

Abschlussbericht

MiningImpact 2 – Environmental Impacts and Risks of Deep-Sea Mining

Zuwendungsempfänger: GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

Förderkennzeichen: 03F0812A

Vorhabenbezeichnung: Mn-MonStr – Monitoringkonzepte für einen Manganknollenabbau in der Tiefsee

Laufzeit des Vorhabens: 1.8.2018 – 28.2.2022



Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung	1
1. Aufgabenstellung	1
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	4
4. wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	6
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
Literatur	7
II. Eingehende Darstellung	9
1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	9
2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	28
3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	29
4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	30
5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen,	31
6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses	32
a) Artikel in internationalen Fachzeitschriften	32
b) Vorträge und Poster bei internationalen Konferenzen und Instituten	34
c) Berichte	35

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Die drei übergeordneten Themen von MiningImpact 2 waren (1) die großräumigen Umweltauswirkungen, die durch die Schwebstofffahne verursacht werden, (2) die regionale Konnektivität von Arten und der biologischen Vielfalt von Lebensgemeinschaften sowie ihrer Resilienz gegenüber den Störungen und (3) die integrierten Auswirkungen auf Ökosystemfunktionen, wie das benthische Nahrungsnetz und biogeochemische Prozesse. GEOMAR hat in seinem Vorhaben zu den folgenden Zielen beigetragen:

- Bestimmung der zeitlichen Dynamik und der Eigenschaften der Schwebstofffahne, der räumlichen Ausdehnung der aus der aufgewirbelten Sedimentwolke wieder abgelagerten Sedimentschicht und der hierdurch induzierten Auswirkungen auf die biogeochemischen Prozesse (WP2, CCT1, CCT2);
- Quantifizierung der Veränderungen der physikalischen Sedimenteigenschaften und der biogeochemischen Prozesse im Manganknollen-Abbaugbiet (WP3);
- Transfer der Projektergebnisse in Leitfäden zu Monitoringkonzepten und -strategien für den Tiefseebergbau (CCT1 & CCT3);
- Entwicklung von Standardisierungsverfahren für das Monitoring und von Definitionen für Indikatoren für einen guten Umweltzustand (CCT1 & CCT3);
- Untersuchung potenzieller Maßnahmen zur Minimierung der Umweltschäden, wie z.B. räumliche Managementpläne für Abbauoperationen oder Restaurierungsansätze des geschädigten Ökosystems (CCT2 & CCT3).

Als Verbundprojektkoordinator hat GEOMAR außerdem eine zielgruppenspezifische Kommunikation der Projektergebnisse, vor allem durch Beratung von Entscheidungsträgern, Austausch mit NGOs und anderen Interessenvertretern, durchgeführt und den Informationsaustausch zwischen den Projektpartnern organisiert (WP5 & CCT3) sowie die langfristige Archivierung der im Projekt erhobenen Daten im Weltdatenzentrum PANGAEA logistisch und operativ unterstützt (WP4).

In den Arbeitspaketen des Verbundprojektes hat GEOMAR dabei folgende Aufgaben bearbeitet:

WP2 „Fate & toxicity of the sediment plume“

- Einsatz neuester hochauflösender Bildgebungstechnologien und Anwendung neuester photogrammetrischer Verarbeitungstechnologien und automatisierter Bildanalysealgorithmen
- Einsatz von optischen und hydroakustischen Technologien zur Beobachtung und Kartierung der aufgewirbelten Sedimentwolke in der Wassersäule
- Überwachung und Quantifizierung der Ausbreitung der Sedimentwolke und der Wiederablagerung von Sedimenten
- Definition natürlich vorkommender Lebensräume auf verschiedenen räumlichen Skalen durch Kombination optischer und hydroakustischer Daten mit unüberwachten und überwachten maschinellen Lernverfahren für räumliche Extrapolationen
- Bewertung der unmittelbaren Auswirkungen der Sedimentwolke auf die biogeochemischen Eigenschaften der Oberflächensedimente, wie POC-Gehalt, Porosität und Sauerstoffverbrauch, einschließlich der Quantifizierung der abgebauten und wieder abgelagerten Sedimentschichten unter Verwendung von Isotopen-Tracern

WP3 „Biogeochemistry and ecosystem functioning“

- Identifizierung der lokalen räumlichen Variabilität der physikalischen Eigenschaften der Sedimente und der biogeochemischen Prozesse im Untersuchungsgebiet
- Quantifizierung der durch den Kollektorversuch induzierten Veränderungen im Hinblick auf das räumliche Ausmaß direkter (z.B. Abtragung von Oberflächensedimenten und Knollen, Sedimentverdichtung, Porenwasserfreisetzung) und indirekter Auswirkungen (Sedimentablagerung) auf physikalische Sedimenteigenschaften (z.B. Scherfestigkeit, Wassergehalt), Redoxzonierung, biogeochemische Stoffflüsse und Prozesse

WP4 „Data and sample management“

- Organisation der Langzeitarchivierung der im Projekt erzeugten Forschungsdaten, einschließlich der großvolumigen Bilddaten mit Zugang über webbasierte Dienste
- Organisation des Daten- und Informationsaustausches zwischen den Projektpartnern
- Organisation der Verteilung von Probenmaterial an die Projektteilnehmer, die nicht an den Fahrten teilnehmen können

WP5 „Project dissemination & coordination“

- Organisation von Workshops mit politischen Entscheidungsträgern, Nichtregierungsorganisationen, ISA-Kontraktoren und an Tiefseebergbau interessierter Industrie, um die Projektergebnisse zu vermitteln und zu diskutieren
- Kommunikation der Projektergebnisse an die Öffentlichkeit, um über das Thema Tiefseebergbau zu informieren
- Beitragen zum Thema Tiefseebergbau auf internationalen wissenschaftlichen Konferenzen, wie z.B. EGU, Goldschmidt, AGU, UMC.

CCT1 “Plume monitoring & habitat/disturbance characterization”

- Planung der Forschungs Expeditionen im Hinblick auf einen Umweltmanagement- und -monitoringplan (EMMP): Planung der Habitatkartierung, Vorbereitung des Programms zur Überwachung der Sedimentwolke
- Koordinierung und Sicherstellung der Kalibrierung der Sensoren vor und während der Fahrten und von Vereinbarungen über gemeinsame Datenverarbeitungstechniken
- Durchführung einer Bewertung des Baseline-Zustands, einschließlich der Klassifizierung der Lebensräume und ihrer Verteilung durch hochauflösende Kartierung während der Fahrt (hydroakustische und optische Kartierung mit AUV und ROV, Bodenuntersuchung der Sedimente und überwachte/unüberwachte Klassifizierung der Lebensräume/des Meeresbodens)
- Koordinierung der gesamten In-situ-Überwachung des Kollektortests sowie der Auswertung der Umweltauswirkungen
- Koordinierung und Überprüfung von In-situ- und Ex-situ-Experimenten vor und während der Fahrt im Hinblick auf das Partikelverhalten und Aufbereitung der Ergebnisse für die Sedimentmodellierung
- Bewertung der Nützlichkeit und Effizienz der eingesetzten Überwachungstechnologien und Sensoren und Bereitstellung von Empfehlungen für optimale Verfahren für zukünftige Studien

CCT2 “Disturbance effects in time and space”

- Charakterisierung und Quantifizierung der abgelagerten Sedimentwolke in bezug auf die biogeochemischen Reaktionen als Beitrag zur Bewertung der integrierten Gesamtbelastungen

- Beiträge zur Entwicklung von Instrumenten zur integrierten (kumulativen) Umweltverträglichkeitsprüfung, insbesondere bzgl. Grenzwerte und biogeochemischer Indikatoren (z.B. für die Remineralisierung organischer Substanzen)
- Beiträge zur Erprobung von Methoden und Konzepten zur Erholung des geschädigten Ökosystems mit Fokus auf die Redoxzonierung und biogeochemische Prozesse

CTC3 “Environmental risk assessment & policy recommendations”

- Zuarbeit zur Entwicklung von Methoden der Risikobewertung von Tiefseebergbau, die den Stand des Wissens und der Forschung über Tiefseeökosysteme berücksichtigt
- Entwicklung von Konzepten zur Minimierung schädlicher Umweltauswirkungen des Tiefseebergbaus, z.B. durch Raumplanung und Management der Abbauoperationen; Festlegung von Kriterien für Umweltschutzgebiete; Anwendung des Konzepts des "guten Umweltzustands" aus dem Umweltmanagement

Im Rahmen eines Unterauftrags haben sich die rechtswissenschaftlichen Kollegen der CAU Kiel hierbei damit befasst, wie das Wissen über die Umweltauswirkungen und -risiken sowie Konzepte für die Überwachung und das räumliche Management von Tiefseebergbauaktivitäten in geeignete rechtliche Rahmenbedingungen der Internationale Meeresbodenbehörde (ISA), der Europäischen Union (EU) und einzelner Staaten umgesetzt werden können und wie mit fehlendem Wissen und daraus resultierenden Unsicherheiten umgegangen werden kann.

- Informationsaustausch mit der ISA, ISA-LTC und ihren Kontraktoren, nationalen und internationalen Behörden und Entscheidungsträgern (z.B. von Ländern mit marinen Bodenschätzen), an Tiefseebergbau interessierter Industrie und Umweltverbänden

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde basierend auf den Erkenntnissen der ersten Projektphase durchgeführt. Dies betrifft sowohl die wissenschaftlichen Ergebnisse, als auch die arbeitstechnischen Erfahrungen der Expeditionen SO239 und SO242, sowie die internationale Vernetzung mit der ISA, Mitgliedern der ISA-LTC, Vertretern im ISA Council, Behörden, ISA-Kontraktoren und anderen an Tiefseebergbau interessierten Unternehmen sowie Umweltverbänden, die in der ersten Phase erreicht wurde und in der 2. Projektphase weiter ausgebaut und intensiviert wurde. Hierdurch konnten insbesondere in der 2. Projektphase die Ergebnisse effektiv in Handlungsvorschläge für Entscheidungsträger transferiert und kommuniziert werden. Hervorzuheben sind hierbei die Beiträge zu den Guidelines für Baseline-Untersuchungen (ISBA 27/C/5) und Environmental Impact Assessments / Statements (ISBA 27/C/11) des ISA Mining Codes sowie der Festlegung von 4 neuen Schutzgebieten (APEI = Areas of Particular Environmental Interest) im REMP (Regional Environmental Management Plan) für die Lizenzgebiete in der Clarion-Clipperton Zone (ISBA 26/C/43). Wie hoch der Bedarf der verschiedenen Interessengruppen an wissenschaftlichen Ergebnissen zu den Umweltauswirkungen ist und welchen Stellenwert MiningImpact international gewinnen konnte, zeigten auch die konstant sehr hohen Teilnehmerzahlen (50-100 externe Personen) an den von uns organisierten Informationsveranstaltungen zu den Expeditionen SO268 und IP21 sowie während unserer Annual Meetings. Darüber hinaus war auch das Interesse der nationalen und internationalen Presse kontinuierlich hoch, was sich u.a. in mehr als 70 Interviews für nationale und internationale Zeitungen, Radiosendungen, TV-Dokumentationen und Filmproduktionen widerspiegelt.

Das unabhängige wissenschaftliche Monitoring des ersten industriellen Manganknollenkollektors Patania II durch die belgische Firma DEME-GSR war das Kernstück der Feldarbeit im Projekt. Hierzu war eine intensive Planung der Expeditionen notwendig, die in engem Austausch mit DEME-GSR erfolgte, um eine sichere und erfolgreiche Durchführung der Kampagne mit gleichzeitiger Operation

von 2 Schiffen an der Wasseroberfläche und mehreren Geräten am Meeresboden zu ermöglichen. Durch eine technische Beschädigung des Versorgungskabels (Umbilical) von Patania II musste DEME-GSR dann aber im Frühjahr 2019 während der schon laufenden Expedition SO268 den Test absagen. Unter erheblichem zusätzlichem Kostenaufwand durch die deutschen Projektpartner, allen voran die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), und den Mittelgeber BMBF, konnte die wissenschaftliche Monitoring-Kampagne des Tests im Frühjahr 2021 auf einer weiteren Expedition, der IP21, erfolgen. Die BGR hat hierfür ein kommerzielles Schiff, die Island Pride, gechartert, da aufgrund der in der Zwischenzeit ausgebrochenen Corona-Pandemie kein deutsches Forschungsschiff im Pazifik zur Verfügung stand. Die logistische Planung und Durchführung der Kampagne wurde zusätzlich durch die Pandemie erschwert, konnte aber am Ende sehr erfolgreich absolviert werden. Der Zeitplan der Projektarbeiten musste hierdurch allerdings mehrfach angepasst und in großem Detail überarbeitet werden. Einige der ursprünglichen Zielsetzungen konnten aufgrund dieser Verzögerungen leider nur eingeschränkt im Zeitrahmen des Projekts erreicht werden. Die ursprünglich ebenfalls während MiningImpact 2 angedachte Expedition zur Erhebung des Umweltzustands ca. 1 Jahr nach dem Kollektortest findet daher nun auch erst ein dreiviertel Jahr nach Ende der 2. Projektphase, Ende Oktober bis Ende Dezember 2022, statt. Diese Verschiebungen des Zeitplans liegen alle außerhalb des Einflusses der Projektpartner und zeigen auch, dass ein industrieller Tiefseebergbau noch einige technischen Herausforderungen zu bewältigen haben wird.

GEOMAR hat mit erheblichen Eigenmitteln Geräte und Tiefseetechnologien, wie ROV Kiel 6000, AUV Abyss, diverse optische und akustische Sensoren, Ocean Bottom Seismometer, Schwerelot, CTD Kranzwasserschöpfer, für die Expeditionen SO268 und IP21 zur Verfügung gestellt. Ohne diese Infrastruktur und das erfahrene Personal wären die Arbeiten, vor allem auch die der Projektpartner, nicht möglich gewesen. Zur Bereitstellung und zum Austausch der erhobenen Forschungsdaten wurden, wie bereits erfolgreich in Phase 1, das Ocean Science Information System (OSIS-Kiel) und der GEOMAR Medienserver, die vom GEOMAR Datenmanagement betrieben werden, bereitgestellt. Mitglieder des GEOMAR Datenmanagements sind seit vielen Jahren als aktive Dateneditoren für das Welt Datenzentrum PANGAEA tätig. Während der Projektlaufzeit konnten die Projektpartner den internen Bereich der Projektwebsite nutzen um Forschungsdaten und weitere Dokumente auszutauschen. Die Bereitstellung und Pflege dieser Website im Datenmanagement Portal konnte durch die Serviceleistung des Datenmanagements im GEOMAR Informations-, Daten- und Rechenzentrum gewährleistet werden.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die im Antrag definierten Inhalte und Ziele konnten weitgehend erreicht werden. Die Zeitplanung wurde nach der SO268 aufgrund des ausgefallenen Kollektortests von DEME-GSR detailliert überarbeitet. Im Frühjahr 2021 wurde zusätzlich die Expedition IP21 durchgeführt, mit der das wissenschaftlich unabhängige Monitoring des Kollektortests von DEME-GSR erfolgreich erreicht werden konnte, und die Proben und Daten für die Analyse der unmittelbaren Umweltauswirkungen konnten gewonnen werden. Die Folgefahrt SO295, auf der Proben und Daten etwa 1,5 Jahre nach dem Kollektortest erhoben werden, wird derzeit vorbereitet und findet von Ende Oktober bis Ende Dezember 2022 statt, also 8 Monate nach Projektende.

Bereits vor Projektbeginn, Ende 2017, begannen die intensiven Planungen für die Expedition SO268, die im Frühjahr 2019 durchgeführt wurde. Hierzu gab es regelmäßige Planungstreffen mit dem belgischen Kontraktor DEME-GSR und der BGR als deutschem Lizenzhalter, die durch mehrere Workshops mit den Projektpartnern komplettiert wurden. Im Rahmen dieser Treffen wurden die Testgebiete und Referenzgebiete im deutschen und belgischen Lizenzgebiet festgelegt, basierend auf vorliegenden Informationen der BGR und DEME-GSR. Zudem wurde die Beprobungsstrategie erarbeitet und die Geometrie der Sensorenanordnung zum Beobachten der Sedimentwolke erörtert. Die Sensoren wurden vor der Expedition im Labor der Jacobs-Universität interkalibriert. Im Oktober

2018 wurde die geplante Kampagne auf einer Informationsveranstaltung, die durch das LBEG moderiert wurde, verschiedenen Interessenvertretern (NGOs, Behörden, Industrie, Presse) vorgestellt und die zahlreichen Fragen beantwortet. Ziel dieser Veranstaltung war, größtmögliche Transparenz über die Kampagne zu erreichen und als Beispiel für folgende Aktivitäten von Kontraktoren zu dienen.

Die Expedition (Haeckel & Linke 2021) bestand aus 2 Fahrtabschnitten und begann, wie geplant, mit der Untersuchung der Baseline-Bedingungen in den designierten Referenz- und Kollektortestgebieten. Während des ersten Fahrtabschnittes informierte DEME-GSR uns dann aber, dass das Versorgungskabel des Kollektorprototypen bei einer ersten Erprobung irreparabel beschädigt wurde und sie die Tests von Patania II nicht durchführen könnten. Daraufhin haben wir in Konsultation mit den beteiligten Projektpartnern die Fahrtplanung überarbeitet. Dies beinhaltete eine deutlich erweiterte Untersuchung der Baseline-Bedingungen in den Arbeitsgebieten sowie ein Alternativexperiment zur Aufwirbelung von Sediment mittels einer Ketten-Dredge, die an Bord von FS SONNE zur Verfügung stand. Somit konnten die notwendigen Proben und Daten erhoben werden, die ein Erreichen der wesentlichen Projektziele erlaubten. Der Arbeits- und Zeitplan sowie die Finanzplanung wurde nach der Expedition detailliert überarbeitet und dem Projektträger zur Evaluierung zugesandt.

In den folgenden Monaten wurde zusammen mit der BGR die Organisation einer zusätzlichen Expedition begonnen, um zum neuen Termin für den Test von Patania II durch DEME-GSR, das unabhängige wissenschaftliche Monitoring durchführen zu können. Als Termin der Kampagne war zunächst das Frühjahr 2020 angedacht. Dieser Termin musste allerdings aufgrund anfänglicher Verzögerungen beim Neubau des Versorgungskabels von Patania II sowie der im Februar 2020 weltweit ausgebrochenen Corona-Pandemie mehrfach verschoben werden. Dadurch wurde eine erneute Überarbeitung des Arbeitsplans im Sommer 2020 notwendig. Nachdem wir zusammen mit DEME-GSR und BGR schließlich April-Mai 2021 als Termin für den Test vereinbart hatten, konnte die BGR ein Schiff für unsere Monitoring-Kampagne chartern. Vor der Expedition wurde im Januar 2021 erneut eine Informationsveranstaltung zur Kampagne, diesmal online aufgrund der weltweiten Corona-Situation, durchgeführt, die sehr gut besucht war. Die Expedition, IP21, konnte erfolgreich durchgeführt werden, so dass die ursprünglich angedachten Proben und Daten nun erhoben werden konnten. Ergebnisse der Expedition und des Gesamtprojekts wurden mehrfach im Laufe des Jahres 2022 (auf der Abschlussveranstaltung am 1. Februar, der ISA-Veranstaltung zum World Ocean Day am 8. Juni sowie auf der Underwater Mining Conference am 4. Oktober) in ähnlichem Format präsentiert.

