Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl Meerestechnik (LMT)	**Förderkennzeichen:**	03SX546D
Vorhabenbezeichnung:	Simulation der Systemdynamik und Entwicklung von Sensor Systemen – SIMUSENSE		
Laufzeit des Vorhabens:	01.06.2021 – 31.05.2024		

1 Zusammenfassung des Forschungsprojekts

1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Forschungsprojekts *Deep Sea Sampling* wurde ein umweltschonendes und autonomes Abbausystem für den Pilot-Miningtest von Massivsulfiderzen im Tiefseegebiet entwickelt. Das Projekt gliederte sich in zwei Hauptbereiche:

1. **Entwicklung einer autonomen, elektrifizierten und smarten Fräseinheit:**
   Ziel war die Anpassung bewährter Frästechnologien an die extremen Bedingungen der Tiefsee. Besondere Schwerpunkte lagen auf:
   - Minimierung von Trübewolken durch ein Sensorsystem, welches beispielsweise die Regulierung der Förderleistung initiiert.
   - Einsatz eines rein elektrischen Antriebssystems zur Vermeidung von hydraulischen Komponenten in sensiblen Umweltbereichen.
   - Entwicklung autonomer Subsysteme für den Schnellwechsel von Verschleißteilen und die Überwachung des Fräszahnverschleißes mittels geeigneter Sensorik.
   - Auswahl optimaler Schneidmaterialien für maximale Effizienz und Haltbarkeit.

2. **Entwicklung einer Förder- und Separationseinheit:**
   Ziel war die Konzeptionierung eines Systems zur Trennung und Förderung von Feststoffen vom Meeresboden zur Oberfläche, bestehend aus:
   - Separations- und Förderbehältern, die den Transport über ein autonomes Fördersystem ermöglichen.
   - Verzicht auf einen Riser und ein speziell angepasstes Abbauschiff, um den Energieverbrauch beim Erztransport deutlich zu senken.
   - Sensorik zur Überwachung des Fräsfortschritts und der Separationsleistung, ergänzt durch eine selbstlernende Regelung zur Optimierung der Prozesse.

Das Zusammenspiel dieser beiden Teilprojekte resultiert in einem effizienten, umweltschonenden und wirtschaftlich tragfähigen Gesamtsystem. Das Projekt adressierte zugleich ökologische Herausforderungen durch die Vermeidung von Trübewolken und den Verzicht auf konventionelle, energieintensive Fördersysteme.

1.2 Voraussetzungen

Sensorentwicklung:
Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts DEEP SEA (FKZ 13N14733) wurden am LMT innovative photonische Unterwassersensoren entwickelt. Dabei lag der Fokus auf der Integration von Sensorelementen in druckbeständige Gehäuse mithilfe von Rapid-Prototyping-Technologien sowie auf der Entwicklung autonomer, anwendungsspezifischer Messroutinen.

Druckneutrale Systeme
Durch umfassende Forschungs- und Entwicklungsarbeit, unter anderem im Rahmen der vom BMWi geförderten Projekte „Druckneutrale Systeme“ (FKZ 03SX220) und „Druckneutrale Systeme Tiefsee“ (FKZ 03SX276D), verfügt der LMT über fundierte Expertise in der Entwicklung und Erprobung druckneutraler Systeme. Ergänzend hierzu besitzt der LMT langjährige Erfahrung in der Untersuchung von Alterungsprozessen polymerer Isolationswerkstoffe für Unterwasseranwendungen.
Im Forschungsprojekt „OWS – Offshore Wind Solutions Mecklenburg-Vorpommern“ (FKZ 03WKCR2G) leitete der LMT experimentelle Studien zur beschleunigten Alterung von Seekabeln unter zyklischer Druckbelastung.

1.3 Projektplan und Ablauf
Die Arbeiten am LMT konzentrierten sich auf die empirische Validierung von Konzepten zur Vermeidung von Trübungserzeugung. Es wurden folgende Teilaufgaben bearbeitet:

- Entwicklung eines druckneutralen Trübungsmesssystems zum Einsatz in der Tiefsee im Umfeld eines minimalinvasiven Abbausystems. Hiermit ist es möglich die Trübungserzeugung und deren Ausbreitung sowohl in Modellversuchen im Labor als auch während des Einsatzes im Feld qualitativ und quantitativ zu bestimmen.
- Konzeptionierung und Errichtung eines geeigneten Versuchsstandes zur Durchführung von Experimenten an skalierten Modellen eines minimalinvasiven Abbausystems. Neben der hierfür notwendigen Infrastruktur umfasst dies zusätzlich die Zusammenstellung und Integration verschiedener Messtechniken. Als relevante Messgrößen zählen beispielsweise Trübung, Prozessgrößen des Abbausystems und Gewichtsverteilungen.
- Zur Beurteilung der Prozessstabilität sind numerische Untersuchungen zur Fluid-Struktur-Interaktion zwischen dem Gesamtsystem, Einzelkomponenten und dem umliegenden Fluid während des Absetzprozesses durchzuführen.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Projektes
Der Stand der Technik zum Beginn des Projektes wird nachfolgend für die einzelnen Teilsysteme zusammengefasst:

Schlitzwandfräsensystem

- Es wurde ein Druckausgleich für alle wichtigen Baugruppen umgesetzt. Eine druckneutrale Ausführung der elektrischen Komponenten war nicht üblich.
- Auf Grund der geringen Wassertiefe wurden vorhandene Elektrokästen gegen den Eintritt von Wasser abgedichtet.
- Eigenentwickelte Kreiselpumpen und Ansaugstrang zur Förderung des gelösten Bodens in einer Suspension mit bis zu 450 l/min und 10% Feststoffgehalt
- Entsandungsanlagen/Siebe zur Separation des gelösten Bodens aus der Bentonitsuspension

Abbautechnologie Massivsulfide

- Crawler mit Gesteinsfräse tragen am Meeresboden die Erze an der Oberfläche ab (Gefahr des Entstehens von Trübewolken am Meeresboden)
- Kollektor sammelt die aufgebrochenen Erze ein und übergibt diese an einen Riser
- Riser pumpt das Erz zusammen mit Wasser vom Meeresboden zum Schiff über eine Strecke von 1000 – 4000 m
- Erz wird auf dem Schiff vom Wasser und Sedimenten getrennt, anschließend wird das Wasser über eine zweite Leitung zurück an den Meeresboden (Schlauchlänge wieder 1000 – 4000 m) gepumpt

Herausforderungen und Problemstellungen beim aktuellen Stand der Technik

- Zusammenarbeit von 4 Einheiten - zwei am Meeresboden, ein Riser als Verbindung zwischen Abbauschiff und Meeresboden sowie der Separationseinheit auf dem Schiff
- Erhöhter Aufwand für die Koordination der einzelnen Einheiten
- Gefahr des Ausbildens von Trübewolken beim Lösen und beim Ausströmen des Prozesswassers aus dem Risersystem

Smarte Sensorsysteme

- Zu Projektbeginn gab es keine Sensorik mit Hinblick auf die quantitative Bestimmung des Auftretens von Trübewolken

1.5 Kooperationen

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde eine enge Kooperation mit mehreren Partnern gepflegt, um die Entwicklung des Abbausystems umfassend zu unterstützen.

- Gemeinsam mit dem Projektpartner BMA wurden die Konzeptionierung, Planung und Installation experimenteller Untersuchungen durchgeführt, die den Funktionsnachweis der entwickelten Systeme ermöglichten. Dies umfasste neben der Errichtung eines Versuchsstandes auch die Entwicklung eines geeigneten skalierten Versuchsmodells.
- In der Zusammenarbeit mit der LSTM lag der Fokus auf der Entwicklung druckneutraler und druckstabiler Hardware-Komponenten, darunter ein Kamerasystem, ein Füllstandssensor und ein Differenzdrucksensor zur Entwicklung eines Sensorsystems zur Feststoffgehaltsbestimmung. Hierzu wurden verschiedene Untersuchungen am großen Drucktank des LMT als Nachweis der Funktionstüchtigkeit unter realen Umweltbedingungen durchgeführt. Darüber hinaus wurden gemeinsam Konzepte für mögliche Separationseinheiten untersucht.
- Die TU Freiberg entwickelte im Rahmen des Projektes einen wasserdichten Lagesensor (IMU), der zur Beurteilung der Stabilität des Gesamtsystems beitrug.

Dieses Messsystem wurde in das experimentelle Setup integriert und in verschiedenen Tests erprobt.

- Der Austausch von Informationen mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) über neue Erkenntnisse aus den Erkundungsfahrten der Zielgebiete ermöglichte eine stetige Anpassung der Versuchsbedingungen.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Vergleich der erzielten Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele des Projektplans

AP 1: Anwendungsfälle, Anforderungen, technische Spezifikation
AP 1.1: *Definition Anforderungen an Umweltverträglichkeit*
AP 1.2: *Definition Anforderungen an Sensoren und elektrische Komponenten*

Vorgegebenes Ziel

In diesem Arbeitspaket werden zu beachtende Normen sowie technische Spezifikationen und Anforderungen, die für den Entwurfsprozess erforderlich sind, definiert. Dabei steht neben den rein technischen Anforderungen vor allem die Umweltverträglichkeit im Fokus.

Erzielte Ergebnisse

In Kooperation mit dem gesamten Konsortium wurde ein Lasten- und Pflichtenheft mit spezifischen Anforderungen an ein Abbausystem hinsichtlich der Umweltverträglichkeit erarbeitet. Dabei wurden mechanische, elektromagnetische und chemische Prozesse berücksichtigt, um potenzielle Umweltauswirkungen umfassend zu bewerten.

Als eine der größten potenziellen Gefährdungsursachen wurden Trübungswolken identifiziert, die durch aufgewirbelte Sedimentpartikel während der Bewegung und des Betriebs eines Abbausystems entstehen. Aufgrund der geringen Absetzgeschwindigkeit der mobilisierten Sedimentpartikel verbleiben diese in Form von Trübungswolken über lange Zeit in der Wassersäule und können so über weite Gebiete verbreitet werden. Dies stellte besondere Anforderungen an das Systemdesign, um die Entstehung und Ausbreitung von Trübungswolken zu minimieren und damit die Umweltverträglichkeit des Abbauprozesses zu verbessern.

AP 2: Konzeptentwicklung / Detaillierung Gesamtsystem
AP 2.1: *Fördereinheit und Umbillical*
AP 2.2: *Separationsbehälterwechselsystem an der Schnittstelle zur Fördereinheit*
AP 2.3: *Förderpumpe und Meerwasserrückführung zur Verhinderung von Trübewolken*
AP 2.8: *Trägertemplate für den Fräseinsatz*

Vorgegebenes Ziel:

Der LMT beteiligt sich bei der Konzeptentwicklung der Fördereinheit und des dazugehörigen Umbilicals, des Separationsbehälterwechselsystems an der Schnittstelle zur Fördereinheit, sowie der Förderpumpe und der Meerwasserrückführung. Beim Fördersystem steht dabei die Ermittlung der zu erwartenden hydrodynamischen Lasten sowie strukturmechanischen Beanspruchungen im Fokus, um eine geeignete Auslegung des Systems zu ermöglichen. Beim Separationsbehälterwechselsystem beziehen sich die Arbeiten auf die Auswahl eines geeigneten Dichtungssystems, welches in der Lage ist, auch unter hohen Drücken eine hinreichende Abdichtung des Systems zu gewährleisten.

Erzielte Ergebnisse

In Zusammenarbeit mit BMA war der LMT an der Konzeptionierung der Separationsbehälter beteiligt. Hierbei konnte eine hydrodynamisch optimierte Form entwickelt werden, die gleichzeitig alle notwendigen Anforderungen an ein geeignetes Wechsel- und Dichtungssystem gewährleistet. Die Strömungsbeiwerte dieses Konzepts wurden im Rahmen von AP 7 in Windkanalversuchen ermittelt.

Zudem wurde in Zusammenarbeit mit BMA ein Konzept zur Vermeidung von Trübewolken entwickelt und iterativ angepasst. Hierbei wird ein Trübekasten um den Frässchlitz positioniert. Dieser verhindert die Ausbreitung von Trübewolken in die Umwelt, während das Fräsgut im Inneren des Trübekastens abgesaugt wird. Dieses Konzept wurde so angepasst, dass es als skaliertes Modell in den Versuchen im Rahmen von AP 11 einsetzbar ist. Das umfasst ebenfalls die Auslegung und Skalierung der Förderpumpe, die für die Funktionalität des Konzepts essenziell ist.

Darüber hinaus wurden in Zusammenarbeit mit BMA geeignete Materialien für das Trägertemplate ausfindig gemacht. Hierbei wurde insbesondere ermittelt, mit welchen Methoden die Drucktoleranz der verschiedenen Komponenten sichergestellt werden kann.

AP 4: Wartung und Instandsetzung am Meeresboden
AP 4.3: *Kamerasystem zur Steuerung*

Vorgegebenes Ziel:

Dieses Arbeitspaket umfasst die Entwicklung eines Kamerasystems zur Steuerung des Schnellwechselsystems für Fräszähne am Meeresboden. Am LMT wird das System an die extremen Umgebungsbedingungen, insbesondere die hohen Drücke in den Fördertiefen, angepasst. Dabei steht die Erhaltung der gewünschten optischen Eigenschaften trotz hoher Druckbelastung im Vordergrund.

Erzielte Ergebnisse

Im Rahmen der Sensorentwicklung zur Bestimmung des Feststoffgehaltes am LSTM wurde in Kooperation ein Kamerasystem zur Überwachung des Abbauprozesses entwickelt. Der LMT war hierbei in der Konzeptphase hinsichtlich der zu verwenden Komponenten und der druckfesten Umsetzung tätig. Zusätzlich konnte das entwickelte System erfolgreich in mehreren Tests unter Realdruck im Drucktank des LMT getestet werden.

AP 5: Löse- und Förderleistung Frässystem
AP 5.3: Strömungsmechanische Untersuchungen zur Absaugung und Förderung des Fräsguts im Schlitz
AP 5.5: Fräsradgeometrie für die Förderung von Erzen

Vorgegebenes Ziel:

Zentraler Bestandteil der am LMT im Rahmen dieses Arbeitspakets durchgeführten Arbeiten ist die experimentelle Analyse und Optimierung des Löse- sowie des Absaugvorgangs bezüglich der Vermeidung des Auftretens von Trübewolken. Dies umfasst neben der Analyse und Optimierung des Vorgangs selbst auch die Mitwirkung bei der Auswahl bzw. Entwicklung geeigneten Probenmaterials sowie bei der Optimierung der Fräsradgeometrie. Dabei arbeitet der LMT eng mit dem LSTM zusammen, welcher die Problemstellung numerisch behandelt.

Erzielte Ergebnisse

Durch hohe Trübung und den begrenzten Bauraum war es in den Modellversuchen nicht möglich strömungsmechanische Messtechnik im Abbaubereich selbst zu integrieren. Eine detaillierte Beschreibung der Voruntersuchungen zur Auswahl eines geeigneten Probenmaterials und zur Bestimmung der Parameter des Versuchsaufbaus sowie der Experimente zur Mobilisierung von Sedimentpartikeln und zum Abbauprozess befindet sich unter AP 11.

AP 6: Sensorik und Elektronik
AP 6.1: Planung und Entwurf eines Teststandes für strömungsmechanische Untersuchungen unter atmosphärischem Druck
AP 6.3: Entwicklung eines Sensorsystems zur Bestimmung des Abscheidegrads im Separator
AP 6.5: Positions- und Lagebestimmung der Behälter während des Transportvorgangs
AP 6.8: Überwachungssystem Trübewolken
AP 6.9: Adaption der Leistungselektronik, Frequenzumrichter und weiterer elekt. Verbraucher für den Einsatz in der Tiefsee
AP 6.10: Test unter Realdruck im Hochdruckreaktor

Vorgegebenes Ziel:

Dieses Arbeitspaket befasst sich mit dem Einsatz und der Erprobung geeigneter Sensoren und elektronischer Komponenten, sowie deren Anpassung an die Erfordernisse eines Einsatzes in der Tiefsee. Dabei erfolgen zum einen Zuarbeiten für die Integration der verschiedenen Systeme durch die Projektpartner. Diese Zuarbeiten erstrecken sich vorrangig auf eine Auslegung hinsichtlich der zu erwartenden Drücke.
Zum anderen entwickelt der LMT eigenständig ein System zur Überwachung von Trübewolken. Dies umfasst auch die Sensorentwicklung inklusive automatischer Auswerteroutinen sowie das Testen der Funktion der Sensoren an skalierten Modellen unter atmosphärischem Druck. Zu diesem Zweck wird im Rahmen dieses Arbeitspaketes am LMT ein Teststand entwickelt, welcher es zudem ermöglicht, die Sensorsysteme in geeigneter Skalierung zu testen. Der Teststand soll gleichzeitig auch der Erprobung weiterer Komponenten aus anderen Arbeitspaketen dienen und optische Messungen bspw. des Partikel- und Sedimenttransports ermöglichen. Da die meisten zu analysierenden Vorgänge Partikel- und Sedimenttransport beinhalten, ist eine Skalierung nur in einem gewissen Rahmen möglich, da hier nicht nur, wie bei anderen typischen strömungsmechanischen Vorgängen die Reynoldszahl als Ähnlichkeitsparameter eingehalten werden muss, sondern bspw. auch der Shieldsparameter.
Der LMT besitzt zwar einen Drucktank für die Simulation von Drücken bis etwa 6000 m Wassertiefe. Allerdings ist die Durchführung der beschriebenen Tests im Drucktank, aufgrund der sehr eingeschränkten geometrischen Abmessungen (Zylinderform,

Durchmesser: 1020 mm, Höhe: 1500 mm) nur bedingt möglich. Gleichzeitig ist die Möglichkeit zur optischen Beobachtung der Vorgänge stark eingeschränkt. Darüber hinaus ist eine Verunreinigung des Drucktanks durch gelöste Sedimente unter allen Umständen zu vermeiden. Entsprechende Anpassungen der Testsysteme würden den zur Verfügung stehenden Bauraum weiter einschränken und insbesondere optische Messungen nur schwer ermöglichen. Der Drucktank dient im Rahmen dieses Arbeitspakets jedoch verschiedenen Tests der Sensorsysteme bezüglich der zu erwartenden Drücke und ggf. der iterativen Anpassung der Sensorsysteme.

Erzielte Ergebnisse

Trübungsmesssystem

Zum minimalinvasiven Charakter des zu entwickelnden Abbausystems gehört auch die Vermeidung von Trübewolken. Um die beim Absetzen und Betrieb der Einheit entstehende Trübung quantifizieren und deren Ausbreitung untersuchen zu können, wurde am LMT ein Trübungsmesssystem entwickelt. Dabei basieren die einzelnen Trübungssensoren auf dem Transmissionsprinzip. Hierbei wird gemäß DIN EN ISO 7027-1:2016 Licht mit einer Wellenlänge von 860 nm in das Messmedium emittiert und am Ende des optischen Pfades mit Hilfe eines IR-Detektors quantifiziert. Das emittierte Licht wird auf dem Weg durch den optischen Pfad an Partikeln gestreut und absorbiert. Die daraus resultierende Lichtschwächung ist ein Maß für die Anzahl der Partikel und somit für die Trübung des Messmediums.

