal 2017 erfasst werden können.

Die grafische Aufbereitung der Messwerte erfolgt mit MS-Excel. Die Bewertungen zu den Ergebnissen finden sich im nächsten Kapitel.

Alle Tiefenangaben beziehen sich auf die Pfahloberkante. Der erste Messwert liegt meist beim Eintauchen der Sonde. Der Wasserstand ist zu Messbeginn gemessen und aufgezeichnet worden.

4.4.1 Potentialmessung 2016/2017

In der Grafik Abbildung 27 sind die Verläufe der Potentialmessungen im Pfahl zu sehen. Um den Tiefenverlauf zu veranschaulichen, ist ein Zeichnungsausschnitt des Monopiles zugefügt. Dieser ist nicht maßstäblich. Die durchgeführten Potentialmessungen sind alle in einem Diagramm dargestellt.

Die unterschiedlichen Potentiale sind bei unterschiedlich eingestellter Fremdstromanlage ermittelt worden, sodass andere äußere Einflüsse nicht erkennbar sind. Das Ausschaltpotential (cpoff-2016-Nov) wurde nur im November aufgenommen und zeigt ein Offset von ca. 50mV im Bereich der Fremdstromanoden.

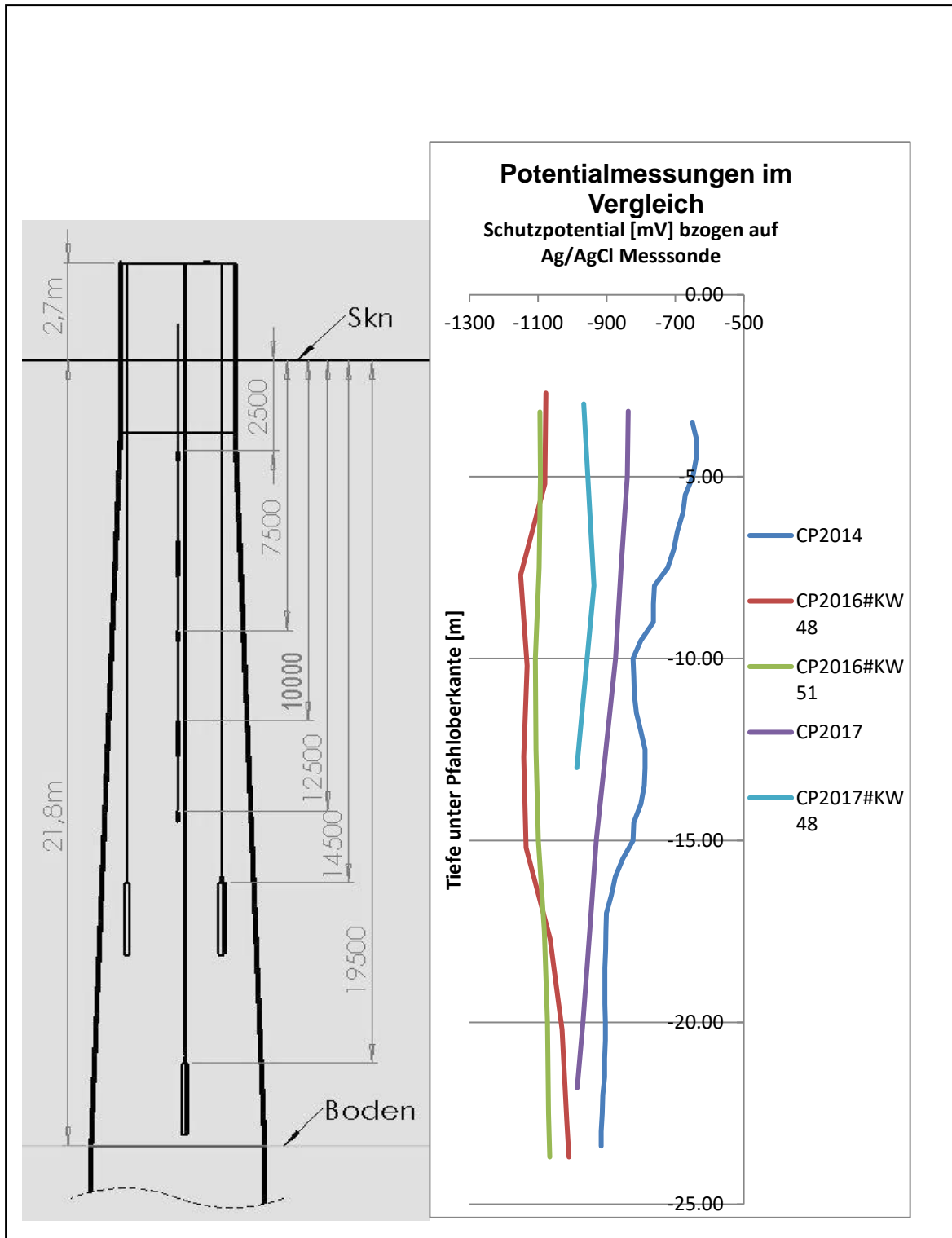


Abbildung 27: Potentialverläufe Monopile FINO3 2016/2017

4.5 Unterschiede und Entwicklungen der Messungen 2016 gegenüber 2014

Vor dem Vergleich der Messdaten aus 2014 und 2016 muss erwähnt werden, dass die Multiparametersonde kurz nach der Anschaffung und damit frischer Kalibrierung ab Werk eingesetzt wurde. Weiter muss bemerkt werden, dass seit 2014 der kathodische Schutz im Pfahlinneren verändert wurde. Die neue Konfiguration beinhaltet sechs statt 12 Anoden in zwei statt drei Ebenen, sowie die bereits erwähnte Fremdstromanlage. Die Potentialverläufe zwischen 2014 und 2016 sind daher nur bedingt vergleichbar. Deutlich erkennbar ist aber, dass vor allem im oberen Bereich der Schutz 2014 zu gering war.

Betrachtet man die Entwicklung des Potentials nach der Installation der Fremdstromanlage, ist zunächst eine Verbesserung vor allem im oberen Bereich zu vermuten. Tatsächlich befinden sich die Potentiale aber im Bereich der Schädigung von Beschichtungen. Da der Monopile und auch der untere Teil des Transition-Piece beschichtet sind, ist das Potential zu hoch und befindet sich nahe der Grenze zur Entwicklung atomaren Sauerstoffes, der zu einer Versprödung des Stahls führt. Zum Vergleich dient die Übersicht des BAW-MKKS Anlage 5 zum Potentialvergleich von Mess- und Streuelektroden. Seit die Messelektroden der Anlage in die Gebäudeleittechnik integriert wurden, konnte die Anlage optimal eingestellt werden.

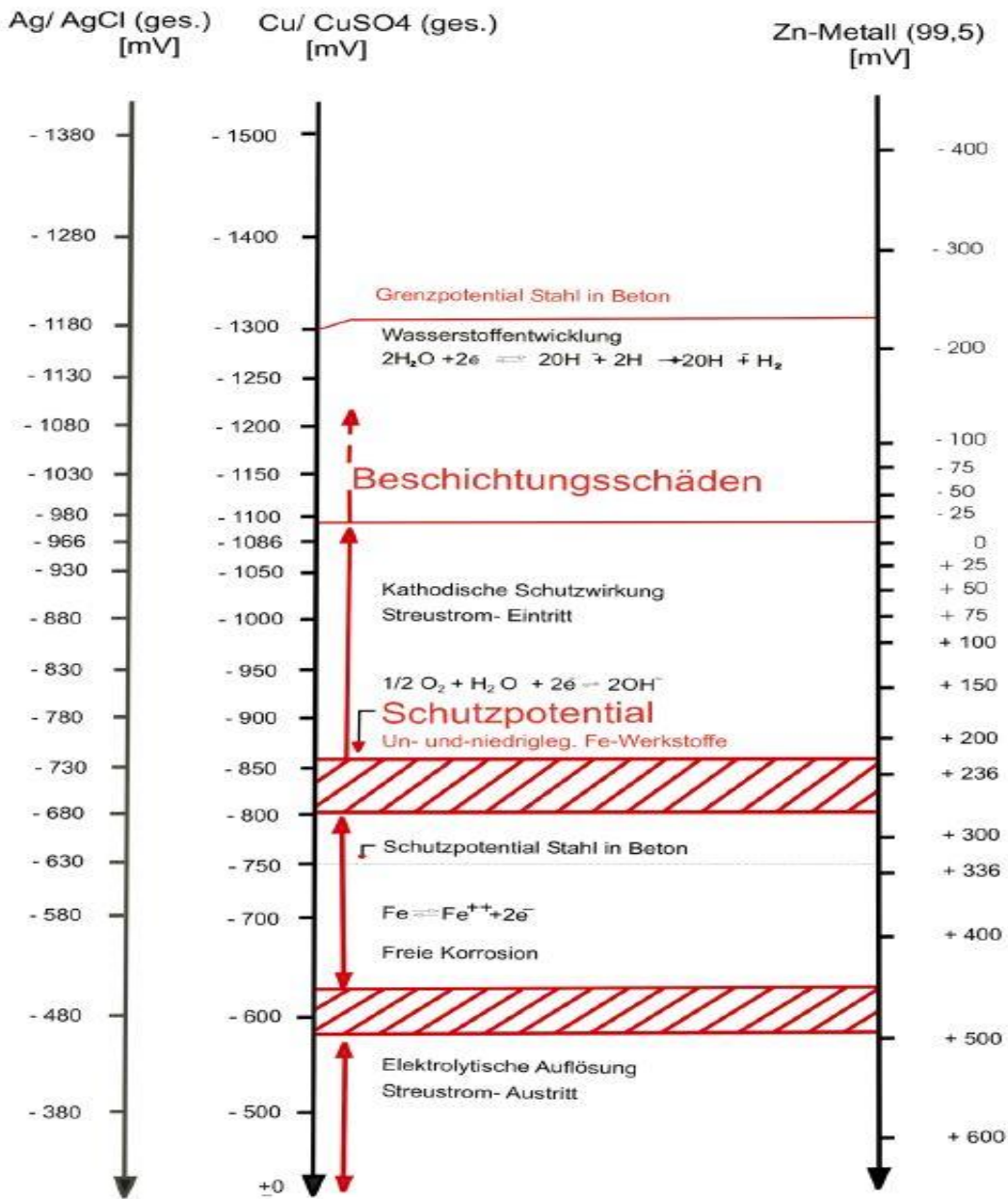


Abbildung 28: Potentialvergleich von Mess- und Streuelektroden für Schutzpotentiale im Stahlwasserbau nach BAW-MKKS Anlage5

Die Messungen 2014 und 2016 mit der Multiparametersonde zeigen im Großen und Ganzen vergleichbare Werte des Mediums Nordsee an der FINO3. Unterschiede in der Tiefe der Durchmischung im Pfahlinneren sind auf Wetterereignisse zurückzuführen, die mit größerem Seegang für stärkere Strömung im Pfahlinneren (Pfahllöcher sorgen.

Die Gegenüberstellung der Daten macht den Vergleich übersichtlicher. Hinzugezogen werden Daten des BSH und HZG. Messdaten im Pfahl werden jeweils für den oberen

und den unteren Bereich gewählt, da bereits in den Diagrammen zu erkennen ist, dass dort Unterschiede herrschen.

Parameter	2014	2016#1	2016#1 außen	2016#2	2017	BSH/HZG
pH oben	8,2	8,2	8,2	8	n.a.	n.a.(BSH)
pH unten	7,75	8,14	8,2	7,4	n.a.	8,15(HZG)
LDO oben	114	112	115	96	n.a.	110%(BSH)
LDO unten	35	94	115	<90	n.a.	94%(HZG)
ORP oben	290	400	395	400	n.a.	n.a.
ORP unten	150	120	435	<90	n.a.	n.a.
sal oben	35	34,2	34	33,5	n.a.	34(BSH)
sal unten	35	34,8	34	34,3	n.a.	34,5(HZG)
cond oben	n.a.	52	51,8	51	n.a.	35(BSH)
cond unten	n.a.	52,6	52	52	n.a.	35(BSH)
cp oben	650	1080	980	1095	835	n.a.
cp unten	914	1010	970	1070	980	n.a.

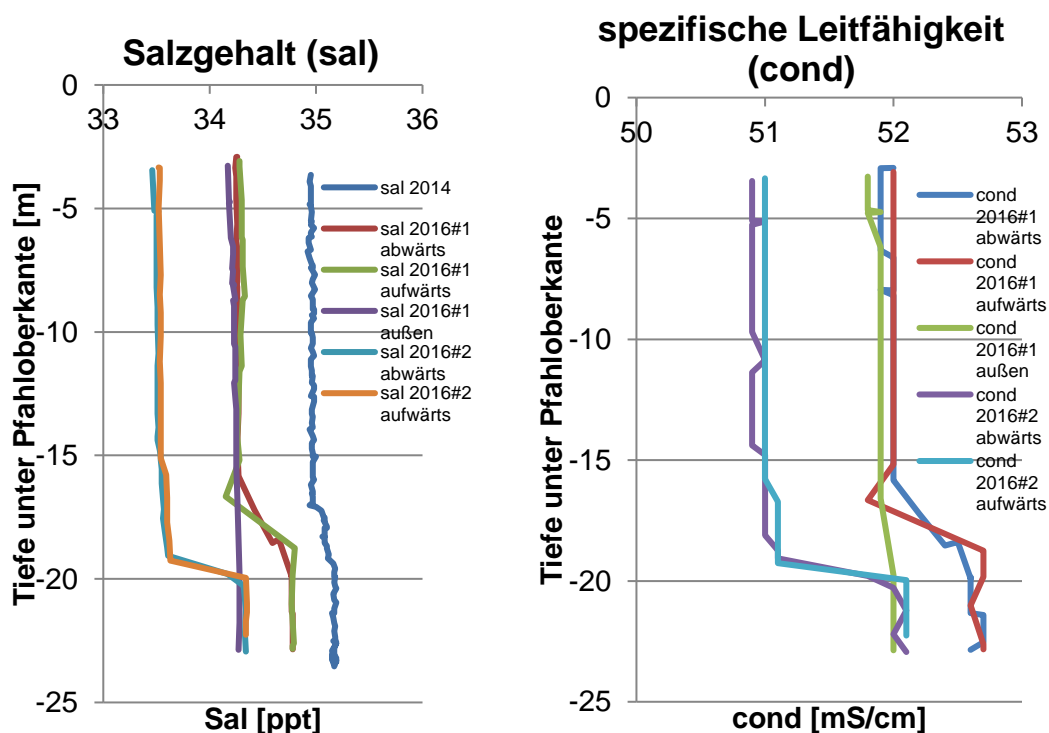
4.5.1 Messreihen der Multiparametersonde

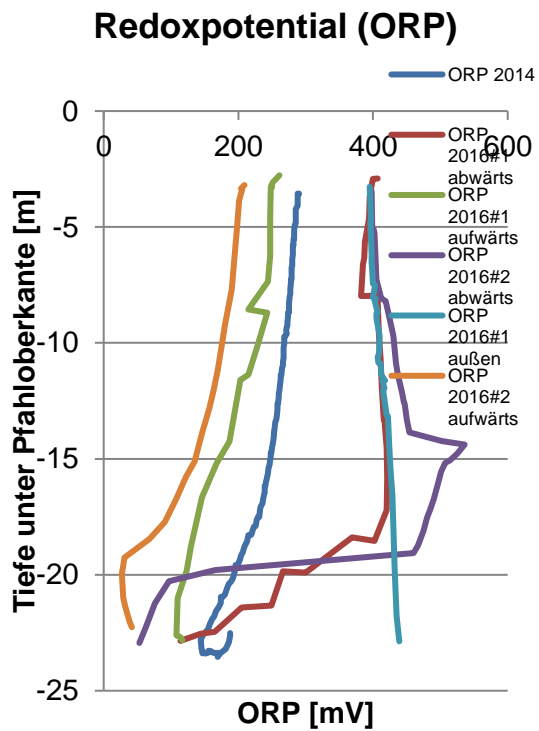
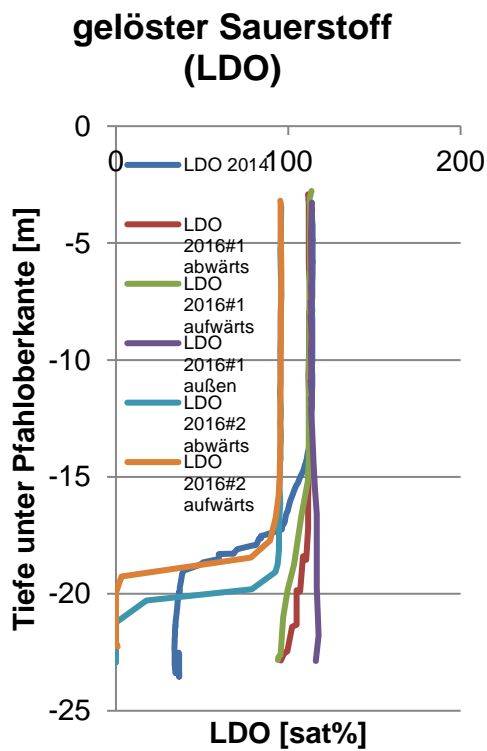
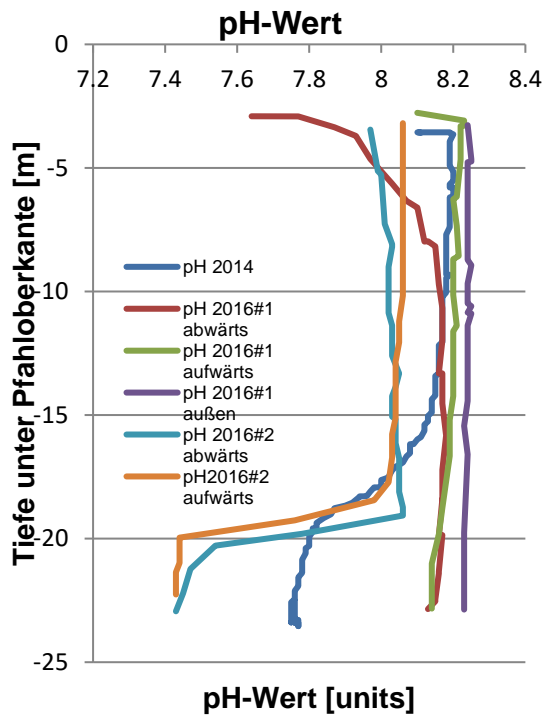
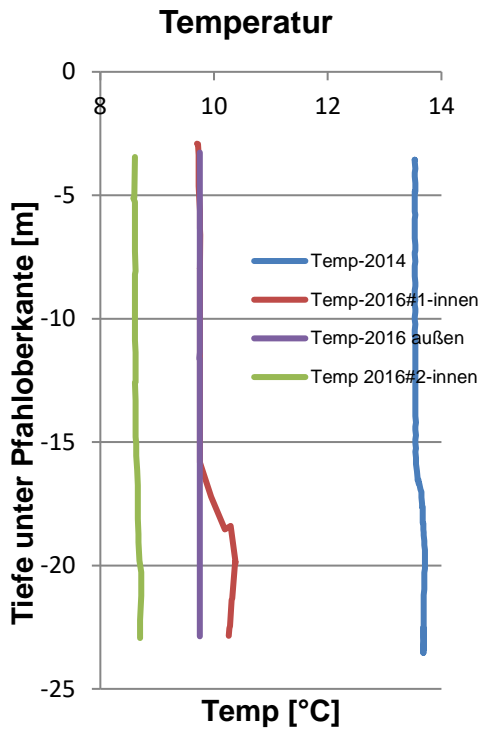
Es konnten bisher drei Messungen mit der Multiparametersonde MS-5 durchgeführt werden. Die erste greift auf einen Zeitraum vor Studienbeginn zurück (November 2014), zwei weitere Messungen wurden im November und Dezember 2016 durchgeführt.

