



Teil I Kurzbericht

Zuwendungsempfänger: GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Wischhofstr. 1-3, 24148 Kiel

Förderkennzeichen: 03G0295OA

Projektleiter: Ingo Grevemeyer, Prof. Dr.

Vorhabenbezeichnung: GUATOPS: Seismische Abbilder schnell-spreizender ozeanischer Lithosphäre im Guatemala Becken: Vorstudien für das International Ocean Discovery Program (IODP) zur Durchteufung der ozeanischen Kruste und Erbohrung der Moho

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2022 bis 31.01.2025

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0295OA gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen / den Autoren.

1. Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand

Die Plattentektonik beschreibt die Bildung, Entwicklung, und das Recycling der Ozeanischen Lithosphäre in den Subduktionszonen als einen Kreislauf. Dieser Kreislauf ist fundamental für den Wärme- und Stoffaustausch zwischen der Festen Erde und der Hydrosphäre. Ozeanische Kruste aus dem Pazifik wird dabei oft als Referenz verwendet, obwohl auch sie strukturelle Variabilität zeigt. Im Rahmen einer Britisch-Deutschen Kooperation wurde 15 bis 24 Mio. Jahre alte schnell-spreizende ozeanische Kruste im östlichen Pazifik charakterisiert sowie systematische Änderungen in ihrer Struktur im Tiefseegraben von Mittelamerika untersucht. Im Mittelpunkt der Arbeiten standen sowohl mehrkanal-reflexionsseismische als auch refraktions- und weitwinkelseismische Messungen entlang eines Korridors sowie in drei Regionen, wo detaillierte Studien zur lateralen Variabilität der Kruste durchgeführt wurden. Zwei dieser Arbeitsgebiete charakterisieren normale Ozeanische Kruste während im dritten Gebiet der Übergang in den Tiefseegraben und die Einflussnahme der dort auftretenden Verwerfungen auf die Struktur, physikalischen Eigenschaften und Hydrogeologie untersucht wurden. Hier stand vor allem die die Hydrierung des Erdmantels im Mittelpunkt. Darüber hinaus liefert das Vorhaben u.a. die notwendigen Voruntersuchungen für das im Forschungsplan des International Discovery Program (IODP) vorgesehene „MoHole“ (M2M; IODP-805MDP) sowie Daten für einen Bohrvorschlag zur Untersuchung der Mantelhydrierung (IODP-876Pre) im Tiefseegraben von Costa Rica.

2. Ablauf des Vorhabens

Der vorgelegte Zeitplan wurde eingehalten. Während des Zeitraumes zwischen dem Projektbeginn bis zur Ausfahrt (**01.08.2022 – 30.11.2022**) stand die Verschiffung der Ausrüstung sowie die Detailplanung der „Barter“ Expedition JC228 auf dem königlich Britischen Forschungsschiff RRS JAMES COOK im Fokus der Aktivitäten. Eine besondere Herausforderung stellte die logistische Bereitstellung der umfangreichen Ausrüstung für die in zwei Abschnitte aufgeteilte Expedition dar. Insgesamt wurden 12 Container (zwei davon mit Übergröße) verschifft. Kleiner Probleme ergaben sich mit der sehr bürokratischen Zollabwicklung im Hafen von Caldera, Costa Rica, so dass die JAMES COOK erst mit einem Tag Verspätung auslaufen konnte. Sowohl der erste Abschnitt der Expedition JC228 (**03.12.2022 – 09.01.2023**) als auch der zweite Abschnitt (**13.11.23 – 22.01.2023**) erfolgte von Hafen von Caldera, Costa Rica, aus. Auf dem ersten Fahrabschnitt unter Leitung von Prof. Ingo Grevemeyer (GEOMAR) und Prof Henstock (NOC) wurden alle seismischen Arbeiten durchgeführt und sowohl mehrkanal-reflexionsseismische mit einem 6-km Seismik-Streamer als auch refraktionsseismische Messungen mit Ozean-Boden-Seismometern durchgeführt. Auf dem zweiten Abschnitt unter Leitung von Dr. Ingo Klauke (GEOMAR) und Prof. Henstock wurden Schwerelot zur Gewinnung von Porenwasser und geothermische Messungen (Dr. Norbert Kaul, Uni. Bremen) durchgeführt. Der Einsatz des „Tauchroboters“ AUTOSUB musste auf Grund technischer Probleme abgebrochen werden. Trotz der Probleme, konnten alle für einen erfolgreichen Projektablauf notwendigen Daten gewonnen werden, vor allem für die am GEOMAR durchgeführten und verantworteten Aktivitäten. Nach der Beendigung der Expedition stand die Daten-Analyse, Dateninversion sowie die Dateninterpretation (**01.02.2023 - 31.01.2025**) und Publikation der Ergebnisse im Mittelpunkt.

3. Wesentliche Ergebnisse

I. *Seismische Struktur an ODP Bohrung Site 1256*

Die Bohrung Site 1256 des Ocean Drilling Program ist die einzige Lokation weltweit wo „in situ“ Gesteine der Unterkruste erbohrt wurden (d.h., abseits von sog. Tektonischen Fenstern). Unsere seismischen Ergebnisse stellen diese Darstellung in Frage, da die seismisch-definierte Unterkruste erst 400-500 m tiefer erreicht wird. Darüber hinaus ist die Kruste mit 5 km ca. 1 km dünner als erwartet.

