
Abschlussbericht

WTZ China – OASIS: Tektonische und magmatische Kontrolle hydrothermaler Sulfidvererzungen im Indischen Ozean

Förderkennzeichen: 03F0724A

Laufzeit des Vorhabens: 01. Juli 2015 bis 30. Juni 2018

Berichtszeitraum: 01. Juli 2015 bis 30. Juni 2018

Zuwendungsempfänger:



Dr. Sven Petersen und M.Sc. Meike Klischies

Zur Kooperation zwischen
GEOMAR – Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, Kiel (Deutschland)
SIO – Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources,
Hangzhou (V.R. China)

Inhalt

1. EINLEITUNG	3
1.1. AUFGABENSTELLUNG	3
1.1.1. FORSCHUNGSGEGENSTAND	3
1.2. VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE	5
1.3. PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS	6
1.4. WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND DER FORSCHUNG	8
1.4.1. LANGSAM-SPREIZENDE MITTELOZEANISCHE RÜCKEN	8
1.4.2. METHODEN DER GEOLOGISCHEN KARTIERUNG	9
1.5. ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN	11
2. DARSTELLUNG DER VERWENDUNG UND ERZIELTE ERGEBNISSE	12
2.1. VERWENDUNG DER ZUWENDUNG UND ERZIELTE ERGEBNISSE	12
2.1.1. ARBEITSPLANUNG	12
2.1.2. ZEITPLANUNG	12
2.1.3. KOSTENPLANUNG	13
2.1.4. METHODEN UND ERGEBNISSE	13
2.1.5. GEOCHEMISCHE ANALYSEN	22
2.2. WICHTIGSTE POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES	23
2.3. NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT	23
2.4. NUTZEN SOWIE VERWERTBARKEIT DES ERGEBNISSES	23
2.5. FORTSCHRITTE AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN	24
2.6. ERFOLGTE ODER GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN	24

Appendix

Veröffentlichungen in peer-review.

1. Einleitung

1.1. Aufgabenstellung

Massivsulfidvorkommen vom rezenten Meeresboden werden, neben dem Ausbau des Recyclings und der Ausdehnung der Abbauaktivitäten an Land, als eine mögliche Quelle für die zukünftige Versorgung mit Metallen angesehen (Petersen et al., 2018). Dies drückt sich unter anderem in erhöhter Aktivität von Firmen aber auch von Ländern bei der Erkundung in der Tiefsee aus. So sind z.Zt. sieben Erkundungslizenzen für Massivsulfide mit einer Laufzeit von 15 Jahren durch die Internationale Meeresbodenbehörde (ISA) ausgegeben worden, unter anderem auch für Deutschland (vertreten durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover) und China (vertreten durch COMRA, Beijing). Diese sogenannten Kontraktoren müssen die 10.000 km² ihres Lizenzgebietes innerhalb weniger Jahre untersuchen und sind vertraglich verpflichtet die Hälfte ihres Areal nach 8 Jahren sowie weitere 25% nach 10 Jahren an die ISA zurückzugeben. Es wäre natürlich wünschenswert, wenn diese Areale frei von wirtschaftlich interessanten Rohstoffen wären. Es gilt also in relativ kurzer Zeit das Rohstoffpotential großer Gebiete festzustellen. Im Fokus der wissenschaftlichen Arbeiten dieses Deutsch-Chinesischen Kooperationsprojektes steht daher die Entwicklung von Explorationskriterien und Methoden für die Erkundung von aktiven, aber vor allem auch inaktiven hydrothermalen Quellen an langsam-spreizenden Mittelozeanischen Rücken wie z.B. dem Carlsberg Rücken im Indischen Ozean. Weiteres Ziel ist die Untersuchung der chemischen Variabilität der entdeckten Vorkommen in Bezug auf wirtschaftlich interessante Metalle und Spurenelemente.

Im Vordergrund der Kooperation zwischen dem GEOMAR und dem Second Institute of Oceanography (SIO) stand und steht der wissenschaftliche Austausch durch Projekttreffen, der Austausch von Studenten und die jeweils gegenseitige Teilnahme an Forschungsfahrten. Die dabei erworbenen und analysierten Daten wurden und werden auch in Zukunft gemeinsam publiziert werden. Der vorliegende Abschlussbericht fasst die Kooperationsaktivitäten, sowie die bisher ausgetauschten und publizierten Daten des OASIS-Projektes zusammen.

1.1.1. Forschungsgegenstand

Im Fokus der wissenschaftlichen Arbeiten dieses Kooperationsprojektes steht der Carlsberg Rücken (CR; siehe Abb. 1) im Indischen Ozean und sein Rohstoffpotenzial. Motiviert ist dieses Vorhaben durch ein gestiegenes Interesse an marinen Rohstoffen als möglicher Rohstoffquelle, wobei Massivsulfide in der Tiefsee bedeutende Vorkommen an Metallen wie Kupfer, Zink, Gold und Silber enthalten können. Mittelozeanische Rücken, insbesondere diejenigen mit langsamen bis sehr langsamen Spreizungsraten, sind submarine, auseinanderspreizende Plattengrenzen und sind bevorzugte Bildungsstätten solcher Erzvorkommen (Hannington et al., 2011; German et al., 2016). Die Metallerze lagern sich um heißen Quellen, sogenannten Hydrothermalsystemen, in mehreren tausend Metern Wassertiefe am Meeresboden ab. Die genaueren Bildungsbedingungen und die

geologischen Prozesse, die für die regionale und lokale Kontrolle dieser Vorkommen von Bedeutung sind, sind jedoch immer noch nicht hinreichend verstanden, da die Erkundung der Tiefsee gewisse technische und zeitliche Herausforderungen birgt und sich bisherige Forschungsaktivitäten auf wenige, vornehmlich aktive heiße Quellen, vorwiegend im östlichen Pazifik und dem nördlichen Atlantik, fokussiert haben.

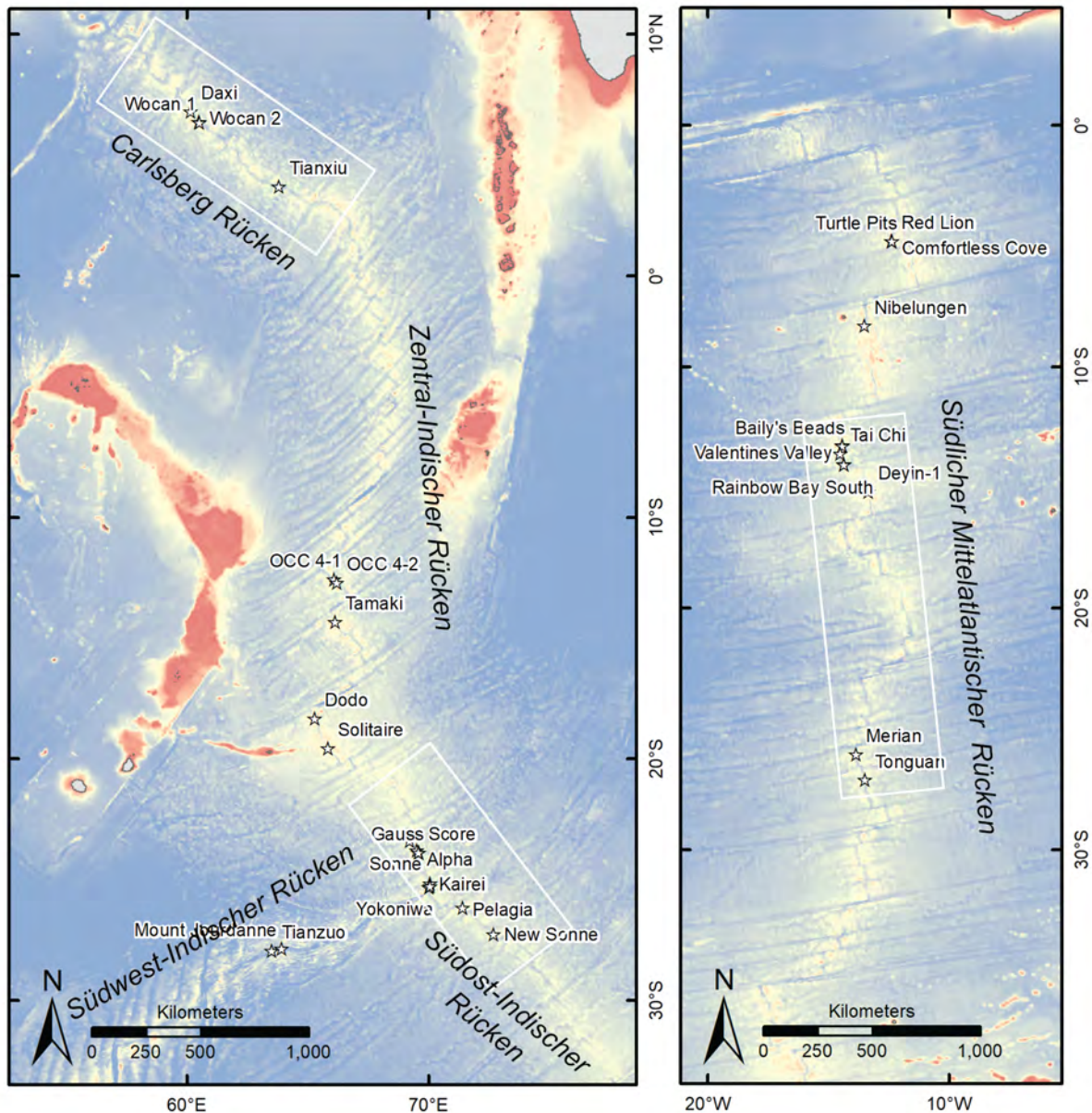


Abb. 1: Überblick über die geographische Verteilung der dem Projekt zur Verfügung stehenden, schiffsbasierten Bathymetriedatensätze.