GEOMAR hat zusätzlich zur Gesamtkoordination des Verbundprojektes auch die Planung, Vorbereitung und Durchführung der Expeditionen SO268 (Haeckel & Linke 2021) und IP21 (in Zusammenarbeit mit der BGR) geleitet. Eine der Hauptaufgaben der Koordination war zudem den Wissenstransfer mit den diversen Interessengruppen und Entscheidungsträgern umzusetzen sowie die Outreach-Aktivitäten, vor allem die äußerst zahlreichen Interviewanfragen, zu bewerkstelligen. Im Rahmen der Arbeiten in CCT2 und CCT3 wurden zudem mehrere Dokumente mit Vorschlägen für Regularien erstellt (Amon et al. 2022; Haeckel et al. 2020; Haeckel & Boetius 2021; van Doorn et al. 2021; Weaver et al. 2022), weitere sind in Vorbereitung (u.a. im Rahmen eines Sonderbandes im internationalen Journal „Frontiers in Marine Science“). Hervorzuheben sind die bereits erwähnten Beiträge zu Guidelines des ISA Mining Codes (ISBA 27/C/5; ISBA 27/5/11) und dem REMP der CCZ (ISBA 26/C/43), die die erfolgreiche Arbeit von MiningImpact unterstreichen. Die angedachten Ziele im Bereich Wissenstransfer (Policy Advice, Austausch mit Interessenverbänden und Outreach) wurden damit deutlich übertroffen.

Wie in der ersten Projektphase wurden die Forschungsdaten im Laufe des Projektes zum internen Austausch im Ocean Science Information System (OSIS-Kiel) hochgeladen und anschließend im Weltdatenzentrum PANGAEA langzeitarchiviert und mit einer DOI zitierbar und nachnutzbar gemacht. Das GEOMAR-Datenmanagement hat hierbei auch die Projektpartner unterstützt, die über

den internen Bereich der Projektwebseite (über OSIS-Kiel) zudem Zugang zu den Daten der Partner haben, auch vor deren Veröffentlichung.

GEOMAR war auf beiden Expeditionen verantwortlich für die Planung der Meeresboden- und Habitatkartierungen mittels AUV (hochauflösendes Multibeam, Photomosaik, Sidescan Sonar) und schiffsbasiertem Multibeam, sowie der Postprozessierung und Auswertung der Daten. Zudem hat GEOMAR CCT1 geleitet, in dem das Monitoring der aufgewirbelten Sedimentwolke mittels eines Arrays verschiedener akustischer und optischer Sensoren auf bis zu 20 Plattformen geplant wurde.

In enger Zusammenarbeit mit den Partnern BGR, JUB, AWI und MPI hat GEOMAR auf den Ausfahrten biogeochemische Proben und Daten erhoben. GEOMAR hat dabei folgende Analysen an den Proben durchgeführt: POC, PON, TS, CaCO₃, Porosität, Scherfestigkeit der Sedimente sowie Messung der Gesamtalkalität des Porenwassers. Mittels numerischer Modellierung wurden aus den biogeochemischen Daten dann Stoffflüsse und Prozessraten bestimmt sowie deren Veränderungen nach der Störung durch den Test von Patania II sowie dem Dredgeexperiment. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde die Eignung von biogeochemischen Variablen für die Bestimmung des Umweltzustands und seiner Störung durch Tiefseebergbau abgeleitet, auch vor dem Hintergrund natürlicher Variabilität und sich verändernden Umweltbedingungen im Zuge der globalen Erwärmung, Ozeanversauerung und Ausdehnung von Sauerstoffminimumzonen, die zum Teil auch in der Tiefsee schon messbar werden. Zudem wurde auf SO268 im deutschen Arbeitsgebiet ein Restorationsexperiment begonnen, um die Möglichkeit der Wiederbesiedlung durch Manganknollen-assoziierte Fauna durch Ausbringen künstlicher Hartsubstrate zu untersuchen (Gollner et al. 2022).

4. wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Arbeiten von GEOMAR beruhen wissenschaftlich auf den Erfahrungen der ersten Projektphase, inklusive seiner Expeditionen SO239 und SO242, sowie technologisch zusätzlich auf den Entwicklungen der vergangenen 10 Jahre (ROV Kiel 6000 und seine in situ Module, AUV Abyss mit Kamerasystem, benthische Lander, in situ optische und hydroakustische Sensoren), die allesamt tiefseerprobt sind, d.h. in Wassertiefen von bis zu 6000 m eingesetzt werden können. Bei den Planungen zum Monitoring des Tests von Patania II kamen dem Koordinator vor allem seine langjährigen Erfahrungen aus anderen Projekten im Bereich CO₂-Speicherung (ECO2 und STEMM-CCS) sowie dem Gashydratprojekt SUGAR zugute, in denen ebenfalls verschiedenste Techniken und Messmethoden zur Umweltüberwachung auf Expeditionen in kombinierter Weise eingesetzt wurden. Die einzelnen Aspekte des Monitorings wurden zudem schon auf den Expeditionen SO239 und SO242 der ersten Projektphase eingesetzt.

In der 1. Projektphase wurden in der CCZ und im Discolgebiet im Perubecken benthische Impact Experimente (BIEs) aus den 1990er Jahren (und älter) untersucht, mit denen die Umweltauswirkungen von Tiefseebergbau auf die benthische Fauna eingeschätzt werden sollten. Dies ist allerdings nur bedingt möglich, da die Störungen sehr kleinräumig (ca. 2 m breit und bis zu 2 km lange Dredge- oder Pflugspuren) sind und die Manganknollen teilweise nicht entfernt, sondern untergepflügt wurden. Trotzdem zeigte sich, dass diese Störungen auch nach Jahrzehnten nicht wiederbesiedelt wurden und auch die mikrobiellen Stoffumsätze nach wie vor stark reduziert sind. Mit der ersten MiningImpact-Phase wurden erstmals Erkenntnisse über längerfristige Störungen des benthischen Tiefseeökosystems gewonnen und es konnten erstmals auch in situ Messmethoden eingesetzt und in situ Experimente durchgeführt werden. Die numerischen Modellierungen der biogeochemischen Prozesse für die CCZ (SO239) und DISCOL (SO242) zeigten, dass das Tiefseeökosystem viele Jahrhunderte bis Jahrtausende benötigen wird, um sich selbst von so kleinskaligen Störungen zu erholen (Haffert et al. 2020, Volz et al. 2020, Vonnahme et al. 2020). Dies bestätigt ältere biogeochemische Arbeiten aus dem TUSCH-Projekt (Haeckel et al. 2001, König et al. 2001).

Die Langzeitarchivierung und Publikation der Projektdaten erfolgte, wie bereits in Phase 1, mittels des Weltdatenzentrums PANGAEA (Data Publisher for Earth & Environmental Science). Dort werden die Daten unter Berücksichtigung der FAIR Prinzipien archiviert. Es werden die Standards ISO19115, Dublin-Core und OAI-PMH für die Archivierung und den Metadatenaustausch verwendet. Weitere Vorteile von PANGAEA sind die Georeferenzierung der Daten und die Verbreitung über nationale und internationale Datenportale, z.B. das Marine Data Portal (<https://marine-data.de/>) oder das Global Earth Observation System of Systems (GEOSS). Die Datensätze bekommen einen persistenten Identifier (DOI) und sind damit in Publikationen zitierbar sowie über Literaturkataloge wie Google Scholar auffindbar. Das Ocean Science Informationssystem (OSIS-Kiel), wird vom Datamanagement Team am GEOMAR gehostet und enthält alle Informationen zu den im Projekt erhobenen Forschungsdaten. Der Datenfluss von internen Daten in OSIS zur Publikation und Langzeitarchivierung in PANGAEA ist seit vielen Jahren in zahlreichen Projekten etabliert. Es wurden die in Phase 1 entstandenen Abläufe, insbesondere für großvolumige Bilddaten, weiterentwickelt und angewendet. Das GEOMAR Datenmanagement hat alle Projektpartner bei der Archivierung und Publikation der Forschungsdaten in PANGAEA unterstützt. Dadurch ist gewährleistet, dass alle Projektdaten auch weit nach Ende der Projektlaufzeit für die wissenschaftliche Gemeinschaft zugänglich sind.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

GEOMAR hat als Koordinator des Projekts und Expeditionsleitung mit allen Partnern eng zusammengearbeitet, insbesondere für die Planung und Durchführung der Expeditionen als auch bei der Zusammenführung der Projektergebnisse und deren Transfer in Vorschläge für Regularien. Hierbei war es nützlich, dass GEOMAR auch in alle Teilprojekte (bis auf WP1) aktiv involviert war.

Für die Planung der Expeditionen war ein intensiver Austausch mit dem belgischen Kontraktor DEME-GSR erforderlich, sowie mit Thomas Peacock vom Massachusetts Institute of Technology (MIT), der von GSR beauftragt war, ozeanographische Messungen und Modellierungen der Sedimentwolke durchzuführen.

Weitere internationale Kooperationen erfolgten im Rahmen von Publikationen mit jeweils mehreren Kollegen von verschiedenen Instituten weltweit. Im Artikel von Amon et al. (2020) wurden die Wissenslücken bezüglich der Auswirkungen von Tiefseebergbau und daraus abzuleitende Vorschläge für den Mining Code der ISA zusammengetragen. Im Artikel von Weaver et al. (2021) wurde der Wissensstand zur räumlichen Ausbreitung der aufgewirbelten Sedimentwolke zusammengetragen, wie er bei derzeit existierenden und geplanten Abbautechnik von Manganknollen zu erwarten ist. Basierend darauf wurden Vorschläge zur Minimierung der Umweltschäden abgeleitet. In einer weiteren internationalen Kooperation im Rahmen des Banbury Think Tanks (<https://www.cshl.edu/banbury/>) wurde ein Vergleich der Umweltauswirkungen von Landbergbau (Fokus auf Cu-Minen) und Tiefseebergbau (Fokus auf Manganknollen) erarbeitet.

Mit den deutschen Vertretern im ISA Council wurden regelmäßig die neuesten Projektergebnisse ausgetauscht, insbesondere in Vorbereitung auf ISA Annual Meetings. Ein regelmäßiger Austausch hat ebenfalls mit Vertretern deutscher NGOs (z.B. Fair Oceans, Brot für die Welt, Misereor, BUND, Forum für Umwelt und Entwicklung) und internationaler NGOs (z.B. Deep-Sea Conservation Coalition, The Pew Trusts, WWF, Seas At Risk) stattgefunden. Aufgrund der Corona Pandemie beschränkte sich dieser Austausch ab Frühjahr 2020 auf online Meetings und Telefonate.

Literatur

Amon D.J., Gollner S., Morato T., Smith C.R., Chen C., Christiansen S., Currie B., Drazen J.C., Fukushima T., Gianni M., Gjerde K., Gooday A.J., Grillo G.G., Haeckel M., Joyini T., Ju S.-J., Levin L.A.,

- Metaxas A., Mianowicz K., Molodtsova T.N., Narberhaus I., Orcutt B.N., Swaddling A., Tuhumwire J., Palacio P.U., Walker M., Weaver P., Xu X.-W., Mulalap C.Y., Edwards P.E.T., Pickens C. (2022) Assessment of scientific gaps related to the effective environmental management of deep-seabed mining. *Marine Policy* 138, 105006.
- Gillard B. et al. (2019) Physical and hydrodynamic properties of deep sea mining-generated, abyssal sediment plumes in the Clarion Clipperton Fracture Zone (eastern-central Pacific). *Elem Sci Anth* 7, 5.
- Gollner S., Haeckel M., Janssen F., Lefaible N., Molari M., Papadopoulo S., Reichart G.-J., Alexandre J. T., Vink A., Vanreusel A. (2022) Restoration experiments in polymetallic nodule areas. *Integrated Environmental Assessment and Management* 18(3), 682-696.
- Haeckel M., Boetius A. (2021) Seafloor integrity versus critical metal supply. *One Earth* 4, 328.
- Haeckel M., König I., Riech V., Weber M., Suess E. (2001) Pore water profiles and numerical modelling of biogeochemical processes in Peru Basin deep-sea sediments. *Deep-Sea Research II* 48(17-18), 3713-3736.
- Haeckel M., Linke P. (2021) RV SONNE Cruise Report SO268 - Assessing the Impacts of Nodule Mining on the Deep-sea Environment: NoduleMonitoring. GEOMAR Report 59. GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, Kiel, Germany, 802 p.
- Haeckel M., Vink A., Kasten S., Janssen F. (2020) Environmental impacts of deep seabed mining. In: *New Knowledge and Changing Circumstances in the Law of the Sea*, Heidar T. (ed.), Brill Nijhoff, Leiden, 327-340.
- Haffert L., Haeckel M., de Stigter H., Janßen F. (2020) Assessing the temporal scale of deep-sea mining impacts on sediment biogeochemistry. *Biogeosciences* 17, 2767-2789.
- König I., Haeckel M., Lougear A., Suess E., Trautwein A.X. (2001) A geochemical model of the Peru Basin deep-sea floor and the system's response to technical impacts. *Deep-Sea Research II*, 3737-3756.
- Volz J. B., Haffert L., Haeckel M., Koschinsky A., Kasten S. (2020) Impact of small-scale disturbances on geochemical conditions, biogeochemical processes and element fluxes in surface sediments of the eastern Clarion-Clipperton Zone, Pacific Ocean. *Biogeosciences* 17, 1113-1131.
- van Doorn E., Laugesen E., Haeckel M., Mestre N., Skjeret F., Vink A. (2022) Chapter 17: Risk assessment in deep-sea mining. In: *Perspectives on Deep-Sea Mining*. Springer Nature Switzerland. p. 497-526.
- Vonnahme T. R., Molari M., Janssen F., Wenzhöfer F., Haeckel M., Titschack J., Boetius A. (2020) Effects of a deep-sea mining experiment on seafloor microbial communities and functions after 26 years. *Science Advances* 6, eaaz5922.
- Weaver P.P.E., Aguzzi J., Billet D.S.M., Boschen-Rose R., Colaco A., de Stigter H., Gollner S., Haeckel M., Hauton C., Jones D., Lily H., Mestre N.C., Mohn C., Thomsen L. (2022) Assessing plume impacts caused by polymetallic nodule mining vehicles. *Marine Policy* 139, 105011.

II. Eingehende Darstellung

1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

GEOMAR hat an allen Arbeitspaketen (WPs und CCTs, Work Packages und Cross-Cutting Themes) von MiningImpact, außer dem rein biologischen WP1, mitgewirkt. Im Folgenden sind die wesentlichen Ergebnisse in diesen Arbeitspaketen dargestellt. Aufgrund des Ausfalls des Kollektortests durch DEME-GSR während der laufenden Expedition SO268 und der Anfang 2020 ausgebrochenen weltweiten Corona-Pandemie ist es zu zeitlichen Verzögerungen und Änderungen im Arbeitsplan gekommen. Die detaillierten Anpassungen (Schreiben vom Mai und November 2020) wurden vom Zuwendungsgeber genehmigt (s. auch I.3).

WP2 „Fate & toxicity of the sediment plume“

Insgesamt fünf Aufgaben (Objectives) wurden vom GEOMAR in WP2 bearbeitet. Zu allen Aufgaben gab es wesentliche Ergebnisse, die hier kurz dargestellt und den entsprechenden Arbeitsschritten (Tasks) zugeordnet sind. Zahlreiche Publikationen sind erschienen, weswegen nicht im Detail auf die Ergebnisse eingegangen wird.

A) Einsatz neuester hochauflösender Bilderzeugungstechnologien und Anwendung neuester photogrammetrischer Verarbeitungstechnologien und automatisierter Bildanalysealgorithmen (Task 2.1 & 2.2)

Während der beiden Expeditionen SO268 und IP21 wurden mehr als 1,2 Mio. hochauflösende Fotos gesammelt. Hochmoderne, intern entwickelte Bildanalyse- und photogrammetrische Verarbeitungstechnologien wurden angewendet (z.B. Schoening et al. 2017), um die räumliche Verteilung von Mn-Knollen und Tiefseefauna zu quantifizieren. Ein neuartiges tragbares Ship High-Performance Compute Cluster for Image Analysis (ShiPCC) wurde verwendet, um die Bildanalyse und -speicherung während SO268 zu erleichtern (Schoening 2019). Darüber hinaus werden die Bilddaten verwendet, um die räumliche Ausdehnung der Sedimentwolkenablagerung zu quantifizieren. Außerdem ist die Rekonstruktion des Fotomosaiks mit ultrahoher Auflösung (<5 mm) vor und nach dem Kollektortest im Gange. Die Bilddaten von SO268 wurden im PANGAEA® Data Publisher (Schoening 2021) veröffentlicht. Ein Teil der IP21-Bilddatenanalyse wurde als Abstract zur 50. Underwater Mining Conference (Gazis et al. 2022a) eingereicht, während die Ergebnisse in einem hochrangigen Peer-Review-Journal veröffentlicht werden sollen.

Die in CCT1 entwickelte räumliche Anordnung des Sensorarrays wurde während der SO268- und IP21-Expeditionen angewendet. In jedem Lizenzgebiet (BGR & GSR) wurden mehr als 50 verschiedene optische und hydroakustische Sensoren eingesetzt. Zusätzlich zu diesen 50 stationären Sensoren wurde auf SO268 das ROV Kiel 6000 mit zwei zusätzlichen Sensoren ausgestattet eingesetzt. Während IP21 wurden zwei ROVs mit jeweils zwei Sensoren und ein mit 6 Sensoren ausgestattetes AUV verwendet, um die räumlich-zeitliche Ausdehnung der Sedimentwolke in Entfernungen von bis zu 5 km und 50 m über dem Meeresboden zu erfassen. Die Daten und Ergebnisse des SO268 Dredge-Experiment wurden in Open-Access-Journals mit Peer-Review veröffentlicht (Haalboom et al. 2022; Purkiani et al. 2022). Die Daten und Ergebnisse von IP21 werden derzeit aufbereitet und analysiert. Ein Teil der Ergebnisse wurde bei der Underwater Mining Conference im Oktober 2022 eingereicht (Gazis et al. 2022b, Purkiani et al. 2022).

Eine speziell konstruierte Tiefseepartikelkamera des Projektpartners JUB (Gillard et al. 2019) wurde von GEOMAR während der IP21-Expedition eingesetzt. Die Kamera erfasste und quantifizierte erfolgreich die Partikelkonzentrationen und -aggregation während und nach dem Kollektortest in beiden Testgebieten. Die Ergebnisse werden ebenfalls auf der UMC Konferenz vorgestellt und zusammen mit allen gesammelten Daten von IP21 veröffentlicht.