Die folgenden sechs Diagramme zeigen die gemessenen Parameter

- Temperatur
- pH-Wert
- gelöster Sauerstoff
- Redoxpotential
- Salzgehalt und
- spezifische Leitfähigkeit

zu den jeweiligen Messkampagnen. In der Legende ist beschrieben, zu welchem Messzeitpunkt die Kurven aufgenommen wurden. Die Messungen im November 2016 sind mit #1 markiert, die Messungen aus dem Dezember mit #2. 2016 wurden das Absenken der Sonde und das Aufholen der Sonde in zwei separaten Kurven dargestellt (abwärts/aufwärts). Die Tiefenangabe ist bezogen auf die Oberkante des Monopiles, da sich der Wasserstand mit der Tide ändert.





Bewertung: Im Rahmen der hier vorliegenden Studie ist es nicht gelungen, einen Zusammenhang zwischen den gemessenen Potentialen, den Umgebungsbedingungen und dem Korrosionsfortschritt zu ermitteln. Ursächlich hierfür sind Unzulänglichkeiten der Messsensorik. Zum einen wurden diese Sensoren zu unterschiedlichen Zeiten in unterschiedlichen Messbedingungen eingesetzt. Desweiteren hat sich gezeigt, dass ein punktuelles Ermitteln der Umgebungsbedingungen (zu insgesamt drei verschiedenen Zeitpunkten) mit einer kontinuierlichen Potentialmessung nicht korreliert werden kann.

Um aussagefähige Daten zu erhalten, müsste die Anordnung von Anoden und Fremdstromanlage und deren Kalibrierung über einen längeren Zeitpunkt konstant bleiben. Dies ist aus operativen Gründen in der vorliegenden Studie nicht der Fall gewesen. Des Weiteren muss auch die Vermessung der Umgebungsvariablen kontinuierlich erfolgen. Dies war im Rahmen der Studie und im Betrieb der Plattform FINO 3 nicht geplant. Wegen der anfangs beschriebenen geringen Relevanz und dem Fehlen jeder Korrelation zwischen Auskolkung und Korrosion wurde die Korrosionsuntersuchung hier nicht weiter verfolgt.

5 Simulation von Auskolkungsvorgängen

5.1 Theoretische Grundlagen

Die Simulation der Auskolkungsvorgänge erfolgt mit Methoden der numerischen Strömungsmechanik: strömungsmechanische Probleme werden approximativ mit numerischen Verfahren gelöst werden. Das Prinzip basiert darauf, dass die Zeit in viele kleine Zeitschritte und der Raum in viele kleine Zellen aufgeteilt wird. Alle Zellen zusammen ergeben das Netz oder Diskretisierungs-Gitter. In jeder Zelle und konsekutiv in jedem Zeitschritt wird anschließend approximativ eine Lösung von Erhaltungsgleichungen berechnet. Das spezielle Verfahren, das in diesem Projekt zur Nutzung kommt basiert auf der Lösung der Reynolds-gemittelten Navier Stokes Gleichungen (RANSE) zusammen mit einer Volume-of-Fluid Methode (VOF) und einem SIMPLE- ähnlichen Algorithmus (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). Für die Simulation von Strömungen mit einer freien Wasseroberfläche und Wellen ist dies ein Standardverfahren, das sich seit Jahren bewährt hat. Durchgeführt werden die Simulationen mit Hilfe des OpenFOAM Frameworks. Dies ist eine Sammlung von Bibliotheken, Lösungsverfahren und Hilfsmethoden zur Behandlung von Feldproblem in Kontinuen. Für die Simulation von Strömungen ist OpenFOAM weit verbreitet. Der besondere Vorteil von OpenFOAM ist die Quelloffenheit. Das System ist erweiterbar und neue Methoden können programmiert und dem System hinzugefügt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde OpenFOAM an zwei Stellen erweitert:

- Verbesserung der rechnerischen Effizienz des Verfahrens zur Behandlung von Strömung mit freier Wasseroberfläche.
- Hinzufügen eines Verfahrens zur Berücksichtigung von Sediment

Der erste Verbesserungsschritt wird an dieser Stelle kurz beschrieben. Das Verfahren zur Berücksichtigung von Sediment beschreibt das Kapitel 5.3.

Bisherige Erfahrungen mit Simulation von Zwei-Phasen-Strömungen mittels OpenFOAM (InterFOAM) zeigen, dass es gewisse Probleme mit dem numerischen Verfahren gibt. Insbesondere die Stabilität des Verfahrens und die Lösungsgeschwindigkeit bereiten Probleme. Außerdem ist die Genauigkeit der Ergebnisse nicht auf dem Stand der Technik. Als Schwachstelle wurde vor allem der Algorithmus zur Berechnung des Transportes der zwei Phasen identifiziert. Der in InterFOAM genutzte *Multi-Dimensional Limiter for Explicit Solution* (MULES) Algorithmus ist ein explizites Verfahren, was die vorher angesprochenen Probleme mit Stabilität und Rechenzeit erklärt. Dieser Algorithmus wurde entfernt und auf Basis aktueller Literatur durch die selbst implementierten impliziten Verfahren *High*

Resolution Interface Capturing Scheme (HRIC), *Blended Interface Capturing Scheme* (BICS) und *Blended Interface Capturing Scheme with Reconstruction* (BRICS) im Quellcode ersetzt. Dadurch ergibt sich insgesamt eine deutliche Verbesserung der Stabilität des Lösungsverfahrens, der Qualität des Wellenbildes und aufgrund der flexibleren Zeitschrittgröße eine Verminderung der Rechenzeit. Zusätzlich wurde noch ein Verfahren implementiert, welches die Fluideigenschaften an der Wasseroberfläche rekonstruiert. Bisher gab es auch an dieser Stelle Probleme, die zu unphysikalisch hohen Geschwindigkeiten an der Wasseroberfläche geführt haben und zusätzlich limitiert werden musste. Die Theorie zu den implementierten Verfahren ist detailliert in Meyer, Renzsch, Graf und Slawig (2016) beschrieben.

Seegang wurde auf Grundlage der existierenden Open Source Bibliothek *waves2Foam*, entwickelt von Jacobsen, Fuhrman und Fredsøe (2012), in die OpenFOAM Umgebung eingebunden. Die Bibliothek liefert bereits eine solide Basis zur Erzeugung von Seegangswellen. Das benutzte Verfahren wurde jedoch noch erheblich verbessert, um Wellen zuverlässig und numerisch korrekt zu erzeugen.

Das größte Hindernis bei Seegangswellen innerhalb einer Simulationsumgebung ist, dass die Wellen an einem Rand des Strömungsgebietes, dem sogenannten *Inlet*, erzeugt und am anderen Rand, dem sogenannten *Outlet*, wieder abgedämpft werden müssen. Die Dämpfung ist notwendig um störende Reflektion zu vermeiden, die nach eigenen Versuchen die Seegangswelle um bis zu 40% verfälschen können. Insbesondere wegen der großen Ausdehnungen des zu untersuchenden Strömungsgebietes im vorliegenden Fall ist dies nicht akzeptabel. Aus diesem Grund wurde ein eigenes Verfahren, basierend auf impliziter Relaxation, entwickelt und implementiert, das in Meyer, Graf und Slawig (2017) detailliert beschrieben ist. Dieses Verfahren benötigt keine Parameteranpassung und funktioniert daher für alle unterschiedlichen Wellen. Insgesamt zeigt sich nach Untersuchung des implementierten Verfahrens, dass die Seegangswellen weniger als 1% durch Reflektion gestört werden, was absolut ausreichend ist. Abbildung 29 und Abbildung 30 veranschaulichen die Ergebnisse. In Abbildung 29 wurde keine Wellendämpfungsmethode appliziert. Die Wellen werden auf der linken Seite generiert und verlassen auf der rechten Seite das Strömungsgebiet. Am Outlet an der rechten Seite entstehen die unerwünschten Reflexionen. Die neu erzeugten Wellen und die reflektierten Wellen überlagern sich wodurch das Wellenbild, wie zu sehen, gestört wird. In Abbildung 30 wurde die neu entwickelt Dämpfungsmethode angewandt. Die Wellen werden in diesem Fall in dem Gebiet ab der 20m Marke bis zum Outlet gedämpft. Die erfolgreiche Dämpfung wird durch die reduzierte Wellenhöhe hinter der 20m Marke sichtbar. Zudem entstehen nun keine Reflexionen, sodass sich ein gleichmäßiges Wellenbild mit konstanter Höhe im restlichen Strömungsgebiet ergibt.

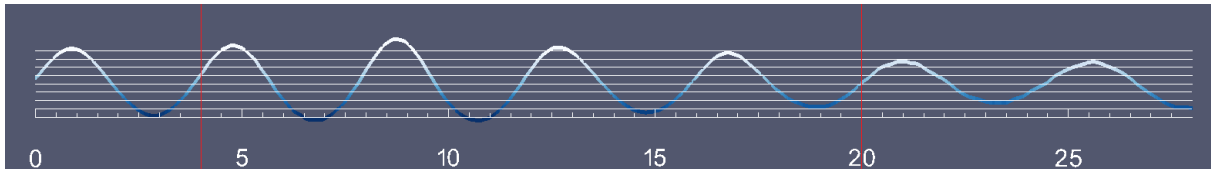


Abbildung 29: Wellenbild ohne Wellendämpfung

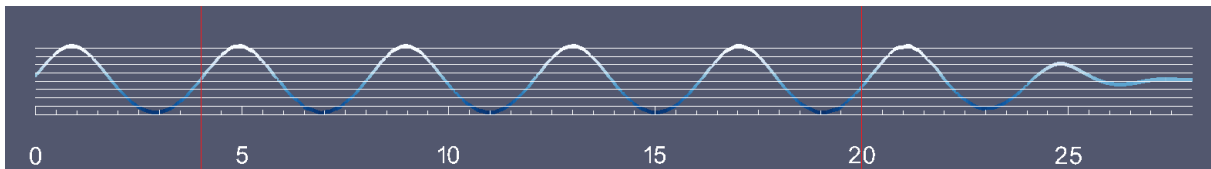


Abbildung 30: Wellenbild mit neuer Wellendämpfungsmethode

Zur Erstellung des Netzes wurde, wie in Kapitel 2 erwähnt, nach einigen Untersuchungen, die Software ANSA Pre-Processor verwendet. Für Strömungssimulationen muss allgemein von dem zu untersuchenden Objekt eine CAD-Geometrie vorliegen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher aus vorhandenen Zeichnungen CAD Geometrien erstellt, die bereits für die Strömungssimulationen optimiert sind. Je nach Komplexität der Geometrie bedeutet dies einen unterschiedlich hohen Aufwand. Speziell die Jacket Struktur der FINO 1 Plattform war dabei aufwendig zu gestalten. Die CAD Geometrien werden anschließend in ein ausreichend großes Strömungsgebiet integriert und räumlich diskretisiert. Die Größe des Strömungsgebiet und der Zellen wird im Wesentlichen durch die Strömungsparameter (Strömungsgeschwindigkeit und/oder Wellenhöhe, Wellenlänge bzw. Wellenperiode) bestimmt. Für die ergebnisorientierten Simulationen erfolgt noch eine genauere Beschreibung der Netzerstellung weiter unten.

Abbildung 31 zeigt beispielhaft den Schnitt durch ein Gitter für einen einfachen Zylinder in einem Strömungsgebiet für eine Zwei-Phasen Strömung aus Luft und Wasser. Um den Zylinder sieht man den unterschiedlichen Verfeinerungsgrad. Im Nahbereich um den Zylinder ist das Netz feiner, da hier die Kolkursachen auftreten. Die Feinheit im Fernbereich des Zylinders ist geringer, da hier keine lokalen Effekte erwartet werden.

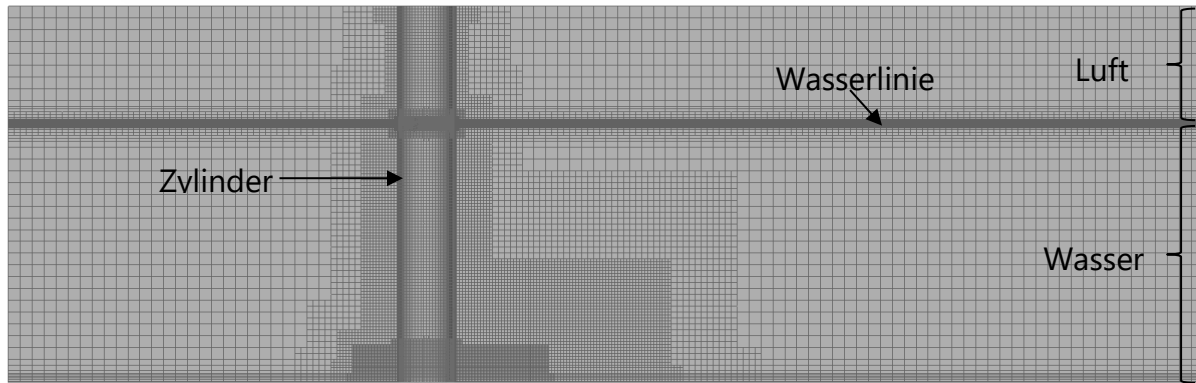


Abbildung 31: Schnitt durch ein Gitter für einen einfachen Zylinder

Damit ist die Simulationsumgebung, zumindest für eine Zwei-Phasen-Strömung aus Wasser und Luft, hinreichend beschrieben. Das nachfolgende Kapitel ist unterteilt in die Simulation von Kolkursachen und die Simulation von Kolkvorgängen. Die Simulation von Kolkursachen nutzt die hier beschriebene Simulationsumgebung, während die Simulation von Kolkvorgängen zusätzlich noch die Veränderung des Sedimentes benötigt. Die Erweiterung der Zwei-Phasen-Strömung zur Berücksichtigung von Sediment wird im Kapitel 5.3 beschrieben.

5.2 Simulation von Kolkursachen

5.2.1 Grundlagen

Dieses Kapitel befasst sich damit, die strömungsmechanischen Ursachen von Auskolkungsphänomenen zu untersuchen. Kolk entsteht durch den Abtransport von Sediment im Nahfeld der Offshoreanlagen-Gründung. Damit Sediment von der Strömung transportiert werden kann, muss eine Kraft auf das Sediment wirken, die größer ist als alle Effekte, die das Sediment in Ruhe halten. In der Regel ist dies das Überschreiten einer Schubspannung am Gewässerboden, die durch die Strömung verursacht wird. Das Kapitel 5.2 beschäftigt sich damit, zu detektieren, welche Bauteil- und Strömungsverhältnisse diese Schubspannung erzeugen. Dies wird allgemein ausgedrückt durch die dimensionslose Shields Zahl θ :

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gD}$$

Darin ist τ die dimensionsbehaftete Schubspannung, ρ der Dichte des Strömungsmediums, ρ_s der Sedimentdichte und D ein charakteristischer Partikeldurchmesser. Wird eine kritische Shields Zahl θ_{krit} und damit eine kritische Schubspannung überwunden, bewegen sich die einzelnen Sedimentpartikel, wobei jeder Sedimenttyp eine unterschiedliche kritische Shields Zahl hat, die das jeweilige

Sediment charakterisiert. Damit Kolk tatsächlich entsteht müssen diese Partikel zusätzlich noch abtransportiert werden. Dieser Abtransport geschieht im Wesentlichen durch zwei strömungsmechanische Strömungsphänomene, die direkt am Bauteil entstehen und durch dieses verursacht werden. Das erste ist der sogenannten Hufeisenwirbel (English: *Horseshoe Vortex*) an der stromaufwärtsgerichteten Seite des umströmten Objektes (Luv Seite). Dieser Wirbel (in erster Näherung Zirkulation) wird verursacht durch eine vertikale Stromableitung, die eine abwärts gerichtete Strömung vor dem umströmten Objekt erzeugt. Das zweite Phänomen ist die sogenannte Wirbelschleppe (English: *Wake Vortex*) an der stromabwärts gerichteten Seite des umströmten Objektes (Lee Seite). Diese entsteht durch die Ablösung der Grenzschicht bei Umströmung des Objektes und ist ebenfalls ein Gebiet ausgeprägter Zirkulationen. Beide Effekte sind in Abbildung 32 grafisch dargestellt.

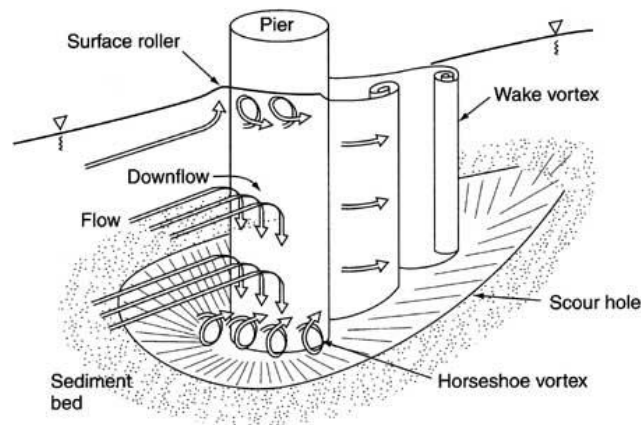


Abbildung 32: Kolkbildung an einem zylindrischen Pfahl nach Hamill (1999)

In einer initialen Voruntersuchung, der sogenannten Gitterinvarianzstudie, wurde das Simulationsmodell so verfeinert, dass diese Strömungsphänomene, Hufeisenwirbel und Nachstrom-Wirbelschleppe, richtig abgebildet werden.

Mit der Erkenntnis, dass Kolk zum einen durch Bodenschubspannungen ausgelöst wird, zum anderen aber in zirkulationsreichen Gebieten auftritt, wurde als Kriterium für ein Kolkpotential das Q-Kriterium herangezogen.

Das Q-Kriterium beschreibt das lokale Gleichgewicht zwischen Rotation Ω und Scherung S (Flächenintegral über Rotation ergibt Zirkulation, Multiplikation der Scherung mit der Viskosität ergibt Schubspannung):

$$Q = \frac{1}{2} (\Omega_{ij} \Omega_{ij} - S_{ij} S_{ij})$$

In Bereichen $Q > 0$ überwiegt die Rotation, in Bereichen $Q < 0$ die Schubspannungen. In Abbildung 33 sieht man die Bereiche mit positiven Q Kriterium grün dargestellt, den Zylinder gelb dargestellt und den Meeresgrund in braun.

Abbildung 33 links zeigt, in farblicher Skalierung nach der Geschwindigkeit, den Verlauf der Stromlinien. Kurz vor dem Zylinder werden diese Partikel nach unten abgelenkt um schließlich den auf dem Meeresboden liegenden Hufeisenwirbel zu erzeugen.

