

## **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 Tide-

strömung 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 Gründungsdimensionierung 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.

**Gründungs bemessung:** Gründungs bemessungen 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 Gründungs bemessung 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 erfolgen, 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 Tidesströmungsvorgänge 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 Kolkbildung 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. Diese werden zurzeit in das kommerzielle FE-Programm Abaqus implementiert, das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens zur Modellierung des Betriebsverhaltens ausgesuchter Gründungsstrukturen eingesetzt werden soll. Die Stoffgesetze werden anhand von bodenmechanischen Elementversuchen an typischen Bodenarten, die im Labor des IGB durchgeführt werden, kalibriert. Für die Entwicklung geeigneter Gründungsstrukturen und die Erarbeitung von Bemessungskonzepten für die kombinierte Windenergie- und Tidesströmungsanlage können die in den Forschungsprojekten Gigawind und Gigawind+ zu bau- und umwelttechnischen Aspekten von Offshore Windenergieanlagen gewonnenen Erkenntnisse herangezogen werden. An diesen Projekten war und ist 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 Kolktiefe 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 Kolk Schutzmaßnahmen oder ggf. auch die Berücksichtigung der zu erwartenden Kolktiefe 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 Standortwahl: Strömungsmechanische Minimalbedingungen, geotechnische Bewertung und Baugrundeigenschaften

##### **Strömungsmechanische Minimalbedingungen:**

Die Leistung einer Strömungsanlage ist grundsätzlich von der Strömungsgeschwindigkeit, der Dichte des Mediums und der Querschnittsfläche der Rotoranlage abhängig. Die ankommende Strahlleistung kann hierbei nach Betz theoretisch zu maximal 16/27, also ca. 59%, in mechanische Leistung umgesetzt werden. Je nach Anlage ist zudem ein Gütegrad zu berücksichtigen, der mit dem Betz-Faktor zu multiplizieren ist. Es lassen sich somit Wirkungsgrade  $\eta$  in der Größenordnung von 50% bezogen auf die verfügbare Strahlleistung erzielen.

Die Nutzleistung lautet dann:  $P_{nutz} = \eta \frac{1}{2} \rho v_{\infty}^3 A$  (Gl. 1)

Hierbei ist  $\rho$  die Dichte des Strömungsmediums,  $v_{\infty}$  Anströmgeschwindigkeit und  $A$  die Querschnittsfläche der Rotoranlage.

Tideströmungsanlagen haben somit gegenüber Windenergieanlagen zunächst den Vorteil einer ca. 800 mal höheren Dichte des Strömungsmediums. Im Gegenzug ist die Strömungsgeschwindigkeit i.a. deutlich geringer und die Querschnittsfläche  $A$  stärker begrenzt. Geeignet sind daher Standorte die bei nicht zu geringer Tiefe eine hohe Strömungsgeschwindigkeit aufweisen. Zunächst muss daher verstanden werden, unter welchen geographischen Gegebenheiten sich der Tidehub der Ozeane in hohe Strömungsgeschwindigkeiten umsetzen kann. Dies ist insbesondere der Fall wenn größere Hinterlandbecken über eine Engstelle mit den Ozeanen verbunden sind. In diesen Engstellen treten dann hohe Geschwindigkeiten auf. Vergleichbare Bedingungen können auch durch vorgelagerte Inselketten entstehen, zwischen denen sich der Tidehub ebenfalls in hohe Strömungsgeschwindigkeiten umsetzt. Beispielsweise findet sich südlich der Insel Sylt ein derartiges Gebiet hoher Tideströmungsgeschwindigkeiten. Günstige Bedingungen finden sich somit weltweit an verschiedenen Standorten, beispielsweise in Flussdeltas, Buchten oder Meerengen. Für Europa ist z.B. der Ärmelkanal zu nennen.

Die Minimalbedingungen, die für die Installation einer Tideströmungsanlage erforderlich sind, hängen natürlich vom im Vergleich zu den Anlagenkosten erzielbaren Stromertrag ab. Wird industrielles Wirtschaftsgut zugrundegelegt, erwartet ein Investor eine jährliche Rendite von ca. 10% der Anlagenkosten. Da wesentliche Teile von Bauwerk und Infrastruktur bei einer Offshore-Windenergieanlage bereits vorhanden sein müssen, ist als Investition im Sinne der kombinierten Anlage lediglich der zusätzlich erforderliche Bauaufwand zu bewerten.

Exemplarisch soll eine zweiseitige Anlage nach Unterpunkt 3.3.2 a (vgl. unten) mit einem Rotordurchmesser von 20m zugrundegelegt werden. Es soll ferner angenommen werden, dass

diese Anlage täglich 6 Stunden im Tidestrom zu betreiben ist und einen Gesamtwirkungsgrad von 50% aufweist.

Die jährliche Nutzdauer beträgt:  $T = 6 \cdot 365 = 2190$  Stunden

Die Nutzenergie entsprechend:  $W = \eta \rho v_{\infty}^3 AT$

in Zahlen für dieses Beispiel:  $W = 34404 v_{\infty}^3$

Folgende Tabelle zeigt den jährlichen Ertrag in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit, wobei ein Wert von 0,09 Euro/KWh(\*) angesetzt wird.

$v_{\infty}^3$ (m/s)	W (kWh)	Ertrag (Euro)	max. Invest (Euro)
0,50	43000	3,870.05	38,700.50
1,00	344004	30,960.40	309,604.00
1,50	1,161,014	104,491.34	1,044,913.40
2,00	2,752,035	247,683.16	2,476,831.60
3,00	9,288,118	835,930.68	8,359,306.80
5,00	43,000,594	3,870,049.50	38,700,495.00

(\*) Zukünftige Strompreise sind schwer einzuschätzen. Es wird erwartet, dass alle Energiepreise mittelfristig stark steigen, Zusatzvergütungen z.B. im Sinne des Einspeisegesetzes jedoch zurückgefahren werden.

Aufgrund der hohen Potenz der Strömungsgeschwindigkeit in der Ertragsfunktion kann bereits anhand der groben Abschätzung angesetzt werden, dass sinnvolle Standorte Strömungsgeschwindigkeiten von mindestens 1,0 bis 1,5 m/s aufweisen müssen.

### **Geotechnische Untersuchungen – Baugrunderkundung:**

Nachdem ein Standort entsprechend den hydrodynamischen Bedingungen als geeignet eingestuft wurde, ist für die weitere Planung der Konstruktion u. a. aus geotechnischer Sicht der Baugrund zu bewerten. Generell sind kombinierte Windenergie-Tideströmungsanlagen entsprechend DIN 1054 (2005) in die geotechnische Kategorie GK 3 als Bauwerke mit hohem Schwierigkeitsgrad einzuordnen.

Zur geotechnischen Standortbewertung ist i.d.R. eine detaillierte geophysikalische und geotechnische Baugrunderkundung erforderlich. Die Baugrunderkundung liefert im Einzelfall die für die Gründungsplanung und –bemessung erforderlichen charakteristischen Bodenkennwerte.

Vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) wurden für Offshore-Windenergieanlagen Mindestanforderungen für die Standortbewertung aus geophysikalischer und geotechnischer Sicht im „Standard Baugrunderkundung – Mindestanforderungen für Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen“ festgelegt. Diese Vorgehensweise und der Umfang der Maßnahmen können sinngemäß und auch für kombinierte Windenergie-Tideströmungsanlagen herangezogen werden. Zu einer ausführlichen Baugrunderkundung sowie einer begleitenden Überwachung während der Planungs-, Bau- und Betriebsphase gehören danach die in Tabelle 1 aufgeführten Elemente.

*Tabelle. 1: Planungselemente einer geophysikalischen und geotechnischen Baugrunderkundung nach BSH (2005)*

<b>Phase</b>	<b>Dokumentation in ...</b>
Vorarbeiten	Geologischer Vorbericht
Vorerkundung des Gebiets	Geologischer Bericht
Erkundung der Standorte	Baugrunduntersuchungsbericht und Fortschreibung des Geologischen Berichts
Entwurf der Gründungskonstruktion	Baugrund- und Gründungsgutachten
Ausschreibung der Gründungsarbeiten	
Bauausführung der Gründungsarbeiten	Protokolle und Auswertungen
Überwachung der Gründungsarbeiten	Ergebnisberichte und Bewertungen
Überwachung des Anlagenbetriebs	Ergebnisberichte und Bewertungen

Die Vorerkundung des Gebiets dient der generellen Beurteilung, ob der anstehende Baugrund für die Errichtung von kombinierten Windenergie-Tideströmungsanlagen geeignet ist. Daraus ergeben sich Hinweise für eine detaillierte Baugrunderkundung und bereits tendenzielle Anforderungen an die Gründungskonstruktionen.

Die eigentliche Erkundung der Standorte bildet den Schwerpunkt während der gesamten Dauer der Baugrunderkundungsphase. Dabei werden entsprechend des Standards Baugrunderkundung die Untersuchungsmethode und deren Umfang durch die geplante Anlage sowie durch den Baugrundaufbau und die morphologischen Verhältnisse am Standort bestimmt. Die Baugrunderkundung in Verbindung mit den sich an die Felderkundungen anschließenden bodenmechanischen Laborversuchen liefert den Baugrundaufbau und dessen Eigenschaften sowie die charakteristischen Bodenkennwerte für die Dimensionierung der Gründung.