B) Einsatz von bildgebenden und hydroakustischen Technologien zur Erkennung und Kartierung der Sedimentwolke in der Wassersäule (Task 2.3 & 2.4)

Bei beiden Expeditionen wurden mehr als 50 optische und hydroakustische Sensoren verwendet, um die räumlich-zeitliche Ausdehnung der Sedimentwolken zu erfassen. Auf beiden Expeditionen koordinierte GEOMAR zusammen mit Projektpartnern die Sensorbereitstellung, ihre Interkalibration und den Einsatz. Die Sensoren wurden auf allen derzeit verfügbaren wissenschaftlichen Plattformen (z. B. Verankerungen, benthische Lander, Tripods am Meeresboden, ROVs, AUVs) eingesetzt. Die technischen Eigenschaften und die Wirksamkeit jedes Sensortyps wurden bewertet und dokumentiert, um nützliche Richtlinien für die zukünftige Überwachung bereitzustellen. Alle Daten von SO268 wurden im PANGAEA® Data Publisher veröffentlicht.

C) Überwachung der Ausbreitung der Sedimentwolke und der Wiederablagerung von Sedimenten in quantitativer Hinsicht (Task 2.3 & 2.4)

Die Quantifizierung der Ausbreitung und Wiederablagerung der Sedimentwolke wurde quantifiziert, was die räumlich-zeitliche Ausdehnung der Sedimentwolke enthüllte. Insbesondere auf IP21 wurde die Quantifizierung der Sedimentwolke in Entfernungen von bis zu 5 km vom Kollektorgebiet erreicht. Die Analyse dieses Datensatzes ist noch im Gange. Die Analyse der Daten des Dredgeexperiments auf SO268 ist abgeschlossen und die Ergebnisse wurden in der Open-Access-Fachzeitschrift *Frontiers of Marine Science* veröffentlicht (Haalboom et al. 2022; Purkiani et al. 2021).

D) Definition natürlich vorkommender Lebensräume auf verschiedenen räumlichen Skalen durch Kombination optischer und hydroakustischer Daten mit unüberwachten und überwachten maschinellen Lernverfahren für räumliche Extrapolationen

Die erfassten Bild- und hydroakustischen Daten wurden mit maschinellen Lernalgorithmen kombiniert, um die räumliche Verteilung von Tiefseelebensräumen innerhalb der Untersuchungsregionen abzubilden. Die Analyse gliedert sich in zwei Teile: a) Basisstudien vor dem Kollektortest (z. B. Mn-Knollenverteilung und Faunareichtum) und b) die Post-Impact-Analyse, die die Ökosystemstörung nach dem Test zeigt. Ein Teil dieser Arbeit wurde in der peer-review Zeitschrift *Scientific Reports* (Mbani et al., accepted) eingereicht, während mehrere andere Veröffentlichungen in Arbeit sind.

E) Bewertung der unmittelbaren Auswirkungen der Sedimentwolke auf die biogeochemischen Eigenschaften der Oberflächensedimente

Der Vergleich von Festphasendaten der Oberflächensedimente vor und nach dem Kollektortest erlaubt eine Abschätzung der durch den Abbaumechanismus entfernten Sedimentschicht sowie der in und außerhalb des Kollektorgebiets aus der Sedimentwolke abgelagerten Schicht. Abbildung 2.1 zeigt dies exemplarisch mittels der Tiefenprofile von partikulärem organischem Kohlenstoff (Corg), Manganoxid (MnO) und der Porosität im belgischen Arbeitsgebiet.

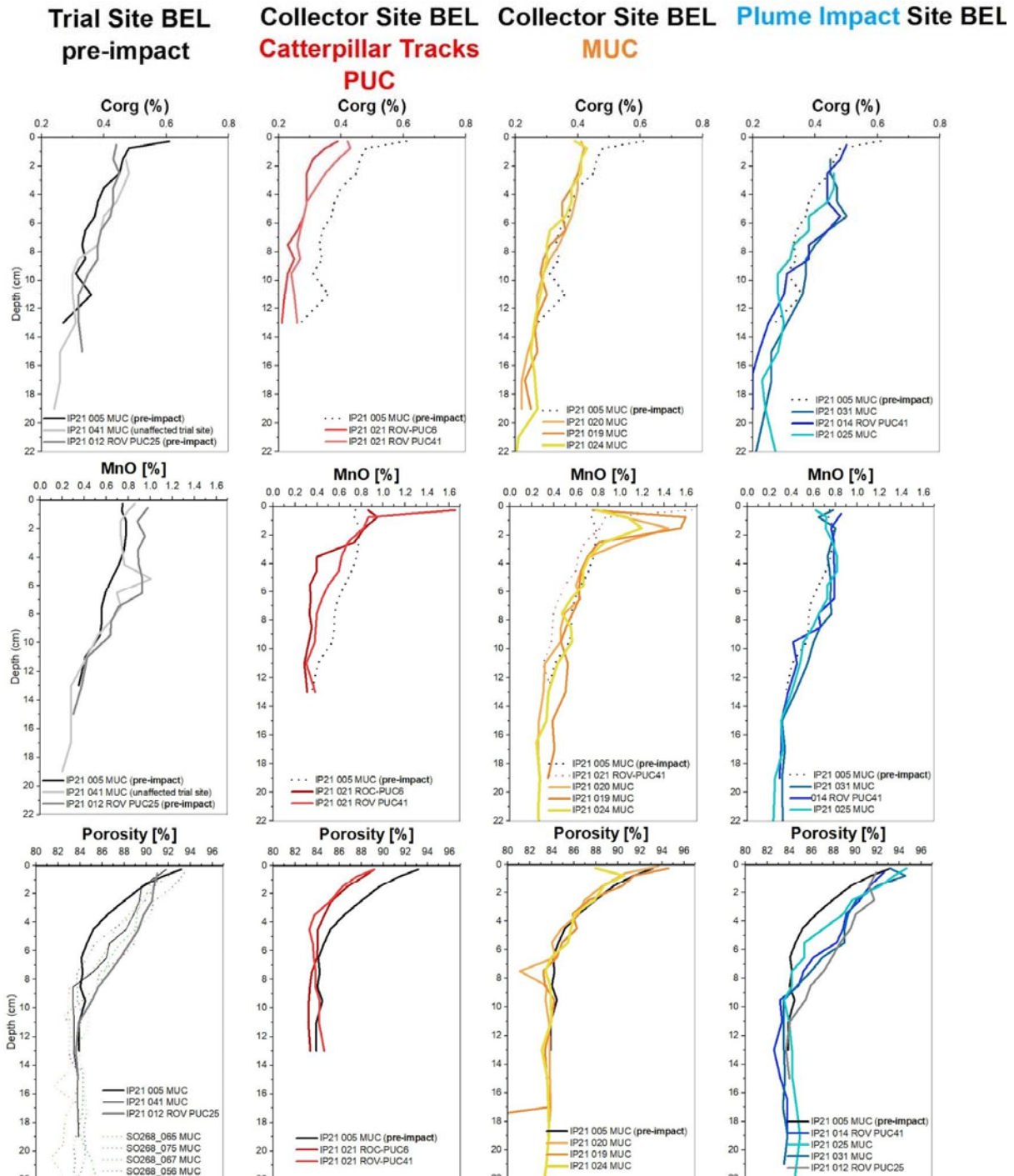


Abb. 2.1: Tiefenprofile von Corg, MnO, und Porosität der Oberflächensedimente im belgischen Testgebiet vor (trial site pre-impact) und nach dem Test im Kollektorgebiet (collector site) in den Spuren (caterpillar tracks) und im Sedimentablagerungsgebiet (plume impact site).

Sedimentkerne, die mit ROV-Pushcores (PUC) in den Fahrspuren des Kollektors genommen wurden, zeigen eindeutig die Entfernung von Oberflächensediment, da sie im Vergleich mit den Baseline-Daten (pre-impact) nach oben verschoben sind, und eine Sedimentablagerung von 2-3 cm, die direkt hinter dem Kollektor aus der Suspensionswolke stattfindet. In den beprobten Kernen gleicht sich Sedimententfernung und –wiederablagerung in etwa aus, jedoch enthält das abgelagerte Sediment etwas weniger Corg und mehr Manganoxid. In den Kernen außerhalb des Kollektorgebiets, wo sich nur Sediment abgelagert hat, erkennt man ein relatives Verschieben der Profile um mehrere cm nach

unten. Weitere geeignete Indikatorvariablen sind im Porenwasser gelöstes Nitrat, Cu und Mn sowie Radionuklidaktivitäten in der Festphase – letztere werden derzeit noch von den Kollegen am AWI und NIOZ gemessen.

In den Daten aus dem Dredge-Experiment von SO268 ließ sich die entfernte und wieder abgelagerte Sedimentschicht mit den geochemischen Variablen nicht ermitteln, da sie zu gering mächtig war. Die numerischen Modellierungen der Sensordaten durch Kollegen des MARUM schätzt, dass nur wenige mm entfernt und wieder abgelagert wurden (Purkiani et al. 2021; Lefaible et al, submitted). Unsere Beprobungsintervalle an der Oberfläche betragen aber 0.5 bis 1 cm, sind also nicht sensitiv genug. Wir haben daher auf IP21 auch eine senkrechte Beprobung der Sedimente mit Spritzen vorgenommen und diese eingefroren, um so dünnere Schichten zu schneiden und zu messen. Diese Analysen stehen noch aus.

WP3 „Biogeochemistry and ecosystem functioning“

In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern AWI, BGR, JUB und MPI wurden auf den Expeditionen biogeochemische Proben und Messungen an den ungestörten Sedimenten (Baseline-Untersuchungen auf SO268) sowie gestörten Sedimenten des Dredgeexperiments (SO268) und des Kollektortests (IP21) durchgeführt. Der Fokus der Untersuchungen lag bei GEOMAR dabei auf den physikalischen Eigenschaften der Sedimente (z. B. Scherfestigkeit, Porosität, Diffusionsfähigkeit) und den entsprechenden Auswirkungen auf die biogeochemischen Eigenschaften, Prozesse und Flüsse im Sediment (z.B. Bioturbationsaktivität, Remineralisierung organischen Materials, Sauerstoffverbrauch). Die natürliche räumliche und zeitliche Variabilität in den Untersuchungsgebieten zu analysieren, war dabei eine wichtige Aufgabe, um die Auswirkungen direkter (z.B. Kompaktion, Entfernen der reaktiven Sedimentschicht) und indirekter Störungen (Sedimentablagerung) beurteilen und quantifizieren zu können. Die Beprobungsstrategie wurde im Rahmen von CCT3 entwickelt und orientierte sich an prognostizierten Gradienten der Auswirkungen (durch Ablagerung der Sedimentwolke). Auf den beiden Expeditionen wurden Sedimentproben mittels Multicorer und ROV-Pushcores sowie 5-m lange Schwerelote gewonnen, insgesamt 70 Kerne mit über 1000 Proben.

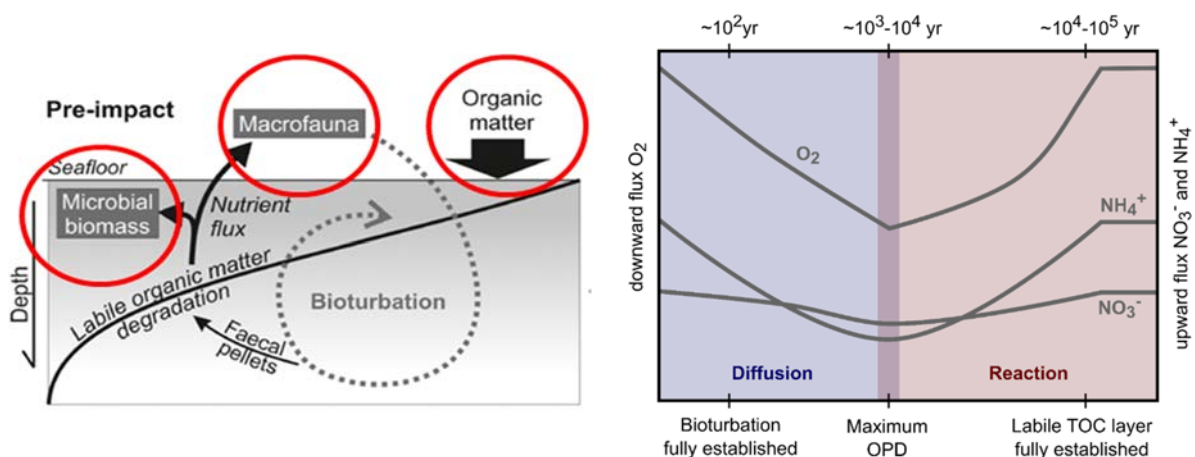


Abb. 3.1: (links) Schematische Darstellung der Interaktion von Makrofauna-Bioturbation auf die biogeochemischen, mikrobiellen Prozesse im Sediment, die wiederum die Nährstoffe für die Fauna liefern (Haffert et al. 2020). (rechts) Konzeptionelle Darstellung der zeitlichen Auswirkungen von Tiefseebergbau durch Entfernen der reaktiven Oberflächenschicht auf die biogeochemischen Prozesse, allen voran den Organikabbau, der durch Sauerstoff- und Nährstoffprofile im Porenwasser angezeigt wird (Volz et al. 2020).

Bioturbation ist ein Schlüsselprozess, der die Struktur und die Funktionen des benthischen Ökosystems beeinflusst, indem er die Biogeochemie der Sedimente, wie z. B. die Remineralisierung organischen Materials, die Nährstoffflüsse und den Sauerstoffverbrauch, sowie die physikalischen Sedimenteigenschaften, wie Porosität und geomechanische Festigkeit, steuert (Abb. 3.1). Die Durchmischung des Oberflächensediments durch die Makrofauna bringt frisches (labiles) organisches Material in tiefere Sedimentschichten, wodurch sich die Reaktionszone und die Zeit für die Remineralisierung von organischem Kohlenstoff vergrößern. Dies bestimmt die Effektivität des Sauerstoffverbrauchs und die gesamte Redoxzonierung in den Oberflächensedimenten (Haeckel et al., 2001), wodurch wiederum die mikrobiellen Gemeinschaften und ihre Funktionen gesteuert werden. Durch numerische Modellierung konnte quantifiziert werden, dass Tiefseebergbau die biogeochemischen Prozesse über Jahrtausende verändert (Abb. 3.1; Haffert et al. 2020; Volz et al. 2020).

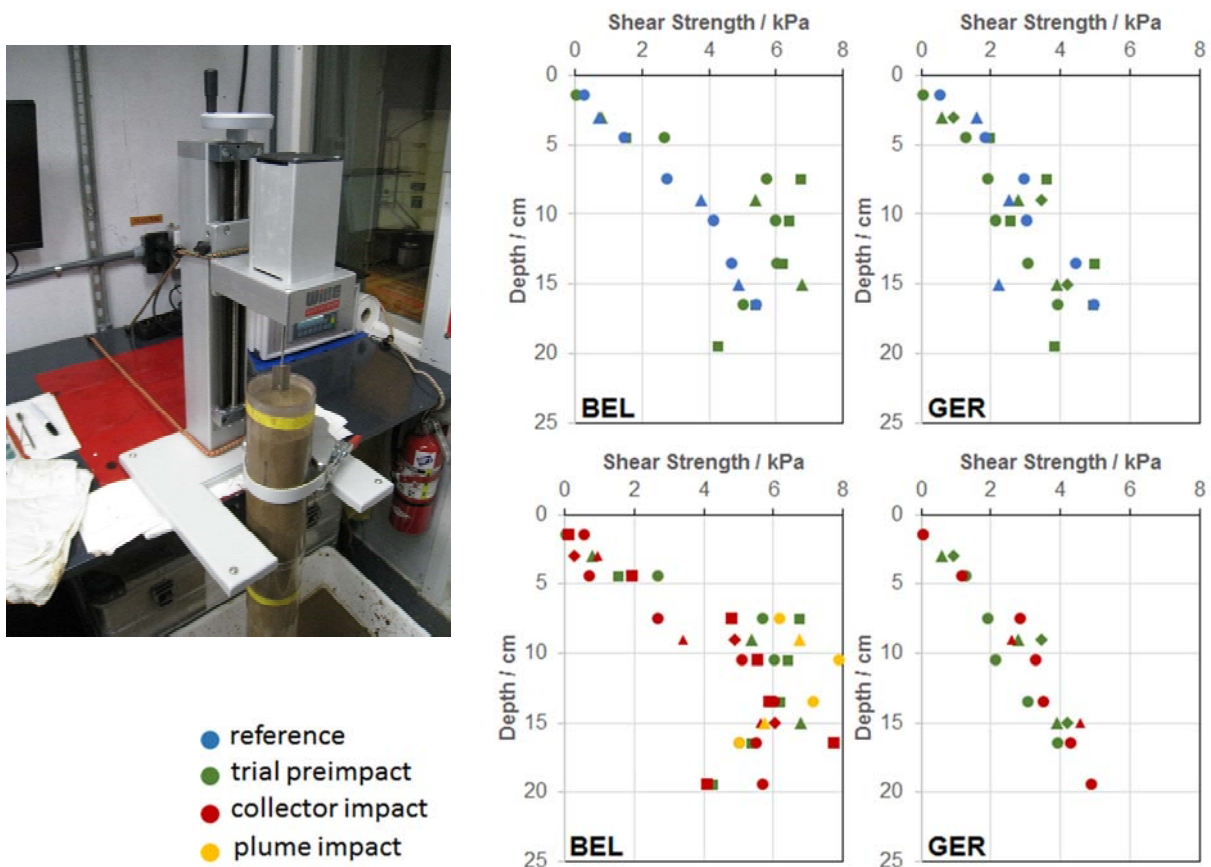


Abb. 3.2: (links) Aufbau zur Messung von Scherfestigkeiten mit Flügelsonden in Multicorer-Kernen an Bord. (rechts) Tiefenprofile der Sediment-Scherfestigkeit in den belgischen (BEL) und deutschen (GER) Referenz- und Testgebieten vor (blau und grün, oben) und nach dem Kollektortest (unten) im Abbaugbiet (rot) und außerhalb (gelb).

Die Analyse der Scherfestigkeit der Oberflächensedimente zielte darauf ab, festzustellen, ob es durch den Kollektor zu einer Kompaktion der darunterliegenden Sedimente kommt, die zum einen den Ausstrom von Porenfluiden induziert, zum anderen aber auch die Diffusionseigenschaften des Sediments verändert (durch Verringerung der Porosität) und darüber hinaus die Wiederbesiedlung durch die Fauna erschweren könnte (wie Ergebnisse aus der 1. Projektphase vermuten lassen). Die Profile zeigen insgesamt typische Verläufe und Werte für Tiefseesedimente mit Mikrostrukturen durch Komponenten, wie Minerale oder Diatomeen, die die Scherfestigkeit erhöhen (Abb. 3.2). Im

belgisches Testgebiet ist die Festigkeit signifikant höher als in den anderen Gebieten. Einzelne stark erhöhte Messwerte (vor dem Kollektortest gemessen) sind auf Manganknollen in den MUC-Kernen zurückzuführen, die die Messungen beeinträchtigten.