Die Entwicklung des Trübungsmesssystems geschieht in einem iterativen Prozess, dessen Ablauf in Abbildung 1 dargestellt ist. Dieser Prozess startet, ausgehend von den spezifischen Systemanforderungen, mit der Entwicklung eines geeigneten Systemdesigns. Dazu gehört neben der Identifizierung geeigneter Hardware-Komponenten auch die Entwicklung und Fertigung jener Module, die nicht kommerziell erhältlich sind. Anschließend erfolgt die Integration der Hardware-Module in geeignete Gehäuse. Hierzu gehört auch die drucktolerante Auslegung des Sensorgehäuses. Die Drucktoleranz wird durch den Verguss des Gehäuses mit Epoxidharz gewährleistet. Dieser Ansatz bietet den Vorteil, dass beim Gehäusedesign auf druckfeste Formen und Materialien verzichtet werden kann. Daraufhin erfolgt die Implementierung der Systemfirmware. Neben der Initialisierung aller Hardware-Komponenten und dem Ablauf einer automatischen Messroutine müssen auch geeignete Methoden zur Datenübertragung und -speicherung sowie zur Datenprozessierung implementiert werden. Der Entwicklungszyklus endet mit der Evaluierung des Systems. Hierbei werden zum einen die Grundlegende Funktionalität überprüft, sowie Signalstabilität und Messfehler untersucht. Zum anderen wird eine Kalibrierung durchgeführt. Die Ergebnisse der Evaluierung fließen anschließend direkt in den nächsten Entwicklungszyklus ein. Innerhalb des Projektzeitraums wurde das Trübungsmesssystem auf diese Weise kontinuierlich optimiert. Infolgedessen wurden sowohl die Messgenauigkeit und -auflösung, als auch die maximal mögliche Messrate stetig verbessert. Zudem wurde das Sensorgehäuse zunehmend miniaturisiert und die Montage erheblich erleichtert. Darüber hinaus wurde im Verlauf des Projekts eine automatische Messbereichsanpassung und eine automatische Anpassung der Messrate implementiert.

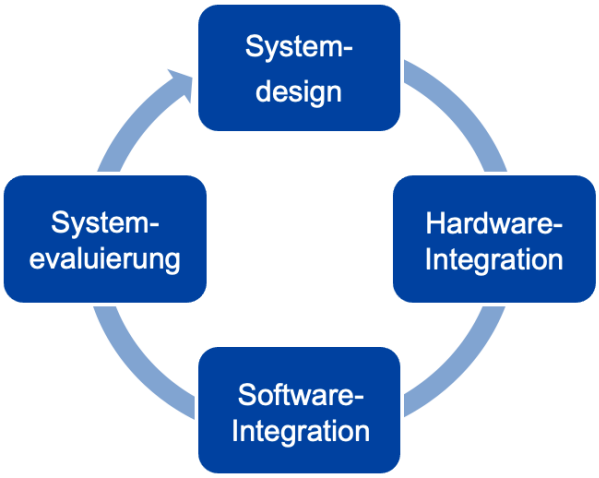


Abbildung 1 Iterativer Entwicklungsprozess

Wie in Abbildung 2 dargestellt, besteht das entwickelte System aus zwei Hauptbestandteilen: einem Datenlogger und einem oder mehreren Sensoren. Um einen intelligenten adaptiven Sensor zu realisieren, enthält der Sensor einen Mikrocontroller. Die IR-LED und der IR-Lichtdetektor für die Transmissionsmessung befinden sich auf dem IR-Emitter- bzw. IR-Detektormodul. Diese Bauteile wurden auf Leiterplatten integriert, die während des Entwicklungsprozesses fortlaufend auf das entsprechende Sensordesign angepasst wurden. Die Emitter- und Detektormodule sind über die Inter Integrated Circuit (I^2C) Schnittstelle mit dem Mikrocontroller verbunden. Als Emitter wird eine IR-LED mit einer Peakwellenlänge von 860 nm verwendet. Deren Helligkeit und Einschaltdauer werden mit einem LED-Treiber gesteuert, während das emittierte Licht mit einem IR-Photodetektor erfasst wird. Die Datenübertragung zum Datenlogger erfolgt über das Controller Area Network (CAN). Das entsprechende CAN Bus Modul ist über die Serial Peripheral Interface (SPI) Schnittstelle mit dem Mikrocontroller verbunden. Um sicherzustellen, dass die Sensor-Firmware jederzeit anpassbar bleibt, selbst wenn der Sensor fertig montiert und mit Epoxidharz vergossen ist, bietet der gewählte ESP32 NoduMCU Mikrocontroller auch eine WiFi-Verbindung zu einem Computer und unterstützt Over-the-Air (OTA) Updates.
Zusätzlich zum CAN-Bus-Modul und Mikrocontroller enthält der Datenlogger weiterhin ein MicroSD-Kartenmodul zum Speichern der Daten. Beide sind über SPI mit dem Mikrocontroller verbunden. Dieser Datenlogger wird genutzt, wenn der Start der Messungen extern auslösbar sein muss, beispielsweise während der Kalibrierung. Für Anwendungen, bei denen eine direkte Visualisierung der Messdaten benötigt wird, um die erhaltenen Werte sofort beurteilen zu können, werden die Sensoren stattdessen an den Yokogawa DL350-HG (vergleich Abschnitt 2.2) angeschlossen.

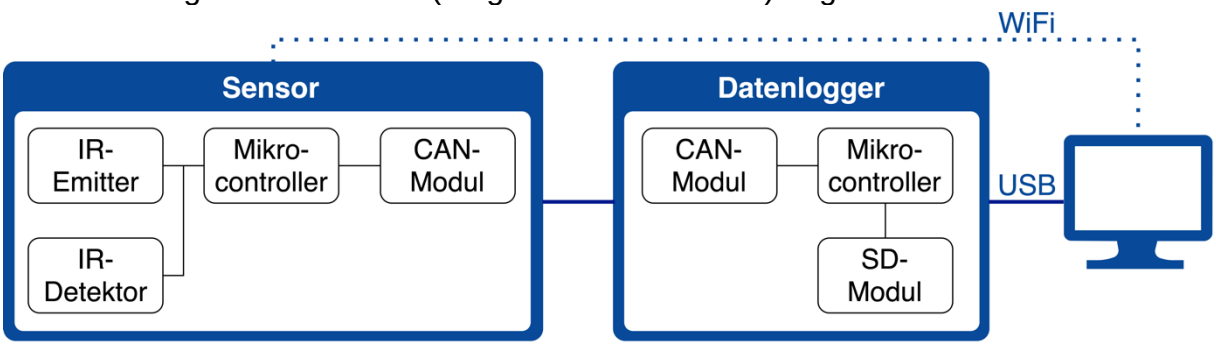


Abbildung 2 Systemdesign

Da der Datenlogger sich für die im Rahmen des Projektes durchgeführten Messungen stets außerhalb des Wassers befindet, kann auf die Integration dessen Hardware in

ein tiefseetaugliches Gehäuse verzichtet werden. Stattdessen ist hier die Integration der Hardware-Komponenten in ein IP 67 Standard-Gehäuse ausreichend.
Im Gegensatz dazu muss für die Sensoren ein Gehäuse entwickelt werden, dass sowohl das zugrundeliegende Transmissionsprinzip, als auch den Einsatz unter Tiefseebedingungen ermöglicht. Dabei wird die erforderliche Wasserdichtigkeit und Drucktoleranz durch den Verguss des Gehäuses mit Epoxidharz gewährleistet. Dadurch kann für das Gehäuse auf druckfeste Materialien und Formen verzichtet werden. Das ermöglicht zum einen die u-förmige Bauweise, die für die Realisierung des Transmissionsverfahrens notwendig ist. Zum anderen kann das Gehäuse im 3d-Druck-Verfahren gefertigt werden.
In Abbildung 3 ist das finale Gehäusedesign dargestellt. Hier werden die elektrischen Verbindungen über eine Trägerleiterplatte integriert, was die Verwendung von Kabelverbindungen innerhalb des Sensors überflüssig macht. Stattdessen können die Hardware-Komponenten direkt in die dafür vorgesehenen Pin-Header gesteckt werden. Dadurch wird nicht nur der Zusammenbau vereinfacht, sondern auch die Fehleranfälligkeit beim Zusammenbau erheblich reduziert.

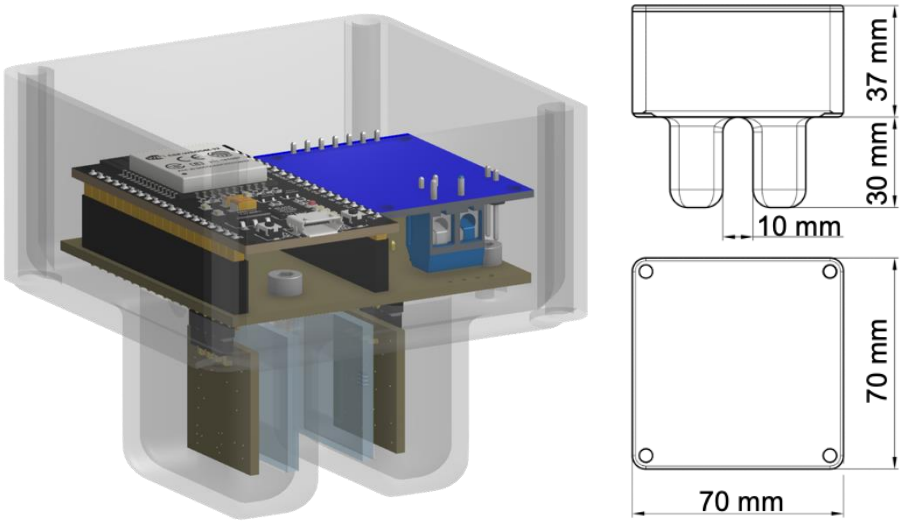


Abbildung 3 Finales Sensor-Gehäusedesign

Die Systemsoftware besteht aus zwei Teilen: der Sensor-Firmware und der Datenlogger-Firmware. Die Sensor-Firmware ist so implementiert, dass sie automatisch Messungen mit einer bestimmten Abtastrate durchführt und die gemessenen Daten über den CAN-Bus an den Datenlogger überträgt. Da das System sowohl in klarem als auch in sehr trübem Wasser zuverlässig arbeiten muss, wurde zudem eine automatische Messbereichsanpassung implementiert. Zudem wurde eine automatische Anpassung der Messrate implementiert. Dadurch kann bei längeren Messzeiträumen die Menge an Daten reduziert werden, indem weniger Messungen durchgeführt werden, wenn keine signifikanten Änderungen in den Daten detektiert werden.
Die Datenlogger-Firmware fragt den CAN-Bus nach eingehenden Sensordaten ab. Wenn Daten empfangen werden, werden sie in das Java Script Object Notation (JSON) Format umgewandelt und in eine Textdatei auf der MicroSD-Karte geschrieben.

Nach jedem Entwicklungszyklus werden die gefertigten Sensoren im Labor evaluiert, sowohl um deren Eignung für die vorgesehene Anwendung nachzuweisen, als auch um Verbesserungspotentiale zu identifizieren. Im Folgenden werden die Ergebnisse

für das finale Sensordesign erläutert, das auch für die experimentellen Untersuchungen an den skalierten Modellen der Lande- und Abbaueinheit zum Einsatz kommt.
Zu Beginn der Evaluierung wird das Signalverhalten betrachtet. Dabei werden vor allem Messfehler und Drift untersucht. Dazu werden Messungen unter konstanten Umgebungsbedingungen durchgeführt, wobei die Helligkeit der LED über den LED-Strom I_{LED} und die Integrationszeit des Detektors T_i variiert werden. Die erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt. Um die Daten besser vergleichen zu können, ist der Bereich der y-Achse entsprechend der Integrationszeit skaliert. Die Messwerte sind gleichmäßig um den entsprechenden Mittelwert (MW) gestreut, wobei die absolute Standardabweichung (SD) mit zunehmender Integrationszeit und LED-Strom ebenfalls zunimmt. Es kann jedoch festgestellt werden, dass die relative Standardabweichung für alle Messungen konstant bei 0,04 % liegt, wie in Tabelle 1 gezeigt ist.

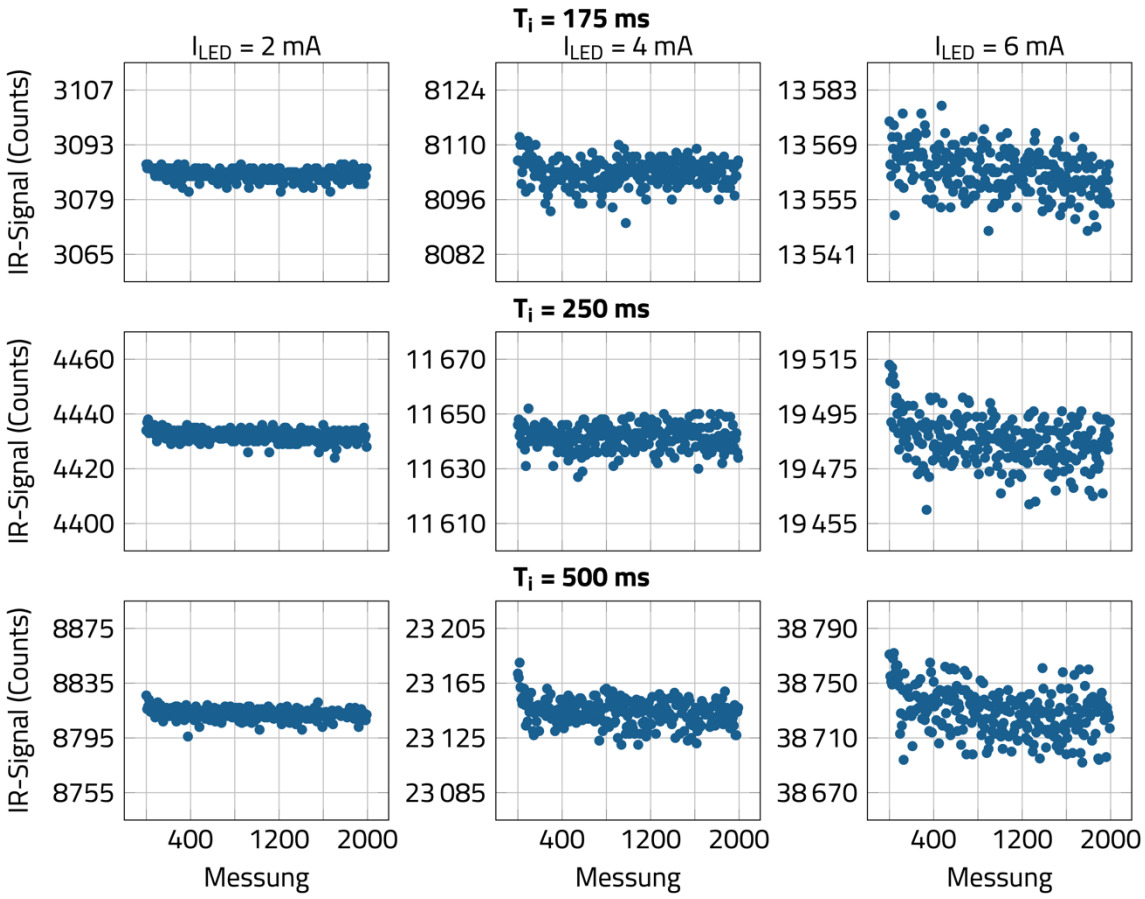


Abbildung 4 Untersuchung des Signalverhaltens

Tabelle 1 Ergebnisse Messfehler

T_i (ms)	I_{LED} (mA)								
	2			4			6		
	MW	SD	SD (%)	MW	SD	SD (%)	MW	SD	SD (%)
175	3085,4	1,4	0,04	8102,9	3,3	0,04	13562,0	6,0	0,04
250	4432,3	2,0	0,04	11641,4	4,8	0,04	19485,5	8,7	0,04
500	8812,4	3,6	0,04	23144,3	10,1	0,04	38730,0	17,1	0,04

Nachdem die Signalstabilität der Sensoren verifiziert wurde, wird eine Kalibrierung durchgeführt, um den gemessenen IR-Counts einen Trübungswert in FNU zuordnen zu können. Gemäß DIN EN ISO 7027-1:2016 ist die Verwendung einer Formazin-Suspension mit definierter Trübung für die Kalibrierung vorgeschrieben. Dies ist bei ex-situ-Messungen mit Laborgeräten möglich, da das Formazin in versiegelten Küvetten verwendet werden kann. Für die Kalibrierung des entwickelten in-situ-Sensors muss der Sensor jedoch in direkten Kontakt mit der Formazin-Suspension kommen, wofür eine vergleichsweise große Menge benötigt wird. Das stellt aufgrund des hohen Preises sowie der Toxizität von Formazin ein Problem dar. Eine sichere und kostengünstige Alternative bietet die Verwendung von Milch anstelle von Formazin. Weil die resultierende Trübung der Milch-Suspension im Gegensatz zur Formazinlösung nicht berechnet werden kann, wird deren Trübung mit einem bereits kalibrierten Referenzsensor bestimmt. Für diesen Zweck wurde ein Sigrist AquaScat S beschafft (Vergleich 2.2).
Bei Betrachtung der Ergebnisse ist zu beobachten, dass die Daten zwar über fast den gesamten Bereich dem gleichen Trend folgen, sich dieser Trend aber bei einer Trübung von etwa 100 FNU und darunter abrupt ändert. Um den sich ändernden Trend bei geringer Trübung adäquat abbilden zu können, wird für diesen Bereich eine eigene Kalibrierkurve berechnet. Dies gilt auch für den Übergang von mittlerer zu hoher Trübung (bei etwa 1000 FNU), wenn die berechnete Kalibrierkurve keine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den Daten zeigt. In Abbildung 5 (oben) sind die Ergebnisse für einen der gefertigten Sensoren exemplarisch abgebildet. Die dargestellte Kalibrierkurve wurde durch die Berechnung von Kurven für hohe, mittlere und niedrige Trübungen erstellt. Die Schnittpunkte der Kurven, wie in Abbildung 5 (unten) gezeigt, werden als Grenzwerte verwendet, um zu bestimmen, welche Kurve für die FNU-Berechnung zu verwenden ist. Für hohe Trübung mit IR < 42769 Counts wird eine Polynom-Regression sechsten Grades zur Berechnung der Kalibrierkurve mit einem Bestimmtheitsmaß von R^2 = 9,9966 verwendet. Die gleiche Regressionsmethode wird für mittlere Trübung mit 42769 Counts ≤ IR ≤ 240895 Counts mit R^2 = 9,9997 verwendet. Bei geringer Trübung mit IR > 240895 Counts wird eine lineare Regression angewandt, die R^2 = 9,9863 ergibt.

Um die Einsetzbarkeit des Systems in größeren Tiefen zu gewährleisten, wird die Drucktoleranz des Sensors im großen Drucktank des LMT getestet. Dabei werden zwei unterschiedliche Druckprofile appliziert. Beim ersten Versuch wird der Druck schrittweise um 100 bar bis zu einem maximalen Druck von 400 bar erhöht. Bei jedem Schritt wird der Druck für 60 min konstant gehalten, bevor es mit dem nächsten Schritt weitergeht. Dabei wird der Druck wird mit einer Geschwindigkeit von 10 bar/min auf- und abgebaut. Bei der zweiten Prüfung wird der Sensor einer zyklischen Belastung ausgesetzt. Dabei wird der Druck 12 mal von 0 bar auf 400 bar erhöht, 10 min lang konstant gehalten und anschließend wieder auf 0 bar reduziert. Dies geschieht wiederum mit einer Rate von 10 bar/min. Um die Funktionsfähigkeit des Sensors während der Tests zu beurteilen, werden jede Sekunde IR-Messungen vorgenommen und in Echtzeit auf einem Computer angezeigt. Sowohl bei der schrittweisen Druckerhöhung als auch beim zyklischen Belastungstest misst der Sensor durchgehend fehlerfrei.

