

## 1 Forschungsthema

Entwicklung von Planungswerkzeugen für Auslegung, Bau und Betrieb von Offshore Windenergie- und Tidenströmungsanlagen

*Forschungsantrag im Rahmen des Initiativprogramms „Zukunftstechnologien für kleine und mittlere Unternehmen“ (ZUTECH)*

## 2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Stetig steigende Energiepreise, Emissionen klimarelevanter Abgase bei der Verbrennung fossiler Energieträger und eine zumindest kritische Haltung gegenüber der Nutzung von Kernenergie stellen grundsätzlich eine günstige Ausgangslage für den Ausbau der regenerativen Energieversorgung dar. Hierbei kommt in Deutschland der Windenergie eine wichtige Rolle zu. Schon jetzt hat die Windenergie einen Anteil von über 5% am gesamten deutschen Stromverbrauch und soll bis 2030 einen Anteil von 15% erreichen. Allerdings ist das Potential landgestützter Windenergienutzung weitgehend ausgeschöpft. Wesentlich größere Potentiale bietet aus heutiger Sicht hingegen die Erschließung von Standorten in Küstengewässern (Offshore). Aus diesem Grund wird der Ausbau der Offshore Windenergie durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz intensiv gefördert. Für eine Reihe von Windparks wurde bereits die Genehmigung erteilt.

Bei der Erschließung von Offshore Standorten ist es nahe liegend, Anlagen zur Nutzung der Windenergie mit Tidenströmungsanlagen zu koppeln. Auf diese Weise kann vor allem hinsichtlich der Bau- und Netzanbindungskosten eine Reihe von Synergien genutzt werden. Das vorliegende Projekt konzentriert sich daher vornehmlich auf kombinierte Windenergie- und Tidenströmungsanlagen. Viele der im Rahmen dieses Vorhabens zu erarbeitenden Erkenntnisse sind jedoch vom Grundsatz her auch auf Anlagen mit nur einer Kraftwerkskomponente übertragbar.

Trotz der bereits weit fortgeschrittenen Planungen zur Nutzung der Offshore Windenergie ist die bauliche Umsetzung aus verschiedenen Gründen noch nicht erfolgt und Tidenströmungsanlagen sind bislang fast ausschließlich Gegenstand von Pilotvorhaben. Eine der wesentlichen Ursachen hierfür ist sicherlich, dass die Planungsrandbedingungen für Offshore-Bauwerke zur Energienutzung aus Wind und Tidenströmung in den Küstengewässern sehr komplex sind und sich die bauliche Umsetzung entsprechend schwierig gestaltet. Zu nennen sind folgende Problemfelder:

**Schwierigkeiten bei der Bestimmung von Lasten auf Offshore Bauwerke:** Dies ist Gegenstand vieler wissenschaftlicher Untersuchungen und es existiert bereits eine Reihe halbempirischer und empirischer Ansätze, die jedoch insbesondere für Tidenströmungsanlagen nicht unmittelbar übertragbar sind. Bei diesen Anlagen treten prinzipbedingt hohe Unterwasserlasten auf und die komplexe, wechselwirkende Umströmung von Struktur, Unterwasserrotoren und Gründung bedarf genauerer Studien, die gegenwärtig nicht verfügbar sind.

**Gründungssicherheit:** Bezüglich der Gründung dieser Offshore Bauwerke ist insbesondere das langfristige Betriebsverhalten unter der fortwährenden zyklischen Belastung aus Wind, Wellen, Strömung und Eis von Bedeutung. Die zyklische Belastung führt zwar nicht notwendigerweise zu einem endgültigen Verlust der Standsicherheit, kann jedoch die Gebrauchstauglichkeit der Anlage, damit ihren Betrieb und letztendlich ihre Wirtschaftlichkeit entscheidend beeinträchtigen. Hierbei stellt die Kombination mit einer Tidenströmungsanlage eine neue Lastsituation dar, deren Auswirkungen noch nicht erforscht sind.

**Schwierigkeiten bei der Standortwahl:** Für eine wirtschaftliche Energienutzung der Tidenströmung ist eine möglichst hohe Strömungsgeschwindigkeit erforderlich. Günstige Bedingungen finden sich bevorzugt an Landspitzen und Meeresbuchten, zwischen Inseln und in Meerengen. Je nach Gründungstyp und Baugrund führen hohe Strömungsgeschwindigkeiten jedoch zur Ausbildung von Kolken, die die Standsicherheit der Gründung maßgeblich beeinträchtigen können.

Tideströmungsanlagen sind dabei besonders kritisch, da bei diesen Anlagen aufgrund der Unterwasserrotoren zusätzliche Störungen der Umströmung auftreten, die die Kolkbildung begünstigen. Neben der Strömungsgeschwindigkeit sind technische Gründe wie beispielsweise die Entfernung zu vorhandenen Stromnetzen, vor allem aber die Baugrundverhältnisse für die Standortwahl entscheidend.

Die zuvor genannten Problemstellungen sind Grundlage des vorliegenden Forschungsvorhabens. Ziel dieses Vorhabens ist es, zuverlässige Planungsgrundlagen für die Unternehmen zu schaffen, die im Offshore Bereich beziehungsweise im Bereich von Konstruktion, Bau und Betrieb regenerativer Energieanlagen tätig sind. Auf diese Weise soll mittelfristig auch die Investitionsbereitschaft für Offshore Bauwerke zur Nutzung regenerativer Energien deutlich verbessert werden.

Um dieses Ziel zu erreichen, werden im Rahmen des vorliegenden Projektes effiziente Simulationsverfahren und Bemessungsmodelle unter Berücksichtigung der gegebenen Anforderungen angepasst bzw. weiterentwickelt. Dabei sollen grundlegende Fragen der Lastermittlung, Standortwahl und Gründungssicherheit für kombinierte Windenergie- und Tideströmungsanlagen geklärt werden. Die Ergebnisse sollen exemplarisch an Beispielanlagen anhand umfangreicher Rechnungen demonstriert werden und somit als Orientierung für Planer und öffentliche Institutionen dienen. Soweit möglich und wirtschaftlich sinnvoll, werden diese Ergebnisse durch experimentelle Vergleichslösungen belegt. Insgesamt soll das Vorhaben dazu beitragen, den in diesem Umfeld tätigen Unternehmen fundierte Informationen bereitzustellen, um ihre Marktposition im nationalen und internationalen Wettbewerb spürbar zu verbessern.

### **3 Forschungsziel / Ergebnisse / Lösungsweg**

#### **3.1 Forschungsziel**

Durch eine fachübergreifende Kooperation im geplanten Verbundvorhaben sollen wissenschaftlich fundierte Planungsgrundsätze entwickelt werden für

- die Standortwahl,
- die zuverlässige Lastsimulation aller Einwirkungen,
- eine sichere Gründungsbemessung und
- eine optimierte strukturelle Auslegung

von Offshore Bauwerken mit kombinierter Nutzung der Energie aus Wind und Tideströmung.

##### **3.1.1 Angestrebte Forschungsergebnisse**

Als wissenschaftlich-technische Ergebnisse werden belastbare Grundlagen für Konstruktion, Bau und Betrieb von Offshore Windenergie- und Tideströmungsanlagen erstellt und anhand von exemplarischen Auslegungen und Simulationen verfügbar gemacht.

Entsprechend der Zielsetzung werden folgende Ergebnisse erwartet:

**Standortwahl:** Die Baugrundverhältnisse müssen den Wind- bzw. Tideströmungsverhältnissen gegenübergestellt werden, da letztere die Energieausbeute der Anlagen bestimmen. Die Energieausbeute von Windenergieanlagen ist bereits hinreichend untersucht. Für Tideströmungsanlagen sollen vergleichbare Ansätze erstellt und anhand von Beispielsimulationen überprüft werden. Die im vorliegenden Projekt zu erstellenden Methoden und Daten ermöglichen bei Kenntnis der Wassertiefen, Strömungskarten und Baugrundverhältnisse eine präzisere Standortbewertung. Es sollen insbesondere Randbedingungen für die Eignung des Standorts definiert werden. Im Umfeld dieser potentiellen Standorte sollen ferner großräumige Strömungssimulationen unter Berücksichtigung der Rückwirkung und gegenseitigen Beeinflussung der zu installierenden Anlagen durchgeführt werden.

**Lastsimulation:** Aufbauend auf methodischen Bausteinen, die in früheren Forschungsvorhaben entwickelt wurden, sollen Konzepte für detaillierte Lastsimulationen erstellt werden. Es werden umfangreiche Strömungssimulationen im Nahfeld exemplarischer Offshore Anlagen durchgeführt und experimentell validiert. Im Fokus steht hierbei vor allem der Einfluss aus der kombinierten Nutzung von Windenergie und Tidenströmung. Anhand von Beispielkonfigurationen sollen belastbare Planungsdaten erstellt werden.

**Gründungsbemessung:** Gründungsbemessungen sind in zweierlei Hinsicht problematisch, da sie einerseits die Lasten aus der aufsteigenden Struktur sicher in den Baugrund einleiten müssen, andererseits aber je nach Bauform die Umströmung in ihrem Nahfeld und damit auch ihre Belastung in erheblichem Umfang beeinflussen. Es müssen daher für die zu erwartenden Lastkonfigurationen und Baugrundbedingungen an den potentiellen Standorten geeignete Gründungsstrukturen für kombinierte Windenergie- und Tidenströmungsanlagen entwickelt werden. In einem zweiten Schritt werden für typische Gründungsstrukturen ingenieurpraktische Konzepte erstellt, die eine zuverlässige Bemessung einschließlich der Beurteilung des langfristigen Betriebsverhaltens ermöglichen. Diese Konzepte werden wiederum anhand von Beispielauslegungen erläutert, die als Grundlage für die Planung der Anlagen verstanden werden können. Der Prozess der Kolkbildung, insbesondere unter Berücksichtigung des Einflusses des Triebstrangs, wird in umfangreichen numerischen Berechnungen untersucht. Aufgrund des äußerst komplexen Vorgangs und der Gefahren für die Betriebssicherheit der Anlagen ist eine kritische Diskussion der Ergebnisse unerlässlich. Diese soll in Empfehlungen für eine adäquate Berücksichtigung der Kolkbildung im Rahmen der Gründungsbemessung münden.

**Optimierte strukturelle Auslegung:** Im Rahmen des Vorhabens wird keine Anlagenoptimierung durchgeführt. Diese soll sich vielmehr beim späteren Bau aus dem Wissen und der Erfahrung der ausführenden Unternehmen ergeben. Die zu erwartenden Betriebslasten und Gründungskonzepte sind hierfür jedoch wesentliche Eckdaten.

Zusammengefasst sollen die angestrebten Ergebnisse die Voraussetzung für die verstärkte Nutzung der genannten Energieformen ermöglichen und die beteiligten Unternehmen bei ihren komplexen Aufgaben unterstützen. Damit soll insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen die Teilnahme am Wettbewerb ermöglicht werden, da gerade diese die hier genannten Vorarbeiten im Rahmen ihrer üblichen Geschäftstätigkeit nicht leisten können. Dies ist als übergeordnetes Forschungsziel zu verstehen.

### **3.1.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse**

Grundsätzlich beinhaltet die Nutzung regenerativer Energien, insbesondere der Offshore Windenergie und noch mehr der Energie aus Tidenströmungen, ein kaum zu unterschätzendes Innovationspotential. Hierin besteht auch die Möglichkeit einer nachhaltigen Übertragung des aus landgestützter Windenergienutzung erworbenen Know-hows auf den anspruchsvollen Offshore-Markt, was zur Sicherung bzw. Schaffung zusätzlicher, hoch qualifizierter Arbeitsplätze in Deutschland beitragen wird.

Im engeren Sinne des Antragsziels besteht das Innovationspotential des angestrebten Vorhabens vor allem darin, als Ergebnis einer Versachlichung der Diskussion um die Einwirkungen und die bemessungsrelevanten Wechselwirkungen zu belastbaren Planungsrandbedingungen zu gelangen und damit die energiepolitischen Rahmenbedingungen für entsprechende Unternehmen zu schaffen. Gerade die kmU sind in der Regel auf diese Informationen bzw. Grundkenntnisse angewiesen. Hinsichtlich der Nutzung der Tidenströmung verfolgt das Vorhaben einen bisher noch nicht diskutierten Ansatz. Es ist unter anderem Ziel des Vorhabens, das energetische Potential der Tidenströmung aufzuzeigen und somit die Grundlage für Anlagen zu legen, die die Windenergie und zugleich die Energie der Tidenströmung nutzen.