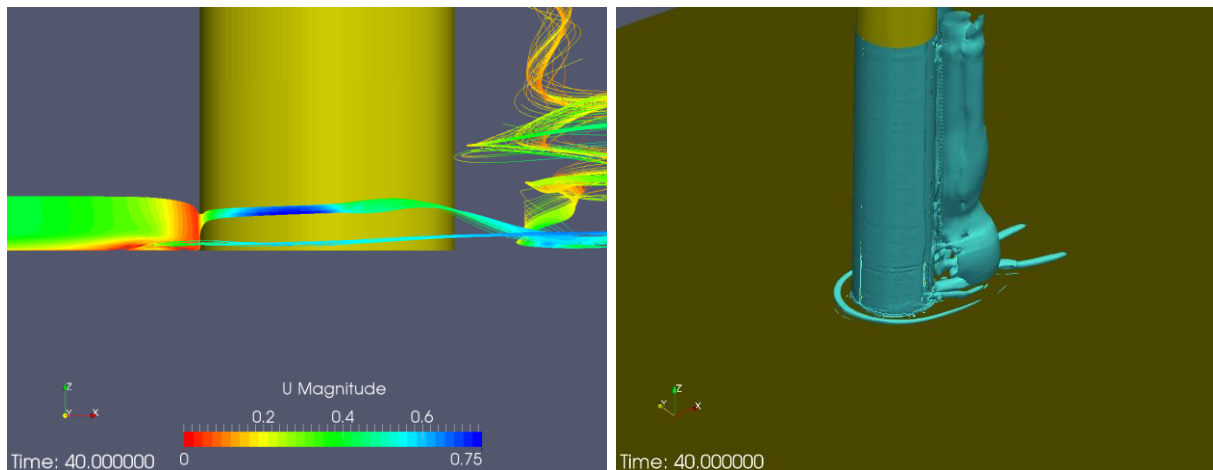


Abbildung 33: Zylinder mit Verlauf der Strömungspartikel (links) Zylinder mit Q Kriterium (rechts)

Abbildung 33 rechts zeigt Bereiche mit positiven Q -Kriterium. Positives Q -Kriterium kennzeichnet den Einfluss des Bauteils (hier der Pfahlgründung) auf die Strömung. In einer ungestörten Parallelströmung gilt $Q=0$. Bei einer Strömung parallel zu einer Wand mit Haftbedingung ohne Bauteil (zum Beispiel der Gewässerboden mit Sediment) gilt $Q < 0$, denn hier überwiegen die Schubspannungen am Boden. Trotz Schubspannung entsteht hier kein Kolk. Erst wenn zusätzlich zur Schubspannung Rotation entsteht, treten Kolkphänomene auf. In den folgenden Untersuchungen wird daher zur Bewertung immer die Bodenschubspannung und das Q -Kriterium herangezogen.

5.2.2 Simulationsmodell für die Plattform FINO 1

Aufgrund der Ergebnisse aus Kapitel 3 wird die Kolkursachensuche im Folgenden auf die Plattform FINO 1 beschränkt. Im ersten Schritt wird die Simulationen dabei zunächst an einem einfachen Pfahl bzw. Zylinder durchgeführt, um sie so einfach wie möglich zu halten. Der Durchmesser des Pfahles ($d = 1,5\text{m}$) ist identisch mit dem Pfahldurchmesser der vier Beine der FINO 1 Plattform. Im weiteren Verlauf wird dann die tatsächliche Gründungsstruktur untersucht, allerdings unter Ausnutzung von Symmetrien. Konkret wird ein Viertel der gesamten Plattform, inklusive Verstreben modelliert. Die

maritimen Gegebenheiten in der Simulationsumgebung in Bezug auf Wassertiefe (30m) und Seegang (2m – 10m) entsprechen der Realität.

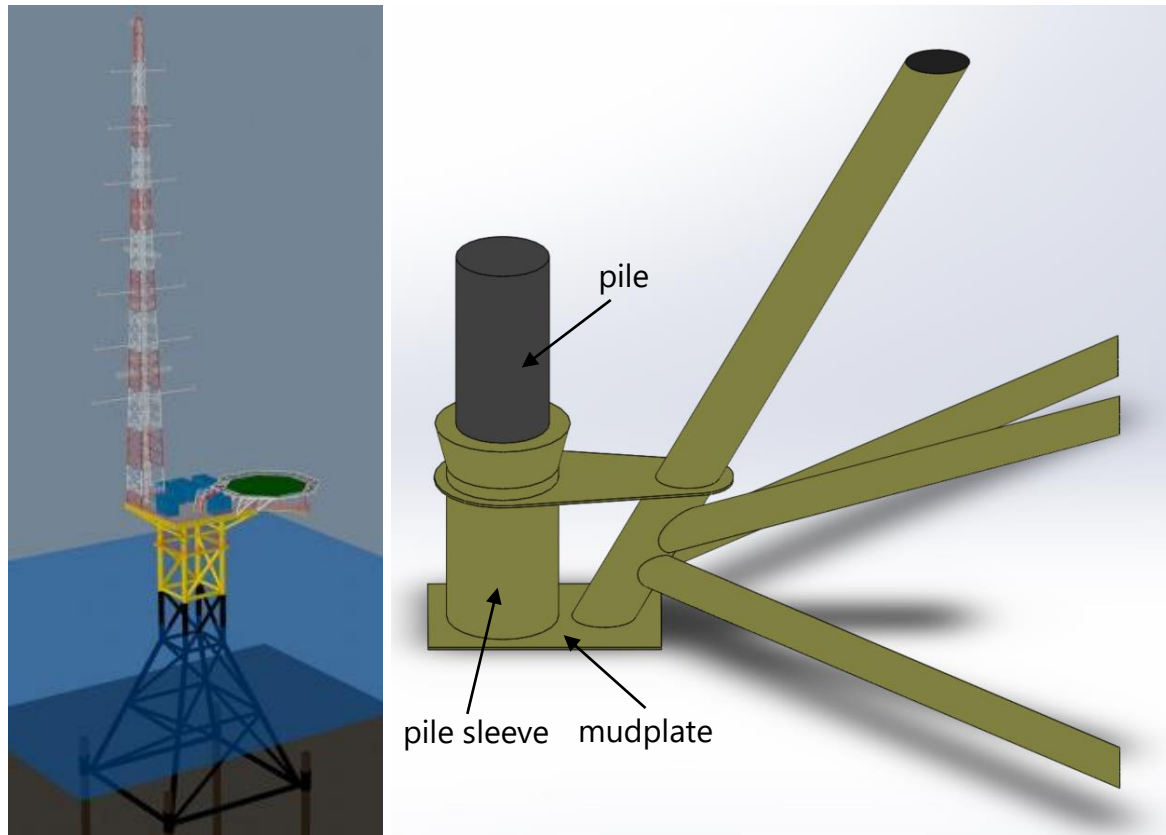


Abbildung 34: FINO 1 Plattform (links), Geometrie für die Simulation (rechts)

Wie bereits erwähnt, wurden zunächst für die Strömungssimulation optimierte CAD Geometrien erstellt. Abbildung 34 zeigt die CAD Geometrie eines Viertels der Plattformgründung. Bei Installation steht die Plattform auf der sogenannten *mudplate* während durch die sogenannten *pile sleeves* die Pfähle, oder *piles* gerammt werden. Diese CAD Geometrien werden in ein ausreichend großes Strömungsgebiet integriert. Anschließend wird für das gesamte Strömungsgebiet räumlich ein Diskretisierungsgitter erzeugt. Die nötige Gitterfeinheit, also die Größe der einzelnen Zellen, um mögliche Kolkursachen ausreichend darzustellen wurde in der Voruntersuchung bestimmt. Der grundsätzliche Aufbau des Strömungsgebietes ist in Abbildung 35 zu sehen. In Längsrichtung (Wellenlaufrichtung) ist das Gebiet aufgeteilt in ein Welleninitialisierungsgebiet mit der Länge einer Wellenlänge, einer Objektzone, in der der Strömungskörper in einem lokal verfeinerten Netz angeordnet ist, sowie nach einer weiteren Wellenlänge das Dämpfungsgebiet von einer Wellenlänge. In Vertikalrichtung liegt der Nullpunkt im Wasserspiegel der Ruhelage. In der Nähe der freien Wasseroberfläche ist das Diskretisierungsgitter ebenfalls feiner als im Fernfeld, um die Wellen besser aufzulösen. Am Meeresgrund und auf dem Objekt sind zusätzlich

flache Prismen Schichten aufgebracht, um die Grenzschichten fein genug aufzulösen. In den hier durchgeführten Simulationen werden sogenannte Wandfunktionen für die Auflösung der Grenzschicht verwendet. Wandfunktionen nutzen Vorkenntnisse des Geschwindigkeitsverlaufes in Wandnähe und werden aus rechner-ökonomischen Gründen verwandt. Dazu sollte der dimensionslose Wandabstand (y^+) in der ersten Prismenzelle einen bestimmten Wertebereich ($30 < y^+ < 300$) nicht verlassen. Die Anzahl der Prismen Zellen wird anschließend anhand eines Wachstumsfaktors (ca. 1.2) und der Umgebungszellengröße bestimmt.

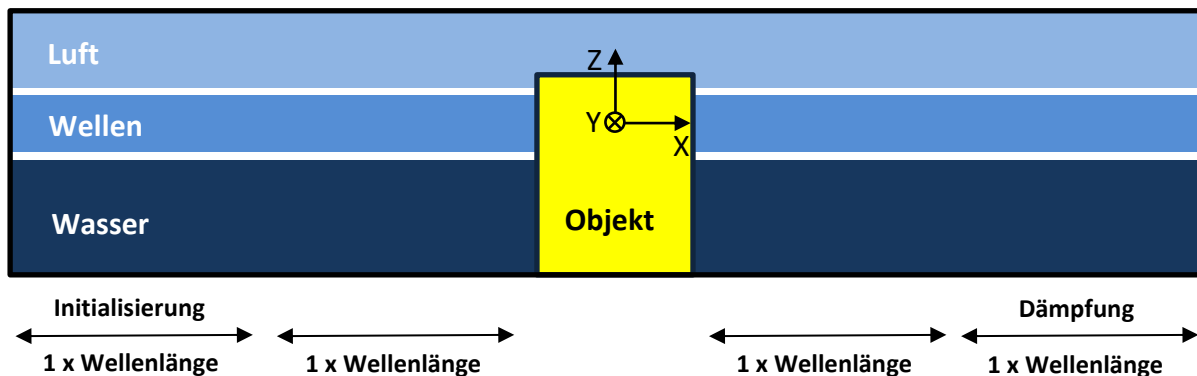


Abbildung 35: Einteilung des Strömungsgebietes

Die Längserstreckung des Berechnungsgebietes ist dementsprechend von der Wellenlänge abhängig, die Verfeinerung in Höhenrichtung in der Wellenzone ist wellenhöhenabhängig. Für die Wellenzone gilt die Faustformel, dass eine Wellenhöhe mit 20 Zellen und eine Wellenlänge mit 100 Zellen aufzulösen ist, um ein akzeptables Wellenbild zu erhalten. Daraus ergibt sich je nach Wellenlänge bzw. -höhe ein Strömungsgebiet zwischen 166 und 830 Metern Länge und ungefähr fünf Millionen Zellen. Als Randbedingungen wird in Längsrichtung am Strömungseinlass (Inlet) eine Dirichlet-Randbedingung mit vorgegebener Geschwindigkeit benutzt. Am Strömungsauslass (Outlet) gilt eine Neumann-Randbedingung und an den seitlichen Begrenzungen des Strömungsgebietes eine Symmetrie-Randbedingung. Am Meeresboden sowie auf dem Objekt (der Plattformgründung) werden jeweils eine Neumann-Randbedingung für den Druck, sowie No-Slip-Randbedingungen mit Wandfunktionen für die übrigen Parameter angegeben. An der oberen Grenze des Strömungsgebietes werden Free-Slip Randbedingungen benutzt. Abbildung 36 zeigt exemplarisch eine dreidimensionale Ansicht des Strömungsgebietes mit einem Viertel der FINO 1 Gründung als Objekt und einer Wellenhöhe von vier Metern. Um die Courant-Zahl möglichst kleiner als den Wert 1 zu halten, aber die Simulation trotzdem möglichst schnell durchzuführen, beträgt die Zeitschrittweite einer üblichen Simulation 0.02 Sekunden. Daraus ergibt sich bei Nutzung von vier Rechnern (Informationen zu den Rechnern siehe Kapitel 2) mit jeweils 12 Prozessoren parallel, also insgesamt 48

Prozessoren, eine Rechenzeit von 12 Minuten für jede Sekunde Simulationszeit. Bei einer üblichen Simulationszeit von 60 Sekunden benötigt eine Simulation also ungefähr 12 Stunden reine Rechenzeit.

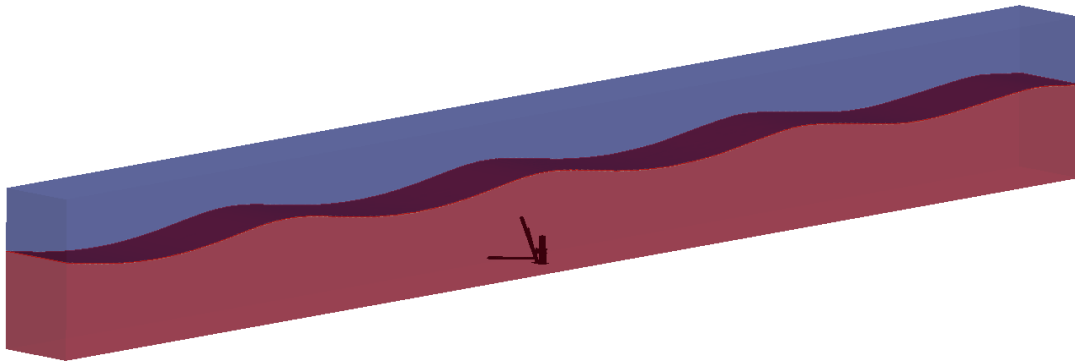


Abbildung 36: Strömungsgebiet mit Objekt

5.2.3 Ergebnisse

Durchgeführt wurden zunächst Simulationen der Umströmung eines Monopiles mit Durchmesser 1.5 Metern, was den Beinen der FINO 1 Plattform entspricht. Es werden Wellenhöhen von 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9 & 10 Metern untersucht. Anschließend wurde ein Viertel der realen Gründungsstruktur der FINO 1, hier exemplarisch der mit Sensoren bestückte südliche Pfahl, bei einer seitlichen Anströmung, die etwa einer Wellenaufrichtung von 270° aus West entspricht. Insgesamt wurden für diesen Teil der Arbeit etwa 40 Simulationen durchgeführt, wobei die Hälfte davon, also etwa 20 Simulationen, für die Einrichtung der endgültigen Simulationsumgebung in Hinblick auf Netzfeinheit, Netzqualität, Vergleichbarkeit und Ergebnisqualität notwendig war.

Abbildung 37 gibt einen visuellen Überblick über ein Simulationsergebnis der Umströmung des einfachen Pfahles bei einer Wellenhöhe von 8 Metern und einer Wellenperiode von 12.6 Sekunden. Die Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf einer gesamten Wellenperiode beginnend bei 40.6 Sekunden Simulationszeit bis 53.2 Sekunden Simulationszeit. Zu sehen ist in der Mitte der Zylinder, am oberen Rand in rosa ggf. die Wasseroberfläche (nur im Wellental), das Q Kriterium in Türkis vor allem um den Pfahl und in einer Farbskalierung (Farbskala siehe linker Rand) die Wandschubspannung am Meeresgrund von 0 bis 10 N/mm^2 .

Grundsätzlich kann man erkennen, dass die Wandschubspannungen bei einem Wellental ($t = 43.8 \text{ s}$) und bei einem Wellenberg ($t = 50.0 \text{ s}$) im Bereich von ca. 5 N/mm^2 liegen und damit deutlich höher sind als zu den Übergangzeitpunkten zwischen

Wellental und Wellenberg bei 40.6, 47.0 und 63.2 Sekunden. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Orbitalgeschwindigkeiten unter Wellental und Wellenberg am höchsten sind. Außerdem ist an den Bereichen mit Q-Kriterium Werten größer null zu sehen, dass es eine deutliche Wirbelablösung jeweils in dem Zeitraum der größten Geschwindigkeiten unter dem Wellental bzw. Wellenberg gibt.

Bereiche mit erhöhter Wandschubspannung findet man an den seitlichen Rändern des Pfahls durch die Beschleunigung der Strömung um den Strömungskörper aber auch unter den erhöhten Wirbelauflösern. Deutlich zu sehen ist unter dem Wellental ($t = 43.8$ s) auf der linken Seite (Strömungsrichtung von rechts nach links) und unter dem Wellenberg ($t = 50.0$ s) auf der rechten Seite (Strömungsrichtung von links nach rechts) eine Fläche mit erhöhter Wandschubspannung unter dem frisch abgelösten Wirbel. Bei feinerer zeitlicher Auflösung kann man exakt beobachten, wie die Wirbel und mit ihnen die Bereiche erhöhter Wandschubspannung nach der Ablösung in Strömungsrichtung vom Pfahl wegwandern.

Wenig bis gar nicht zu erkennen ist der Hufeisenwirbel, was vor allem daran liegt, dass die Strömung bzw. die Orbitalgeschwindigkeit in Wellenberg bzw. Wellental immer nur für einen kurzen Zeitraum in die gleiche Richtung verläuft. Wie sich in der Voruntersuchung gezeigt hat braucht der Hufeisenwirbel eine gewisse Zeit, um sich vollständig auszubilden.

Vergleicht man die Simulation des kleinen Pfahles mit einer äquivalenten Simulation mit dem Pfahldurchmesser von FINO 3 in Abbildung 38 ($d = 4.5$ m), fällt auf, dass bei dem größeren Pfahl von FINO 3 vor allem die Wirbelablösung wesentlich weniger und mit nahezu keiner Erhöhung der Wandschubspannung auftritt. Zu erklären ist dies dadurch, dass in der Zeit in der die Orbitalgeschwindigkeit in eine Richtung geht der Zylinder nicht ausreichend umströmt wird um eine Wirbelablösung hervorzurufen. Mathematisch zeigt sich dieser Zusammenhang dadurch, dass die Ablösefrequenz kleiner als die Wellenfrequenz bzw. Wellenperiode ist.