Ein Zusammenhang zwischen Größe, Metallinhalt sowie Verteilung und Häufigkeit der Vorkommen mit dem geologischen Umfeld, sowie der Spreizungsrate der Mittelozeanischen Rücken wird immer wahrscheinlicher (German et al., 2016; Monecke et al., 2016; Abb 2). Da sich aber bisherige Explorationsaktivitäten nur auf aktive Hydrothermalsysteme und ihre Vorkommen in ausgewählten Gebieten (nördlicher Atlantik und östlicher Pazifik) beschränkt haben, ist die Repräsentativität der Untersuchungsergebnisse noch nicht bestätigt. Eine effiziente und zielgenaue Erkundung des Indischen Ozeans, in dem sowohl die Volksrepublik

China als auch die Bundesrepublik Deutschland Explorationslizenzen für Massivsulfide erworben haben, nach aktiven, sowie inaktiven hydrothermalen Systemen und Erzvorkommen und die Untersuchung ihres geologischen Umfelds zum besseren Verständnis der Entwicklung hydrothermaler Erzlagerstätten bildet den Kern dieses Kooperationsprojektes. Ziel ist die gemeinsame Entwicklung von Explorationskriterien, um die Suche nach und die Erkundung von sowohl aktiven, aber vor allem auch inaktiven hydrothermalen Quellen und ihren Erzvorkommen zu verbessern. Um eine wirtschaftliche Bedeutung der Massivsulfid-vorkommen aufzeigen zu können ist darüber hinaus ein Wissen um die chemische Zusammensetzung von besonderer Bedeutung. Nicht alle Vorkommen sind durch wirtschaftliche Gehalte an Kupfer, Zink, Gold oder Silber gekennzeichnet. Aufgrund der hohen chemischen Variabilität sind Untersuchungen zur regionalen Variabilität aber auch zur Verteilung der Wertmetalle innerhalb einzelner Vorkommen durchzuführen. Moderne Methoden, wie zum Beispiel die Laser-ablation ICP-MS am GEOMAR, helfen dabei auch Spurenmetalle zu untersuchen. Daher sind von einer ganzen Reihe von Proben der chinesischen Kooperationspartner, die von neuentdeckten Vorkommen entlang des Carlsberg Rückens genommen worden waren, Spurenelementanalysen am GEOMAR durchgeführt worden.

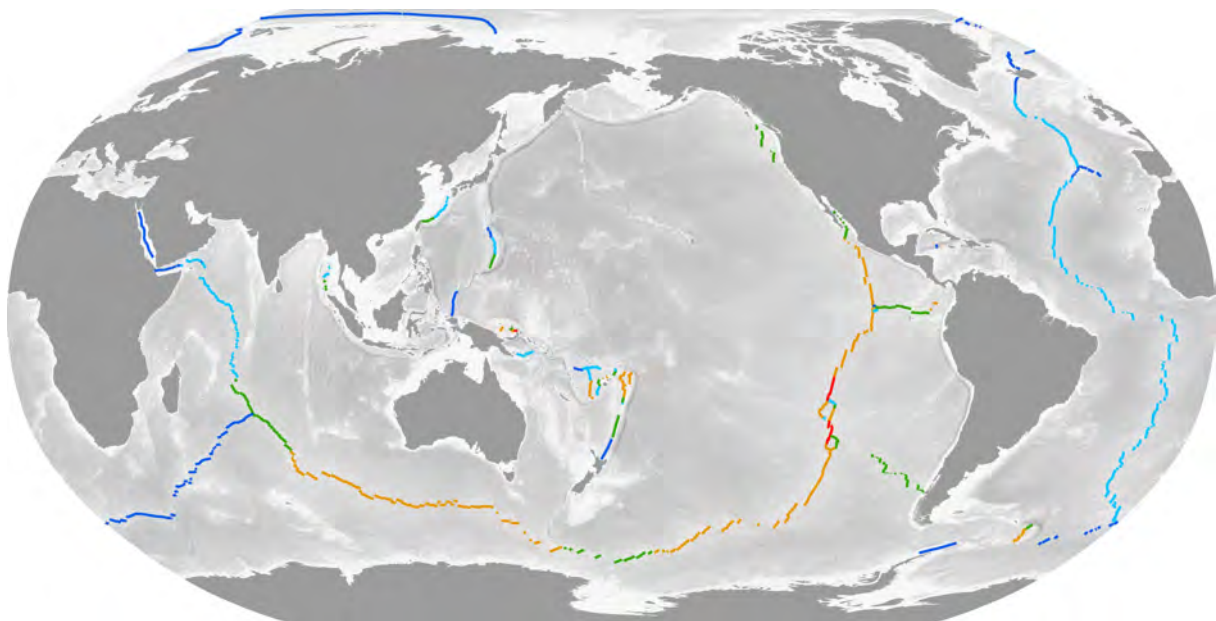


Abb. 2: Lage der für die Bildung von Massivsulfidvorkommen bedeutenden mittelozeanischen Rücken sowie der „back-arc“ Spreizungszentren. Farben zeigen die Spreizungsgeschwindigkeit der einzelnen Segmente: dunkelblau=sehr langsam (<20 mm/a); hellblau=langsam (20–40 mm/a); grün=intermediär (40–60 mm/a); = schnell (60–140 mm/a); rot = sehr schnell (>140 mm/a; aus Petersen et al., 2016).

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt sollte Arbeiten zu mineralischen Rohstoffen an den beiden Instituten zusammenführen und einen Austausch auf wissenschaftlicher Ebene gewährleisten und die gemeinsame Teilnahme an Forschungsfahrten ermöglichen. Für die Durchführung der

geologischen Arbeiten am GEOMAR wurde eine Doktorandin eingestellt. Dabei sollte die geologische Interpretation insbesondere an Fächerecholotdaten der chinesischen Kooperationspartner durchgeführt werden. Hier gab es allerdings Probleme, weil ein Großteil der regionalen Daten durch den Auftraggeber der chinesischen Forschung (COMRA, Beijing) nicht freigegeben wurde. Daher war die Auswertung auf kleinräumige Gebiete um die Hydrothermalfelder herum beschränkt. Da die Explorationskriterien nur an Hand großräumiger Daten zu entwickeln sind und auch um eine erfolgreiche Promotion der Doktorandin zu gewährleisten wurde daher entschieden, regionale Daten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover mit heranzuziehen (aus einem Vergabeprojekt mit der BGR im Rahmen der INDEX-Fahrten). Weitere Mittel waren für den Einsatz des autonomen Unterwasserfahrzeugs (AUV ABYSS) des GEOMAR auf einer chinesischen Forschungsfahrt vorgesehen. Aufgrund von Ausfuhrbestimmungen der USA wurde die Freigabe hierzu nicht erteilt. Trotz der unerwarteten Beschränkung des Forschungsvorhabens durch amerikanische Exportbestimmungen, die den Einsatz des GEOMAR AUV ausschließen, konnten die Ziele des Projektes erreicht werden. Dies wurde durch die Erweiterung des Fokus auf den Zentralen Indischen Rücken unter Mithilfe der BGR erreicht.

Anders als die Bathymetriedaten der BGR an sich, wurden die bei der Analyse der Daten gewonnene Expertise und die Erkundungskriterien dem OASIS-Projekt zur Verfügung. Dies, in Zusammenspiel mit der bisherigen Kooperation, ermöglichte den chinesischen Partnern eine gezieltere Erkundung der Hydrothermalfelder Daxi, Tianxiu und Wocan am Carlsberg Rücken während der Ausfahrt auf dem *FS DaYangYiHao* im Sommer 2018. Diese Ausfahrt war bereits des Öfteren verschoben worden und fand nun am Ende der Projektlaufzeit statt. Dies und die gleichzeitige Durchführung einer langfristig geplanten Forschungsfahrt mit *FS Maria S Merian* vor Island machte eine deutsche Beteiligung an dieser chinesischen Ausfahrt unmöglich. Da der Einsatz eines AUVs während der gesamten Projektlaufzeit nicht realisiert werden konnte, basierte die geologische Analyse des Carlsberg Rückens alleine auf den schiffsgestützten Fächerecholot-Daten für die Topographie. Frei verfügbare satellitenbasierte geophysikalischen Parameter (z.B. Schwerefeld, Magnetik, etc) wurden jedoch zur Analyse hinzugezogen (siehe unten).

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Nach einem initialen Treffen im September 2015, haben in regelmäßigen Abständen Treffen der Projektpartner stattgefunden (Abb. 3). So wurde unter anderem die gemeinsame Ausfahrt M127 unter Leitung von Dr. Sven Petersen in 2016 genutzt, um die Bearbeitung und methodische Interpretation von Bathymetriedaten abzustimmen. Durch nachfolgende Treffen und einen regen, erfolgreichen Austausch mit den chinesischen Kollegen konnte bisherige Ergebnisse effizient zusammengeführt, Artikel veröffentlicht und weitere Publikationsvorhaben vorangetrieben werden.



Abb. 3: Impressionen verschiedener Projekttreffen über den Projektzeitraum, die zu einem regen und erfolgreichen Austausch zwischen dem SIO und GEOMAR geführt haben.

Insbesondere der mehrwöchige Aufenthalt von Frau Klischies in Hangzhou Anfang 2018 ermöglichte die gemeinsame Auswertung von Daten, die Diskussion der unterschiedlichen Methodenansätze sowie die Vorbereitung gemeinsamer Publikationen zur geologischen Kartierung. Während der Gegenbesuche in Kiel (2016, 2017) wurden insbesondere die chemischen Analyseverfahren durchgeführt, diskutiert und für die Veröffentlichung vorbereitet.

Die Fahrtplanung stellte eine besondere Herausforderung während des Projektverlaufes dar. Im Mai/Juni 2016 fand eine Meteor Ausfahrt (M127) unter Leitung von Dr. Sven Petersen zum Mittelatlantischen Rücken statt, an der ein chinesischer Wissenschaftler, Dr. Honglin Li, und ein Mitglied des chinesischen AUV Teams, Dr. Kai Zhang, teilnahmen. Im folgenden Jahr war eine chinesische Ausfahrt mit dem chinesischen Forschungsschiff *DaYangYiHao* unter Beteiligung des GEOMAR AUV's geplant. Aufgrund der US Ausfuhrbeschränkungen konnte weder diese Fahrt noch folgende Ausfahrten mit dem deutschen AUV bedient werden. Die chinesische Forschungsfahrt wurde aus anderen logistischen Gründen mehrmals verschoben. Die Nutzung eines neuen chinesischen AUV wurde ebenfalls vorgesehen. Gerade noch innerhalb des Projektzeitraumes wurde letztendlich im Juni/Juli 2018 eine Ausfahrt auf dem chinesischen Forschungsschiff *DaYangYiHao* in das Zielgebiet am Carlsberg Rücken durchgeführt, die allerdings ohne deutsche Beteiligung stattfinden musste, da Dr. Petersen zeitgleich an einer anderen Ausfahrt (RV Maria S Merian MSM75) beteiligt war.

Die Kooperation wird über den Projektzeitraum fortgeführt. So sind Besuche von Prof. Xiqiu Han für das Frühjahr 2019 und von Dr. Yejian Wang für Ende 2019 am GEOMAR geplant. Eine Publikation über die systematische, maßstabsübergreifende, geologische Analyse von Bathymetriedaten steht kurz vor der Fertigstellung und soll Mitte 2019 eingereicht werden. Veröffentlichungen zu der geologischen Interpretation des Referenzdatensatzes am langsam-spreizenden zentralen Atlantik und der geologischen Umgebung von Hydrothermalfeldern im deutschen Lizenzgebiet sind bei Journals mit Peer-Review eingereicht oder befinden sich in Vorbereitung, um das Promotionsvorhaben der Doktorandin zum Abschluss zu bringen.