Um die Ziele des Vorhabens zu erreichen, sind Methoden erforderlich, die in dieser Kombination an anderer Stelle nicht verfügbar sind. So sollen beispielsweise CFD-Methoden zur detaillierten Simulation der Fern- und Nahfeldumströmung von Unterwasserströmungsanlagen unter Berücksichtigung freier Oberflächen, rotierender Bauteile und veränderlicher Bodentopographie

(Kolkbildung) eingesetzt und mit bodenmechanischen und grundbaulichen Modellen verknüpft werden.

### 3.2 Lösungsmethoden zur Erreichung des Forschungsziels

Die Erreichung der vorgenannten Forschungsziele erfordert die kombinierte Untersuchung verschiedener Fragestellungen aus der Strömungsmechanik und der Bodenmechanik. Das Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme, Duisburg, (DST) bringt hierbei hydrodynamische Berechnungsverfahren und Modellversuche ein. Das Institut für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik, und Tunnelbau der Universität Duisburg-Essen (IGB) untersucht die bodenmechanischen und grundbaulichen Aspekte dieses Forschungsvorhabens. Beide Forschungsstellen können auf langjährige Erfahrung in ihren jeweiligen Fachgebieten verweisen. Die Entwicklungen werden ferner durch die Firma numrax ergänzt, die Zusatzmodule zur numerischen Simulation von Rotorumströmungen und Kolkbildung erarbeiten soll.

Aus vielfältigen Forschungsvorhaben und industriellen Anwendungen steht somit ein umfangreiches Repertoire an experimentellen und numerischen Methoden für strömungs- und bodenmechanische Problemstellungen zur Verfügung. Diese sind jedoch für die hier vorgesehenen Arbeiten entsprechend anzupassen und zu ergänzen.

**Strömungsmechanische Methoden:** Es stehen umfangreiche Methoden für großräumige und detaillierte Strömungssimulationen zur Verfügung. Aufgrund der spezifischen Aufgabenstellungen basieren diese Methoden vorwiegend auf eigenen Entwicklungen, die vor allem in Zusammenarbeit mit Partnerinstituten der Universität Duisburg-Essen erarbeitet wurden. So verfügt das DST aus Vorarbeiten über ein zuverlässiges Programmpaket zur Lösung von Flachwassergleichungen (BEShiWa). Dieses Verfahren soll im vorliegenden Forschungsvorhaben für die Simulation großräumiger Tidenströmungsvorgänge unter detaillierter Erfassung von Bodentopographie und Seegang, sowie der Rückwirkung durch Offshore Anlagen (Bremsung), eingesetzt werden. Es dient ferner der Ermittlung geeigneter Randbedingungen für detaillierte Nahfeldsimulationen. Diese Nahfeldsimulationen selbst sollen mit einem dreidimensionalen Strömungslöser (MOUSE) erfolgen. Für diesen Löser wurden bereits umfangreiche Module für inkompressible, zeitgenaue Strömungsprobleme unter Berücksichtigung freier Oberflächen entwickelt. Das Verfahren soll in diesem Forschungsvorhaben durch Methoden zur detaillierten Strömungssimulation von Unterwasserrotoren und der durch Sedimenttransport bedingten Kolkausbildung an Bauwerksgründungen ergänzt werden. Für experimentelle Untersuchungen von Strömungen in flachen Gewässern stehen ein Schlepptank mit Gegenstromanlage und Wellengenerator sowie umfangreiche Messmethoden zur Verfügung. Diese sollen für exemplarische Validierungen genutzt werden.

**Bodenmechanische Methoden:** Am IGB steht umfangreiches Datenmaterial zu den Baugrundbedingungen in Nord- und Ostsee zur Verfügung, das für eine bodenmechanische Bewertung der Eignung potentieller Standorte herangezogen werden kann. Zur Beschreibung des Materialverhaltens von Böden unter zyklischer Belastung aus Wind, Wellen und Strömung können darüber hinaus zwei am IGB entwickelte Stoffgesetze (No Yield Two Surface Model für nichtbindige Böden und Detachment Cyclic Model für bindige Böden) verwendet werden. Die Stoffgesetze werden anhand von bodenmechanischen Elementversuchen an typischen Bodenarten, die im Labor des IGB durchgeführt werden, kalibriert. Für die Beschreibung des Langzeitverhaltens sind jedoch weitere Untersuchungen nötig, mit denen auch Laständerungen mit über 100 Mio. Zyklen während einer Betriebsdauer von 20 Jahren erfasst werden können. Für die Entwicklung geeigneter Gründungsstrukturen und die Erarbeitung von Bemessungskonzepten für die kombinierte Windenergie- und Tidenströmungsanlage können die in den Forschungsprojekten Gigawind und Gigawind+ zu bau- und umwelttechnischen Aspekten von Offshore Windenergieanlagen gewonnenen Erkenntnisse herangezogen werden. An diesen Projekten war das IGB beteiligt. Die Bemessungskonzepte sollen auf die ingenieurpraktische Anwendbarkeit abgestimmt sein und basieren daher auf analytischen Berechnungsmodellen, die für die hier relevanten Gründungsstrukturen weiterentwickelt werden müssen. Sie werden ergänzt durch ein geeignetes bodenmechanisches Standard-Versuchsprogramm, das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens

erarbeitet werden muss. Die Ergebnisse der numerischen Modellierung bilden die Grundlage für die zuvor genannten Arbeiten. Zur Untersuchung der Kolkproblematik werden die bisher verfügbaren Ansätze zur Ermittlung der Kolkentiefe recherchiert. Auf Basis der Ergebnisse der von numrax durchgeführten numerischen Simulation des Kolkprozesses wird die Anwendbarkeit dieser Ansätze auf kombinierte Windenergie- und Tideströmungsanlagen analysiert und bewertet. Daraus werden abschließend Regeln für die Planung von Kolkschutzmaßnahmen oder ggf. auch die Berücksichtigung der zu erwartenden Kolkentiefe im Rahmen der Bemessung abgeleitet.

Die einzelnen Arbeitsschritte sind in der ausführlichen Beschreibung des Antrags erläutert.

### 3.3 Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

#### 3.3.1 Experimentelle Untersuchungen

##### 3.3.1.1 Standortfragen und Umgebungsbedingungen

Zur Konzeption der experimentellen Untersuchungen zur Hydrodynamik von Tidestromanlagen mussten im Vorfeld mögliche Standorte und die hydrodynamisch relevanten Umgebungsbedingungen untersucht werden. Hierzu wurden zunächst die Strömungsverhältnisse im Bereich ausgewählter Genehmigungsgebiete für Offshore-Windkraftanlagen in der Deutschen Bucht betrachtet. Im Rahmen des EU-Projekts HIPOCAS<sup>1</sup> wurden durch so genannte Reanalysen zeitlich und räumlich aufgelöste Daten von insgesamt 17 Parametern für die gesamte südliche Nordsee zusammengestellt. Es liegen stundenweise gemittelte Werte für mehr als 12.000 Raumpunkte, entsprechend einer Kantenlänge von etwa fünf Kilometern, über einen Zeitraum von 43 Jahren vor.

Klassierte Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen für den Monat Juni 1998, in dem sehr geringe Einflüsse durch Windfelder überlagert sind, bieten einen guten Überblick über die Charakteristik des Tidestroms in der Deutschen Bucht. Die nachstehenden Tabellen zeigen die Häufigkeiten der jeweiligen Strömungsbedingungen für zwei ausgewählte Standorte. Die Charakteristika in anderen Genehmigungsgebieten sind vergleichbar oder liegen zwischen diesen Beispielen.

**Tabelle 1 Klassierte Tidestrom-Daten an der Position N 55.75° E 4.08° (Prozentuale Häufigkeiten)**

Angle \ Speed	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0-30	0.28	2.5	1.53	0.83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30-60	0.28	1.94	3.75	2.92	1.94	0.28	0.28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60-90	1.39	2.22	2.78	4.31	3.33	0.56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90-120	0.56	1.11	1.94	2.5	0.83	0.28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120-150	0.56	1.11	1.39	0.69	0.28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150-180	0.69	0.83	0.56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180-210	0.14	0.56	0.83	0.28	0.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
210-240	0.69	2.64	3.33	2.64	1.94	0.69	0.56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
240-270	0.56	3.33	6.25	6.39	3.33	0.42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
270-300	1.11	3.06	4.86	1.94	0.42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300-330	0.97	2.78	1.81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
330-360	0.83	1.94	0.83	0.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<sup>1</sup> Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe

Tabelle 2 Klassierte Tidestrom-Daten an der Position N 53.70° E 6.48° (Prozentuale Häufigkeiten)

Angle \ Speed	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95
0-30	0	0.97	0.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30-60	0	0.14	0.83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60-90	0	0	0.14	0.69	1.81	1.53	1.11	1.67	1.94	2.64	1.39	1.81	0.83	0.56	0	0	0	0	0	0
90-120	0	0	0.14	0	0.14	0.42	2.36	2.22	2.64	3.47	3.61	3.61	3.33	1.39	0	0	0	0	0	0
120-150	0	0	0	0.83	1.81	1.67	0.56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150-180	0	0	0.56	2.36	0.28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180-210	0	0	1.11	1.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
210-240	0	0	0.14	2.08	0.56	0.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
240-270	0	0	0	0	1.11	2.08	1.53	1.81	1.39	1.94	2.5	2.5	2.36	2.64	2.22	1.67	0.14	0	0	0
270-300	0	0	0	0.42	1.81	0.69	0.83	0.83	2.08	1.39	1.94	2.08	1.81	2.22	1.39	0.97	0	0	0	0
300-330	0	0.14	1.11	0.56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
330-360	0	0.56	0.56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten sind ohne die unregelmäßigen Auswirkungen von Windfeldern je nach Standort kleiner als 0,35 bzw. 0,85 m/s. Da die im Wasser enthaltene Strahlleistung sich mit der dritten Potenz der Strömungsgeschwindigkeit ändert, ist der Energieinhalt bei 0,5 m/s Strom mit rund 60 W/m<sup>2</sup> sehr gering. Das Erfassen entsprechend großer Strömungsquerschnitte wird durch das ungünstige Verhältnis zwischen der Leistung und den resultierenden Lasten auf die Gründungsstruktur erschwert, in welche die Strömungsgeschwindigkeit nur quadratisch eingeht. Für einen wirtschaftlichen Betrieb sind Standorte mit einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit ab etwa 1 m/s wünschenswert. Modellversuche wurden bis 4 m/s in der Großausführung durchgeführt.

Durch den Reibungseinfluss am Gewässerboden bildet sich ein Geschwindigkeitsprofil aus, welches näherungsweise ab der halben Wassertiefe bis zur Oberfläche eine konstante Strömungsgeschwindigkeit erreicht. Darunter lässt sich das Profil gut mit einem Potenzgesetz annähern. Die Strömungskomponenten aus der Wirkung von Windfeldern dagegen klingen linear mit dem Abstand von der freien Oberfläche ab. Die Strömungszustände an realen Standorten können durch den Einfluss der Bodentopologie stark von diesem theoretischen Ansatz abweichen.

Aus den oben genannten Hindcast-Daten wurden auch Statistiken für die auftretenden Seegänge hinsichtlich der Perioden und Wellenhöhen aufgestellt.

### 3.3.1.2 Versuchskonzept und Modellbau

Die Versuchsanlagen des DST erlauben prinzipiell zwei Möglichkeiten, um die Anströmung des Modells zu realisieren. Das Modell kann entweder stationär angeströmt werden oder, wie in dieser Versuchsreihe gewählt, durch stehendes Wasser geschleppt werden. Die erstgenannte Variante ermöglicht zeitlich fast unbeschränkte Messungen mit geringen Wartezeiten und erfüllt generell das aus der Bodenreibung resultierende Geschwindigkeitsprofil, welches sich fast unabhängig vom Maßstab einstellt. Allerdings bedingen die erforderlichen Strömungsgeschwindigkeiten aufgrund des großen Querschnitts Einschränkungen bei der Wassertiefe, was zu einem kleineren Modell und verstärkten Maßstabseinflüssen führt.