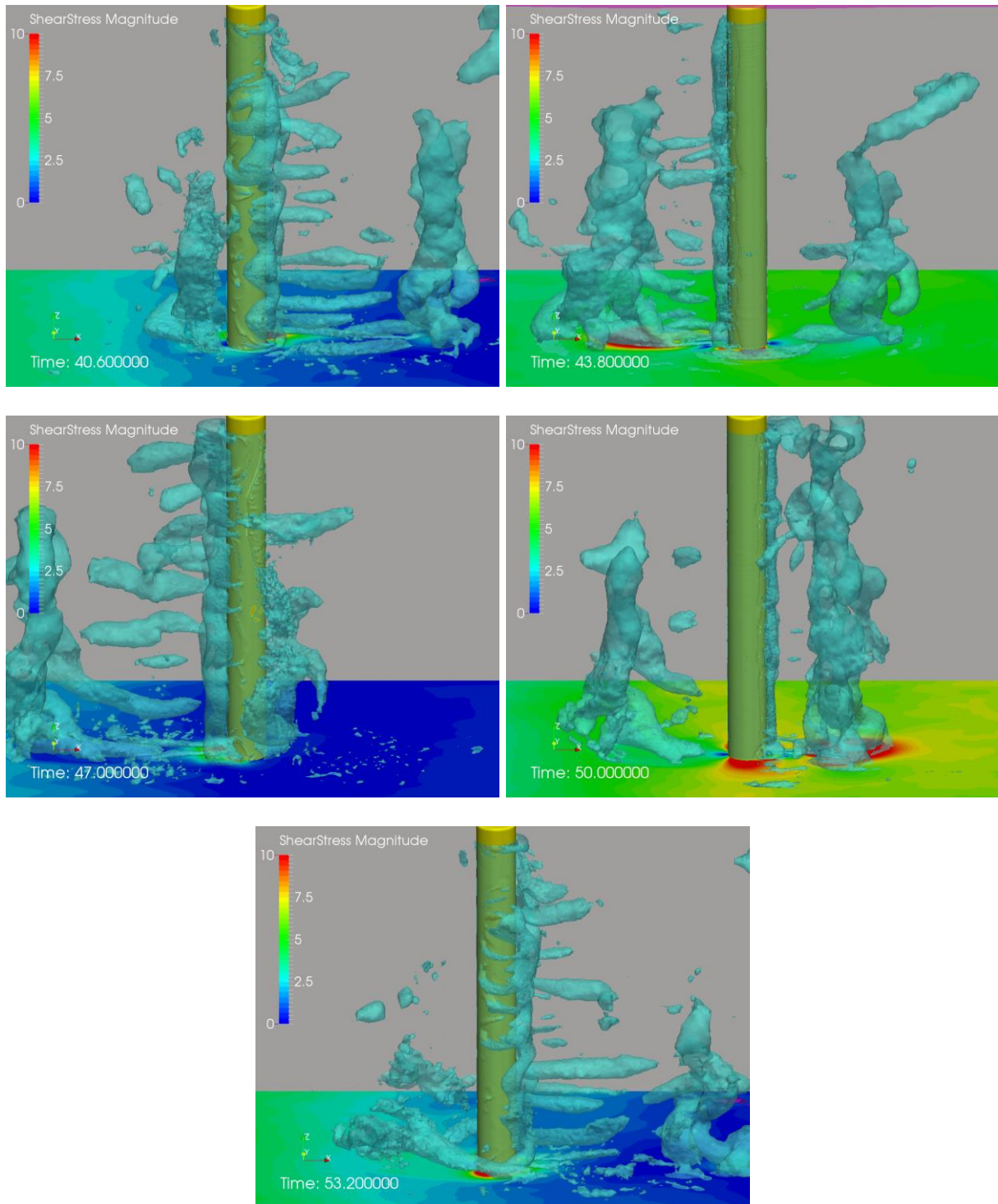


Abbildung 37: Periodendurchlauf einer 8m Welle mit einer Periode von 12.6s bei einem Pfahl mit 1.5m Durchmesser

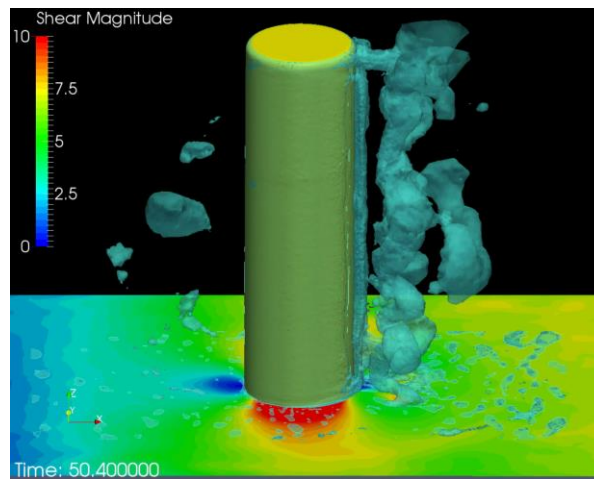


Abbildung 38: FINO 3 Pfahl mit 8m Welle mit einer Periode von 12.6s bei einem Wellenberg

Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, entsteht Kolk in dem momentanen Zustand nur noch oberhalb einer signifikanten Wellenhöhe von 4.8m. Um zu verstehen, was die Unterschiede bei zunehmender Wellenhöhe sind wurden verschiedene Wellenhöhen jeweils mit dem einzelnen Pfahl als auch mit der komplexen Geometrie untersucht. Ein wesentlicher Unterschied zwischen Simulation und Realität ist, dass in der Realität ein Sturmereignis mit einer gewissen signifikanten Wellenhöhe eine Vielzahl von Einzelwellen verschiedener Wellenhöhen und Wellenlängen enthält. In der Simulation hingegen, wird nur eine Wellenhöhe einer regelmäßigen Welle berechnet. Um dies zu berücksichtigen werden die Parameter eines Sturmereignisses und einer simulierten regelmäßigen Welle, bei der die Wellenhöhe der signifikanten Wellenhöhe des Sturmereignisses entspricht, verglichen. Es zeigt sich, dass im realen Seegang vor allem die Orbitalgeschwindigkeiten in der Nähe des Meeresgrundes höher sind als bei der simulierten Welle. Wie in Tabelle 6 zu sehen sind andere Parameter, wie die Keulegan Carpenter Zahl, ebenfalls unterschiedlich. Es ist daher zu erwarten, dass wesentliche Unterschiede im Simulationsergebnis erst bei einer höheren Wellenhöhe als den genannten 4.8m auftreten.

Tabelle 6: Vergleich Wellensimulation zu realen Seegang

Parameter	Stokes 2te Ordnung	Stokes 5te Ordnung (Simulation)	Spektrum FINO 1 29.01.2015
Hs [m]	6	6	5.99
U [m/s]	1.33 – 1.45	ca. 1.3	2.05
T [s]	10.00	10.00	12.50
KC	8.00	7.50	14.64

Für die Auswertung der Simulationen bei verschiedenen Wellenhöhen wurde ein Parameter eingeführt, der beschreibt, wie hoch die Schubspannungen im Mittel in den Bereichen erhöhter Schubspannungen sind. Dazu wird eine Fläche des Meeresgrundes um die Gründungsstruktur in eine Anzahl i von einzelnen Teilen, sogenannte Zellen, zerteilt. In jeder Zelle i wird die Schubspannung τ_i zu jedem Zeitschritt der Simulation berechnet. Anschließend werden Median $\bar{\tau}$ und Standardabweichung τ_σ über alle Zellen für jeden Zeitschritt bestimmt. Der Median ist gleichzeitig in jedem Zeitschritt der Wert der ungestörten Schubspannung τ_∞ für den Fall, dass keine Gründungsstruktur die Umgebung beeinflusst $\bar{\tau} = \tau_\infty$. Für alle Zellen n , deren Wert größer als der Median plus zweimal die Standardabweichung $\tau_{+\infty}(n)$ ist wird nun der Mittelwert bestimmt und mit signifikanter Schubspannung bezeichnet. Um Darstellungen zwischen verschiedenen Wellenhöhen zu vereinheitlichen wird noch der Verstärkungsfaktor τ_{Amp} als das Verhältnis zwischen erhöhter Schubspannung $\tau_{+\infty}$ und ungestörter Schubspannung τ_∞ berechnet.

Ungestörte Schubspannung

$$\bar{\tau}_i = \tau_\infty = \frac{\tau_{i+1}}{2}$$

Erhöhte Schubspannung

$$\tau_{+\infty}(n_i) = \{i \mid \tau(i) > \tau_\infty + 2 * \tau_\sigma\}$$

Signifikante Schubspannung

$$\tau_{sign} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n \tau_{+\infty}(n_i)$$

Verstärkungsfaktor

$$\tau_{Amp} = \frac{\tau_{+\infty}(n_i)}{\tau_\infty}$$

Für jede Wellenhöhe erhält man den Verlauf der signifikanten Schubspannung (Shear Stress Significant) über der Zeit wie in Abbildung 39 dargestellt. Zusätzlich ist in Abbildung 39 noch die ungestörte Schubspannung (Shear Stress Median) eingezeichnet. Deutlich zu erkennen ist, dass sowohl die ungestörte als auch die signifikante Schubspannung periodisch zu- bzw. abnehmen. Bei genauerer Untersuchung zeigt sich, dass die Bereiche mit den höchsten Peaks zu einem Wellenberg bzw. die zweithöchsten Peaks zu einem Wellental gehören. Dieses periodische Verhalten wurde bereits vorher im Periodendurchlauf, Abbildung 37, deutlich. Zwischen Wellenberg und Wellental sinkt die mittlere Schubspannung nahezu auf null, was daran liegt, dass sich die Richtung der Orbitalgeschwindigkeit umkehrt.

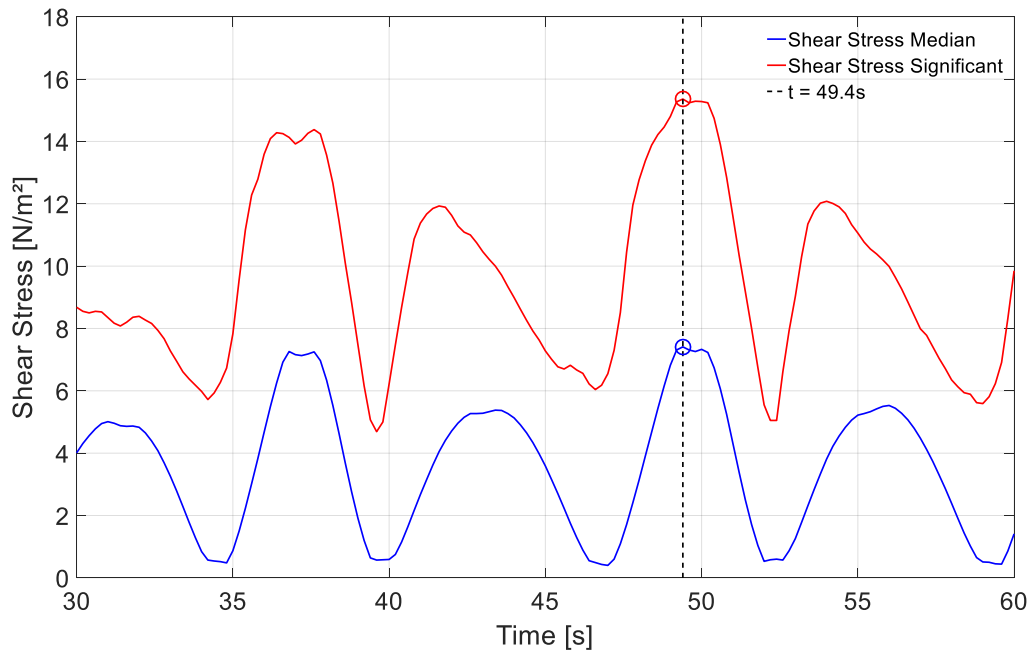


Abbildung 39: Verlauf der Schubspannung bei einer 8m Welle um einen Pfahl

Zum Vergleich zwischen den Wellenhöhen wird der jeweils größte Wert der signifikanten Schubspannung, meist unter dem Wellenberg, bestimmt. Für die Welle der Höhe 8m sind in Abbildung 39 der Medianwert und der signifikante Wert nach obiger Definition bei $t = 49.4\text{s}$ markiert.

Abbildung 40 zeigt das Ergebnis des Wellenhöhenvergleiches. Aufgetragen ist die mittlere Schubspannung und die signifikante Schubspannung jeweils von dem Pfahl, dem Jacket ohne Kolkloch und dem Jacket mit Kolkloch. Abbildung 41, Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen einen Konturplot des Verstärkungsfaktors bei 4 Meter, 6 Meter und 8 Meter Wellenhöhe jeweils für den Pfahl, das Jacket ohne Kolkloch und das

Jacket mit Kolkloch. Ein Verstärkungsfaktor mit Betrag eins entspricht der ungestörten Schubspannung.

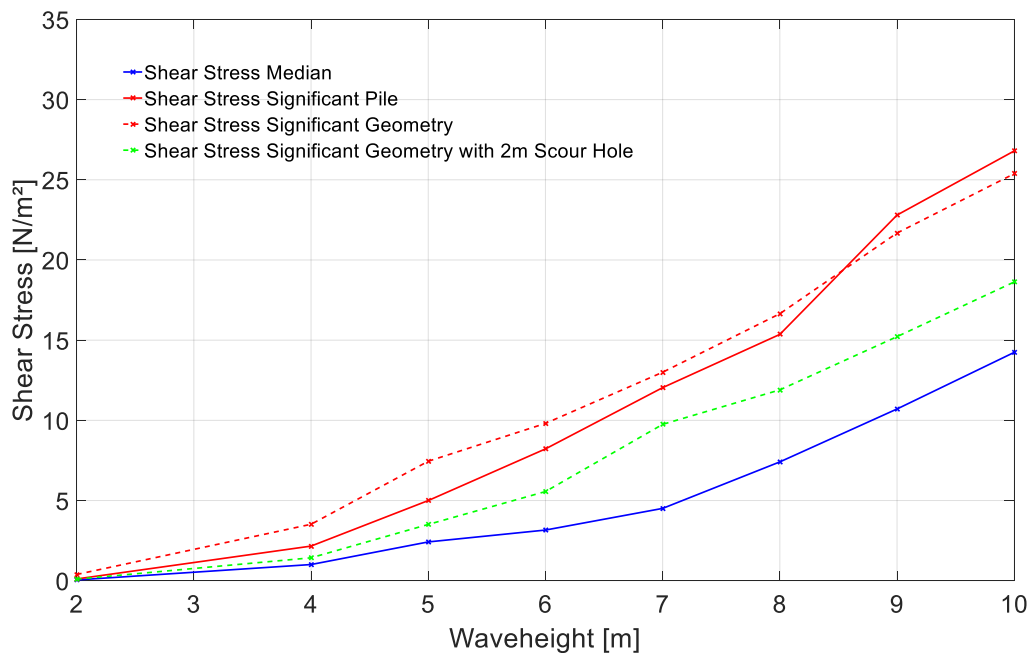


Abbildung 40: Signifikante Schubspannung bei verschiedenen Wellenhöhen

Sowohl die ungestörte Schubspannung auf der untersuchten Fläche als auch die signifikante Schubspannung nehmen mit steigender Wellenhöhe zu. Ab vier bis fünf Metern Wellenhöhe nimmt dabei die signifikante Schubspannung stärker zu als die ungestörte, was zu den Ergebnissen aus der Messung passt, dass Kolk in einem späten Stadium erst ab einer gewissen Wellenhöhe entsteht. Vergleicht man den Graphen der signifikanten Schubspannung für den einfachen Pfahl und das Jacket, ist zu erkennen, dass das Jacket einen leicht erhöhten Wert aufweist. Hiervon ausgenommen sind lediglich sehr große Wellenhöhen. Hierfür können sowohl die Mudplate als auch die Querstreben ursächlich sein. Weitere Untersuchungen zeigen, dass die Mudplate nur einen Einfluss auf die Schubspannungen direkt um den Pfahl hat. Vor allem die Wirbelablösung und die damit erhöhte Schubspannung in einiger Entfernung zum Pfahl ist hiervon nicht beeinflusst. Die zusätzlichen Querstreben jedoch verursachen eine starke Veränderung der Schubspannungs-, Wirbel- und Strömungsverhältnisse. Dadurch ist die signifikante Schubspannung bei Wellenhöhen bis ca. 8 Meter um das Jacket etwas höher. Vor allem aber gibt es zusätzliche lokale Effekte, nämlich lokal erhöhte Verstärkungen der Schubspannung unter den Querstreben und innerhalb des Jackets. Dieses ist vor allem im Vergleich der Verstärkung bei verschiedenen Wellenhöhen von Abbildung 41 bis Abbildung 43 ersichtlich. Die örtliche Verstärkung der Schubspannung vom einfachen Pfahl (jeweils oben) zum Jacket (jeweils unten links) verändert sich deutlich. Bei Wellenhöhen über 8 Meter ist die signifikante

Schubspannung um den einfachen Pfahl etwas höher als die um das Jacket. Wie in Abbildung 43 ersichtlich, findet die klassische Wirbelablösung um den einfachen Pfahl wesentlich deutlicher statt als bei dem Jacket. Dieser Effekt verdeutlicht sich mit zunehmender Wellenhöhe und sorgt dafür, dass innerhalb des Wirbels die Schubspannungen so stark erhöht sind, dass auch die signifikante Schubspannung im Vergleich zum Jacket steigt.

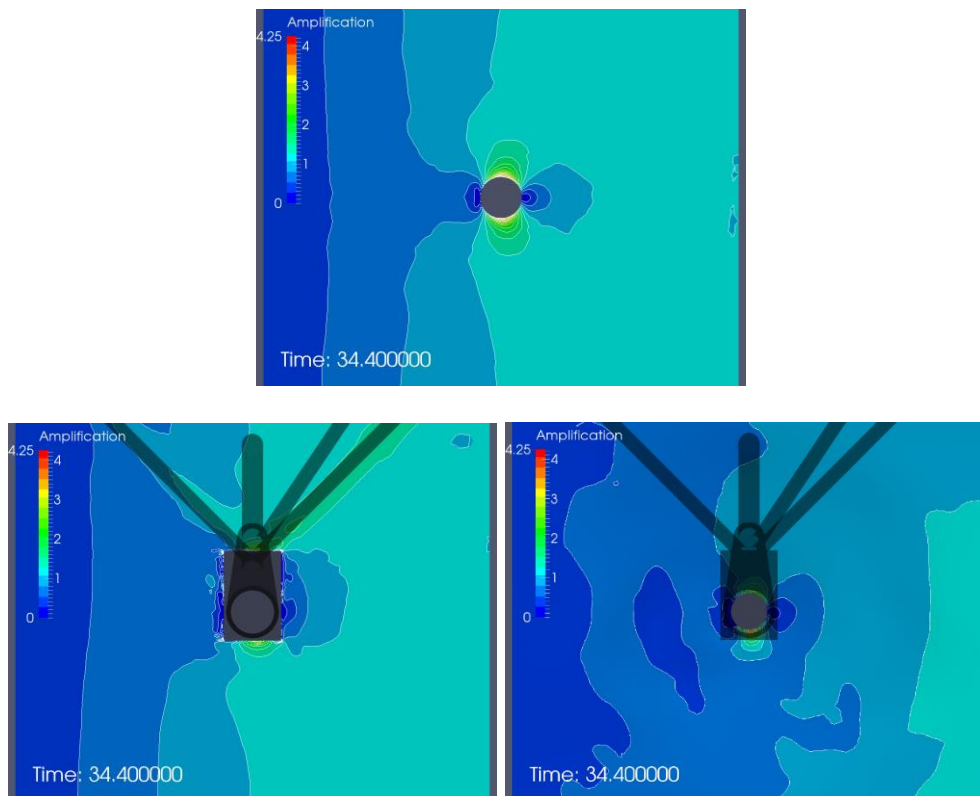


Abbildung 41: Verstärkungsfaktor bei 4 Meter Wellenhöhe für den Pfahl (oben), das Jacket (links) und das Jacket mit Kolkloch (rechts)



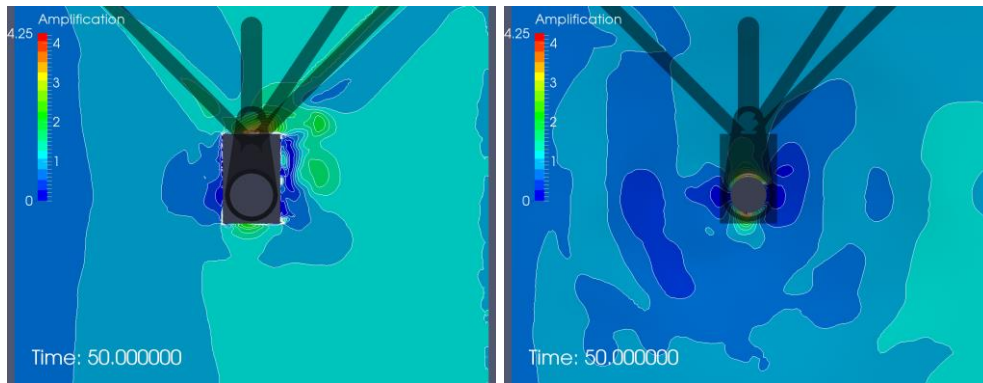


Abbildung 42: Verstärkungsfaktor bei 6 Meter Wellenhöhe für den Pfahl (oben), das Jacket (links) und das Jacket mit Kolkloch (rechts)