Stehen die Baugrundeigenschaften mit ausreichender Sicherheit fest, kann die Gründungskonstruktion entworfen werden. Die Dimensionierung der Gründung erfolgt z. B. nach DIN 1054 (2005). Anschließend können die Gründungsarbeiten ausgeschrieben werden.

Während der Ausführung der Gründungsarbeiten sind die für die Berechnung der Konstruktion herangezogenen Bodenkennwerte zu überprüfen. Dies geschieht durch Messungen parallel zu den Herstellungsarbeiten, bei denen z. B. Rammprotokolle, im Idealfall Probelastungen Aufschlüsse über die angenommenen Tragfähigkeiten geben können.

Im Anlagenbetrieb dient die Anwendung der Beobachtungsmethode nach DIN 1054 (2005) dazu, frühzeitig unerwartete Abweichungen vom geplanten Verhalten, z. B. Setzungen oder Schiefstellungen, zu erkennen. Dann sind ggf. entsprechende Maßnahmen zu ergreifen, um den sicheren Betrieb der Anlage zu gewährleisten.

### **Baugrundeigenschaften:**

Da belastbare Baugrundeigenschaften und Bodenkennwerte nur nach einer entsprechenden Baugrunderkundung am gewählten Standort angegeben werden können, kann hier nur ein Überblick über die zu erwartenden Baugrundeigenschaften gegeben werden. Grundlage dafür sind die Planungsgebiete in der deutschen Nordsee, auch unter dem Gesichtspunkt, dass sie als Standorte für kombinierte Offshore-Windenergie-Tideströmungsanlagen ggf. nur bedingt geeignet sind.

Sindowski (1970) dokumentierte den Baugrundaufbau in der Nordsee in den oberen rd. 30-40 m Tiefe. Seine Ergebnisse sind in den Abbildungen 1 und 2 sowie in Tabelle 2 wiedergegeben. Demnach besteht der Baugrund in der südlichen Nordsee in der oberen Bodenschicht aus holozänen Sanden und tonig-schluffigen Sedimenten. Teilweise können diese Schichten auch aus Kiesen oder Muschelschill bestehen. Im Allgemeinen ist diese obere Bodenschicht locker bis

mitteldicht gelagert, ihre Mächtigkeit ist standortabhängig, beträgt i. d. R. jedoch maximal 3,0 m mit Ausnahme eiszeitlicher Rinnensysteme. Unter der holozänen Schicht lagert die pleistozäne Schicht, die aus Sanden oder Geschiebelehm besteht. Vereinzelt können Torfschichten auftreten. Die Sande sind meist dicht, z. T. sehr dicht gelagert und die bindigen Schichten durch eiszeitliche Vorbelastung überkonsolidiert. Charakteristisch für den Baugrund in der Nordsee sind die bereits erwähnten eiszeitlichen Rinnensysteme, die mit holozänen Sedimenten verfüllt sind. Am Übergang zu einem Rinnensystem ist daher mit einer sprunghaften Änderung der Tragfähigkeit zu rechnen.

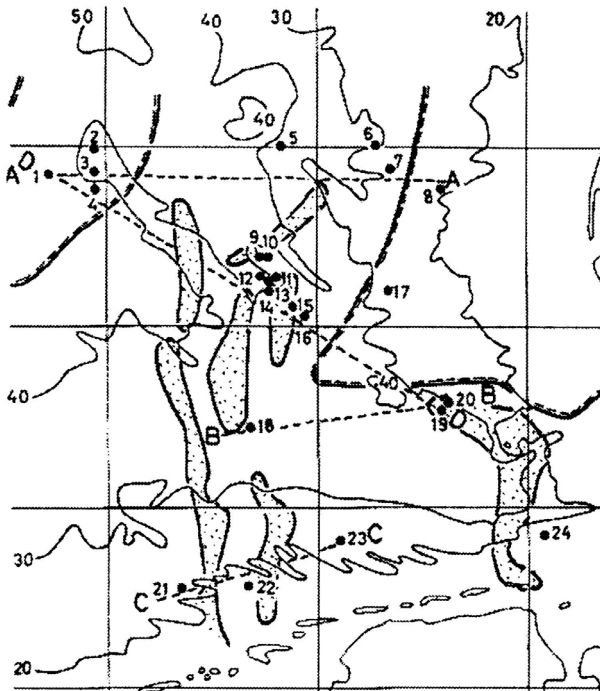


Abbildung 1:  
Geologische Schnitte A-  
A bis D-D in der Nordsee  
nach Sindowski (1970)

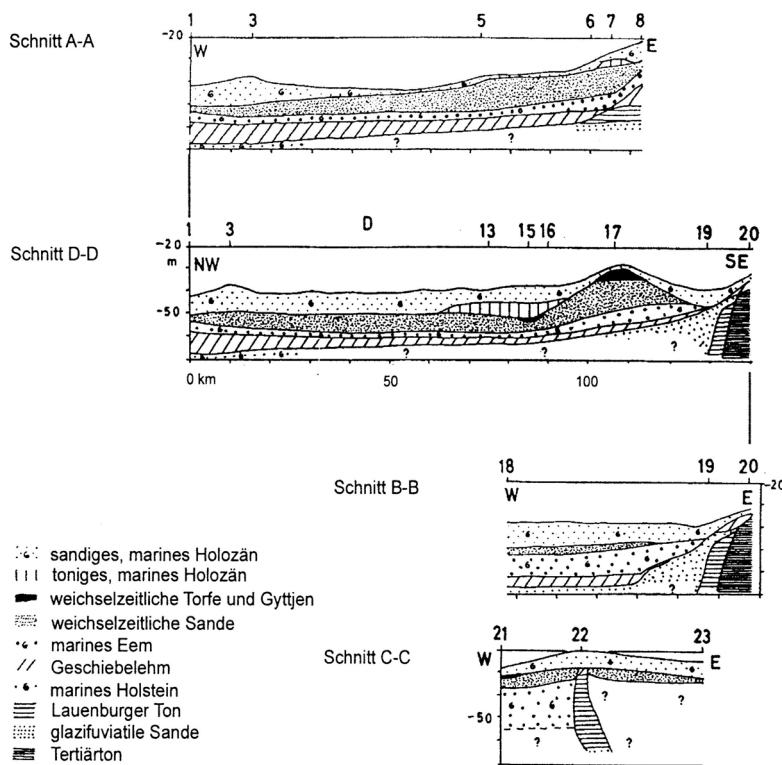


Abbildung 2: Schichten-  
verlauf in den Schnitten  
A-A bis D-D nach  
Sindowski (1970)



Tabelle 2: Schichtenaufbau und Bodenarten in der Nordsee nach Sindowski (1979)

Entstehungszeit		Schicht	Schicht -dicke [m]	Bodenart	
Holozän		obere, marine Schicht	1-15	meist graue Feinsande und schluffige Feinsande (Schlicksand) mit Molluskenresten, stark kalkhaltig	
Pleistozän	Weichsel-Eiszeit	limnisch-fluviatile Schicht	0-17	oberer Schichtbereich: tonig-sandige Mudden oder humose Lagen Unterer Schichtbereich: Fein- bis Mittelsande, teils kiesig	
	Eem-Warmzeit	Mittlere marine Schicht	4-20	Fein- bis Mittelsande, mit Kies	
	Drenthe (Saale)- Eiszeit	Beckenablagerung	glaziäre Schicht	0-3	dunkle Tone
				1-10	grauer, sandiger, geschiebearmer Geschiebemergel bzw. Geschiebelehm
			obere glazifluviatile Schicht	>2	Fein- bis Mittelsande mit geringer Kieskomponente
	Holstein-Warmzeit	untere marine Schicht	>2	Fein- bis Mittelsande	
	Elster-Eiszeit	Beckenablagerung		<30	dunkle, z.T. gebänderte Tone (Lauenburger Ton)
untere glazifluviatile Schicht			>2	Fein- bis Mittelsande mit geringer Kieskomponente	

Grundsätzlich ist der Bodenaufbau in der Nordsee sowohl für Flachgründungen, also Schwergewichtsfundamente oder Saugrohrgründungen, als auch für Tiefgründungen, d. h. Pfahlgründungen als Monopile oder als aufgelöste Struktur (Jackets o. ä.), geeignet. Da die Belastung aus der kombinierten Windenergie-Tideströmungsanlage erwartungsgemäß hoch sein wird und zudem der Strömungsrotor konstruktiv in das Gründungselement eingebunden werden muss, sind Tiefgründungen jedoch wesentlich geeigneter. Besonders bei den zu erwartenden oberflächennah locker gelagerten Schichten können durch eine Pfahlgründung die Lasten in tiefere, tragfähigere Schichten eingeleitet werden. Außerdem wird bei Wahl einer aufgelösten Gründungsstruktur die Last auf mehrere Gründungselemente verteilt, die entsprechend kleiner dimensioniert werden können. Die Gesamtkonstruktion wird dadurch steifer. Gerade bei aufgelösten Strukturen ist zudem die Integration eines Unterwasserrotors in die bestehende Konstruktion relativ gut möglich.