II. *Seismische Struktur der Kruste im Guatemala Becken*

Entlang eines 300 km langen seismischen Profil sowie zweier 100 km langer Kreuzprofile wurde die Krustenstruktur im Guatemala Becken untersucht und klassifiziert. Die ozeanische Kruste ist dabei mit 4.8-5.5 km dünner als „normale“ ozeanische Kruste mit 6 km. Generell zeigt die Kruste die Charakteristika welche für das „MoHole“ gefordert wurden (Mantelanisotropie, typische Gliederung der Kruste und klare Reflexionen von der Moho (Krusten-Mantelgrenze) sowohl in reflexionsseismischen als auch weitwinkel-seismischen Daten), so dass der „Pre-site Survey“ erfolgreich verlaufen ist. Für die ungewöhnlich dünne Kruste diskutieren wir zwei Mechanismen: 1.) die sehr hohe Spreizungsrate von ~220 mm/yr ist u.U. zu hoch um eine ausreichende Förderung von Magma zu gewährleisten, oder 2.) der Mantel welche die Kruste gebildet hat war durch vorherige Schmelzereignisse verarmt.

III. *Einflussnahme des Tiefseegrabens auf die Hydrierung der Kruste*

Bereits frühere Untersuchungen deutete darauf hin, dass die ozeanische Kruste mit der Annäherung an einen Tiefsee graben erhebliche Veränderungen erfährt. Dieser Umstand wird durch die Subduktion bedingt in deren Verlauf die ozeanische Platte in den Tiefsee graben abtaucht und deformiert wird. Diese Deformation stellt Wegsamkeiten für hydrothermale Aktivität dar. Auf der JC228 haben wir vor allem untersucht inwieweit kleine Tiefseekuppen diesen Prozess beeinflussen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass „Seamounts“ die Hydrierung der in eine Subduktionszone ein fahrende Platte signifikant erhöhen. Dieser Umstand zeigt sich in der seismischen Struktur und wird gestützt durch

JC228-GUATOPS

Seismische Abbilder schnell-spreizender ozeanischer Lithosphäre im Guatemala Becken: Vorstudien für das International Ocean Discovery Program (IODP) zur Durchteufung der ozeanischen Kruste und Erbohrung der Moho

Förderkennzeichen:
03G0295OA

Ingo Grevemeyer
GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

Gefördert vom



**Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt**

(vormals Bundesministerium für Bildung und Forschung)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03G0295OA gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Abschlussbericht des Vorhabens 03G0295OA GUATOPS

Zuwendungsempfänger:	GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel Wischhofstr. 1-3, 24148 Kiel
Förderkennzeichen:	03G0295OA
Projektleiter:	Ingo Grevemeyer, Prof. Dr.
Vorhabenbezeichnung:	GUATOPS - Seismische Abbilder schnell-spreizender ozeanischer Lithosphäre im Guatemala Becken: Vorstudien für das International Ocean Discovery Program (IODP) zur Durchteufung der ozeanischen Kruste und Erbohrung der Moho
Laufzeit des Vorhabens:	01.08.2022 bis 31.01.2025
Berichtszeitraum:	01.08.2022 bis 31.01.2025

I.1 Aufgabenstellung

Die ozeanische Kruste entzieht sich der direkten Wahrnehmung durch den Menschen, da sie sich am Grunde der Ozean befindet. Sie ist jedoch die größte geologische Formation der Erde und umfasst ca. 60% der festen Erdoberfläche. Durch ihre remote Lage am Grunde der Weltmeere sind ihre Struktur und die Prozesse ihrer Entstehung noch immer weitgehend unverstanden. Vor allem die große Variabilität der ozeanischen Kruste wirft noch immer unzählige Fragen auf. Die Forschungsarbeiten des Vorhabens GUATOPS hatten das Ziel, die Struktur der schnell-spreizender ozeanischer Kruste, welche generell als Referenz für den Ausbau der ozeanischen Kruste verwendet wird, seismisch abzubilden sowie die magmatischen Prozesse zu evaluieren, welche an den Mittelozeanischen Rücken die Bildung ozeanischer Kruste und Ausbildung der Krusten-Mantelgrenze (Moho) kontrollieren.

Darüber hinaus ist das Erbohren einer kompletten Sektion der ozeanischen Kruste eines der acht Hauptziele des auch von Deutschland geförderten intentionalen Bohrprogramms IODP (International Ocean Discovery Program; Umori et al., 2012). Die im Rahmen des Vorhabens gesammelten und nach der Expedition aufbereiteten seismischen Daten sollen vor allem dazu dienen, eine mögliche Lokation für die von IODP bereits genehmigte Durchteufung der ozeanischen Kruste zu definieren.

I.2 Voraussetzungen

Das Vorhaben war ein gemeinschaftlicher Antrag mit Kollegen aus England (PIs Prof. Henstock, Prof. Teagle, Univ. Southampton) und dem GEOMAR Forschungszentrum in Kiel unter Leitung von Prof. Ingo Grevemeyer. Der britische Antrag, finanziert von National Environmental Research Council (NERC), umfasste die Finanzierung des 6-km langen seismischen Streamers, die Besetzung von 45 OBS Lokationen, die Bereitstellung eines Seegravimeters, eines Seemagnetometers, den Einsatz des AUV AUTOSUB, sowie die Probenahme mit dem Schwerelot. Vor deutscher Seite wurden 51 OBS Lokationen besetzt sowie die seismische Quelle gestellt. Die Luftpulsar wurden in diesem Fall im Zuge der Barter-Expedition gemeinschaftlich mit der RRS JAMES COOK bereitgestellt. Projektpartner aus Bremen haben des Weiteren Wärmestromdichtemessungen ausgeführt. Um die wissenschaftlichen Ziele zu erreichen, wurden auf der Barter-Expedition JC228 umfangreiche seismische, geophysikalische und geologische Datensätze gesammelt. Die erfolgreiche Datenakquisition auf der JAMES COOK war eine notwendige Voraussetzung für

die Durchführung und Erreichung der wissenschaftlichen Ziele.

