

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil II: Eingehende Darstellung

Vorhaben

M³: Zukunftsweisendes Sonar-Monitoring von klimaschädlichem Methan an Gasemissionen des Meeresbodens
Ein Beitrag zum Verständnis globalen Wandels, Phase 2

Gefördert vom

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Förderkennzeichen: 03F0854A

Projektleiter:

Prof. Dr. Gerhard Bohrmann

Universität Bremen – MARUM

Klagenfurter Str. 2-4

28359 Bremen

Projektzeitraum:

01.05.2020 – 31.12.2023

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1.	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen.....	3
1.1	Sicherstellung der langfristigen Datenerhebung: Wartungs- /Reparaturarbeiten ..	4
1.2	Analyse der langfristigen Trends und Schwankungen der Tiefseegasemissionen	6
1.3	Versuchsaufbau und Kalibrierungsexperimente	7
2.	Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	10
3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	11
4.	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses.....	11
5.	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	13
6.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	13

1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen

Ziel dieses Projekts war die Entwicklung von Sensoren zur Überwachung von Tiefsee-Methanemissionen über längere Zeiträume zum Verständnis der natürlichen Freisetzung von Kohlenwasserstoffen, die aus dem Meeresboden in die Wassersäule austreten. Zur Erreichung dieses Ziel, war geplant, einen Satz von vier Instrumenten zur Überwachung verschiedener Aspekte der Methanaustrittsaktivität iterativ zu entwickeln und zu bauen:

- Ein "Übersichtssonar" zur Erfassung und Lokalisierung aller aktiven Gasemissionen, die auf dem südlichen Gipfel des Hydrate Ridge auftreten.
- Ein "Quantifizierungssonar" zur Dokumentation von Veränderungen der Morphologie des Meeresbodens und, wenn möglich, zur Quantifizierung der Methanflüsse, die aus einem Gasblasenstrom freigesetzt werden.
- Ein Kamerasystem, das Bilder der Gasblasenfreisetzung und des umgebenden Meeresbodens liefert, um die Beobachtungen des Sonars am Boden zu bestätigen. Die Kamera zielte auch darauf ab, Eigenschaften der Gasfreisetzung, wie Blasenauftiegsgeschwindigkeiten und Größenverteilungen, zu messen.
- Eine CTD-DO-Sonde zur Messung des Salzgehalts, der Temperatur, der Tiefe und des Gehalts an gelöstem Sauerstoff im Wasser in der Nähe des Meeresbodens.

Dank des Einsatzes des kabelgebundenen Tiefsee-Observatoriums der OOI könnten diese vier Instrumente vom Land aus, gesteuert werden und nahezu in Echtzeit Daten produzieren. Die periodische Überwachung würde es uns ermöglichen, Datenzeitreihen über lange Zeiträume zu erstellen, um dies zu erreichen:

- festzustellen, ob und wie langfristige Veränderungen (z.B. langsame Erwärmung des Bodenwassers) die Freisetzung von Gas am Meeresboden beeinflussen würden,
- festzustellen, was die kurzfristige Variabilität der Gasemissionen kontrolliert (z.B. Gezeiten, Seismizität usw.),
- Prozesse von kurzer Dauer dokumentieren, die bei früheren Schiffsexpeditionen wegen ihrer Kurzlebigkeit nie beobachtet werden konnten, wie zu Beispiel das Phänomen des Gashydrat-Aufschwimmens (Rafting).

Nach der ersten Phase des Projekts, die sich auf die Entwicklung der Instrumente konzentrierte, zielte die zweite Phase darauf ab, die entwickelten Instrumente zur mehrjährigen Überwachung der Methanfreisetzung und der Veränderungen des Meeresbodens am südlichen Hydratrücken einzusetzen (Abbildung 1). Zu diesem Zweck musste sichergestellt werden, dass die Instrumente in einem funktionsfähigen Zustand gehalten wurden. Dies wurde einmal im Jahr während der OOI-Sommerwartungsexpeditionen durchgeführt. Bei diesen Expeditionen werden alle Instrumente, die auf dem Observatorium

eingesetzt werden, visuell überprüft und bei Bedarf geborgen. Alle nicht funktionsfähigen Instrumente werden geborgen bzw. durch funktionierende Instrumente ersetzt. Zu Beginn der zweiten Phase wurde eine zweite CTD-Sonde angeschafft, um die CTD-Sonde aus der Phase 1 zu ersetzen, die eine Neukalibrierung benötigte.