Die gewählte Konfiguration mit dem fahrenden Schleppwagen erlaubt einen kleineren Maßstabfaktor und sehr genaue und reproduzierbare Messungen. Das Geschwindigkeitsprofil wurde mit einer mitgeschleppten Bodenplatte und einem vorangestellten Drahtgitter nachgebildet.

Für die Auslegung und den Bau der Repeller wurden verschiedene Möglichkeiten diskutiert. Optimierte Flügel mit radialer Änderung des Anstellwinkels besitzen zwar den bestmöglichen Wirkungsgrad, sind aber im Modellbau aufwändig und lassen keine Anpassungsmöglichkeiten im Rahmen der Modellversuche zu. Abwickelbare Kreissegmentprofile mit radialem Twist sind einfacher zu fertigen und effizient, jedoch sehr empfindlich gegenüber Abweichungen vom optimalen Betriebspunkt. Somit fiel die Wahl auf nicht getwistete, zugespitzte Profile mit einem toleranten Profilquerschnitt. Diese Flügel erlauben die Einstellung verschiedener Anstellwinkel und bilden den besten Kompromiss aus geringem Fertigungsaufwand, hoher Effizienz und Variabilität der Modellkonfiguration.

Die Einhaltung des jeweiligen Rotor-Betriebspunktes wurde mit Hilfe von drehzahlgeregelten Moto-

ren in den Gondeln sichergestellt, welche sowohl an- als auch abtreibend genutzt werden können. Zum Schutz gegen eindringendes Wasser bei minimalen Reibverlusten wurden die Auslegerarme und die Gondeln unter leichtem Luft-Überdruck gehalten. Die resultierende Anordnung des Modells zeigen Abbildung 1 und Abbildung 2.

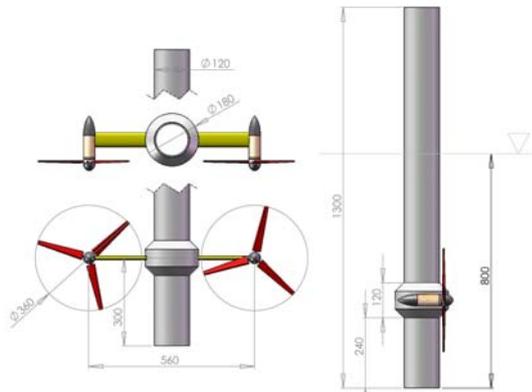


Abbildung 1 Anordnungszeichnung der Gesamtstruktur



Abbildung 2 Modell mit Bodenplatte

### 3.3.1.3 Durchgeführte Messreihen

Zur detaillierten Untersuchung der Rotoren wurden so genannte Freifahrtversuche durchgeführt. Hierbei wird der Modellrepeller mit Hilfe eines schlanken, strömungsgünstigen Schaftes in einem ausgewählten Schlupf-Bereich betrieben. Der Schlupf  $s_R$  repräsentiert hier für konstant eingestellte Blatt-Anstellwinkel unterschiedliche Verhältnisse der auf die Rotorsteigung bezogenen Umfangsgeschwindigkeit zur Geschwindigkeit der ungestörten Anströmung  $V_A$ .

$$s_R = 1 - \frac{V_A}{nP} \quad \text{Gl. 1}$$

Für verschiedene Schlepp- bzw. Strömungsgeschwindigkeiten wurde die Drehrate variiert und die auftretenden Axiallasten sowie die Drehmomente wurden gemessen. Im Rahmen dieser Versuche können Wechselwirkungen mit dem Bauwerk ausgeschlossen werden und mit bewährter Messtechnik für Modellpropeller exakte Messungen durchgeführt werden. Da dieser Aufbau hohe Geschwindigkeiten zulässt, können auch die zähigkeitsbedingten Maßstabseffekte untersucht werden. Ein weiterer Freiheitsgrad dieser Messreihe ist der Anstellwinkel der Blätter und die damit verbundene Variation des Auslegungspunktes.

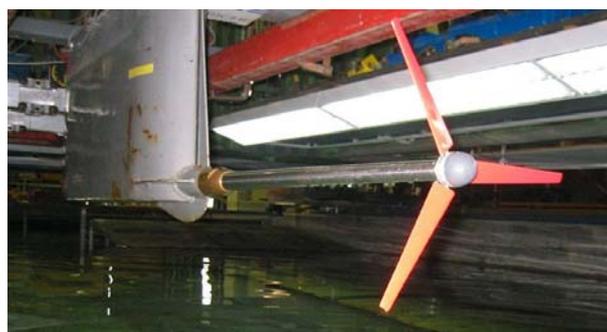


Abbildung 3 Freifahrtgerät mit einem der Repeller

Das Geschwindigkeitsprofil über der Bodenplatte wurde zunächst ohne die Kraftwerksstruktur aufgemessen und iterativ an eine theoretische Kurve angepasst. Hierzu wurde in der unteren Hälfte des Querschnitts Maschendraht teils mehrlagig vor dem Testquerschnitt positioniert.

Im Anschluss an die beschriebenen Voruntersuchungen wurden verschiedene Messreihen mit der gesamten Struktur sowohl mit als auch ohne Repeller durchgeführt. Die Strukturlasten wurden nicht in der Schnittstelle zwischen der Bodenplatte und dem Monopile, sondern über Wasser, am Kopf der Struktur mit einer 6-Komponenten-Waage gemessen. Zusätzlich wurde ein speziell

konstruiertes und gefertigtes Messglied im Ansatz eines der Rotorausleger verwendet. Im Anschluss an die Messungen unter Glattwasserbedingungen wurden verschiedene Messreihen in regelmäßigen und unregelmäßigen Seegängen durchgeführt.

Zur Validierung der Anordnung mit Bodenplatte in stehendem Wasser dienten ergänzende Versuche im kleinen Flachwassertank. Dort wurde bei stationärem Modell die durch die Pumpenleistung limitierte maximale Strömungsgeschwindigkeit eingestellt.

<b>Messreihen</b>	<b>Messgrößen</b>
- Freifahrt der Repeller	- 5 Kräfte in der Modellaufhängung
- Anpassung des Geschwindigkeitsprofils	- Horizontallast in der Wurzel des Auslegers
- Lasten und Betriebsgrößen im Tidestrom	- Drehraten der Repeller
- Lasten und Betriebsgrößen im Seegang	- Drehmomente der Repeller
- Lasten und Betriebsgrößen in Strom und Seegang	- Axiallast der Repeller in der Freifahrt
- Referenzmessung angeströmt	- Verformungen der freien Oberfläche

#### **3.3.1.4 Repeller Freifahrt**

In den Freifahrtmessungen zeigten sich außerordentlich große Maßstabeffekte. Werden die Versuche mit Froude'scher Ähnlichkeit durchgeführt, skalieren die Geschwindigkeiten bei einem Maßstab von 1:50 mit dem Faktor  $\sqrt{50}$ . Eine Strömungsgeschwindigkeit von 2 m/s in der Großausführung entspricht rund 0,28 m/s im Modellversuch. In Kombination mit der um den Faktor 50 verkleinerten Modellabmessung resultieren – bezogen auf die Profiltiefe auf 70% des Radius und die sich aus Parallelanströmung und Umfangsgeschwindigkeit ergebende Blattanströmung – sehr geringe Reynoldszahlen in der Größenordnung von  $1 \times 10^4$ . In diesem Bereich ist nicht nur der Einfluss der Reibung an der Flügeloberfläche auf das nutzbare Moment erheblich vergrößert, sondern es treten auch massive laminare Strömungsablösungen an den Profilen auf. Selbst im Auslegungspunkt liefern die Modellrepeller somit kein abtreibendes Drehmoment, sondern müssen vielmehr noch angetrieben werden.

Vernachlässigt man die Froude'sche Ähnlichkeit und betreibt die Repeller bei höheren Geschwindigkeiten und den korrespondierenden Drehraten, so nähert sich die Charakteristik der Umströmung im Modellversuch der der Großausführung. Die Reynolds'sche Ähnlichkeit ist jedoch im Modellversuch nicht einzuhalten, da diese näherungsweise identische Kräfte unabhängig vom Maßstab bedeutet. Bis zur Grenze der mechanischen Belastbarkeit der Rotoren konnten erheblich reduzierte Maßstabeffekte gemessen werden, was durch einen zusätzlich angefertigten Kohlefaser-verstärkten Repeller noch einmal verbessert werden konnte.

Da diese Geschwindigkeiten mit der Gesamtstruktur nicht realisierbar sind und für die Gesamtlasten die Froude'sche Ähnlichkeit eingehalten werden muss, ist eine entsprechende Korrektur in die Prognose für die Großausführung einzurechnen. Abbildung 4 und Abbildung 5 veranschaulichen diese Effekte. Die ohne Zähigkeitsbedingte Maßstabeffekte gültige Rotor Kurve in Abbildung 4 wurde mit einem am Institut für Schiffstechnik und Transportsysteme entwickelten potentialtheoretischen Verfahren für Schiffspropeller bestimmt.

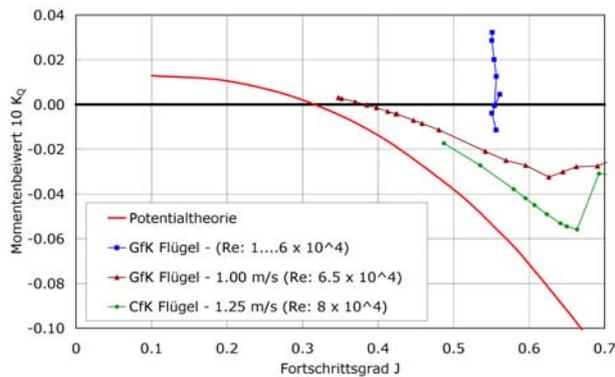


Abbildung 4 Momentenbeiwerte aus der Potentialtheorie und Messungen in Abhängigkeit von der Reynoldszahl

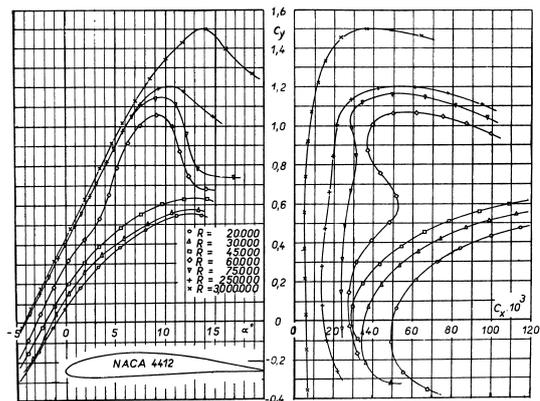


Abbildung 5 Reynoldszahl-abhängige Polaren des verwendeten Profils NACA 4412 (Lnenicka u. Horeni, 1974)

### 3.3.1.5 Gesamtstruktur in gleichförmiger Anströmung

Die genannten Maßstabseffekte treten auch bei der Gesamtstruktur auf, welche unter Einhaltung der Froude'schen Ähnlichkeit untersucht wurde. Durch die Kraftmessung im Ausleger und die Freifahrtergebnisse konnten die Belastungen der gesamten Struktur sehr gut in ihre Komponenten zerlegt werden. Die durch den Monopile und die Ausleger eingebrachten Lasten können direkt auf die Werte der Großausführung extrapoliert werden. Für die Lasten aus den Rotoren wurde eine Maßstabskorrektur eingerechnet. Die Ergebnisse für das Fundamentmoment und die Horizontallast sind grafisch in Abbildung 6 und Abbildung 7 dargestellt.