Vergleicht man die Messungen der Sedimente vor und nach dem Kollektortest, so ist keine messbare Kompaktion durch das Befahren des Meeresbodens mit dem Kollektor feststellbar. Die Ablagerung der aufgewirbelten Sedimente führte dagegen zu einer Oberflächenschicht mit schwacher Scherfestigkeit, die sowohl in den Kollektorspuren als auch außerhalb im dicker Sedimentablagerungen – basierend auf diesen Daten lässt sich eine Schichtdicke der Ablagerung von etwa 3-5 cm abschätzen. Dies passt gut zu anderen Festphasenvariablen (s. Abb. 2.1). Da die verwendeten Flügelsonden 3 bzw. 5 cm hoch sind, ist dies jedoch keine sehr sensitive Methode zum Bestimmen der Schichtdicke.

Anhand von Radionuklidkonzentrationen in Sedimentproben von SO268 aus dem belgischen und deutschen Gebiet wurden die Sedimentationsrate und die Bioturbationsaktivität bestimmt. Im Rahmen des Projektes wurden hierzu Sedimentproben auf zwei verschiedene Radionuklide analysiert: ^{210}Pb (Halbwertszeit von 22,3 Jahren) und ^{230}Th (Halbwertszeit von 75.380 Jahren). Die mit ^{210}Pb assoziierten Messungen wurden am NIOZ durchgeführt, während die mit ^{230}Th assoziierten Messungen am AWI stattfanden. Zusätzlich wurden jeweils die langlebigeren Radionuklide der relevanten Zerfallskette gemessen, um den excess-Anteil des Signals (*ex*) zu bestimmen: Den Anteil, der nicht im Gleichgewicht mit dem Mutternuklid im Sediment steht, sondern aus dem Eintrag aus der Wassersäule stammt. Dieses excess-Signal wurde dann mit dem Ergebnis eines Transport-Reaktions-Modells verglichen, welches drei verschiedene Prozesse beinhaltet: Den natürlichen radioaktiven Zerfall des Radionukleids, die Sedimentation und die Bioturbation. Für die Modellierung des Bioturbationskoeffizienten *Db* wurde ein Ansatz mit drei Parametern gewählt: $Db = Db_0 * 0.5 * \text{erfc}((x - x_{Db}) / \beta_{Db})$. Hier beschreibt Db_0 den Maximalwert des Bioturbationskoeffizienten, x_{Db} eine charakteristische Tiefe und β_{Db} bestimmt die Steilheit der Abnahme des *Db*. Dieser Ansatz ermöglicht die Modellierung von Bioturbationsprofilen mit einer gewissen Variabilität in der Kurvenform, die somit an die unterschiedlichen Aktivitäten von verschiedenen Spezies angepasst werden kann.

Für die Modellierung wurden die gemessenen Sedimentkerne in drei Gruppen unterteilt: Kerne aus dem deutschen Lizenzgebiet (GER), Kerne aus dem belgischen Lizenzgebiet (BEL) und Kerne aus dem deutschen Lizenzgebiet im Bereich ohne Manganknollen (No Nodules). Da es bei der Bergung des Schwerelots zum Verlust der obersten Sedimentschicht kommt, wurden die Daten um 28 cm (GER) bzw. 20 cm (No Nodules) verschoben, um ihren Verlauf an den Trend der MUC-Kerne anzupassen. Die 84GC Daten aus dem belgischen Gebiet ließen sich dabei weniger gut an den Verlauf der MUCs angleichen.

Die Modellierung ergibt für das deutsche Lizenzgebiet (Abb. 3.3a) Sedimentationsrate von 0.31 cm/ka. Die Bioturbationstiefe (bei der die Durchmischung des Sediments vernachlässigbar wird) beträgt etwa 7,5 cm. Im No Nodules Gebiet (Abb. 3.3b) ergibt sich eine etwas geringere Sedimentationsrate von 0.23 cm/ka und eine Bioturbationstiefe von ca. 7 cm. Der maximale Bioturbationskoeffizient an der Sedimentoberfläche ist sehr ähnlich, ca. 0.14 cm²/a. Im belgischen Gebiet (Abb. 3.3c) ergibt sich eine geringere Bioturbationstiefe von etwa 5,4 cm und eine Sedimentationsrate von 0.38 cm/ka. Das maximale *Db* liegt bei 0.15 cm²/a. Da hier keine GC-Daten für die Anpassung der Simulation zur Verfügung standen, ist die Bestimmung der Sedimentationsrate mit höherer Unsicherheit behaftet.

Die Bioturbationstiefen korrelieren mit den ersten Abschätzungen der entfernten Sedimentschicht in den Kollektortestgebieten. Dies erscheint plausibel, da die Bioturbationsaktivität die Sedimentfestigkeit in diesem Horizont herabsetzt, beim Manganknollenabbau also diese aktive und weniger feste Schicht leichter mit entfernt werden kann.

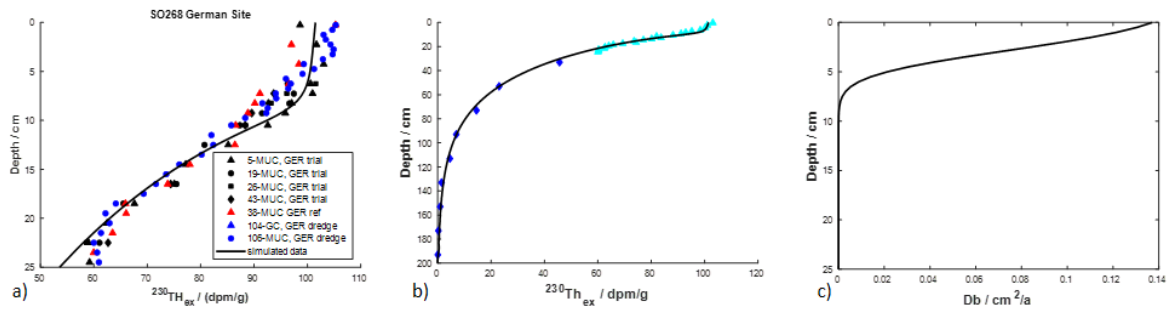


Abb. 3.3a: Ergebnisse der Bioturbationsmodellierung für das deutsche Gebiet: a) Messwerte für alle Multicorer-Kerne (MUC) mit Modellrechnung, b) Messwerte des Gravity Cores 104-GC (dunkelblaue Symbole) und gemittelte Kurve über alle MUCs (hellblaue Symbole) mit Modellrechnung, c) Bioturbationskoeffizient in Abhängigkeit von der Sedimenttiefe.

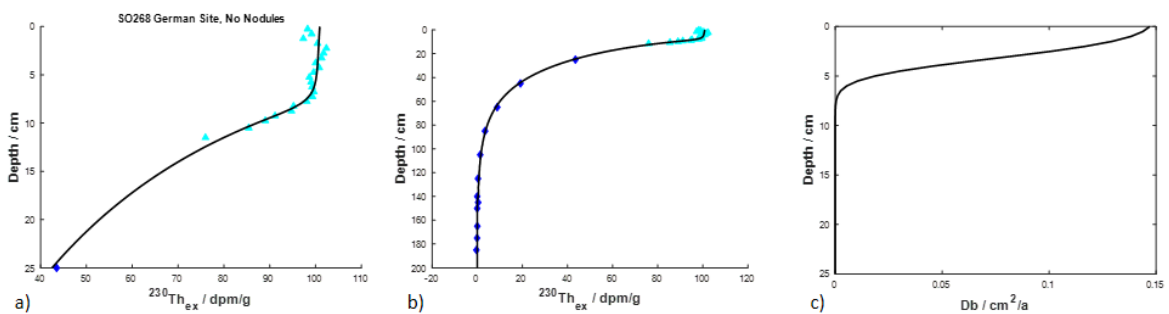


Abb. 3.3b: Ergebnisse der Bioturbationsmodellierung für das deutsche No Nodule Gebiet: a) Messwerte für den Kern 158PC mit Modellrechnung, b) Messwerte der Kerne 157-GC (dunkelblaue Symbole) und 158PC (hellblaue Symbole) mit Modellrechnung, c) Bioturbationskoeffizient in Abhängigkeit von der Sedimenttiefe.

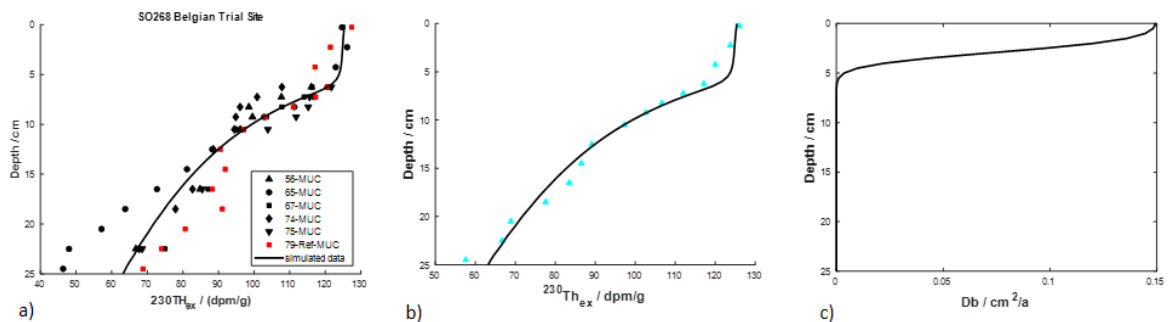


Abb. 3.3c: Ergebnisse der Bioturbationsmodellierung für das belgische Gebiet: a) Messwerte für alle Multicorer-Kerne (MUC) mit Modellrechnung, b) G Kurve über alle MUCs mit Modellrechnung, c) Bioturbationskoeffizient in Abhängigkeit von der Sedimenttiefe.

Da die verschiedenen Geochemie-Daten aus dem Dredgeexperiment keine konsistente Bestimmung bzgl. der Sedimentmobilisierung und –ablagerung erlaubten, wurde hierzu zunächst keine Modellierung angestrebt. Basierend auf den Ergebnissen der Plumemodellierung durch MARUM (Purkiani et al. 2021) flossen die geochemischen Daten aber in die Diskussion der Auswirkungen auf Meiofauna ein und die wissenschaftlichen Unsicherheiten beim Festlegen von Grenzwerten (Lefaible

et al., submitted). Im Rahmen der Arbeiten von CCT2 wurde zudem ausgiebig diskutiert, wie die beobachtete räumliche und zeitliche Variabilität in der Tiefsee beim Design der Beprobungsschemata für Baseline und in Konsequenz bei der Bewertung von Schäden berücksichtigt werden sollte. Diese Ergebnisse haben wir u.a. in den Entwurf der Baseline Guidelines zum ISA Mining Code (ISBA 27/C/5) einfließen lassen.

Konzeptionell lässt die Modellierung der biogeochemischen Prozesse unter CCZ-Bedingungen erwarten, dass nach Abtragen der Oberflächensedimente mit den Manganknollen Sauerstoff in die Sedimente eindringt und sich die Nährstoffflüsse erniedrigen (Volz et al., 2020). Erst nach mehreren Tausend Jahren neuer Sedimentation von labilem organischem Material erholt sich das System wieder auf einen Zustand vor dem Eingriff. Die Erholung hängt dabei stark von der Tiefe des Abbaus, dem Eintrag von labilem Corg und der Erholung der Bioturbation durch Fauna ab (Abb. 3.1). D.h. im dt. Gebiet wird mehr labiles Corg als im belg. Gebiet abgelagert, wodurch eine schnellere Erholung der Stoffflüsse zu erwarten wäre, dafür ist aber im belg. Gebiet aufgrund des geringeren Sauerstoffflusses auch die Änderung durch den Abbau geringer. Die explizite Modellierung anhand der Daten des Kollektortests ist noch nicht abgeschlossen, da noch nicht alle erforderlichen Daten (z.B. Radioisotope, solide Quantifizierung der entfernten und wieder abgelagerten Sedimentschicht) vorliegen bzw. während IP21 im deutschen Gebiet eine ausreichende Beprobung nach dem Test zeitlich nicht mehr möglich war – dies findet auf der SO295 im Oktober-Dezember 2022 statt.

WP4 „Data and sample management“

Zu Beginn des Projektes wurde ein Datenmanagementplan für die gemeinsame Nutzung und Archivierung der im Projekt erhobenen Forschungsdaten vereinbart. Alle Projektdaten werden spätestens zwei Jahre nach Abschluss des Projekts öffentlich zugänglich gemacht (M4.1).

Der zentrale Einstiegspunkt für alle im Zusammenhang mit dem Datenmanagement durchgeführten Arbeiten ist das Ocean Science Information System (OSIS-Kiel), welches am GEOMAR gehostet wird. Für jede Ausfahrt wurde in OSIS eine Übersicht angelegt, die jeweils die Stationslisten beinhaltet, so dass eine Zuordnung der Forschungsdaten anhand einheitlicher Stationsnummern stattfinden kann. Außerdem wurde eine Liste der zu erwartenden Data Deliverables mit den Geräten, Parametern sowie verantwortlichen Wissenschaftler/innen und Fälligkeitsdaten erstellt. Diese Übersichten fungierten als kontinuierlich fortgeschriebener Datenmanagementplan und sind für alle Projektmitglieder sichtbar. Die Datensätze mussten auf OSIS innerhalb von sechs Monaten nach Ende der Ausfahrt oder bis zum 15. Monat (M4.2) hochgeladen werden. Automatisierte Erinnerungen an den zeitlich vereinbarten Datenupload wurden per E-Mail quartalsweise an die verantwortlichen Wissenschaftler/innen gesendet. Regelmäßig wurde auf den Annual Meetings ein aktueller Stand der Datenbestände vorgetragen und in persönlichen Kontakten an den Upload der Forschungsdaten erinnert. Aufgrund von Verzögerungen in der Datenverarbeitung und -analyse wurden die Zeitpläne im Datenmanagementplan in kontinuierlicher Rücksprache mit den verantwortlichen Wissenschaftler/innen und dem Koordinator angepasst. Sobald die Datensätze fertig bearbeitet waren oder veröffentlicht wurden, wurden sie bei PANGAEA gemäß den FAIR Prinzipien publiziert. Dort können die Datensätze mit einem Moratorium von bis zu zwei Jahren nach Projektende versehen werden, anschließend werden die Datensätze öffentlich zugänglich gemacht (D4.2).

Insgesamt war der Datenfluss innerhalb des Projektes sowie zur Langzeitarchivierung in sehr gut. Die gemeinsam genutzten Datensätze wurden von den Wissenschaftler/innen kontinuierlich hochgeladen und sind je nach Status und Art in den verschiedenen Datenbanksystemen (PANGAEA, OSIS, BIIGLE, ELEMENTS) verfügbar. Etwa 90 Dateien, die von den Projektpartnern gemeinsam genutzt werden sollen, wurden in das Ocean Science Information System (OSIS) (<https://portal.geomar.de/osis>) hochgeladen. Rund 100 TB an Videos und Bildern wurden in der ELEMENTS-Mediendatenbank am GEOMAR archiviert. Alle Bilder wurden den Wissenschaftler/innen

über lokale Instanzen der Bildverarbeitungssoftware BIIGLE zur Verfügung gestellt (D4.1). Insgesamt sind für das Projekt (Phase 1+2) über 480 Datensätze in PANGAEA veröffentlicht (<https://pangaea.de/?q=project%3AJPIO-MiningImpact>) und damit langfristig verfügbar (Abb. 4.1+4.2). Die Datensätze sind bis zur Veröffentlichung in Publikationen mit einem Moratorium versehen. Viele Datensätze sind bereits mit Publikationen verknüpft und frei verfügbar. Diese Liste ist auf der Webseite des Projektes einsehbar. Weitere Datensätze werden kontinuierlich bei PANGAEA eingereicht und veröffentlicht. Desweiteren ist eine Sammlung von Links zu Datensätzen in BOLD (Barcode of Life Data System) auf der internen Website des Projektes verfügbar. Bei öffentlicher Verfügbarkeit dieser Datensätze wurden die Informationen auch in OSIS und bei den entsprechenden Publikationen hinterlegt.

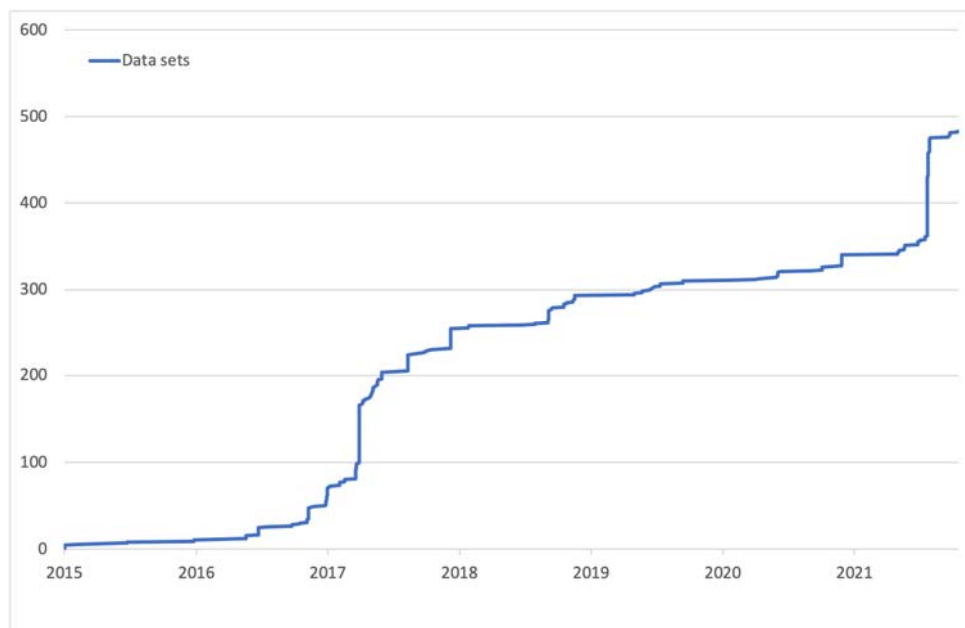


Abbildung 4.1: Veröffentlichte Datensätze in PANGAEA während der 1. und 2. Projektlaufzeit (2015-2018 und 2018-2022).

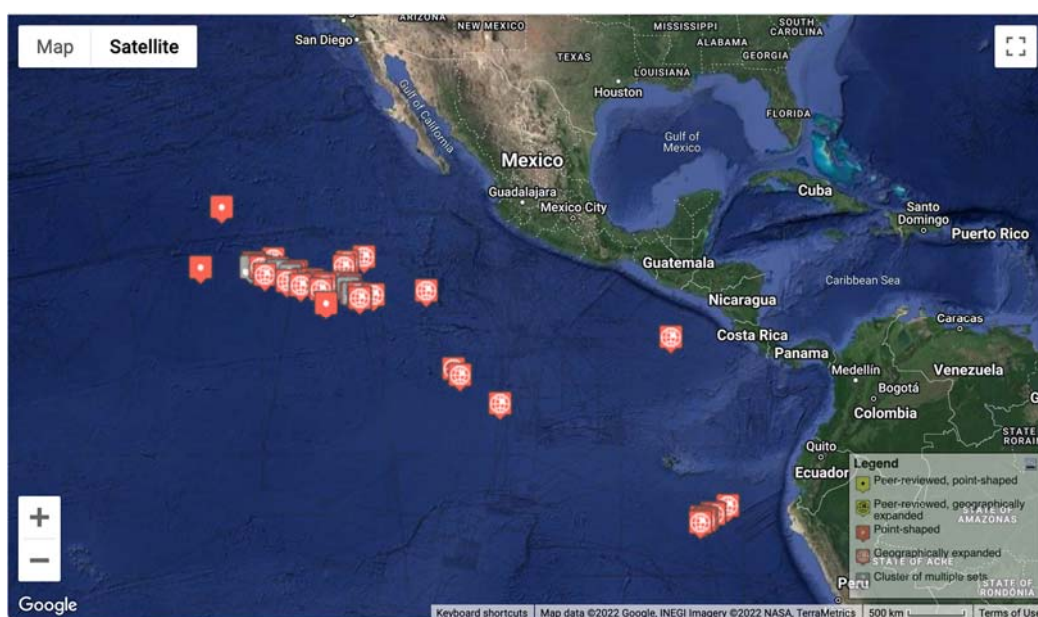


Abbildung 4.2: Georeferenzierte Datensätze in PANGAEA (SO239, SO242, SO268, IP21).