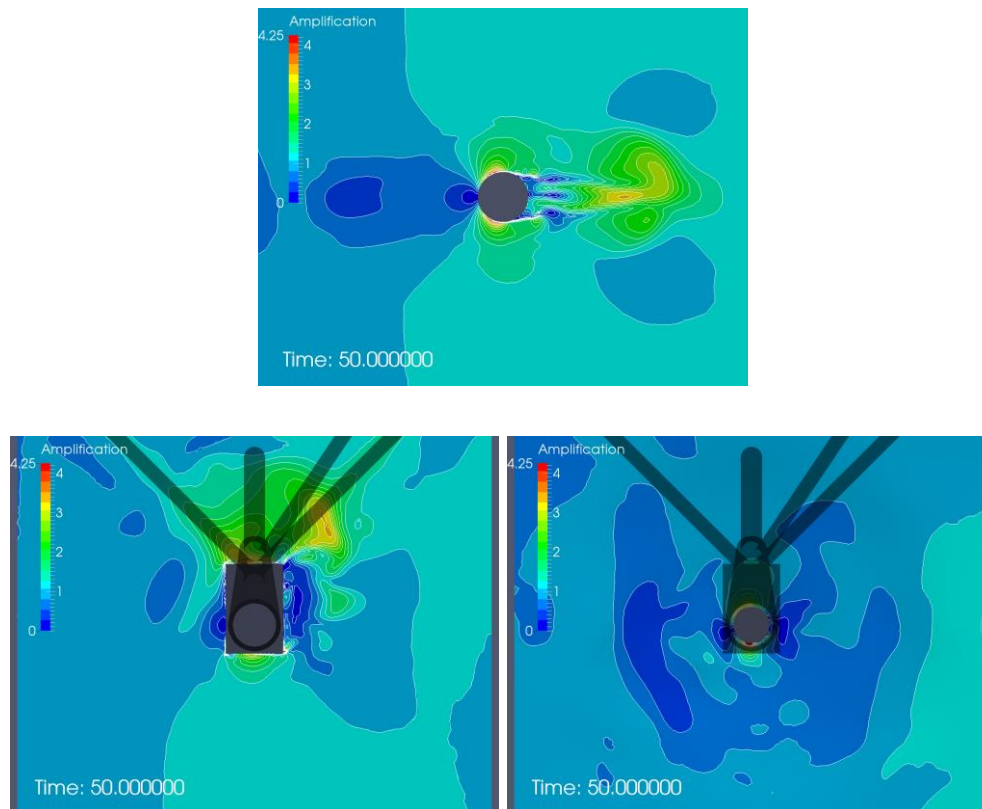


Abbildung 43: Verstärkungsfaktor bei 8 Meter Wellenhöhe für den Pfahl (oben), das Jacket (links) und das Jacket mit Kolkloch (rechts)

Vergleicht man die Verstärkung der Schubspannung um das Jacket ohne Kolkloch (jeweils unten links) und mit Kolkloch (jeweils unten rechts), ist deutlich ersichtlich, dass mit Kolkloch die Verstärkung deutlich verringert, im Großteil um das Bein und unter den Streben sogar annähernd eins, also nicht vorhanden ist. Als Kolkloch für die Simulationen wurde hierbei der am 01.08.2017 vermessene Meeresboden, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, verwendet. Dieses Ergebnis ist im Einklang mit der Beobachtung aus den Messwerten, dass sich die Kolkbildung im ausgekolkten Zustand einem Gleichgewichtszustand nähert, bei dem auch bei großen Wellenhöhen kein weiterer Kolk entsteht.

Die signifikante Schubspannung bzw. der Verstärkungsfaktor kann Aufschluss darüber geben, wo Kolk entstehen wird. Insgesamt steigt die Schubspannung und damit auch die Neigung zur Kolkentwicklung mit zunehmender Wellenhöhe und sinkt mit zunehmender Kolkentiefe. Vor allem ab ca. 5 Meter Wellenhöhe steigt die signifikante Schubspannung im Vergleich zur ungestörten Situation stärker an. Der Vergleich zwischen einfachem Pfahl und Jacket-Konstruktion zeigt, dass bei dem Jacket, wie es bei FINO 1 vorliegt, die gefährdeten Bereiche sowohl um die Gründungspfähle selbst, aber auch im Inneren der Jacket-Konstruktion im Bereich zwischen den Querstreben im Nahbereich der Gründungspfähle liegen.

5.2.4 Zusammenfassung

Die Untersuchung und Bewertung der Kolk-verursachenden Strömungsphänomene wurde hier im Wesentlichen an Hand der am Gewässerboden auftretenden Schubspannungen und mit dem Q-Kriterium vorgenommen. Dabei ist das Q-Kriterium eine Quantifizierung der Abweichung vom Gleichgewichtszustand von Rotation und Schubspannung.

Es wurde im Wesentlichen festgestellt:

- Durch die Offshore-Gründungen werden am Gewässerboden signifikante Schubspannungen generiert.
- Diese Schubspannungen steigen mit zunehmender Seegangshöhe exponentiell.
- Bei kleineren Pfahldurchmessern (FINO 1) treten in oszillierender Strömung größere Schubspannungen am Gewässerboden auf als bei größeren Durchmessern (FINO 3).
- Bei einer Gründung, die bereits ausgekolkt ist, sind die auftretenden Schubspannungen deutlich kleiner als bei nicht ausgekolkten Gründungen.

5.3 Simulation von Kolkvorgängen

Das Kapitel 5.2 dieses Berichtes hat die Untersuchung von Kolkursachen zum Gegenstand. Dies bedeutet im Wesentlichen, dass die Strömungsphänomene untersucht wurden, die für die Ausbildung von Kolk verantwortlich sind. Der Vorgang der Auskolkung wird damit nicht beschrieben. Um dies zu tun, ist es erforderlich, die Bewegung von Bodensediment rechnerisch nachzuvollziehen. Das bisher verwendete Rechenverfahren ist in der Lage, Schubspannungen und Rotation der Strömung rechnerisch zu erfassen, wobei dies in einer Zweiphasenströmung (Luft und Wasser) mit scharfer Trennebene (der freien Wasseroberfläche) erfolgt. Um zusätzlich Sedimenttransport zu berücksichtigen, muss eine weitere Fluidphase, das Sediment, mit berücksichtigt werden.

In der Antragsphase dieses Vorhabens war dies zunächst nicht geplant. Die wissenschaftlichen Publikationen, die der Antragstellung zu Grunde lagen (insbesondere Stahlmann, 2013), wiesen diese Erweiterung nicht auf. Allerdings zeigte sich als Ergebnis der experimentellen Untersuchungen (Kap. 3), dass ein einfacher (linearisierbarer) Zusammenhang zwischen Seegang/Strömung und Kolkumfang nicht vorliegt. Zudem war das Verfahren von Stahlmann nicht auf Jacket-Gründungen wie der FINO 1 anwendbar. Es wurde daher entschieden, ein eigenes Verfahren auf der Basis des vorliegenden Simulationsmodells zu entwickeln. Dieses Verfahren sollte es

gestatten, die Entwicklung von Kolk nachzuvollziehen und musste daher als Dreiphasenmodell (Luft, Wasser, Sediment) implementiert werden.

Vor der Entwicklung einer eigenen Methode zur Simulation von Kolkvorgängen wurden bekannte Verfahren aus der Literatur untersucht. Bei der Untersuchung dieser Methoden ist es wichtig das Gesamtverfahren zu betrachten, d.h. die Eigenschaft Seegang (Luft und Wasser) und Kolk (Sediment) zu simulieren, die Anwendbarkeit auf unsere Geometrien sowie die Rechenzeit für große Zeitskalen. Es wurden drei grundlegend unterschiedliche Konzepte investigated:

- (1) Sedimentsimulation mittels empirischen Gleichungen und expliziter Bodenverformung (Stahlmann 2013)
- (2) Sedimentsimulation mittels Zwei-Phasen-Strömung (Wasser, Sediment) und Inter-Granularem Spannungs-Modell (Cheng et al. 2016)
- (3) Sedimentsimulation mittels modifizierten Bingham-Modellen (Völkner et al. 2015)

Ansatz (1) wurde in der Antragsphase als favorisiertes Verfahren betrachtet und es war geplant, dies lediglich zu erweitern und auf FINO 1 und FINO 3 anzuwenden. Bei diesem Verfahren wird Luft und Wasser und somit Seegang berücksichtigt. Auskolkung wird durch eine Verschiebung des Bodens modelliert und nicht durch Abtragen von Sediment. Der Zusammenhang von Sedimentabtragung und Auskolkung wurde explizit mit einem empirischen Verfahren behandelt.

Die Simulation des Seegangs bringt in diesem Verfahren einige numerische Probleme mit sich, was zu erhöhten Rechenzeiten und ungenaueren Ergebnissen führt. Das Simulationsverfahren des Seegangs (OpenFOAM InterFOAM) ließe sich sehr einfach durch unser eigenes Verfahren ersetzen, welches keine Stabilitätsprobleme hat und rechnereffizienter ist. Für die Simulation des Kolkvorganges wird der Sedimentboden als verformbarer Rand des Strömungsgebietes simuliert. Somit müssen nur die beiden Phasen Luft und Wasser dreidimensional berechnet werden, die dritte Phase (Sediment) wird basierend auf der Finit-Area-Method (FAM) und empirischen Gleichungen nur am Strömungsrand berechnet. Für das Sediment muss daher nur ein zweidimensionales Problem gelöst werden. Die Simulationemethode des Kolkvorgangs erweist sich als sehr ausgereift. Allerdings lässt sich diese Methode nicht auf unsere Geometrien anwenden. Auf Grund des Gitterverformungsansatzes lässt sich kein Gitter erzeugen welches die Untersuchung einer Jacket-Gründung mit Mudplate (siehe Abbildung 34), wie an der FINO1, ermöglicht. Aus diesem Grund muss dieser

Simulationsansatz leider komplett ausgeschlossen werden und wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht praktisch angewandt.

Ansatz (2), als „SedFoam“ bekannt, ermöglicht zunächst nur die Simulation von Auskolkung im Wasser. Eine freie Wasseroberfläche und Seegang wurde bisher nur durch angepasste Druck- und Geschwindigkeits-Randbedingungen am oberen Rand simuliert. Dieser Ansatz ist nur geeignet, wenn es sich um vollgetauchte Geometrien handeln, was bei den FINO Plattformen jedoch nicht der Fall ist. Das Verfahren wurde durch unsere Methode zur vollständigen Simulation von Seegang erfolgreich erweitert. Die Simulation des Kolkvorganges geschieht auf Basis der sogenannten 2-Phasen-Strömung. Hierbei werden Wasser und Sediment als getrennte Phasen betrachtet. Das bedeutet, wenn sich sowohl Sediment als auch Wasser in einer Zelle des Gitters befinden, dann dürfen beide Phase von einander unterschiedliche Geschwindigkeiten besitzen. Dies ist eine sehr genaue Betrachtung des Phänomens, ist aber mit erheblichem Mehraufwand verbunden. Die Sediment-Phase wird außerdem mit Hilfe eines Inter-Granularen Spannungs-Modells berechnet. Dies ist ebenfalls eine sehr genaue physikalische Modellierung, welche deutlich weniger Empirie als der erste Ansatz benötigt. Der eigentliche Transport des Sediments und des Wassers wird mit dem Volume-of-Fluid Ansatz berechnet. Die Entwickler haben erste kleinskalige Simulationen veröffentlicht. Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit Experimenten. Zudem ermöglicht die Verwendung der Volume-of-Fluid Methode eine Anwendbarkeit auf die komplexen FINO-Geometrien inklusive Mudplate. Aus diesem Grund wurde dieser Ansatz ausführlich im Rahmen des Projektes untersucht. Die Untersuchungen haben mehrere Mannmonate eingenommen und werden in Kapitel Ansatz 2: SedFoam 5.3.1 genauer beschrieben.

Der dritte Ansatz bietet die Möglichkeit, das Sediment als nicht-Newtonsche, viskoplastische Fluid-Phase mit angepasster Dichte und Viskosität zu modellieren. Solche Ansätze wurden in Völkner et al. 2015 benutzt, um den Einfluss auf den Meeresgrund zu untersuchen, der bei Offshore-Gründungs-Operationen entsteht. Uns ist allerdings nicht bekannt, dass ein solcher Ansatz für die Berechnung von Auskolkungsvorgängen verwendet wurde. Bisherige Veröffentlichungen ließen eine gute Anwendbarkeit auf die FINO Geometrien erwarten, bei akzeptablen Rechenzeiten. Die korrekte Simulation von Auskolkungsvorgängen galt es zu untersuchen. Die Eigenentwicklung und Untersuchung dieses Ansatzes wird in Kapitel 5.3.2 detaillierter beschrieben.

5.3.1 Ansatz 2: SedFoam

Bei SedFoam handelt es sich um einen aus der Literatur bekannten Verfahren, Cheng (2016), für das auch der Programm-Code zur Verfügung stand. Es ist also möglich, diesen Code in die eigene OpenFOAM-Entwicklung zu integrieren. Dies gelang auch,

wobei ein aufgebauter Kontakt zu den Forschern um Cheng sehr hilfreich war. Chengs Verfahren behandelte wie bereits oben erwähnt nur Zweiphasenströmungen, d.h. es wurde nur Wasser und Sediment berücksichtigt. Eine freie Wasseroberfläche und die Ausbildung von Seegang kann mit dem ursprünglichen Modell nicht berücksichtigt werden. Es war daher geplant, SedFoam um die oben beschriebene eigene Entwicklung eines Verfahrens zur Berücksichtigung von freien Oberflächen und Wellen zu erweitern. Dementsprechend lässt sich das weitere Vorgehen nach erfolgter Integration des Codes in drei Teilschritte unterteilen:

- Untersuchung eines kleinskaligen Strömungs- und Kolkproblems. Kleinskalig heißt hier, dass Strömungsobjekte, etwa der Pfahl einer Offshoregründung, Abmessungen von nur wenigen Zentimetern hat. Auf derartige Anwendungen hatten sich die Entwickler des Verfahrens konzentriert.
- Anwendung des bestehenden Verfahrens auf großskalige Probleme, konkret auf Monopiles mit den Abmessungen der FINO 1/3.
- Erweiterung des Verfahrens zur Berücksichtigung von Seegang und Verbesserung des Laufzeitverhaltens.

Als erste eigene Anwendung sollte der Testfall „Kolk hinter einer Abrisskante“, beschrieben in Breusers 1967, nachgerechnet werden (Größenordnung 20cm). Hierbei handelt es sich um eine einfache zweidimensionale Simulation, welche mit Ergebnissen aus Experimenten verglichen werden kann. Es handelt sich hierbei um eine sehr kleinskalige Simulation, sodass sich z.B. das gesamte Strömungsgebiet innerhalb der Grenzschicht befindet. Erst nach Rücksprache mit den Entwicklern von SedFoam konnten erfolgreiche Simulationen durchgeführt werden. Es zeigte sich, dass es nötig ist zusätzliche Dämpfungsterme vor dem Outlet einzuführen. Leider wurde dies nicht in den Veröffentlichungen der Entwickler erwähnt. Die Ergebnisse sind wie erwartet in guter Übereinstimmung mit der Literatur.

Im nächsten Schritt sollte das Verfahren auf einen großskaligen Fall angewandt werden. Dafür wurde die Simulation von Kolk unter einem horizontalen Zylinder gewählt. Diese Simulation lässt sich weiterhin zweidimensional berechnen und es gibt ebenfalls Vergleichswerte aus Experimenten. Der simulierte Zylinder hat dabei einen Durchmesser von 0.6m und entspricht somit einem Querträger, der FINO1 Jacket-Gründung. Die Grenzschicht macht in diesem Fall nur einen geringen Teil des Strömungsgebietes aus. Wie sich während der Entwicklung herausstellte muss diese Grenzschicht jedoch sehr genau aufgelöst werden, damit das Verfahren funktioniert. Aufgrund bekannter Stabilitätskriterien für numerische Verfahren, benötigt eine feinere räumliche Diskretisierung auch eine feinere zeitliche Diskretisierung. D.h. obwohl nur der Bereich der Grenzschicht lokal räumlich verfeinert wird, muss für das gesamte

Strömungsgebiet ein kleinerer Zeitschritt gewählt werden. Das großskalige Problem muss also mit einem kleinskaligen Zeitschritt berechnet werden. Dies führt zu extrem hohen Rechenzeiten, die sich auch mit dem angeschafften Hochleistungsrechner nicht mehr in praxistauglichen Zeiträumen (Rechenzeiten von 1 Tag bis 1 Woche) durchrechnen lassen. Bei einer späteren dreidimensionalen Berechnung, wären die Simulationszeiten zusätzlich nochmal um ein vielfaches höher. Des Weiteren konnten trotz kleiner Zeitschritte keine plausiblen Ergebnisse erzeugt werden. Es wird vermutet, dass weitere Verkleinerungen des Zeitschrittes irgendwann zu sinnvollen Ergebnissen geführt hätte. Die dafür nötigen Rechenzeiten sind aber nicht mit der Projektlaufzeit vereinbar. Zudem ist dadurch die wirtschaftliche Anwendbarkeit auf unsere großskaligen dreidimensionalen FINO-Geometrien ausgeschlossen. Aus diesen Gründen ist das Original-Verfahren ungeeignet für die Untersuchung der FINO Plattformen.

Zwischenbemerkung: Strömungsprobleme werden anhand der sogenannten Reynoldszahl klassifiziert, die zum Produkt aus Strömungsgeschwindigkeit und signifikanter Abmessung proportional ist. Strömungen um einen Pfahl mit einem Durchmesser um 8 cm bei einer Geschwindigkeit von 0.5 m/s gehören also einer ganz anderen Klasse an als Strömungsprobleme um einen Pfahldurchmesser von 3 m bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 2 m/s. Dies ist der Grund dafür, dass ein Lösungsverfahren, das für ein kleinskaliges Strömungsproblem gut funktioniert, bei einem großskaligen Problem versagt, auch wenn die Geometrien recht ähnlich sind.

Folglich wurde als nächstes versucht das Verfahren zu stabilisieren, sodass größere Zeitschritte und damit eine geringere Berechnungszeit möglich sind. Das Verfahren konnte an mehreren Stellen numerisch stabilisiert werden. Für die Gleichung der kinetischen Theorie war dies allerdings nicht möglich. Diese Gleichung beinhaltet viele Terme mit nicht linearem Auftreten der zu lösenden Variable, wodurch das Lösungsverhalten dieser Gleichung instabiler als bei den anderen Gleichungen ist. Letztendlich konnte deshalb nur eine Halbierung der Rechenzeit erreicht werden. Somit sind die Rechenzeiten weiterhin deutlich zu groß um eine dreidimensionale Untersuchung mit Seegang und großskaligen Zeitverläufen zu simulieren. Aus diesem Grund musste dieser Ansatz für unsere Simulationen als ungeeignet eingeordnet werden.

Nach Abschluss unserer eigenen Untersuchungen, haben die Entwickler von SedFoam eine dreidimensionale Simulation des Auskolkungsvorganges um einen vertikalen Zylinder in konstanter Strömung veröffentlicht. Die veröffentlichten Resultate stehen im Einklang mit unseren eigenen Untersuchungen, d.h. auch die Entwickler benötigen extrem hohe Rechenzeiten für dreidimensionale Probleme. Zudem zeigten die

veröffentlichten Simulationsergebnisse, dass nicht alle Kolkphänomene korrekt aufgelöst werden. So entstand fälschlicherweise kein Kolk auf der stromabgewandten Seite des Zylinders.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass dieses Verfahren zunächst sehr geeignet erschien, die detaillierten Untersuchungen zeigten aber, dass das Verfahren, aufgrund extrem hoher Rechenzeiten, einiger Stabilitätsprobleme sowie Ungenauigkeiten im Ergebnis ungeeignet für unsere großskaligen Kolk-Simulationen ist.