Bei der späteren konstruktiven Ausbildung und Bemessung der Gründung ist jedoch die Kolkbildung zu beachten. Die oberflächennahen Sedimente im Bereich der südlichen Nordsee bestehen in der Regel aus locker gelagerten Fein- bis Mittelsanden mit einer sehr eng gestuften Kornverteilung, wie in Abbildung 3 dargestellt ist, und sind daher prinzipiell kolkgefährdet. Die Kolkbildung wird zudem durch den Unterwasserrotor begünstigt. Sie kann zu einer deutlichen Reduzierung der Pfahleinbindetiefe und damit des lastabtragenden Bereichs führen. Gerade für

Monopilegründungen hat dies erhebliche Auswirkungen auf das Tragverhalten, das gerade von den oberflächennahen Schichten maßgebend beeinflusst wird. Bisher stellt die Kolkbildung jedoch einen rechnerisch kaum zuverlässig zu erfassenden Vorgang dar, der im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens noch zu untersuchen ist.

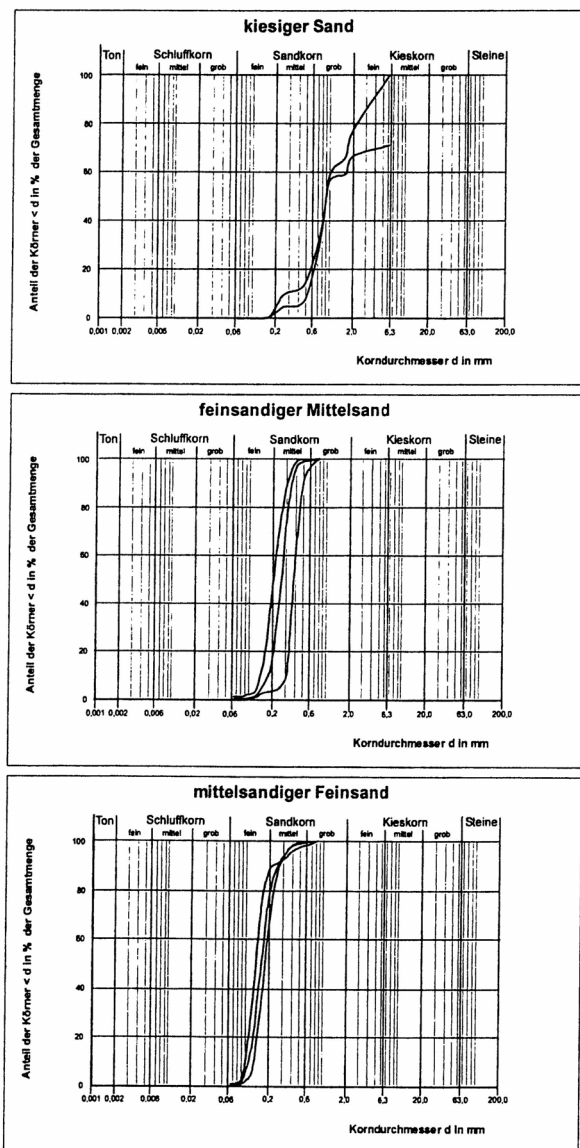


Abbildung 3: Korngrößenverteilung oberflächennaher Sedimente zwischen Helgoland und ostfriesischer Küste (Wiemann et al. 2005)

### 3.3.2 Musterkonstruktionen

Die Untersuchungen und Berechnungen im vorliegenden Projekt sollen exemplarisch anhand verschiedener Musterkonstruktionen durchgeführt werden. Diese Beispielanlagen sollen alle wesentlichen Eigenschaften möglicher Realisierungen aufweisen, jedoch im Detail, soweit möglich, sinnvolle Vereinfachungen darstellen. Sie dienen somit einerseits der Methodenentwicklung, andererseits sollen hieraus sinnvolle und bereits praxisrelevante Ergebnisse erzielt werden können, ohne detaillierte Konstruktionen vorwegzunehmen.

Ein modularer Aufbau der Musteranlagen soll ferner parametrisierbare Lösungen ermöglichen. So werden beispielsweise die Rotorkonfigurationen zunächst offen gehalten, um die Wirkung verschiedener Typen mit unterschiedlichen Blattzahlen und Profilierungen studieren zu können.

Es werden zunächst drei Grundtypen gewählt, die sich hinsichtlich der Tragstruktur und der Rotoranlage unterscheiden. Die Auswahl der Tragstruktur selbst ist wiederum vor allem von den Baugrund- und Strömungsbedingungen abhängig:

- a) Monopile mit zweirotoriger Strömungsanlage.
- b) Quadpod mit dreirotoriger Strömungsanlage auf Ring- oder Scheibenträger.
- c) Quadpod mit Umlaufrotor (Variation des Grundtyps b)

Die Anlagen sind im Folgenden kurz dargestellt und beschrieben.

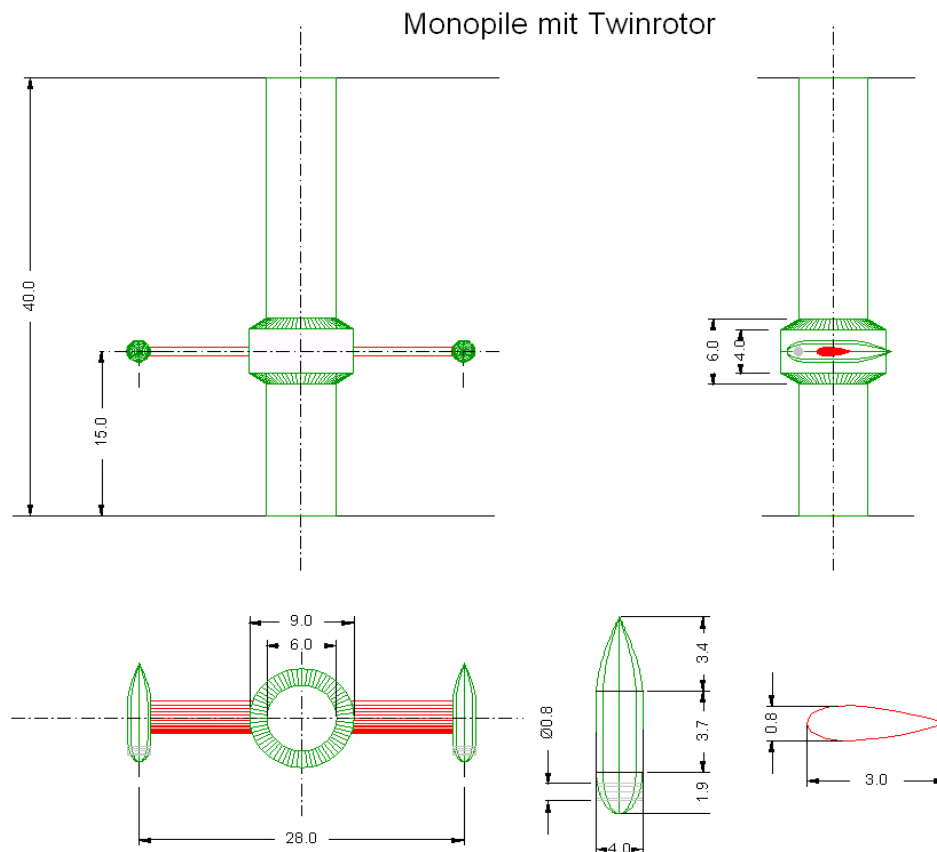


Abbildung 4: Monopile mit zwei Rotoren

#### a) Monopile mit zweirotoriger Strömungsanlage.

Bei ausreichend tragfähigen Böden und Wassertiefen bis ca. 30 Meter stellt eine Monopile-Gründung eine besonders wirtschaftliche Lösung zur Errichtung einer Offshore-Windenergieanlage dar. Ein derartiger Monopile bietet relativ gute Möglichkeiten zur Installation einer ergänzenden Unterwasserströmungsanlage. Aufgrund der Schlankheit bietet sich eine um die Hochachse schwenkbare Rotoranlage an, die entsprechend der jeweiligen Strömungsrichtung optimal ausgerichtet werden kann. Eine Ein-Rotoranlage ist ebenso möglich wie eine Anlage mit mehreren Rotoren in paralleler Anordnung. Da es sich um vergleichsweise flache Gewässer handelt, ist der Rotordurchmesser entsprechend begrenzt. Dies spricht für eine mehrtorige Anlage, mit der entsprechend größere Gesamtrorflächen erzielt werden können. Als weiterer Vorteil gegenüber einrotorigen Anlagen ist zu nennen, dass störende Einflüsse des Monopiles auf die Rotorumströmung reduziert werden können.

Die gewählte Konstruktion ist zweirotorig und besteht aus einer drehbar um den Monopile

angeordneten Aufnahmeeinheit, an der zwei Flügelträger montiert sind. An den jeweiligen Enden der Flügelträger befinden sich die Pods zur Aufnahme der Rotoren. Die Pods selbst sind geometrisch einfache Stromlinienkörper. Die Rotoren werden in Luv-Anordnung installiert. Für zunächst zweiflügelige Rotoren ist eine im Nabenbereich zylindrische Blattaufnahme vorgesehen. Eine derartige Aufnahme ermöglicht die Installation verstellbarer Rotorblätter. Im Gegensatz etwa zu Schiffspropellern sind Blätter mit hohem Streckungsverhältnis erforderlich, so dass die Verluste aufgrund des zylindrischen Nabenanschlusses wenig bedeutend sind.

Abbildung 4 zeigt die Grundkonstruktion dieser Anlage.