Die erhobenen Rohdaten der Ausfahrt SO268, wie z.B. Stationslisten und bathymetrische Daten, sind entsprechend der Vorgaben und des für SONNE-Fahrten üblichen Prozedere in den Datenbanken PANGAEA und BSH archiviert worden (D4.1). In der BSH Datenbank können die Informationen über die Ausfahrt unter folgendem Link eingesehen werden <https://csr.seadatanet.org/>.

SO268/1: CSR REF-NO: 20190056

SO268/2: CSR REF-NO: 20190057

Der Fahrtbericht von SO268 ist als GEOMAR Bericht verfügbar und mit einer DOI zitierbar (D4.1):

https://doi.org/10.3289/GEOMAR_REP_NS_59_20

Der Fahrtbericht von IP21 ist derzeit als BGR-Bericht in Vorbereitung.

Weitere Informationen zu den Ausfahrten (Stationsliste, Daten, Links zu Publikationen, veröffentlichten Datensätzen und andere Datenbanken) sind öffentlich in OSIS verfügbar:

SO268/1: <https://portal.geomar.de/metadata/leg/show/348623>

SO268/2: <https://portal.geomar.de/metadata/leg/show/348628>

IP21: <https://portal.geomar.de/metadata/leg/show/358959>

Die Sedimentkerne (Schwerelote) der SO268 lagern im GEOMAR Core & Rock-Repository und wurden in das CurationDIS-System aufgenommen, welches mit OSIS-Kiel verlinkt ist. Zusätzlich wurden für die Sedimentkerne IGSNs (International Generic Sample Number) registriert. Mit diesem persistenten Identifikator können die Sedimentkerne in Publikationen eindeutig referenziert werden und sind zentral auffindbar, sie werden auch im Marine Data Portal Sample Viewer zusammen mit anderen Proben gemeinsam angezeigt und sind dadurch besser nachnutzbar.

WP5 „Project dissemination & coordination“

Zum Austausch zwischen den Projektpartnern wurden jährliche Meetings des gesamten Verbundes organisiert, die bis zum Ausbruch der Corona-Pandemie im Februar 2020 in Person stattfanden und danach online. Das Kickoff-Meeting fand in Brüssel im Royal Belgian Museum of Natural Sciences (Partner RBINS) statt, das 1. Annual Meeting in Aveiro. Das 2. Annual Meeting und die Abschlussveranstaltung fanden online statt, was allerdings die Teilnahme von Stakeholdern weltweit ermöglichte und dadurch eine deutlich höhere Teilnehmerzahl von bis zu 180 Personen erreicht wurde. Weitere Projekt- und Teilprojektmeetings wurden von den WP-Leitern organisiert. Zur Vorbereitung der Expeditionen SO268 und IP21 wurden zusätzlich mehrere Treffen abgehalten, für SO268 noch in Person, für IP21 dagegen komplett online. Wider Erwarten kam es erfreulicherweise bei allen online Meetings ebenfalls zu lebhaften Diskussionen und Austausch.

Der Projektkoordinator hat, wie in der ersten Phase, die Ergebnisse und daraus abgeleitete Handlungsoptionen und Vorschläge für Regularien zum Tiefseebergbau bei vielfältigen Veranstaltungen zu präsentiert und vertreten. Aufgrund der Anfang 2020 ausgebrochenen Corona-Pandemie fanden seitdem Veranstaltungen ausschließlich online statt, was oft nur wenig Möglichkeit zur Diskussion bot. Auf der anderen Seite gab es viele Einladungen zu online Veranstaltungen und direkten Webmeetings mit verschiedenen Interessengruppen (z.B. Pew Trust, Deep-Sea Conservation Coalition, WWF, Greenpeace, Fair Oceans, Misereor, Forum für Umwelt und Entwicklung, BUND, Ozeaniendialog).

Da der Kollektortest 2019 ausfiel, wurde entschieden, kein eigenes Side Event beim ISA Annual Meeting im Juli 2019 zu organisieren, sondern dies auf einen Termin nach erfolgtem Test zu verschieben. The Pew Trust richtete 2019 aber ein Side Event beim ISA Annual Meeting aus und hat den Projektkoordinator eingeladen, hieran teilzunehmen und die Projektergebnisse vorzustellen. Seit Beginn der Pandemie hat die ISA leider keine Side Events mehr zugelassen. Dieses Jahr ist es uns aber

zusammen mit DEME-GSR gelungen, die ISA davon zu überzeugen, uns im Rahmen ihrer Veranstaltung zum World Ocean Day im Juni 2022 einen Block von 2 Stunden zur Verfügung zu stellen, um die Ergebnisse der Expeditionen und des Kollektortests zu präsentieren. Weitere Informationsveranstaltungen für Stakeholder zur Monitoring-Kampagne und dem Kollektortest haben wir im November 2018 vor der SO268, im Januar 2021 vor der IP21 und im Februar 2022 durchgeführt. Diese waren alle sehr gut besucht und haben zu sehr regen und intensiven Diskussionen geführt. Projektergebnisse wurden zudem auf internationalen wissenschaftlichen Konferenzen, wie der Goldschmidt 2021 und dem Deep-Sea Biology Symposium 2019 und 2021 präsentiert. Von der SO268 wurde zudem ein Video mit Interview für die BMBF FONA-Konferenz im Mai 2019 produziert.

Interviewanfragen von Journalisten von Print- und Online-Medien, Radio und Fernsehen sowie Filmemachern waren sehr viel zahlreicher als in der 1. Projektphase. Während auf der SO268 ein Medienstudent der FH Kiel teilnahm, der Interviews für die Projektwebseite erstellt hat, nahmen an der IP21 zwei Journalisten der ARD/SWR teil. Hieraus resultierte eine 90-minütige Dokumentation „Gier nach Meer“, die am 26. Juli 2022 auf arte TV ausgestrahlt wurde.

Die Projektwebseite (<https://miningimpact.geomar.de>) wurde regelmäßig aktualisiert und der interne Bereich wurde zum Austausch von unveröffentlichten Projektdaten (s. WP4) und Präsentationsmaterial von Projektmeetings genutzt. Derzeit ist in Zusammenarbeit mit Partner UNEP GRID Arendal eine interaktive Informationswebseite zu Tiefseebergbau und seinen Umweltauswirkungen im Aufbau, die von Grid Arendal gehostet wird.

Auch in der 2. Projektphase gelang wieder eine Zusammenarbeit mit Künstlern, diesmal u.a. mit den belgischen Theaterkünstlern Silke Huysman und Hannes Dereere (<http://silkehuysmanshannedereere.com>). Das realisierte Projekt „Out of the Blue“ hatte im Mai 2022 in Brüssel Premiere und ist derzeit auf einer Tournee durch Europa bis Ende 2023 zu sehen.

Ein Sonderband zur gemeinsamen Publikation von Projektergebnissen ist im internationalen Peer-Review Journal „Frontiers in Marine Science“ eröffnet.

Die folgende Aufstellung beinhaltet alle von GEOMAR ausgeführten Aktivitäten.

Künstlerprojekte und Ausstellungen

Silke Huysman & Hannes Dereere theatre play “Out of the Blue”, premiere May 2022 in Brussels, Europe tour 2022 and 2023, <http://silkehuysmanshannedereere.com>

Armin Linke video installation "Broken Nature" in the German Pavilion of the Triennale 2019 in Milan, <https://www.triennale.org/en/events/carceri-dinvenzione/>

DEEPWAVE Film Festival for the Protection of the Oceans 2019 <https://www.deepwave.org/projekte/deepwave-filmfestival/>

Fast Forward Science 2019 video competition by Wissenschaft im Dialog, <https://www.youtube.com/watch?v=YiJOUbdi4J0>

Helmholtz Association Science Picture of the Month in September 2019.

Interactive posters for the Ocean Academy on board the Hapag Lloyd ships HANSEATIC nature, HANSEATIC inspiration and HANSEATIC spirit, <https://www.hl-cruises.de/blog/hanseatic-nature-the-study-wall-of-the-ocean-academy>

Science Picture of the Month of the Helmholtz Association in March 2020.

Exhibition and brochure "Deep Sea and Marine Research" at the Senckenberg Museum Frankfurt, incl. public talk on 27 January 2021.

Exhibition at the Deutsches Museum in Nuremberg, "Station Tiefseeexploration".

Material for a touch table of the BMBF.

Autun Purser, 2nd prize at JPI-Oceans Photo and Art Awards 2021.

Sarah Marie Kröger, participation at ISA Art Competition 2022.

Print und online Medien

<https://www.nature.com/articles/d41586-019-00757-y>

<https://www.nature.com/articles/d41586-019-02242-y>

<https://www.newscientist.com/article/2192495-deep-sea-mining-could-wreck-the-last-unexplored-ecosystem-on-earth/>

<https://science.sciencemag.org/content/363/6432/1129.full>

<https://www.sciencemag.org/news/2019/03/bus-size-robot-set-vacuum-valuable-metals-deep-sea>

https://www.bbc.co.uk/news/resources/idt-sh/deep_sea_mining

<https://www.the-scientist.com/news-opinion/proposed-deep-sea-mining-zone-harbors-previously-unknown-species-66584>

<https://www.apache.be/?p=101148>

<https://www.levif.be/actualite/magazine/ruee-mini%C3%A9re-sur-les-abysses/article-normal-1189241.html>

<https://www.nzz.ch/wochenende/schwerpunkt/tiefseebergbau-die-letzte-landnahme-ld.1512041>

<https://www.bazonline.ch/wissen/natur/das-rennen-um-einen-tiefseeschatz/story/15764059>

Regionale und überregionale Tageszeitungen, RND (Redaktions Netzwerk Deutschland) im September 2019

<https://www.zeit.de/2019/48/tiefseebergbau-tiefsee-rohstoffe-meeresboden>

<https://www.zeit.de/2019/23/kobalt-manganknollen-rohstoff-smartphones-elektroautos>

<https://www.sueddeutsche.de/wissen/rohstoffe-das-rennen-um-die-tiefseeknoedel-1.4536105?reduced=true>

<https://www.sueddeutsche.de/wissen/tiefseebergbau-moratorium-nautilus-1.4631999>

<https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/abbau-von-manganknollen-ressourcenrausch-in-der-tiefsee-a-1262034.html>

<https://www.spektrum.de/news/tiefseebergbau-projekt-komplett-gescheitert/1675750>

<https://www.spektrum.de/magazin/interview-abbau-von-manganknollen-in-greifbarer-naehe/1681218>

<https://www.noz.de/deutschland-welt/politik/artikel/1870856/im-rausch-der-tiefe-maritimer-bergbau-zwischen-chance-und-risiko>

<https://magazin-forum.de/de/node/16330>

<https://www.wissenschaft.de/magazin/natur-archiv/geister-der-meere/>

<https://www.riffreporter.de/anthropozoen/tiefsee-bergbau-umwelt/>

<http://www.bbc.com/future/article/20201202-deep-sea-mining-tracks-on-the-ocean-floor>

<https://www.scientificamerican.com/article/deep-sea-mining-how-to-balance-need-for-metals-with-ecological-impacts/>

<https://krautreporter.de/3358-die-menschheit-moechte-rohstoffe-im-meer-fordern-und-hat-keine-ahnung-was-sie-da-tut>

P.M. Magazin 08/2020 “Alle wollen diese Knollen“

Stuttgarter Zeitung, 18. September 2020

<https://www.mo.be/fr/longread/la-belgique-en-eaux-profondes>

<https://www.republik.ch/2020/11/13/golddrausch-in-der-blauen-welt>

<https://www.morgenbladet.no/ideer/kronikk/2022/02/10/gruvedrift-pa-havbunnen-er-irreversibelt-tap-av-natur/>

<https://www.derstandard.de/story/2000134317544/meeresforscher-haeckel-wir-finden-bei-jeder-forschungsfahrt-100-neue-arten>

https://www.focus.de/magazin/archiv/rohstoffe-caspers-knoellchen_id_77058596.html

https://issuu.com/greenpeace-switzerland/docs/gp_magazin_04_2021_de_es/1?ff

<https://www.geo.de/heftreihen/geolino-magazin/geolino--tiefsee-in-gefahr-32617840.html>

<https://taz.de/Meere-als-Bergbaureviere/!5822108&SuchRahmen=Print/>

<https://www.lalibre.be/planete/environnement/face-a-l-entreprise-belge-gsr-en-pleinpacifique-greenpeace-proteste-contre-les-projets-miniers-dans-les-fonds-marins-607058a19978e2410f5bb08b>

<https://news.mongabay.com/2021/10/antithetical-to-science-when-deep-sea-research-meets-mining-interests/>

<https://www.nationalgeographic.de/umwelt/2021/05/golddrausch-in-der-tiefe-der-meeresgrund-als-rohstoffquelle>

<https://www.nationalgeographic.com/environment/article/proposed-deep-sea-mining-would-kill-animals-not-yet-discovered>

<https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/tiefsee-forscher-finden-hinweise-auf-zahllose-unbekannte-arten-a-0993d6a8-9c85-4108-bbbf-901bf4a89f5d>

TV, Radio, Videos, Podcasts

<https://www.arte.tv/de/videos/098421-000-A/die-gier-nach-meer/>

<https://www.zdf.de/nachrichten/zdf-morgenmagazin/moma-future-bergbau-am-meeresgrund-100.html>

<https://www.cbsnews.com/news/rare-earth-elements-u-s-on-sidelines-in-race-for-metals-sitting-on-ocean-floor-60-minutes-60-minutes-2019-11-17/>

<https://www.br.de/radio/bayern2/rohstoffabbau-in-der-tiefsee-waere-umweltzerstoerung-100.html>

<https://www1.wdr.de/mediathek/audio/wdr5/quarks/hintergrund/audio-schaetze-aus-der-tiefsee---von-manganknollen-und-urviechern-100.html>

<https://www.ardaudiothek.de/episode/wdr-5-quarks-hintergrund/tiefseebergbau-hat-ungewisse-folgen/wdr-5/59862464/>

https://www.deutschlandfunk.de/tiefseebergbau-greenpeace-warnt-vor-rohstoff-ausbeutung-im.697.de.html?dram:article_id=452898

https://www.deutschlandfunkkultur.de/tiefseebergbau-im-pazifik-wettrennen-um-die-letzten.979.de.html?dram:article_id=465529

<https://www.br.de/radio/bayern2/programmkalender/ausstrahlung-2171198.html>

https://www.deutschlandfunk.de/schaetze-am-meeresgrund-ist-tiefseebergbau-die-zukunft.724.de.html?dram:article_id=481319

WDR 5 Quarks, November 2020

<https://twitter.com/RadioTeleSuisse/status/1357286025274535936>

Documentary „From the Abyss to the Moon“, Quentin Noirfalisie & Laura Cole

<https://scilogs.spektrum.de/klartext/elektro-hard-rock-und-heavy-metal/>

https://www.levif.be/actualite/sciences/course-a-la-science-dans-les-abysses-quid-du-deep-sea-mining-enquete/article-normal-1427327.html?cookie_check=1646297941

<https://www.youtube.com/watch?v=9iy5jEHWykQ>

<https://www.swr.de/swr2/wissen/mangan-knollen-ernte-in-der-tiefsee-stoert-das-oekosystem-100.html>

<https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/tiefsee-bergbau-manganknollen-101.html>

<https://www.butenunbinnen.de/videos/tiefsee-bergbau-forschung-meer-100.html>

https://themenspezial.eskp.de/fileadmin/user_upload/PDFs/rohstoffe/ESKP-Rohstoffe-in-Tiefsee.pdf

<https://www.deutschlandfunk.de/metallvorkommen-in-der-tiefsee-abbau-von-manganknollen-100.html>

<https://www.deutschlandfunk.de/meeresschutz-forum-der-meeresregionen-will-ozeane-schuetzen-100.html>

<https://www.ardaudiothek.de/episode/wdr-5-quarks-hintergrund/tiefseebergbau-hat-ungewisse-folgen/wdr-5/59862464/>

https://youtu.be/bUcK_THAPNQ (In Too Deep - The True Cost of Deep Sea Mining, Deep-Sea Conservation Coalition)

<https://detektor.fm/wissen/zurueck-zum-thema-tiefseebergbau>

https://www.youtube.com/watch?v=9iy5jEHWykQ&ab_channel=DWPlanetA

<https://www.dw.com/de/manganknollen-der-schatz-der-tiefsee/av-60912247>

<https://www.dw.com/de/abbau-auf-dem-meeresboden-tiefsee-in-gefahr/av-62818870>

<https://www.deutschlandfunk.de/mangan-gewinnung-bergbau-in-der-tiefsee-koennte-bald-100.html>

<https://www.ndr.de/nachrichten/info/Manganknollen-Sorge-um-Tiefsee-Bergbau,ndrinfo18802.htm>

<https://www.ndr.de/fernsehen/sendungen/das/In-der-Kritik-Manganknollen-Gewinn-durch-Tiefseebergbau-,dasx24632.html>

Panel Diskussionen, Konferenzen, Workshops

JPI-Oceans Conference "Increasing the impact of European investments in marine and maritime research - What's on the Horizon?", Brussels, 17 January 2019.

UBA expert meeting "Assessment benchmarks for the impact of mining projects on the deep seabed on marine ecosystems", Hamburg, 29 January 2019.

BMBF FONA Conference "Marine biodiversity - What protection does the high seas need? Ocean Governance in the Conflict between Protection and Utilization", Berlin, 14 May 2019.

BMBF exchange meeting "Integration of deep-sea research into regulatory processes at the Seabed Authority", Bremerhaven, 24 June 2019.

IASS Workshop "Developing regional environmental management plans in the field: an approach to legal and substantive issues", Potsdam, 2 July 2019.

ISA Annual Meeting Side Event, The Pew Charitable Trusts & DOSI, Kingston, 18 July 2019.

ISA Workshop "Deep CCZ Biodiversity Synthesis", Friday Harbor, 1-4 October 2019.

IASS International Expert Workshop "Towards a standardized approach to Regional Environmental Management Plans in the Area", Hamburg, 11-13 November 2019.