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand der Forschung

1.4.1. Langsam-spreizende Mittelozeanische Rücken

Submarine Plattengrenzen stehen im Verdacht, die Bildung besonders großer und metallreicher Vorkommen zu fördern (Hannington et al., 2011; German et al., 2016). Die mit Geschwindigkeiten von weniger als 5 cm/Jahr auseinanderdriftenden Platten haben im Vergleich zu ihren schnell-spreizenden Äquivalenten (mit bis zu 15 cm/Jahr) eine kalte, brüchige Kruste und sind überwiegend durch punktuellen Vulkanismus gekennzeichnet. Die sich nur langsam öffnende „Lücke“ zwischen den Platten wird überwiegend durch tektonische Verwerfungen und Abschiebungen verfüllt, statt mit neuer, magmatischer Kruste. Die zum Teil sehr tiefreichenden Verwerfungen in der Kruste stellen gute Wegsamkeiten für die hydrothermalen, metall-reichen, heißen, aus der Tiefe aufsteigenden Fluide dar, die durch den Kontakt mit kaltem Ozeanwasser am Meeresboden ihre Metalle ausfällen (McCaig et al., 2007). Tiefreichende Verwerfungen in Kombination mit einer Magmen- bzw. Hitzequelle, die für die Zirkulation hydrothermale Fluide unbedingt erforderlich ist, sind daher als bevorzugte Explorationsgebiete einzuschätzen.

Es hat sich in den letzten Jahren aber auch gezeigt, dass Mantelgesteinskomplexe (sogenannte „Core Complexes“) in fast allen untersuchten Fällen Anzeichen für hydrothermale Aktivität aufweisen (Devey et al., 2010; Escartin et al., 2017), obwohl sie abseits der aktiven Spreizungsachse und damit auch abseits bekannter Wärmequellen liegen. Die genauen Gründe für diese Häufung von Hydrothermalsystemen und damit assoziierten Massivsulfidvorkommen sind noch nicht verstanden.

Trotz eines globalen, 57.000 km langen, MOR Systems beruht der Großteil der Erkenntnisse für langsam-spreizenden Mittelozeanische Rücken auf Untersuchungen in einem relativ kleinen Bereich: dem nördlichen Mittelatlantischen Rücken zwischen 12°N und 40°N. Dabei zeigt der größte Teil des restlichen Mittelatlantischen Rückens ebenfalls Spreizungsraten von 2 bis 4 cm/Jahr und auch der Carlsberg Rücken, sowie der Zentralindische Rücken (siehe Abb. 1) gehören zu den langsam-spreizenden Rücken. Ziel unserer Kooperation ist es daher auch, die bisherigen Erkenntnisse über das Auftreten hydrothermalen Systeme am langsam-spreizenden Mittelatlantischen Rücken auf ihre Übertragbarkeit auf andere Rückensysteme, wie den Indik, zu überprüfen.

1.4.2. Methoden der geologischen Kartierung

Mit Fächerecholoten lässt sich die Topographie des Meeresbodens auch in großen Wassertiefen hochauflösend kartieren. Fächerecholote sind mittlerweile internationaler Standard auf Forschungsschiffen, wobei sich die Genauigkeit und Verlässlichkeit der mit ihnen gesammelten Bathymetrie-Daten über das vorangegangene Jahrzehnt signifikant verbessert hat. Auch die Bearbeitung der Daten ist durch die gestiegene Rechenleistung von Computern deutlich beschleunigt worden. Schiffsgestützte Fächerecholotdaten erreichen eine Auflösung (auch Zellen- oder Pixelgröße genannt) von 50 bis 100 m und sind damit bedeutend genauer als satellitengestützte Radarmessungen (mit i.d.R. einer Auflösung von 1 bis 10 km). Doch während Satelliten globale Messungen durchführen können, ist die schiffsbasierte Kartierung des Meeresbodens zeitlich und damit regional begrenzt, sodass bis heute weniger als 15 % des weltweiten Meeresbodens hochauflösend kartiert sind. Um jedoch größere Zusammenhänge, wie z.B. die magmatischen und tektonischen Kontrollmechanismen auf die Verteilung von Erzvorkommen entlang eines Mittelozeanischen Rückens, begreifen zu können, ist ein flächendeckendes, hochauflösendes Bild der Topographie des Meeresbodens essentiell. Grundlage des Kooperationsprojektes bildet daher der Austausch von Bathymetrie-Daten, die Zusammenarbeit bei Kartierungsfahrten, sowie eine standardisierte Bearbeitung der Daten, um ein flächendeckendes regionales Abbild des Meeresbodens in konstant hoher Qualität zu erhalten.

Unbemannte, unabhängig vom Schiff operierende Tauchroboter, wie das Autonome Unterwasserfahrzeugs AUV ABYSS vom GEOMAR, aber auch geschleppte Systeme können den Meeresboden in einer Auflösung von wenigen Metern kartieren. Dies erlaubt neben der Aufnahme der regionalen Kontrollparameter auch die Untersuchung der Bedeutung von lokalen Gegebenheiten (Störungsmuster, Hangrutschungen, Eruptionszentren) auf die Bildung der Hydrothermalsysteme. Mittels Seitensichtsonar oder durch die Erstellung von Fotomosaiken kann die Auflösung bis in den Zentimeterbereich vorangetrieben werden. Die Interpretation der schiffsgestützten Bathymetrie kann so überprüft werden (engl. ground truthing) und um wichtige Detailinformationen, wie der Beschaffenheit des Meeresbodens oder der Zusammensetzung hydrothermalen Erzablagerungen, ergänzt werden.

Die schiffsgestützten bathymetrischen Daten werden auf Grundlage von verschiedenen Karten und Berechnungen und einer überwachten Klassifikation der Meeresbodenstrukturen analysiert. Mit Geoinformationssystemen (*ArcGIS*) wird dann eine geologische Karte des Meeresbodens erstellt (siehe Beispiel Menez Gwen Segment, Mittelatlantischer Rücken; Abb. 4). Diese ist Ausgangspunkt für eine strukturelle und tektonische Analyse, die aber auch zeitliche Zusammenhänge der vulkanischen Prozesse berücksichtigt (Altersabfolgen). Eine solche Herangehensweise ist in der Landvermessung und Fernerkundung seit langem etabliert, hat aber auf Grund mangelnder oder lückenhafter Daten oder auch wegen der schier Masse von Bathymetriedaten in der Meeresforschung bisher keine Umsetzung gefunden. Mit dem Einsatz und der Adaption vorhandener, sowie der Entwicklung neuer Kartier- und Bearbeitungsmethoden, soll daher das Verständnis der

Geologie des Meeresbodens und damit auch der Bildung hydrothermaler Erzvorkommen, sowie die Ermittlung ihres Rohstoffpotentials verbessert werden.

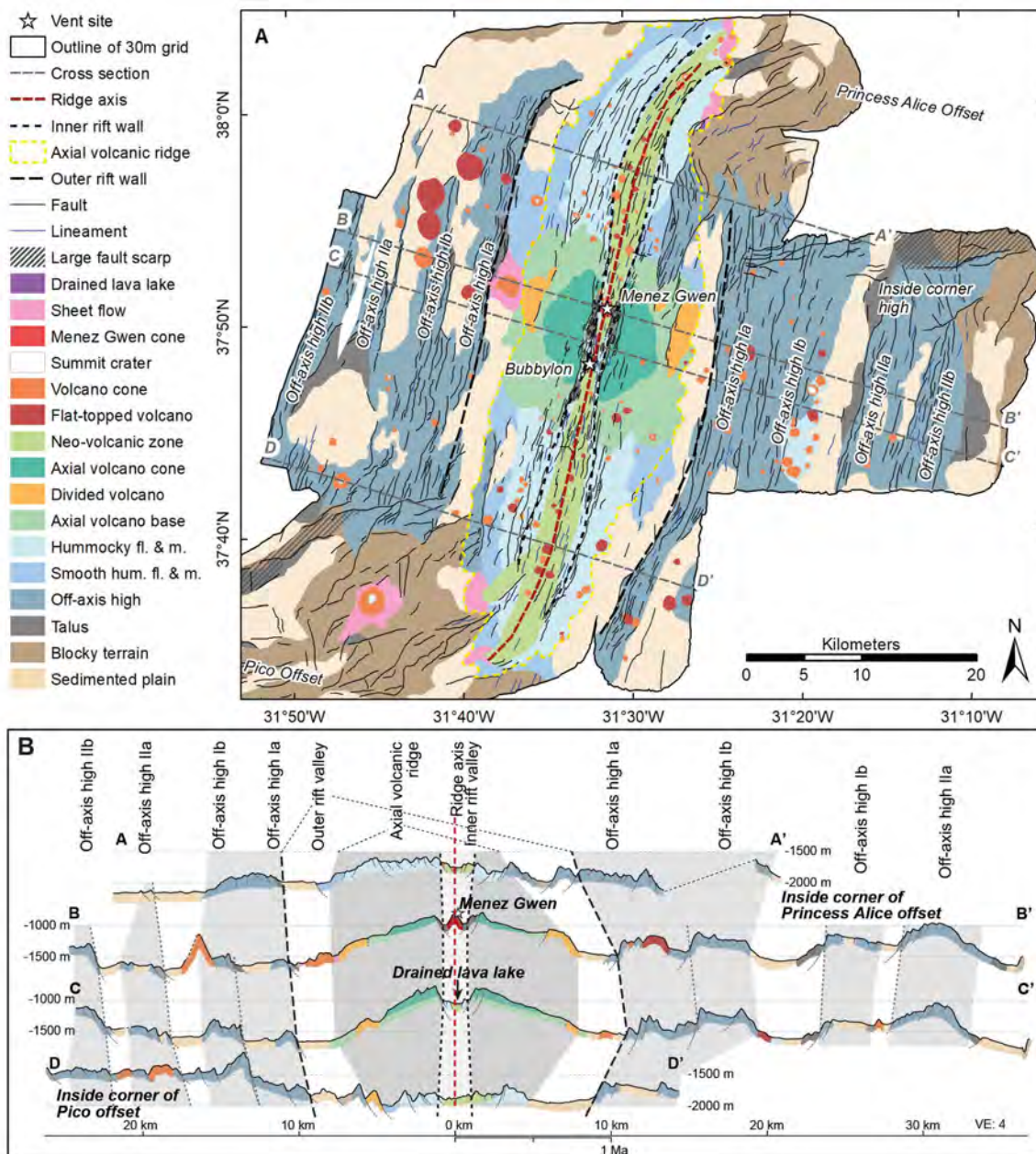


Abb. 4: Beispiel einer regionalen geologischen Karte eines langsam-spreizenden Mittelozeanischen Rückens. Menez Gwen Gebiet, Mittelatlantischer Rücken (Quelle: Klischies et al., 2019).