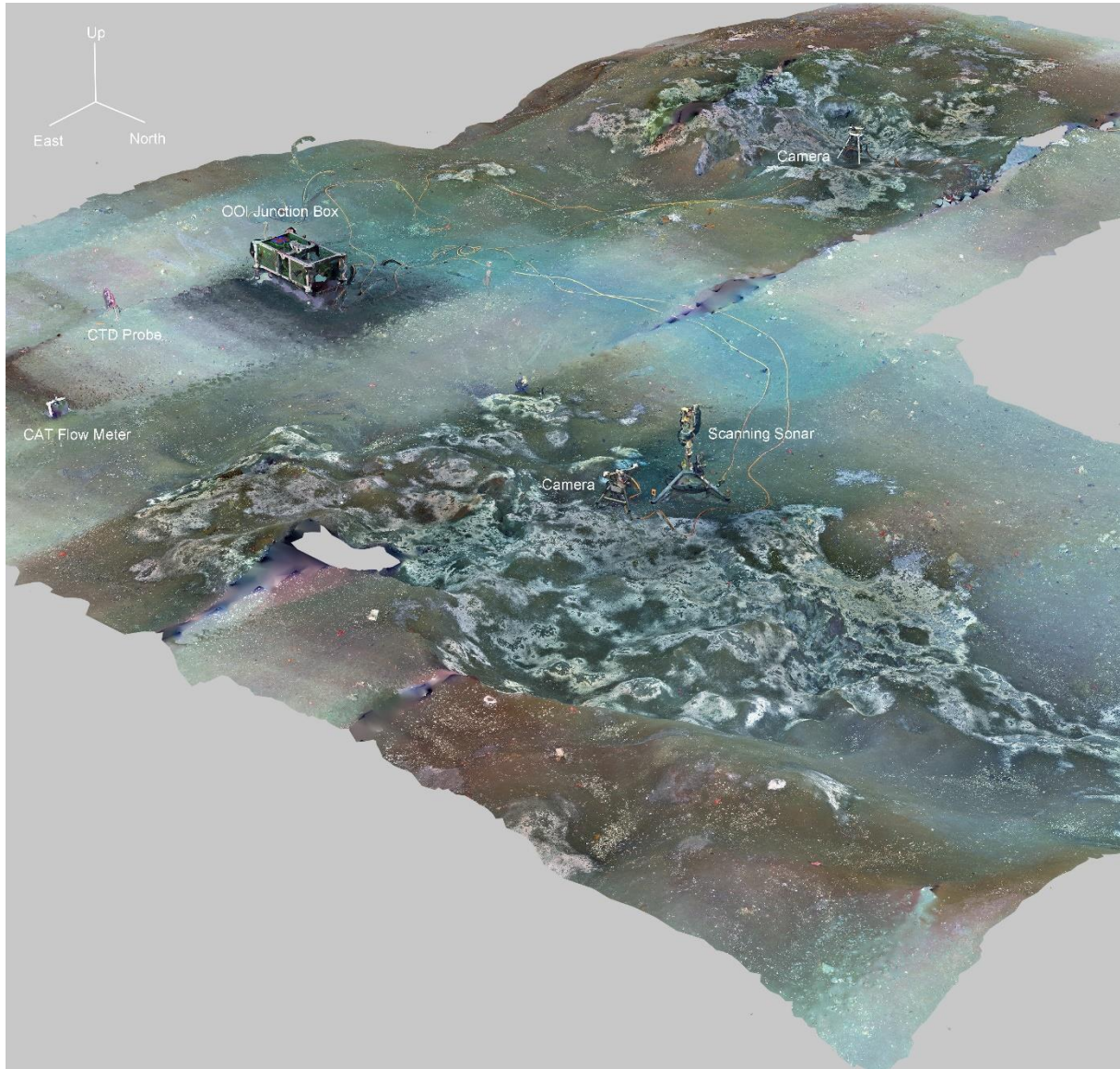


Abbildung 1: 3D-Ansicht des Arbeitsgebietes mit Teilen des OOI-Observatoriums am Südlichen Hydratrücken. Drei der vier MARUM-Instrumente, die am Meeresboden installiert und mit dem OOI-Anschluss-System verbunden wurden, sind sichtbar (Scanning Sonar, Kamera und CTD-Sonde). (3D-Karte: Yann Marcon/MARUM, Originalfotos: OOI-UW / ROV ROPOS / Visions'22).

1.1 Sicherstellung der langfristigen Datenerhebung: Wartungs- /Reparaturarbeiten

Aufgrund der Corona-bedingten Reisebeschränkungen konnten wir an den Expeditionen 2020 und 2021 nicht persönlich teilnehmen. Unsere Projektpartner aus dem OOI-Team boten uns jedoch an, unsere Arbeiten auf See für uns durchzuführen. Während der Expeditionen konnten

wir aus der Ferne in Deutschland die ROV-Tauchgänge in Echtzeit per Live-Videostreaming verfolgen und die Arbeiten überwachen. Bei Bedarf konnten wir mit dem OOI-Team die einzelnen Arbeitsschritte besprechen, und sie so bei den Arbeiten mit den Manipulatoren in Echtzeit begleiten. In den Jahren 2022 und 2023 konnten wir wieder an den OOI Wartungsexpeditionen teilnehmen und so an Bord des Forschungsschiffes die erforderlichen Arbeiten selbst durchführen.

Kurz nach Beginn des Projektes haben wir bereits im Sommer 2020 die Arbeiten während der Expedition auf dem Schiff an den Instrumenten des Observatoriums durchgeführt. Dazu gehörte die Bergung des Übersichtssonars und des Kamerasystems. Das Übersichtssonar, das die Aktivität und den Standort aller einzelnen Gasemissionen über dem Hydratrücken in einem kreisförmigen Überwachungsbereich mit einem Radius von 200 m registrieren kann, war defekt und musste repariert werden, und das Kamerasystem reagierte auf Kommandos nicht mehr. Wir überprüften das Scanning-Sonar visuell, um sicherzustellen, dass keine Probleme zu erwarten waren, und tauschten die CTD-Sonde gegen die neue Sonde aus, die gleich zu Beginn der zweiten Projektphase angeschafft worden war.