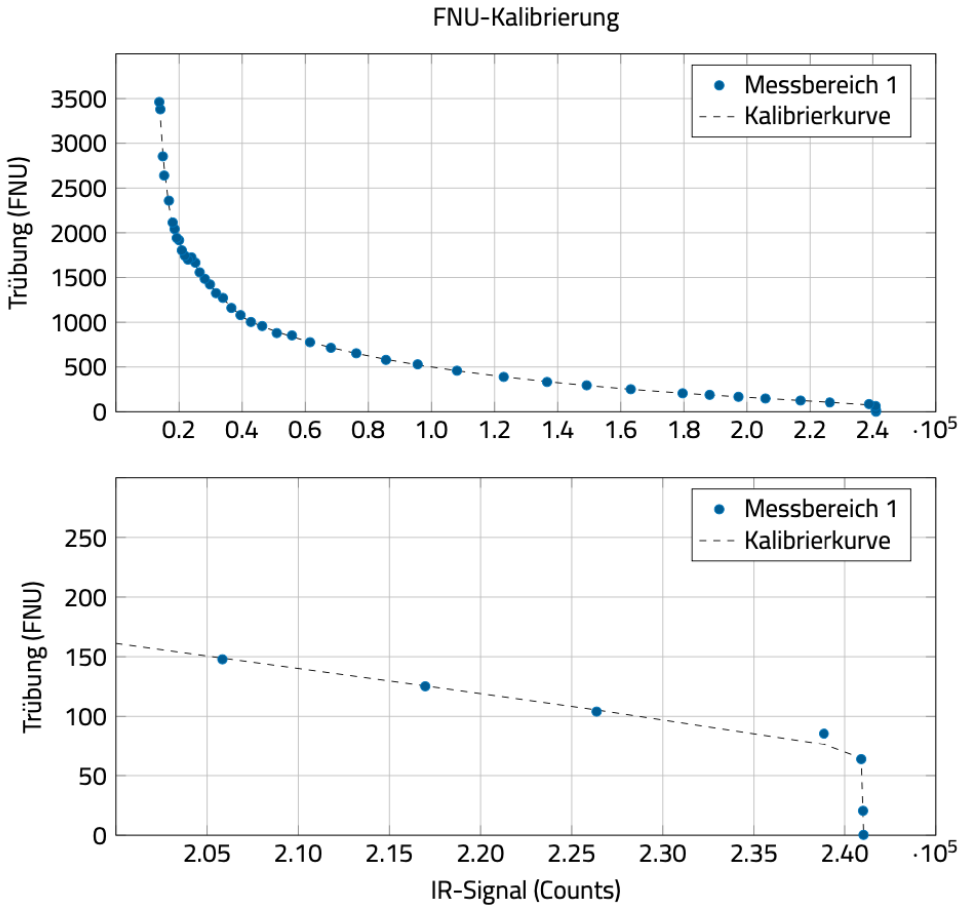


Abbildung 5 Ergebnisse Kalibrierung

Positions- und Lagebstimmung

Des Weiteren hat der LMT den Projektpartner IMB bei der Entwicklung des Sensorsystems zur Positions- und Lagebestimmung unterstützt. Insbesondere zu Beginn der Entwicklung wurden die Erfahrungen, die seitens des LMT bereits während der Entwicklung ähnlicher Systeme gesammelt wurden, mit dem Projektpartner geteilt, um einen schnellen Einstieg in den Entwicklungsvorgang ermöglichen und potenzielle Fehlerquellen vermeiden zu können. Zudem wurde in Zusammenarbeit beider Projektpartner ermittelt, wie die drucktolerante Gestaltung des entwickelten Systems realisiert werden kann.

Feststoffgehaltssensor

Außerdem war der LMT bei der Konzeptphase für das am LSTM entwickelte Sensorsystems zur Bestimmung des Abscheidegrads beteiligt. Dabei wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner zunächst geeignete Messverfahren und Komponenten identifiziert. Anschließend wurden geeignete Konzepte zur Gewährleistung der Drucktoleranz entwickelt.

Versuchstank

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein oktogonaler Versuchstank zur Durchführung experimenteller Untersuchungen an skalierten Modellen eines Abbausystems konzipiert und beschafft. Der achteckige, begehbare Versuchstank mit einem Durchmesser von etwa 2,98 m, einer Seitenlänge von 1,14 m und einer Höhe von 2,61 m

wurde für experimentelle Untersuchungen unter kontrollierten Bedingungen konzipiert (Abbildung 6). Die Konstruktion umfasst sieben transparente Acrylglaswände, die eine umfassende visuelle Überwachung des Experimentverlaufs aus verschiedenen Perspektiven ermöglichen. Eine Seite des Tanks ist mit einem öffnungsfähigen Schott ausgestattet, die in Kombination mit der offenen Decke flexible Anpassungen des Versuchsaufbaus erlaubt. Dies erleichtert die Einführung verschiedener Geräte und Instrumente in den Versuchsraum, um spezifische Experimente zu realisieren.
Der Tank erreicht eine maximale Wassertiefe von 2,20 m, was die Untersuchung unterschiedlicher hydrodynamischer Phänomene bei variierenden Wasserständen ermöglicht. Die Abmessungen des Tanks ermöglichten Experimente mit einer niedrigen Modellskalierung von 1:5 für Detailuntersuchungen des Fräsmoduls und 1:25 für das Gesamtsystem.

Abbildung 6 Versuchstank

Eine detaillierte Beschreibung der Voruntersuchungen zur Bestimmung der Parameter des Versuchsaufbaus sowie der Experimente zur Mobilisierung von Sedimentpartikeln und zum Abbauprozess befindet sich unter AP 11.

AP 7: Förder- und Wechselsystem für die Separationseinheit
AP 7.1: Simulation/Analyse des gekoppelten Systems Behälter / Förderseil / Schiff (bzw. Plattform) an der Wasseroberfläche
AP 7.2: Strömungsmechanische Auslegung des Behälterfördersystems (Außenkontur + Überwachung Leckage-Strömungen bei Förderung
AP 7.3: Integration der Sensorsysteme zur Detektion des Feststoffgehaltes und der Partikelgröße im Fördergut

Vorgegebenes Ziel:

Dieses Arbeitspaket umfasst als ersten Schwerpunkt die Analyse des gekoppelten Gesamtsystems Behälter / Förderseil / Schiff (bzw. Plattform) an der Wasseroberfläche. Die Dynamik der genannten Systeme ist zum einen strukturmechanisch gekoppelt und zum anderen wirken transiente hydrodynamische Lasten auf alle Komponenten. Daher ist eine simulatorische Analyse des gekoppelten Gesamtsystems erforderlich, um zum einen die strukturmechanische Integrität des Systems und zum anderen dessen gewünschtes dynamisches Verhalten gewährleisten zu können. Darüber hinaus können

Einsatzgrenzen und Ausfallzeiten in Abhängigkeit der zu erwartenden Umweltbedingungen präzise bestimmt werden. Zu diesem Zweck werden bereits am Lehrstuhl vorhandene Modelle erweitert und entsprechende Simulationen durchgeführt, um alle relevanten physikalischen Effekte abbilden zu können.
Des Weiteren umfassen die Arbeiten eine strömungsmechanische Auslegung des Behälterfördersystems. Die hier gewonnenen Resultate stellen wiederum die Grundlage für weitere Analysen mittels der in AP 7.1 erstellten Software dar. Aufbauend darauf erfolgt dann eine weitere Optimierung des Gesamtsystems. Abschließend erfolgt in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern die Integration der unter AP 6.2 und 6.3 entwickelten Sensoren.

Erzielte Ergebnisse

Um eine vollelastische Modellierung des Kabels zu ermöglichen, wurde das bereits bestehende Open-Source Simulationspaket OCN-SIM Flex entsprechend erweitert. Der Absetzvorgang der Fräseinheit wurde mit der Simulationssoftware anschließend analysiert. Dabei wurde das Absetzen der Einheit bei unterschiedlichen Wellenhöhen und Periodendauern verglichen. Zusätzlich wurden zwei unterschiedliche Konfigurationen hinsichtlich der Steifigkeit der Drahtseile untersucht. Als beispielhaftes Ergebnis sind die vertikalen Schwingungsamplituden der Einheit für Wellenamplituden von 1 m und 2 m in Abb. 6 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass in dieser Konfiguration bei einer Wellenamplitude von bspw. 1 Meter und einer Wellenperiode von 4 Sekunden das Gesamtsystem eine dreifach so hohe Schwingungsamplitude erfährt. Weitere Simulation werden durchgeführt.

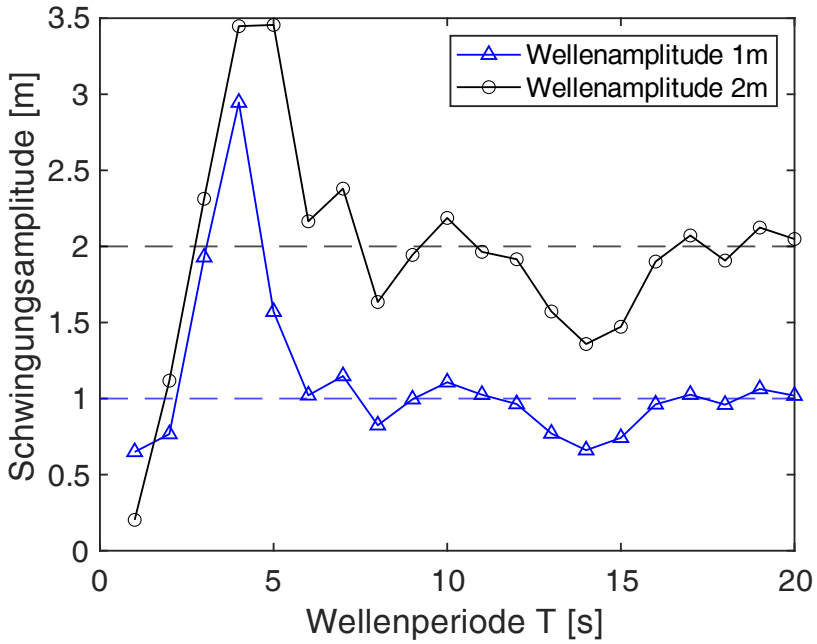


Abbildung 7: Beispiel einer Analyse des gekoppelten Gesamtsystems mit OCN-SIM Flex

Um die strömungsmechanischen Eigenschaften der Separationseinheit näher zu untersuchen, wurde im Rahmen dieses Arbeitspaketes ein Versuchsstand für den Windkanal konzipiert und umgesetzt. Mittels additiver Fertigung wurde ein 1:10 Model der Separationseinheit erzeugt und anschließend im laminaren Strömungsfeld bei sechs verschiedenen Geschwindigkeiten für einen Winkelbereich von 0° bis 360° angeströmt. Aus den erhobenen Daten wurden die Kraftbeiwerte für das Hieven und

Fieren des Fördersystems und für die seitliche Anströmung durch Meeresströmungen bestimmt.
Diese Variation liefert Informationen über die durch Hieven und Fieren der Separationseinheit sowie der aus der Meeresströmung induzierten Widerstände und Querkräfte (siehe Abb. 7). Zur Bestimmung der Kraftbeiwerte wird die jeweils normal zur Anströmrichtung stehende projizierte Fläche herangezogene. In Abb. 8 ist exemplarisch für eine Anströmgeschwindigkeit der Verlauf des Querkraftbeiwertes und des Widerstandsbeiwertes dargestellt. Die unter realen Bedingungen relevanten Winkelbereiche liegen dann bei $\beta = 0° \pm 15°$ sowie $\beta = 180° \pm 15°$.

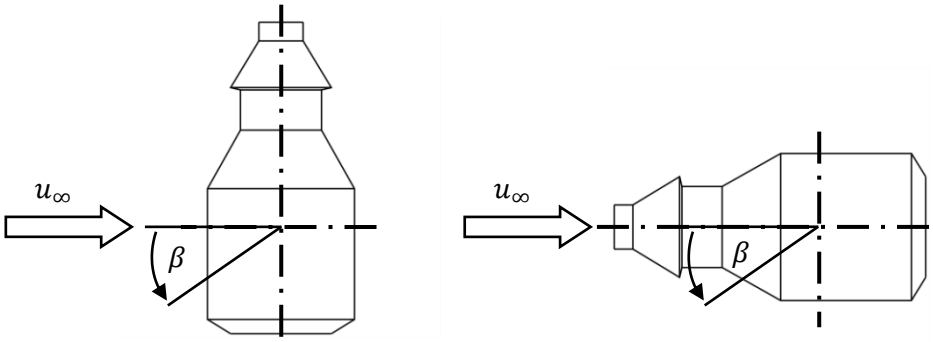


Abbildung 8: Umströmung durch Meeresströmung (l.) und Umströmung durch Hieven und Fieren (r.)

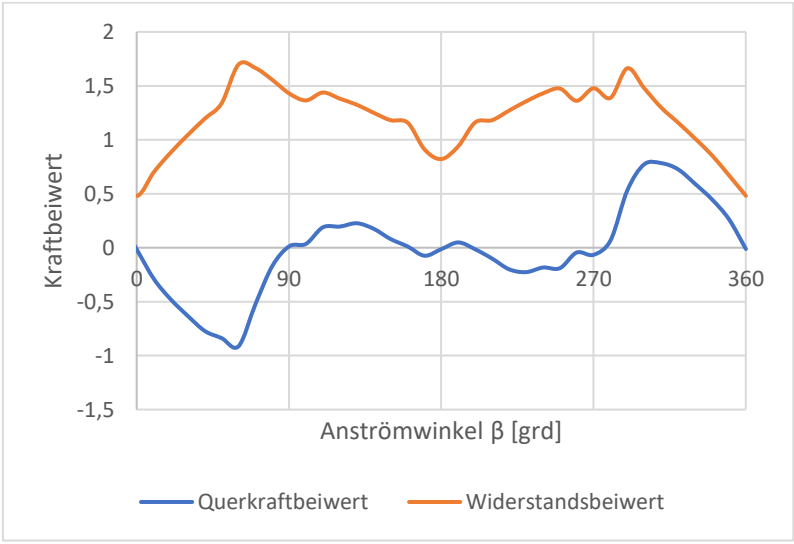


Abbildung 9: Querkraft- und Widerstandsbeiwert für Hieven und Fieren bei $Re = 7{,}92 \cdot 10^5$

Zusätzlich wurde im Rahmen des Arbeitspaketes der LSTM bei der Entwicklung eines Sensorsystem zur Detektion des Feststoffgehaltes und der Partikelgröße im Fördergut unterstützt. Das Teilsystem wurde anschließend erfolgreich im Drucktank des LMT bei 400 bar auf Funktionstüchtigkeit untersucht. Der Prototyp des Sensors zur Bestimmung des Feststoffgehaltes wurde in einen Versuchsstand am LSTM integriert und stand daher nicht für die Untersuchungen am LMT zur Verfügung. Eine Integration des Messsystems in den Versuchsstand des LMT steht aus und wird im Rahmen eines potentiellen Folgeprojektes umgesetzt.

AP 8: Separation und Sedimentation im Separator
AP 8.5: *Entwicklung Abdocksystem an der Separationseinheit*

Vorgegebenes Ziel:

Im Fokus dieses Arbeitspakets steht die Mitwirkung bei der Entwicklung eines Dockingsystems mit Abdichtfunktion gegenüber separierten Erzen und Sedimenten. Besondere Herausforderungen sind dabei die Bewegung von Festkörpern und Sedimenten im transportierten Medium sowie die hohen Drücke in den angestrebten Fördertiefen. Zu diesem Zweck führt der LMT strömungstechnische Untersuchungen durch, um ein Abdichten unter realen Betriebsbedingungen zu gewährleisten.

Erzielte Ergebnisse

Zu Beginn des Projektes hat sich der LMT an der Konzeption eines Dockingsystems für die Separationsbehälter beteiligt. Da sich das Konzept fest installierter Separationsbehälter im Laufe des Projekts durchsetzte, fanden hierzu keine weiteren Untersuchungen statt. Stattdessen ergab sich die Notwendigkeit für zusätzliche Analysen zum Landeverhalten und zur Standsicherheit des Abbausystems.

AP 10: Datenanalyse und Entwicklung Regelsysteme
AP 10.1: Entwicklung von Auswerteroutinen zur Bestimmung des Feststoffgehaltes und der Löseleistung im Absaugtrakt sowie zur Bestimmung des Abscheidegrads im Separator
AP 10.8: Entwicklung der Auswerteroutinen zur qualitativen und quantitativen Bewertung der Positionierung der Fördereinheiten am Fräsenträger und des Transportweges zum Schiff/zur Plattform

Vorgegebenes Ziel:

Zentraler Bestandteil der Arbeiten des LMT ist hier die Implementierung sowie Verifizierung der am LSTM entwickelten Auswerteroutinen für die unterschiedlichen Sensorsysteme. Bei der Ermittlung des Feststoffgehaltes und der Löseleistung im Absaugtrakt sowie des Abscheidegrads im Separator besteht die besondere Herausforderung darin, dass eine rein optische Detektion der betreffenden Parameter nur eingeschränkt möglich sein wird, da von einer starken optischen Trübung des Mediums durch beim Fräsen gelöste Sedimente auszugehen ist. Die Auswertung der Sensordaten erfordert dementsprechend komplexe Routinen, welche auch in der Lage sein müssen, aus unterschiedlichen physikalischen Größen geeignete Parameter zur Quantifizierung der interessanten Größen abzuleiten.

Erzielte Ergebnisse

Die Implementierung der am LSTM entwickelten Routinen zur Bestimmung des Feststoffgehaltes wurde durch den LSTM in Kooperation mit dem LMT in ein Messsystem überführt. Das entwickelte Messsystem wurde unter Realbedingungen erfolgreich im Drucktank des LMT getestet.
Die dadurch frei gewordenen Kapazitäten am LMT wurden für zusätzliche Arbeiten an der Entwicklung des Sensorsystems zur Trübungsbestimmung sowie für weiterführende Analysen zum Landeverhalten und zur Standsicherheit des Abbausystems eingesetzt.

AP 11: Systemevaluation und -demonstration
AP 11.1: Experimentelle Validierung des Systems Fräse - Förderpumpe - Separator zum Nachweis der Funktion des Separators und der Vermeidung von Trübewolken im Betrieb
AP 11.5: Ergebnisdarstellung und Bilanzierung

Vorgegebenes Ziel:

Ziel der Arbeiten ist die Analyse und ggf. Optimierung des Gesamtsystems hinsichtlich des Auftretens von Trübewolken, des Andockens des Separationsbehälters an die Fräseinheit sowie des Wirkungsgrads des Separationsprozesses. Zu diesem Zweck definiert der LMT geeignete Parameter, mit denen die absolute Bewertung des Auftretens der Trübewolken möglich ist. Dies dient neben der Bewertung des Systemverhaltens auch der Verifizierung der im System integrierten Sensoren für die Überwachung hinsichtlich Trübewolken. Die absolute Bewertung wird dann durch die Beschaffung geeigneter Messtechnik sowie die Implementierung entsprechender Auswertealgorithmen realisiert. Aufbauend darauf erfolgt, falls notwendig, eine weitere Optimierung des Gesamtsystems.
Abschließend erfolgt im Rahmen dieses Arbeitspaketes die finale Ergebnisdarstellung in Form eines Berichts.