Die Expedition fand in zwei Fahrabschnitten statt, wobei alle Hafenaufenthalte in Caldera, Costa Rica stattfanden. Der erste Abschnitt unter Leitung von Prof. Ingo Grevemeyer fand vom 3. Dezember 2022 bis zum 9. Januar 2023 statt; der zweite Abschnitt unter Leitung von Dr. Ingo Klaucke vom 13. Januar 2023 bis zum 21. Januar 2023. Auf beiden Abschnitten fungierte der Britische Co-PI Prof. Timothy Henstock als Co-Chief. Während der Expedition konnten alle seismischen Arbeiten erfolgreich durchgeführt werden. Einzig der Einsatz des nahe am Meeresboden operierenden Tauchroboters AUTOSUB konnte auf Grund technischer Probleme nicht ausgeführt werden. Die beantragten Arbeiten des GEOMAR waren durch diesen Umstand nicht betroffen.

1.3 Planung und Ablauf

Der vorgelegte Zeitplan wurde eingehalten. Während des Zeitraumes zwischen dem Projektbeginn bis zur Ausfahrt (01.08.22 – 30.11.22) stand die Verschiffung der Ausrüstung sowie die Detailplanung der „Barter“ Expedition JC228 auf dem königlich Britischen Forschungsschiff RRS JAMES COOK im Fokus der Arbeiten. Im Unterschied zu Fahrten auf einem Deutschen Forschungsschiff wird die Logistik für die Expedition durch einen Projektmanager des National Oceanography Centre (NOC) in Southampton koordiniert. Für die Expedition was Jason E. Scott verantwortlich. Er koordinierte nicht nur die Expedition bzgl. der Logistik, sondern er war auch vor Ort in Costa Rica, um alle Abläufe zu überwachen, so dass unnötige Verzögerungen oder Probleme mit dem Zoll oder Hafenbehörden minimiert wurden. Ohne die fachliche Unterstützung von Jason Scott wäre die logistische Herausforderung die umfangreiche Ausrüstung für die in zwei Abschnitte aufgeteilte Expedition nur schwer zu bewältigen gewesen. Insgesamt wurden 12 Container (zwei davon mit Übergröße) verschifft. Die Container mit Übergröße wurden dabei mit der JAMES COOK bereits in Europa an Bord genommen (da in Folge der Covid-19 Pandemie die Transportwege noch nicht wieder funktionierten), um den 6-km Seismikstreamer pünktlich bereitzustellen. Trotzdem ergaben sich kleiner Probleme mit der sehr bürokratischen Zollabwicklung im Hafen von Caldera, Costa Rica, so dass die JAMES COOK erst mit ca. 12 Stunden Verspätung auslaufen konnte. Sowohl der erste Abschnitt der Expedition JC228 (03.12.22 – 09.01.23) als auch der zweite Abschnitt (13.11.23 – 22.01.2023) erfolgte von Hafen von Caldera, Costa Rica, aus. Auf dem ersten Fahrabschnitt unter Leitung von Prof. Ingo Grevemeyer (GEOMAR) und Prof Henstock (NOC) wurden alle seismischen Arbeiten durchgeführt und sowohl mehrkanal-reflexionsseismische mit einem 6-km Seismik-Streamer als auch refraktionsseismische Messungen mit Ozean-Boden-Seismometern durchgeführt. Auf dem zweiten Abschnitt unter Leitung von Dr. Ingo Klaucke (GEOMAR) und Prof. Henstock wurden Schwerelote zur Gewinnung von Porenwasser gefahren und geothermische Messungen (Dr. Norbert Kaul, Uni. Bremen) durchgeführt. Der Einsatz des „Tauchroboters“ AUTOSUB musste auf Grund technischer Probleme abgebrochen werden. Trotz der Probleme konnten alle für einen erfolgreichen Projektablauf notwendigen Daten gewonnen werden, vor allem für die am GEOMAR durchgeführten und verantworteten Aktivitäten (die Daten des AUV wäre vor allem am NOC bearbeitet worden). Details über den Expeditionsverlauf können dem Fahrtbericht (Grevemeyer et al., 2023) entnommen werden.

Nach der Beendigung der Expedition (01.02.2023 - 31.01.2025) stand die Daten-Analyse, Dateninversion sowie die Dateninterpretation und Publikation der Ergebnisse im Mittelpunkt der Aktivitäten. Die refraktions- und weitwinkelseismischen Daten wurden zwischen den Arbeitsgruppen in Kiel und Southampton aufgeteilt. Am GEOMAR wurde die