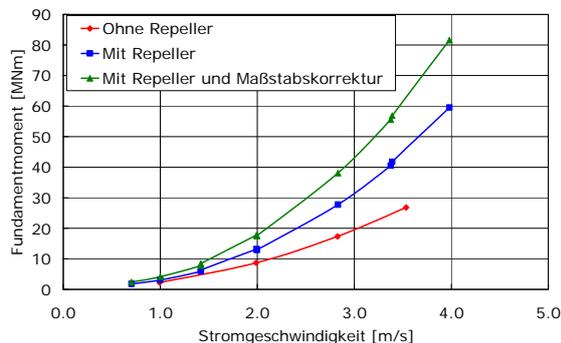


Abbildung 6 Fundamentmoment als Funktion der Stromgeschwindigkeit unter Glattwasserbedingungen

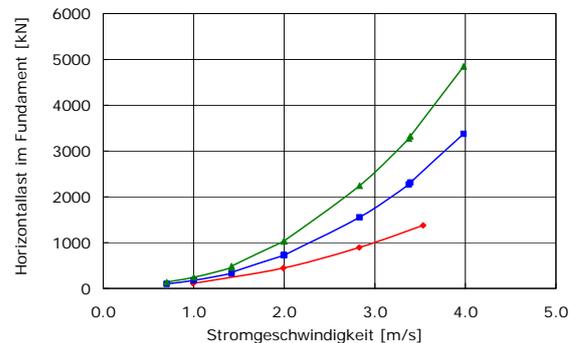


Abbildung 7 Horizontallast ohne Seegang

Bezüglich der Umwandlung von Strömung in elektrische Energie lässt sich bei der Gesamtstruktur ein leicht verschlechterter Wirkungsgrad im Vergleich zur Freifahrt feststellen. Dieser Effekt ist neben der schwachen Wechselwirkung mit der Struktur im Wesentlichen auf den Betrieb im Geschwindigkeitsprofil zurückzuführen. Durch die verzögerte Strömungsgeschwindigkeit in der 6-Uhr Stellung weicht dort die Anströmung der Blätter deutlich von der 12-Uhr Position ab. Die Einflüsse der Rotoren auf die freie Oberfläche und die Strömung am Gewässerboden sind vernachlässigbar.

### 3.3.1.6 Gesamtstruktur im Seegang

Die Versuchsreihen im Seegang wurden größtenteils für zwei ausgewählte Stromgeschwindigkeiten durchgeführt. Die Lastschwankungen infolge des Seegangs können in guter Näherung mit den Belastungen aus der gleichförmigen Anströmung überlagert werden, so dass die Lasten für andere Stromgeschwindigkeiten abgeleitet werden können. Die meisten Messungen wurden für Sinuswellen mit verschiedenen Höhen und den zugehörigen Perioden, welche gemäß den HIPOCAS-Daten häufig auftreten, durchgeführt. Im Rahmen der in der Natur auftretenden Parameter-Kombinationen ist die Abhängigkeit der Strukturlasten von

der Periode bei gegebener Wellenhöhe gering. Tendenziell sind jedoch lange Wellen aufgrund der höheren Phasengeschwindigkeiten und der tiefer reichenden Orbitalbewegung kritischer als eine kurze, steile See. Ergänzende Versuche wurden mit unregelmäßigen Seegängen gemäß JONSWAP Spektren mit verschiedenen Anlaufängen durchgeführt. In Abbildung 8 und Abbildung 9 sind für das Fundamentmoment und die Horizontalkraft jeweils die Mittel-, Minimal- und Maximalwerte für eine Stromgeschwindigkeit von 2,82 m/s aufgetragen.

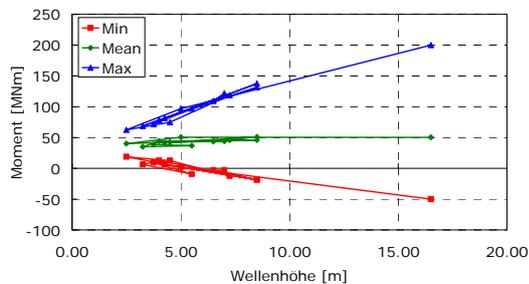


Abbildung 8 Einspannmoment in der Gründung

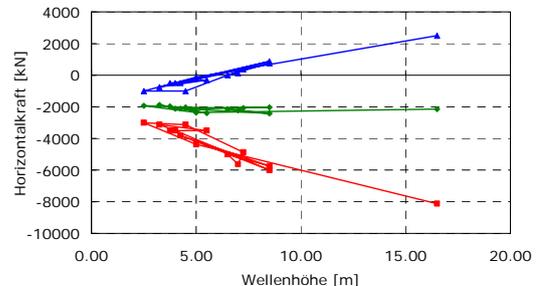


Abbildung 9 Horizontallast im Einspannquerschnitt

Durch die Überlagerung der Orbitalbewegungen im Seegang mit dem Tidestrom ergibt sich schon bei moderaten Seegängen eine signifikant ungleichförmige Anströmung der Rotoren. Da insbesondere bei starkem Seegang mit langer Periode auch Standorte mit 40 m als Flachwasser gelten, wirkt sich der Seegang bis auf den Gewässerboden aus. Die periodisch schwankenden Orbitalgeschwindigkeiten erreichen teilweise den gleichen Betrag wie die überlagerte Strömungsgeschwindigkeit. Somit wird der Betrieb eines Tidestromkraftwerks mit horizontaler Achslage schon bei moderaten Seegängen unwirtschaftlich und sehr schnell sogar unmöglich.

### 3.3.1.7 Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Modellbau mangels geeigneter auf dem Markt verfügbarer Komponenten und aufgrund der sehr speziellen Anforderungen sehr aufwändig war. Auch die elektronische Regelung und Messwerterfassung der Motoren erwiesen sich als sehr anspruchsvoll.

Im weiteren Projektverlauf sollen nun alternative Anlagenkonzepte auf ihre Eignung als Tidestromturbine untersucht werden. Gemantelte Rotoren mit kleineren rotierenden Bauteilen sind zwar interessant aber nur schwierig mit der Struktur einer Offshore-Windkraftanlage kombinierbar. Turbinen mit vertikaler Achse konnten sich bisher aus verschiedenen Gründen im Bereich der Windenergie nicht durchsetzen. Durch die besonderen Anforderungen und Randbedingungen unter Wasser und besonders in Kombination mit einer Windkraftanlage könnten sie jedoch bei der Umsetzung von Energie aus den Gezeitenströmen eine gute Alternative darstellen.

### 3.3.2 Numerische Entwicklungen und Untersuchungen

Im vergangenen Bearbeitungszeitraum konnte der Umfang der Simulationsmöglichkeiten erheblich erweitert werden. So sind nun umfassende Methoden für rotierende Repeller verfügbar, die mit den bestehenden Methoden kombiniert werden können. Der modulare Aufbau mittels Overset-Gittertechnik erlaubt ferner den Austausch von Teilnetzen und/oder Methoden, ohne dass jeweils wieder vollständig neue Netzkonfigurationen generiert werden müssen. Ebenfalls neu integriert sind nun Methoden zur Simulation flacher Gewässer unter Berücksichtigung von Seegangseffekten, die über zeitlich veränderliche Randbedingungen in die instationären Berechnungen eingebracht werden können.

Exemplarisch für diese Entwicklungen sind unten stehende Beispiele angefügt. Diese beziehen sich weiterhin vorwiegend auf die bereits im vorangegangenen Zwischenbericht vorgestellte Testgeometrie mit Tandemrotoranlage. Abbildung 10 bis Abbildung 14 zeigen Ergebnisse einer Simulation unter Berücksichtigung der freien Oberfläche, bei der die Repellerwirkung noch über ein Kraft-Scheibenmodell eingebracht wird. Die inkompressible Strömung wurde hier mit dem Verfahren der künstlichen Kompressibilität berechnet. Die Darstellung der freien Oberfläche erfolgt über eine Level-Set Methode. In Abbildung 10 und Abbildung 11 ist die vertikale Geschwindigkeitskomponente in einer horizontalen Schnittebene und durch eine vertikale, transparente Schnittebene durch die Rotoren dargestellt. Da die Rotoren die gleiche Drehrichtung haben, werden die Tragarme der Repellergondeln unterschiedlich belastet, siehe Abbildung 12 und Abbildung 13. Die Simulation wurde unter dem Einfluss (zunächst regelmäßigen) Seegangs wiederholt. Abbildung 14 zeigt die Auslenkung der freien Oberfläche und die Vertikalkomponente der Strömungsgeschwindigkeiten für einen Zeitpunkt während der Simulation.

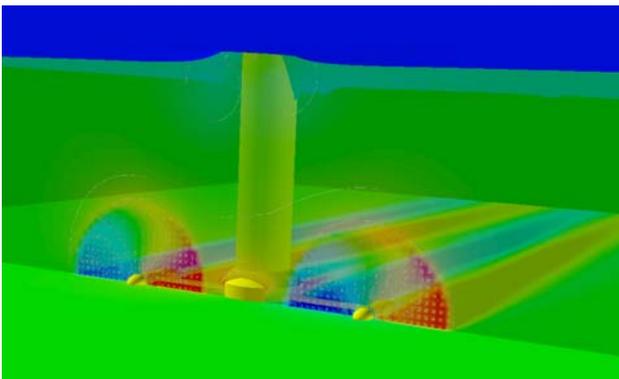


Abbildung 10 Vertikale Geschwindigkeit mit horizontaler Schnittebene in Höhe der Tragarme. Zusätzlich ist die Rotorebene transparent eingeblendet.

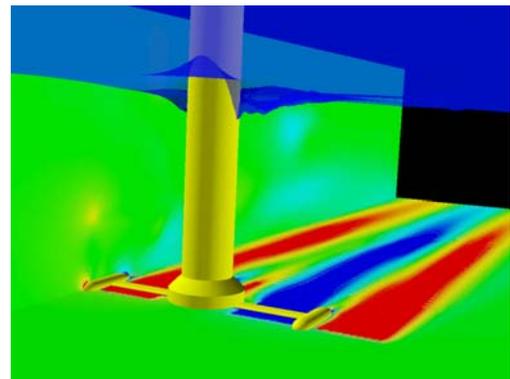


Abbildung 11 Wie Abbildung 10 jedoch mit einer Schnittebene durch die linke Gondel

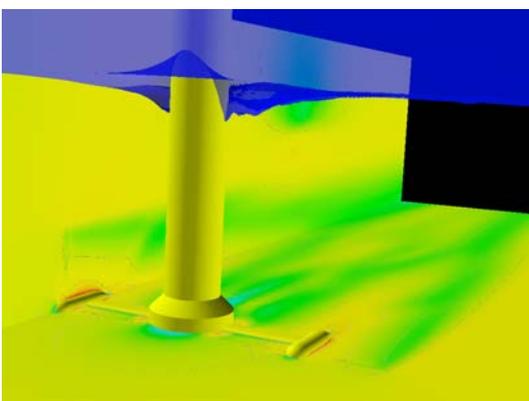


Abbildung 12 Geschwindigkeitskomponente in Anströmrichtung

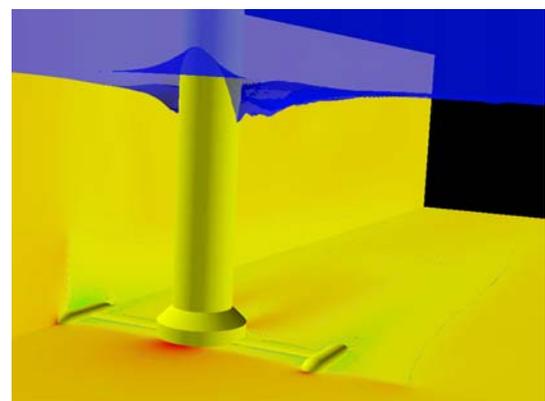


Abbildung 13 Druck und Auslenkung der Oberfläche (10-fach überhöht)

Zur genaueren Modellierung des Repellers wird eine Overset Methode angewendet. Bei dieser Methode wird ein detailliertes Repellergitter in ein Hintergrundgitter eingesetzt.

Die berechneten Werte auf dem Repellergitter bestimmen die Simulation in dem überdeckten Bereich des Hintergrundgitters. Die Interaktion der Gitter erfolgt über Interpolationsmethoden. Am Beispiel eines Repellers in Freifahrt wird diese Methode vorgestellt.