#### **b) Quadpod mit dreiroriger Strömungsanlage auf Ring- oder Scheibenträger.**

Bei großen Wassertiefen und/oder sehr leistungsfähigen Anlagen, vor allem aber bei weniger tragfähigen Böden, ist ein Monopile ggf. ungünstig, da unter Umständen keine ausreichende Bettung zur Einleitung der hohen Biegemomente erzielt werden kann oder die Abmessungen unwirtschaftlich werden. Es empfehlen sich daher Multipod-Konstruktionen, bei denen durch eine Aufspreizung der Konstruktion eine Lastverteilung auf mehrere Gründungselemente erzielt wird. Die Installation von Unterwasserströmungsanlagen gestaltet sich bei diesen schwieriger, da die Anlage selbst bereits recht ausladend ist und andererseits keine ausreichenden Freiräume zum Schwenken von Rotoren zwischen den einzelnen Trägern vorhanden sind. Um dennoch eine Strömungsanlage installieren zu können, bieten sich zunächst Konstruktionen an, die aus einer Vielzahl an kleinen Rotoren bestehen. Nachteilig hierbei ist jedoch, dass entsprechend viele Generatoren und Schwenkeinrichtungen vorzusehen wären. Sinnvoller erscheint daher die Konstruktion einer gesonderten Plattform zur Aufnahme der Unterwasserströmungsanlage.

Die Musterkonstruktion, Abbildung 5, besteht daher aus einer ring- bzw. scheibenförmigen Plattform die in mittlerer Wassertiefe um den Quadpod herumgebaut wird. Um diese Plattform drehbar ist die Trägeranlage für zunächst drei Rotoren angeordnet, so dass, wie beim Monopile, wiederum eine Ausrichtung nach der jeweiligen Strömungsrichtung möglich ist.

#### **c) Quadpod mit Umlaufrotor**

Als Alternative zur Rotoranlage in obiger Quadpod-Konstruktion nach 3.3.2 b) ist eine Anlage mit Umlaufrotor denkbar. Die diesbezügliche Grundkonstruktion ist noch in der Entwicklung und soll daher nur kurz angedeutet werden: Statt der drei Einzelrotoren kann an der vertikal drehbaren Trägeranlage ein einzelner Umlaufrotor befestigt werden, an dessen Enden vertikale Blätter angeordnet sind. Es handelt sich somit um einen Darrieus-Rotor in H-Konfiguration.

Vorteilhaft bei dieser Anlage ist, dass sie eine rechteckige Querschnittsfläche aufweist und somit bei begrenzten Wassertiefen eine größere nutzbare Fläche ermöglicht. Diese Eigenschaft ist insbesondere interessant, falls eine Reihe von Anlagen nebeneinander quer zur Hauptströmungsrichtung aufgebaut wird. Weiterhin kann der Durchmesser den Strömungsverhältnissen entsprechend groß gewählt werden, da lediglich entsprechend ausladende Rotorstützen erforderlich sind.

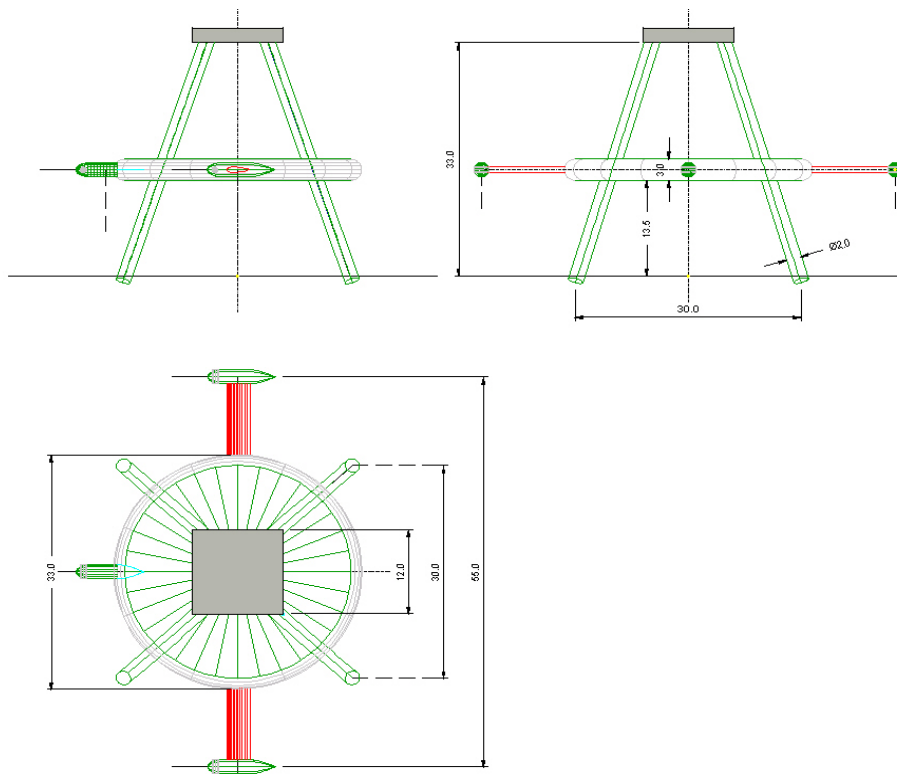


Abbildung 5: QuadPod mit drei Rotoren

Noch unklar sind die Erfordernisse bezüglich der Gestaltung der vertikal stehenden Rotorblätter selbst. Aus Gründen des Wirkungsgrads scheiden widerstandsbasierte Rotoren aus. Zu klären ist daher vor allem, ob in dieser Konfiguration ein rein passives, starres Rotorsystem möglich ist, oder ob eine während des Umlaufs zu steuernde zyklische Blattverstellung vorgesehen werden muss. Von derartigen Fragestellungen hängt wesentlich ab, ob der Anlagentyp erfolversprechend sein wird. Dies wird seitens der Projektbeteiligten derzeit erwartet. Es sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich, um diese Frage abschließend beantworten und ggf. eine Musterkonstruktion vorstellen zu können.

### 3.3.3 Belastung der kombinierten Windenergie-Tideströmungsanlagen

Die Belastung auf eine kombinierte Windenergie-Tideströmungsanlage resultiert im Wesentlichen aus:

- a) ständigen Lasten:                -Eigengewicht der Anlage
- b) veränderlichen Lasten:        -Wind,  
  -Wellen und  
  -Strömung.

Je nach Standort bzw. örtlichen Gegebenheiten sind ggf. zusätzlich zu berücksichtigen:

- Eislasten und
- Schiffsstoß

Durch die Forschung auf dem Gebiet der Offshore-Windenergie liegen zuverlässige Ansätze zur Ermittlung der Belastung reiner Offshore-Windenergieanlagen vor, welche während des Forschungsprojektes GIGAWIND geprüft bzw. erarbeitet wurden. Wird nun die vorhandene Struktur um die Unterwasserrotoren erweitert, werden zusätzliche Kräfte auf das Bauwerk hervorgerufen. Diese Belastungsänderung/ -erhöhung muss im weiteren Verlauf der

Forschungsarbeiten genauer untersucht werden. Um für eine Vorbemessung der Gründung einen ersten Anhaltspunkt zu bekommen, wurde eine vereinfachte Untersuchung am Beispiel der Monopilegründung durchgeführt. Die Baugrundeigenschaften spielen für dieses Rechenbeispiel eine untergeordnete Rolle, weil die Belastung unabhängig davon ist.

#### Wellenbelastung:

Die Berechnung einer Wellenbelastung auf Bauwerke kann auf verschiedene Arten erfolgen. Die häufig verwendete Morison-Formel (Morison 1950) für vertikale, zylindrische Bauelemente kann für eine kombinierte Anlage nicht ohne weiteres angewendet werden, weil die Kragarme für die Unterwasserrotoren nicht berücksichtigt werden können. Im Rahmen dieser Arbeiten wird daher das Computerprogramm WaveLoads (2003) verwendet, mit dem beliebige Geometrien berechnet werden können. Die Wellenkräfte werden dabei nach der Airy-Wellentheorie ermittelt.

Für die beiden Kragarme, an denen jeweils die Unterwasserrotoren befestigt sind (Abbildung 6), wurden dabei verschiedene Abmessungen gewählt. In erster Näherung wird von einem kreisförmigen Querschnitt ausgegangen. Die zugehörigen Abmessungen aus Tab. 1 sind gewählt und orientieren sich an theoretisch möglichen Werten. Für weitergehende Untersuchungen müssen sie allerdings überprüft und ggf. angepasst werden.