Profile P100, P300 und P400 sowie der östliche Teil des langen Krustentranssects P200e bearbeitet. P100 untersucht die Kruste im Bereich der Bohrung des Ocean-Drilling-Program Site 1256. Diese Bohrung ist bislang die einzige Lokation wo eine „intakte“ Sektion der Oberkruste bis in die obersten Bereich der Unterkruste abgeteuft wurde (diese These wird allerdings oft in Frage gestellt, da zwar Gänge mit Gabbros beprobt wurden, aber diese noch immer in dem Kontext von basaltischen „Umgebungsgestein“ lagen). P300 und P400 verliefen senkrecht zum Hauptprofil und somit entlang einer Isochrone; d.h., sie erlauben somit die Abbildung der lateralen Variabilität der Krustengenese zum gleichen geologischen Zeitpunkt. Das Profil P200e untersucht die Region, wo die in die Subduktionszone von Costa Rica einfahrende ozeanische Platte in den Tiefseeegraben „gezwungen“ wird und somit tektonisch beansprucht. Dieser Prozess ist mit der Ausbildung von Störungszonen und dem Auftreten von Erdbeben assoziiert, welche wiederum Wegsamkeiten für Meerwasser darstellen und zur Hydrierung der Lithosphäre führen und somit den globalen Wasserhaushalt der Erde beeinflussen. Unsere Arbeiten konzentrieren sich vor allem auf die Einflussnahme und Verstärkung der Hydrierung durch kleine submarine Tiefseekuppen, welche wir hier als Seamounts bezeichnen. Das Profil P100 wurden vom Prof. Grevemeyer analysiert. Die Profile P200e, P300 und P400 vom Postdoc im durch das BMBF geförderten Vorhaben Dr. Yuhan Li.

Die britischen Partner konzentrieren sich vor allem auf die laterale Variabilität der Kruste seewärts des Tiefseeegrabens (P200w). Diese Arbeiten wurden von dem Postdoc in Southampton Dr. Adam Robinson durchgeführt. Als weitere Mitglieder der Arbeitsgruppe analysieren Dr. Milena Marjanovic vom Institut de Physique du Globe in Paris sowie der British PI Prof. Henstock die mehrkanal-reflexionsseismischen Daten. Ergänzt werden die Untersuchungen durch die Analyse von Porenwasser in den Sedimentkernen (Prof. Damon Teagle and Dr. Matthew Cooper, Univ. Southampton) sowie durch die Analyse der Wärmestromdichtemessungen (Dr. Norbert Kaul, Univ. Bremen).

Alle durchgeführten Arbeiten wurden in regelmäßigen Projekttreffen dargestellt und diskutiert. Diese Treffen fanden ca. alle zwei Monate online statt wurden jedoch auch durch persönliche Treffen in Southampton und am Rande von Tagungen ergänzt.

I.4 Wissenschaftlich-technischer Stand

Circa 70 % der Erdoberfläche sind von Wasser bedeckt, wobei eine Reihe von Randmeeren wie z. B. die Nord- und Ostsee von kontinentaler Kruste unterlagert sind, so dass in der Summe ca. 57-60 % der Erdoberfläche von ozeanischer Kruste unterlagert sind, welche durch Meeresbodenspreizung entlang des globalen Systems der mittelozeanischen Spreizungsrücken (MOR) gebildet wurde. Folglich ist die ozeanische Lithosphäre, welche über die letzten 180 Mio. Jahre an den Mittelozeanischen Rücken entstanden ist, die größte geologische Einheit der Erde.

Die ozeanische Kruste formt den oberen Teil der Lithosphäre und entsteht durch das Aufschmelzen eines pyrolitischen Erdmantels an den mittelozeanischen Rücken, wobei basaltische Magmen zur Bildung der ozeanischen Kruste extrahiert werden und ein Residuum von Harzburgit zurückbleibt, welches den darunter liegenden Mantel bildet. Etwa zwei Drittel des gebildeten Magmas bilden den unteren Teil der ozeanischen Kruste. Das restliche Magma wird am Meeresboden extrudiert oder bildet Gangsysteme („sheeted dykes“) an der Basis der oberen Kruste. Extrudierte Basalte und Deckenbasalte bilden die Oberkruste („Layer-2“); die untere Kruste („Layer-3“) besteht aus gabbroiden Gesteinen. Diese Sichtweise zum Aufbau der ozeanischen Kruste wurde zunächst aus refraktionsseismischen Messungen abgeleitet. Die erste klassische Zusammenstellung

seismischer Daten von Raitt (1963) bildeten für die letzten Jahrzehnte die Referenz für seismische Profile und den geologischen Aufbau der Kruste. Die obere magmatische Kruste oder Layer-2 ist eine Region mit starken Geschwindigkeitsgradienten, während die untere Kruste oder Layer-3 relativ homogen ist, obwohl sie eine Zunahme der Geschwindigkeit mit der Tiefe zeigt. Weiterhin ist die obere Kruste unterteilt in die Layer-2A, die aus extrudierten Basalten besteht, und die Layer-2B, die von basaltischen Gängen gebildet wird (Abb. 1). Die untere Layer-3 wird auch als "ozeanische Schicht" bezeichnet (z. B. White et al., 1992; Grevemeyer et al., 2018). Mit zunehmendem Alter des Meeresbodens lagern sich Sedimente ab, welche das magmatische Grundgebirge bedecken und Layer-1 bilden.