Zuerst wird die Geometrie des Modells festgelegt, siehe Abbildung 15. Bei der hier betrachteten Geometrie handelt es sich um den Repeller mit Gondel. Diese Geometrie wird in einen drehbaren (Abbildung 16) und einen raumfesten Teil (Abbildung 17) zerlegt.

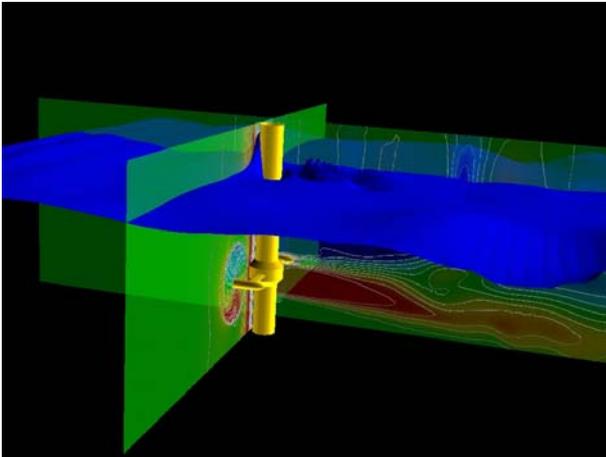


Abbildung 14 Geschwindigkeitskomponente normal zur hinteren Schnittebene und die freie Oberfläche (10-fach überhöht) bei Seegang

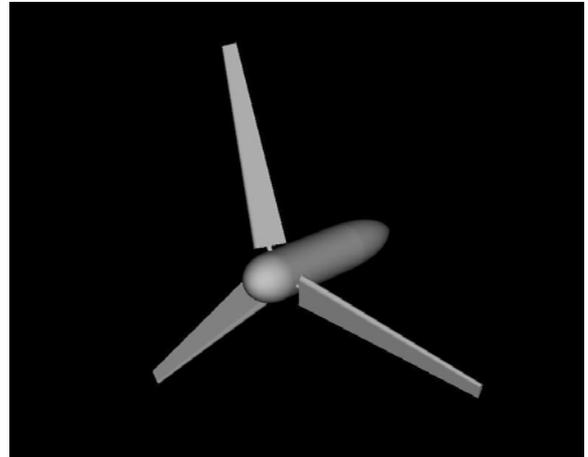


Abbildung 15 Repellergeometrie

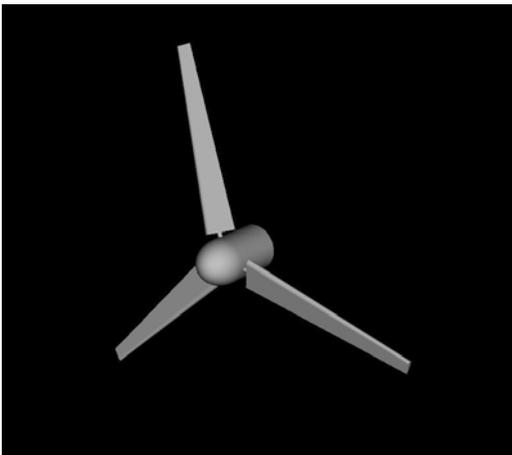


Abbildung 16 Rotierende Geometrie

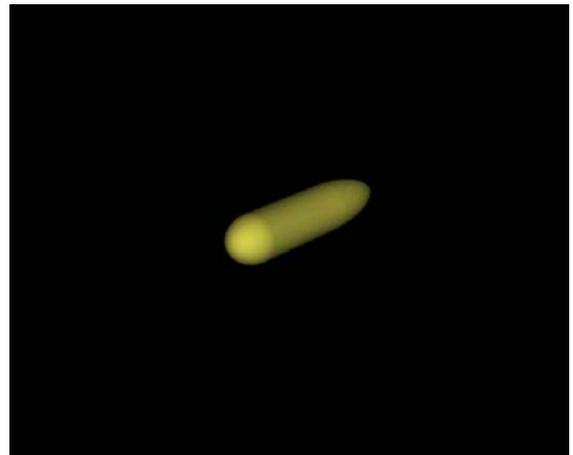


Abbildung 17 Raumfeste Geometrie

Es müssen also zwei Gitter generiert werden. Ein Gitter enthält den Repeller samt Blättern und Nabe. Dies ist das Gitter, welches sich in der Simulation dreht. Das raumfeste Gitter für die Gondel selbst ist so groß gewählt, dass es das Repellergitter komplett umschließt (Abbildung 18 und Abbildung 20). Ein Teil der Gondelgeometrie existiert also doppelt.

Die aus obigen beiden Teilen bestehende Repellereinheit kann nun in ein Hintergrundgitter eingesetzt werden. Zur Simulation der Propellerfreifahrt besteht letzteres aus zwei ineinander geschachtelten kartesischen Blöcken, Abbildung 19 und Abbildung 21.

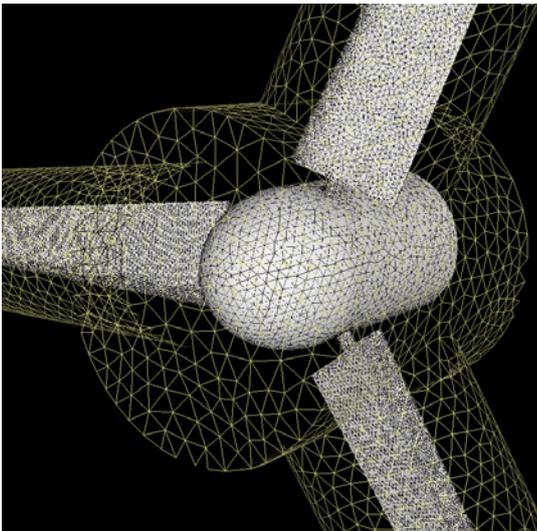


Abbildung 18 Vernetzung des Repellers

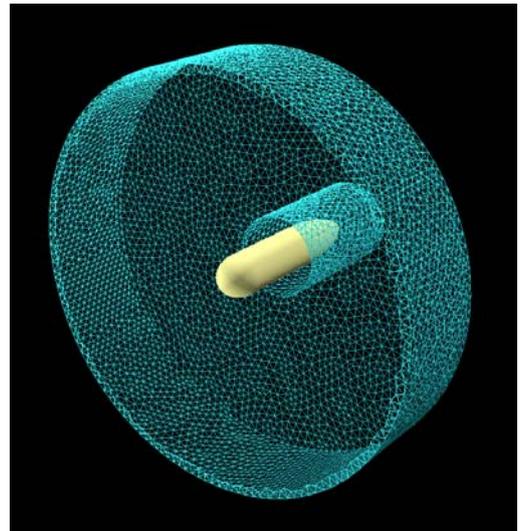


Abbildung 20 Vernetzung der Gondel

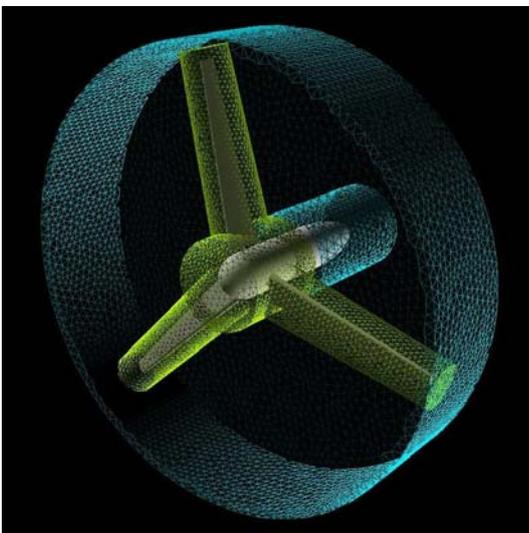


Abbildung 19 Vernetzte Repellereinheit

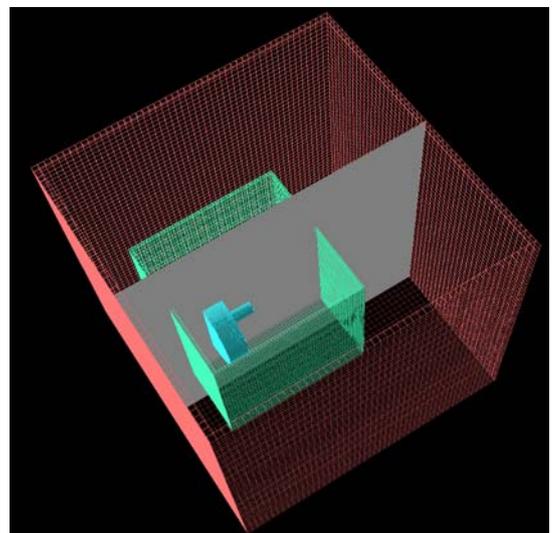


Abbildung 21 Repellereinheit im Fingergrundgitter mit Schnittebene

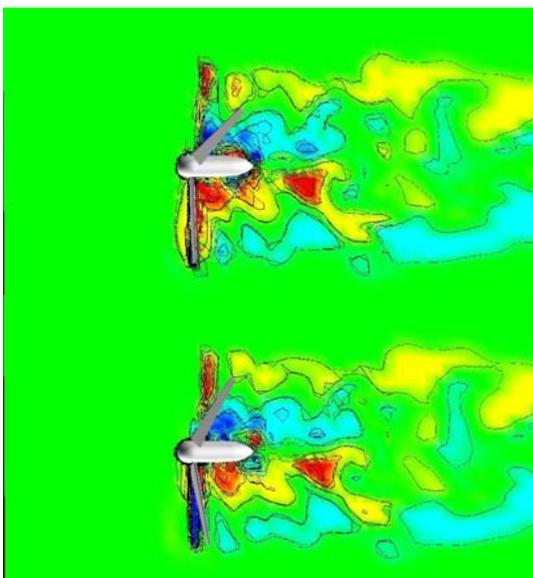
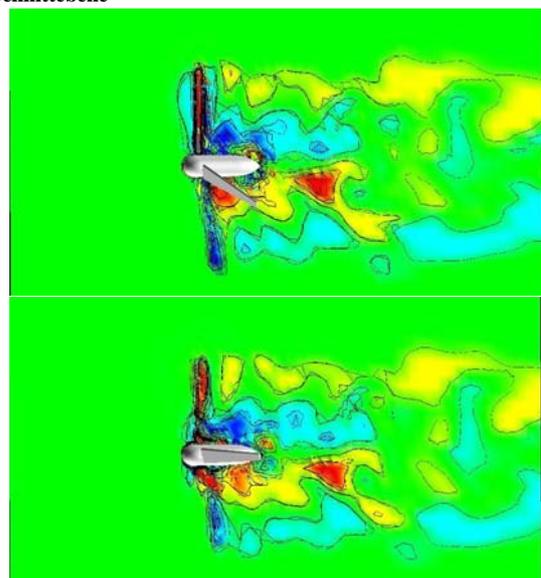


Abbildung 22 Geschwindigkeitskomponenten normal zur Schnittebene zu unterschiedlichen Zeitpunkten



In Abbildung 22 ist die Geschwindigkeit normal zur Schnittebene aus Abbildung 21 zu unterschiedlichen Zeitpunkten dargestellt. Im Gegensatz zur Modellierung des Repellers durch ein Kraft-Scheibenmodell wird hier die zeitliche Abhängigkeit des Prozesses deutlich.

Im nächsten Schritt wurde der für die Freifahrt modellierte Repeller genutzt, um erste Simulationen für das gesamte Bauwerk durchzuführen. In Abbildung 23 ist gezeigt, wie das Repellergitter an die nun im Hintergrundgitter enthaltenden Gondeln angesetzt wird. Die linke Gondel ist zum besseren Verständnis ausgeblendet. Das linke Bild zeigt die äußere Hülle der Repellergitter im Hintergrundgitter, das rechte Bild die gesamte Geometrie.

Abbildung 24 zeigt den Druck auf den Oberflächen sowie in einer transparenten Schnittfläche mit Isolinien durch die Repellerebene, zu zwei verschiedenen Zeitpunkten während der Simulation.