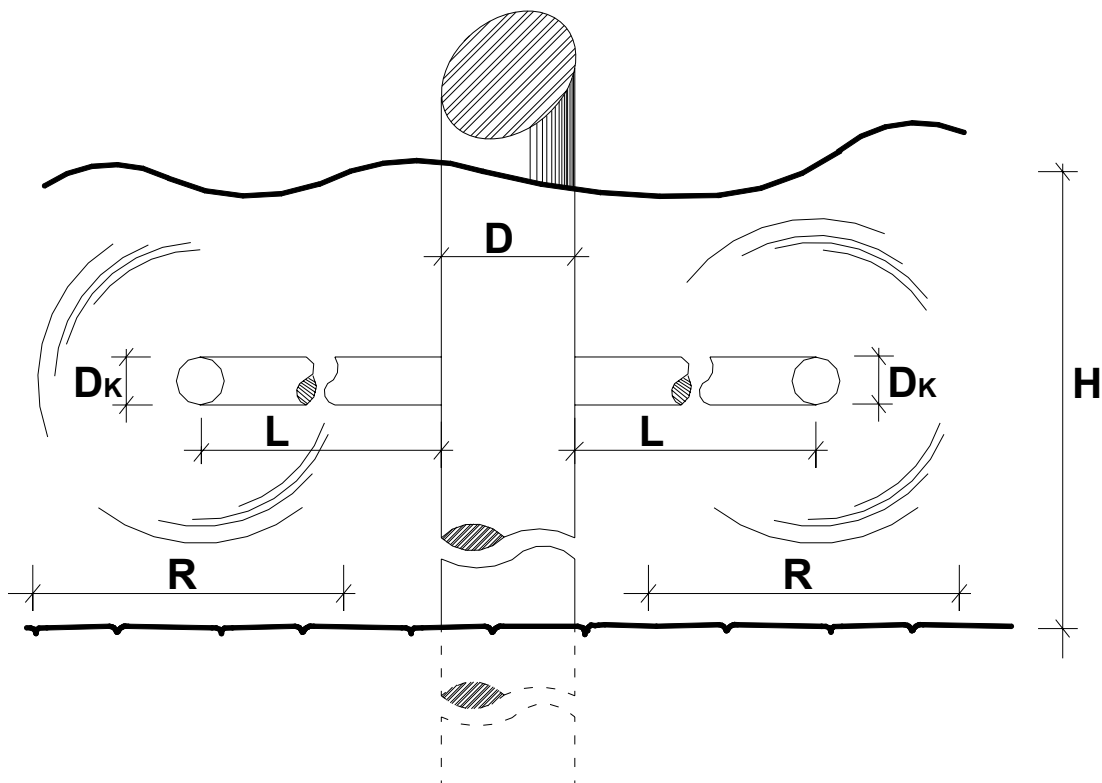


Abbildung 6: Geometrie zur Berechnung mit WaveLoads (2003)

Tab. 3: Beispielabmessungen für Monopilegründung mit 2 Unterwasserrotoren

Durchmesser Monopile D [m]	4	6	8	8	8
Rotordurchmesser R [m]	4	6	8	12	16
Kragarmlänge L [m]	4	5	6	8	10
Durchmesser Kragarm $D_K$ [m]	1	1,5	2	2,5	3

Es wurde zuerst die Wellenkraft auf einen Monopile für eine Offshore-Windenergieanlage berechnet. Danach wurde die kombinierte Anlage (Abbildung 6), bei der an dem Monopile zwei Kragarme angebracht sind, betrachtet. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 7 und 8 enthalten.

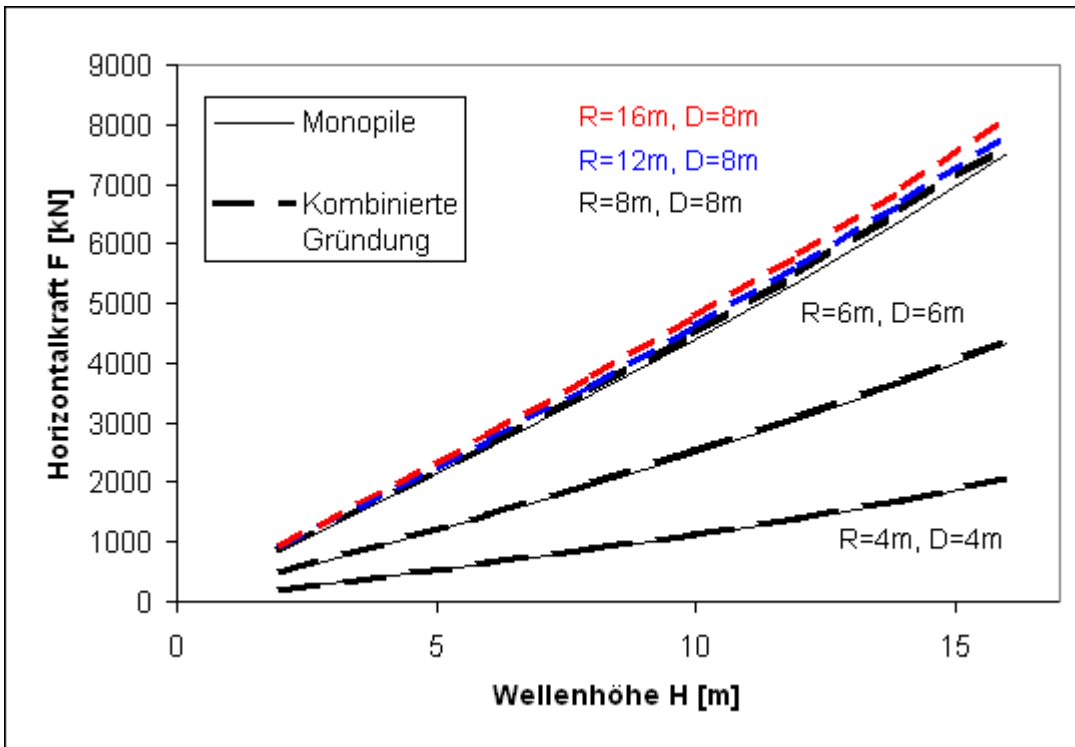


Abbildung 7: Horizontalkraft aus Wellenbelastung, (R=Rotordurchmesser, D=Monopiledurchmesser)

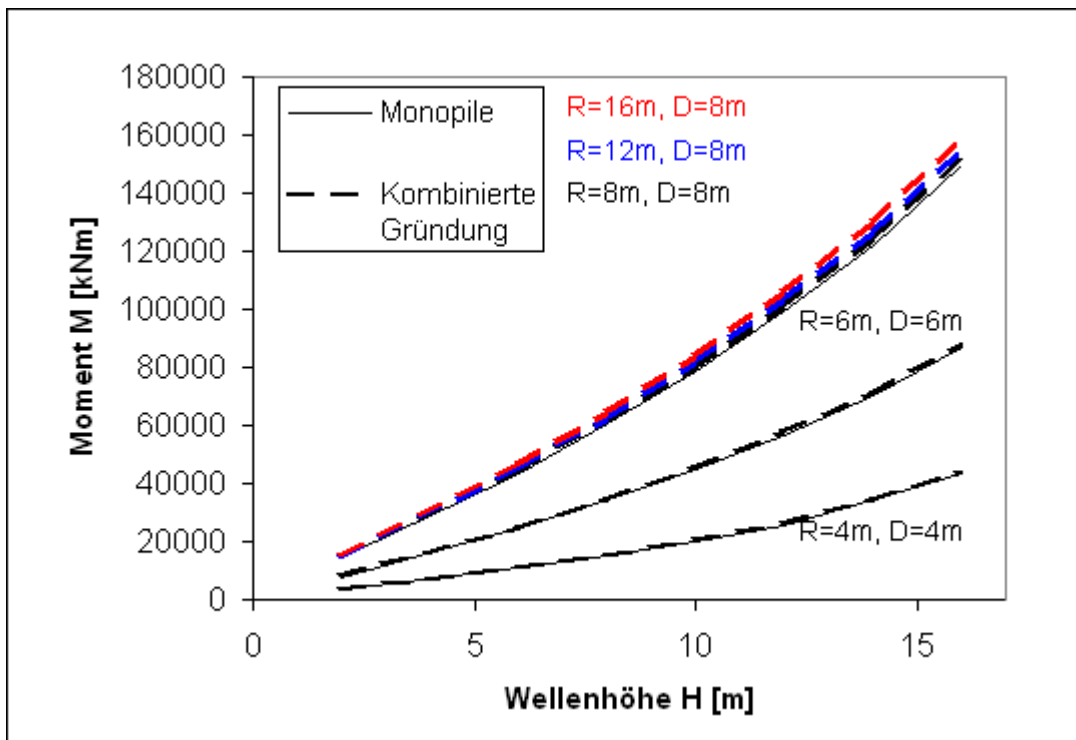


Abbildung 8: Moment aus Wellenbelastung,  
(R=Rotordurchmesser, D=Monopiledurchmesser)

Demnach sind die zusätzlichen Kräfte bei einer kombinierten Gründung prinzipiell größer als bei einem Monopile für eine reine Offshore-Windenergieanlage. Änderungen machen sich vor allem bei großen Wellenhöhen und leistungsfähigen Anlagen, welche entsprechend dimensioniert sind, bemerkbar. Der Zuwachs der Horizontalkräfte und Momente beträgt z.B. bei einem Pfahldurchmesser D=8 m und bei einem Rotordurchmesser R=16 m rund 10 % gegenüber einem Monopile ohne die Anbauten für Unterwasserrotoren. Je tragfähigere Kragarme durch größere Rotoren erforderlich werden, um so stärker wird auch die zusätzliche Wellenbelastung. Diese Ergebnisse hängen außerdem auch von der Position der Unterwasserrotoren ab. Diese müssten theoretisch direkt unter der Wasserfläche angebracht sein, weil dort die Strömungsgeschwindigkeit am größten ist. Dort treten aber gleichzeitig die größten Wellenbelastungen auf. Eine tiefere Anbringung erzeugt somit geringere Belastungen. Hier wird letztlich nur eine Analyse bezüglich der Wirtschaftlichkeit der Anlage zur Optimierung beitragen können. Die detaillierte Simulationen der Umströmung im Wellengang unter Berücksichtigung der Unterwasserrotoren ist Gegenstand weiterführender Arbeiten.