Fair Oceans discussion event "The Deep Sea in Distress? Deep-sea mining and the International Seabed Authority between resource, climate and Marine Conservation Policy", Bremen, 10 December 2019.

World Economic Forum Virtual Ocean Dialogues "Deep Dive Session", online, 3 June 2020.

Hearing in the Belgian Parliament on deep-sea mining, online, 24 June 2020.

40th DIN meeting, Presentation and discussion on deep sea mining, online, 1 December 2020.

DOSI Panel Discussion "Treasures of the deep: life and rocks" (<https://www.dosi-project.org/deep-sea-mining-webinar>), online, 21 January 2021.

International VISTA Seminar "Subsea floor processes and a sustainable ocean" panel discussion, Oslo, 17 November 2021.

ISA UN World Ocean Day, Panel Discussion, online, 8 June 2022.

Öffentliche Vorträge und Vorlesungen

Vortrag "Umweltauswirkungen von Tiefseebergbau", Naturwissenschaftliche Gesellschaft Winterthur, 21 January 2022.

Vortrag "Umweltauswirkungen von Tiefseebergbau", GEOMAR „Wissen Schaffen“ Seminar, 29 September 2021.

Vortrag "Environmental impacts and risks of deep-sea mining", Lunchtime Seminars, Department of Geology, Trinity College Dublin, 3 December 2021.

Vorlesung mageoMaSus: Marine Geosciences & Sustainability, Master Program Geosciences and Marine Geosciences, CAU Kiel, Sommersemester 2020, 2021, 2022.

CCT1 "Plume monitoring & habitat/disturbance characterization"

GEOMAR war in CCT1 für die Aktivitäten verantwortlich, die wissenschaftlich in WP2 bearbeitet wurden. Im Antrag sind diese Aufgaben in sieben spezielle Arbeitsschritte gegliedert: Task 6.1 bis 6.7.

A) Planung der Expeditionen im Hinblick auf einen Umweltmanagement- und -überwachungsplan (EMMP) (Task 6.1, 6.2, 6.3)

GEOMAR hat die wissenschaftliche und logistische Planung der SO268- und IP21-Expeditionen durchgeführt und war für die Planung und Organisation des Sensor-Netzwerks zum Plume-Monitoring verantwortlich. Vor jeder Expedition wurden alle verfügbaren ozeanografischen und geologischen Daten zusammengestellt sowie die von Projektpartner MARUM durchgeführten prognostischen Modellierungen zur Ausbreitung der Sedimentwolke, welche in Karten mit Wahrscheinlichkeiten der räumlichen Ausbreitung und Sedimentablagerung zusammengefasst wurden. Die Untersuchung dieser Datensätze erlaubte schließlich die erfolgreiche Überwachung der

Sedimentwolken auf beiden Expeditionen und in beiden Untersuchungsgebieten. Vor und nach den Expeditionen fanden mehrere persönliche und virtuelle Treffen mit DEME-GSR statt, die der Planung der Kampagnen und der Optimierung des Post-Processing-Workflows dienten. Auf der IP21 war ein Vertreter von DEME-GSR an Bord, um die Kommunikation zwischen den beiden Schiffen und den Fahrtleitungen zu erleichtern (Task 6.1). Die beiden Task 6.2 und 6.3 sind unter WP2 beschrieben. Milestone M6.1 wurde im Rahmen von Task 6.2 erreicht.

B) Koordinierung und Sicherstellung der Instrumentenkalibrierung von Sensoren vor/während der Fahrt und Förderung von Vereinbarungen über gemeinsame Datenverarbeitungstechniken und bewährte Verfahren

Laborkalibrierungen der Instrumente wurden vor, während und nach beiden Expeditionen zusammen mit den anderen CCT1-Partnern durchgeführt. Alle optisch basierten Trübungssensoren wurden mit unterschiedlichen Tiefseesedimentkonzentrationen aus dem BGR-Lizenzgebiet kalibriert, wodurch die spezielle Reaktion und Sättigungskonzentration jedes Sensors identifiziert wurde. Die akustisch basierten Sensoren wurden unter Verwendung der kalibrierten optischen Sensoren von derselben Plattform und Position interkalibriert. Die Ergebnisse des Dredgeexperiments wurden in Haalboom et al. (2021) veröffentlicht. Weitere Ergebnisse werden in den kommenden Monaten veröffentlicht.

Die Aufgaben zu den vier Tasks 6.4 bis 6.7 sind bereits in WP2 beschrieben.

CCT2 “Disturbance effects in time and space”

GEOMAR hat sowohl zur integrativen Bewertung der Auswirkungen von Tiefseebergbau als auch der Analyse zur räumlichen und zeitlichen Variabilität von Umweltvariablen beigetragen. Mehrere Workshops wurden in 2020 und 2021 durchgeführt, um die Integration der Ergebnisse zu bewerkstelligen und Probleme beim Beprobungsdesign zu diskutieren.

Der Datensatz biogeochemischer Variablen integriert Sediment- und Porenwasserproben und In-situ-Messungen, die vor und nach dem Dredgeexperiment (SO268) und dem Kollektortest (IP21) durchgeführt wurden. Hierzu zählen (1) die Verfügbarkeit und Frische organischer Substanz (z.B. POC Gehalte und C/N Verhältnisse), (2) die Flüsse von Elektronenakzeptoren des POC-Abbaus (O₂- und NO₃-Konzentrationen), (3) die Abbaugeschwindigkeit von organischem Material, (4) Porenwasserbestandteile, die während des Abbaus organischen Materials und der reduktiven Auflösung von Oxidmineralen freigesetzt werden, (5) Sedimentationsrate und Bioturbationstiefe (²³⁰Th, ²¹⁰Pb), (6) Festphasen-Elementkonzentrationen, (6) physikalische Eigenschaften des Sediments (Porosität, Scherfestigkeit).

Die meisten biogeochemischen Variablen unterscheiden sich zwischen den Lizenzgebieten (>100 km Skala), vor allem bedingt durch die trophischen Unterschiede beim Eintrag von organischem Material. Bei vielen Variablen zeigt sich zudem eine starke Variabilität auf lokaler Ebene (1-10 km Skala) und sogar zwischen Replikaten am selben Ort (10 m Skala). Einige Porenwasservariablen deuten auch eine natürliche zeitliche Variabilität auf beim Vergleich von Daten von 2019 und 2021. Um trotz der natürlichen räumlichen und zeitlichen Variabilität solide Auswirkungen von Störungen identifizieren und quantifizieren zu können, bedarf es ausreichender Beprobungsreplikate, die auch verschiedene Jahreszeiten und Jahre abdecken sollten. Referenzgebiete müssen so gewählt werden, dass sie dies gewährleisten. Analysen verschiedener Variablen sollten möglichst an der gleichen Probe durchgeführt werden (d.h. gleicher Sedimentkern, homogenisierte Sedimente). Biogeochemische Variablen, die zur Bewertung der Auswirkungen auf das Ökosystem herangezogen werden, müssen empfindlich auf die durch die Störung verursachten physikalischen Veränderungen und/oder auf die daraus resultierenden Veränderungen der biogeochemischen Prozesse und Raten reagieren. Zudem hat sich ein Multi-Proxy-Ansatz als robust erwiesen.

Eine Publikation ist der integrativen Analyse und daraus abgeleitete Vorschläge für ISA Guidelines ist in Vorbereitung und soll im geplanten Sonderband in *Frontiers in Marine Science* eingereicht werden. Im Rahmen der Stakeholder-Veranstaltung beim Final Meeting wurde der derzeitige Stand vorgestellt.

Zusätzlich zu den beantragten Arbeiten, haben wir erstmals auch den durch Tiefseebergbau erzeugten Lärm auf die Unterwasserwelt untersucht, da dies ein weiterer Stressor ist, zu dem vorher keine Informationen vorlagen, aber viel spekuliert wurde. Als Teil des Sensornetzwerks haben wir daher Hydrophone vom Projektpartner AWI und Kollegen des Scripps Instituts an einer BGR-Verankerung und dem NIOZ-Lander sowie Ozeanbodenseismometer des GEOMAR am Meeresboden ausgebracht, mit denen die allerersten Daten zur Lärmemission eines Kollektors (inklusive Schiffslärm der Einsatzplattform an der Meeresoberfläche) gemessen wurden. Hierbei hat sich gezeigt, dass der Kollektor vor allem Lärm im Bereich <10 Hz erzeugt, der dadurch zustande kommt, dass der Meeresboden in Vibrationen versetzt wird, wodurch Auswirkungen auf benthische Organismen zu erwarten sind. Im höherfrequenten Bereich bis 2000 Hz überwiegt der Schiffslärm.

Schließlich war GEOMAR auch an der Durchführung des Restorationsexperiments beteiligt, bei dem künstliche Hartsubstrate, Konkretionen aus gebranntem Ton, im deutschen und belgischen Kollektortestgebiet (IP21), dem deutschen Referenzgebiet (SO268), dem No-Nodule Gebiet (SO268) und dem Dredgeexperiment-Gebiet (SO268) ausgebracht wurden. Das Experiment ist detailliert in der Publikation Gollner et al. (2022) beschrieben, da eine Ansiedlung von Organismen voraussichtlich nicht in den nächsten Jahren nachweisbar sein wird, außer vielleicht mikrobieller Bewuchs, also die folgenden Generationen von Wissenschaftlern es hoffentlich fortführen.

CCT3 “Environmental risk assessment & policy recommendations”

Die Arbeiten des Projektpartners CAU Kiel wurden im Rahmen der Bewilligung dem Vorhaben des GEOMAR zugeordnet und fanden im Rahmen von CCT3 statt.

Art. 145 des Seerechtsübereinkommens (SRÜ) sieht die Verpflichtung vor, einen wirksamen Schutz der Meeresumwelt im Gebiet vor schädlichen Auswirkungen von Tiefseebergbau zu gewährleisten. Um dies zu gewährleisten, ist die Internationale Meeresbodenbehörde (ISA) verpflichtet geeignete Regeln, Vorschriften und Verfahren zur Verhütung, Verringerung und Kontrolle der Verschmutzung und anderer Gefahren für die Meeresumwelt sowie zum Schutz und zur Erhaltung der natürlichen Ressourcen des Gebiets und zur Verhütung von Schäden an der Flora und Fauna der Meeresumwelt zu erlassen. Daher muss sich die Behörde bei der Ausarbeitung der Betriebsvorschriften an diesen Grundsatz halten. Sowohl die Verordnung über die Prospektion und Exploration von polymetallischen Knollen im Gebiet als auch der Entwurf der Verordnung über die Ausbeutung von Bodenschätzen im Gebiet wurden auf der Grundlage des Seerechtsübereinkommens entwickelt. Ihre wichtigste Rechtsgrundlage ist Art. 145 SRÜ. Beide Verordnungen greifen auch auf den Vorsorgeansatz zurück, um sicherzustellen, dass ernsthafte Schäden für die Meeresumwelt vermieden werden. Der Entwurf der Verordnung über die Ausbeutung von Bodenschätzen im Gebiet enthält detaillierte Vorschriften über die Dokumentation der Umweltauswirkungen, die Überwachung der Tätigkeiten und mögliche Folgen durch Inspektionen, die Einhaltung der Vorschriften und Durchsetzungsmechanismen. Darüber hinaus sieht die Verordnung die Einrichtung eines Umweltkompensationsfonds vor, der zur Vermeidung, Begrenzung oder Sanierung von Schäden an der Meeresumwelt, die durch Aktivitäten in dem Gebiet verursacht werden, eingesetzt werden soll.

Umweltverträglichkeitsprüfungen (UVPs) sind für jede einzelne Ausbeutungstätigkeit auf dem Meeresboden im Gebiet von entscheidender Bedeutung. Die Legal and Technical Commission (LTC) der ISA hat den Auftrag diese vorzubereiten (“prepare assessments of the environmental implications of activities in the Area”; Art. 165 (2)(d) SRÜ). Die LTC muss diese Bewertungen auch bei der Formulierung von Regeln, Vorschriften und Verfahren berücksichtigen (Art. 165 (2)(f) SRÜ).

Die LTC muss dem Rat der ISA empfehlen, ein bestimmtes Gebiet für die Nutzung abzulehnen, wenn stichhaltige Beweise auf die Gefahr einer schwerwiegenden Umweltschädigung hinweisen (Art. 165 (2)(l) & 162 (2)(x) SRÜ). Darüber hinaus ist der Abbau in nicht genehmigten Gebieten nicht zulässig (ISA 2000; ISA 2010; ISA 2012). Eine Dringlichkeitsanordnung kann erforderlich sein, um schwerwiegende Umweltschäden zu verhindern, einzudämmen oder zu minimieren, wenn die Tätigkeit bereits begonnen hat. Eine solche Anordnung des Rates kann die Anpassung oder Aussetzung der Tätigkeit beinhalten (Art. 162 (2)(w) SRÜ; ISA 2000; ISA 2010; ISA 2012).

Wie bereits erwähnt, legt die UVP die wichtigsten Auswirkungen fest, auf die sich die UVP konzentrieren sollte. Da eine UVP als ein Prozess zur Vorwegnahme, Bewertung und Verringerung der ökologischen und sozialen Risiken eines Projekts vor der Erteilung einer Abbaugenehmigung oder einer behördlichen Genehmigung zu sehen ist, muss zunächst entschieden werden, ob die Schwelle für die Durchführung der geplanten Tätigkeit tatsächlich erreicht ist. Eine vorläufige Risikobewertung kann bei diesem Teil des Prozesses ebenfalls hilfreich sein. Der nächste Schritt ist die Durchführung eines Scoping-Verfahrens, bei dem festgelegt wird, was die UVP abdecken soll. Dies ist die Funktion die die UVP gemäß dem aktuellen Entwurf der Verwertungsvorschriften (ISBA/25/C/WP.1) erfüllt. Eine qualitative UVP ist ein notwendiger Bestandteil dieses Schritts, um die wichtigsten Auswirkungen und Fragen zu berücksichtigen. Einerseits könnte der laufende Prozess dazu führen, dass einige dieser Aspekte für die weitere Betrachtung ausgeschlossen werden, d.h. solche, die nachweislich vernachlässigbare Auswirkungen haben, andererseits werden aber auch Alternativen geprüft werden.

Ein besonderes Thema, das – unter Berücksichtigung sowohl der ökologischen als auch der wirtschaftlichen Risiken – bei der Diskussion um den Tiefseebergbau für die Menschheit unverzichtbar erscheint, ist der Schutz der Tiefsee. Referenzzonen und Habitat-Schutzgebiete müssen den Ökosystemmerkmalen der Abbaugebiete, z.B. Produktivität des Ozeans, Knollendichte, Faunendichte und –zusammensetzung, genau entsprechen, um die biologische Vielfalt des Meeresbodens zu sichern und bestimmte empfindliche und wichtige Ökosysteme sowie deren Funktionen und Dienstleistungen zu schützen. Eine Auswirkungsreferenzzone pro Abbaugebiet ist möglicherweise nicht ausreichend. Von den Areas of Particular Environmental Interest (APEIs) allein kann nicht erwartet werden, dass sie die biologische Vielfalt und die Ökosystemfunktionen und –dienstleistungen, die durch den Tiefseebergbau verloren gehen, kompensieren: Es werden zusätzliche Meeresschutzgebiete benötigt. Die Tatsache, dass nicht klar ist, inwieweit ein ökosystemarer Ansatz in der derzeit bestehenden Sammlung von APEIs angewendet wird, unterstreicht diesen Punkt. Die Minimierung der großräumigen Auswirkungen erfordert eine sorgfältige und anpassungsfähige Raumplanung für den Tiefseebergbau, die Einrichtung eines Netzes repräsentativer Schutzgebiete und die Entwicklung von Abbautechnologien mit minimierten Auswirkungen. Wissenschaft sowie technologische Forschung und Entwicklung sind für all diese Anforderungen von entscheidender Bedeutung.

Die ISA kann Gebiete für die Ausbeutung ablehnen und Dringlichkeitsanordnungen erlassen, um schwerwiegende Schäden an der Meeresumwelt zu verhindern. Zu den erwähnten Risiken einer schwerwiegenden Schädigung gehören offensichtlich auch Schäden an Lebensräumen. Darüber hinaus sollte das übergreifende Management von Abbaupraktiken durch die ISA, z.B. in Bezug auf Größe, Anzahl und Anordnung von Abbaulizenzen im Verhältnis zu ausgewiesenen Schutzgebieten, auch in groß angelegte Umweltmanagementstrategien auf regionaler und globaler Ebene eingebettet werden. Dies ermöglicht eine transparente, gemeinsame Sicht auf die Aktivitäten aller ISA-Vertragspartner und stellt den Tiefseebergbau in einen globalen Kontext, in dem auch konkurrierende Interessen und Nutzungen von Meeresökosystemen berücksichtigt werden können. Zu diesen Interessen gehören unter anderem die Fischerei, die Schifffahrt, der Bau von Unterwasserkabeln und die Meereswissenschaft.

Es besteht noch umfassender Forschungsbedarf, um wissenschaftlich fundierte Empfehlungen für geeignete Abbaustrategien geben zu können. Es ist noch nicht absehbar, inwieweit die Optionen des

Raummanagements die Umweltauswirkungen des Tiefseebergbaus abmildern und größere irreversible Schäden verhindern können. Um ein Gleichgewicht zwischen dem Bedarf an Rohstoffen einerseits und einer strengen Auslegung des Vorsorgeprinzips andererseits zu erreichen, sollte der Tiefseebergbau schrittweise von kleinen zu großen räumlichen Maßstäben entwickelt werden. Dazu gehören Komponentenversuche, Pilotabbauversuche und kleine kommerzielle Testproduktionsstätten, die von gründlichen, umfassenden und unabhängigen wissenschaftlichen Umweltuntersuchungen und Risikobewertungen begleitet sein müssen.

Der Aspekt der Nichteinhaltung von Vorschriften wird ein wichtiges Thema sein, wenn die Ausbeutungsphase des Tiefseebergbaus beginnt. Das Abbaugelände ist ein sensibles Umfeld, das nur dann erhalten bleibt, wenn sich alle Trägerstaaten (Sponsoring State) und ihre Auftragnehmer sich an die Regeln aus den Verträgen, dem Bergbaukodex, seinen Verordnungen und dem SRÜ halten. Sollte eine Partei gegen diese Vereinbarungen verstoßen, haben der Rat, die LTC und die Versammlung der ISA verschiedene Möglichkeiten, darauf zu reagieren. Das LOSC enthielt bereits solche Regeln. Da in der Clarion Clipperton Zone noch kein kommerzieller Bergbau betrieben wurde, gibt es keine Präzedenzfälle oder eine Praxis für Verstöße. Dennoch wurde die Kammer für Meeresbodenstreitigkeiten des Internationalen Seegerichtshofs gebeten, ein Gutachten über die Verpflichtungen der Staaten in diesem Gebiet abzugeben. Dies ist ein weiterer Ansatzpunkt für mögliche Reaktionen auf Verstöße. Die Anwendbarkeit der Regelung ist auf Bohrungen, Ausbaggerungen, Entkernungen und Ausgrabungen, die Entsorgung, Verklappung und Einleitung von Sedimenten, Abfällen oder anderen Abwässern sowie den Bau, den Betrieb oder die Wartung von Anlagen, Rohrleitungen und anderen Geräten im Zusammenhang mit diesen Tätigkeiten beschränkt. Obwohl die Verordnungen auch den Transport und die Aufbereitung abdecken, stützt sich die Meeresbodenkammer auf den Wortlaut des Übereinkommens und bezieht sie nicht mit ein. Sie legt auch einige allgemeine direkte Verpflichtungen fest, wie die Anwendung des Vorsorgeprinzips, die besten Umweltpraktiken, die Ergreifung von Maßnahmen zum Schutz der Meeresumwelt im Falle einer Notstandsanordnung, die Sicherstellung der Einhaltung der Pflicht zur Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung durch den geförderten Auftragnehmer und die Gewährung von Entschädigungsansprüchen.