Leider verursachte im August 2020 ein Schaden an der Hauptkabelinfrastruktur den sofortigen Ausfall der Stromversorgung und der Kommunikation zu mehreren Knotenpunkten des OOI-Observatoriums, zu denen auch der südliche Hydratrücken gehörte. Wegen des hohen Aufwands, der für die notwendigen Reparaturen am Hauptkabel erforderlich war, konnten die Reparaturen nicht sofort durchgeführt werden. Ein spezielles Telekommunikationskabel-Verlegungsschiff war erforderlich, um den beschädigten Kabelabschnitt zu bergen, ihn zu spleißen und einen der großen Primärknoten neu zu verlegen. Ein erster Reparaturversuch wurde im Sommer 2021 zeitgleich mit der OOI-Wartungsexpedition unternommen. Doch leider wurde der neue Primärknoten während der Aussetzung beschädigt und musste wieder geborgen werden. Im Sommer 2021 tauschten wir die CTD-Sonde erneut aus und setzten das reparierte Kamerasystem und das Übersichtssonar wieder aus. Diese Arbeiten erfolgten zur gleichen Zeit wie die Primärkabelreparaturen, und es wurde erwartet, dass die Stromversorgung und die Kommunikation innerhalb weniger Tage wiederhergestellt sein sollten. Aufgrund der Beschädigung des neuen primären Knotens fiel der Dienst des OOI-Observatoriums für den südlichen Hydratrücken jedoch um ein weiteres Jahr aus, bis im Sommer 2022 ein zweiter, diesmal erfolgreicher Reparaturversuch unternommen werden konnte. Während der OOI-Wartungsexpedition im Sommer 2022 tauschten wir das CTD-System erneut aus und reinigten die Linse und die Lichter des Kamerasystems, die von Biofouling betroffen waren. Leider wurde ein elektrisches Problem am Übersichtssonar festgestellt, und es musste beschlossen werden, das System zu bergen, da es in diesem

Zustand nicht mehr funktionstüchtig war. Nach einem weiteren Jahr der Datenaufzeichnung mit dem Kamerasystem, dem Scanning-Sonar und der CTD-Sonde wurden alle Instrumente im Sommer 2023 während der letzten OOI-Wartungsexpedition vor dem Ende des Projekts endgültig geborgen. Die Instrumente wurden dann demontiert, verpackt und nach Deutschland reimportiert.

1.2 Analyse der langfristigen Trends und Schwankungen der Tiefseegasemissionen

Obwohl wir, wie in der Vorhabenbeschreibung vorgesehen, jedes Jahr alle notwendigen Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten an unseren Instrumenten durchgeführt haben, haben wir in Phase 2 des Projektes aufgrund der Schäden an der primären Infrastruktur des OOI-Observatoriums und der daraus resultierenden Unterbrechung des Betriebs nur etwas mehr als ein Jahr lang Daten gesammelt. Dies war ein schwerer Rückschlag für ein Projekt, das auf eine langfristige Überwachung abzielt. Wir konnten jedoch Abhilfemaßnahmen ergreifen, um die wissenschaftlichen Ziele des M³-Projekts dennoch zu erreichen.

Um den Datenmangel zu kompensieren und die wissenschaftlichen Ziele des Projekts weiter zu verfolgen, arbeiteten wir zeitgleich mit den Kollegen vom kanadischen Kabel-Netzwerk „Ocean Network Canada“ (ONC) zusammen. Sie betreuen das kabelgebundene Neptun-Observatorium am nördlichen Kontinentalrand des Kaskaden-Gebirges. Im Rahmen dieses Observatoriums wird auch eine Art Übersichtssonar betrieben, das ähnlich aufgebaut ist, wie das in unserem Projekt entwickelte, wenn auch mit geringerer Reichweite und Auflösung. Dank dieser Zusammenarbeit hatten wir Zugang zu einer fast ununterbrochenen 4-Jahres-Datenreihe akustischer Daten von Gasemissionen im Bereich des Clayoquot Hanges in 1260 m Wassertiefe. Aufgrund der großen Datenmenge (ca. 33.650 stündliche Scans) konnte die Analyse nur mit der im Rahmen des M³-Projekts entwickelten Visualisierungs- und Analysesoftware durchgeführt werden (Abbildung 2). Diese Arbeit ermöglichte zum ersten Mal die Analyse von Gasemissionen aus der Tiefsee über einen Zeitraum von mehr als 4 Jahren mit einer extrem hohen Abtastfrequenz. Die Ergebnisse zeigen, dass die tages- und halbtagesperiodischen Gezeiten den Zeitpunkt des Einsetzens und Aufhörens der Blasenemissionen beeinflussen. Allerdings waren die Gasemissionen innerhalb des Überwachungsgebiets zu mehr als 84 % der Zeit aktiv, was darauf hindeutet, dass die Gezeiten allein die Emissionen nicht zum Stillstand bringen können. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Gasflüsse zwar transient, aber im Allgemeinen ausreichend hoch sind, um die Blasenbildung unabhängig von den gezeitenbedingten Druckänderungen am Meeresboden aufrechtzuerhalten. Die Ergebnisse zeigen auch, dass die Gezeiten die Stärke der aktiven Gasemissionen nicht zu modulieren scheinen. Zwar wurden große mittelfristige Schwankungen der Emissionen aufgezeichnet, jedoch konnte kein eindeutiger langfristiger

Trend (Zunahme oder Abnahme) der Intensität der Gasemissionen beobachtet werden, was darauf hindeutet, dass die Reaktion der Methanfreisetzungsaktivität in solchen Tiefen auf klimawandelbedingte Veränderungen entweder langsam erfolgt oder durch eine mehrjährige Zeitverzögerung beeinflusst wird. Diese Ergebnisse wurden im März 2022 in *Frontiers in Earth Science* veröffentlicht (Marcon et al., 2022). Diese Ergebnisse sind von entscheidender Bedeutung, zum Beispiel für Modelle der Kohlenstoff-Zyklen sowie für die Hochskalierung des marinen Methanflusses.