Die Netze im hier betrachteten Beispiel bestehen insgesamt aus ca. 1 Mio. Gitterpunkten und 5 Mio. Elementen. Da die Overset Methode zum gegebenen Zeitpunkt Berechnungen auf mehreren CPUs noch nicht unterstützt, sind die betreffenden Simulationen sehr aufwändig. Simulationen mit einer erwünschten, höheren Auflösung sind daher noch nicht möglich. Aus diesem Grund wird derzeit verstärkt an der Parallelisierung der Overset-Methode gearbeitet.

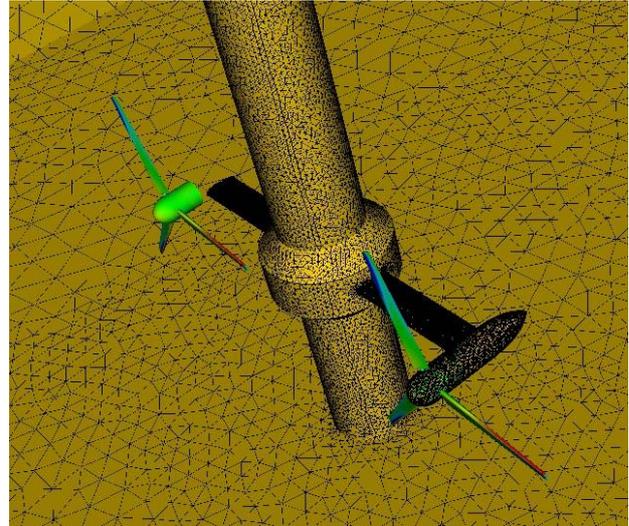
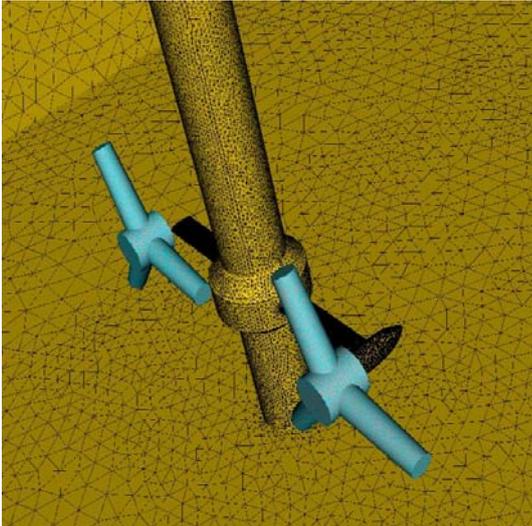


Abbildung 23 Repellergitter und Repellergeometrie im gesamten Simulationsgebiet

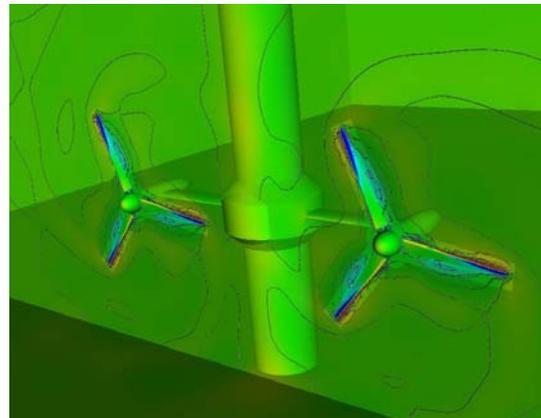
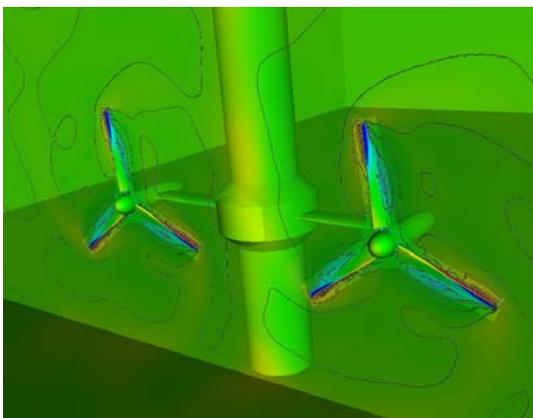


Abbildung 24 Verteilung des Druckes auf der Geometrie und einer transparenten Schnittebene mit Isolinien

Die Flexibilität dieser Overset Methode wurde bisher am Beispiel der Repeller Freifahrt und der Simulation des gesamten Bauwerkes nicht vollständig ausgenutzt, weshalb ein weiteres Beispiel vorgestellt wird. Betrachtet seien zwei gegenläufig drehende Rotoren, die so dicht zusammenstehen, dass die Rotorblätter ineinander greifen. Zu diesem Zweck werden zwei Repellergitter, in ein gemeinsames Hintergrundgitter eingesetzt. In Abbildung 25 sind die Repellergitter sowie Isolinien konstanter Geschwindigkeit zu zwei verschiedenen Zeitpunkten während der Simulation dargestellt. In diesem Beispiel existieren Bereiche im Hintergrundgitter, die im zeitlichen Fortschritt der Simulation von beiden Repellergittern abwechselnd überstrichen werden.

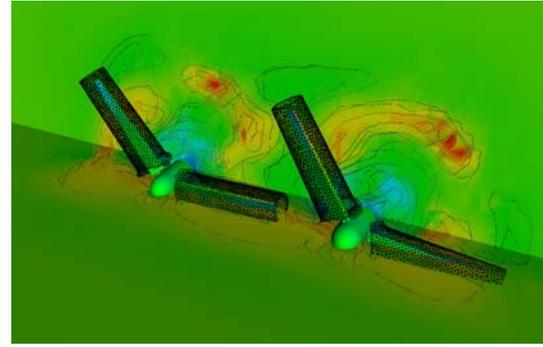
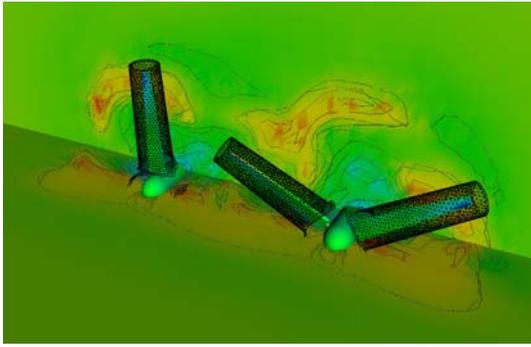


Abbildung 25 Gegenläufig drehende und ineinander greifende Rotoren

### 3.3.3 Erfassung der Einwirkungen: Berechnung vs. Modellversuch

Bereits im ersten Zwischenbericht 02/2007 wurden die Möglichkeiten zur Berechnung der Einwirkungen für die Gründungsdimensionierung diskutiert. So können die Strömungskräfte vorab über den Impulssatz und die Wellenkräfte mit Hilfe des Computerprogramms Waveloads (Mittendorf et al., 2003) auf Grundlage der Morison-Formel (1950) ermittelt werden.

Die so ermittelten Lasten können nun mit den Messdaten der im DST-Flachwassertank durchgeführten Modellversuche verglichen werden, siehe Abbildung 26. Dort sind die Resultierenden aus Wellen- und Strömungsbelastung für Strömungsgeschwindigkeiten von  $v_1=1,41$  m/s und  $v_2=2,82$  m/s dargestellt. Danach sind die berechneten Belastungen geringer als die gemessenen Belastungen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der Berechnung der Wellenkraft im Rahmen des Programms Waveloads die rotierenden Flügel nicht erfasst werden. Trotz dieser Einschränkung lässt sich eine gute Annäherung an die Messergebnisse mit den zum Teil recht einfachen und damit praxistauglichen Berechnungsansätzen feststellen. Demnach weichen die Messwerte von der Berechnung teilweise bis zum doppelten Wert ab. Für die Entwurfsdimensionierung können die Belastungen vorerst erfasst werden, bis genauere Methoden verfügbar sind.

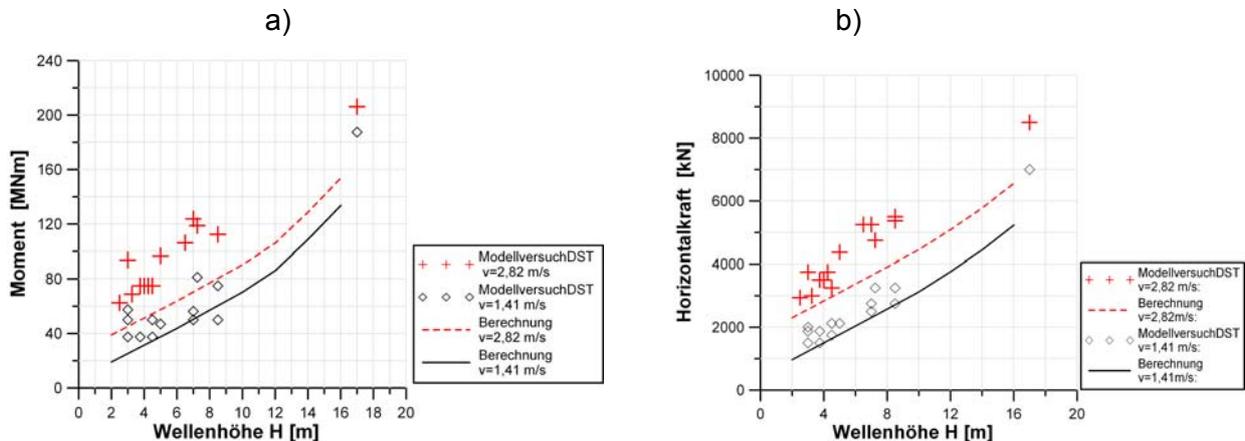


Abbildung 26 Ermittelte Belastungen in Abhängigkeit der Wellenhöhe (a: Moment, b: Horizontalkraft)

### 3.3.4 Abbildung des Elementverhaltens unter zyklischer Belastung

#### Bodenverhalten unter monotoner Belastung

Um das Systemverhalten einer Monopile-Gründung beschreiben zu können, muss zunächst das Elementverhalten des Bodens bekannt sein. Als Versuchsboden wurde exemplarisch ein leicht plastischer Schluff (UL) verwendet. Entsprechend seiner Kornverteilung nach Abbildung 27 repräsentiert er typische Böden in Nord- und Ostsee (vgl. Zwischenbericht 02/2007).

Das Bodenverhalten wird als elasto-plastisch modelliert. Dabei werden die Scherspannungen durch eine Bruchbedingung nach Drucker-Prager und die Druckspannungen durch eine Kappe

begrenzt. Das Modell ist in Abbildung 28 und die Stoffparameter sind in Tabelle 3 angegeben.

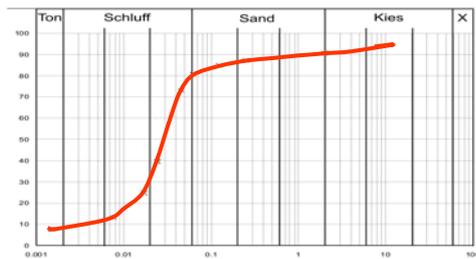


Abbildung 27 Kornverteilung des Modellbodens (UL)

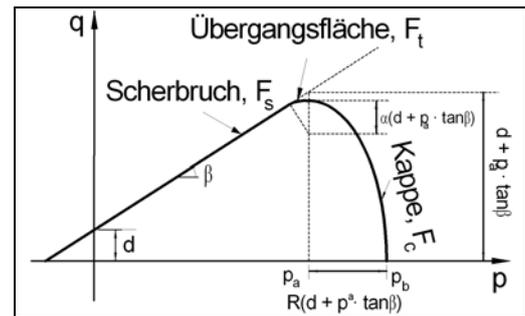


Abbildung 28 Stoffmodell für den verwendeten Schluff

Tabelle 3 Stoffparameter UL für das Drucker-Prager-Kappenmodell

Größe	Formelzeichen	Wert	Einheit
Elastizität	E	45	[MN/m <sup>2</sup> ]
Querdehnung	n	0,3	[-]
Reibungswinkel (umgerechnet aus Mohr-Coulombscher Bruchbedingung*)	b	42	[°]
Kohäsion (umgerechnet aus Mohr-Coulombscher Bruchbedingung*)	d	19	[kN/m <sup>2</sup> ]
Exzentrizität	R	0,4	[-]
Anfangsfließfläche der plast. Volumendehnung	e <sub>pl</sub>	0	[-]
Übergangsradius	a	0,05	[-]
Verhältnis der Fließspannungen	K	1	[-]
Kompressionsbeiwert	C <sub>c</sub>	0,0526	[-]
Schwellbeiwert	C <sub>s</sub>	0,0103	[-]

(\*...Mohr-Coulomb-Scherparameter aus Versuch zum Vergleich:  $\varphi' = 32^\circ$ ,  $c' = 13,4 \text{ kN/m}^2$ )

Die bodenmechanischen Eigenschaften des Schluffs wurden im Kompressionsversuch nach DIN 18135 und im direkten Scherversuch nach DIN 18137-3 analysiert. Die Ergebnisse wurden mit dem Finite-Elemente-Programm Abaqus nachgerechnet. Dabei wurde der Kompressionsversuch mit einem Element und der Scherversuch wegen der auftretenden Scherfuge mit 400 Elementen modelliert. Die Berechnungsergebnisse für den Kompressionsversuch nach Abbildung 29 zeigen erst bei der dritten Wiederbelastung Abweichungen von den Messergebnissen. Beim Scherversuch in Abbildung 30 liegen die errechneten Bruchspannungen unterhalb der gemessenen Werte, was auf die Einflüsse aus der Netzabhängigkeit bei Erreichen des Bruchzustandes (Maier & Hettler, 2003) zurückgeführt wird. Insgesamt aber bildet das verwendete Stoffgesetz insbesondere für Gebrauchslasten unterhalb des Bruchzustandes das Bodenverhalten gut ab.