Im Rahmen der CCT3-Arbeiten bestand zudem die Hoffnung, dass es möglich sein würde, die Ergebnisse des Kollektortests und seiner wissenschaftlichen Analyse in Veröffentlichungen zu integrieren. Da dieser Kollektortest sich im Zeitplan sehr stark verspätete, konnte dies leider nicht innerhalb der Projektlaufzeit umgesetzt werden.

Die Arbeiten von GEOMAR in CCT3 sollten dazu beitragen, die wissenschaftlichen Ergebnisse von MiningImpact in Handlungsvorschläge für die internationalen Regularien der ISA zu transferieren. Neben wissenschaftlichen Artikeln zu verschiedenen Aspekten, wie derzeit vorhandene Wissenslücken (Amon et al. 2022), Stand der Technologie und des Wissens in bezug auf Sedimentwolkenausbreitung (Weaver et al. 2022), biogeochemischen Prozessen und Funktionen (Haeckel et al. 2020) und Risiken von Tiefseebergbau (Haeckel & Boetius 2021), gelang es tatsächlich, dass einige Ergebnisse in Guidelines zum ISA Mining Code (ISBA 27/C/5 zu Baseline-Untersuchungen, ISBA 27/C/11 zu EIA/EIS) und den CCZ REMP (ISBA 26/C/43 definiert 4 neue APEIs) aufgenommen wurden. Einige Kollegen, inklusive dem Projektkoordinator, waren hierfür von der ISA-LTC in eine Expertengruppe eingeladen worden. An verschiedenen anderen Policy-Dokumenten konnte ebenfalls durch Kommentierung mitgewirkt werden, z.B. dem White Paper des High Level Panel for a Sustainable Ocean Economy (<https://oceanpanel.org/publication/what-role-for-ocean-based-renewable-energy-and-deep-seabed-minerals-in-a-sustainable-future/>) und dem Bericht des World Economic Forum zum Thema Tiefsee-Rohstoffe (<https://www.weforum.org/whitepapers/decision-making-on-deep-sea-mineral-stewardship-a-supply-chain-perspective>).

Während MiningImpact zeigen konnte, dass die Schädigungen des Tiefsee-Ökosystems langfristig sein werden und alle Faunenklassen von Mikroorganismen bis Megafauna betreffen, können bisher nur zu wenigen Umweltvariablen schon konkrete Grenzwerte genannt werden, z.B. tritt eine

signifikant erhöhte Mortalität von Nematoden bei Sedimentbedeckung von mehr als 0.5-1 cm auf. Für die meisten Umweltvariablen ist dies allerdings noch nicht möglich und daher haben wir hier bekannte Ansätze für Küstensysteme herangezogen, auch wenn die absoluten Werte meist nicht übertragbar sein werden. Wir haben Überlegungen u.a. zu den ins Bodenwasser suspendierten Partikelkonzentrationen, die Freisetzung von toxischen Substanzen, Lärm und Bodenvibrationen, Einleitung von Abfallwässern, Raumplanung durch Einrichtung von Schutzzonen in den Lizenzgebieten und deren Kriterien angestellt. Ein erster Entwurf mündete in einem gemeinsamen Artikel (van Doorn et al. 2021) im Buch „Perspectives on Deep-Sea Mining“ im Springer Verlag.

2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Pos. 813 Material

Für die Expeditionen SO268 und IP21 wurden Verbrauchsmittel für geochemische Analysen und die Geräteeinsätze (GC, CTD, Sensoren, Elevatoren) sowie zur Gewinnung und Archivierung der Proben (z.B. der gewonnenen Sedimentkerne) beschafft. Hierfür standen Eur 118.797 zur Verfügung.

Pos. 823 FE-Fremdleistungen

Die Arbeiten der CAU Kiel zu rechtlichen Fragestellungen wurden GEOMAR als Unterauftrag zugeordnet. Die wesentlichen Ergebnisse sind in II.1 bei CCT3 dargestellt. Der bewilligte Betrag (Eur 24.730) wurde von der CAU Kiel abgerechnet.

Pos. 837 Personalkosten

Die bewilligten Personenmonate wurden komplett genutzt: in WP2 26 PM durch Schoening, Haffert, Kossel; in WP3 18.5 PM durch Haffert, Kossel, Deusner, Heinrich; in WP4 10 PM durch Springer; in WP5 30 PM durch Hamann und Heinrich; in CCT1 19 PM durch Schoening und Gazis sowie in CCT2 5.5 PM durch Haffert und Deusner. Nach dem Weggang von Frau Haffert wurden die Arbeiten in WP2, WP3, CCT2 durch Frau Kossel, Herrn Deusner und Frau Heinrich übernommen und die Aufgaben von Frau Hamann wurden nach ihrem Weggang von Frau Heinrich übernommen.

Pos. 838 Reisekosten

Für die Teilnahme an den Expeditionen SO268 (Haeckel, Linke, Gazis, Hamann, Köser, Schoening, Urban, Petersen, Fabrizio, Schott, Niemann) und IP21 (Haeckel, Gazis, Heger, Mohrmann) standen insgesamt Eur 84.560 zur Verfügung. Diese wurden für die Flüge nach und von Manzanillo (SO268), die Umbuchung der Rückreise nach Leg 2 auf Vancouver (SO268) sowie nach und von Los Angeles (IP21), notwendige Hotelaufenthalte, inkl. Corona-Quarantäne vor IP21, sowie die erforderlichen Schiffssicherheits-Lehrgänge verwendet.

Zudem wurden Reisemittel für die Teilnahme an einem ISA Side Event (2019), VISTA Paneldiskussion (2021), Informationsveranstaltung zur SO268 (2018), JPIO-Konferenz (2019), Austauschgespräche mit dem UBA (2019), BMBF (2019), Fair Oceans (2019) sowie MiningImpact Annual Meetings (2018, 2019), mehreren Fahrtvorbereitungstreffen mit DEME-GSR und Projektpartnern (2018, 2019) sowie Besichtigungen von Schiffen für die IP21 (2020, 2021) verwendet. Aufgrund der Corona-Pandemie fanden 2020 und 2021 fast ausschließlich online-Veranstaltungen statt. Für die Teilnahme an internationalen Konferenzen (Goldschmidt 2021, Deep-Sea Biology Symposium 2021) fielen daher nur Konferenzgebühren an.

Pos. 847 vorhabenspezifische Kosten

Für die Langzeit-Archivierung der Bilddaten von SO268 und IP21 (insgesamt über 100 TB Daten) wurde jeweils ein Speichersystem angeschafft (Eur 48.549).

Pos. 850 unmittelbare Vorhabenkosten

Für die Nutzung von ROV Kiel 6000 und AUV Abyss auf der SO268 waren ursprünglich Eur 902.605 bewilligt worden, hiervon unterlagen später Eur 465.065 einer Sperrung und es konnten nur Eur 26.678 für Einsatzkosten abgerechnet werden. Der aufgewandte Differenzbetrag wurde von GEOMAR aus Eigenmitteln getragen.

Zur Anmietung eines Multibeam-Echolots zum Einsatz am ROV Kiel 6000 zur Sedimentplume-Detektion auf SO268 standen Eur 64.358 zur Verfügung.

Zum Transport der Ausrüstung per Container zu den Expeditionen SO268 (5 + Reefer) und IP21 (8 + Reefer) standen Eur 149.091 zur Verfügung.

Aufgrund der Corona-Pandemie fanden nur die Annual Meetings 2018 (Kickoff in Brüssel) sowie 2019 (Aveiro) in Person statt. Die übrigen Jahrestreffen wurden online durchgeführt, inklusive der Stakeholder-Veranstaltungen. Am Kickoff und dem 1. Annual Meeting nahmen jeweils 80-90 Personen teil. An den online Veranstaltungen waren bis zu 150 Personen zugeschaltet.

Eigenleistungen

Aus Institutsmitteln wurden in erheblichem Umfang Personalmittel (110 PM), Einsatzkosten für ROV und AUV auf SO268, biogeochemische Analysen sowie Datenauswertung eingebracht, um das Vorhaben durchführen zu können. Insgesamt ca. 2,1 Mio Eur.

3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Während die technologischen Entwicklungen für den Tiefseebergbau voranschreiten (z.B. EU Projekte Blue Mining, Blue Nodules, Blue Harvesting) und erste Prototypmaschinen getestet werden (DEME-GSR im Frühjahr 2021, NORI/TMC/AllSeas geplant für Juli 2022), strebt die Internationale Meeresbodenbehörde (ISA) die Verabschiedung eines "robusten und holistischen Regelwerks" des Entwurfs des Mining Code bis Juli 2023 an (ISBA/26/C/44). Diese Frist wurde durch ein Schreiben von Nauru initiiert, das die 2-Jahres-Regel (§15 des UNCLOS) für die Fertigstellung der Regeln und Vorschriften auslöste. Die Standards und Richtlinien für den Schutz der Meeresumwelt sind jedoch noch nicht fertiggestellt. Wissenschaftler von MiningImpact wurden während der Projektlaufzeit in die ISA-LTC Expertengruppen berufen, um an den Guidelines für Baseline-Untersuchungen (ISBA 27/C/5) und für EIS/EIA (ISBA 27/C/11) mitzuarbeiten. Außerdem flossen MiningImpact Ergebnisse zur Variabilität der Ökosysteme in der CCZ in die Definition von 4 neuen APEIs ein (ISBA 26/C/43). Im März 2022 hat es zudem einen Horizon Europe Call zur Entwicklung von Monitoring-Systemen für Tiefseebergbau (HORIZON-CL4-2022-RESILIENCE-01-02) gegeben. MiningImpact hat mit seinen erfolgreichen Arbeiten auf SO268 und IP21 den Technical Readiness Level (TRL) hierfür auf 6 angehoben, also die grundlegende Machbarkeit der Technologie im relevanten industriellen Umfeld und in der Tiefsee demonstriert und somit den Standard gesetzt. Diese Europäischen und internationalen Aktivitäten im Bereich Tiefseebergbau und Umweltauswirkungen zeigen, wie wichtig der Beitrag unabhängiger wissenschaftlicher Experten ist und in den kommenden Jahren sein wird, um den Mining Code der ISA fertigzustellen, zu überprüfen und anzupassen. Ein Hauptziel von MiningImpact war daher der Transfer unabhängiger wissenschaftlicher Erkenntnisse in politische Empfehlungen für den Mining Code. Dies ist sehr erfolgreich gelungen, gegenüber allen Interessengruppen (NGOs, Industrie, Behörden, Entscheidungsträger) und auch die Outreach-Aktivitäten waren sehr umfangreich und vielfältig.

Alle wesentlichen Meilensteine und Ziele wurden erreicht, sowohl wissenschaftlich als auch technologisch und beim Wissenstransfer. Dies gelang nach dem Ausfall des Patania II Tests vor allem

durch die kostenneutrale Umwidmung von gesperrten Finanzmitteln für ROV- und AUV-Nutzung, wodurch die Durchführung der zusätzlichen Expedition IP21 möglich wurde.

4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Antrag angestrebte Verwertung ist in der Projektlaufzeit vollumfänglich umgesetzt worden. Im Bereich Wissenstransfer und Handlungsempfehlungen ist deutlich mehr erreicht worden, als vor Projektbeginn zu erwarten war. Die direkte Verwertung der Ergebnisse erfolgt u.a. über die in Vorbereitung befindliche 3. Projektphase und die nächste MiningImpact-Expedition SO295 im Oktober-Dezember 2022.

Wirtschaftlicher Nutzen

Die in MiningImpact erarbeiteten Konzepte und eingesetzten Technologien und Methoden für die Umweltüberwachung von Tiefseebergbau sowie deren erfolgreicher Test im Rahmen des ersten industriellen Tests eines Manganknollen-Kollektor Prototypen in den ISA-Lizenzgebieten der CCZ, die durchgeführte Umweltrisikoaanalyse und die abgeleiteten Empfehlungen zum Umweltmanagement sind in die Ausarbeitung internationaler Rechtsvorschriften zur Regulierung von Tiefseebergbau-Aktivitäten (ISA Mining Code) eingeflossen. Hiermit hat das Projekt den Maßstab für die Umweltuntersuchungen und das Monitoring für alle Kontraktoren und zukünftige Abbauvorhaben gesetzt. Die Entwicklung von Umweltstandards und Definition von Schwellenwerten für irreversible Umweltveränderungen sind begonnen worden, müssen aber weiter anhand der Ergebnisse der folgenden Expeditionen und Arbeiten fortgesetzt werden. Die Ergebnisse von MiningImpact werden daher hoffentlich dazu beitragen, dass die Industrie Technologien und Strategien zur Minimierung der Umweltschäden entwickelt. Dies sollte zu allererst ein nachhaltigerer Umgang mit den Rohstoffen sein, denn die Umweltschäden von Tiefseebergbau sind großflächig und langfristig. Somit leistet das Projekt auch einen Beitrag zur Debatte, welche rechtlichen, politischen und sozioökonomischen Aspekte die Ausbeutung mariner Ressourcen lenken beziehungsweise lenken sollten. Hier besteht Anschlussfähigkeit an eine notwendige umweltethische Diskussion im Bereich Nachhaltigkeit und Umweltgerechtigkeit.

Wissenschaftlicher Nutzen

MiningImpact hat entscheidendes Wissen in Bezug auf die Umweltauswirkungen des Tiefseebergbaus erarbeitet, wie z.B. das räumliche und zeitliche Verhalten der aufgewirbelten Sedimentwolke sowie zur räumlichen (und zeitlichen) Variabilität aller Umweltvariablen in der Tiefsee. Ein Teil der Ergebnisse ist bereits in zahlreichen peer-review Artikeln in internationalen Zeitschriften veröffentlicht worden (s. II.6), weitere Veröffentlichungen sind u.a. im Rahmen des Sonderbands in „Frontiers in Marine Science“ geplant. Mit Vorträgen auf internationalen Konferenzen (z.B. Goldschmidt, UMC, DSBS, Challenger 150) sowie Postern wurden Zwischenergebnisse regelmäßig der internationalen wissenschaftlichen Gemeinschaft präsentiert. Die im Projekt erhobenen Forschungsdaten sind im Weltdatenzentrum PANGAEA der internationalen Wissenschaftsgemeinschaft langfristig archiviert und spätestens zwei Jahre nach Projektende öffentlich verfügbar.

In einer 3. Projektphase sollen die wichtigen Arbeiten zu den Auswirkungen des Manganknollenabbaus fortgesetzt werden – die nächste Expedition SO295 zum Erheben der Daten und Proben 1,5 Jahre nach dem Kollektortest findet im Oktober – Dezember 2022 statt. Zudem sollen

die Arbeiten von MiningImpact 3 in Richtung Auswirkungen von Massivsulfidabbau erweitert werden, da hierzu bisher weltweit keine Untersuchungen stattgefunden haben und u.a. die Guidelines des Mining Codes diese Aspekte nicht enthalten.

Im Rahmen des BiodivERsA-Projektes DeepRest werden seit Mai 2022 die begonnenen Arbeiten zu Restaurationsmöglichkeiten in bezug auf ihre Funktionalität zum Schutz der Biodiversität in der Tiefsee untersucht.

Die Auswirkungen von Tiefseebergbau sowie anderen anthropogenen Aktivitäten, wie Dredging und Grundschleppnetzfisherei, auf regionale und globale Prozesse der biologischen Kohlenstoffpumpe werden ab November 2022 im EU-Projekt OceanICU untersucht. Hiermit werden die Ergebnisse von MiningImpact in Bezug auf die nächst größere räumliche Skala genutzt und untersucht.

Die Ergebnisse fließen zudem in eine internationale Studie ein, bei der die Umweltauswirkungen von Tiefseebergbau und Landbergbau verglichen werden. Publikationen sind in Vorbereitung.

Ein mögliches Ergebnis aus den Arbeiten der Kollegen der CAU Kiel, die im Rahmen eines Unterauftrags für CCT3 durchgeführt wurden, das von anderen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern verschiedener Disziplinen aufgegriffen werden könnte, ist, dass die Übertragung von Bergbauregelungen an Land auf die Ausbeutung von Ressourcen des Ozeans an fundamentalen (Denk-)Fehlern leidet. Wissenschaftlicher Austausch sollte zudem regional übergreifend stattfinden. Da ein erster Fokus auf Ressourcen des Nord-Ost-Atlantiks liegen wird, sind wissenschaftliche Kooperationen mit Projekten zu Grönland, Kanada und den USA vorstellbar.

5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen,

Während der Durchführung des Vorhabens sind dem ZE keine wesentlichen Fortschritte auf dem Gebiet seines Vorhabens bei anderen Stellen außerhalb des JPIO-Verbundprojektes bekannt geworden.

Neben DEME-GSR sind auch andere Kontraktoren dabei einen Kollektortest vorzubereiten, allerdings hat z.B. der für Juli 2022 angekündigte Test von The Metals Company zusammen mit All Seas bisher nicht stattgefunden. Andere Akteure, wie IHC Merwede, UK Seabed Resources, Indien, sind in ihren Planungen noch ein weiter zurück. Anders als beim Patania II Test von DEME-GSR durch MiningImpact sind im Rahmen dieser Tests keine unabhängigen wissenschaftlichen Untersuchungen der Umweltauswirkungen angedacht.

Die umfangreiche Untersuchungskampagne von MiningImpact zum ersten industriellen Kollektortest hat daher in fast allen Aspekten Neuland betreten. Sie hat u.a. die ersten quantitativen Daten zur Ausbreitung einer Sedimentwolke sowie der Ablagerung von Sedimenten auf dem Meeresboden geliefert und die ersten Lärmmessungen eines Kollektorsystems erhoben. Darüber hinaus wurde erstmals ein Konzept, inklusive der Methodiken und Technologien, für ein umfassendes Umweltmonitoring erarbeitet und erfolgreich umgesetzt. Dies setzt den Standard für nachfolgende Gerätetests, an denen sich die Arbeiten der Kontraktoren bei zukünftigen Tests messen lassen müssen. Die massive Kritik am EIS von Nauru und The Metals Company zu dem von ihnen im Juli 2022 angedachten Test, bei dem ein Monitoringkonzept komplett fehlte, zeigt dies eindrücklich. Folgerichtig hat die ISA-LTC das EIS in dieser Form nicht akzeptiert.