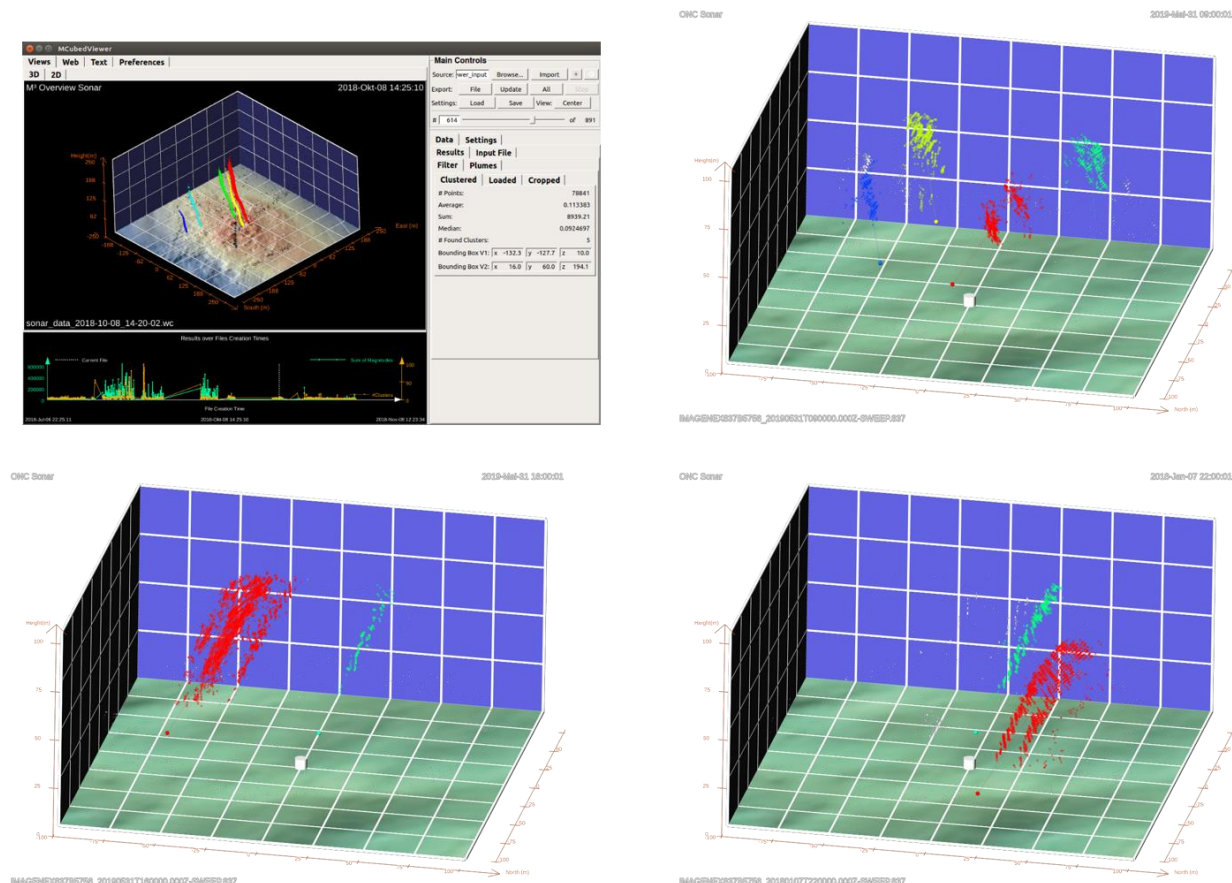


Abbildung 2: Anwendung der Software MCubedViewer (oben links) auf die Daten des Neptunobservatoriums (oben rechts und unten). Die Bilder zeigen die Ergebnisse der akustischen Flare-Erkennung; die Flare-Farben zeigen nur an, dass die Flares als eindeutige Flares erkannt wurden, und sie stellen nicht die Intensität der Flares dar. Das Übersichtssonar befindet sich in der Mitte jeder Karte, dargestellt durch einen grauen Zylinder.

1.3 Versuchsaufbau und Kalibrierungsexperimente

Ein Aspekt des Projekts bestand darin, ein Testsetup zu entwickeln, um künstliche Methangasblasen in einer kontrollierten Umgebung zu erzeugen, insbesondere im MARUM-Salzwassertestbecken (10 x 5 m, Tiefe: 5 m). Die Idee war, Kalibrierungsexperimente durchzuführen, um den Gasfluss mithilfe eines Scanning-Sonars zu quantifizieren. Bei Erfolg

sollte die Quantifizierungsmethode verwendet werden, um die Sonardaten vom Southern Hydrate Ridge zu analysieren und den Methanausstoß zu quantifizieren (Abbildung 3).

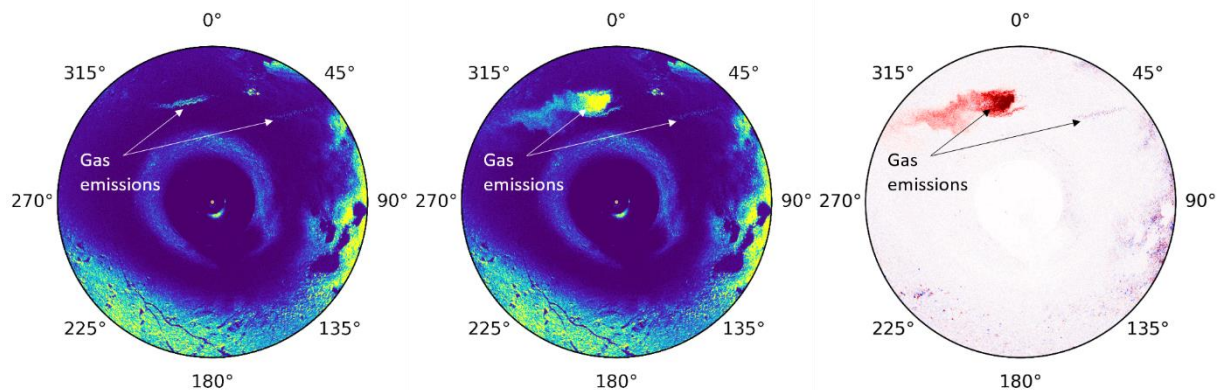


Abbildung 3: Links und Mitte: 360°-Scans des Scanning-Sonars, die Gasemissionen am Meeresboden in unterschiedlicher Intensität zeigen. Rechts: Differenzscan mit Hintergrundentfernung zur Identifikation der Gasemissionen aus den Sonardaten.