5.3.2 Entwicklung eines eigenen Simulationskonzepts

Auf der Basis der bislang gemachten Erfahrungen wurde beschlossen, ein eigenes Simulationsverfahren zu entwickeln, das Strömungen mit Luft und Wasser, also freier Wasseroberfläche und Wellenbewegungen, wie auch den Transport von Sediment simulieren kann.

In der Phase der Projektbeantragung war dies in dieser Form nicht geplant. Nach Ansicht der Entwickler war dieser Schritt aber schlichtweg erforderlich. Es war von Anfang an erkennbar, dass der Mehraufwand für diese Eigenentwicklung nur zum Teil aus Projektmitteln kompensiert werden konnte. Dieser Weg wurde aber als unabdingbar bewertet, da alle anderen Ansätze, die bisher verfolgt wurden, nur zu unbefriedigenden Ergebnissen geführt haben.

Bei Sediment handelt es sich genau genommen nicht um ein Fluid. Das Sediment besteht aus kleinen Körnern und die Zwischenräume können teilweise oder vollständig mit einem Fluid wie Wasser oder Luft gefüllt sein. Aus diesem Grund verhält sich das Sediment anders als ein herkömmliches Fluid, in der Fachwelt Newtonsches Fluid genannt. Sediment die Eigenschaft, sich erst zu bewegen, wenn eine kritische Spannung überschritten ist. Der Ansatz der sogenannten Bingham-Modelle, die hier verfolgt wird, modelliert das Sedimentverhalten als Nicht-Newtonsches Fluid. Dadurch kann das vorhandene Lösungsverfahren, das auf Transportgleichungen von Masse und Impuls beruht, weiter verwendet werden, wenn die entsprechenden Terme dieser Gleichungen (die Diffusionsterme) angepasst werden. Nicht-Newtonsche Fluide sind z.B. Zementleim, Zahnpasta oder Ketchup. Dabei ist das grundsätzliche Prinzip sehr einfach: In den Sedimentbereichen, in denen die kritische Schubspannung des Sediments nicht überschritten wird, wird eine sehr hohe Viskosität angenommen (z.B. 10000x höher als Honig), sodass sich das Sediment lokal wie ein Festkörper verhält. In den Bereichen in denen die kritische Schubspannung überschritten ist, wird eine deutlich geringere Viskosität angenommen (teilweise so gering wie bei Wasser). Diese geringere Viskosität ergibt sich aus den lokalen Umgebungsgrößen wie Druck und Geschwindigkeit. Dadurch verhält sich das Sediment eher wie eine Flüssigkeit und kann

vom Wasser abtransportiert werden. Ansätze zur Berechnung der Sedimentviskosität werden z.B. von Drucker-Prager oder von Mises gegeben. Die Implementation eines solchen Verfahrens ist nicht trivial. So ergeben die Sprünge der Materialeigenschaften der Fluide an der Sedimentoberfläche ein unstetiges Verhalten, welches bekannte, aber nur teilweise gelöste numerische Probleme verursacht.

Im Folgenden werden die wesentlichen Bestandteile des neu entwickelten Kolkmodells beschrieben.

Sediment Modellierung:

Zur Modellierung des Sediments wird die Sediment-Viskosität μ_s eingeführt. Diese wird nach von Mises mit folgender Gleichung berechnet

$$\mu_{\text{sed}} = \frac{p_r \sin \varphi + C \cos \varphi}{\sqrt{4J}}$$

Dabei sind p_r ein Referenz-Druck, C die Kohäsion (in unserem Fall ist diese Null), φ der innere Reibungswinkel und J die zweite Invariante des Formänderungsgeschwindigkeits-Tensors. Bei der Kohäsion und dem inneren Reibungswinkel handelt es sich um Materialwerte, die für das Sediment angegeben werden müssen. Für die Berechnung des relativen Drucks ist kein Verfahren bekannt, welches sich auf unseren Lösungsansatz anwenden lässt. Daher wurde ein eigener Ansatz entwickelt der im nachfolgenden Abschnitt beschrieben wird.

Berechnung des relativen Drucks:

Zur Berechnung der Sediment-Viskosität wird der relative Druck benötigt. Der relative Druck entspricht dem statischen Druck abzüglich des hydrostatischen Druckes. An der Sedimentoberfläche ist der relative Druck daher gleich Null und steigt dann mit zunehmender Sedimenttiefe an. Die Berechnung des relativen Druckes ist nicht trivial, da sich die Sedimentoberfläche verformt. Es musste daher ein eigener Ansatz entwickelt werden bei dem eine zusätzliche Poisson-Gleichung gelöst wird. Der neu entwickelte Ansatz liefert sehr gute Ergebnisse. Abbildung 44 zeigt exemplarischen den relativen Druck in der oberen Sedimentschicht.

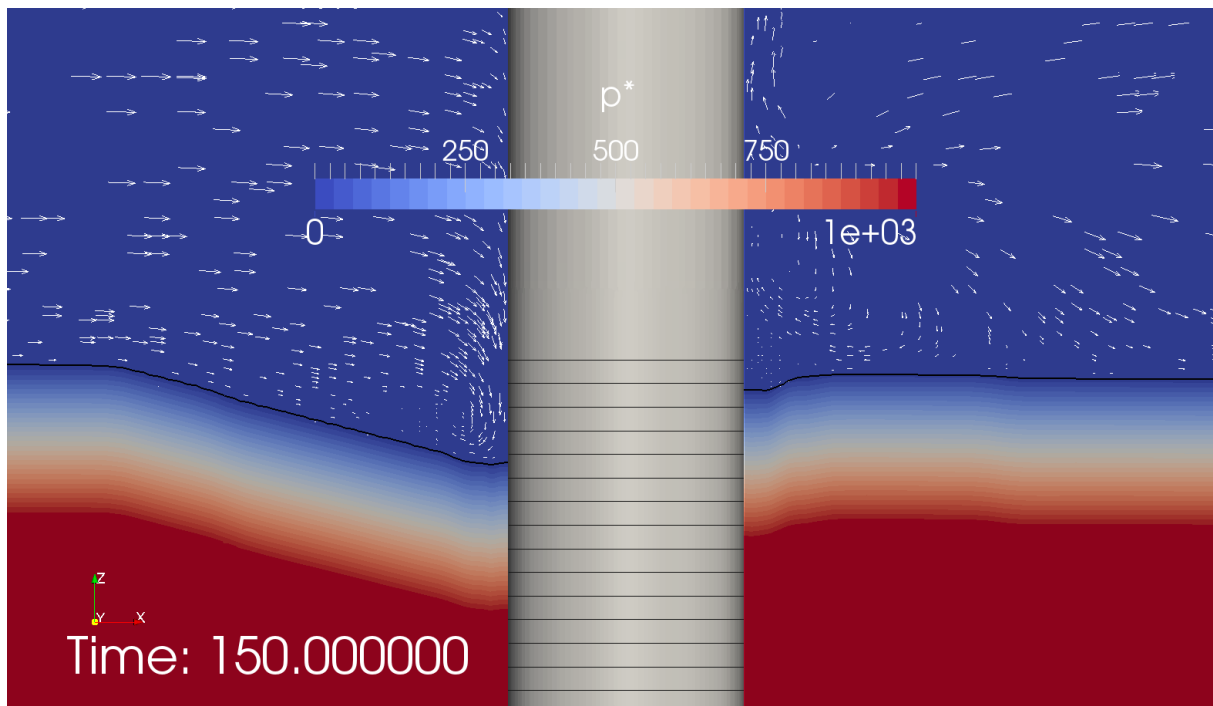


Abbildung 44: Relativer Druck im Sediment berechnet mit dem neuen Ansatz

Suspensions-Modellierung:

Als Suspension wird der Wasser-Bereich direkt über dem Sediment bezeichnet indem Sediment-Partikel suspensionsartig gelöst sind. Der Anteil der Sand-Partikel im Wasser ist zudem so hoch, dass Einfluss auf die Strömung genommen wird und daher ein Modellierungs-Ansatz für dieses Verhalten nötig sein kann. Zur Modellierung der Suspension wird der Ansatz aus Völkner et al. 2015 verwendet. Hiernach wird die Suspensions-Viskosität wie folgt berechnet:

$$\mu_{\text{sus}} = \frac{C_f \rho_s \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}}{\sqrt{4J}}$$

Im Laufe des Projektes wurden Simulationen testweise mit und ohne Suspensions-Modell durchgeführt. Dabei haben sich keine nennenswerten Unterschiede im Ergebnis ergeben. Es ist allerdings unklar ob dies auf eine unzugängliche Suspensionsmodellierung schließen lässt, oder ob in den untersuchten Fällen die Suspension eine untergeordnete Rolle spielt. Zudem ist sich die aktuelle Literatur uneinig bezüglich der Suspensionsmodellierung. So wird in Baykal et al. 2015 explizit auf die Notwendigkeit eines Suspensionsmodells hingewiesen, wohingegen in Roulund 2004 derselbe Testfall ohne Suspensionsmodell erfolgreich simuliert werden kann. Das von uns entwickelte Verfahren schließt sich eher der zuletzt genannten Quelle an, da

in den untersuchten Testfällen alle Phänomene ohne Suspensionsmodell qualitativ gut aufgelöst werden.

Interne Wandfunktion:

Bei der Umströmung von Wänden - in unserem Fall kann der Sedimentboden als Wand betrachtet werden - bildet die Strömung in Wandnähe aufgrund der Haftbedingung (keine Strömungsgeschwindigkeit direkt an der Wand) eine sogenannte Grenzschicht. In diesem Bereich hat die Strömungsgeschwindigkeit einen nicht-linearen Verlauf senkrecht zur Wand. Um diesen Verlauf korrekt zu simulieren gibt es zwei gängige Möglichkeiten. Die Erste verwendet ein sehr feines Gitter mit sogenannten Prismen-Zellen in Wandnähe. Diese Methode liefert gute Ergebnisse, allerdings ist der Rechenaufwand auf Grund der hohen Zellenanzahl extrem hoch und teilweise untragbar für wirtschaftliche Simulationen. Eine andere Methode basiert auf sogenannten Wandfunktionen. Im Vergleich zur ersten Möglichkeit, kann dabei ein grobes Gitter mit deutlich weniger Zellen benutzt werden. Für die korrekte Simulation der Geschwindigkeit und Wandschubspannung werden die turbulente Dissipationsrate oder die spezifische turbulente Dissipationsrate und die Produktionsrate in der wandnächsten Zelle modifiziert und zudem wird die turbulente Viskosität auf der Wand explizit gesetzt. Die Ergebnisse sind unter bestimmten Bedingungen sehr zufriedenstellend, bei gleichzeitig akzeptablen Rechenaufwand. Allerdings wurden diese Wandfunktionen bisher nur für feste Wände entwickelt und implementiert, also dort, wo für das Strömungsgebiet eine Randbedingung implementiert ist. Das heißt, solche Funktionen können bisher nur an Rändern des zu simulierenden Strömungsgebietes angewandt werden. Bei dem Sedimentboden handelt es sich jedoch nicht um einen numerischen Rand, weshalb die bekannten Wandfunktionen hier nicht angewandt werden können.

Aus diesem Grund wurde ein eigener Ansatz entwickelt und implementiert, der es ermöglicht den Sedimentboden als interne Wand zu berücksichtigen. Dabei werden zunächst die Zellflächen markiert, welche näherungsweise Sediment und Wasser voneinander trennen. Nur im Bereich dieser „internen Wandflächen“ werden nun die entsprechenden Parameter modifiziert. Das heißt, die Dissipationsrate und die Produktionsrate werden in der Zelle, die Wasser beinhaltet, gesetzt. Umgekehrt wird in der Zelle, die das Sediment beinhaltet, die turbulente Viskosität explizit gesetzt.

Zur Beurteilung der Ergebnisse wurden verschiedene Simulationen ohne Strömungshindernis durchgeführt. Im ersten Fall wird ein Strömungsgebiet mit echter numerischer Wand und bisheriger Wandfunktion verwendet. Das Strömungsgebiet ist vollständig mit Wasser gefüllt. Die Strömung wird über 5 Sekunden auf eine Zielgeschwindigkeit von 0.4 m/s beschleunigt. Am Inlet und am Outlet wird jeweils eine

Neumann-Randbedingung für die Geschwindigkeit verwendet, sodass sich die Grenzschicht an der Wand frei und ungestört bilden kann. Die Ergebnisse dieser Simulation dienen als Vergleichswerte für die Simulationen mit der neuen internen Wandfunktion.

Für die Simulation mit der neuen internen Wandfunktion wird ein tieferes Strömungsgebiet verwendet. Der hinzugekommene Bereich ist vollständig mit Sediment gefüllt, sodass sich die interne Sediment-Wand an gleicher Position wie die numerische Wand aus dem ersten Testfall befindet. Diese Simulation wurde sowohl mit als auch ohne interne Wandfunktion durchgeführt. Gleichzeitig wird die Sedimentverformung nicht berechnet, sodass sich die interne Wand nicht ändert.

Abbildung 45 stellt die verschiedenen Geschwindigkeitsprofile der Simulationen nach 5s dar. Die grüne Linie ist das Resultat der Simulation mit echter numerischer Wand und Wandfunktion und wird hier als Zielwert betrachtet. Die blaue Linie gibt die Geschwindigkeit der Simulation mit interner Wand und ohne interne Wandfunktion wieder. Es ist eindeutig zu sehen, dass diese Geschwindigkeit erheblich niedriger ist. Dieser Fehler hat erheblichen Einfluss auf die Wirbelbildung an Strömungsobjekten und würde die Kolkbildung deutlich reduzieren. Die gelbe und die rote Linie repräsentieren das Ergebnis der Simulationen mit interner Wand und interner Wandfunktion auf unterschiedlich feinen Gittern. Im Vergleich ist hier eine deutliche Verbesserung des Ergebnisses zu sehen.

Abbildung 46 stellt den wandnahen Bereich der Grenzschicht vergrößert dar. Trotz erheblicher Verbesserung des Geschwindigkeitsprofils zeigt sich hier für den Fachexperten, dass der Geschwindigkeitsgradient noch unterschätzt wird. Da dieser Geschwindigkeitsgradient für die Berechnung der Sediment-Viskosität des Bingham-Modells benötigt wird wurde ein Skalierungs-Faktor im Verfahren eingeführt. Dieser Faktor ermöglicht dem Anwender die Feinjustierung und somit Berichtigung des Geschwindigkeitsgradienten.

An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass es bei der neu entwickelten Methode für interne Wände noch folgende offene Punkte gibt:

- Korrekte Berücksichtigung nicht-orthogonaler Zellen
- Korrekte Berücksichtigung von Zellen mit mehreren internen Wandflächen
- Automatisierte Korrektur des Geschwindigkeitsgradienten für unterschiedlich große Zellen

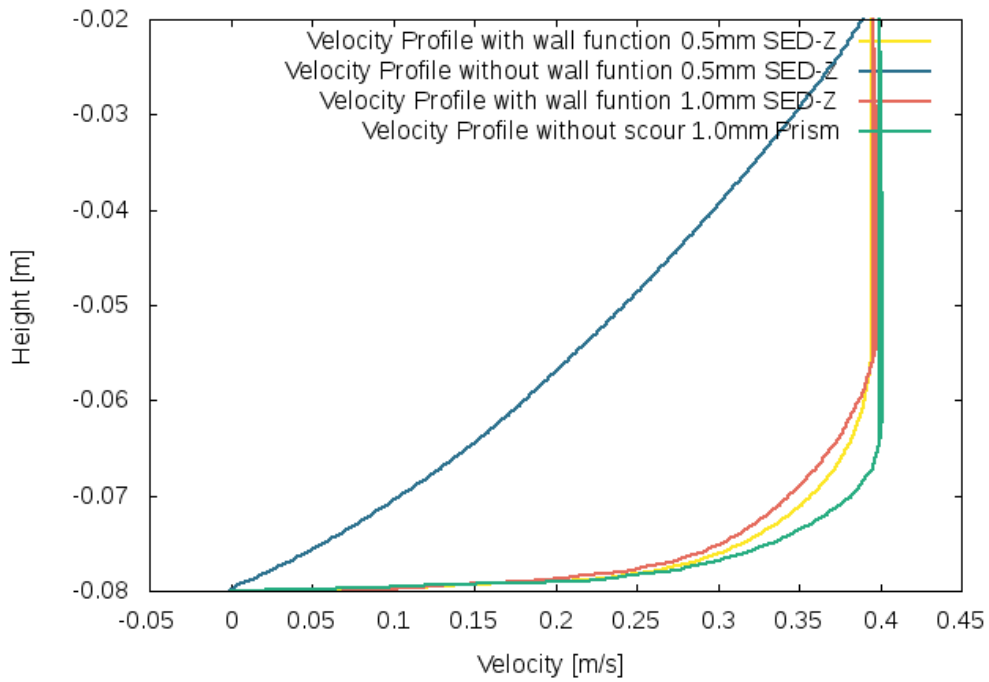


Abbildung 45: Geschwindigkeitsprofil in der Grenzschicht; ohne interne Wandfunktion (blau), mit interner Wandfunktion (gelb), mit interner Wandfunktion und groben Gitter (rot) und mit echter Wand und Wandfunktion (grün)

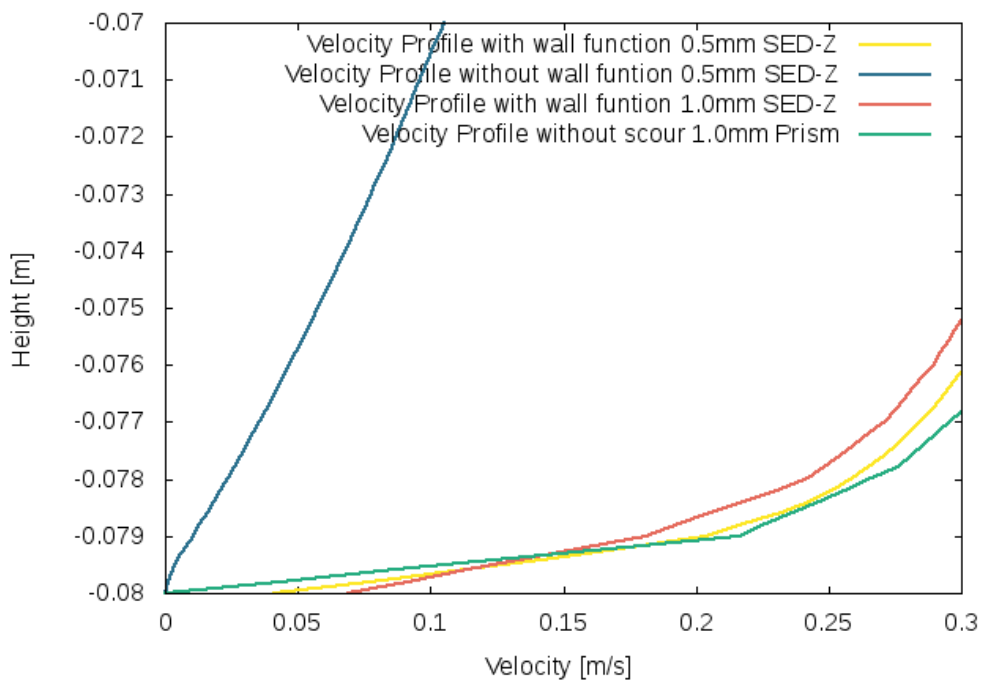


Abbildung 46: Detaillierte Ansicht des Geschwindigkeitsprofils in der Grenzschicht; ohne interne Wandfunktion (blau), mit interner Wandfunktion (gelb), mit interner Wandfunktion und groben Gitter (rot) und mit echter Wand und Wandfunktion (grün)

5.3.3 Simulationsergebnisse des neu entwickelten Verfahrens

Im Folgenden werden die prägnantesten Simulationsergebnisse des neu entwickelten Verfahrens beschrieben. Für eine erste qualitative Einschätzung wurden sowohl Testfälle aus der Literatur, als auch neue Problemstellungen, wie die Anwendung auf die FINO-Geometrien mit den dort vorhandenen Randbedingungen simuliert.