Mit den vorliegenden Stoffparametern wurde weiterhin ein Triaxialversuch simuliert, der als Referenzversuch für die zyklischen Triaxialversuche benutzt wird. Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 31 dargestellt. Danach hat der Schluff ein sprödes Spannungs-Dehnungs-Verhalten mit anfangs großer Steifigkeit und anschließendem ausgeprägten Bruch.

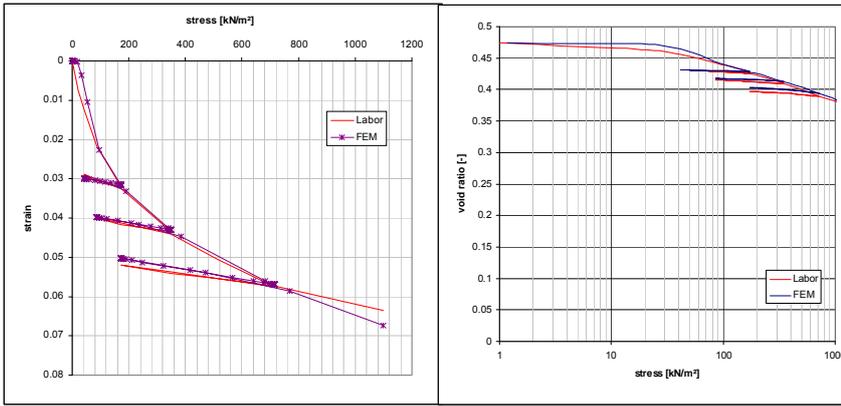


Abbildung 29 Ergebnisse Kompressionsversuch

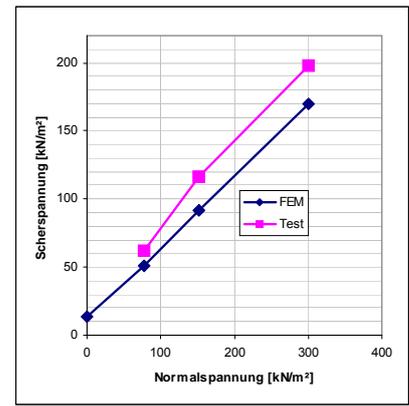


Abbildung 30 Ergebnisse direkter Scherversuch

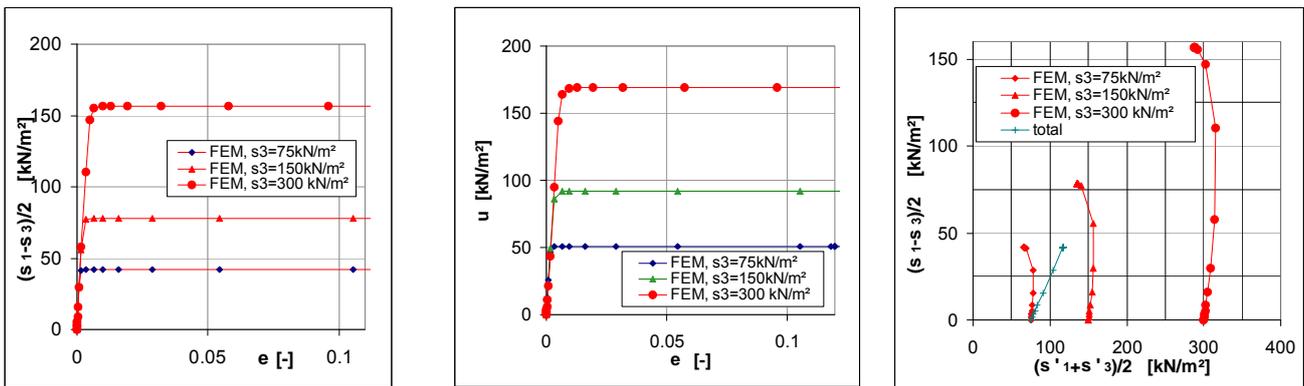


Abbildung 31 Simulation eines CU-Triaxialversuchs

### Bodenverhalten unter zyklischer Belastung

Es wurden zyklische, undrained, unconsolidated Triaxialversuche durchgeführt. Die Größe des zyklischen Belastungsverhältnisses wird nach Gl. 2 eingestuft. Die Auslegung der Versuche als Mehrstufenversuche mit wachsenden zyklischen Belastungsverhältnissen erlaubt das „Herantasten“ an den Versagenszustand an einer einzigen Bodenprobe und schließt damit Streuungen der Bodeneigenschaften aus.

$$CLR = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{zyk}}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{max, stat}} \quad \text{Gl. 2}$$

Beispielhaft sind in Abbildung 32 einige Versuchsergebnisse dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber wurde nur die jeweils letzte aufgebrachte zyklische Belastungsstufe CLR gekennzeichnet. In den Versuchen waren die Seitendrucke  $s_3 = 75, 150$  und  $300 \text{ kN/m}^2$ . Ist das zyklische Belastungsverhältnis gering genug, stellt sich eine Beruhigung ein und die Zuwachsrate der plastischen Dehnung bleibt klein. Mit jedem vorangegangenen zyklischen Belastungsverhältnis wächst die plastische Dehnung. Am Übergang von einer Belastungsstufe zur nächsten wird die plastische Dehnung sprunghaft vergrößert. Weil der verwendete Boden nicht unter gleich bleibenden Bedingungen hergestellt, sondern aus einem natürlichen Vorkommen gestört entnommen und aufbereitet worden ist, streuen auch die Versuchsergebnisse entsprechend. So wurde bei einem Versuch mit  $s_3 = 300 \text{ kN/m}^2$  (rote Kurve in Abbildung 32) die geringste zyklische Festigkeit festgestellt. Die Bodenprobe zeigte bereits bei einer kleinen zyklischen Belastung entgegen der Erwartung eine sehr große Akkumulation plastischer Dehnungen. Dieses Ergebnis wird deshalb während der weiteren Untersuchungen nicht berücksichtigt.

In Abbildung 33 ist das Langzeitverhalten der einzelnen Belastungsstufen im doppeltlogarithmischen Maßstab zu sehen, wobei die Dehnungen bei einer Zyklenzahl von  $N = 10.000$  normiert wurden. Die Kurven verlaufen innerhalb der ersten rd. 10.000 Zyklen annähernd linear. Bei stei-

gender Zyklenzahl kann teilweise ein überlogarithmischer Anstieg gemessen werden. Deswegen ist ein bilinearer Ansatz, wie in Abbildung 33 angedeutet, generell am treffendsten. Zur Beschreibung von sehr großen Zyklenzahlen wird die plastische Dehnung jedoch durch einen Potenzansatz nach Gl. 3, der sich in einen doppeltlogarithmischen Ansatz überführen lässt, mit ausreichender Genauigkeit approximiert. Die Steigung  $a$  ist bei allen Versuchen annähernd konstant und liegt hier im Bereich von rd. 0,1. Die plastische Dehnung im ersten Zyklus  $\epsilon_{pl}(N=1)$  ist vom Spannungsniveau CLR abhängig. Sie kann entweder direkt aus dem Versuch abgelesen oder aus einer Finiten-Element-Berechnung ermittelt werden.

$$\epsilon_{pl}(N) = \epsilon_{pl}(N = 1) \cdot N^a \quad \text{Gl. 3}$$

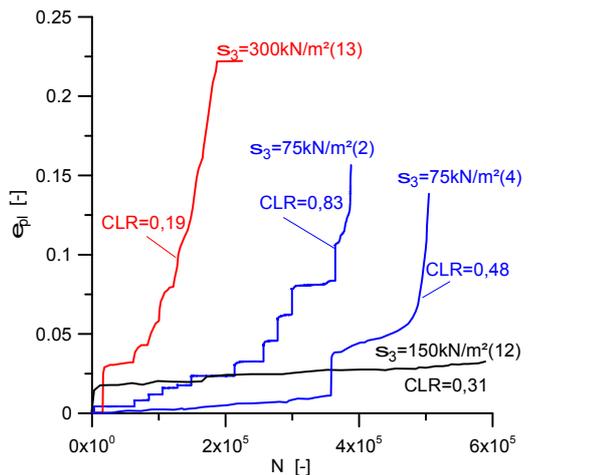


Abbildung 32 Vertikaldehnungen im zyklischen Triaxialversuch

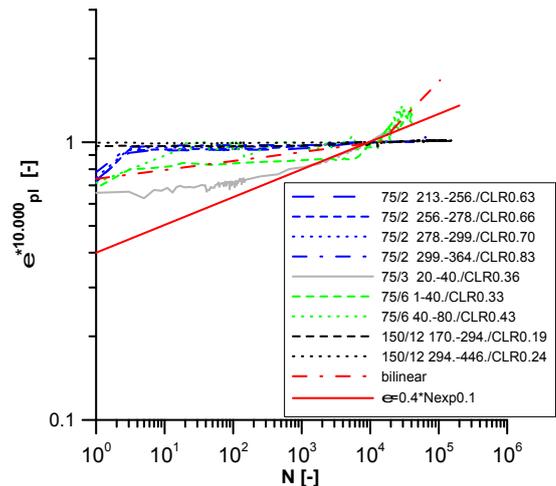


Abbildung 33 Normierte Vertikaldehnungen der einzelnen Belastungsstufen

Mit Hilfe von Gl. 3 wird die Zyklenzahl ermittelt, welche erforderlich ist, um eine bestimmte Dehnung von z.B.  $\epsilon_{pl}=0,01$  zu verursachen. Diese Zyklenzahl wird von dem zugehörigen zyklischen Belastungsverhältnis bestimmt. Die Abhängigkeit ist in Abbildung 34 dargestellt. Wird durch die Messergebnisse im doppeltlogarithmischen Maßstab eine Gerade gelegt, so ergibt sich eine Aussage über die zyklische Festigkeit, nämlich welches Spannungsspiel wie oft ertragen werden kann, um eine vorgegeben Dehnung nicht zu überschreiten.

Auf dieser Grundlage kann mit der konsequenten Form der Miner-Regel (Haibach, 1989) die gemessene plastische Verformung nachgerechnet werden, siehe Abbildung 35. Dieser Vorgehensweise liegt die Annahme zugrunde, dass die Dehnungszuwächse unabhängig von der Belastungsreihenfolge sind, welche bei sehr großen Zyklenzahlen und Spannungsniveaus deutlich unterhalb der statischen Bruchgrenze gerechtfertigt ist (Hinz et al., 2007).