Die im Rahmen von MiningImpact zusammen mit den Partnern AWI, BGR, JUB, MPI stattfindenden Untersuchungen zu biogeochemischen Prozessen in Sedimenten von Manganknollenhabitaten sowie die Auswirkungen von Tiefseebergbau hierauf sind nach wie vor die einzigen, die uns bekannt sind. Kontraktoren erheben solche Daten nur sehr rudimentär (z.B. POC-Gehalte und

Nährstoffkonzentrationen), die Modellierung der Prozesse findet nicht statt. Dies war sicher auch ein Grund, warum MiningImpact Partner in die Expertengruppe der ISA-LTC für die Baseline Guidelines (ISBA 27/C/5) benannt wurden, um die Sektion zur Biogeochemie, chemischen Ozeanographie und Mikrobiologie zu schreiben.

6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

a) Artikel in internationalen Fachzeitschriften

Veröffentlicht:

Amon D.J., Gollner S., Morato T., Smith C.R., Chen C., Christiansen S., Currie B., Drazen J.C., Fukushima T., Gianni M., Gjerde K., Gooday A.J., Grillo G.G., Haeckel M., Joyini T., Ju S.-J., Levin L.A., Metaxas A., Mianowicz K., Molodtsova T.N., Narberhaus I., Orcutt B.N., Swadling A., Tuhumwire J., Palacio P.U., Walker M., Weaver P., Xu X.-W., Mulalap C.Y., Edwards P.E.T., Pickens C. (2022) Assessment of scientific gaps related to the effective environmental management of deep-seabed mining. *Marine Policy* 138, 105006.

Baeye M., Purkiani K., de Stigter H., Gillard B., Fettweis M., Greinert J. (2021) Tidally Driven Dispersion of a Deep-Sea Sediment Plume Originating from Seafloor Disturbance in the DISCOL Area (SE-Pacific Ocean). *Geosciences* 12 (1).

Cuvelier D., Pinto Ramalho S., Purser A., Haeckel M. (revised) Impact of return cruises and prolonged on-site presence on litter abundance at deep-sea nodule fields. *Marine Pollution Bulletin*.

Devey C.W., Greinert J., Boetius A., Augustin N., Yeo I. (2021) How volcanically active is an abyssal plain? Evidence for recent volcanism on 20 Ma Nazca Plate seafloor. *Marine Geology* 440, 106548.

Drazen J.C., Leitner A., Morningstar S., Marcon Y., Greinert J., Purser A. (2019) Observations of deep-sea fishes and mobile scavengers from the abyssal DISCOL experimental mining area. *Biogeosciences* 16, 3133-3146.

Gazis I. Z., Greinert J. (2021) Importance of Spatial Autocorrelation in Machine Learning Modeling of Polymetallic Nodules, Model Uncertainty and Transferability at Local Scale. *Minerals* 11, 1172.

Gausepohl F., Hennke A., Schoening T., Köser K., Greinert J. (2020) Scars in the abyss: reconstructing sequence, location and temporal change of the 78 plough tracks of the 1989 DISCOL deep-sea disturbance experiment in the Peru Basin. *Biogeosciences* 17, 1463-1493.

Gollner S., Haeckel M., Janssen F., Lefaible N., Molari M., Papadopoulo S., Reichart G.-J., Alexandre J. T., Vink A., Vanreusel A. (2022) Restoration experiments in polymetallic nodule areas. *Integrated Environmental Assessment and Management* 18(3), 682-696.

Haalboom S., Schoening T., Urban P., Gazis I.Z., de Stigter H., Gillard B., Baeye M., Hollstein M., Purkiani K., Reichart G.-J., Thomsen L., Haeckel M., Vink A., Greinert J. (2022) Monitoring of anthropogenic sediment plumes in the Clarion-Clipperton Zone, NE equatorial Pacific Ocean. *Frontiers in Marine Science* 9, 882155.

Haeckel M., Boetius A. (2021) Seafloor integrity versus critical metal supply. *One Earth* 4, 328.

Haeckel M., Vink A., Kasten S., Janssen F. (2020) Environmental impacts of deep seabed mining. In: *New Knowledge and Changing Circumstances in the Law of the Sea*, Heidar T. (ed.), Brill Nijhoff, Leiden, 327-340.

Haffert L., Haeckel M., de Stigter H., Janßen F. (2020) Assessing the temporal scale of deep-sea mining impacts on sediment biogeochemistry. *Biogeosciences* 17, 2767-2789.

- Hoving H.J.T., Amon D., Bodur Y., Haeckel M., Jones D.O.B., Neitzel P., Simon-Lledo E., Smith C.R., Stauffer J.B., Sweetman A.K., Purser A. (2022) The abyssal voyage of the argonauts: Deep-sea in situ observations reveal the contribution of cephalopod egg cases to the carbon pump. *Deep-Sea research I* 183, 103719.
- Hoving H.-J., Boetius A., Dunlop K., Greinert J., Haeckel M., Jones D.O.B., Marcon Y., Stratmann T., Suck I., Sweetman A.K., Purser A. (revised) Major fine-scale spatial heterogeneity in accumulation of gelatinous carbon fluxes on the deep seabed. *Scientific Reports*.
- Krause S., Molari M., Gorb E. V., Gorb S., Kossel E., Haeckel M. (2020) Persistence of plastic debris and its colonization by bacterial communities after two decades on the abyssal seafloor. *Scientific Reports* 10. DOI 10.1038/s41598-020-66361-7.
- Lefaible N, Macheriotou L., Purkiani K., Haeckel M., Pape E., Vanreusel A. (submitted) Digging deep: lessons learned from a multi-facet dredge experiment in the Clarion Clipperton Zone. *Marine Biodiversity*.
- Mbani B, Schoening T., Gazis I-Z., Koch R., Greinert J. (accepted) An automated workflow for seafloor classification using optical underwater imagery: Examples from Manganese-nodule covered deep seabed areas in the Central Pacific Ocean. *Scientific Reports*.
- Paul S. A. L., Haeckel M., Bau M., Bajracharya R., Koschinsky A. (2019) Small-scale heterogeneity of trace metals including REY in deep-sea sediments and pore waters of the Peru Basin, southeastern equatorial Pacific. *Biogeosciences* 16, 4829-4849.
- Purkiani K., Paul A., Vink A., Walter M., Schulz M., Haeckel M. (2020) Evidence of eddy-related deep-ocean current variability in the northeast tropical Pacific Ocean induced by remote gap winds. *Biogeosciences* 17, 6527-6544.
- Purkiani K., Gillard B., Paul A., Haeckel M., Haalboom S., Greinert J., de Stigter H., Hollstein M., Baeye M., Vink A., Thomsen L., Schulz M. (2021) Numerical simulation of deep-sea sediment transport induced by a dredge experiment in the northeastern Pacific Ocean. *Frontiers in Marine Science* 8, 719463.
- Purkiani K., Haeckel M., Haalboom S., Schmidt K., Urban P., Gazis I.-Z., Walter M., Paul A., de Stigter H., Vink A., Schulz M. (2022) Impact of a long-lived anticyclonic mesoscale eddy on seawater anomalies in the northeastern tropical Pacific Ocean: a composite analysis from hydrographic measurements, altimetry data and reanalysis model products. *Ocean Science* 18, 1163-1181.
- Schoening T., Jones D.O.B., Greinert J. (2017) Compact-morphology-based polymetallic nodule delineation. *Scientific Reports* 7, 13338.
- Schoening T., Köser K., Greinert J. (2018) An acquisition, curation and management workflow for sustainable, terabyte-scale marine image analysis. *Sci. Data* 5, 180181.
- Schoening T. (2019) SHiPCC—A Sea-going High-Performance Compute Cluster for Image Analysis. SHiPCC—A Sea-going High-Performance Compute Cluster for Image Analysis. *Front. Mar. Sci.* 6, 736.
- Schoening T., Purser A., Langenkämper D., Suck I., Taylor J., Cuvelier D., Lins L., Simon-Lledó E., Marcon Y., Jones D. O. B., Nattkemper T., Köser K., Zurowietz M., Greinert J., Gomes-Pereira J. (2020) Megafauna community assessment of polymetallic nodule fields with cameras: Platform and methodology comparison. *Biogeosciences* 17, 3115-3133.
- Volz J. B., Haffert L., Haeckel M., Koschinsky A., Kasten S. (2020) Impact of small-scale disturbances on geochemical conditions, biogeochemical processes and element fluxes in surface sediments of the eastern Clarion-Clipperton Zone, Pacific Ocean. *Biogeosciences* 17, 1113-1131.
- van Doorn E. (2020) Resource Access Under the International Tribunal for the Law of the Sea, in: M. Kocsis (ed.) *Global Encyclopedia of Territorial Rights*.

van Doorn E., Laugesen E., Haeckel M., Mestre N., Skjeret F., Vink A. (2022) Chapter 17: Risk assessment in deep-sea mining. In: Sharma R. (ed.), Perspectives on Deep-Sea Mining. Springer Nature Switzerland. p. 497-526.

Vonnahme T. R., Molari M., Janssen F., Wenzhöfer F., Haeckel M., Titschack J., Boetius A. (2020) Effects of a deep-sea mining experiment on seafloor microbial communities and functions after 26 years. Science Advances 6, eaaz5922.

Weaver P.P.E., Aguzzi J., Billet D.S.M., Boschen-Rose R., Colaco A., de Stigter H., Gollner S., Haeckel M., Hauton C., Jones D., Lily H., Mestre N.C., Mohn C., Thomsen L. (2022) Assessing plume impacts caused by polymetallic nodule mining vehicles. Marine Policy 139, 105011.

In Vorbereitung:

Macheriotou L., Vanreusel A., MI2 partners (in prep) The known unknown: addressing the knowledge gap of connectivity in abyssal plains targeted for deep-sea mining.

Volz J.B., Lange M., Köhler D., Geibert W., Stimac I., Paul S.A.L., Haeckel M., Schmidt K., Kasten S. (in prep) Environmental characteristics of impact and reference areas before the first industrial trial of a prototype mining vehicle in the Clarion-Clipperton Zone.

Van Doorn E. (in prep) Eine Veröffentlichung über das Verhältnis zwischen dem internationalen Rechtsrahmen für den Tiefseebergbau und den nationalen Regelungen steht kurz vor der Vorlage. Die Bewertung des Verhältnisses zwischen dem internationalen Rahmen und der nationalen Regulierung von Aktivitäten auf dem Kontinentalschelf ist fast abgeschlossen. Ein fortgeschrittener Entwurf für eine zweite Publikation steht kurz vor der Fertigstellung. Dieser soll die Frage aufwerfen, in wie weit Regelungsmechanismen aus nationaler Gesetzgebung zur offshore Öl- und Gasförderung auch Anwendung auf Tiefseebodenbergbau im Gebiet finden können. Darüber hinaus befinden sich zwei weitere Veröffentlichungen in einem frühen Stadium der Entwicklung. Die erste befasst sich mit den rechtlichen Aspekten der Überwachung des Bergbaus auf dem Tiefseeboden. Die zweite befasst sich mit dem besonderen Kontext im Arktischen Ozean für den Bergbau auf dem Tiefseeboden.

b) Vorträge und Poster bei internationalen Konferenzen und Instituten

Gazis I-Z, Mohrmann J, Heger K, Köser K, Schoening T, Charlet F, Greinert J., Photomosaicking the impact of deep-sea mining in the Belgian contract area of the CCZ. 50th Underwater Mining Conference, 2-7. October 2022a, St. Petersburg, Florida, USA.

Gazis I-Z, de Stigter H, Mohrmann J., Heger K., Diaz M., Veloso-Alarcón M-E, Gillard B., Baeye M., Purkiani K., Hollstein M., Schoening T., Urban P., Haalboom S., Thomsen L., Haeckel M., Vink A., Charlet F., Greinert J., Deep-sea mining plume monitoring: Results from the first deep-sea trial of the Patania-II pre-prototype nodule collector and parallel plume monitoring. 50th Underwater Mining Conference, 2-7. October 2022b, St. Petersburg, Florida, USA.

Purkiani K., Gazis I.Z., Mohrmann J., Heger K., Diaz M., Veloso-Alarcón M.E., Gillard B., Baeye M., Paul A., de Stigter H., Haeckel M., Vink A., Greinert J., Thomsen L., Schulz M., Numerical simulation of deep-sea sediment dispersion induced by a pre-prototype nodule collector vehicle in the northeast tropical Pacific Ocean. 50th Underwater Mining Conference, 2-7. October 2022, St. Petersburg, Florida, USA.

Van Doorn, 'Twenty Thousand Laws Under the Sea: How to translate value assessment of seabed resources and risks of exploitation into regulations', Symposium Frontiers in Ocean Sustainability: Co-designing Research and Solutions, Halifax, Canada, 20. September 2018.

Van Doorn, 'Marine mineral resources beyond national jurisdiction: potential for resource conflict or common heritage of humankind?', Conference Ocean – Climate Sustainability Research Frontiers, Berlin, 22. Oktober 2018.

Van Doorn, 'Present & future meaning of a common heritage of humankind: possibilities for public trusteeship over natural resources', Conference 'Natural Resource Rights Within Planetary Boundaries: a workshop on governance and normative theory', Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change, Berlin, 15. November 2018.

Van Doorn, Runder Tisch der Bundesregierung „Internationalisierung von Bildung, Wissenschaft und Forschung“, Themenzyklus „Meere und Ozeane“, Expertenteam „Mineralische Ressourcen der Tiefsee“ (2018/19).

Van Doorn, 'Beyond optimal utilisation & benefit for humankind as a whole: environmental justice in the international legal distribution of marine resources', Workshop 'Narratives & Practices of Environmental Justice', Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 7. Juni 2019.

Van Doorn, Fachgespräch 'Entwicklung regionaler Umweltmanagement Pläne im Gebiet: eine Annäherung an rechtliche und inhaltliche Probleme', Institute for Advanced Sustainability Studies, Potsdam, 2. Juli 2019.

Van Doorn, Workshop 'Towards a standardised approach to Regional Environmental Management Plans in the Area', Hamburg, 11.-13. November 2019.

Van Doorn, 'Ocean edges: the mismatch between the natural & legal boundaries of the marine environment', STREAMS – Transformative Environmental Humanities, Stockholm, Schweden, 6. August 2021.

c) Berichte

Haeckel (2018) Nachhaltige Auswirkungen des Tiefseebergbaus. Earth System Knowledge Platform (ESKP) der HGF zum Thema „Metalle aus der Tiefsee für unsere High Tech Gesellschaft“, <https://themenspezial.eskp.de>

Haeckel M., Linke P. (2021) RV SONNE Cruise Report SO268 - Assessing the Impacts of Nodule Mining on the Deep-sea Environment: NoduleMonitoring. GEOMAR Report 59. GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, Kiel, Germany, 802 p.

Janssen, Soltwedel, Haeckel (2018) Strategien zur Renaturierung von Abbaugebieten. Earth System Knowledge Platform (ESKP) der HGF zum Thema „Metalle aus der Tiefsee für unsere High Tech Gesellschaft“, <https://themenspezial.eskp.de>

Janssen, Soltwedel, Haeckel (2018) Abbau- und Managementstrategien. Earth System Knowledge Platform (ESKP) der HGF zum Thema „Metalle aus der Tiefsee für unsere High Tech Gesellschaft“, <https://themenspezial.eskp.de>

Petersen S., Haeckel M. (2020) Mineralische Rohstoffe der Tiefsee. In: Tiefsee - Vielfalt in der Dunkelheit. Müller T., Hoffmann-Wieck G. (ed.), Senckenberg-Buch 83, Schweizerbart, Stuttgart, 147-149.

Petersen S., Haeckel M., Steffen J. (2020) Mineral Resources of the Deep Sea - Formation, Potential and Risks. 1st edition, GEOMAR, 36 p.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht
3. Titel Abschlussbericht: Mn-MonStr – Monitoringkonzepte für einen Manganknollenabbau in der Tiefsee	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Haeckel, Matthias; Kossel, Elke; Heinrich, Luise; Springer, Pina; Gazis, Iason; Greinert, Jens	5. Abschlussdatum des Vorhabens 28.02.2022
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Abschlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel Wischhofstraße 1-3 24148 Kiel	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03F0812A
	11. Seitenzahl 38
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 13
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 6
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) PTJ, Rostock, 30.08.2022	
18. Kurzfassung Im Rahmen des JPI Oceans Verbundprojekts MiningImpact 2 hat GEOMAR ein Konzept zum Monitoring von Tiefseebergbau erarbeitet und getestet sowie einen Umweltmanagementplan entwickelt. Auf zwei Expeditionen, SO268 und IP21, wurde eine unabhängige, wissenschaftliche Begleitforschung des ersten industriellen Gerätetests eines Manganknollenkollektors durch die Firma DEME-GSR im deutschen und belgischen Lizenzgebiet der CCZ durchgeführt. Dies umfasste Baseline-Untersuchungen des Umweltzustandes in beiden Testgebieten und in benachbarten Referenzgebieten sowie das Monitoring des Tests und eine erste Zustandsaufnahme nach dem Test. Hierdurch wurden insbesondere Erkenntnisse zur zeitlichen und räumlichen Ausbreitung der dabei aufgewirbelten Sedimentwolke gewonnen, die ersten Daten zu Lärmemissionen erhoben, die Auswirkungen auf biogeochemische Prozesse untersucht und ein Restorationsexperiment gestartet. Die gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse wurden in Vorschläge für Abbauregularien der Internationalen Meeresbodenbehörde transferiert.	
19. Schlagwörter Tiefseebergbau, Umweltauswirkungen, Pazifik, Geochemie, Manganknollen, Kommunikation, Wissenstransfer, Handlungsempfehlungen, Datenmanagement	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Final report: Mn-MonStr – Monitoring strategies for the exploitation of polymetallic nodules in the deep sea	
4. author(s) (family name, first name(s)) Haeckel, Matthias; Kossel, Elke; Heinrich, Luise; Springer, Pina; Gazis, Iason; Greinert, Jens	5. end of project 28.02.2022
	6. publication date
	7. form of publication Final report
8. performing organization(s) (name, address) GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel Wischhofstraße 1-3 24148 Kiel Germany	9. originator's report no.
	10. reference no. 03F0812A
	11. no. of pages 38
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 13
	14. no. of tables 0
	15. no. of figures 6
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) PTJ, Rostock, 30.08.2022	
18. abstract In the framework of the JPI Oceans joint project MiningImpact 2, GEOMAR has developed and tested a strategy for monitoring of deep-sea mining activities, and developed an environmental management plan. On two expeditions, SO268 and IP21, an independent scientific monitoring of the first industrial test of a prototype manganese nodule collector vehicle by the company DEME-GSR in the German and Belgian licence area of CCZ was carried out. This included baseline studies of the environmental condition in both test areas and in adjacent reference areas, as well as monitoring of the test and a first impact survey after the test. In particular, this provided insights into the temporal and spatial dispersion of the suspended sediment plume, the first data on noise emissions were collected, the effects on biogeochemical processes were investigated and a restoration experiment was started. Scientific knowledge transfer was targeted towards the Mining Code of the International Seabed Authority.	
19. keywords Deep-sea mining, environmental impacts, Pacific Ocean, geochemistry, polymetallic nodules, outreach, knowledge transfer, policy advice, data management	
20. publisher	21. price