Erzielte Ergebnisse

Auswahl eines geeigneten Sediments für die experimentellen Untersuchungen

Bevor die experimentellen Untersuchungen im Versuchstank des LMT durchgeführt werden können, muss ein geeigneten Probenmaterial gefunden werden, das in ausreichender Menge beschafft werden kann und als Ersatz für das Originalmaterial dient. Dafür wurden charekteristische Eigenschaften von verschiedenen Sedimenten verglichen. Die vom BGR bereitgestellte original Massivsulfidprobe (Index Mission), die während der Index-Mission gesammelt wurde, wurde zunächst am IAM mechanisch zerkleinert und dient als Referenz nach dem Fräsprozess. Zudem wurde Kies (Gravel 0/4 Doerner) aus einem Kieswerk bei Rostock beschafft. Außerdem stellte das IAM eine Probe aus einem Steinbruch in Rochlitz zur Verfügung (Rochlitz). Darüber hinaus wurden am IAM mit Proben aus diesem Steinbruch Schnittversuche durchgeführt. Das Material, das dabei bei verschiedenen Schnitttiefen gelöst wurde (Segment_A 4 mm, Segment_A 6 mm, Segment_A 8 mm), wurden dem LMT ebenfalls zur Verfügung gestellt.

Korngrößenverteilung

Um die Korngrößenverteilung eines Sediments zu analysieren, wird es mit einer Vibrationssiebmaschine unter Verwendung verschiedener Maschenweiten gesiebt. Zu Beginn wird die Trockenmasse des Sediments bestimmt. Anschließend werden die jeweiligen Siebstufen durchlaufen und das entsprechende Gewicht des Rückstandes ermittelt. Im Rahmen der ersten Projekttreffens wurde definiert, das vorerst nur Partikel mit einer Korngröße über 1,0 mm als wirtschaftlich relevant betrachtet und an die Wasseroberfläche gefördert werden. Dementsprechend verbleiben alle kleineren Partikel am Meeresboden und müssen dort abgelagert werden. Die Maschenweiten wurden

entsprechend dieser Vorgabe gewählt, so dass sich nachfolgende Werte für die Siebanalyse ergeben: 1,0 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm und 0,063 mm. Der Siebverlust wird von der Trockenmasse subtrahiert und dann der prozentuale Rückstand und der daraus resultierende prozentuale Siebanteil der Durchgänge bestimmt. Wie in Abbildung 10 gezeigt, wird das Ergebnis aufgetragen als Korngröße zur Summe der Durchgänge in einem halblogarithmischen Diagramm dargestellt.

Die Abbaueigenschaften der Segment_A Proben ähnelten am stärksten der Index-Missionsprobe. Die Rochlitz-Probe wies eine ähnliche Zusammensetzung wie die Index-Missionsprobe auf, jedoch eine deutlich unterschiedliche Korngrößenverteilung im Bereich unter 1 mm. Das Kiesmaterial weist die beste Übereinstimmung in der Korngrößenverteilung mit der Originalprobe auf.

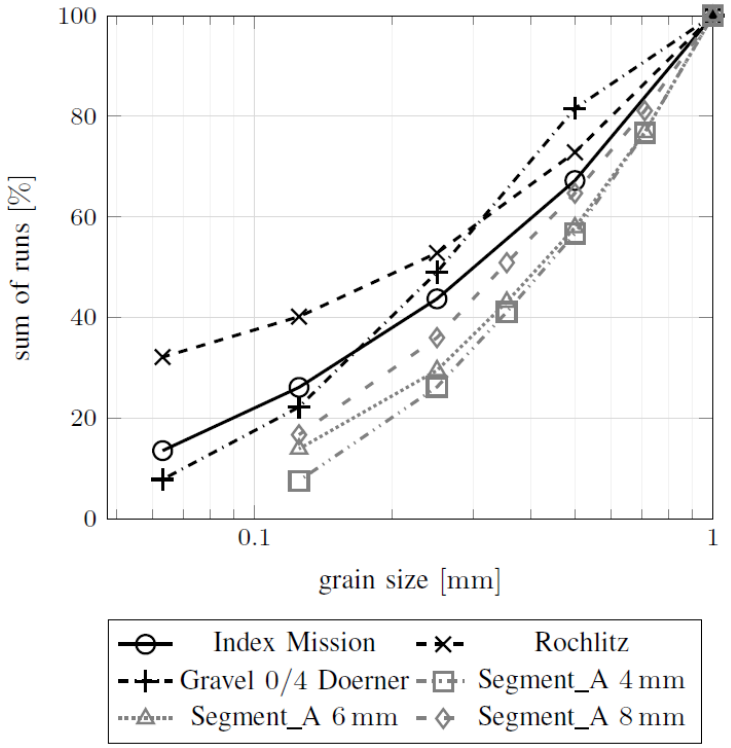


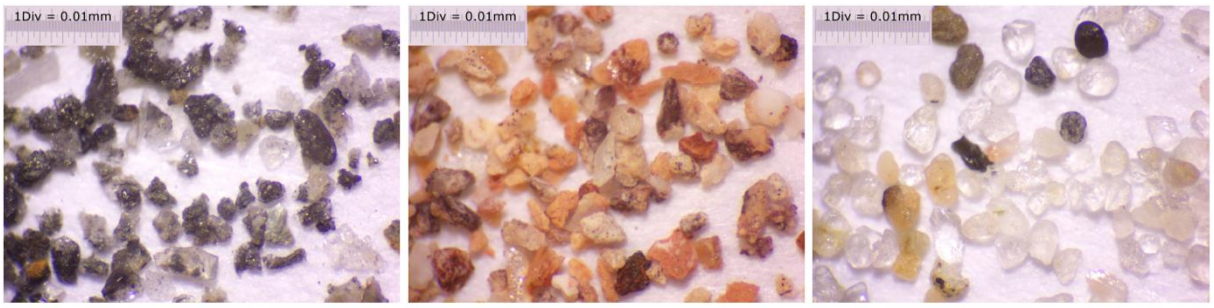
Abbildung 10 Korngrößenverteilung

Partikelgeometrie

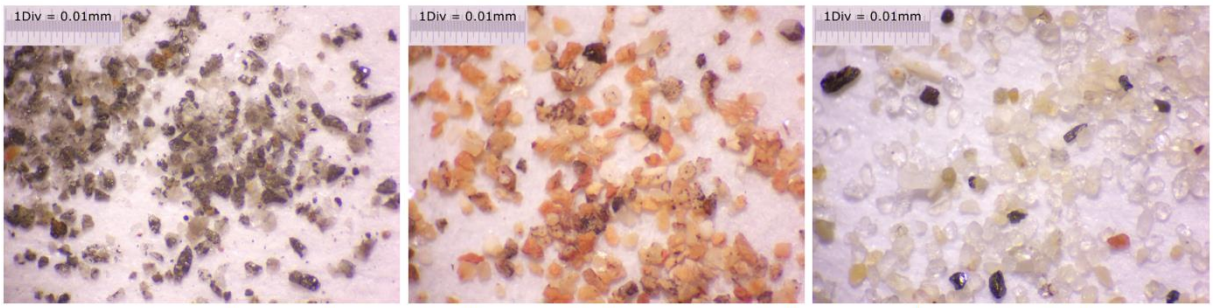
Zusätzlich zu der Korngrößenverteilung werden die Sedimentpartikel unter einem Auflichtmikroskop untersucht, um nähere Informationen über die Partikelgeometrie zu erhalten. Die Geometrie hat einen signifikanten Einfluss auf den Widerstand eines Körpers bei einer Relativbewegung durch ein Fluid. Der durch die Relativbewegung induzierte Widerstand beeinflusst die Verweilzeit eines Teilchens in der Wassersäule und damit die zu bestimmende Sedimentationsrate. Die Arbeit von Mrokowska [1]hat gezeigt, dass bei verschiedenen scheibenförmigen Partikel ein untschiedliches Absetzverhalten zu beobachten ist, welches sich auf die Partikelgeometrie zurückzuführen lässt. Dementsprechend wird die Ähnlichkeit der Partikelformen als weiterer Parameter

[1] *M. M. Mrokowska, "Influence of pycnocline on settling behaviour of non-spherical (particle and wake evolution," Scientific reports, vol. 10, no. 1, pp. 1–14, 2020.*

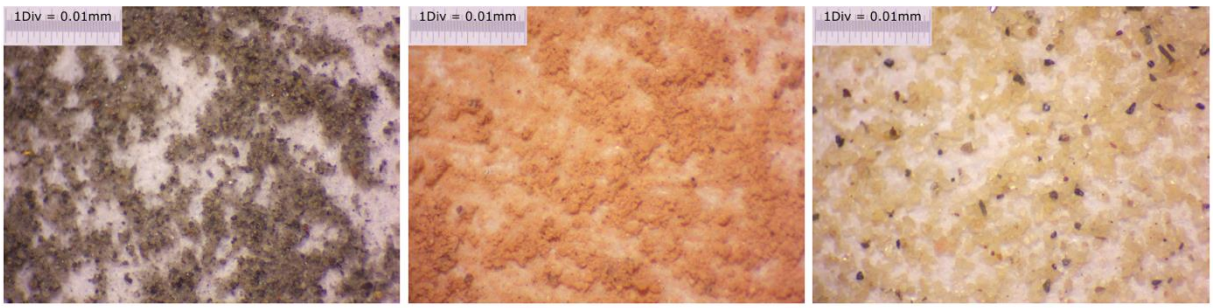
für die Entscheidung über ein Ersatzsediment herangezogen. Abbildung 11 zeigt drei verschiedene Partikelgrößen für drei Proben. Abbildung 11 (a) veranschaulicht die verschiedenen Entstehungsprozesse der Sedimentproben. Die Index Mission und Rochlitz-Probe enthalten Sedimentpartikel, die durch mechanische Bearbeitung mit einer Fräsmaschine hergestellt wurden. Das ursprüngliche Gestein brach aufgrund mechanischer Spannung und erzeugte somit scharfe Kanten. Dies steht im Gegensatz zu der Kiesprobe, welche abgerundete Kanten aufweist. Diese sind durch Erosionsprozesse über einen langen Zeitraum hinweg entstanden. Abbildung 11 (c) zeigt einen weiteren signifikanten Unterschied: Während der Kies selbst bei einer Korngröße von weniger als 0,063 mm noch eine lockere Struktur aufweist, verkeilen sich die Partikel bei anderen Materialien und bilden dadurch ein Konglomerat einer Vielzahl einzelner Sedimentpartikel.



(a) Samples of sediment particles from Index Mission (l.), Rochlitz (c.), Gravel 0/4 Doerner (r.) with a grain size of 0.125 mm



(b) Samples of sediment particles from Index Mission (l.), Rochlitz (c.), Gravel 0/4 Doerner (r.) with a grain size of 0.063 mm



(c) Samples of sediment particles from Index Mission (l.), Rochlitz (c.), Gravel 0/4 Doerner (r.) with a grain size of less then 0.063 mm

Abbildung 11 Aufnahmen Auflichtmikroskop

Sedimentationsrate

Die Sedimentationsrate ist die vertikale Geschwindigkeit eines Teilchens in einem flüssigen Medium, in dem es sich am Boden absetzt. Zur Ermittlung der Sedimentationsrate der untersuchten Partikel wurde ein Absetzbecken entwickelt. Dieser Tank weist einen quadratischen Innenquerschnitt von 150 mm×150 mm und eine Höhe von

1100 mm auf. Durch diese Abmessungen des Tanks wird sichergestellt, dass der Wandeinfluss auf die Sinkgeschwindigkeit eliminiert wird. Die Seitenwände sind aus Acrylglas gefertigt, was eine visuelle Beobachtung des Sedimentationsprozesses erlaubt.
Abbildung 12 zeigt eine Skizze des Absetzbeckens, das bis zu einer Wassersäule von 1,0 m mit Leitungswasser gefüllt wird. Der Versuchsaufbau umfasst eine 6K-Kamera zur Erfassung des Sedimentationsprozesses. Zur Bestimmung der Absetzgeschwindigkeit wurden hochauflösende Bilder mit einer Bildrate von 50 Hz aufgenommen. Für die Versuche werden die gesiebten Proben aus der Korngrößenbestimmung verwendet. Bei den Proben, die eine Korngröße kleiner als 0,063 mm aufweisen, wird im Tank zusätzlich das im Rahmen von AP 6 entwickelte Trübungsmesssystem verwendet. Dabei wurden drei Sensoren in einem Abstand von 100 mm, 400 mm und 700 mm zum Boden des Tanks installiert, mit denen mit einer Abtastrate von 3 Hz die Trübung des Wassers bestimmt wird.

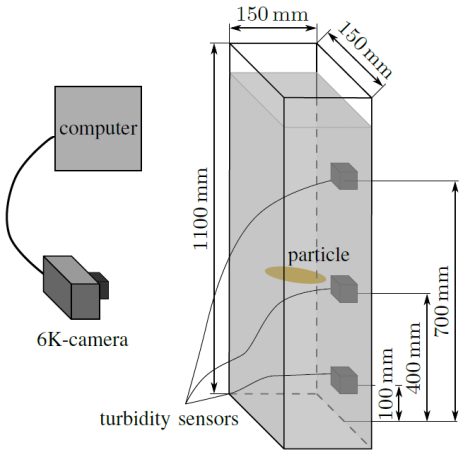


Abbildung 12 Skizze vom experimentellen Setup am Sedimentationstank

Die ermittelten Absetzgeschwindigkeiten sind in Abbildung 13 gezeigt. Bei einer Korngröße von weniger als 0,5 mm weisen die beiden durch Fräsen mechanisch bearbeiteten Proben (Index Mission und Rochlitz) eine weitgehend ähnliche Absetzgeschwindigkeit auf. Dies kann in Zusammenhang mit einer ähnlichen Korngeometrie und damit einer ähnlichen Umströmung der einzelnen Partikel stehen. Obwohl die abgerundeten Kiespartikel über einer Korngröße von 0,25 mm, aufgrund ihrer hydrodynamisch günstigeren Geometrie, eine deutlich höhere Absetzgeschwindigkeit aufweisen, verbleiben Sedimentpartikel mit einer Korngröße unter 0,125 mm deutlich länger in der Wassersäule. Für die Durchführung der Absetz- und Systemversuche des Fräsen-Modells im Versuchstank sind somit diese kleinen Sedimentpartikel von besonderem Interesse. In diesem Bereich liegt der Unterschied zwischen den Proben aus Rochlitz und dem Kies für Partikelgrößen von 0,125 mm bei etwa 10 % und für 0,063 mm bei etwa 2,6 %.

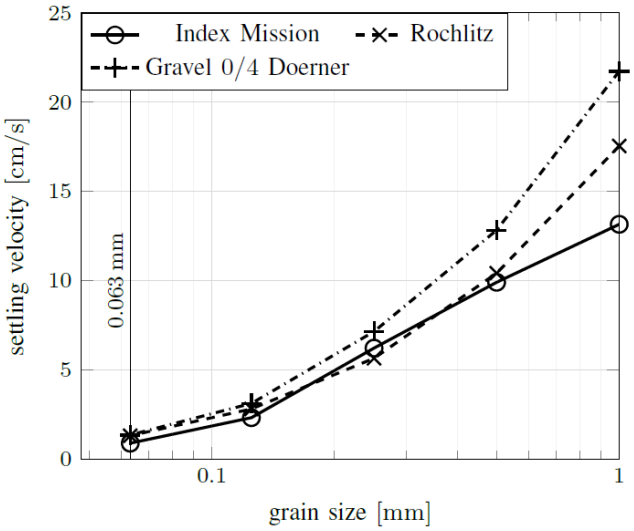


Abbildung 13 Sedimentationsrate der Proben bis zu einer Partikelgröße von 0,0063mm

Die Ergebnisse des Trübungsmesssystems sind in Abbildung 14, Abbildung 15 und Abbildung 16 dargestellt. Sensor 1 weist dabei einen Abstand von 700 mm, Sensor 2 von 400 mm und Sensor 3 von 100 mm zum Boden auf. Es ist erkennbar, dass die Sensoren die Sedimentwolke beim Durchgang durch die Wassersäule zuverlässig detektieren. Die gemessene Trübung für die Index-Probe nimmt deutlich schneller ab als die der Rochlitz- und Kiesprobe. Bei allen drei Proben nimmt die Sedimentationsrate mit der Zeit ab bis keine weitere Veränderung mehr feststellbar ist. Für die Index-Probe geschieht dies nach etwa 200 s. Für die Rochlitz-Probe liegt dieser Wert bei etwa 600 s und für Kies bei 2000 s. Der Grund dafür kann in der Kornform oder der Dichte, aber auch in der Messmethodik der Trübungssensoren liegen. Die Kameraaufzeichnungen zeigen allerdings, dass sich nach dem Auftreffen der Sedimentwolke auf dem Boden eine Wolke mit deutlich geringerer Trübung im Tank ausbreitet. Diese verbleibt sowohl für die Index- als auch für die Kiesproben etwa 20 Stunden in der Wassersäule.