Literatur

- Devey CW, German CR, Haase KM, et al (2010) The relationships between volcanism, tectonism, and hydrothermal activity on the Southern Equatorial Mid-Atlantic Ridge. In: Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges. Geophysical Monograph Series 188, pp 133–152
- Escartín J, Mevel C, Petersen S, et al (2017) Tectonic structure, evolution, and the nature of oceanic core complexes and their detachment fault zones (13°20'N and 13°30'N, Mid

-
- Atlantic Ridge). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 18:1451–1482. doi: 10.1002/2016GC006775
- German CR, Petersen S, Hannington MD (2016) Hydrothermal exploration of mid-ocean ridges: Where might the largest sulfide deposits be forming? *Chemical Geology* 420:114–126. doi: 10.1016/j.chemgeo.2015.11.006
- Hannington M, Jamieson J, Monecke T, et al (2011) The abundance of seafloor massive sulfide deposits. *Geology* 39:1155–1158. doi: 10.1130/G32468.1;3 figures; Data Repository item2011342
- Maus S, Barckhausen U, Berkenbosch H, et al (2009) EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10:n/a–n/a. doi: 10.1029/2009GC002471
- McCaig AM, Cliff RA, Escartín J, et al (2007) Oceanic detachment faults focus very large volumes of black smoker fluids. *Geology* 35:935–938. doi: 10.1130/G23657A.1
- Monecke T, Petersen S, Hannington MD, et al (2016) The minor element endowment of modern sea-floor massive sulfides and comparison with deposits hosted in ancient volcanic successions. *Reviews in Economic Geology* 18:245–306.
- Petersen S, Krätschell A, Augustin N, et al (2016) News from the seabed – Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources. *Marine Policy* 70:175–187. doi: 10.1016/j.marpol.2016.03.012
- Petersen S, Lehrmann B, Murton BJ (2018) Modern seafloor hydrothermal systems: new perspectives on ancient ore-forming processes. *Elements* 14:307–312. doi: 10.2138/gselements.14.5.307
- Sandwell DT, Muller RD, Smith WHF, et al (2014) New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science* 346:65–67. doi: 10.1126/science.1258213
- Weatherall P, Marks KM, Jakobsson M, et al (2015) A new digital bathymetric model of the world's oceans. *Earth and Space Science* 2:331–345. doi: 10.1002/(ISSN)2333-5084
- Whittaker JM, Goncharov A, Williams SE, et al (2013) Global sediment thickness data set updated for the Australian-Antarctic Southern Ocean. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 14:3297–3305. doi: 10.1002/ggge.20181

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Aufgrund der Schwierigkeiten regionale Bathymetriedaten von COMRA zu bekommen, wurde der Datensatz um Daten aus einer Kooperation des GEOMAR mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) erweitert, um der Doktorandin die Realisierung ihres Promotionsvorhabens auf Basis eines umfangreichen Datensatzes zu ermöglichen. Frau Klischies hat dafür im Projektzeitraum an den Ausfahrten INDEX2016_2 mit dem FS Maria S. Merian und INDEX2017 mit dem TFS Sonne teilgenommen. Da diese Daten aus dem deutschen Lizenzgebiet stammen, dürfen diese ausschließlich von den deutschen Projektpartnern verwendet werden. Allerdings ermöglichen die dabei gewonnenen

Erkenntnisse einen Vergleich zu den Interpretationen der Daten vom Carlsberg Rücken und dem südlichen Atlantik.

2. Darstellung der Verwendung und erzielte Ergebnisse

2.1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über den Verlauf des Vorhabens im Vergleich zur ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung.

2.1.1. Arbeitsplanung

Die Bearbeitung und Analyse aller dem Projekt zur Verfügung stehenden schiffsbasierten sowie hochauflösenden (AUV und *HOMESIDE*) Bathymetriedaten ist abgeschlossen. Die Analyse der gesammelten, geochemischen Laserablationsdaten für die vier Hydrothermalfelder Kairei, Wocan, Daxi, und Tianxiu ist ebenfalls abgeschlossen. Die Daten der beiden ersten Datensätze sind bereits publiziert (Wang et al., 2017 und Wang et al., 2018). Eine gemeinsame Publikation der Datensätze von Daxi und Tianxiu ist in Vorbereitung (Einreichen in 2020).

Als gemeinsame Ausfahrt wurde die Forschungsfahrt M127 mit FS Meteor in 2016 durchgeführt. Die chinesische Ausfahrt konnte, nach mehrmaligen Verschiebungen durch die chinesische Seite, erst im Juni/Juli 2018 durchgeführt werden. Daraufhin war eine deutsche Beteiligung jedoch nicht mehr realisierbar. Die im Rahmen dieser Ausfahrt gewonnenen Ergebnisse werden daher nicht mehr analysiert werden können. Die Hauptabweichung zum ursprünglichen Antrag ergab sich aus der fehlenden Exportgenehmigung für GEOMARs AUV ABYSS für einen Einsatz auf einem chinesischen Forschungsschiff. Da auch von chinesischer Seite keine AUV-Ausfahrt am Carlsberg Rücken durchgeführt werden konnte, musste die Nutzung von hochauflösenden Daten für die Entwicklung geologischer Explorationskriterien durch den Wechsel auf Daten des INDEX-Projektes (Nutzung des tief-geschleppten *HOMESIDE* Gerätes sowie des AUV ABYSS) gewährleistet werden. Allerdings dürfen diese Daten dem chinesischen Projektpartner nicht zur Verfügung gestellt werden.

Die noch verbleibenden Arbeiten beinhalten deshalb ausschließlich die Publikation der bisher gewonnenen Ergebnisse.

2.1.2. Zeitplanung

Auf Grund der Datenlage, konnte die Bearbeitung der für alle Projektpartner verfügbaren schiffsgestützten Bathymetriedaten schneller als erwartet abgeschlossen werden. Ihre Analyse wurde Ende 2017 beendet, sodass sich entsprechende Publikationen in Arbeit befinden. Das Einreichen der Promotion von Frau Klischies ist nun für Ende 2019 geplant. Dafür befindet sich eine Veröffentlichung über die systematische, maßstabsübergreifende, geologische Analyse von Bathymetriedaten kurz vor dem Einreichen. Des Weiteren sind Publikationen über die geologische und strukturelle Umgebung von Hydrothermalfeldern im

Indischen Ozean in Arbeit. Die Veröffentlichungen sind für die zweite Jahreshälfte 2019 vorgesehen, damit das Promotionsvorhaben abgeschlossen werden kann.

In Abb. 5 sind der geplante und der tatsächlich umgesetzte Zeitplan zusammengefasst. Dabei sind in Grün die erfolgreich stattgefundenen Aktivitäten und in Grau die ursprünglich geplanten Zeitfenster der Aktivitäten dargestellt.

	2015		2016		2017		2018	
	Sommer	Herbst	Winter	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Frühling
Besuch am SIO		M1						M3
Besuch am GEOMAR								
Teilnahme der Doktorandin an Ausfahrten				BGR 2016		BGR 2017		
Gemeinsame Ausfahrten			M127					M2 ohne deutsche Beteiligung
Laboranalyse von Proben, Bearbeitung Bathymetrie								
Manuskripte, Vorträge								

Abb. 5: Finaler Arbeitsplan der stattgefundenen Aktivitäten (grün). In grau die ursprünglich angedachten Zeiträume. Die zusätzlichen Ausfahrten von Frau Klischies sind in orange aufgeführt.

2.1.3. Kostenplanung

Die Kostenplanung für das Projekt ist durch den Ausfall des AUV-Einsatzes auf dem chinesischen Forschungsschiff *DaYangYiHao* stark beeinträchtigt. Die Kosten zur Vorbereitung und Durchführung der Fahrt wurden nicht (0813- Verbrauchsmittel; 0848- Abschreibung Batterien; 0850- Containertransporte) oder nur in geringen Umfang (0838- Reisekosten zum Projektpartner) genutzt. Verschiebungen der wissenschaftlichen Ziele der chinesischen Forschungsfahrt hin zu dem Einsatz eines Bohrgerätes, anstelle eines autonomen Unterwasserfahrzeugs (AUV), sowie Terminverschiebungen auf den Sommer 2018 machten die Teilnahme deutscher Projektpartner an der chinesischen Forschungsausfahrt unmöglich. Die Zuwendung beinhaltet damit überwiegend Personal- sowie Reisekosten (siehe unten).

2.1.4. Methoden und Ergebnisse

Die schiffsbasierte Kartierung des Meeresbodens mittels Fächerecholoten ist ein Standardverfahren, um die Bathymetrie und Morphologie des Meeresbodens zu erfassen und sogenannte „Digitale Geländemodelle“ (DGM) zu erstellen. Aus der Morphologie des Meeresbodens lassen sich insbesondere an Mittelozeanischen Rücken, den jüngsten Ozeanbodenbereichen, geologische Karten ableiten. Die Verteilung geologischer Einheiten um bekannte Hydrothermalfelder und ein Verständnis der Zusammenhänge steht im Zentrum dieses Projektes, um in Zukunft die geologische Kartierung für die Exploration nach inaktiven Hydrothermalsystemen nutzen zu können.

Die in dem Projekt genutzten Bathymetriedaten sind in Tabelle 1 aufgelistet. Sie unterteilen sich in schiffsbasierte Fächerecholotdaten entlang 1300 km Rückenachse im Indischen Ozean und knapp 1000 km im südlichen Atlantik (siehe Abb. 1). Zusätzlich wurden für die Interpretation globale Datensätze anderer geophysikalischer und geologischer Parameter genutzt (Abb. 6). Dazu gehören satellitengestützte topografische Daten (GEBCO_2014; Weatherall et al., 2015), Daten zu Schwerefeldgradienten (Sandwell et al., 2014), globale Magnetikdaten (EMAG2; Maus et al., 2009;) und, z.B., auch Daten zur globalen Sedimentation (Whittaker et al., 2013). Die geologische Interpretation um hydrothermale Massivsulfidvorkommen stand dabei im Fokus der Arbeit. Weiterhin können die Daten hochauflösenden Bathymetrie von tauchenden und tief-geschleppten Fächerecholotssystemen beinhalten, die die größer-skaligen, geologischen Kartierungen verifizieren (Abb. 4).