Das Testsetup umfasste ein Gerät zur Freisetzung von Methangasblasen mit einer kontrollierten und bekannten Durchflussrate, ein Scanning-Sonar und zwei Hochgeschwindigkeitskameras. Die akustische Quantifizierung von Gasblasen ist komplex und hängt von vielen Faktoren ab, wie z.B. der Beschallungsfrequenz, der Intensität der Blasenfreisetzung und den Aufstiegsgeschwindigkeiten und Größenverteilungen der Blasen. Die Sonarrückstreuung ist sehr empfindlich gegenüber den Blasengrößen, was bedeutet, dass genaue Daten zur Blasengrößenverteilung und den Aufstiegsgeschwindigkeiten für präzise Durchflussquantifizierungen mit Sonar erforderlich sind. Die Hochgeschwindigkeitskameras überwachten die Blasengrößen und Aufstiegsgeschwindigkeiten, um die Sonarquantifizierung zu verfeinern.

Wir haben zahlreiche Testtage im Salzwasserbecken durchgeführt und erzielten nur Teilerfolge bei der akustischen Quantifizierung von Blasenströmen. Mehrere Hürden trugen dazu bei. Erstens wurden die verwendeten Scanning-Sonare als Bildgebungs-Sonare konzipiert und nicht für Quantifizierungszwecke entwickelt. Sie konnten keine Rohdaten in Form von absoluter Schalleistung oder Schalldruckpegel ausgegeben werden, was eine Voraussetzung für eine zuverlässige Quantifizierung ist. Daher mussten wir zunächst Kalibrierungsexperimente mit akustischen Kalibrierungskugeln aus Wolframkarbid durchführen, um die Sonarbilddaten in akustische Leistung umzuwandeln, was bereits einige Unsicherheiten mit sich bringt (Abbildung 4).

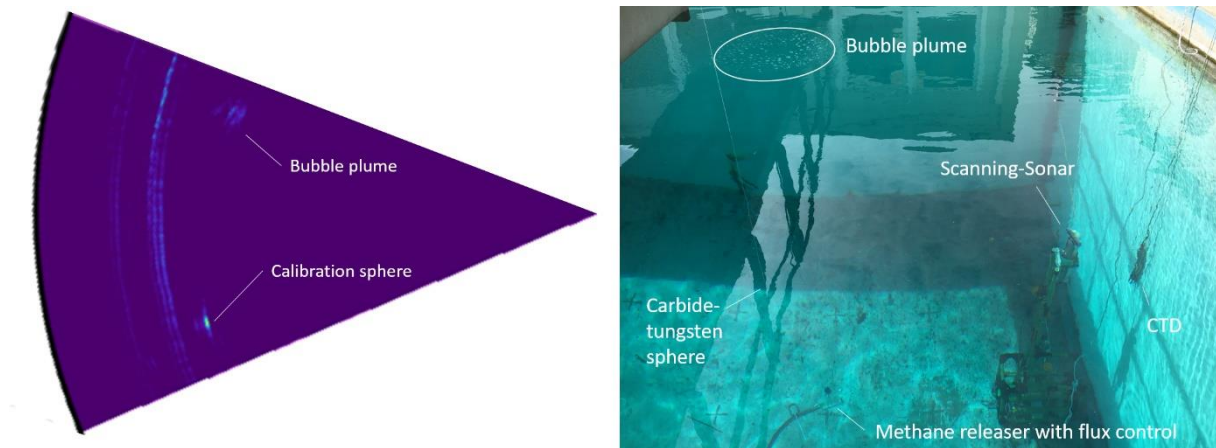


Abbildung 4: Rechts: Experimenteller Sonar-Kalibrierungsaufbau im MARUM-Salzwasser-Testbecken mit dem Scanning-Sonar, dem Methanblasenauslöser, den Karbid-Wolfram-Kalibrierungskugeln und der Leitfähigkeits-Temperatur-Sonde (CTD). Links: Ansicht des Sonarscans mit den Echos der Kalibrierungskugel und des künstlichen Methanblasenstroms.