Das Berechnungsergebnis in Abbildung 35 zeigt den Verlauf der plastischen Dehnungen, wobei die vorangegangenen Lastspiele ohne eine Akkumulation plastischer Dehnungen abgeschnitten wurden. Es sind also relative Dehnungen und Zyklenzahlen abgebildet. Das Ergebnis zeigt eine gute Übereinstimmung für das erste und das dritte zyklische Belastungsverhältnis. Bei der mittleren Stufe werden die Dehnungen geringfügig unterschätzt. Grund hierfür kann die Kraftsteuerung der Versuchsanlage sein, die eventuell von der Vorgabe geringfügig abweichende Spannungen verursacht hat. Dies hätte eine größere Stauchung zur Folge, die in dem Berechnungsmodell nicht abgebildet werden kann. Die genauen Ursachen werden noch weiter untersucht.

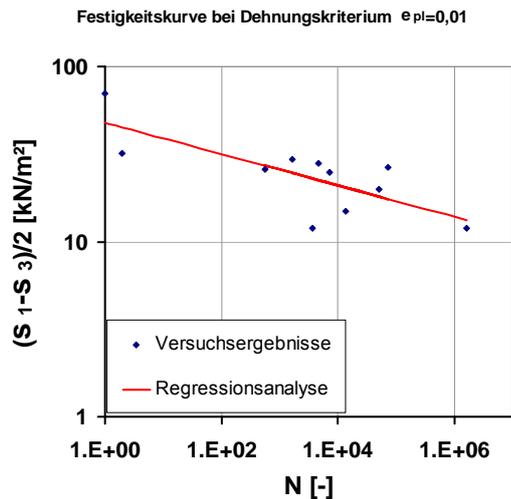


Abbildung 34 Ermittelte Spannungen mit zugehöriger Zyklenzahl für ein bestimmtes Dehnungskriterium

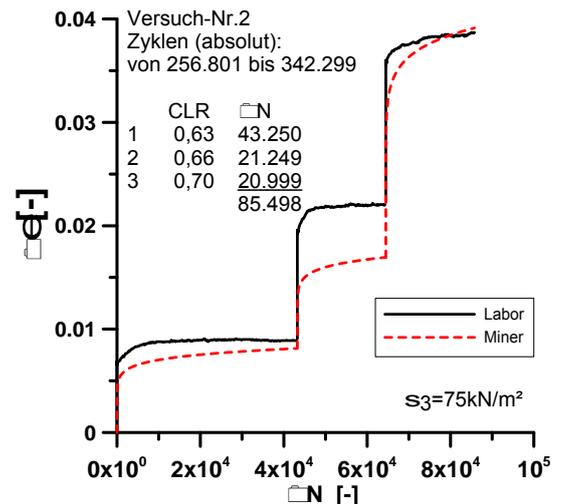


Abbildung 35 Nachgerechneter zyklischer Triaxialversuch

Um die Versuchsergebnisse für die Prognose von Verformungen unter realen Lastverhältnissen verwenden zu können, wird die zyklische Bodenfestigkeit nach Abbildung 34 den zu erwartenden Einwirkungen nach Kap. 3.3.3 gegenübergestellt. Unter Verwendung der Miner-Regel kann die Gesamtverformung des Bodenelements nach einer bestimmten Einwirkungsdauer für ein konkretes Lastkollektiv ermittelt werden. Zurzeit werden die entsprechenden Berechnungsmethoden analysiert. Außerdem ist es nur sehr schwer möglich, die Langzeitverformungen über 20 Jahre mit ausreichender Sicherheit anzugeben. Dazu wären theoretisch Laborversuche mit über 100 Mio. Zyklen notwendig. Vorerst werden die im Labor möglichen Zyklenzahlen von rd. 1 Million verwendet. Dies entspricht einem Belastungszeitraum der Anlage von ungefähr einem Vierteljahr. Diese Versuchsergebnisse müssen dann extrapoliert werden, um größere Zeiträume abzudecken.

In der verbleibenden Projektlaufzeit wird das Elementverhalten auf das Systemverhalten übertragen und die Systemantwort berechnet. Dazu wird die Zunahme der plastischen Verformung durch eine Abnahme der Bodensteifigkeit in dem zyklisch am stärksten beanspruchten Bodenbereich modelliert. Dieser befindet sich bei Monopilegründungen im Pfahlkopfbereich bis zu einer Tiefe des 1-2-fachen Pfahldurchmessers. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Untersuchung einer geeigneten Methode, mit welcher das Systemverhalten ingenieurpraktisch modelliert werden kann.

### 3.3.5 Literatur

- Haibach, E. (1989): Betriebsfestigkeit – Verfahren zur Bauteilberechnung. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Hinz, P.; Lesny, K.; Richwien, W. (2007): Prognose des Langzeitverhaltens von Monopilegründungen. In: Tagungsband zum HTG-Kongress 2007, Dresden, S. 153-162.
- Maier, Th. & Hettler, A. (2003): Netzabhängigkeit und Regularisierungsmethoden bei FE-Berechnungen mit hypoplastischen Stoffgesetzen für nichtbindige Böden, Bautechnik Heft 2, S. 89-108.
- Mittendorf, K.; Nguyen, B.; Zielke, W. (2003): Waveloads Version 1.0, Institute of Fluid Mechanics and Computer Applications in Civil Engineering, University of Hannover, Germany.
- Morison, J. R.; O'Brien, M. P.; Schaaf, S. A.; Johnson, J. W. (1950): The force exerted by surface waves on piles, Petroleum Trans. AIME, Vol. 189, p.149-157.

#### **4    Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittlere Unternehmen (kmU)**

Neben der energetisch sinnvollen Nutzung regenerativer Energien aus Wind- und Tidenströmung, stellt die entsprechende technische Umsetzung eine erhebliche Herausforderung für die betreffenden Unternehmen dar, woraus sich auch ein hohes Potential zur Schaffung von Arbeitsplätzen ergibt. Fachleute gehen von ca. 20.000 direkten und indirekten Dauerarbeitsplätzen aus, die allein durch Offshore-Windenergie in der Nordsee geschaffen werden können. Ein großer Teil dieser Arbeitsplätze wird hierbei in kleinen und mittleren Unternehmen entstehen.

Entsprechend der Problemstellungen, die mit den hier zu erstellenden Methoden bzw. Verfahren bewältigt werden können, besteht ein großes Nutzungspotential vor allem für:

Ingenieur- und Konstruktionsbüros, insbesondere in den Industriesparten der maritimen Technik bzw. des konstruktiven Ingenieurbaus, Wasserbaus und Grundbaus sowie der regenerativen Energie

Bauausführende Firmen, z. B. des Grundbaus, Wasser- und Küstenbaus

Bohrfirmen, Betreiber von Hubinseln, Bohrschiffen

Firmen für Auslegung, Bau, Installation, Betrieb und Wartung von Windenergie- und Tidenströmungsanlagen

Unternehmen der Energie-Betreiber

##### **4.1    Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse**

Mit den in diesem Vorhaben zu erzielenden Forschungsergebnissen sollen sowohl die fundierten Kenntnisse der zuverlässigen Randbedingungen, unter denen Offshore Tide- und/oder Windenergieanlagen zu planen, zu bauen, zu betreiben und zu unterhalten sind, erarbeitet als auch Planungswerkzeuge kleinen und mittleren Unternehmen für die Markterschließung zur Verfügung gestellt werden. Somit besteht ein Bezug zu den AiF-Fachgebieten "**Konstruktion**" und "**Produktion**" (AiF-Vordruck 4.1.23, jeweils für den Bereich "Hauptsächliche Nutzung") sowie "**Umweltechnik**" (AiF-Vordruck 4.1.23, für den Bereich "Nutzung auch möglich").

Bei den Wirtschaftszweigen (AiF-Vordruck 4.1.24) ist eine Zuordnung in folgende Bereiche (Hauptsächliche Nutzung) möglich:

Fahrzeugbau (Maritime Unternehmen, Bauverfahrenstechnik), Abteilungs-Nr. **34/35**;

Baugewerbe (Gründungs-, Wasser- und Küstenbau), Abteilungs-Nr. **45**;

Erbringung von Dienstleistungen (Ingenieurbüros, Wasser- und Umweltämter), Abteilungs-Nr. **72/74**;

Maschinenbau (Windanlagen- und Triebstrangbau), Abteilungs-Nr. **29**;

Energieversorgung (Energiegewinnung aus Wind und Tidenströmung), Abteilungs-Nr. **40/41**.

##### **4.2    Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der kmU**

Es ist geplant, den Abschlussbericht des Forschungsvorhabens als ein Manual abzufassen, das Empfehlungen für eine zuverlässige Lastermittlung, eine sichere Bemessung der Gründungsstrukturen und eine optimierte Bauverfahrenstechnik für Planung, Bau und Betrieb von Offshore Windenergie- und Tidenströmungsanlagen enthält. Dies trägt dazu bei, dass sich die Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit in verschiedenen mittelständisch strukturierten Wirtschaftszweigen verbessert.

Konkret kann erwartet werden, dass:

- einschlägige Dienstleister, zum Beispiel Ingenieurbüros und Klassifikationsgesellschaften, durch Rückgriff auf innovative Verfahren und auf fundierte Bemessungskriterien ihr

- Leistungsspektrum bei der Entwicklung, Planung und konstruktiven Auslegung von Offshore-Bauwerken verbessern und ausweiten können,
- Maritime Unternehmen, Produktionsfirmen bzw. bauausführende Unternehmen, die durch Entwicklung geeigneter Bauverfahrens- und Installationstechniken sowie den Einsatz entsprechend leistungsfähiger Anlagen und Geräte ihre Wettbewerbsfähigkeit bei Herstellung, Installation und Betrieb stärken
  - Firmen, die im Bereich Bau, Betrieb und Wartung von Anlagen zur Nutzung regenerativer Energiequellen tätig sind, ihre Stellung im internationalen Wettbewerb erhalten bzw. ausbauen.

## **5 Beabsichtigte Umsetzung der angestrebten Forschungsergebnisse**

Alle Ergebnisse des Vorhabens werden als Forschungsberichte abgefasst und von den beteiligten Forschungsstellen in deren Publikationsreihen veröffentlicht. Darüber hinaus sollen die Forschungsergebnisse in gemeinsamen Veröffentlichungen in einschlägigen Fachzeitschriften sowie durch gemeinsame Präsentationen auf Fachkonferenzen der Fachwelt zugänglich gemacht werden.

In einer engen Kooperation mit dem Projektbegleitenden Ausschuss und den kooperierenden Mitgliedervereinigungen werden während der Laufzeit des Projektes Anwenderseminare bzw. Workshops durchgeführt, in denen die potentiellen Nutzer über den Ansatz des Vorhabens, seine Entwicklung und die Ergebnisse informiert und frühzeitig eingebunden werden. Auf diese Weise können die Forschungsstellen frühzeitig Kontakt zu den Anwendern aus kleinen und mittelständigen Unternehmen und Planungsbüros aufnehmen und so auch deren Bedürfnisse im Detail abfragen. Der Informationsaustausch im aufzubauenden Netzwerk erfolgt über eine von den Forschungsstellen eingerichtete und gepflegte Website.

Darüber hinausgehende Planungen, wie Weiterentwicklungen in Kooperation mit den Anwendern und Zusammenarbeit in Pilotprojekten, zum Beispiel für die kombinierte Nutzung der Energie aus Wind und Tideströmung, werden angestrebt.

Zusätzlich zu den oben genannten Maßnahmen können theoretische und numerische Forschungsergebnisse in die Hochschullehre einfließen. In diesem Zusammenhang ist die Ausbildung qualifizierter Nachwuchswissenschaftler bei der Projektbearbeitung in beiden Forschungsstellen zu nennen. Somit sind gute Voraussetzungen auch unter diesem Aspekt für eine Verbreitung und Fortentwicklung der angestrebten Forschungsergebnisse gegeben.

**6 Durchführende Forschungsstelle(n) \*\*)**

Forschungsstelle 1: DST - Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme

Institutsleiter: Professor Dr. P. Engelkamp

Projektleiter: PD Dr.-Ing. T. Jiang

Forschungsstelle 2: IGB - Institut für Grundbau

Institutsleiter: Professor Dr.-Ing. W. Richwien

Projektleiterin: Dr.-Ing. K. Lesny

Duisburg, den 18.03.2008

---

Ort, Datum

---

Unterschrift des Leiters und Stempelabdruck  
der Forschungsstelle