Der Datensatz, der beiden Projektpartnern zur Verfügung steht, umfasst ausgewählte DGM vom Carlsberg Rücken, die durch das SIO aufgezeichnet und prozessiert wurden. Erweitert wurde der Datensatz durch eine Kooperation des GEOMAR mit dem National Oceanography Center, Southampton (UK), um Fächerecholotdaten der Fahrt CD149 zum Carlsberg Rücken (Tabelle 1). Öffentlich zugängliche Rohdaten des japanischen Forschungsschiffes RV Yokosuka entlang des Zentralindischen Rückens wurden am GEOMAR prozessiert und in die Auswertung integriert. Außerdem wurde ein Referenzdatensatz des GEOMAR vom Südlichen Mittelatlantischen Rücken hinzugezogen, um die Arbeiten im Indischen Ozean auf den besser erforschten Atlantik beziehen zu können.

Tabelle 1: Übersicht über dem Projekt bzw. den Projektpartnern zur Verfügung stehenden Bathymetriedaten und damit einhergehenden Digitalen Geländemodelle (DGM), sowie den Bearbeitungs- und Publikationsstatus.

Ausfahrt	Quelle	Region	Status
Kombinierter Datensatz	SIO	Carlsberg Rücken	Rohdaten prozessiert. DGM mit einer Auflösung von 70m. Keine flächendeckende Kartierung, maximal zwei Fächerbreiten. Geologische Kartierung durchgeführt in der nahen Umgebung der Hydrothermalfelder Tianxiu, Wocan und Daxi.
Kombinierter Datensatz	SIO	Carlsberg Rücken	Ausschnitte flächendeckender, prozessierter DGMs um die Hydrothermalfelder Tianxiu, Wocan und Daxi. Die Daten stehen für eine wissenschaftliche Publikation nicht zur Verfügung. Geologische Kartierung in Arbeit. Die Interpretation darf ggf. veröffentlicht werden.
RV Charles Darwin CD149	NOC ¹	Carlsberg Rücken	Rohdaten prozessiert. DGM mit einer Auflösung von 80m. Keine flächendeckende Kartierung, maximal eine Fächerbreite. Eingesetzt ergänzend zu höher auflösender, flächendeckender Bathymetrie.
RV Maria S Merian MSM25	GEOMAR	Südlicher Mittelatlantischer Rücken (SMAR)	Daten prozessiert. DGM mit einer Auflösung von 40m. Keine flächendeckende Kartierung, maximal drei Fächerbreiten. Verwerfungen und Vulkane in kompletten Datensatz interpretiert. Geologische Kartierung um Hydrothermalsysteme. Publikation in Arbeit.

Ausfahrt	Quelle	Region	Status
RV Meteor M82/3	Dubilier et al., 2012	Mittelatlantischer Rücken, 37°50'N	Flächendeckende Kartierung (DGM-Auflösung von 30m) des Menez Gwen Segmentes mit aktiven Hydrothermalfeldern. Publikation akzeptiert bei <i>Marine Geology</i> .
INDEX2011 & INDEX2012	BGR ²	Zentraler Indischer Rücken und Südost-Indischer Rücken	Flächendeckende, prozessierte DGM mit einer Auflösung von 45m. Geologische Kartierung abgeschlossen. Die Daten stehen ausschließlich den deutschen Projektpartnern zur Verfügung, sind jedoch zur Verwendung in wissenschaftlichen Publikationen frei gegeben.
INDEX2016_2	BGR ²	Zentraler Indischer Rücken und Süd-Ost-Indischer Rücken	Hoch-auflösende, flächendeckende DGMs mit einer Auflösung von 3m (Kartierung mittels AUV <i>ABYSS</i> und BGR <i>HOMESIDE</i>), zum Teil um bekannte Hydrothermalfelder. Geologische Kartierung abgeschlossen. Die Daten stehen ausschließlich den deutschen Projektpartnern zur Verfügung, sind jedoch zur Verwendung in wissenschaftlichen Publikationen frei gegeben.
RV Yokosuka YK01-15	JAMSTEC ³	Zentralindischer Rücken	Flächendeckende Kartierung (DGM-Auflösung von 100m) erstellt aus öffentlich zugängigen Rohdaten. Die Daten wurden am GEOMAR editiert. Eingesetzt ergänzend zu höher auflösender, flächendeckender Bathymetrie.
RV Yokosuka YK05-16(Leg1)	JAMSTEC ³	Zentralindischer Rücken	Flächendeckende Kartierung (DGM-Auflösung von 100m) erstellt aus öffentlich zugängigen Rohdaten. Die Daten wurden am GEOMAR editiert. Eingesetzt ergänzend zu höher auflösender, flächendeckender Bathymetrie.
RV Yokosuka YK09-13	JAMSTEC ³	Zentralindischer Rücken	Flächendeckende Kartierung (DGM-Auflösung von 100m) erstellt aus öffentlich zugängigen Rohdaten. Die Daten wurden am GEOMAR editiert. Eingesetzt ergänzend zu höher auflösender, flächendeckender Bathymetrie.
RV Yokosuka YK13-01	JAMSTEC ³	Zentralindischer Rücken	Flächendeckende Kartierung (DGM-Auflösung von 100m) erstellt aus öffentlich zugängigen Rohdaten. Die Daten wurden am GEOMAR editiert. Eingesetzt ergänzend zu höher auflösender, flächendeckender Bathymetrie.
RV Yokosuka YK13-02	JAMSTEC ³	Zentralindischer Rücken	Flächendeckende Kartierung (DGM-Auflösung von 70m) erstellt aus öffentlich zugängigen Rohdaten. Die Daten wurden am GEOMAR editiert. Eingesetzt ergänzend zu höher auflösender, flächendeckender Bathymetrie.

¹⁾ National Oceanography Center, Southampton (UK) ²⁾ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover; ³⁾ Japan Agency for Marine-Earth Sciences (Japan)

Mit diesem sehr diversen, sowie umfangreichen Datensatz kann die geologische Kartierung und Analyse zur Höffigkeit von Massivsulfidvorkommen entlang eines statistisch relevanten Anteils des globalen Mittelozeanischen Rückensystems durchgeführt werden. Die geologische Kartierung ist abgeschlossen und wird in Publikationen münden, die sich derzeit in Vorbereitung befinden. Erste Analysen wurden bereits auf der Goldschmidt Paris 2017 vorgestellt.

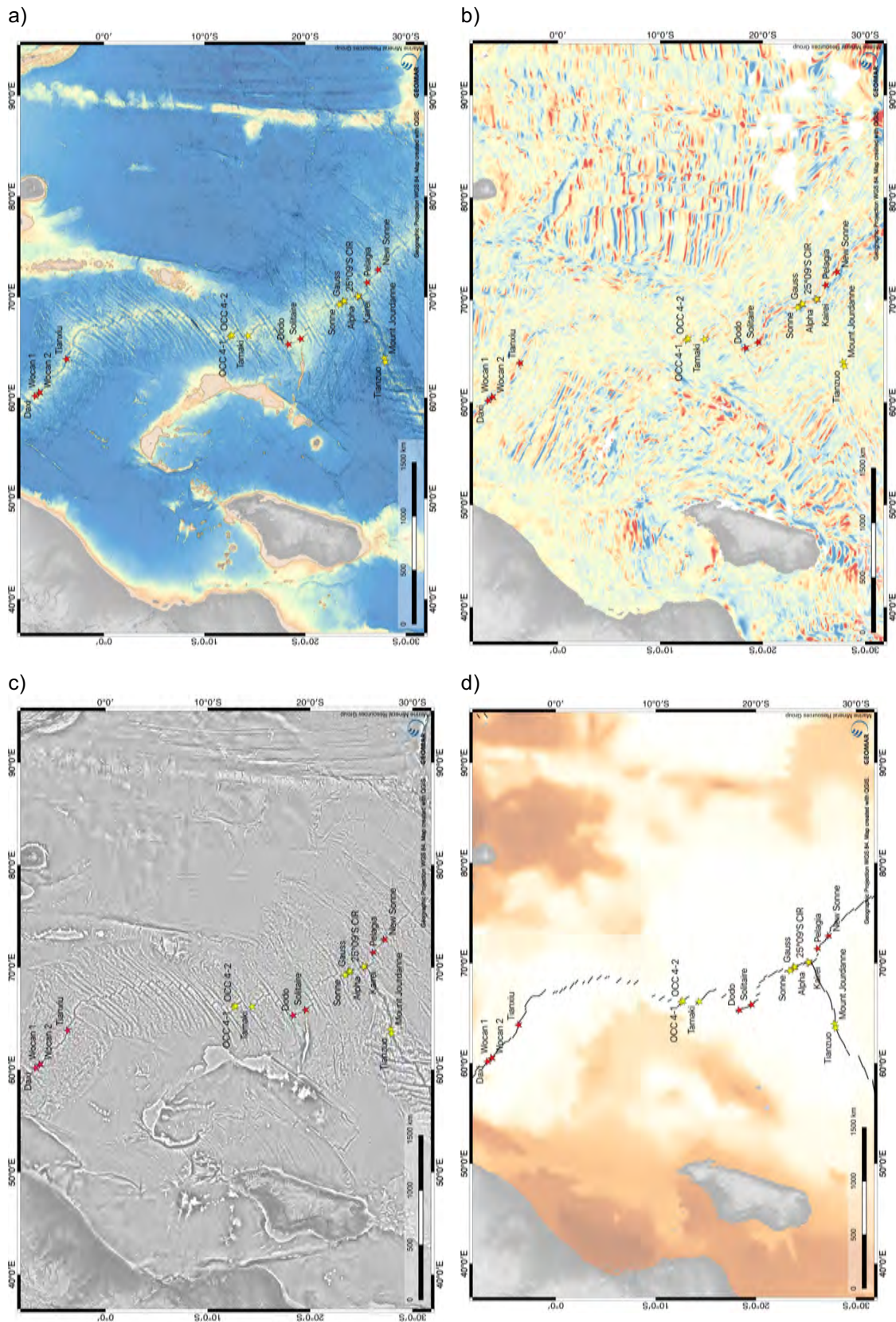


Abb. 6: Beispiele für globale und regionale Datensätze, die für die geologische Interpretation herangezogen wurden. a) Topographie (Weatherall et al., 2015); b) Magnetik (EMAG2; Maus et al., 2009); c) Schwerefeldgradient (Global_grav_1min; Sandwell et al., 2014); d) Sedimentation (Whittaker et al., 2013). Sterne bezeichnen die Lage aktiver (rot) und inaktiver (gelb) Hydrothermalefelder im Indischen Ozean (Quelle: GEOMAR).