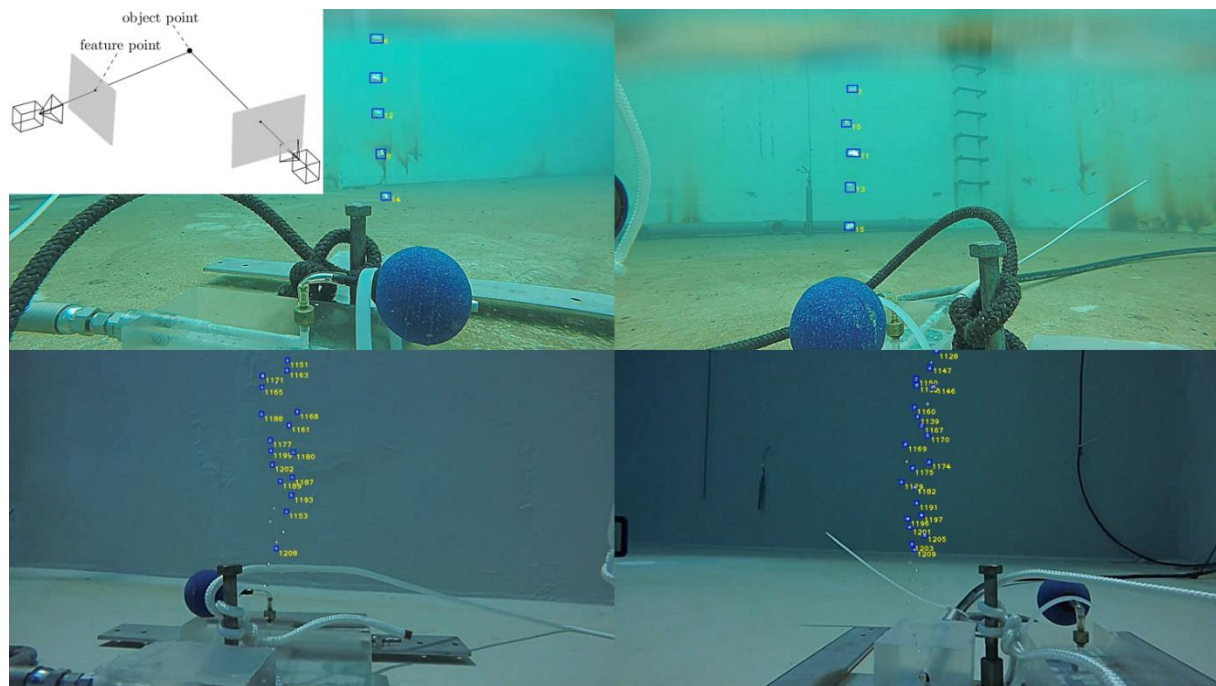


Abbildung 5: Methanblasenströme wurden mit zwei Hochgeschwindigkeitskameras in wasserdichten Gehäusen aufgezeichnet. Mit Hilfe eines speziell trainierten neuronalen Netzes konnten die Blasen aus den beiden synchronisierten Kameraaufnahmen erkannt und die Position jeder Blase in 3D-Weltkoordinaten trianguliert werden (oben links). Mit dieser Technik konnte die Größe und die Aufstiegs geschwindigkeit jeder Blase sowie die Strömungsgeschwindigkeit der Blasenströme genau bestimmt werden. Darüber hinaus dienen die resultierende Verteilung der Blasengröße und der Aufstiegs geschwindigkeit als Input-Parameter zur Verfeinerung der akustischen Quantifizierung von Blasenströmen. Die Tests wurden sowohl im 5 m tiefen MARUM-Salzwasser-Testbecken (oben) als auch im 8 m tiefen Salz wasserbecken (unten) der Maritimen Explorationshalle des Deutschen Forschungszentrums für Künstliche Intelligenz (DFKI) durchgeführt. Die blauen Rechtecke in den Kamerabildern zeigen die Ergebnisse der Blasenerkennung

Darüber hinaus ist die akustische Quantifizierung von Blasen sehr empfindlich gegenüber kleinen Variationen in den Blasengrößen, was zuverlässige Blasenmessungen erforderte. Für diesen Schritt haben wir ein neuronales Netzwerk genutzt, um Blasen aus den Unterwasservideobildern der Hochgeschwindigkeitskameras zu erkennen, und entwickelten ein Python-Skript zur Automatisierung der Erkennung, Verfolgung und Zuordnung von Blasen über die beiden Kameras hinweg. Ziel war es, ihre Position im 3D-Raum automatisch zu triangulieren und ihre 3D-Größe und Aufstiegsgeschwindigkeiten zu messen (Abbildung 5). Diese Arbeit erforderte einen erheblichen Zeitaufwand, war jedoch extrem erfolgreich. Dies führte zu einer Zusammenarbeit mit der Arctic University of Tromsø (UiT), Norwegen, um die entwickelte Quantifizierungstechnik auf reales Filmmaterial von Gas- und Ölquellen in der Barentssee anzuwenden, das mit anderen Methoden nicht analysiert werden konnte. Die Methodik und die Ergebnisse dieser Zusammenarbeit werden in einem wissenschaftlichen Artikel beschrieben, der derzeit in dem internationalen Journal „Limnology and Oceanography – Methods“ eingereicht und begutachtet wird.

Nachdem das Sonar kalibriert und die Verteilungen der Blasengrößen und Aufstiegsgeschwindigkeiten bekannt sind, ist es möglich, die Gas-Durchflussrate aus den Sonardaten abzuschätzen. Aufgrund der zahlreichen Annahmen und fehleranfälligen Rückberechnungen, die diesem Prozess zugrunde liegen, sind die resultierenden Flussquantifizierungen jedoch mit Fehlerbereichen verbunden, was die Ergebnisse nicht zweifelsfrei interpretierbar macht. Obwohl diese Arbeit durch die neueren Bemühungen wichtige Hinweise erbrachten, die für zukünftige akustische Quantifizierungsarbeiten wertvoll sind, ist es aufgrund des laufenden Begutachtungsverfahrens noch unklar, ob die Ergebnisse dieser akustischen Quantifizierung kurzfristig veröffentlicht werden.

2. Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind durch die angefallenen Personalkosten, Investitionen, und Vergabe von Aufträgen entstanden. Während der Projektlaufzeit bearbeiteten ein wissenschaftlicher Mitarbeiter und ein technischer Mitarbeiter in Vollzeit bzw. in Teilzeit die oben beschriebenen Arbeitsinhalte. Weitere Kosten entstanden durch die Anschaffung aller für die CTD-Sensorsonde und den Aufbau der Versuchsanlage benötigten Teile und Komponenten. Zu den kostenaufwändigsten Teilen gehörten die CTD-Sonde und die wasserdichten Kamergehäuse für die Hochgeschwindigkeitskameras. Schließlich war auch die Auftragsvergabe ein wichtiger Teil des Budgets. Dazu gehörten die 2020, 2021, 2022 und 2023 anfallenden Kosten der University of Washington für Test, Anbindung und Betrieb der Projektinstrumente durch das OOI-Observatorium. Letztere Kosten umfassen u.a. die Integrationstests, die für den Einsatz und die Wartung erforderliche

Arbeitszeit, sowohl für das Schiff als auch für das ROV, einschließlich der damit verbundenen Personalkosten, sowie die Beteiligung an der Datenspeicherung durch das OOI-Datenarchiv. Reisekosten entstanden hauptsächlich für die An- und Abreise nach und von Newport (OR), den Transport der Instrumente und der notwendigen Ausrüstung für die Integrationstests und Schiffsexpeditionen, der Wiedereinfuhr der gesamten Ausrüstung (auch aus Phase 1) nach Deutschland am Ende des Projekts sowie für die Teilnahme an Konferenzen, auf denen die Projektergebnisse vorgestellt wurden, und für Publikationskosten.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Durchführung der M³-Projektphase 2 erforderte die qualifizierte Arbeit von zwei Mitarbeitern sowie die zeitweise Unterstützung durch studentische Hilfskräfte (HiWis).

Der verantwortliche Wissenschaftler übernahm die Projektkoordination, die Kommunikation mit dem OOI und der University of Washington sowie die Erstellung von Kooperationsvereinbarungen zwischen den beiden Universitäten. Er beaufsichtigte die Arbeiten an den Projektinstrumenten während der jährlichen Wartungsfahrten und führte die Datenerfassung, Qualitätskontrolle, Analyse, Interpretation und Veröffentlichung der Ergebnisse durch. Er konzipierte auch die Pooltests und entwickelte die entsprechenden Analysemethoden.

Ein Ingenieur war für die logistische Planung der Forschungsfahrten und die Transportlogistik verantwortlich und nahm selbst an mehreren der Fahrten teil und kümmerte sich zwischendurch um die Instandsetzung der Instrumente. Darüber hinaus entwarf er den Versuchsaufbau für das Testbecken, einschließlich des Blasenströmungssystems mit Strömungsreglern, der Blasenauslässe und der Gehäuse für die Hochgeschwindigkeitskameras. Sowohl der Wissenschaftler als auch der Ingenieur waren bei allen Beckenversuchen anwesend und führten die Tests selbst durch.

Unterstützend wurden studentische Hilfskräfte (HiWi) eingesetzt. Ein HiWi half bei der Analyse der Bilder und Videos aus den Tiefsee-Aufzeichnungen des Kamerasystems. Ein weiterer HiWi unterstützte die letzte Forschungsfahrt, insbesondere die Bergung, Demontage und Verpackung aller Instrumente.

Die personelle Ausstattung des Projekts war somit notwendig und angemessen, um die ehrgeizigen Ziele zu erreichen. Die beiden Mitarbeiter deckten die wissenschaftlichen und technischen Kernkompetenzen ab und stellten die Kontinuität des Projekts sicher. Die studentischen Hilfskräfte leisteten wertvolle Unterstützung bei spezifischen Aufgaben.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die Ergebnisse des M³-Projekts bieten eine Vielzahl von Nutzungs- und Verwertungsmöglichkeiten, die sowohl für die Wissenschaft als auch für die Gesellschaft von großer Bedeutung sind:

- Vertieftes Verständnis der Methanemissionen aus dem Meeresboden: Die gewonnenen Daten und Erkenntnisse werden wesentlich zum Verständnis der Prozesse beitragen, die die Methanemissionen aus dem Meeresboden steuern. Diese Informationen sind entscheidend für die Bewertung der Auswirkungen von Methan auf den globalen Kohlenstoffkreislauf und das Klimasystem.
- Verbesserte Methoden zur Überwachung von Methanemissionen: Die im Rahmen des Projekts entwickelten Instrumente und Methoden bieten neue Möglichkeiten für die langfristige Überwachung von Methanemissionen aus dem Meeresboden. Diese Daten sind wichtig, um die Auswirkungen von Umweltveränderungen und menschlichen Aktivitäten auf die Methanemissionen zu bewerten, z. B. in flachen Gewässern oder in Regionen, in denen die Auswirkungen des Klimawandels am stärksten sind (z. B. in der Barents-See).
- Neue Erkenntnisse über Kaltwasseraustritte am Meeresboden: Das Projekt liefert wertvolle Einblicke in die Funktionsweise und Dynamik von Cold Seeps am Meeresboden, die wichtige Lebensräume für Meeresorganismen sind.
- Beitrag zum Klimaschutz: Die gewonnenen Erkenntnisse über Methanemissionen aus dem Meeresboden könnten dazu beitragen, effektive Strategien zur Minderung von Treibhausgasemissionen zu entwickeln und die Auswirkungen des Klimawandels abzumildern.
- Entwicklung neuer Technologien: Die im Projekt entwickelten Instrumente und Methoden können für die Entwicklung neuer Technologien zur Erforschung und Überwachung des Meeresbodens eingesetzt werden.