#### Rotorlasten unter Betriebsbedingungen:

Die Strömungsanlage entzieht der anströmenden Flüssigkeit laufend Energie was einer Abbremsung entspricht. Diese hat eine Impulsänderung der Strömung durch die Rotoren zur Folge. Die hierzu erforderliche Kraft tritt als axiale Rotorkraft auf und muss über das Bauwerk in den Baugrund abgeleitet werden.

In folgender Berechnung wird angesetzt, dass gemäß Betz-Faktor die Anlage für eine maximale Leistungsausbeute optimiert ist, d.h. es werden 16/27 der anströmenden Strahlleistung als Nutzleistung entnommen. Dies entspricht einer

Absenkung der Strömungsgeschwindigkeit auf  $v_{aus} = 1/3 \cdot v_{\infty}$

Nach Rankinescher Propellertheorie ist die Geschwindigkeit in der Rotorblattebene:



$$v' = \frac{1}{2} (v_\infty + v_{aus}) \text{ also } v' = \frac{2}{3} v_\infty \text{ (Gln. 2)}$$

Wird vereinfacht eine konstante Druckdifferenz  $\Delta p$  über der Rotorebene angenommen, gilt für die Nutzleistung  $P_{nutz} = 16/27 P_{strahl}$  ebenso:

$$P_{nutz} = v' A \Delta p \text{ (Gl. 3)}$$

Die Druckdifferenz bzw. die Axialkraft auf die Rotoren lautet dann:

$$\Delta p = \frac{4}{9} \rho v_\infty^2 \text{ und } F = \frac{4}{9} \rho v_\infty^2 A \text{ (Gln. 4)}$$

Da die Leistung über eine drehende Welle abgeführt wird, wird ferner ein Drehmoment auf die Anlage ausgeübt, das im Gegenzug einen Drall in der Strömung einbringt. Für das Drehmoment T kann über die Nutzleistung angesetzt werden:

$$P_{nutz} = \omega T \text{ also: } T = \frac{P_{nutz}}{\omega} \text{ (Gln. 5)}$$

Wird vereinfacht eine konstante Tangentialspannung t auf der Rotorfläche angenommen, kann nach Integration über die Blattfläche das Drehmoment T durch diese Spannung und den Rotorradius r ausgedrückt werden:

$$T = \frac{2}{3} \pi t r^3 \text{ (Gl. 6)}$$

Wird die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  mit Hilfe der Umfangsgeschwindigkeit  $v_u$  an der Blattspitze eliminiert und vereinfacht eine konstante Tangentialspannung t angesetzt ergibt sich nach einigen Umformungen:

$$t = \frac{4}{9} \frac{v_\infty}{v_u} \rho v_\infty^2 \text{ bzw. } T = \frac{8}{27} \pi r^3 \frac{v_\infty}{v_u} \rho v_\infty^2 \text{ (Gln. 7)}$$

Obige Betriebslasten wurden unter vereinfachten Ansätzen bestimmt. Diese sollen erste Abschätzungen zur Auslegung der Bauwerke ermöglichen und fließen über Impulsquellenansätze in die Simulationsrechnungen mit dem Rotorscheibenmodell ein. Eine genauere Bestimmung, ggf. auch zyklisch schwankender Betriebslasten, erfordert eine detaillierte Simulation der Rotorumströmung im Umfeld der gesamten Anlage.

### 3.3.4 Hydrodynamische Beispielrechnungen (Programmpaket MOUSE):

Die Simulation der Umströmung von Tidedrömungsanlagen ist äußerst aufwändig, sofern alle wesentlichen Einflüsse entsprechend berücksichtigt werden sollen. Um sich den komplexen Simulationen zu nähern, wurden Berechnungen unter zunehmender Berücksichtigung von Einflussfaktoren und somit zunehmenden Schwierigkeitsgrades, durchgeführt. Als Beispiel dient zunächst der Anlagentyp nach 3.3.2 a).

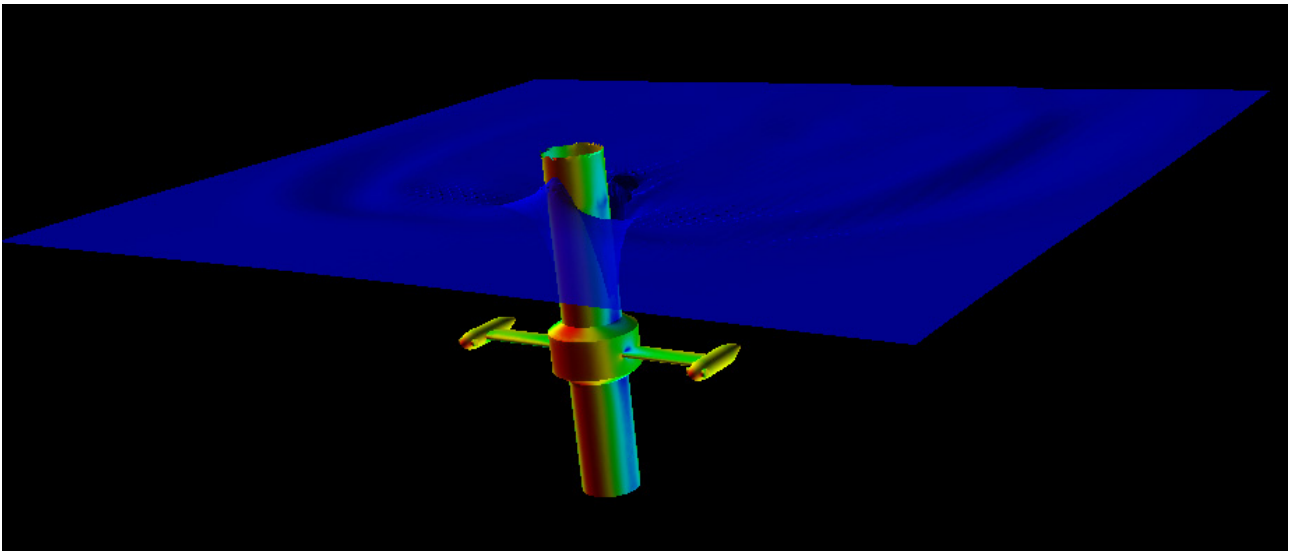


Abbildung 9: Druckverteilung auf dem Bauwerk und freie Oberfläche

So wurden zunächst reibungsfreie Berechnungen der Bauwerksumströmung in freier Anströmung ohne Berücksichtigung freier Oberflächen und ohne Rotoren durchgeführt. In weiteren Rechnungen wurde die Wirkung der Gravitation zugeschaltet und die hieraus resultierenden Oberflächenverformungen mittels Level-Set Methode berücksichtigt.

Schließlich wurde die Wirkung der Rotoranlage mit einem zunächst vereinfachten Scheibenmodell integriert. Die Rotoren werden hierbei so konfiguriert, dass Sie gemäß optimierten Betz-Faktors  $B = 16/27$  (theoretisch optimale Nutzleistung einer Strömungsanlage) eine über die Fläche konstante Bremswirkung auf die Strömung ausüben. Entsprechend den Gleichungen (4) und (7) für die Druckdifferenz respektive Tangentialspannung werden über das Scheibenmodell Impulsquellen und somit Kräfte auf die zu simulierende Strömung ausgeübt. Das Verhältnis aus Anströmungsgeschwindigkeit zu Blattspitzen-Umfangsgeschwindigkeit wurde hierbei exemplarisch zu  $v_\infty/v_u = 1/4$  gewählt, die tangential Schubspannung entsprechend zu  $t = \frac{1}{9}\rho v_\infty^2$ .

Im angefügten Berechnungsbeispiel wird ein unstrukturiertes Tetraedernetz mit 1.903.003 Elementen verwendet. Abbildung 9 zeigt die freie Oberfläche (in 10 fach überhöhter Darstellung) sowie die Druckverteilung auf das Bauwerk. Je von blau bis rot: niedrigste bis höchste Werte. Abbildung 10 zeigt Ausschnitte von Iso-Flächen konstanter Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung im Bereich eines der Rotoren. Sehr deutlich ist die Bremswirkung der Rotoren ersichtlich, es werden jedoch aufgrund der Wechselwirkung mit der freien Oberfläche lokale Übergeschwindigkeiten induziert.