Im Rahmen des Projektes hat die Doktorandin an der Entwicklung eines Workflows zum Aufbereiten von Fächerecholotdaten des AUV *ABYSS* mitgewirkt. Der Workflow wurde im November 2018 auf der 2018 IEEE OES AUV Konferenz in Porto vorgestellt. Für die geologische Kartierung wurden für die jeweiligen Struktureinheiten Kriterienkataloge entwickelt (Tab. 2) die als Grundlage für die Zuordnung dienen. Für die Interpretation größerer geologischer Einheiten wurde auch Derivate der Topographie genutzt (Hangneigung, Neigungsrichtung, Krümmung, Rauigkeit, etc.; Abb. 7) in denen z.B. Strukturen von Vulkanen aber auch von Erosionsrinnen deutlicher zu erkennen sind als in den topographischen Daten alleine. Die geologischen Einheiten wurden zu Polygonen zusammengefasst und interpretiert (Abb. 8, 9).

Tabelle 2. Kriterien für Aufnahme geomorphologischer Geländestrukturen in geologische Karten.

Geologic feature/unit	Morphologic attributes	Geologic meaning
Normal fault	linear step with sharp edges and steep slope, usually constant dip of scarp along-strike	brittle failure and downward dip-slip movement of hanging wall block; fault strike is perpendicular to lowest, horizontal, compressional stress (extensional regime)
Caldera ring fault	(nearly) circular, inward-facing scarp at the summit of a large cone or hill	outlines a caldera; ring fault or fissure marks brittle failure due to subsidence (collapse) of the caldera floor relative to the volcanic edifice around
Axial volcanic ridge (AVR) crest	elongated, axis-parallel ridge of aligning mounds and/or volcanos	location of most recent volcanic activity; due to a large fissure eruption (pillow ridge) and/or series of point source eruptions (pillow mounds)
Corrugation	linear, shallow, ridge-perpendicular furrow with smooth edges	striation on the fault plane of a deep routing detachment; indicate direction of fault displacement
Caldera	confined, (nearly) circular depression at the summit of a large cone or hill	effusion and/or drainage of large magma volumes causes magma chamber roof to collapse and subsidence of the overlying rocks
Crater	funnel-shaped depression at the summit of a cone or hill	indicates explosive eruption mechanisms, or small-scale magma chamber collapse (high magma effusion rate)
Volcano	cone-shaped edifice with steep flanks; round outline of convex slope-break	eruptive feature; consists of stacked pillows, or a series of layered sheet flows and volcanic ejecta; result of a (series of) point-source eruption(s)
Shield volcano	large cone- or dome-shaped, round edifice with smooth, inclined flanks	large eruptive feature; consists of a series of layered sheet flows, volcanic ejecta, and hyaloclastites; result of repeated, voluminous, focused eruptions
Large volcanic mound	dome-shaped edifice with hummocky flanks and an irregular, rounded outline	eruptive feature; consists of stacked pillows; result of (repeated) low-effusion rate or high-viscosity, point-source eruption(s); limited magma supply
Rifted axial volcano	domed elevation with a semicircular outline, a scarp on one side, and an otherwise smooth, slightly inclined surface	rifted half of a large eruptive feature (shield volcano) previously located on the ridge axis (split in half); consists of a series of layered sheet flows, volcanic ejecta, and hyaloclastites; result of repeated, voluminous, focused eruptions and subsequent rifting; formerly fertile magma source

Geologic feature/unit	Morphologic attributes	Geologic meaning
Hummocky volcanic terrain	elevated area of small, directionless, unconfined depressions and mounds; dominated by rounded shapes and steep slopes	accretionary, volcanic terrain consisting of small mounds of stacked pillow lava, and talus filled depressions in between; high magma volume, but single, low-effusion eruptions; forms on- or near-axis
Volcanic plain	overall flat area with minor mounds or depressions; may be slightly inclined	volcanic terrain of lobate and sheet flows caused by (repeated) high effusion rate eruption(s); potentially covers other morphologies; forms on- or near-axis
Sedimented hummocky terrain	slightly elevated area of smooth, small, directionless, unconfined depressions and mounds; dominated by rounded shapes and intermediate slopes	eroded, accretionary, volcanic terrain consisting of broken pillow mounds, with talus and sediment filled depressions in between; documents repeated point-source, low-effusion eruptions which is subsequently; near-axis
Hummocky off-axis high	bathymetric high with a surface of small, directionless, unconfined depressions and mounds; (axis-) parallel, linear steps (faults) run through the unit	rifted, off-axis and (heavily) faulted hummocky volcanic terrain; forms abyssal hill; documents past period of voluminous magmatic accretion; inwards usually bound by larger throw faulting facing the ridge axis
Smooth off-axis high	bathymetric high with a surface of smooth, small, directionless, unconfined depressions and mounds; few (axis-) parallel, linear steps (faults) run through the unit	rifted, off-axis, eroded hummocky volcanic terrain; forms smooth abyssal hills; documents past period of magmatic accretion; inwards usually bound by faulting facing the ridge axis
Off-axis volcanic plain	overall flat area with minor mounds or depression; may be terraced due to (axis-) parallel, linear steps (faults) running through; may be slightly inclined	rifted, off-axis, volcanic plain; forms flat, off-axis terrain; documents (repeated) high-effusion rate magmatic event(s)
Nodal basin	bathymetric low with irregular, edged morphologies and directionless steps, breaks, and ridges	strongly deformed and subsided crust with talus and sediments; at segment ends, in non-transform discontinuity
Sedimented basin	depression with smooth, relatively even floor	subsided terrain with thick sediment cover, levelling out potentially underlying morphologies; may outline areas of long-term, volcanic and tectonic inactivity
Talus	irregular, finely textured morphology on steep, inclined areas (scarps)	mass wasting deposit from gravitational collapse of instable slopes; downslope transport of rock masses

Die Erstellung von Methoden zur geologischen Interpretation von topographischen und anderen Daten hat sich als wesentlicher Bestandteil des Projektes herausgestellt. Regionale geologische Karten des Meeresbodens sind zwingende Voraussetzung für die Erstellung von Explorationskriterien und existierten praktisch weltweit vor dem Beginn des Projektes nicht. Ein wissenschaftlich fundierter Merkmalskatalog für geologische Elemente an langsam spreizenden Rücken wurde im Rahmen von OASIS erstellt und diente als Grundlage für die Entwicklung der Explorationskriterien auf submarine Massivsulfide.

Die Explorationskriterien wurden dann u.a. auf der Grundlage der Lage und geologischen Situation in der Umgebung bereits bekannter Hydrothermalfelder im Indischen Ozean entwickelt (Abb. 10). Dazu gehören z.B. das Auftreten und die Nähe zu größeren axialen Vulkanstrukturen, tiefreichenden Störungszonen oder ozeanischen Kernkomplexen.

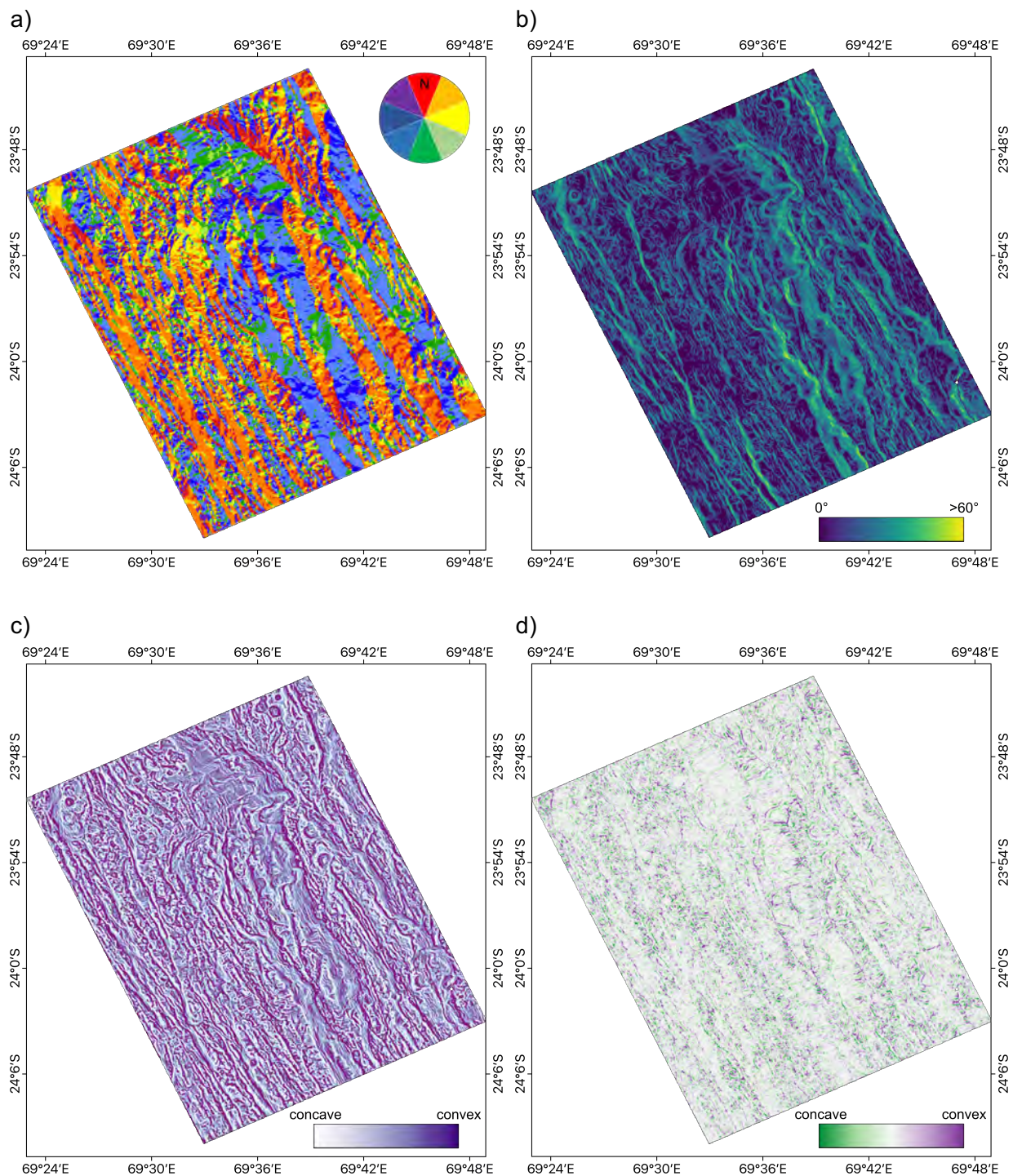


Abb. 7: Derivate der Topographie angewendet auf einen schiffsbasierten Datensatz der BGR. Diese Derivate werden für die geologische Interpretation herangezogen. Dargestellt sind hier a) Neigungsrichtung, b) Hangneigung, c) Krümmung, d) tangentielle Krümmung.