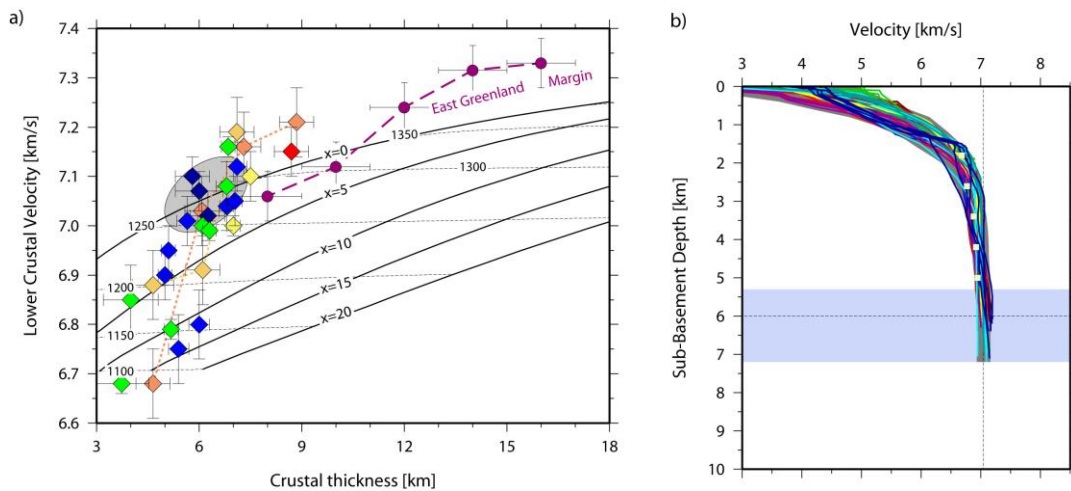


Abbildung 1. a) Beobachtete Krustenmächtigkeit als Funktion der seismischen Geschwindigkeit in der Unterkruste; graue Feld markiert „normale“ ozeanische Kruste als Referenz welche eine Schmelzmenge generiert um 6 km an Kruste zu bilden (McKenzie & Bickle, 1988). Linien: Schmelzmodell nach Korenaga et al. (2002); normale Kruste hat eine Mächtigkeit von ca. 6 km. b) Seismische Struktur ozeanischer Kruste nach Grevemeyer et al., 2018.

Seismische, bathymetrische und meeresgeologische Beobachtungen deuten darauf hin, dass ozeanische Kruste, welche sich bei schnellen Spreizungsraten (>80 mm / Jahr) gebildet hat, viel weniger variabel ist als Kruste, die sich bei langsamen Spreizungsraten (<40 mm / Jahr) gebildet hat (e.g., Christeson et al., 2018). D.h., schnell-spreizende Kruste entspricht eher dem idealen Modell der ozeanischen Kruste als langsam-spreizende Kruste und entspricht somit dem sogenannten Penrose-Modell. Das Penrose-Modell wurde an Hand geologischer Untersuchungen an Ophioliten abgeleitet. Bei Ophioliten handelt es sich um Fragmente ozeanischer Kruste und des oberen Mantels, die auf Kontinentalrändern aufgeschoben oder in Akkretionskomplexe an Subduktionszonen angelagert wurden. Auf der Penrose-Konferenz der Geological Society of America (GSA) wurde im Jahr 1972 ein idealisiertes Modell für die ozeanischen Kruste abgeleitet (e.g., Dilek, 2003). Von der Basis aufwärts besteht ozeanische Kruste aus den folgenden Einheiten: Mantelperidotite, geschichtete ultramafische Gesteine und Gabbros, isotrope Gabbros, die basaltischen Gang-in-Gang-Komplex (sheeted dykes) und einen extrusiven Sequenz, bestehend aus Kissenbasalten und massiven Lavaströmen, überlagert von pelagischen Sedimenten. Ursprünglich ging man davon aus, dass Ophiolite hauptsächlich an mittelozeanischen Rücken gebildet wurden. Neuere geochemische Untersuchungen an Ophiolithen stellten diese Sichtweise jedoch in Frage und legten eine enge generische Verbindung mit Subduktionszonen nahe. Dieser Paradigmenwechsel führte zur Definition von Supra-Subduktionszonen-Ophiolithen. Somit könnte das Penrose-Modell ozeanische Kruste repräsentieren, welche in einem Back-Arc-Spreizungssystem gebildet wurde, und nicht Kruste, die an einem "normalen" mittelozeanischen Rücken gebildet wurde, so dass ein

Konzept in Frage gestellt wird, das bislang in zahlreichen Lehrbüchern als „Standard-Modell“ eingeführt wird.

Um ein besseres Prozessverständnis zu erlangen, werden neue Daten dieser größten geologischen Formation der Erde benötigt. Die ozeanische Kruste, die an schnell spreizenden ozeanischen Rücken gebildet wird, scheint gleichmäßig geschichtet und relativ homogen zu sein, was auf einen relativ einheitlichen Akkretionsmodus hindeutet. Obwohl sich heutzutage nur ca. 20% der ozeanischen Rücken zu der Kategorie der schnell spreizenden Rücken gehört, wurden fast 50% ozeanischen Kruste und somit ca. 30% der Erdoberfläche entlang schnell spreizender Rücken erzeugt (e.g., Müller et al., 2008). Dies erklärt warum ozeanische Kruste, welche an schnell spreizenden Rücken gebildet wurde, das Ziel zukünftiger detaillierter geologischer Probenahmen sein sollte. Die im Rahmen von GUATOPS durchgeführten Arbeiten befassen sich mit der seismischen Struktur der ozeanischen Kruste welche bei einer extrem hohen Spreizungsrate von >200 mm/yr im Guatemala Becken gebildet wurde.