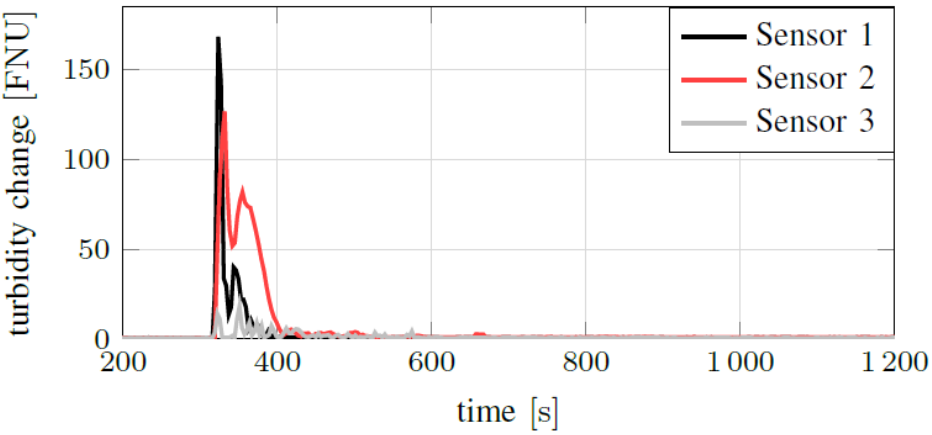


Abbildung 14 Trübungsänderung Index-Mission, kleiner 0,063 mm

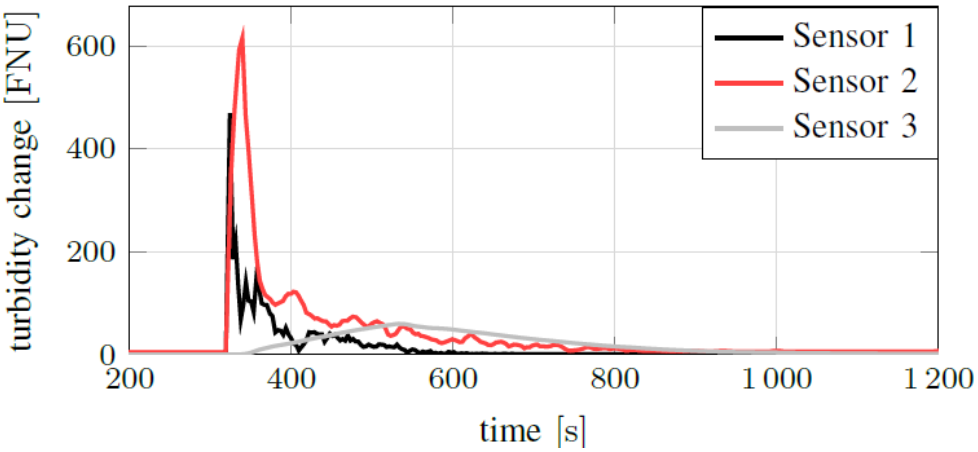


Abbildung 15 Trübungsänderung Rochlitz, kleiner 0,063 mm

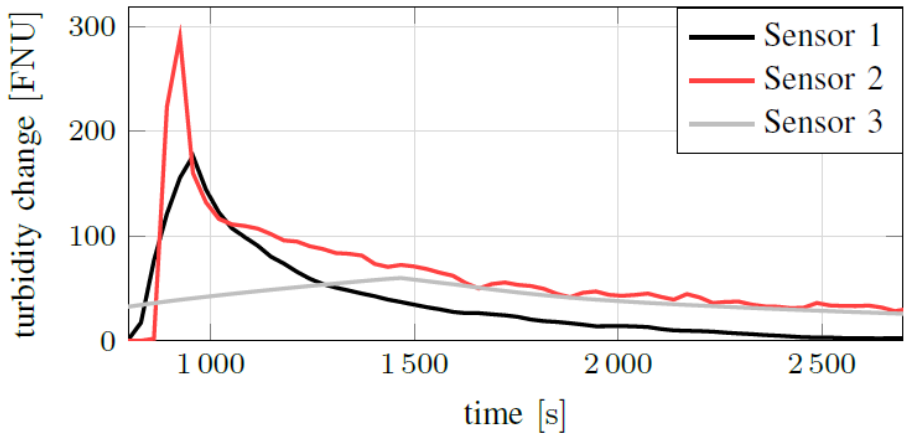


Abbildung 16 Trübungsänderung Kies 0/4, kleiner 0,063 mm

Proctor-Test

Zur Herstellung eines maximal verdichteten Bodens für die nachfolgend beschriebenen Landeversuche wurden Proctorversuch mit dem ausgewählten Sediment durchgeführt. Unter Variation des Wassergehalts in der Sedimentprobe wird hierbei in einer Versuchsreihe die maximal erreichbare Bodendichte bei definierter Verdichtungsarbeit ermittelt. Es ergibt sich ein optimaler Wassergehalt des Versuchssediments, welcher für den Bodenaufbau genutzt wurde. Abbildung 17 zeigt hierzu den Verlauf der Dichte der gleichmäßig verdichteten Kies 0/4 Probe bei variierendem Wassergehalt. Abbildung 17 zeigt hierzu, dass die maximale Dichte der untersuchten Probe von 1,848 g/cm³ bei einem optimalen Wassergehalt von 9,3 % erreicht wurde. Dieser Wert diente als Grundlage für den Bodenaufbau bei den nachfolgend beschriebenen Landeversuchen.

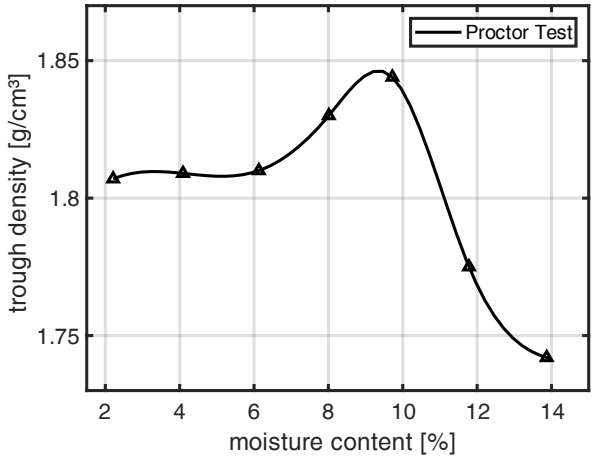


Abbildung 17 Proctordichte Kies 0/4

Trübungsversuche

Um die Anwendbarkeit des entwickelten Trübungsmesssystems in einem modular erweiterbaren Sensorarray nachzuweisen, wurden umfangreiche Trübungsversuche im Versuchstank des LMT durchgeführt. Hierbei wurde ein Gewicht auf eine künstliche Bodenstruktur fallen gelassen, wodurch große Mengen an Sedimentpartikeln mobilisiert wurde. Der Fokus der Untersuchungen lag hierbei auf der Detektion relevanter Trübungswolken sowie derer räumlicher und zeitlicher Ausbreitung.

Versuchsaufbau

Als Boden wurde eine Runde Sedimentwanne mit einem Durchmesser von 100 cm verwendet. Diese wurde mit losem Sediment gefüllt, um eine realitätsnahe Umgebung zu simulieren. Das lose Sediment repräsentiert einen "worst-case" für die Partikelaufwirbelung und erzeugt hohe Trübungen,welche die Verifizierung des Trübungsmesssystems ermöglichen. Zur Untersuchung des Versuchs wurde eine runde Scheibe mit einem Gewicht von 6 kg als Fallgewicht verwendet.
Für die Trübungsmessung wurden insgesamt 8 der am LMT entwickelten Trübungssensoren (Vgl. 1 in Abbildung 18 und AP 6) verwendet. Die Sensoren wurden in vier Zweiergruppen übereinander mit einem Abstand von 10 cm. Die vier Sensorgruppen sind zueinander um je 90° versetzt, um eine umfassende räumliche Abdeckung des Behälters zu erhalten. Weiter wird aus dem rechten Teil von Abbildung 19 die Bezeichnung und Position der verwendeten Sensoren ersichtlich. Die Bezeichnung der Sensoren in diesen Versuchen setzt sich aus der Position (U – Upper, L – Lower) und der spezifischen zweistelligen Sensor-ID zusammen.
Zusätzlich werden die Vorgänge mit zwei hochauflösenden Kameras foto- und videodokumentiert. Im Rahmen eines weiterführenden Tests wurde das Setup durch einen kommerziellen Trübungssensor ergänzt (Aquascat S, Vgl. 2 in Abbildung 18)

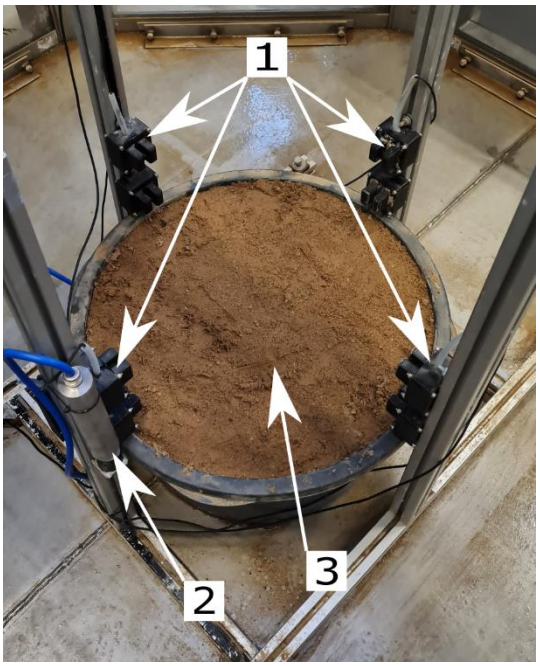


Abbildung 18 Versuchsaufbau Trübungsversuche mit Anordnung der Messtechnik. 1 – Trübungssensoren des LMT, 2 –Aquascat S – Kommerzielles FNU-Meter, 3 – Sedimentwanne

Versuchsdurchführung

Das Fallgewicht wurde aus einer Höhe von 100cm im freien Fall in den Behälter abgesenkt. Die transiente, dreidimensionale Ausbreitung der durch den Einschlag erzeugten Trübewolke wurde mit Hilfe eines Arrays von Trübungssensoren detektiert. Zusätzlich wurden Aufnahmen mit hochauflösenden Kameras gemacht, um die Messdaten visuell zu bestätigen.
Zur Abschätzung der dreidimensionalen Trübungsausbreitung über einen längeren Zeitraum wurde im Anschluss an den Versuch der Versuchstank über einen Zeitraum von 18 Stunden weiter von den Kameras dokumentiert.

Ergebnisse

In Abbildung 19 werden die Auswirkungen des Einschlags durch Kameraaufnahmen der Trübungsversuche aus zwei verschiedenen Perspektiven veranschaulicht. Diese Bilder wurden eine Sekunde nach dem Impact aufgenommen. Es ist zu erkennen, dass durch den Einschlag des Fallgewichts große Menge an Partikeln verschiedenster Korngrößen mobilisiert und in der Wassersäule verteilt wurden. Die Partikel wurden durch den Einschlag bis zu 20 cm hoch aufgewirbelt und die Sedimentwolke verteilte sich ungleichmäßig und schnell in alle drei Raumrichtungen.
In Abbildung 20 sind hierzu die Messwerte der Trübungssensoren für den ersten Versuch innerhalb von 60 Sekunden nach der Trübungserzeugung dargestellt. Durch die beschriebene ungleichmäßige, dreidimensionale Ausbreitung der initialen Trübungswolke kurz nach dem Impact weichen die Messwerte an den einzelnen Messorten zum Teil stark voneinander ab. Es ist zu erkennen, dass sich die horizontale Ausbreitung der Trübewolke in Richtung der bodennahen Sensoren L23 und L26 (Vgl. Abbildung 19) am größten war. Hierbei wurden Trübungswerte von bis zu 9000 FNU erreicht.

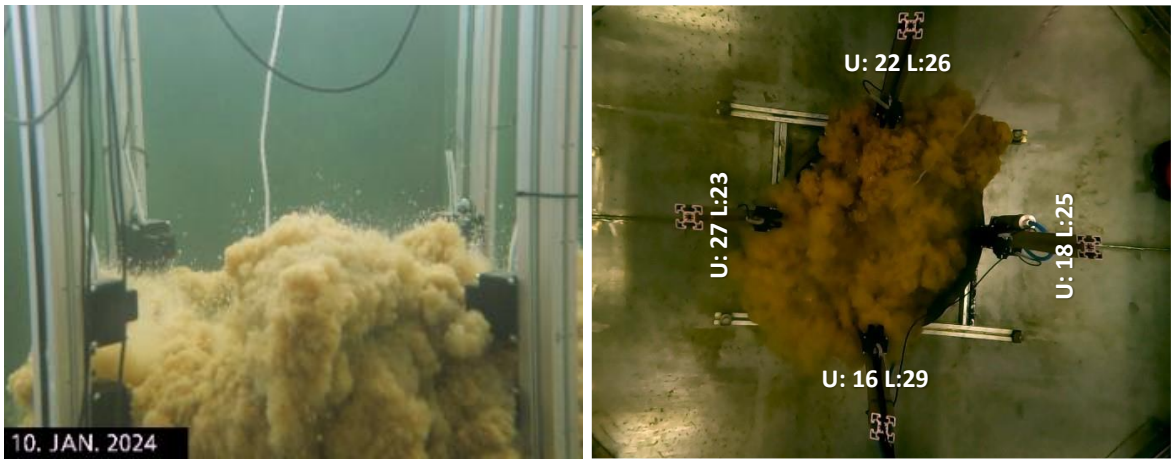


Abbildung 19 Bildaufnahme Trübungsversuch nach einer Sekunde, links erster Versuch aus lateraler Sicht, rechts zweiter Versuch in Draufsicht

Weiter ist zu erkennen, dass lediglich die unteren Sensoren nach dem Einschlag signifikante Trübungswerte messen konnten. Dies ist zum einen mit der bodennahen Ausbreitung der Trübungswolke zu begründen. Diese Ergebnisse sind mit dem angewandten Messverfahren zu begründen. Für die Trübungssensoren wurde ein Messverfahren auf Basis des Transmissionsprinzips gewählt. Dies ermöglicht, wie zuvor gezeigt, die Detektion von hohen Partikelkonzentrationen im Messvolumen, welche bei der Aufwirbelung durch Fräsräder erwartet wird. Die sichere Messung niedriger Trübungswerte kann hierbei ab 50 FNU gewährleistet werden. Folglich konnten Trübungen mit geringen Partikelkonzentrationen an den oberen Sensoren und im weiteren Langzeitverlauf nicht aufgelöst werden.

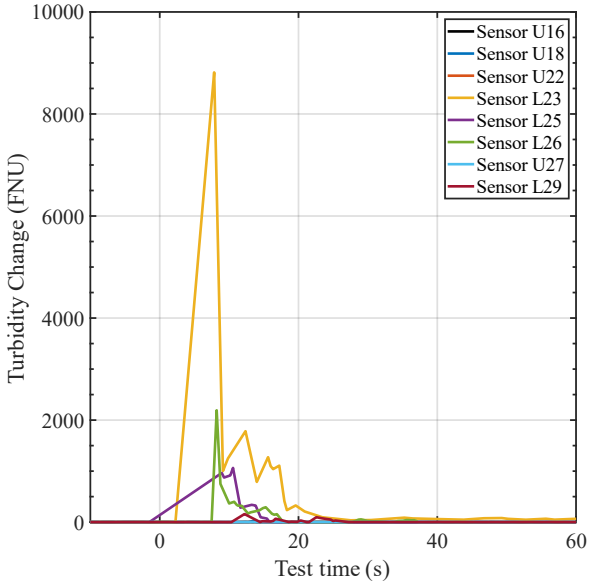
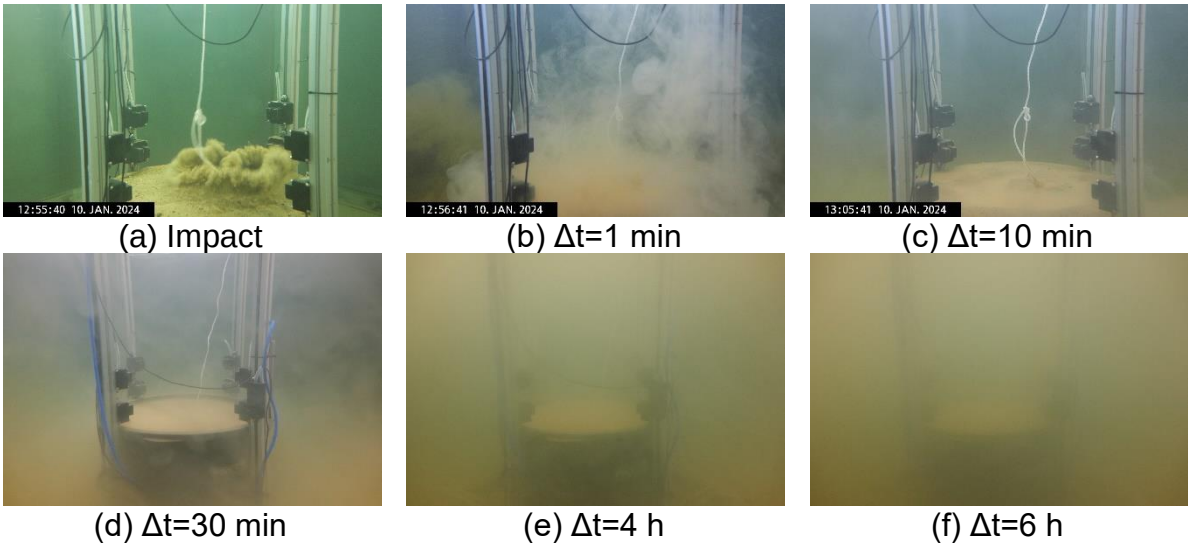


Abbildung 20 Messwerte der Trübungssensoren in den ersten 60 Sekunden nach dem Einschlag - erster Versuch

Zur Veranschaulichung der Langzeitverteilung der Partikel in der Wassersäule werden in Abbildung 21 exemplarisch 6 Momentaufnahmen zu verschiedenen Zeitpunkten nach dem Einschlag gezeigt. Obwohl die Messwerte der Trübungssensoren in Abbildung 20 bereits nach etwa 30 Sekunden auf das Anfangsniveau absanken, ist zu erkennen, dass sich ein geringer Anteil der aufgewirbelten Sedimentpartikel über längere Zeit in der Wassersäule hält und verteilt. Während die Partikel sich in den 30

Minuten nach dem Einschlag (Vgl. Abbildung 21 (b), (c) und (d)) in Wolken formiert im Tank verteilen, lässt sich über längere Zeit (Vgl. Abbildung 21 (e) und (f)) eine Homogenisierung der Partikelkonzentration beobachten.



(a) Impact (b) Δt=1 min (c) Δt=10 min

(d) Δt=30 min (e) Δt=4 h (f) Δt=6 h

Abbildung 21 Zeitlicher Verlauf der Trübungsausbreitung aus Sicht der lateral angeordneten Kamera

Zur Quantifizierung der beschriebenen resultierenden Trübungswerte im Langzeitverlauf wurde für eine zweite Untersuchung ein kommerzielles Trübungsmessgerät (AquaScat S der Fa. Sigrist) dem Versuchsaufbau hinzugefügt. Mit diesem Messgerät, welches lediglich für den Laborbetrieb geeignet ist, können Trübungswerte bis zu 0 FNU aufgelöst werden.

In Abbildung 22 sind die entsprechenden Messdaten des kommerziellen Trübungssensors für den zweiten Trübungsversuch für 0,5 bis 8 Stunden nach dem Einschlag des Fallgewichts abgebildet. Die zuvor mit Abbildung 21 beschriebenen Effekte stimmen mit den Messdaten des Trübungssensors überein. Die starke Schwankung der Messwerte in den ersten 2,5 Stunden lassen auf durchziehende Sedimentwolken und eine ungleichmäßige Verteilung schließen. Nachfolgend ist eine homogenere Verteilung der Partikel durch eine geringe Fluktuation der Messwerte abzuleiten.