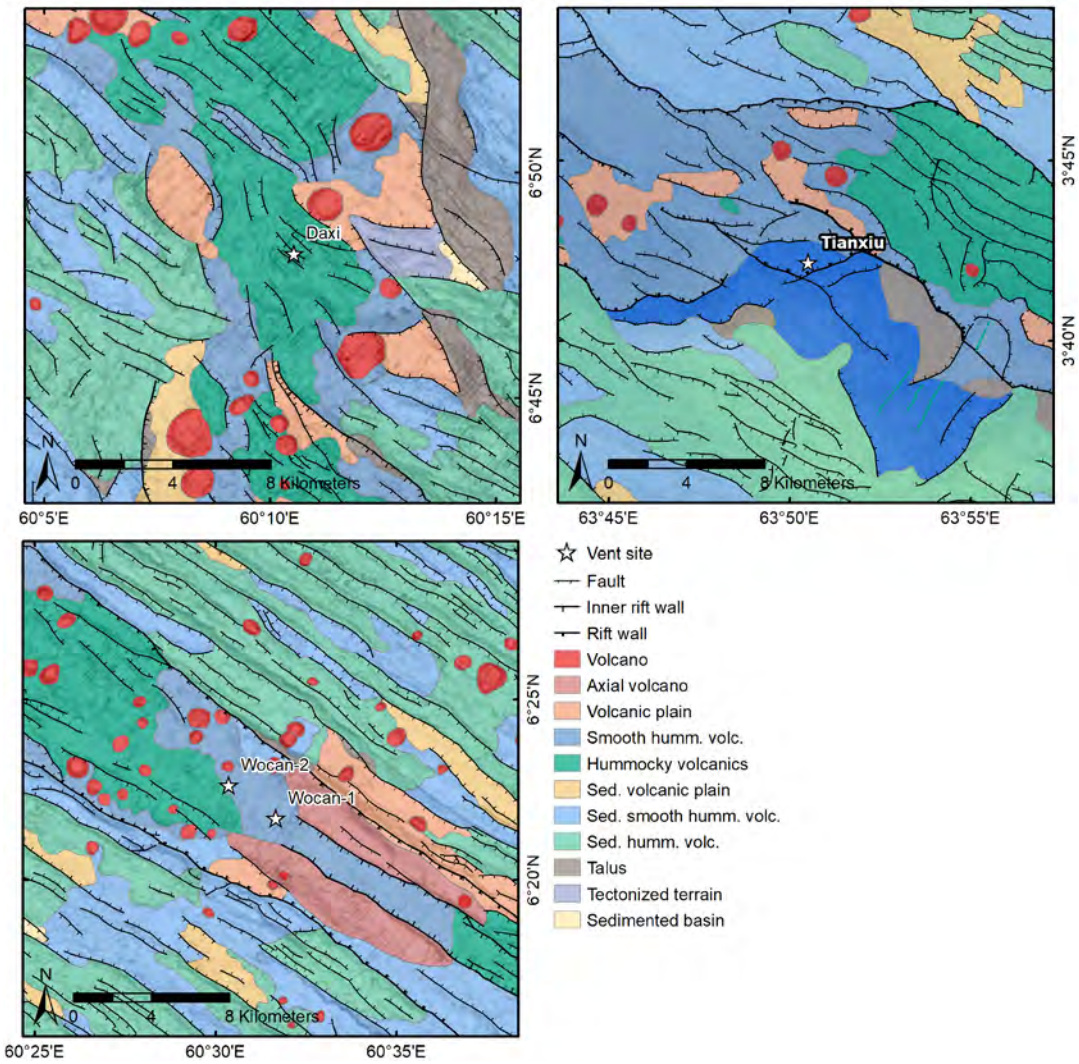


Abb. 8: Geologische Kartierung um die Hydrothermalfelder am Carlsberg Rücken basierend auf Schiffsfächerecholotdaten von COMRA und CD149.

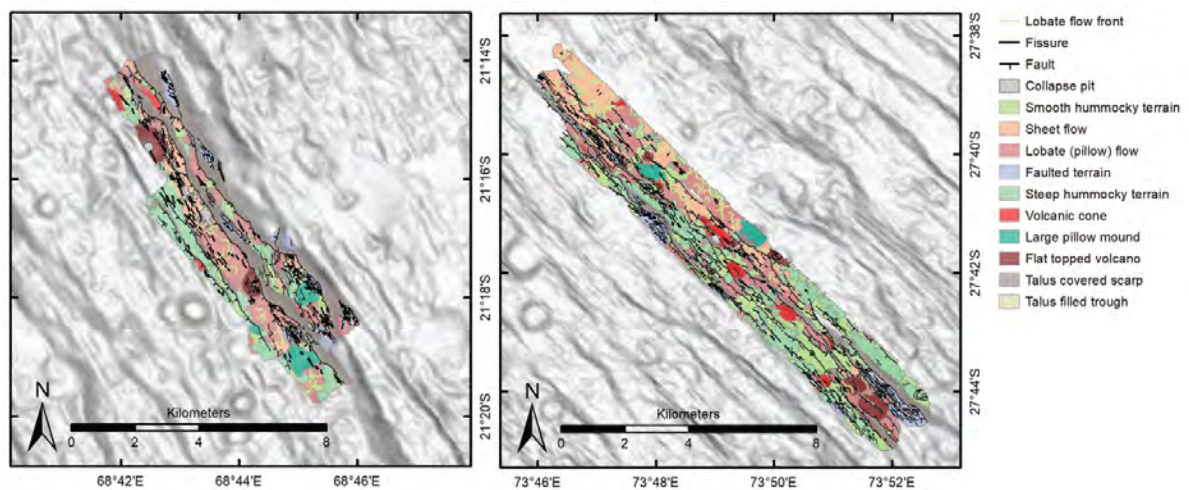


Abb. 9: Geologische Kartierung am zentralen Indischen Rücken und dem Südost-Indischen Rücken basierend auf hochauflösenden Bathymetriedaten der BGR, die mit dem GEOMAR Tauchroboter AUV Abyss (links) und dem geschleppten Fächerecholotssystem *Hometown* der BGR (rechts) gewonnen wurden.

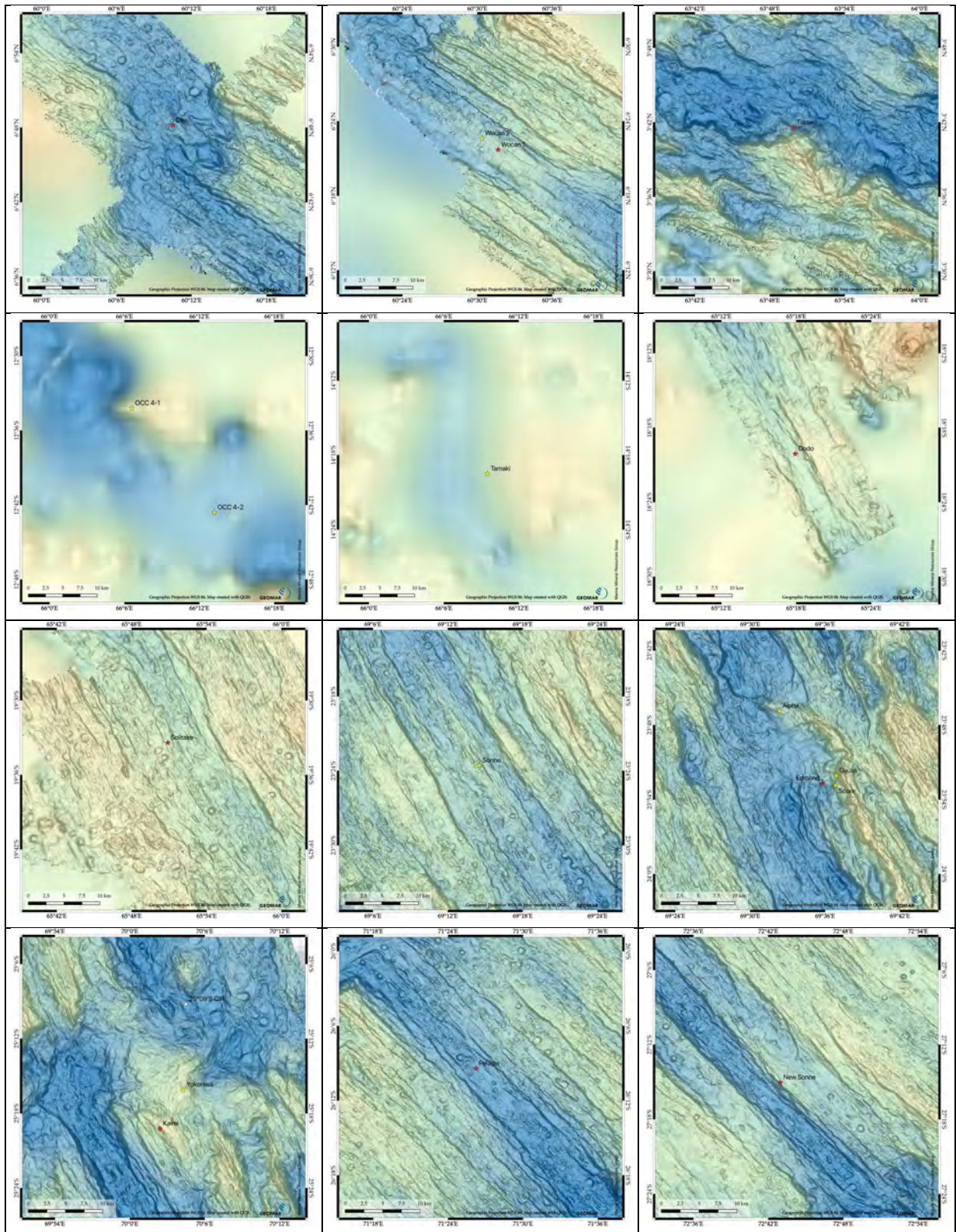


Abb. 10: Lage bekannter Hydrothermalfelder (rot=aktiv; gelb=inaktiv) entlang des Carlsberg Rückens, des Zentralindischen Rückens und des Südostindischen Rückens die für die Erstellung von Explorationskriterien herangezogen wurden. Die zu berücksichtigende unterschiedliche Auflösung der zur Verfügung stehenden topographischen Daten wird hier deutlich.