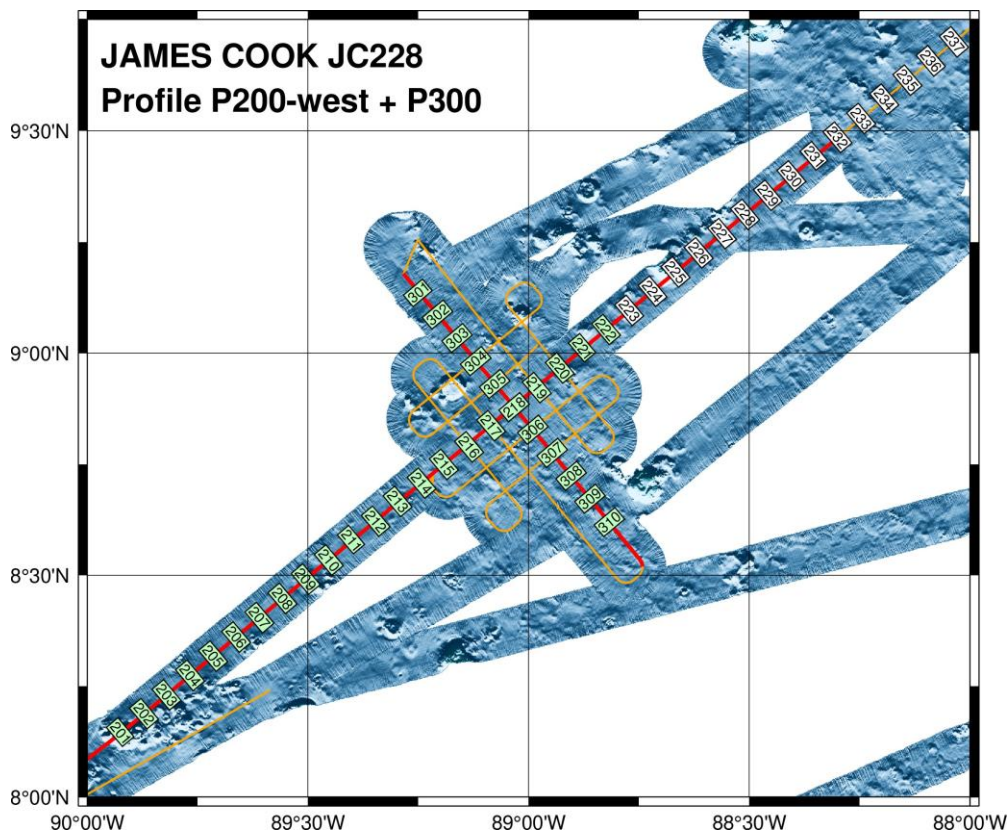


Abbildung 2: Profile im westlichen Teil des Hauptarbeitsgebiets (grün hinterlegte Zahlen: OBS Lokationen von Stationen welche nur auf dem westlichen Teil ausgelegt waren; weiß: OBS welche sowohl Schüsse entlang von P200e und P200w registriert haben). Rote Linien sind „in-line“ Profile mit OBS; orange Linien: MCS Profile.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Expedition war schon im Rahmen des Antrags als gemeinschaftliches Projekt Britischer und Deutscher Partner formuliert wurden. Die Britischen Kollegen unter Federführung von Profs Timothy Henstock und Damon Teagle von der Universität in Southampton und des National Oceanography Centres übernahmen die Beantragung von Großgeräten wie dem 6-km

langen seismischen Streamers für reflexionsseismische Messungen, das AUV für die detaillierte Kartierung von Schlüsselstrukturen im Bereich des seewärtigen Teils des Tiefseegrabens, sowie die Belegung von 45 Ozean-Boden-Seismometer (OBS) Positionen. Darüber hinaus verantworteten sie die Entnahme von Porenwasser, um Fluidmigration abzubilden. Die Britischen Partner stellen zusätzlich noch ein Seegravimeter sowie ein Seemagnetometer. Den deutschen Partner Prof. Ingo Grevemeyer oblag die Beantragung der Schiffszeit, die Bereitstellung von OBS für weitere ~50 OBS Positionen sowie die Bereitstellung der seismischen Quelle. Bedingt durch den Umstand, dass FS SONNE für längere Zeit nicht im Ostpazifischen Ozean vor Zentral-Amerika verfügbar war, wurde ein Antrag auf Barter im Rahmen von OFEG gestellt. OFEG ermöglicht es, marine Infrastruktur wie Forschungsschiffe anderer Partner Staaten zu nutzen. Dem gestellten Antrag wurde stattgegeben und die Britische JAMES COOK für die Aktivitäten bereitgestellt, so dass die Expedition am Ende der Covid-19 Pandemie im Dezember 2023 und Januar 2024 stattfinden konnte. Im Ganzen