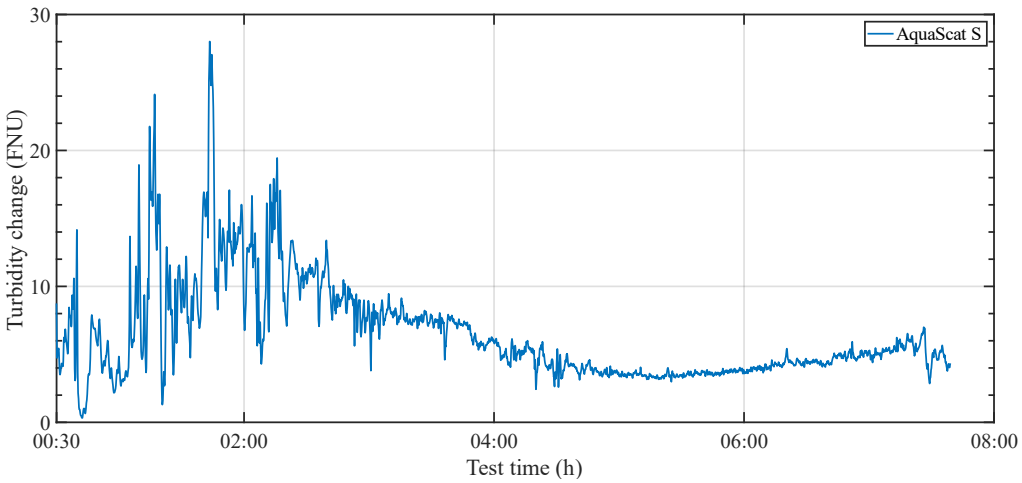


Abbildung 22 Messdaten zweiter Trübungsversuch kommerzielles FNU-Meter Aquascat S

Landeuntersuchungen

Versuchsaufbau

Für die Durchführung von Landeversuchen mit dem Modell einer Tiefseefräse im Maßstab 1:20 wurde ein detaillierter Versuchsaufbau entwickelt, der eine Nachbildung der Einsatzbedingungen ermöglichen soll. Das Modell der Tiefseefräse besteht aus einer quadratischen Grundfläche mit einer Seitenlänge von 500 mm und einer Höhe von 385 mm. Um verschiedene Beladungszustände während der Experimente zu modellieren, kann das Modellgewicht durch das Füllen von drei Auffangbehältern variiert werden. Das Modellgewicht wurde im Hinblick auf die Flächenlasten skaliert. Die Leermasse des Modells beträgt 250 kg in Luft, wohingegen es im vollständig befüllten Zustand ein Gewicht von 400 kg erreicht.
Zur Anpassung an unterschiedlichen Geländebedingungen, ist das Modell mit vier höhenverstellbaren Beinen ausgestattet, welche eine optimale Ausrichtung ermöglichen. Hierdurch kann die Orientierung des Modells für den Landevorgang im Vorfeld an den Hang angepasst werden. Zur Überprüfung des Einsinkens in den Boden, der Standsicherheit und der Rutschfestigkeit wurden zwei verschiedene Größen von Landetellern getestet.
Die maximal zu untersuchende Hangneigung im Rahmen des vorgestellten Forschungsprojektes wurde durch das Konsortium basierend auf vorhandenen Daten des BGR und Literaturangaben auf 20° festgelegt. Zur Durchführung der Landeversuche wurde eine schräge Ebene bestehend aus einem Rahmengestell und einer mit Sediment gefüllten Wanne gefertigt (Abbildung 23). Die Grundfläche des Bodens beträgt 800x800 mm und die maximale Bodenhöhe war auf 200 mm begrenzt. Zur Erfassung der Bodenlastverteilung während des Landeprozesses sind sieben Wägezellen unterhalb und seitlich des Hangs angebracht. Hierdurch soll bei einem etwaigen Kippen oder Rutschen des Modells die Veränderung der Gewichtsverteilung gemessen werden. Zusätzlich wurde die vom Partner Freiberg entwickelte inertiale Messeinheit (IMU) am Versuchsmodell eingesetzt, um die Neigung und Bewegung des Modells während des Absetzens und Befüllens zu überwachen. Während der Experimente wurden die Daten der IMU und der Wägezellen zentral und zeitsynchron erfasst.

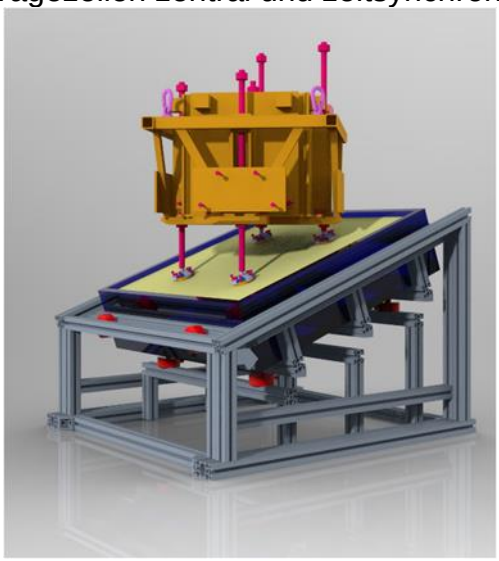


Abbildung 23 Versuchsaufbau Landeversuche

Im Rahmen der Untersuchungen wurden zwei unterschiedliche Bodenkonfigurationen getestet. In den ersten Versuchen wurde das Modell auf unverdichteter Boden abgesetzt. Hierzu wurde das Sediment als lose Schüttung in die Auffangwanne gegeben. Nachfolgend wurden die Versuche unter Verwendung eines verdichteten Bodens wiederholt. Zur Präparation des verdichteten Bodenaufbaus wurde der Wassergehalt des Sediments auf 9,2 % eingestellt (Vgl. Ergebnisse Proctortest). Durch den optimalen Wassergehalt konnte die erreichbare Verdichtung des Untergrundes maximiert werden. Die anschließende Verdichtung des Bodens erfolgte in drei gleichdicken Schichten. Um eine reproduzierbare Festigkeit des Bodens zu gewährleisten, wurde wiederholt in jeder Bodenschicht eine definierte Bodenmaße auf dieselbe Dichte komprimiert.

Durchführung Landeversuche

Die Versuchsdurchführung umfasst das kontrollierte Absetzen des Landemodells mit einer Geschwindigkeit von 2 m/min, um realistische Feldanwendungen zu simulieren. Anschließend werden die Auffangbehälter nacheinander mit Zusatzgewicht beladen, während potenzielle Reaktionen wie Rutschen, weiteres Einsinken oder Kippen des Modells beobachtet und über die Wägezellen gemessen werden. Diese Beobachtungen ermöglichen es, die Standsicherheit und das Verhalten des Modells unter verschiedenen Belastungsbedingungen zu bewerten.
Die vorliegende Studie untersucht vier verschiedene Kombinationen von Modellkonfiguration und Versuchsaufbau im Rahmen von Landetests. Zunächst wurden Landetests durchgeführt, die sich auf das Landeverhalten des Modells mit den zwei Landetellergrößen bei unverdichtetem Boden konzentrieren. Basierend auf den erzielten Ergebnissen wurde anschließend das Landeverhalten des Modells mit den verschiedenen Landetellergrößen auf dem zuvor beschriebenen verdichteten Boden untersucht.

Landung auf unverdichtetem Boden

In den Landetests mit unverdichtetem Boden konnte in den Versuchen mit kleineren Landetellern (Durchmesser 100 mm) keine stabile Positionierung auf dem Untergrund erreicht werden. Sofort nach dem Kontakt des Modells mit dem unverdichteten Boden drangen die Landebeine vollständig in den Untergrund ein. Nach dem Landen konnte zusätzlich eine hangabwärts gerichtete Rutschbewegung des Modells bis zur unteren Kante des Bodengestells beobachtet werden. Dies ist mit der geringen Scherfestigkeit des Bodenaufbaus zu begründen. Während des Absetzens des Modells konnte keine Sedimentaufwirbelung beobachtet oder gemessen werden. Allerdings wurde beim Bergen des Modells eine lokale Mobilisierung von Sedimentpartikeln festgestellt. Da diese Partikelwolken jedoch unterhalb des Modells entstehen, können sie nicht mit den am Modell befindlichen Sensoren erfasst werden. Auch die zusätzlich am äußeren Rahmen der Sedimentwanne befindlichen Sensoren wurden von den lokalen Partikelwolken nicht erfasst. Somit konnten diese geringfügen Trübungen lediglich optisch mit den installierten Kameras beobachtet werden. Die größeren Landeteller mit einem Durchmesser von 200 mm konnten das Einsinken des Modells auf unverdichtetem Boden ebenfalls nicht vollständig verhindern. Bei beiden Experimenten wurde die Stabilisierung der Lage des Versuchsmodells durch das Aufliegen der eigenen Unterkante auf dem Untergrund erreicht.

Landung auf verdichtetem Boden

Zur Optimierung des Landeprozesses während der Versuche wurde für die folgenden Untersuchungen der Bodenaufbau wie beschrieben verdichtet und präpariert. Bei den ersten Landetests mit den kleineren Landetellern drangen die Füße trotz der höheren Bodenfestigkeit vollständig in den Untergrund ein. Eine Mobilisierung von Sedimentpartikeln konnte hierbei lediglich beim Bergen des Modells festgestellt werden. Beim Absetzen des Fräsmodells mit den größeren 200mm Landetellern auf dem verfestigten Boden konnte erstmals ein sicherer Stand erreicht werden. Die Füße drangen lediglich 1-2 mm in den Boden ein. Während der Landung konnten kleinere Partikelwolken direkt an den Füßen beobachtet werden. Diese traten allerdings sehr begrenzt lokal auf und konnten durch die geringe Partikelkonzentration lediglich durch die Kameras und nicht mit den Sensoren erfasst werden.
Zusätzlich konnte mit Hilfe der verbauten IMU keine Veränderung des Lagewinkels und somit kein Kippen festgestellt werden.
Im Anschluss an die erfolgreiche Landung wurde das Versuchsmodell mit zusätzlichem Gewicht beladen, um den voranschreitenden Fräsprozess zu nachzubilden. In Folge der Beladung des Modells konnte ein langsames Rutschen des Modells beobachtet werden. Die hieraus resultierende Verschiebung des Masseschwerpunktes hatte jedoch keine Auswirkung auf die Lagewinkel des Modells. Dies konnte zusätzlich durch die verbaute IMU bestätigt werden.
Zur Veranschaulichung des Rutschens in Folge der Beladung wurden in Abbildung 24 ein Bild vor und nach der Beladung übereinandergelegt. Zur Verdeutlichung umzeichnet die weiße Markierung den Standort des unteren Landefußes vor und die schwarze Markierung nach der Beladung. Das Rutschen wurde durch die Unterkante der Sedimentwanne gestoppt.

Abbildung 24 Abrutschen nach dem Befüllen von Sammelbehältern mit 200-mm-Landeplatten auf verdichtetem Boden

Das für das Einsetzen des Rutschens ausschlaggebende statische Verhältnis von Haftreibungskraft zu Hangabtriebskraft ist jedoch nur von dem Anstellwinkel und dem Haftreibungskoeffizienten abhängig, nicht aber von der Objektmasse. Folglich genügte der Impuls der durch die Beladung des Modells auf dieses ausgeübt wurde um die

hangabwärts wirkende Kraft ausreichend zu erhöhen. Hieraus resultiert, dass mit den vorliegenden 20° Hangneigung die maximal mögliche Hangneigung des Systems nahezu erreicht wurde. In weiterführenden Untersuchungen gilt es somit Adaptionen an den Landetellern zu entwickeln und zu untersuchen, welche die Haftreibung erhöhen.

Frästests

Im Forschungsprojekt soll ein entwickeltes Trübeschutzkonzept durch Versuchsreihen an einem skalierten Funktionsmodell geprüft und validiert werden. Dabei werden der Abbauprozess und der Fräskreislauf, einschließlich des Eingriffs der Fräsräder, die Materialförderung, die Separation und die Rückführung in den Frässpalt, nachgebildet. Eine zentrale Messreihe befasst sich mit Strömungs- und Druckänderungen in und außerhalb des Trübekastens, abhängig von der Dichtheit der Abschirmung und der Position der Volumenstromrückführung.
Der grundlegende Versuchsaufbau ist hierzu in Abbildung 25 dargestellt. Die Sedimentaufwirbelung und Trübewolkenbildung erfolgen in dem mit Wasser gefüllten Versuchstank des LMT (Vgl. AP 6). Die Meeresbodentopografie wird vereinfacht nachgestellt, und ein Bodenmaterial mit skalierten Korngrößen sowie ähnlichen Schwebeeigenschaften wird verwendet.
Die Fräsräder tragen Material mit definierter Auflast ab und wirbeln die Sedimente durch Rotation auf. Für das gezielte Absenken der Fräsräder wird eine auflastgesteuerte Winde verwendet. Das gelöste Bodenmaterial wird über eine Pumpe in den Förderschlauch transportiert, wo es im Originalmodell dann durch Separatoren getrennt wird.

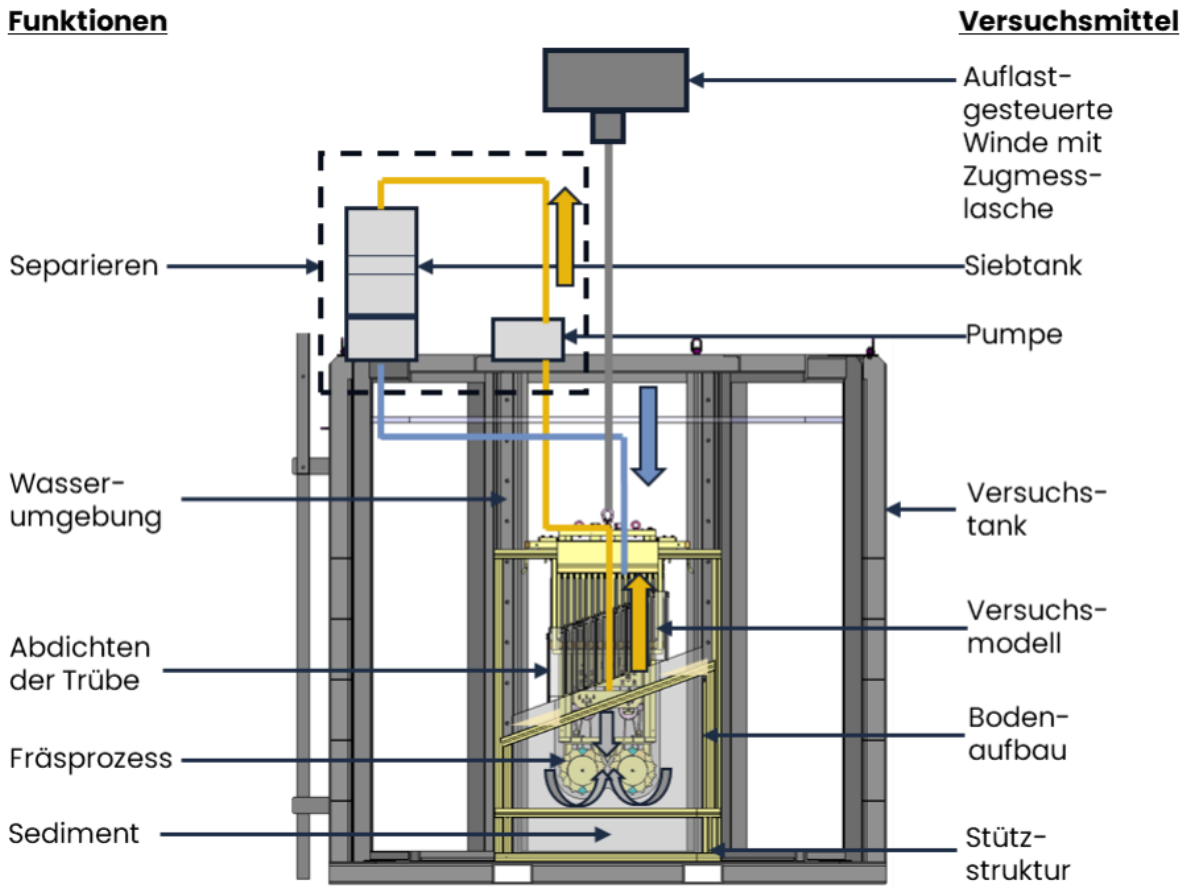


Abbildung 25 Versuchsaufbau Trübungsversuche, Quelle: BMA

Versuchsmodell

Zur besseren Darstellung der Prozesse durch die Anwendung eines kleinen Skalierungsfaktors wurde für die Modellversuche lediglich ein Modell des Frässtrangs verwendet (Abbildung 26). Basierend auf den Abmessungen des Versuchstanks konnte so ein Skalierungsmaßstab von 1:5 gewählt werden. Das Fräsenmodell umfasst einen Grundrahmen, der die Fräsräder, Antriebseinheiten, Linearführung, Verrohrung und die Elektronikversorgung integriert. Die Fräsräder sind ebenfalls im Maßstab 1:5 zum Originalmodell skaliert und werden mit einer Drehzahl von 150 U/min betrieben. Hierdurch kann die gleiche Umfangsgeschwindigkeit der Strömung wie im Original erreicht werden. Ein mehrstufiger Antrieb mit einem Übersetzungsverhältnis von 18 überträgt das Drehmoment von einem Elektromotor auf die Fräsräder, während die Linearführung das Absenken der Fräse ermöglicht.
Zusätzlich umfasst das Versuchsmodell eine Vorrichtung zur Abschirmung von Trübungswolken, den Trübekasten (Abbildung 27). Im Rahmen des Funktionsmodells besteht der Trübekasten aus Kunststofflamellen, welche zur Visualisierung der Strömungen und Einsehbarkeit des Fräsbereichs aus transparentem Plexiglas gefertigt sind. Die Geometrie der Lamellen wird vereinfacht, sodass diese auf einen definierten Einsatz mit 20° Hangneigung abgestimmt sind. Bei dem späteren Prototypen in Originalgröße wird der Trübekasten sich an unterschiedliche Untergründe individuell anpassen können. Zur Messung der Sedimentation wird ein Trübesensor in den Trübekasten integriert. Die obere Seite des Trübekastens besteht ebenfalls aus Plexiglas, ergänzt durch eine Bürstendichtung welche eine vertikale Ausbreitung der Trübewolken unterbinden soll.