Testfall: Kolk hinter Abrisskante

Bei diesem Testfall geht es um die Berechnung der Sedimentabtragung hinter einer festen Abrisskante. Der Testfall wurde gewählt, da experimentelle Vergleichsdaten, Breusers 1967, vorhanden sind und die Simulationen als ebene Strömung durchgeführt werden können. Abbildung 47 zeigt die Simulationsergebnisse für drei verschiedene Zeitschritte. Das Wasser fließt auf der linken Seite in das Strömungsgebiet und verlässt dieses auf der rechten Seite. Die schwarze Linie stellt die Sedimentoberfläche dar, die Hintergrundfarbe zeigt exemplarisch den Betrag der ermittelten Viskosität für das Bingham Model. Qualitativ ist die berechnete Sedimentoberfläche in sehr guter Übereinstimmung mit dem Experiment. Zudem lief die Simulation extrem stabil bei einer geringen Simulationszeit. An dieser Stelle soll noch einmal erwähnt werden, dass das Verfahren SedFoam schon bei diesem einfachen Fall zusätzliche Dämpfungsterme benötigte um eine stabile Berechnung zu erreichen.

Das Ergebnis dieses ersten Tests war sehr vielversprechend. Das erste wichtige Ziel der Eigenentwicklung wurde voll und ganz erreicht: die erforderliche Rechenzeit hat sich massiv verkürzt (ein Hundertstel der Zeit, die mit SedFoam benötigt wurde). Die Übereinstimmung der Ergebnisse mit Literaturwerten war gut.

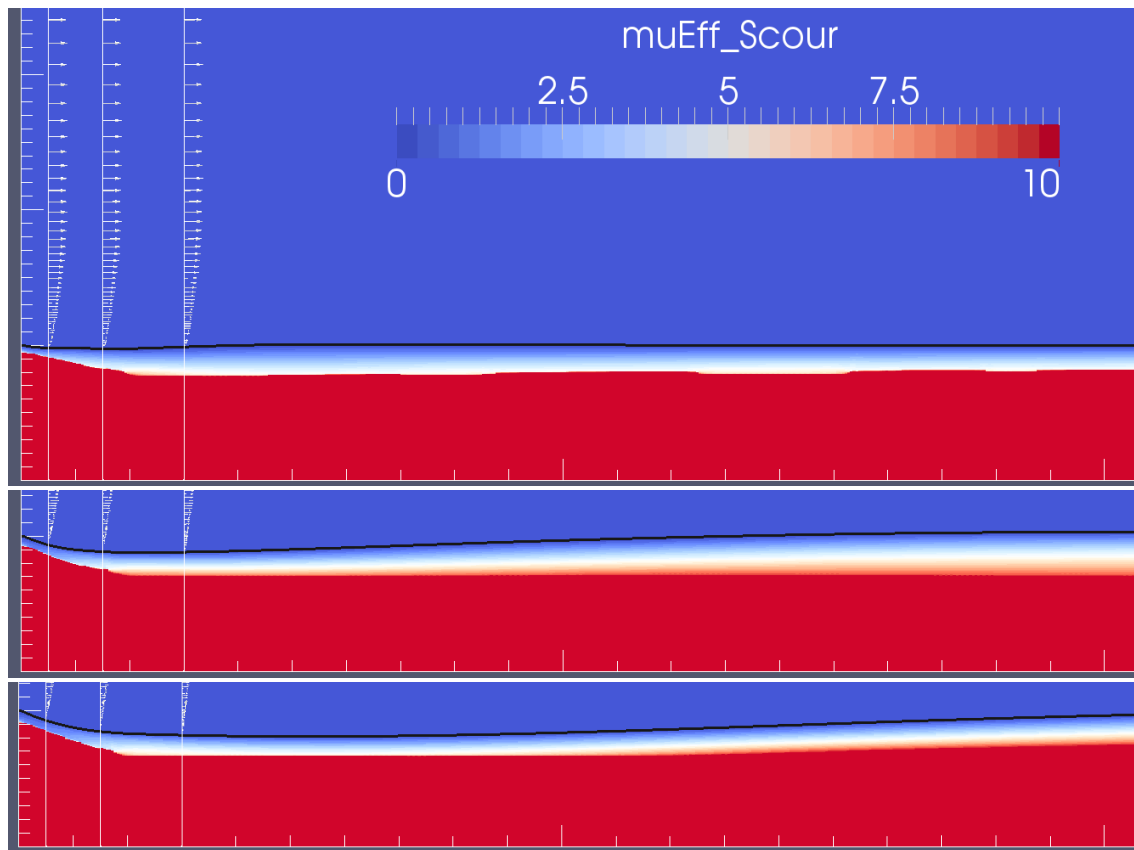


Abbildung 47: Zeitlicher Verlauf der Auskolkung und effektiver dynamischer Viskosität des Bingham-Modells ($t=1\text{s}$, 10s , 50s)

Testfall: Kolk um Monopilegründung in konstanter Strömung (Modellmaßstab)

Bei diesem Testfall handelt es sich um einen der wichtigsten Fälle zur Beurteilung der Ergebnisse, da das in Roulund 2004 durchgeführte Experiment unseren FINO Applikationen am nächsten kommt. Zudem wurden Simulationen dieses Testfalls mit anderen numerischen Verfahren veröffentlicht. Untersucht wurde ein vertikaler Zylinder in konstanter Strömung. Im Experiment wurde beobachtet das zunächst stromaufwärts Kolk entsteht. Im weiteren Verlauf wandert die Sedimentauswaschung um den Zylinder herum, bis auch auf der stromabwärts liegenden Seite Kolk zu sehen ist. Im gesamten Verlauf, wie auch im finalen Gleichgewichtszustand wurde stromaufwärts immer mehr Kolk als stromabwärts beobachtet. Zudem liegt der beobachtete Winkel der Sedimentoberfläche stromaufwärts im Bereich des inneren Reibungswinkels wohingegen er stromabwärts flacher ausfällt.

Abbildung 48 bis Abbildung 51 zeigen den zeitlichen Verlauf der Auskolkung die mit dem neu entwickelten Verfahren berechnet wurden. Dabei wurde links mit einer mittleren Geschwindigkeit von etwa 0.4m/s gerechnet und rechts mit einer höheren Geschwindigkeit von etwa 0.75 m/s . Insgesamt stimmen die Simulationsergebnisse

qualitativ wie quantitativ sehr gut mit dem Experiment überein. Alle zuvor beschriebenen experimentellen Beobachtungen werden wiedergegeben. Lediglich der Winkel der Sediment Oberfläche auf der linken (stromaufwärts liegenden) Seite ist niedriger als der innere Reibungswinkel von 32° . Im Vergleich dazu sei gesagt, dass das in Kapitel 5.3.1 erwähnte Verfahren SedFoam die Sedimentabtragung auf der stromabwärts Seite gar nicht wiedergibt und fälschlicherweise eher eine Sedimentanlagerung zu sehen ist. Das erwähnte Verfahren von Stahlmann löst wiederum alle experimentellen Beobachtungen auf. Es basiert aber nicht auf einer Transportgleichung für die Sedimentbewegung und ist daher nicht für alle praktischen Fälle (wie etwa FINO 1) geeignet.

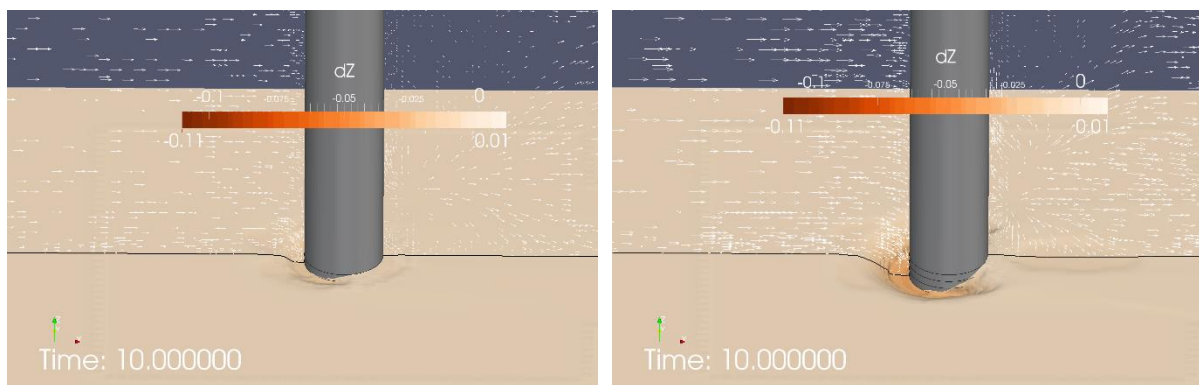


Abbildung 48: Auskolkung um Monopilegründung in konstanter Strömung nach 10s; mittlere Geschwindigkeit (links), hohe Geschwindigkeit (rechts)

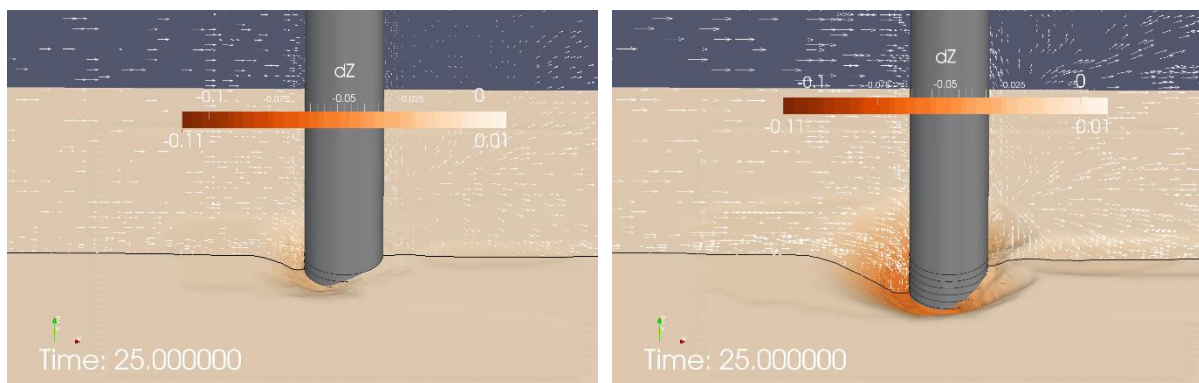


Abbildung 49: Auskolkung um Monopilegründung in konstanter Strömung nach 25s; mittlere Geschwindigkeit (links), hohe Geschwindigkeit (rechts)

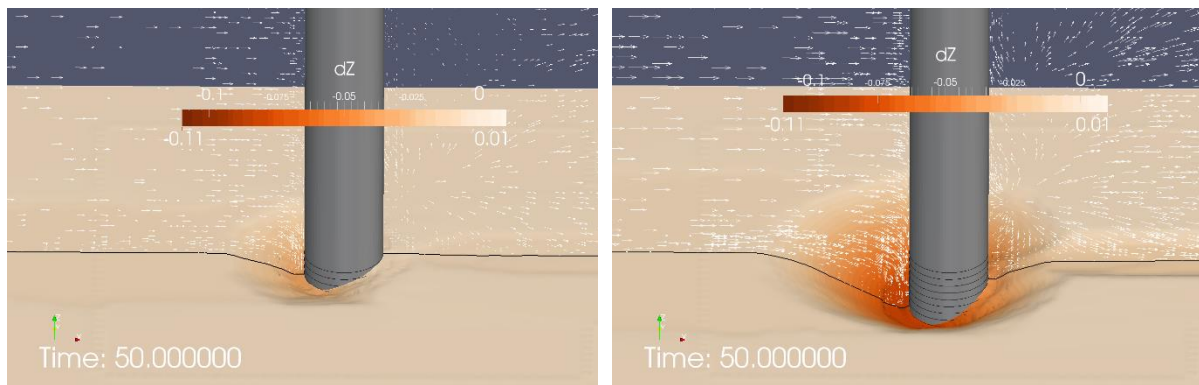


Abbildung 50: Auskolkung um Monopilegründung in konstanter Strömung nach 50s; mittlere Geschwindigkeit (links), hohe Geschwindigkeit (rechts)

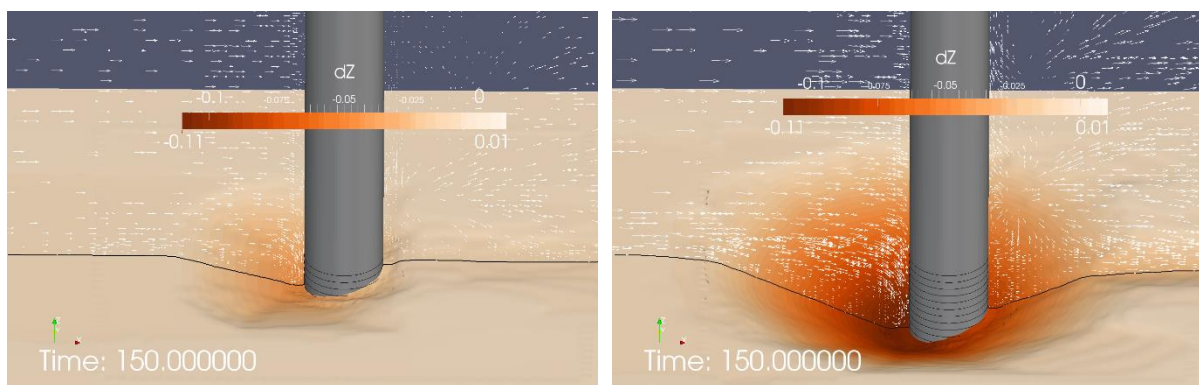


Abbildung 51: Auskolkung um Monopilegründung in konstanter Strömung nach 150s; mittlere Geschwindigkeit (links), hohe Geschwindigkeit (rechts)

Testfall: Anwendung auf die FINO-Geometrien in Seegang

Bei dieser Simulation wurde das neu entwickelte Verfahren auf die FINO-Geometrien im Originalmaßstab angewandt. Beide FINO-Gründungen werden hierbei vereinfacht als vertikaler Zylinder mit konstantem Durchmesser dargestellt. Dabei wurde für FINO1 ein Durchmesser von 1,83m und für FINO3 ein Durchmesser von 4,75m verwendet. Sinnvolle Wellenparameter wurden aus den Messungen abgeleitet. Es wurde eine Stokes Welle 5ter Ordnung verwendet mit einer Wellenhöhe von 8m und einer Periode von 12,5s. Die Wassertiefe beträgt in beiden Simulationen 22m. Abbildung 52 gibt einen globalen Überblick über die FINO1 Simulation. Abbildung 53 bis Abbildung 55 geben Aufschluss über den zeitlichen Verlauf des Sediments während einer Wellenperiode nach 300s Einwirkzeit. Es wird deutlich, dass für FINO3 weniger Kolk entsteht. Dies stimmt mit den Messungen überein, da auch in diesen für FINO3 nahezu keine Auskolkung auftritt.

Beide Simulationen benötigten ca. 23h Berechnungszeit auf dem Großrechner, wobei insgesamt 60 Kerne genutzt wurden. Für eine Gittergröße von in diesem Fall ca. 2,8

Millionen Zellen ist dies eine sehr gute, weil kurze, Berechnungszeit. Insgesamt läuft das Verfahren sehr zuverlässig und stabil. So sind z.B. keine zusätzlichen Dämpfungszonen oder Dämpfungsterme für die Simulation nötig.

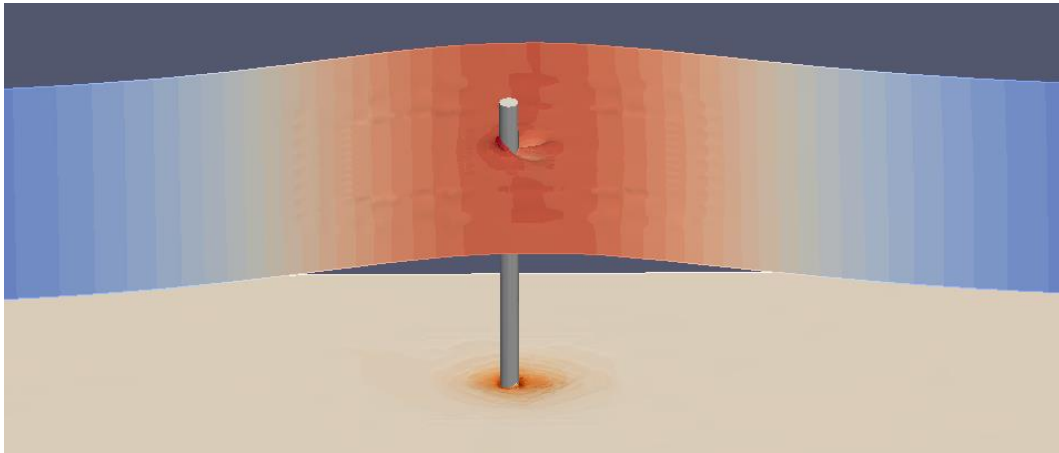


Abbildung 52: Übersicht der Kolksimulation der FINO1-Gründung in Seegang

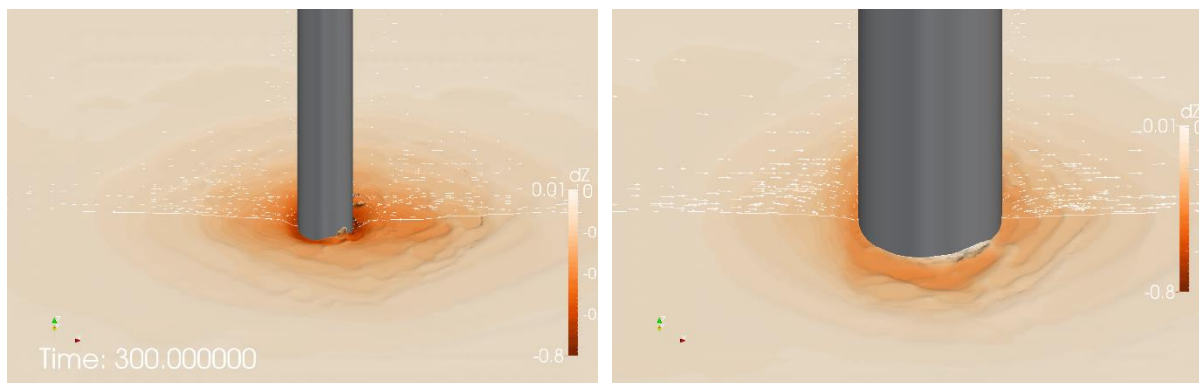


Abbildung 53: Auskolkung um vertikalen Zylinder in Wellen nach 300s; FINO1 Maßstab (links), FINO3 Maßstab (rechts)