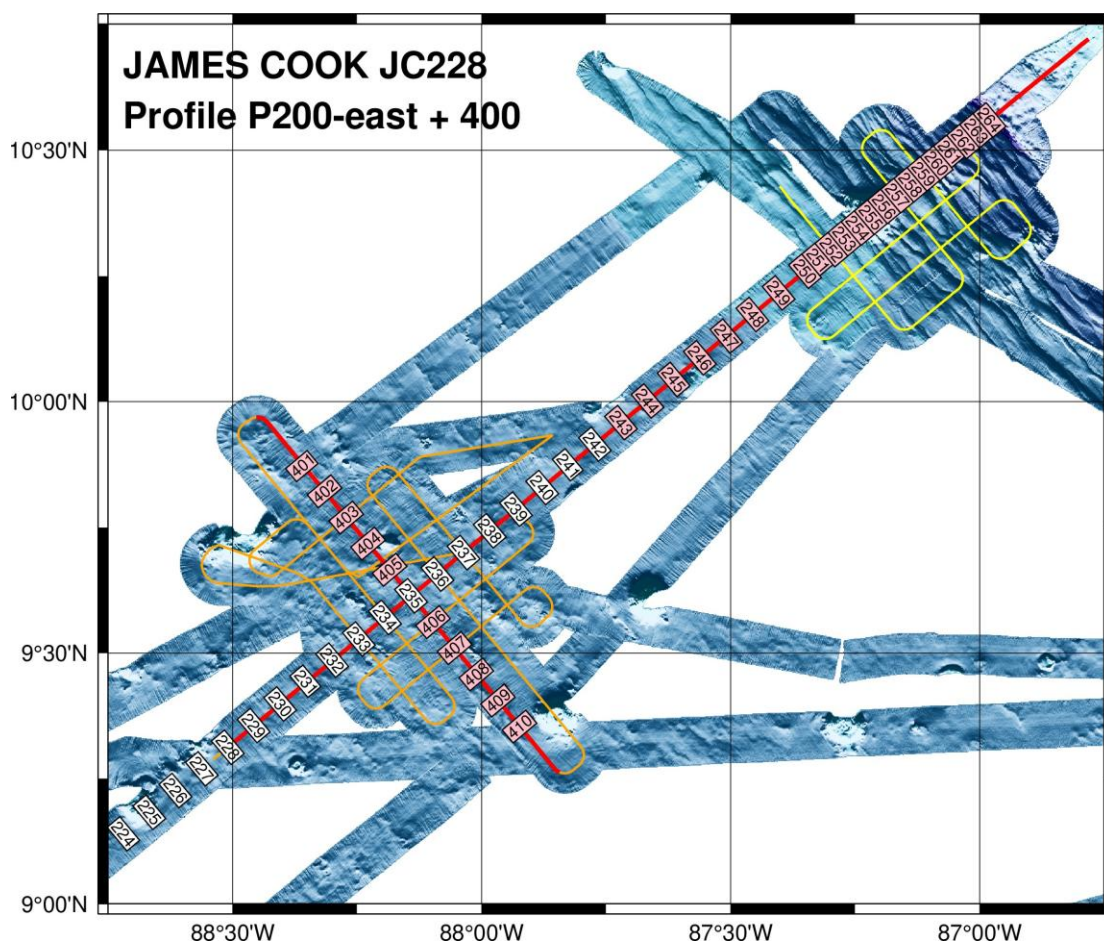


Abbildung 3: Profile im östlichen Teil des Hauptarbeitsgebiets (blass rot hinterlegte Zahlen: OBS Lokationen von Stationen welche nur auf dem östlichen Teil ausgelegt waren; weiß: OBS welche sowohl Schüsse entlang von P200e und P200w registriert haben). Rote Linien sind „in-line“ Profile mit OBS; orange Linien: MCS Profile mit 6-km Streamer; gelbe Linien MCS Profile mit 3-km Streamer.

ergaben sich nur wenige Veränderungen, wobei auf Grund der Barter jedoch nicht die seismische Quellen des GEOMAR sondern des NOC in Southampton zum Einsatz kamen. Im Rahmen des Guatemala Beckens wurde ein umfangreicher seismischer Datensatz im Guatemala Becken aufgenommen (das Hauptarbeitsgebiet sowie dazugehörigen seismischen

Profile sind in den Abbildungen 2 & 3 gezeigt).

Die Aufnahme von Wärmestromdichte Messungen im Bereich des Tiefseegrabens von Costa Rica oblag dem Projektpartner von der Universität Bremen, Dr. Norbert Kaul.

Weitere Details zur Zusammenarbeit sind u.a. im Teil I.3 dargestellt.

II.1 Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Im Folgenden werden die erzielten Hauptergebnisse des Vorhabens dargestellt, wobei dieser Bericht sich auf die von Deutscher Seite finanzierten Arbeiten und Ergebnisse abgeleitet aus den Weitwinkelseismischen Daten fokussiert; exemplarisch sind jedoch auch Ergebnisse der Projektpartner mitdargestellt:

- i) Seismische Struktur der Kruste im Bereich der Bohrung Site 1256, die tiefste bislang in ozeanische Kruste abgeteufte Bohrung
- ii) Über die Mächtigkeit der ozeanischen Kruste im Guatalama Becken, die „quer“ Profil P300 und P400 und Vergleiche hinsichtlich „normaler“ ozeanischer Kruste
- iii) Die Variabilität ozeanischer Kruste im Westlichen Teil des Arbeitsgebiets – die Suche nach einer potentiellen Lokation für eine künftige IODP3 Tiefbohrung
- iv) Einflussnahme von Tiefseekuppen auf die Struktur und Hydrogeologie ozeanischer Kruste im Bereich von Tiefseegräben – Variabilität der ozeanischen Kruste im östlichen Teil des Arbeitsgebiets

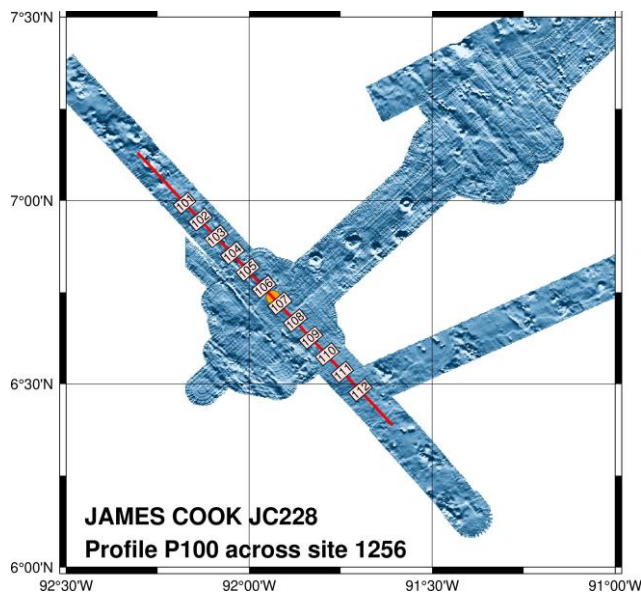


Abbildung 4: Profil P100 an der Bohrung Site 1256

Die in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse basieren auf der Analyse seismischer Daten, wobei der Schwerpunkt auf der Analyse der mit Ozean-Boden-Seismometern registrierten refraktionsseismischen und weitwinkelseismischen Daten beruht. Wie im Fahrtbericht dargestellt (Grevemeyer et al., 2023), waren die seismischen Daten von exzellenter Qualität, so dass sowohl seismische Ersteinsätze (Refraktionen) als auch sekundäre Einsätze (weitwinkelseismische Reflexionen) von der Krusten/Mantelgrenze identifiziert wurden. Deren Laufzeiten wurden

durch ein von Korenaga et al. (2000) entwickeltes Verfahren der seismischen Tomographie in Geschwindigkeitsmodelle überführt. Diese Modelle sowie die Interpretation der invertierten Struktur der ozeanischen Kruste und des oberen Erdmantels werden im Bericht dargelegt, interpretiert und diskutiert.