Konkrete Planungen für die nähere Zukunft:

Die aus den Projektinstrumenten sowie aus weiteren Kerninstrumenten des OOI-Observatoriums gewonnenen Daten und Erkenntnisse werden in weiteren wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht, um sie der wissenschaftlichen Gemeinschaft bereitzustellen. Darüber hinaus sind die gesammelten Daten bereits über das OOI-Datenportal öffentlich zugänglich, was weitere wissenschaftliche Forschung oder Bildungszwecke ermöglicht.

Die im Projekt entwickelten Instrumente und Methoden sollen weiterentwickelt und optimiert werden, um ihre Einsatzmöglichkeiten zu erweitern. Die entwickelten Analysetechniken haben ein hohes Potenzial für weitere Anwendungen, auch für andere Unterwasserüberwachungsplattformen, wie sich bereits in diesem Projekt gezeigt hat: Erstens, konnten wir mit der Software MCubedViewer die Daten eines anderen Sonars analysieren, das an ein anderes Observatorium angeschlossen ist. Zweitens konnte die für dieses Projekt entwickelte Methode zur Quantifizierung des Blasenflusses mit zwei Kameras erfolgreich Tiefseeaufnahmen analysieren, die unter realen, nicht idealen Tiefseebedingungen und mit

einem anderen Kamerasystem gesammelt wurden und die mit anderen bestehenden Techniken nicht analysiert werden konnten. In Bezug auf die entwickelten Instrumente, insbesondere prüfen wir die Möglichkeit, einige Instrumente auf anderen kabelgebundenen Observatorien wie dem LoVe-Observatorium in der Norwegischen See oder dem COSYNA-Observatorium im Kongsfjorden in Svalbard einzusetzen. Es ist bekannt, dass es in ihrer Nähe Gasemissionen gibt, und es ist zu erwarten, dass diese Gebiete in polaren Regionen stärker von steigenden Temperaturen betroffen sein werden als die in diesem Projekt untersuchten kalten Quellen des Cascadia-Kontinentalrandes.

Schließlich bilden die gewonnenen Erkenntnisse die Grundlage für neue Forschungsprojekte, die sich mit der Untersuchung von Methanemissionen aus dem Meeresboden und der Entwicklung nachhaltiger Lösungen für den Klimaschutz befassen.

5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Außer den schon bestehenden Tiefsee-Sonarsystemen, wie dem Drehsonar von Ocean Networks Canada (Römer et al., 2016) und dem COVIS-System (Light et al., 2011, 2010), sind uns keine neuen Initiativen auf dem Gebiet der langfristigen autonomen Sonarüberwachung von Tiefseegasemissionen bekannt, die seit Beginn dieses Projekts begonnen haben. Daher können wir nicht über Fortschritte in diesem Bereich in anderen Bereichen berichten.

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Zwei Publikationen zu den Projektergebnissen wurden veröffentlicht:

- Marcon, Y., Kelley, D., Thornton, B., Manalang, D., Bohrmann, G., 2021. Variability of Natural Methane Bubble Release at Southern Hydrate Ridge. *Geochem. Geophys. Geosystems* 22, e2021GC009894. <https://doi.org/10.1029/2021GC009894>
- Marcon, Y., Römer, M., Scherwath, M., Riedel, M., Dølvén, K.O., Heesemann, M., 2022. Variability of Marine Methane Bubble Emissions on the Clayoquot Slope, Offshore Vancouver Island, Between 2017 and 2021. *Front. Earth Sci.* 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.864809>

Darüber hinaus ist eine Publikation eingereicht und wird derzeit begutachtet:

- Marcon, Y., Stetzler, M., Kopsiske, E., Bénédicte, F., Bohrmann, G., Deep learning-based characterization of underwater methane bubbles using simple dual camera platform. *Limnology and Oceanography: Methods*, *in review*

Literaturverzeichnis

- Light, R., Miller, V., Jackson, D.R., Rona, P.A., Bemis, K.G., 2011. Cabled observatory vent imaging sonar. *J. Acoust. Soc. Am.* 129, 2373–2373. <https://doi.org/10.1121/1.3587685>
- Light, R., Miller, V., Rona, P.A., Bemis, K.G., 2010. Acoustic Instrumentation for Imaging and Quantifying Hydrothermal Flow in the NEPTUNE Canada Regional Cabled Observatory at Main Endeavour Field.
- Marcon, Y., Römer, M., Scherwath, M., Riedel, M., Dølven, K.O., Heesemann, M., 2022. Variability of Marine Methane Bubble Emissions on the Clayoquot Slope, Offshore Vancouver Island, Between 2017 and 2021. *Front. Earth Sci.* 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.864809>
- Marcon, Y., Stetzler, M., Kopiske, E., Bénédicte, F., Bohrmann, G., 2024. Optical gas and oil bubble flow quantification using the BUbble Rise speed and Size Tracking (BURST) methodology: results from experimental tests and in-situ seabed deployments. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10696557>
- Philip, B.T., Denny, A.R., Solomon, E.A., Kelley, D.S., 2016. Time-series measurements of bubble plume variability and water column methane distribution above Southern Hydrate Ridge, Oregon. *Geochem. Geophys. Geosystems* 17, 1182–1196. <https://doi.org/10.1002/2016GC006250>
- Römer, M., Riedel, M., Scherwath, M., Heesemann, M., Spence, G.D., 2016. Tidally controlled gas bubble emissions: A comprehensive study using long-term monitoring data from the NEPTUNE cabled observatory offshore Vancouver Island. *Geochem. Geophys. Geosystems* 17, 3797–3814. <https://doi.org/10.1002/2016GC006528>