Tabelle 3. Explorationskriterien für Massivsulfidvorkommen an langsam spreizenden Mittelozeanischen Rücken.

Feature	Elemente	Wichtung
Störungen	Länge von Störungen (km) Versatzhöhe von Störungen (m) Störungsdichte Kreuzungspunkte von Störungen Abstand zu großen Störungen (m)	0, 1, 2 0, 1, 2 diffus 0, 1 relativ
Vulkane	Auftreten und Größe von Vulkanen Abstand zu Vulkanzentren (km) Vulkandichte	0, 1, 2 relativ diffus
Kernkomplexe	Auftreten und Größe von OCCs Lage zum OCC (außerhalb, innerhalb)	0, 1 0, 1
Geometrie	Abstand zum Segmentende (km) Abstand zur Segmentmitte (km)	relativ relativ
andere	Standardabweichung zur mittleren relativen Wassertiefe Abstand zu Wechsellinien im Schwerfeld (km) Abstand zu Wechsellinien im Magnetfeld (km) Symmetrie der Meeresbodenspreizung Abweichung der Spreizungsrichtung zum Verlauf der Plattengrenze	relativ relativ relativ 0, 1 relativ

Neben diesen einfach zu identifizierenden Einschlusskriterien wurden weitere entwickelt, die sich nur durch GIS-basierte Berechnungen ergeben (z.B. Häufung von Störungen oder Vulkanen, Standardabweichung zur mittleren Wassertiefe, etc; Tab. 3). Die Grundlagen für die Entwicklung der generellen Explorationskriterien ist damit weit fortgeschritten. Die Grenzwerte der Kriterien (z.B. Abstand zu großen Störungen, was sind in einer bestimmten Region große Störungen, wie dicht liegen sie beieinander) sind von Region zu Region in Abhängigkeit von der Spreizungsgeschwindigkeit bzw. der Plattenkonfiguration unterschiedlich. Daher ist eine Anpassung an die jeweilige Umgebung notwendig. Diese Informationen in computergesteuerte Algorithmen umzusetzen ist der nächste Schritt in der Entwicklung der Explorationsmethodik.

2.1.5. Geochemische Analysen

Geochemische Analysen an Massivsulfiden vom Carlsberg Rücken wurden von Prof. Xiqiu Han und Dr. Yejian Wang in den Laboren des GEOMAR, sowie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel durchgeführt. Die dabei gewonnenen Spurenelementmessungen und Laserablationsdaten der Vorkommen Kairei und Wocan sind ausgewertet, erste Ergebnisse sind in 2017 und 2018 publiziert worden (Wang et al., 2017; 2018) und eine weitere Publikation über die Geochemie der Sulfide aus den Hydrothermalfeldern TianXiu und Daxi ist in Arbeit und soll noch 2019 eingereicht werden.

2.2. wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Zuwendung wurde für Personalkosten für die Doktorandin (ca. 116.300,- €) sowie für die Reisekosten zum Projektpartner nach China eingesetzt (ca. 12.200,- €). Verwaltungskosten und Gemeinkosten durch die Verwaltung des GEOMAR schlugen mit etwa 29.400,- € zu Buche.

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Bearbeitung der topografischen Daten, die Entwicklung der geologischen Merkmale und die Erstellung der geologischen Karten waren sehr zeitintensiv und haben die Arbeitszeit der Doktorandin voll ausgefüllt. Ohne die Erstellung der Merkmalskataloge (Tabelle 2) wäre die Entwicklung von Explorationskriterien (Tabelle 3) nicht möglich gewesen.

2.4. Nutzen sowie Verwertbarkeit des Ergebnisses

Nach momentanem Kenntnisstand sind und werden im Rahmen des OASIS-Projektes keine Schutzrechtsanmeldungen etc. vorgesehen oder erforderlich. Die Ergebnisse des OASIS-Projekts bezüglich der Exploration von hydrothermalen Massivsulfiden am Meeresgrund, sowie der Abschätzung ihres Rohstoffpotentials, haben den Basisdatensatz der EU-Projekte „Blue Mining“ und MIDAS um wertvolle Informationen zum Auftreten von Massivsulfiden an langsam-spreizenden Mittelozeanischen Rücken erweitert und so zu einem besseren Verständnis der nachhaltigen Nutzung von hydrothermalen Tiefsee-Massivsulfiden für den Rohstoffbedarf der Menschheit beigetragen.

Zudem beschränkt sich die Exploration von Massivsulfiden zur Zeit mit der Detektion von Temperatur- oder Trübheitsanomalien in der Wassersäule (engl. „*plume hunting*“) fast ausschließlich auf aktive Quellen und damit auf belebte, von hoch spezialisierten Organismen besiedelte Metallvorkommen. Übergeordnetes Ziel bildet deshalb die Entwicklung von Explorationskriterien in Bathymetriedaten, mittels derer in Zukunft nachhaltig, flächendeckend und damit effektiver nach potentiellen Lokationen inaktiver Vorkommen geforscht werden kann. Da Fächerecholotsysteme weltweiter Standard auf Forschungsschiffen sind, sind die Erkenntnisse der Datenverarbeitung, Kartierung und Exploration mittels Fächerecholoten international anwendbar. Ziel ist es die geologische Kartierung als Standard-Tool in der Erkundung des Meeresbodens zu etablieren.

Wie in der Vorhabensbeschreibung dargestellt, werden die Daten und Ergebnisse in der internationalen Fachliteratur publiziert bzw. in Datenbanken hinterlegt (BSH, Pangea, OSIS Kiel). Alle Daten und Ergebnisse können somit für Fragen zur Seerechtskonvention und für Abschätzungen des Rohstoffpotentials von mineralischen Rohstoffen genutzt werden. Zurzeit befinden sich mehrere Publikationen in Bearbeitung. Die Bedeutung dieses Themas wird international anerkannt und führte vor kurzem (2018) zur Bildung einer Arbeitsgruppe „Erkundung von Massivsulfiden“ des internationalen wissenschaftlichen Zusammenschlusses InterRidge (www.interridge.org). Auf dem ersten InterRidge-Workshop im

September 2019 in Hangzhou (China) werden die Ergebnisse des OASIS-Projektes vorgestellt.

Das OASIS-Projekt wird Ergebnisse von langsam-spreizenden Mittelozeanischen Rücken aus dem nördlichen und südlichen Atlantik sowie dem Indik auf ihre Übertragbarkeit überprüfen. Ein möglicher nächster Schritt könnte dabei die Erweiterung der Erkenntnisse auf Mittelozeanische Rücken mit anderen Spreizungsraten beinhalten. Ein wesentlicher Punkt für die weitere Entwicklung ist das Umsetzen der Explorationskriterien in Kartenform, um Vorhersagen in unbekanntem Gelände zu ermöglichen. Dazu müssen durch die Nutzung von GIS-Routinen oder mittels Unterstützung von weiteren Analyseprogrammen („R“, Python) unterschiedlichste Informationslayer abgefragt und analysiert werden. Auch eine Automatisierung des Analyseprozesses der Bathymetriedaten („machine learning“) wird angestrebt, um die sehr zeitintensive Bearbeitung und Interpretation weiter zu beschleunigen und zu standardisieren und sie somit objektiver und reproduzierbar zu machen. Beide Themenkomplexe werden derzeit im Zusammenhang mit dem INDEX-Projekt der BGR weiterverfolgt.

2.5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Bisher sind keine ähnlichen oder vergleichbaren Vorhaben am Carlsberg Rücken von dritter Seite bekannt. Aktuelle Forschungsaktivitäten am Zentralen Indischen Rücken der BGR finden in enger Absprache mit den deutschen Projektpartnern statt. Von der dabei gewonnenen Expertise profitierte das OASIS-Projekt und ermöglichte so eine effizientere Umsetzung des Vorhabens. Wir erwarten aber in der näheren Zukunft eine deutliche Zunahme an Aktivitäten im Bereich der regionalen geologischen Kartierung. So beginnen derzeit Projekte an der NTNU in Trondheim (Norwegen) sowie an der Universität Ottawa in Kanada (Projekt: Metal Earth). Die während des Projektes OASIS gewonnenen Erkenntnisse, die Methoden und die geologischen Merkmale kommen in weiteren grundlegenden Arbeiten unserer Arbeitsgruppe in diesen Projekten zur Anwendung.

2.6. erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Klischies M, Petersen S, Hannington MD (2017). Geologic mapping reveals structural limitations on hydrothermal vent locations. *Goldschmidt Conference, Paris*, (abstract: 2017004319).

Klischies M, Rothenbeck M, Steinführer A, Yeo IA, dos Santos Ferreira C, Mohrmann J, Faber C, Schirnack C (2018). AUV *Abyss* workflow: autonomous deep sea exploration for ocean research. 2018 *IEEE OES AUV Porto* 2018.

Klischies M, Petersen S, Devey CW (2019). Geological mapping of the Menez Gwen segment at 37°50'N on the Mid-Atlantic Ridge: implications for accretion mechanisms and associated hydrothermal activity at slow-spreading mid-ocean ridges. *Marine Geology* 412: 107-122.

-
- Klischies M, Petersen S, Hannington MD, Graber S, Schwarz-Schampera U (2019) Assessing the regional geology of the Rodriguez Triple Junction and its influence on the location of hydrothermal activity. *Goldschmidt Conference, Barcelona*, 12-17 August 2019.
- Klischies M, Hannington MD, Petersen S, Andersen MO (in Vorb.). Geological mapping of mid-ocean ridges from multibeam echosounding data. White paper.
- Klischies M, Petersen S, Schwarz-Schampera U, Hannington MD, Li H, Han X (in Vorb.). Geological controls on hydrothermal activity in the Indian Ocean.
- Li H, Klischies M, Han X, Petersen S (in Vorb.). Geological setting of hydrothermal activity along the Carlsberg Ridge.
- Wang Y, Han X, Petersen S, et al. (2017). Mineralogy and trace element geochemistry of sulfide minerals from the Wocan Hydrothermal Field on the slow-spreading Carlsberg Ridge, Indian Ocean. *Ore Geology Reviews* 84: 1-19.
- Wang Y, Han X, Petersen S, et al (2018) Trace metal distribution in sulfide minerals from ultramafic-hosted hydrothermal systems: Examples from the Kairei vent field, Central Indian Ridge. *Minerals* 8:526–1–21. doi: 10.3390/min8110526.
- Wang Y, Han X, Petersen S, Frische M, et al. (in Vorb.) Trace element composition of massive sulfides from the Tianqiu and Daxi hydrothermal fields, Carlsberg Ridge.

Appendix: Published peer-reviewed articles related to the OASIS project.