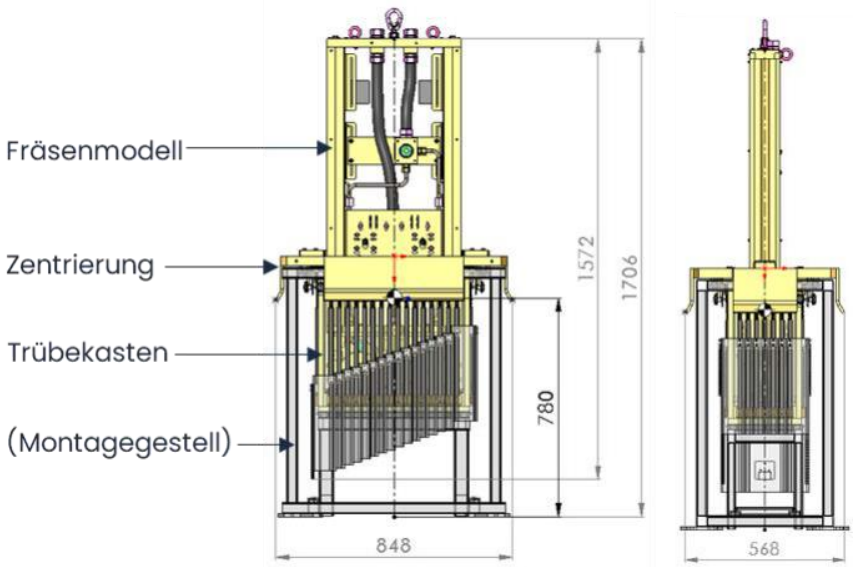


Abbildung 26 CAD-Modell des Fräsenmodells, Quelle: BMA

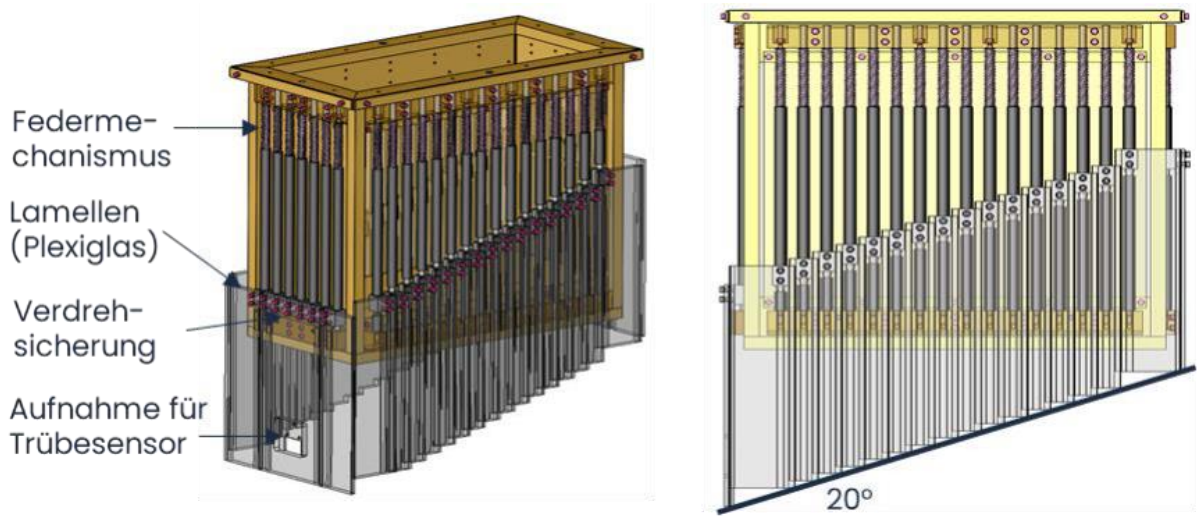


Abbildung 27 CAD-Darstellung des Trübekastens, Quelle: BMA

Messtechnik

Der folgende Abschnitt beschreibt den Messaufbau zur Dokumentation und Überwachung der Trübeentwicklung und strömungsmechanischen Effekte.
Zur Detektion der Trübungswolken und Überprüfung der Dichtigkeit innerhalb und außerhalb des Trübekastens kommen Sensoren zum Einsatz, die im Rahmen des Forschungsprojekts vom LMT entwickelt wurden (Vgl. AP 6). Die Umfangsgeschwindigkeit der Fräsräder wird mithilfe von Drehzahlsensoren im Antriebsstrang erfasst. Die strömungsmechanischen Eigenschaften im Fräskreislauf werden durch Sensoren für Volumenstrom, Druck und Strömungsgeschwindigkeit gemessen. Für die Steuerung der Auflast an der Winde ist eine wasserdichte Zugmesslasche integriert.

Versuchsdurchführung

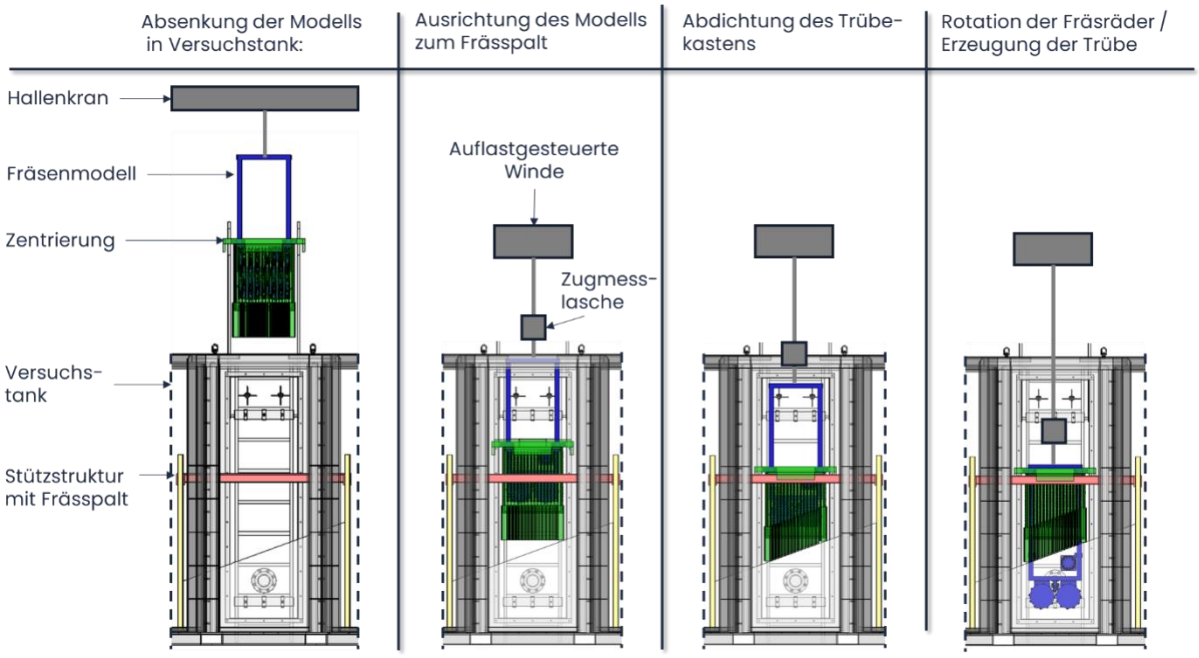


Abbildung 28 Schematische Darstellung des Ablaufs der Fräsversuche

In den Testreihen wird der Einfluss verschiedener Parameter auf das Trübeverhalten untersucht. In der Standardkonfiguration des Versuchsmodells wird das Fräsen mit Trübekasten unter Rückführung gefilterten Wassers in den Frässpalt simuliert. Dabei werden sowohl die Abdichtung des Trübekastens als auch die strömungsmechanischen Eigenschaften des Fräskreislaufs geprüft.
Durch eine Umleitung der Rückführung konnte zudem getestet werden, ob ein Unterdruck im Trübekasten einen Einsaugeffekt erzeugt. Hierdurch können mobilisierte Sedimentpartikel in den abgeschirmten Abbaubereich geleitet werden.
Ein Vergleichstest ohne Trübekasten validiert mithilfe der Trübesensoren die Wirksamkeit des Abschirmkonzepts. In weiteren Tests wird beim Fräsen der Rückstrom des gefilterten Wassers variiert, um den Einfluss des Einlasspunktes auf die Trübung innerhalb und außerhalb des Trübekastens zu messen.
Der Ablauf der experimentellen Untersuchungen ist in Abbildung 28 schematisch dargestellt. Zuerst wird das Modell mit dem Hallenkran über dem Versuchstank positioniert. Anschließend wird das Funktionsmodell an eine auflastgesteuerte Winde übergeben. Durch eine Zugmesslasche im Laststrang kann somit die Last überwacht werden. Zur Vermeidung eines Stillstandes der Fräsräder wird somit die Absetzgeschwindigkeit individuell reduziert, sobald die gemessen Auflast abnimmt. Nach dem exakten Positionieren des Versuchsmodells über dem entsprechenden Aufbau, wird dieses abgelassen, sodass der Trübekasten den Abbaubereich formschlüssig abdichtet. Zuletzt werden die Motoren zum Antrieb der Fräsräder sowie die Absaugung und Rückführung gestartet und die Winde lässt den Frässtrang auflastgesteuert ab.

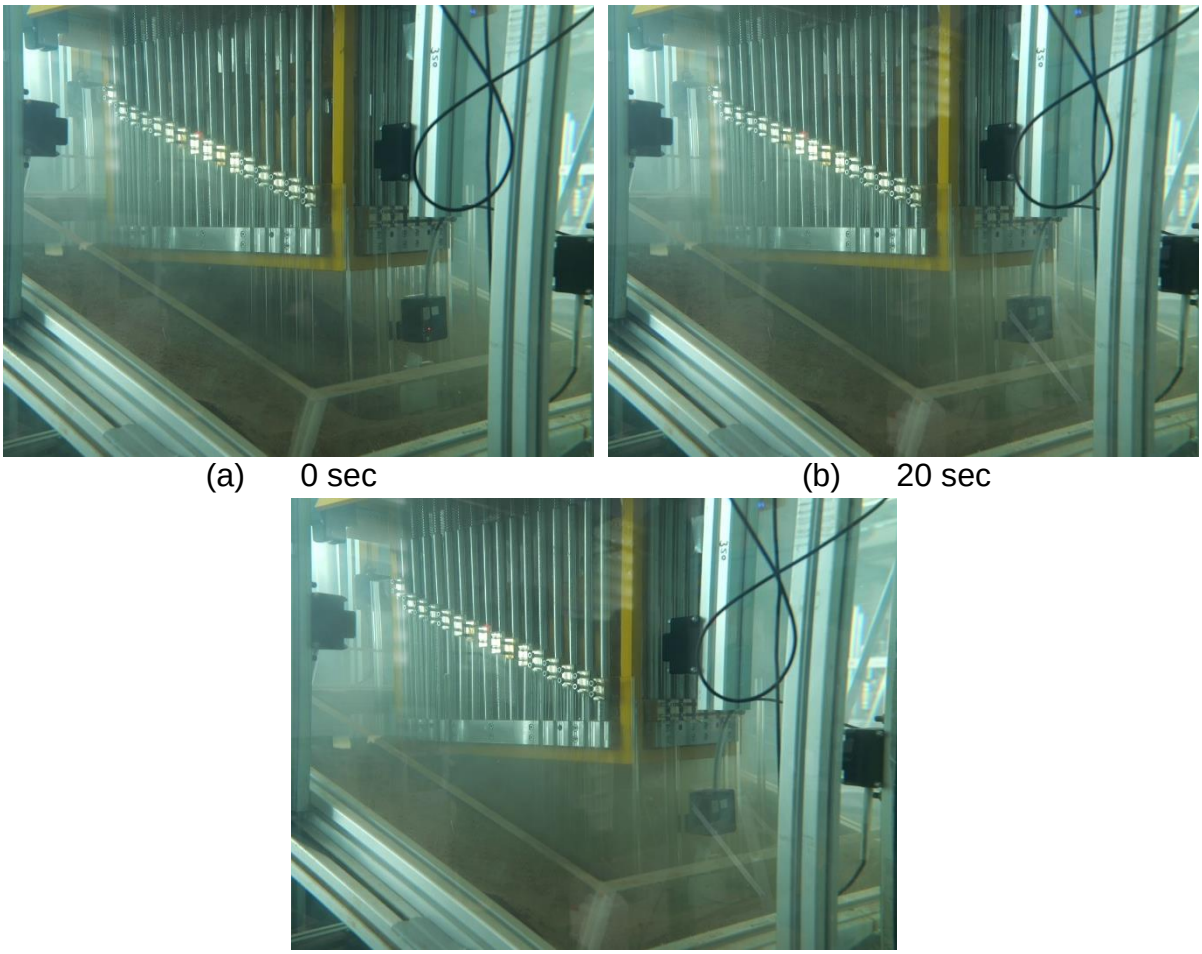
Ergebnisse
Zur Überprüfung der Funktionalität des Trübeschutzkonzeptes sollten Funktionstests mit dem Gesamtsystem durchgeführt werden. Bei der iterativen Inbetriebnahme des Funktionsmodells stellte sich jedoch heraus, dass das vereinfachte Design der Fräsräder bei dem aufgebrachten Drehmoment nicht zum vollständigen Abtrage des verdichteten Bodenaufbaus genügt. Auch die Verwendung einer losen Schüttung konnte dieses Problem nicht vollständig beheben. In durchgeführten Funktionstests konnte lediglich die wenige Zentimeter der oberste Bodenschicht bis zum Stillstand der Fräsräder aufgewirbelt bzw. abgetragen werden.
In einer modifizierten Version des Funktionsmodells sollte das aufgebrachte Drehmoment durch die Integration eines weiteren elektrischen Antriebs erhöht werden. Jedoch konnte eine vollständige Umsetzung dieser Änderung aufgrund von langen Lieferzeiten der Motoren nicht im zeitlichen Rahmen des Forschungsprojektes erfolgen.

Nachfolgend wird die Funktionalität des Trübeschutzkastens anhand von drei Modellkonfigurationen gezeigt.

a) Funktionstest mit Rückführung und installiertem Trübeschutzkasten
b) Funktionstest ohne Rückführung und installiertem Trübeschutzkasten
c) Funktionstes ohne Rückführung und ohne Trübeschutzkasten

Im Rahmen des ersten Funktionstests wurde der Abbauprozess mit Rückführung untersucht. Vor dem Starten der Fräsräder wurde das hangaufwärts liegende Fräsrad ca. 5 cm oberhalb des Bodens positioniert. Bereits beim Anlaufen der Fräsräder wurde Sediment von der Oberfläche des Versuchsbodens aufgewirbelt. Bei diesem Prozess konnte die Funktionsweise des Trübeschutzkonzeptes gut beobachtet werden. Hierzu ist in Abbildung 29 der zeitliche Verlauf der Trübungsentwicklung im Leerlauf oberhalb

des Bodens dargestellt. Während die Trübung innerhalb des Trübekastens mit voranschreitender Zeit zunimmt, konnte die Ausbreitung von Partikeln in die Umwelt effektiv unterbunden werden.



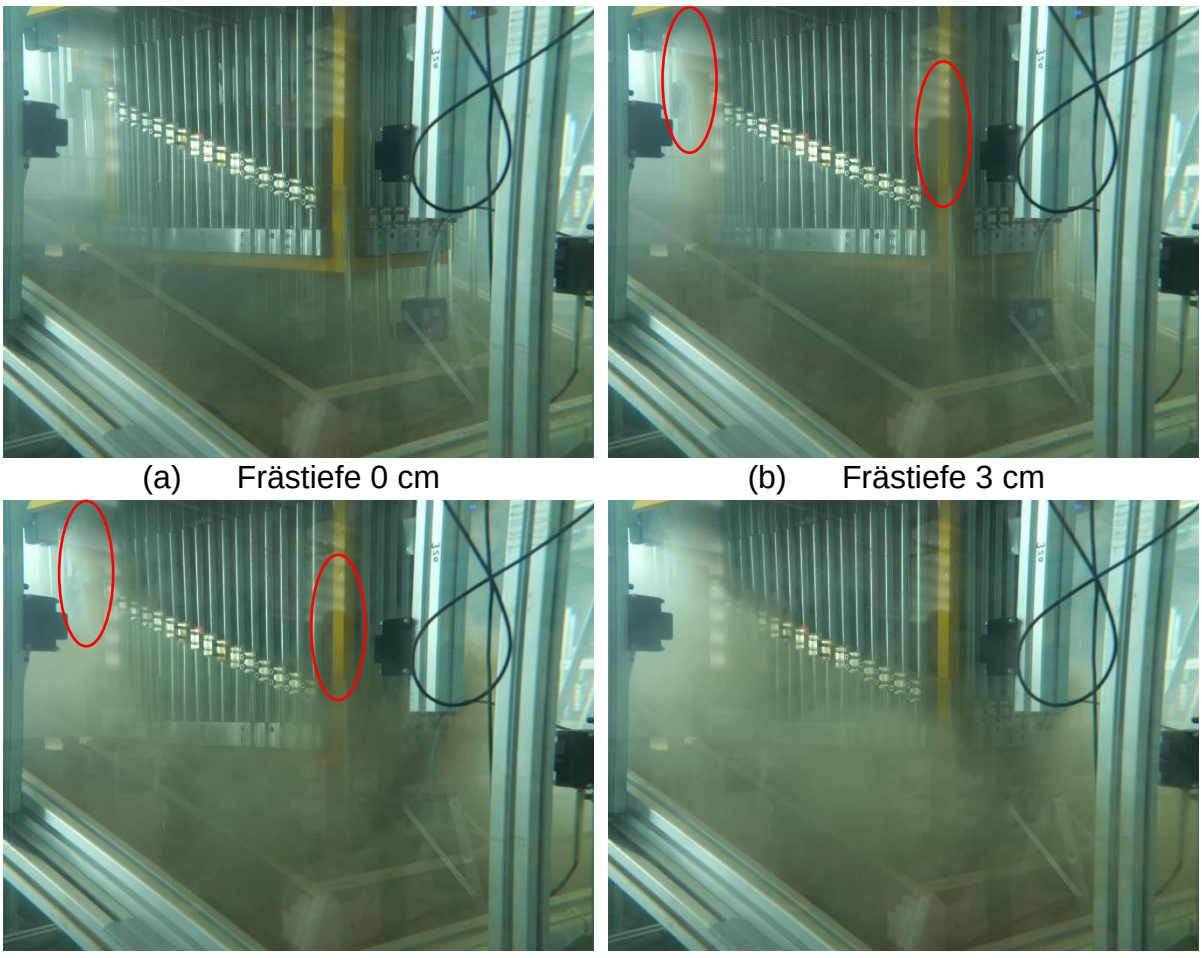
(a) 0 sec (b) 20 sec

(c) 80 sec

Abbildung 29 Trübungsverlauf Funktionstest mit Trübekasten und Rückführung im Leerlauf 5 cm oberhalb des Bodens

Nach dem anfänglichen Anlaufen der Fräsräder wurde die Fräse mit einer limitierten Absetzgeschwindigkeit über eine auflastgesteuerte Winde abgelassen. Die Auflaststeuerung der Winde sollte hierbei ein Festfahren der Räder unterbinden, indem die Absenkgeschwindigkeit bei sinkender Hakenlast reduziert wird. Die Funktionalität der Auflaststeuerung selbst konnte in diversen Versuchsdurchläufen nachgewiesen werden. Auf Grund der vereinfachten Fräsradgeometrie und einem zu niedrigen Drehmoment des elektrischen Antriebes, konnte das Ausfallen des oberen Fräsrades jedoch nicht verhindert werden. Aus diesem Grund ist in Abbildung 30 lediglich die Trübungsentwicklung für eine Frästiefe von bis zu 6 cm gezeigt. Mit voranschreitender Arbeitstiefe konnte die Dichtigkeit des Trübekastens an der Kontaktfläche zum Untergrund bestätigt werden. An der Oberkannte des Trübungsschutzes konnte jedoch eine Undichtigkeit festgestellt werden. Insbesondere in den in Abbildung 30 (b) und (c) rot markierten Eckbereichen des Modells trat eine relevante Menge an Sedimentpartikeln aus dem abgegrenzten Abbaubereich aus. Eine modell- und skalierungsbedingte Undichtigkeit in den Ecken der lamellenartigen Kunststoffumrandung konnte hierfür als Grund identifiziert werden. In Abbildung 30 (d) ist die Entwicklung der Trübung 20 Sekunden nach dem Stillstand des oberen Fräsrades gezeigt. Dies verdeutlicht zum einen die Geschwindigkeit, in welcher die Umwelt durch mobilisierte Sediementpartikel beeinträchtigt wird. Zum anderen wird ersichtlich, dass der Hauptteil der austretenden

Partikel kurz nach dem Aufwirbeln wieder zu Boden sinkt. Wie bereits die zuvor präsentierten Voruntersuchungen gezeigt haben, verbleiben lediglich die feinsten Korngrößen für längere Zeit in der Wassersäule. Diese Schwachstelle besteht bei dem geplanten Prototypen im Realmaßstab nicht. Zur Abdichtung der Undichtigkeit im Modellmaßstab wurde eine Lösung auf Basis von Bürstendichtungen erarbeitet, welche jedoch nicht mehr im zeitlichen Rahmen des Projektes überprüft werden konnte.