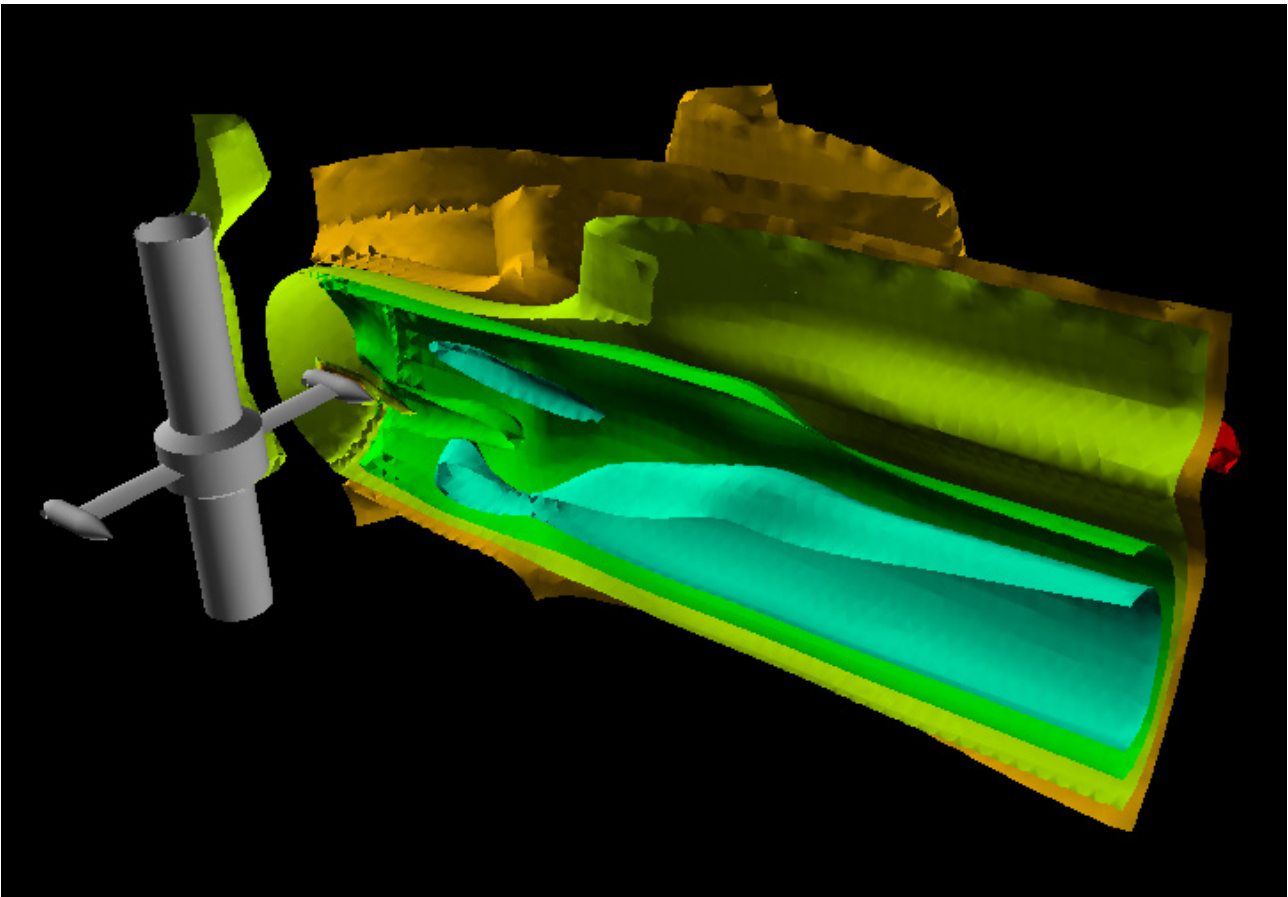


Abbildung 10: Iso-Flächen konstanter Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung

### 3.3.5 Strategie für die Gründungsbemessung

Für die Gründungsbemessung wird DIN 1054 (2005) „Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau“ herangezogen. Die Musterkonstruktionen basieren ausschließlich auf Pfahlgründungen. Entsprechend DIN 1054 ist für eine Pfahlgründung die Sicherheit im Grenzzustand der Tragfähigkeit sowie im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nachzuweisen. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit wird die Standsicherheit der kombinierten Windenergie-Tideströmungsanlage untersucht. Durch Ansatz entsprechender Teilsicherheitsbeiwerte auf Einwirkungen und Widerstände ist dabei ein vorgegebenes Sicherheitsniveau einzuhalten. Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird geprüft, ob die Verformungen einen ungestörten Betrieb der Anlage gewährleisten oder ob Setzungen oder Setzungsdifferenzen zum Funktionsverlust der Anlage führen können. Es ist nachzuweisen, dass die entsprechenden Einwirkungen nicht größer sind als die charakteristischen Widerstände. Dabei sind die charakteristischen Widerstände von den maximal zulässigen Verformungen (Setzungen, Schiefstellungen, Setzungsdifferenzen) des Bauwerks abhängig. Bei der Bemessung der Gründung muss allerdings beachtet werden, dass neben den Belastungen während eines Extremereignisses, wie z. B. eines Sturms, während der Betriebsdauer der Anlage durch Wind und Wellen eine sehr große Zahl wiederholter, zufälliger Belastungen verursacht wird. Durch diese Lastaufbringung, die auf eine zyklische Belastung reduziert werden kann, werden im Boden bleibende Verformungen hervorgerufen, die sich bei ausreichend langer Lasteinwirkung auf die Gebrauchstauglichkeit der Anlage negativ auswirken können oder gar die Standsicherheit der Anlage gefährden können. Eine ausreichend lange Lasteinwirkung bedeutet dabei eine Lebensdauer von bis zu 50 Jahren, innerhalb derer ungleichmäßige Setzungen und Schiefstellungen vermieden werden sollen.

### Berechnung überwiegend vertikal beanspruchter Pfähle

Die Musterkonstruktion des Quadpods ist auf Pfählen gegründet, die überwiegend durch vertikale Belastungen beansprucht werden. Auftretende Momente werden durch ein Kräftepaar aufgenommen, welches in die entsprechende Pfahlachse gerichtet ist. Somit können Druck- und Zugkräfte auf die Pfähle wirken.

Ziel der Berechnung vertikal belasteter Pfähle ist die Kenntnis der Last-Setzungs-Linie, wie exemplarisch in Abbildung 11 dargestellt. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit darf die Vertikallast des Pfahls mit einer ausreichenden Sicherheit nicht größer werden als die Summe der Widerstände aus Pfahlmantelreibung und Spitzendruck, siehe Abbildung 11. Der Pfahlwiderstand ergibt sich damit zu:

$$R_k(s) = R_{b,k}(s) + R_{s,k}(s) \quad (\text{Gl. 8})$$

wobei:  $R_k$ ... charakteristischer Pfahlwiderstand  
 $R_{b,k}$ ... charakteristischer Pfahlspitzenwiderstand  
 $R_{s,k}$ ... charakteristische Pfahlmantelreibung  
 $s$ ... Setzung

Bei zugbelasteten Pfählen wird nur die Mantelreibung angesetzt. Die Pfahlwiderstände sind dabei nach DIN 1054 (2005) grundsätzlich aus einer Pfahlprobebelastung abzuleiten, allerdings ist deren Durchführung auf dem offenen Meer nicht ohne weiteres möglich und zudem sehr kostenintensiv. Denkbar sind Verfahren, die Korrelationen aus den Ergebnissen der Baugrunderkundung, z. B. zu Drucksondierungen, zu Grunde legen.

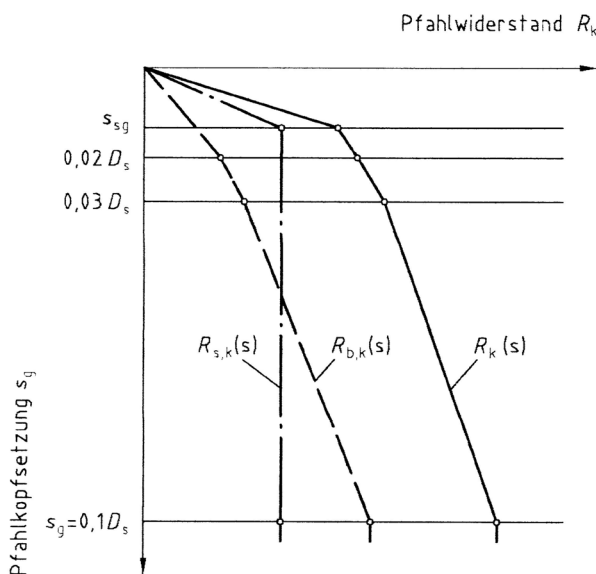


Abbildung 11: Widerstands-Setzungslinie

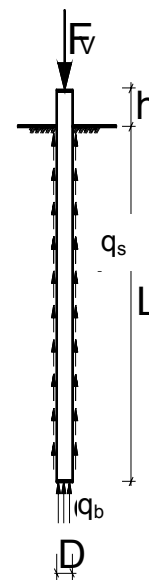


Abbildung 12: Widerstand eines vertikal beanspruchten Pfahls

### Berechnung überwiegend horizontal beanspruchter Pfähle

Die Monopilegründung stellt eine Pfahlgründung mit einem hohen Anteil an horizontalen Lasten dar. Momente und Horizontalkräfte können nur über die Pfahlbettung abgetragen werden. Der Widerstand von horizontal belasteten Pfählen wird durch den passiven Erddruck mobilisiert. Es ist nachzuweisen, dass im Grenzzustand der Tragfähigkeit der Erdwiderstand auf der Druckseite des Pfahls mit ausreichender Sicherheit nicht überschritten werden kann. Auch hier sind die

Pfahlwiderstände aus Probelastungen oder vergleichbaren Verhältnissen abzuleiten.

Am gebräuchlichsten für die Berechnung horizontal belasteter Pfähle ist die Theorie des elastisch gebetteten Balkens nach WINKLER (1867), siehe auch Abbildung 12. Dabei wird der Boden durch eine Reihe benachbarter Federn ersetzt, die unabhängig voneinander nachgeben können und sich nicht gegenseitig beeinflussen. Dadurch ist es nicht möglich, die Übertragung von Schubspannungen zu modellieren. Dennoch stellt der elastisch gebettete Balken eine effiziente Methode dar, das Tragverhalten horizontal belasteter Pfähle zu berechnen.