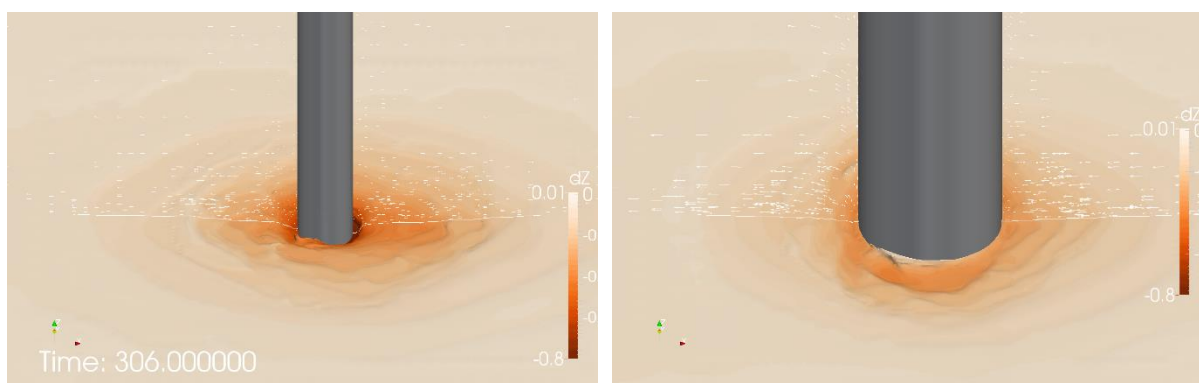


Abbildung 54: Auskolkung um vertikalen Zylinder in Wellen nach 306s; FINO1 Maßstab (links), FINO3 Maßstab (rechts)

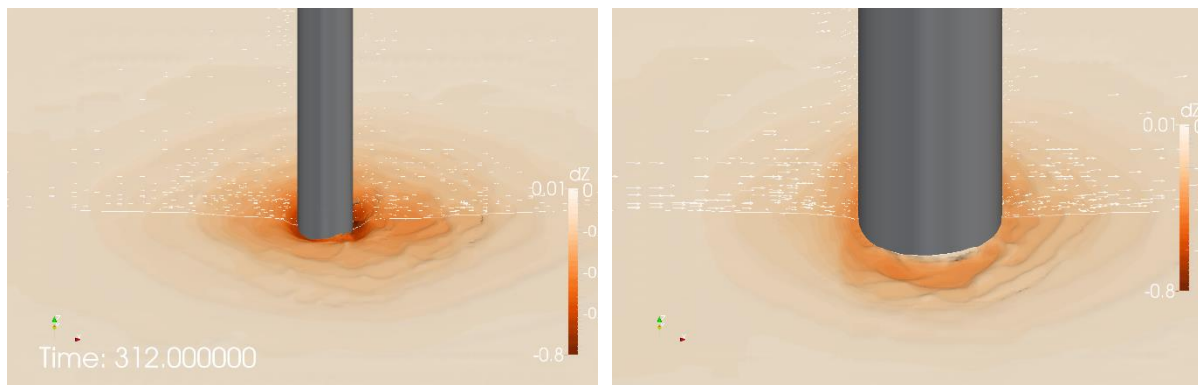


Abbildung 55: Auskolkung um vertikalen Zylinder in Wellen nach 312s; FINO1 Maßstab (links), FINO3 Maßstab (rechts)

Das Ergebnis dieser Untersuchung von Monopiles liefert einige neue Erkenntnisse zur Kolkbildung im Seegang. Tatsächlich ist es so, dass die Kolkbildung durch die Seegangs-induzierte bodennahe Strömung deutlich geringer ausfällt als die Kolkbildung in konstanter Strömung. Bei den großen Pfahldurchmessern der FINO 3 Plattform fiel sie zudem geringer aus als bei dem Pfahldurchmesser der FINO 1. Ähnliche Ergebnisse wurden auch bereits im Kap. 5.2 festgestellt. Dort wurde auch festgestellt, dass der Abtransport von Sediment vom Verhältnis Wellenlänge und Periode zur Strömungsgeschwindigkeit abhängt. Es kann daher an dieser Stelle abgeleitet werden, dass Seegang allein nicht zur Auskolkung führt. Seegang bewirkt allerdings eine Mobilisierung von Sediment. Die (dem Seegang möglicherweise überlagerte) über längere Zeit konstante Strömung (etwa Tidenstrom) transportiert Sediment von der Gründung weg. Erst dies führt zur Kolkbildung.

5.3.4 Bewertung des Simulationsverfahrens

Während des Projektes wurden verschiedene Ansätze untersucht um das Problem Kolk um großskalige Objekte in Seegang zu simulieren. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse konnte erfolgreich ein Kolksimulations-Verfahren entwickelt werden. Dieses Verfahren ist eine zuverlässige Zusammenstellung verschiedener Methoden für Seegangerzeugung, Wellendämpfung, Simulation freier Wasseroberflächen, Modellierung von Kolk, geringe Rechenzeiten, interne Wandfunktionen, Sprung-Rekonstruktion sowie Zeitdiskretisierung.

Die Anwendung des Verfahrens auf großskalige Strömungsprobleme, insbesondere auf Pfahlumströmungen mit den Abmessungen der Plattformen FINO 1 und FINO 3 ergibt vielversprechende Ergebnisse und verhilft zu einigen neuen Ergebnissen, die sich einerseits auf die Entstehung von Kolk im Seegang und in konstanter Strömung beziehen sowie andererseits auf den Einfluss des Pfahldurchmessers.

Wegen des erheblichen Mehraufwandes für die Implementation eines eigenen Kolksimulationsverfahrens ist es nicht gelungen, weitere geometrische Varianten von Plattformgründungen zu untersuchen. Insbesondere ist es nicht gelungen, eine Ganzkörperuntersuchung der Jacket-Gründung der FINO 1 Plattform vorzunehmen. Hier liegen bislang nur Ergebnisse von Teiluntersuchungen (einzelner Vertikalpfahl sowie Horizontalstrebe der FINO 1) vor.

6 Aktivitäten

An dieser Stelle seien einige Aktivitäten aufgezählt, die im Rahmen des Projektes unternommen wurden, die aber in der technischen Beschreibung der letzten Kapitel bislang keine Erwähnung fanden.

Zu Projektbeginn wurde ein Fachgespräch bei der Fa. DeltaRES in Delft/NL geführt. DeltaRES ist ein Spin-Off der TU Delft und unter anderem einer der wichtigsten Akteure der Forschung und Entwicklung im Bereich Offshoreanlagenbau in der Nordsee. Es wurde festgestellt, dass DeltaRES ähnliche Ansätze verfolgten, wie sie im Rahmen dieser Studie verfolgt wurden. Insbesondere arbeitet auch DeltaRES an einem mit OpenFOAM implementierten Verfahren zur Sedimentsimulation.

Wissenschaftliche Publikationen: Wie bereits in Kapitel 5 beschrieben, wurden verbesserte Methoden zur Berechnung der freien Wasseroberfläche in OpenFOAM implementiert. Die Ergebnisse wurden in Meyer et al. (2016) auf der Konferenz „22nd Chesapeake Sailing Yacht Symposium“ im März 2016 in Annapolis, Maryland, USA publiziert, hier angewandt auf die Umströmung von Booten. Des Weiteren wurde eine verbesserte Methode zur Wellendämpfung in der Simulation implementiert und in Meyer et al. (2017) auf der Konferenz „VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering – MARINE 2017“ im Mai 2017 in Nantes, Frankreich publiziert. Eine dritte wissenschaftliche Publikation, Meyer, Graf: „OpenFOAM solver for the simulation of scour around arbitrary offshore foundations in waves“ wird im *Journal of Ocean Engineering* publiziert und befindet sich im Peer-Review-Prozess.

Außerdem wurde eine Masterthesis, Bruchmann (2016), im Studiengang Master of Engineering Maschinenbau an der Fachhochschule Kiel verfasst. Die Thesis beschäftigte sich mit der Auswertung der Kolk- und Seegangsdaten und der Auswertung der Ergebnisse. Der Thesiskandidat, Herr Bruchmann, wurde nach Abschluss seines Studiums für ein weiteres Jahr im Projekt als Vollzeit-Wissenschaftler beschäftigt.

Das Projekt und die Sachbearbeiter Meyer und Bruchmann wurden mit dem KOMPASS-Preis 2017, einer Auszeichnung für innovative, maritime, wissenschaftliche Arbeiten aus Schleswig-Holstein, mit dem dritten Platz ausgezeichnet. Der Preis wird verliehen durch die UBS Unternehmens-Beratung Schümann GmbH, die MCG Maritime Consulting Group und dem Maritimes Zentrum der Hochschule Flensburg und der Fachhochschule Kiel. Die Preisverleihung fand im Rahmen des Maritimen Sommertreffs im August 2016 statt.

Während der Projektlaufzeit fand außerdem jedes Jahr ein vom FEZ organisiertes Wissenschaftler-Treffen statt. Es treffen sich alle Wissenschaftler, die an den Plattformen FINO 1 und FINO 3 arbeiten, um sich über aktuelle Forschungsthemen auszutauschen. Der Projektstatus wurde dabei jedes Mal durch die Projekt-Mitarbeiter mittels einer Präsentation vorgestellt und mit den Kollegen diskutiert.

Am 21.2.2018 wird das Simulationsverfahren unter dem Titel „Solver development for the simulation of scour around offshore foundations in waves“ auf einem Workshop von Entwicklern numerischer Verfahren auf der Basis von OpenFOAM vorgestellt.

Am 6.12.2017 wurde das Projekt im Rahmen der Veranstaltung „Future Energies Science Match“ vorgestellt. Science Match wurde veranstaltet vom Land Schleswig-Holstein und der Zeitung Tagesspiegel und ist eine Netzwerkzusammenkunft von Akteuren aus Wissenschaft, Politik, Verbänden und Industrie, die sich über laufende Projekt im Kontext Neue Energien informieren.

Schließlich soll nicht unerwähnt bleiben, dass große Teile der im Rahmen des vorliegenden Projektes erfolgten wissenschaftlichen Entwicklung Gegenstand der Promotion des Projektmitarbeiters Janek Meyer ist. Herr Meyer promoviert an der FH Kiel in Kooperation mit der Christian-Albrecht Universität. Er gehört damit zu den Vorreitern, die wissenschaftliche Arbeit und kooperative Promotionsvorhaben an Fachhochschulen etablieren. Das besondere Engagement, das von Mitarbeitern mit Promotionsmöglichkeit erwartet und auch geleistet wird, hat ganz erheblich dazu beigetragen, dass die vorliegende Studie trotz des erheblich ausgeweiteten Umfangs gelungen ist.

7 Zusammenfassung & Ausblick

Das hier beschriebene Studienvorhaben befasst sich mit dem Phänomen der Auskolkung des Gewässerbodens bei den Forschungsplattformen FINO 1 und FINO 3. Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines Simulationsverfahrens, mit dem die Auskolkung physikalisch untersucht und vorhergesagt werden kann.

Die Inhalte des Studienvorhabens setzen sich aus drei Säulen zusammen:

- Einer Messkampagne auf beiden Plattformen, die Umweltparameter wie Seegang und Strömung sowie die Veränderung von Auskolkung mit Messsensorik hoher Bandbreite erfasst und deren Korrelation bestimmt.
- Einer Untersuchung von Kolk-erzeugenden Strömungsphänomenen mit einem Simulationsverfahren, das freie Wasseroberflächen, Anströmung der Plattformgründungen und Seegang berücksichtigt.
- Der Entwicklung und Anwendung einer neuen Simulationsmethode, mit der der Transport von Sediment im Nahfeld der Gründung nachvollzogen werden kann.

Es wurden im Wesentlichen die folgenden Ergebnisse erzielt:

- Eine Analyse der erhobenen Messdaten auf den Plattformen ergibt, dass es keinen deterministischen Zusammenhang zwischen einem Wetter-Ereignis (einem Sturm mit erheblicher Seegangsbildung) und einer Kolkzunahme gibt. Wetter-Ereignisse können zu einer Zunahme oder Abnahme der Auskolkung führen, sofern die Wellenhöhe ein bestimmtes Maß von etwa 6 m überschreitet. Innerhalb eines Wetter-Ereignisses kommt es allerdings immer zu erheblichen, nicht bleibenden Kolkänderungen. Seegang ist also immer mit einer erheblichen Mobilisierung des Sediments verbunden, ohne dies jedoch immer abzutragen. Es wurde zudem festgestellt, dass die FINO 3 Plattform mit im Vergleich zur FINO 1 viel größeren Pfahlabmessungen offenbar immun gegen Kolk ist.
- Bei der Untersuchung der Strömungsphänomene, die Kolk verursachen, konnte ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Gründungstopologie und –Größe und den Kolk-verursachenden Strömungsmerkmalen wie Bodenschubspannungen, Hufeisenwirbel und Wirbelschleppe festgestellt werden. Es konnte gezeigt werden, dass sich im ausgekolkten Zustand kleinere Bodenschubspannungen einstellen als am Gewässerboden ohne Kolk. Mit anderen Worten, Auskolkung erreicht nach einiger Zeit eine Sättigung. Außerdem konnte gezeigt werden, dass ein Zusammenhang zwischen der Periode des Seegangs, der Bauteilabmessung, bezogen auf die Strömungsgeschwindigkeit und dem Q-Kriterium besteht. Hieraus konnte

abgeleitet werden, dass größere Pfahldurchmesser weniger kolk anfällig sind als kleinere.

- Diese letzte Erkenntnis konnte in den Simulationen, die Sedimenttransport berücksichtigen, bestätigt werden. Es wurde festgestellt, dass eine über längere Zeiträume stationäre Strömung, etwa die Tidenströmung, starke Auskolkungen verursacht, ein Seegang mit Wellenhöhen um 6-8 m aber nicht im gleichen Umfang. Auch hier wurde gezeigt, dass kleinere Monopile-Durchmesser, FINO 1, stärker von Kolk betroffen sind als größere (FINO 3).

Beim Bau von Offshore-Windenergieanlagen ist in den letzten Jahren ein Trend zu Monopile-Gründungen mit immer größeren Durchmessern zu beobachten, während hingegen Jacket-Anlagen weniger werden oder gar verschwinden. Vor diesem Hintergrund ist die in dieser Studie gefundene Erkenntnis gravierend. Derzeit wird die erwartete Auskolkung eines Monopiles, die bei der Rammtiefe berücksichtigt werden muss, als näherungsweise proportional zum Durchmesser angenommen. Dies ist mit erheblichen Mehrkosten bei der Errichtung, Umweltbelastungen beim Rammen sowie gegebenenfalls Mehrbelastungen beim Rückbau verbunden. Diese Studie zeigt, dass die Annahme steigender Auskolkung bei steigendem Pfahldurchmesser höchst zweifelhaft ist. Es ist vielmehr zu erwarten, dass die Auskolkung ein bestimmtes absolutes Maß nicht übersteigt oder sogar weniger wird, wenn der Bauteildurchmesser steigt.

Es wird daher empfohlen, diesen Zusammenhang zwischen Gründungspfahl-Abmessungen und der Auskolkung weiter zu untersuchen und die Aussagen aus dieser Studie zu verifizieren. Die hier vorliegende Studie bezieht sich ausschließlich auf die Plattformen FINO 1 und FINO 3. Um die gewonnenen Erkenntnisse zu generalisieren, sind weitere Untersuchungen erforderlich. Das Simulationsverfahren muss abgesichert werden, es müssen längere Simulationszeiträume untersucht werden und der Einfluss des Pfahldurchmessers, der Strömungsgeschwindigkeit und des Seegangs auf die Auskolkung muss systematisch investigiert werden.

8 Literaturverzeichnis

- Baykal, C., Sumer, B. M., Fuhrman, D. R., Jacobsen, N. G., Fredsoe, J. (2015), Numerical investigation of flow and scour around a vertical circular cylinder, *Phil. Trans. R. Soc. A* 373: 20140104
- Benoit, M., Frigaard, P. & Schäfer, H. A. (1997). Analysing multidirectional wave spectra. A tentative classification of available methods. In E. Mansard (Hrsg.), *Multidirectional waves and their interaction with structures* (S. 131–158) [Ottawa]: National Research Council of Canada.
- Breusers, H. (1967), *Time scale of two-dimensional local scour*, Proc. 12th IAHR Congress, Pt. Collins 3, 1967, pp. 275-282
- Bruchmann, U. (2016). *Derivation of Seastate Spectra from Wave Elevation Data for the Correlation of Scour and Seastate*. Master Thesis, Fachhochschule Kiel. Kiel.
- Cheng, Z., Hsu, T., Calantoni, J. (2016), *SedFoam: A multi-dimensional Eulerian two-phase model for sediment transport and its application to momentary bed failure*, Coastal Engineering, 119, 32-50
- Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures* (Advanced series on ocean engineering, vol. 15, [2nd ed.]. Singapore: World Scientific.
- Hamill, L. (1999). *Bridge hydraulics*. London: E. & F.N. Spon.
- Hauser, D. (2005). *COST Action 714. Measuring and analysing the directional spectra of ocean waves : Working Group 3* (Meteorology). Luxembourg: EUR-OP.
- Jacobsen, N. G., Fuhrman, D. R. & Fredsøe, J. (2012). A wave generation toolbox for the open-source CFD library. OpenFoam? *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70 (9), 1073–1088.
- James, R. & Ros, M. C. (2015). *Carbon Trust - Floating Offshore Wind. Market and Technology Review*.
- Johnson, D. (Centre for Water Research, University of Western Australia, Hrsg.). (2002). *DIWASP, a directional wave spectra toolbox for Matlab: User Manual. Research Report WP-1601-DJ (V1.4)*.

- Mayerle, R., Ricklefs, K. & Rother, M. (2008). *Endbericht zum Projekt - Untersuchungen zur Auswirkung von Offshore Windkraftanlagen auf den Meeresboden*, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. FTZ Westküste.
- Meyer, J., Graf, K. & Slawig, T. (2017). *A New Adjustment-Free Damping Method for Free-Surface Waves in Numerical Simulations*. VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering MARINE 2017, Nantes.
- Meyer, J., Renzsch, H., Graf, K. & Slawig, T. (2016). *Advanced CFD-Simulations of free-surface flows around modern sailing yachts using a newly developed OpenFOAM solver*. The 22nd Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Annapolis, Maryland.
- Nortek AS. (2016). *Scour Monitor - Acoustic measurements of distance to seabed*. Zugriff am 28.09.2017. Verfügbar unter http://www.nortek-as.com/lib/brochures/scour-monitor-1/at_download/file
- Ricklefs, K., Ruser, A. & Mayerle, R. (2011). *Teilprojekt Untersuchungen zur Kolk-Dynamik an einem Offshore Monopile (Ko-DynaMo)*, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. FTZ Westküste.
- Roulund, A., Sumer, B.M., Fredsoe, J., Michelsen, J. 2004, Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile, *J. Fluid Mech.* (2005), 534, pp. 351-401
- Stahlmann, A. (2013), *Experimental and Numerical Modeling of Scour at Offshore Wind Turbines*, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Hannover
- Sumer, B. M. & Fredsøe, J. (2002). *The mechanics of scour in the marine environment* (Advanced series in ocean engineering, vol. 17, Reprinted.). New Jersey: World Scientific.
- Sumer, B. M., Petersen, T. U., Locatelli, L., Fredsøe, J., Musumeci, R. E. & Foti, E. (2013). Backfilling of a Scour Hole around a Pile in Waves and Current. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 139 (1), 9–23.
- Völkner, S., Wriggers, W. R., Luo-Theilen, X., Rung, T. (2015), *An Overset-Grid Three-Phase Flow Model For Offshore Operations*, VI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering MARINE 2015, Rome.
- Whitehouse, R., Harris, J., Sutherland, J. & Rees, J. (2008). An Assessment of Field Data for Scour at Offshore Wind Turbine Foundations. In *Proceedings / Fourth*

International Conference on Scour and Erosion. 5 - 7th November, 2008, Surugadai Memorial Hall, Chuo University, Tokyo, Japan (pp. 329–335). Tokyo.