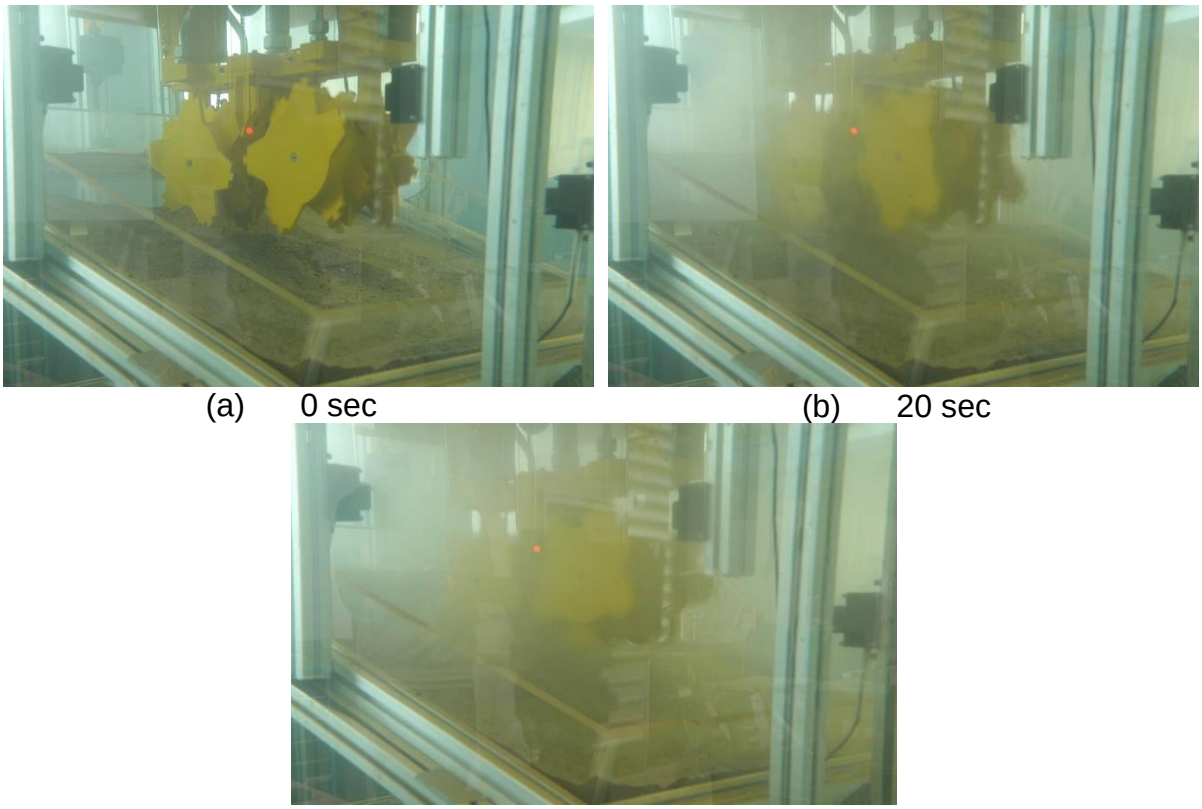
(a) Frästiefe 0 cm (b) Frästiefe 3 cm

(c) Frästiefe 6 cm (d) 20 Sekunden nach Abbruch

Abbildung 30 Trübungsverlauf Funktionstest mit Trübekasten und Rückführung für eine Frästiefe von bis zu 10 cm

In der Modellkonfiguration b) wurde das Versuchsmodell ohne Rückführung der abgesaugten Schlämme untersucht. Hierdurch sollte die Erzeugung eines Unterdrucks im Abbaubereichs als zusätzliche Möglichkeit zur Vermeidung der Trübungsausbreitung untersucht werden. In den durchgeführten Untersuchungen konnten jedoch keine relevanten Abweichungen bzw. Verbesserungen zu den Ergebnissen der Funktionsuntersuchungen mit Rückführung beobachtet werden. Aus diesem Grund wird nicht weiter auf diese Konfiguration eingegangen.

In einer zusätzlichen Modellkonfiguration wurden die Auswirkungen des Fräsvorganges in Abwesenheit des Trübekastens untersucht. Dies dient zur Veranschaulichung des erzielten Fortschrittes, welche durch das präsentierte Trübeschutzkonzeptes erzielt wurde. Hierzu ist in Abbildung 31 der Trübungsverlauf im Leerlauf, 5 cm oberhalb des Bodens dargestellt. Der direkte Vergleich mit den Ergebnissen mit Trübekasten in Abbildung 29 zeigt eine deutliche Zunahme der aufgewirbelten Sedimentpartikel.

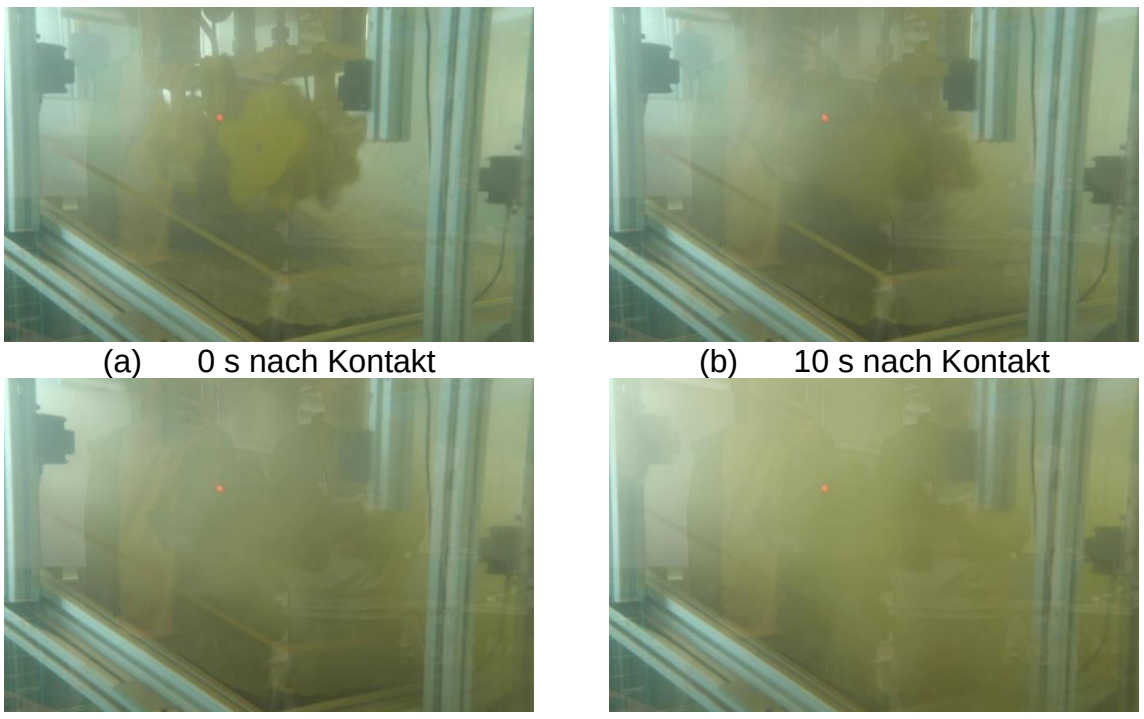


(a) 0 sec (b) 20 sec

(c) 80 sec

Abbildung 31 Trübungsverlauf Funktionstest ohne Trübekasten und Rückführung im Leerlauf 5 cm oberhalb des Bodens

Durch den zeitlichen Verlauf der Trübungsausbreitung im Fräsversuch in Abbildung 32 wird dies zusätzlich unterstrichen. Hier ist bereits nach 20 Sekunden Versuchslaufzeit der gesamte Versuchsbereich durch eine sich ausbreitende Sedimentwolke getrübt, sodass keine weitere optische Beobachtung des Versuchs möglich war.



(a) 0 s nach Kontakt (b) 10 s nach Kontakt

(c) 20 s nach Kontakt (d) 30 s nach Kontakt

Abbildung 32 Trübungsverlauf Funktionstest ohne Trübekasten und Rückführung für eine Fräszeit von bis zu 30 s

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen zum Absetzvorgang und zur Evaluierung des Konzepts zur Vermeidung von Trübewolken wurde ein Versuchstank geplant und umgesetzt (Vgl 2.1 AP 6). Dieser wurde für die verschiedenen Modellversuche mit zwei Kameras ausgestattet, welche die Grundlage für die visuelle Auswertung der durchgeführten Untersuchungen bieten (Vgl 2.1 AP 11).
Zur Untersuchung der Entstehung und Ausbreitung von Trübewolken während des Absetz- und Abbauprozesses wurde ein Trübungsmesssystem entwickelt und iterativ optimiert (Vgl 2.1 AP 6). Zur Kalibrierung des entwickelten Trübungsmesssystems wurde ein AquaScat S als Referenzsensor verwendet (Vgl 2.1 AP 6). Dieser diente außerdem als Referenzsensor im Rahmen der Trübungsversuche (Vgl 2.1 AP 11).
Zur Aufnahme der gemessenen Daten wurde ein Yokogawa DL350-HG verwendet. Durch das direkte visuelle Feedback können die Versuchsergebnisse in Echtzeit beurteilt werden, was besonders während der Evaluierung des entwickelten Trübungsmesssystems von Vorteil war (Vgl 2.1 AP 6).

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Zur Untersuchung der Entstehung und Ausbreitung von Trübewolken während des Absetz- und Abbauvorgangs wurde im Rahmen des Projektes ein Trübungsmesssystem entwickelt. Das System wurde so entwickelt, dass Anpassungen schnell umsetzbar sind. Somit kann das System bei Bedarf iterativ verbessert und stets auf die Anforderungen der jeweiligen Anwendung und die vorhandene Infrastruktur zugeschnitten werden. Zudem werden die entwickelten Trübungssensoren so ausgelegt, dass sie den Umgebungsbedingungen für die Anwendung in der Tiefsee standhalten. Auf diese Weise wurde ein Trübungsmesssystem entwickelt, das sich durch hohe Flexibilität auszeichnet und sich somit optimal in übergeordnete Systeme integrieren lässt.
Neben der Entwicklung des Trübungsmesssystems wurde auch eine Evaluierung der Prototypen durchgeführt, die zum einen essenziell ist, um deren Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit zu beurteilen. Zum anderen werden hierbei potenzielle Optimierungspotenziale identifiziert, die in der folgenden Iteration des Entwicklungszyklus adressiert werden können. Hierbei wurde neben der Funktionalität des Gesamtsystems auch die Signalstabilität und der Messfehler geprüft. Zudem wurden die Trübungssensoren kalibriert, um die Messergebnisse vergleichbar zu machen.

Vorbereitend für experimentelle Untersuchungen wurden unterschiedliche Sedimentproben hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und ihres Sedimentationsverhaltens untersucht. Um ein geeignetes Ersatzsediment für Laboruntersuchungen zu identifizieren, wurden diese Charakteristiken anschließend mit Sedimentproben aus der Tiefsee verglichen.
Zur qualitativen und quantitativen Detektion von Trübewolken wurde anschließend das zuvor beschriebene Trübungsmesssystem in einem Versuchsaufbau integriert und in Form von Trübungsversuchen getestet. Hierbei wurde die versucht, die räumliche Ausbreitung von Trübewolken zu messen.
Die Ausbreitung von Trübungswolken soll im laufenden Abbauprozess durch eine Abschirmung des Abbaubereichs von der Umwelt mit Hilfe eines adaptierbaren Trübekastens verhindert werden. Zum Nachweis der Funktionalität dieses Konzeptes, wurde ein Modell des Frässtrangs im 1:5 Maßstab gefertigt und im Versuchstank des LMT getestet. Hierbei wurde neben der Trübungsausbreitung auch die Funktionstüchtigkeit

des Modells und die Eignung des Trübekastens zur Vermeidung von Trübewolken untersucht.
Auf Grund der aktuellen Ergebnisse von bathymetrischen Untersuchungen des Zielgebietes durch das BGR wurden zusätzliche Untersuchungen hinsichtlich des Landeverhaltens und der Standsicherheit des Gesamtsystems notwendig. Hierbei wurde ein Modell des Abbausystems beim Absetzen sowie ein simulierter Beladevorgang betrachtet.

2.4 Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Das entwickelte Trübungsmesssystem wird künftig auch für andere wissenschaftliche Fragestellungen zum Einsatz kommen und als Basis für weitere maßgeschneiderte Prototypen dienen und gleichzeitig stetig iterativ optimiert werden. Im September 2024 wurde auf Grundlage des entwickelten Systems ein Prototyp bereitgestellt, mit dem in Kooperation mit dem dänischen *National Institute of Aquatic Resources (DTU Aqua)* Feldversuche durchgeführt wurden, bei denen die Trübungsentwicklung infolge von Schleppnetzfischerei untersucht wurden. Ähnliche Untersuchungen sollen im Februar 2025 von der *Arctic University of Norway (UiT)* durchgeführt werden. Auch hier wird ein Prototyp des entwickelten Trübungsmesssystems zum Einsatz kommen. Zudem bilden die Ergebnisse aus der Sensorentwicklung einen wesentlichen Bestandteil der Dissertation von Christoph Strehse, die im Dezember 2024 eingereicht wird. Des Weiteren wurde ein Trübungsmesssystem für das Monitoring von Aquakulturanlagen entwickelt und der Ege University Izmir, Türkei bereitgestellt. Die erhaltenen Ergebnisse wurden im Oktober 2024 im *North American Journal for Aquaculture* veröffentlicht (https://doi.org/10.1002/naaq.10351).

Auch der Versuchstank soll in Zukunft als Infrastruktur für experimentelle Untersuchungen genutzt werden und soll auch in einem Folgeprojekt zur Untersuchung von Standfestigkeit und Trübungsentwicklung Einsatz finden. Das betrifft ebenfalls die vorhandenen Versuchsmodelle, die für künftige Anwendungen ggf. Angepasst werden.

Darüber hinaus wurden im Rahmen des Projektes 3 Masterarbeiten abgeschlossen. Das stellt die Attraktivität dieses Forschungsfeldes unter Beweis, das am LMT auch in den nächsten 4 Jahren mindestens 3 Masterarbeiten und eine Promotion ermöglicht. Zusätzlich sollen künftige Forschungsergebnisse aus diesem Fachbereich auf einschlägigen nationalen und
internationalen Konferenzen vorgestellt und
innovative Erkenntnisse in relevanten internationalen Fachzeitschriften
Veröffentlicht werden.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse im Bereich des Tiefseebergbaus sowie der Sensorentwicklung, Prozesssteuerung und experimentellen Forschung bilden eine solide Grundlage für die Ausbildung hochqualifizierter Ingenieure im wachsenden maritimen Technologiesektor der Region. Diese Expertise soll ab dem Jahr 2025 in den neu etablierten internationalen Studiengang *Sustainable Maritime Engineering* einfließen,

der Studierende aus aller Welt anzieht und sie auf nachhaltige und innovative Technologien in der Meerestechnik spezialisiert. Durch die enge Verknüpfung von Forschung und maritimer Industrie wird sichergestellt, dass die Studierenden nicht nur fundiertes theoretisches Wissen erwerben, sondern auch wertvolle praktische Erfahrungen sammeln, die sie zu gefragten Fachkräften im globalen maritimen Sektor machen. Der Aufbau dieses Studiengangs trägt somit wesentlich zur internationalen Vernetzung und zur langfristigen Sicherung des Fachkräftebedarfs in der Meerestechnik bei.
Darüber hinaus wird der Studiengang durch die Integration von Projektinhalten in die Lehre sowie durch Kooperationen mit internationalen Partneruniversitäten weiter gestärkt. Dies fördert einen intensiven Wissenstransfer und ermöglicht den Aufbau eines Expertennetzwerks, das den Studierenden Zugang zu den neuesten Entwicklungen und Technologien im Bereich der nachhaltigen Meerestechnik bietet. Auf diese Weise wird nicht nur die Attraktivität des Studiengangs erhöht, sondern auch die Verwertung der im Projekt gewonnenen Ergebnisse nachhaltig unterstützt, indem diese direkt in die Ausbildung der nächsten Generation von Fachkräften im Bereich Meerestechnik einfließen.

Die erzielten Ergebnisse des aktuellen Projekts bilden außerdem eine solide Basis für ein Folgeprojekt, das die regionale Forschungsinfrastruktur am Standort Rostock weiter ausbaut. Im Rahmen dieses Folgeprojekts wird die Zusammenarbeit mit Wirtschaftsunternehmen und weiteren Projektpartnern intensiviert, um praxisrelevante Fragestellungen zu adressieren und gemeinsam innovative Lösungen zu entwickeln und zu testen. Durch die enge Verzahnung von Forschung und Industrie wird nicht nur der Wissenstransfer gefördert, sondern auch die Wettbewerbsfähigkeit der maritimen Wirtschaft in der Region gestärkt.
Von besonderem Vorteil für die Umsetzung des Folgeprojekts sind die Versuchseinrichtungen der Universität Rostock sowie das *Digital Ocean Lab (DOL),* die erheblich von den geplanten, groß angelegten Experimenten profitieren. Die realitätsnahe Nachbildung von Unterwasserabbauprozessen sowie präzise Positionierungs- und Lokalisierungstechniken erweitern die Expertise der beteiligten Forschungseinrichtungen. Damit wird die Position Rostocks als leistungsstarker Forschungs- und Entwicklungsstandort im Bereich der Meerestechnik weiter gefestigt und die Attraktivität als Test- und Erprobungsfeld für zukünftige maritime Innovationen erhöht.

2.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

- Forschungstätigkeiten eines norwegischen Konsortiums im Rahmen ihres EMINENT Projekts zur Exploration von Massivsulfidvorkommen (seit 2023)

2.6 Veröffentlichungen

C. Strehse, H. Langosch, H. Betz, S. Kosleck, “OpenAquaSense - An Open-Source Sensor Prototyping Platform for Tailor-Made Marine Sensing,” *DEMaT 2022*, Rostock, Germany, 2022, pp. 117-130, isbn: 978-3-946694-06-9

C. Strehse, H. Langosch, O. J. Lenz, S. Schacht, C. Schütt and S. Kosleck, "Prototyping and Evaluation of an Open-Source Based Tailor-Made Turbidity Monitoring System for Deep-Sea Mining Application," *OCEANS 2023 - Limerick*, Limerick, Ireland, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/OCEANSLimerick52467.2023.10244577

A. Altmann, C. Strehse, M. Münsch, S. Kosleck and A. Wierschem, "Development of a differential pressure sensor for intelligent control of deep-sea mining applications," OCEANS 2023 - Limerick, Limerick, Ireland, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/OCEANSLimerick52467.2023.10244515

S. Schacht, C. Schütt, C. Strehse and S. Kosleck, "Minimally Invasive Vertical Deep-Sea Mining," *OCEANS 2023 - MTS/IEEE U.S. Gulf Coast*, Biloxi, MS, USA, 2023, pp. 1-7, doi: 10.23919/OCEANS52994.2023.10337374

C. Otto, C. Schütt, C. Strehse, S. Schacht and S. Kosleck, "Experimental Approach on Structural Stability and Turbidity Propagation around Landing Units in Deep-Sea Mining," *OCEANS 2024 - Singapore*, Singapore, Singapore, 2024, pp. 1-7, doi: 10.1109/OCEANS51537.2024.10682320