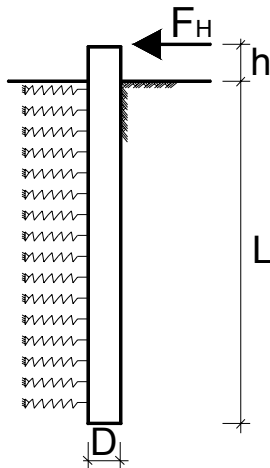


Abbildung 12: Modell des elastisch gebetteten Balkens

Die entscheidende Größe für die Pfahlschnittkräfte und –verformungen ist der Quotient aus Bettungsspannung und Pfahlverschiebung, der Bettungsmodul  $k_s = p/y$ . Der Bettungsmodul ist sowohl vom Boden als auch von den Eigenschaften des Pfahls abhängig. Er ist somit kein Bodenkennwert, sondern ein Systemparameter, der sich je nach Randbedingung ändert. Nach DIN 1054 (2005) kann der benötigte Bettungsmodul entsprechend Gleichung (9) abgeschätzt werden zu:

$$k = E_s / D \quad (\text{Gl. 9})$$

wobei: k... Bettungsmodul  
 $E_s$ ... Steifemodul des Bodens  
 D... Pfahldurchmesser ( $\leq 1$  m)

Der so ermittelte Bettungsmodul gilt jedoch nur für Pfähle bis zu einem Durchmesser von 1,0 m. Da das Modell des elastisch gebetteten Balkens den Boden durch eng aneinandergereihte „Bodenfedern“ abbildet, ist es nicht möglich, die Übertragung von Schubkräften im Boden zu modellieren. Die Federn beeinflussen sich nicht gegenseitig. Dennoch stellt der elastisch gebettete Balken eine effiziente Methode dar, horizontal belastete Pfähle zu berechnen. Da das reale Spannungs-Dehnungsverhalten eines Bodens nichtlinear ist, können die elastischen Bodenfedern durch nichtlineare Federn ersetzt werden. Mit diesem Berechnungsmodell, auch p-y-Methode genannt, werden z.B. in den Normen API (2000) oder DNV (2000) die Nachweise für Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit geführt. Entsprechend der Pfahlverschiebung y wird ein bestimmter Bettungswiderstand p geweckt. Im Laufe der Zeit wurden die verschiedensten Ansätze erarbeitet, eine Auswahl davon wird z.B. in REESE & VAN IMPE (2000) gegeben. Für Monopiles wurde von WIEMANN, 2007 ein Ansatz erarbeitet, bei dem der Einfluss des Pfahldurchmessers auf die p-y Kurven explizit berücksichtigt wird, was durch die bisherigen empirischen p-y-Ansätze, basierend auf Pfahltests mit wesentlich geringeren Durchmessern, nur unzureichend erfasst wurde. Auf dieser Grundlage kann eine Monopile-Gründung zuverlässig dimensioniert werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung horizontal belasteter Pfähle stellt das Strain-Wedge-

Modell dar (Abbildung 14). Es verknüpft die reale dreidimensionale Pfahl-Boden-Interaktion mit der eindimensionalen Theorie des elastisch gebetteten Balkens (NORRIS 1986, ASHOUR & NORRIS 2000; ASHOUR ET AL. 2002). Das Spannungs-Verformungsverhalten des Bodens wird dabei in Elementversuchen untersucht, aus deren Ergebnissen und dem mechanischen Modell auf das Systemverhalten geschlossen werden kann. Die Annahme eines Bettungsmoduls entfällt somit.

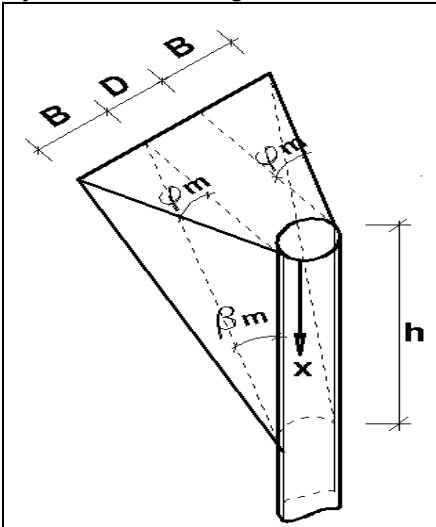


Abbildung 14: Geometrie des Strain-Wedge-Modells nach ASHOUR, 2004

#### Bemessungskonzept

Um die Gründung einer kombinierten Windenergie-Tideströmungsanlage umfassend nachzuweisen, wird eine zweistufige Strategie vorgeschlagen. Zuerst wird die Anlage unter Extremlasten dimensioniert. In einem zweiten Schritt werden die Auswirkungen der zyklischen Belastung geprüft. Momentan wird an einer Bemessungsregel gearbeitet, bei der diese Beanspruchungen unter Betriebsbedingungen berücksichtigt werden können. Wichtiger Bestandteil dieses Bemessungskonzeptes ist außerdem die Durchführung eines umfassenden bodenmechanischen Laborprogrammes, in dem auch zyklische Elementversuche enthalten sind. Das Schema des Konzeptes ist in Abbildung 15 dargestellt.

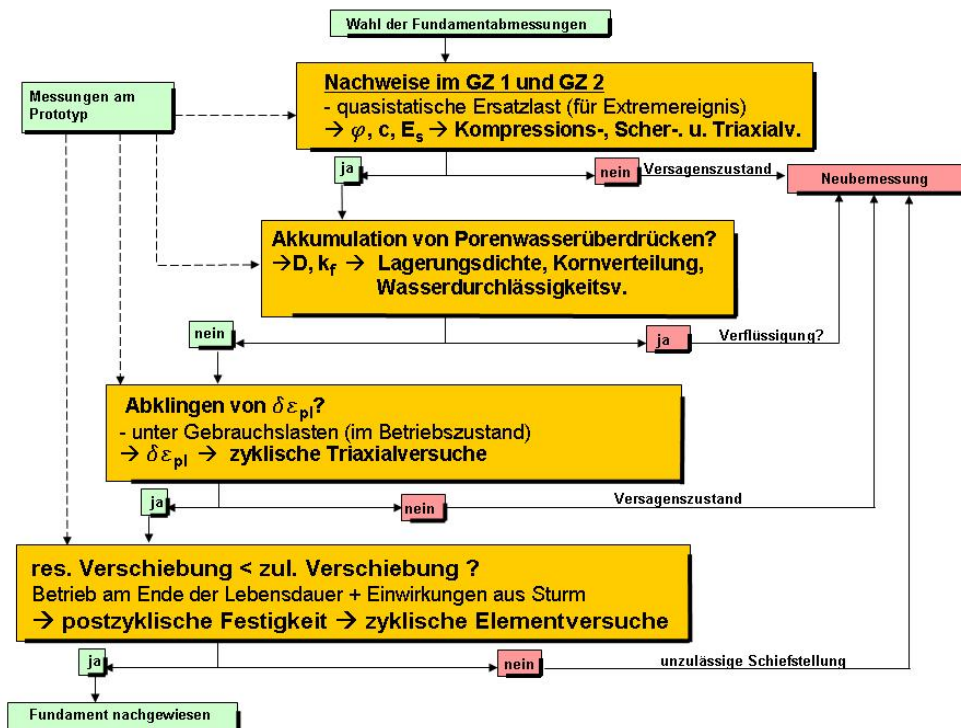


Abbildung 15: Bemessungskonzept, siehe auch GIGAWIND (2006)

#### Literatur:

- Ashour, M., Norris, G.: Modelling Lateral Soil-Pile response based on Soil-Pile Interaction. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, May 2000.
- Ashour, M., Norris, G., Pilling, P.: Strain-Wedge-Model Capability of Analyzing Behavior of Laterally Loaded Isolated Piles, Drilled Shafts and Pile Groups, Journal of Bridge Engineering, 2002.
- API: Recommended Practice for Planning, Design and Construction Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design. American Petroleum Institute, Washington D.C., API Publishing Services, 2000.
- DIN 1054, Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau, Ausgabe 2005.
- EAU 2004, Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“, Häfen und Wasserstraßen, 10. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2005.
- Morison, J.R., O'Brien, M.P., Schaaf, S.A., Johnson, J.W.: The force exerted by surface waves on piles. Petroleum Trans. AIME, Vol. 189, p.149-157, 1950.
- Reese, L.C. & Van Impe, W.F.: Single Piles and Pile Groups under Lateral Loading, A.A. Balkema, 2000.
- Standard Baugrunderkundung – Mindestanforderungen für Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock, August 2003.
- WaveLoads, Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen, Hannover, 2003.
- Wiemann, J., Lesny, K. & Richwien, W.: Gründung von Offshore-Windenergieanlagen – Gründungskonzepte und geotechnische Grundlagen, Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Heft 29, Verlag Glückauf, Essen, 2005.
- Winkler, E: Die Lehre von Elasticität und Festigkeit, Verlag H. Dominicus, Prag, 1867.

#### **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 4.1.19, jeweils für den Bereich "Hauptsächliche Nutzung") sowie "**Umweltechnik**" (AiF-Vordruck 4.1.19, für den Bereich "Nutzung auch möglich").

Bei den Wirtschaftszweigen (AiF-Vordruck 4.1.20) 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 Tidenströmung, 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 26.02.2007

Ort, Datum

Unterschrift des Leiters und Stempelabdruck  
der Forschungsstelle