Die Mehrkanalreflexionsseismischen Daten wurden in Southampton und Paris analysiert. Im Rahmen der hier dargestellten Ergebnisse sind die reflexionsseismischen Daten vor allem in die Bestimmung der Sedimentmächtigkeit eingeflossen. Darüber hinaus finden wir im gesamten Arbeitsgebiet in den Regionen mit Daten des 6-km Seismik-Streamers (siehe Fahrtbericht; P200w sowie „Grids“ um die Profile P300 und P400) eine

sehr gute Übereinstimmung zwischen der Krustenmächtigkeit abgeleitet aus OBS und MCS Daten.

i) Seismische Struktur der Kruste im Bereich der Bohrung Site 1256

Das ODP Site 1256 im Guatemala Becken war eine extrem erfolgreiche Kampagne. In 5 fünf Expedition wurde über einen Gesamtzeitraum von fünf Monaten sehr-schnell spreizende („superfast spreading“) ozeanische Kruste erbohrt. In einer Tiefe von 1157 m wurden erstmalig „in situ“ gebildete gabbroide Gesteine erbohrt (Teagle et al., 2006; 2012; Wilson et al., 2006). Zuvor waren entsprechende Gesteine nur in sog. tektonischen Fenstern

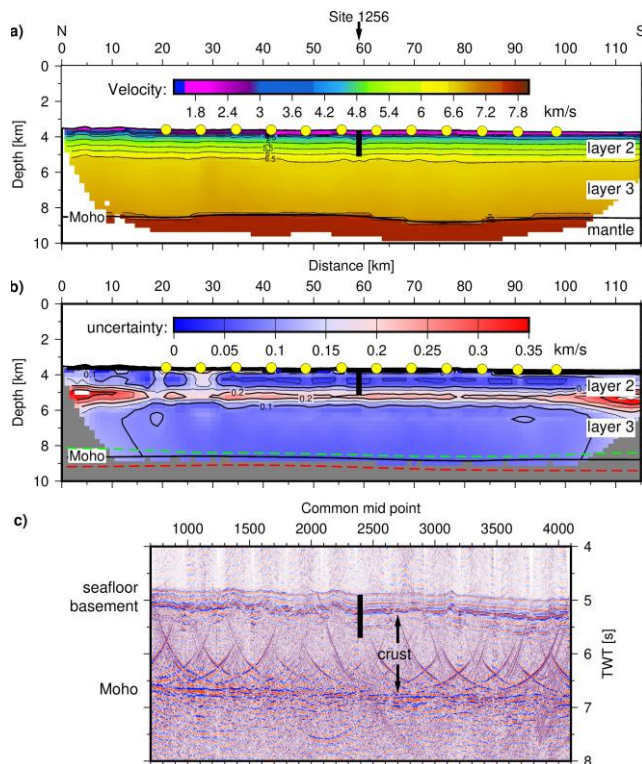


Abbildung 5: P100: a) Seismisches Geschwindigkeitsmodell; b) Fehler des Modells; c) Kombiniertes Mirror Image & Migration der Weitwinkel-Reflexion der Krustenbasis. Schwarze Linie markiert die Lage und max. Eindringtiefe der Bohrung Site 1256.

gefunden worden, wo die Unterkruste durch sekundäre Prozesse gehoben und am Meeresboden exponiert wurde. Obwohl in größere Tiefe wiederum Basalte gefunden wurden (e.g., Teagle et al., 2006), wurde generell die Interpretation bevorzugt, dass die Unterkruste erreicht wurde (Wilson et al., 2006). Die als Voruntersuchung aufgenommenen seismischen Daten (Hallenborg et al., 2003) hatten jedoch bzgl. der Krustenmächtigkeit und Lage der Krusten/Mantelgrenze keine eindeutige Zuordnung ermöglicht (Wilson et al., 2003; Hallenborg et al., 2003). Aus diesem Grund wurde auf der JC228 das Profil P100 abgeschossen, ein 120 km langes seismisches Profil mit 12 OBS über das Site 1256 (Abb. 4).

Die Daten wurden dazu verwendet, ein Krustenmodell mittels seismischer Laufzeit-Tomographie abzuleiten. Darüber hinaus wurde Mirror-Imaging und eine Migration der Weitwinkelseismischen Moho oder PmP-Reflexion dazu verwendet, die Krusten-Mantelgrenze (d.h., die seismische Moho) abzubilden (siehe Abb. 5). Die Ergebnisse zeigen, dass die Kruste mit max. 5 km Mächtigkeit (bzw. 1.5 s Zwei-Weg-Laufzeit in migrierten seismischen Daten) ca. 1 km dünner ist als sog. normale ozeanische Kruste. Darüber hinaus liegt die seismische definierte Mächtigkeit der Oberkruste bei ca. 1,6 km und somit um ca. 400-500 m tiefer als die Erbohrung der Gabbros. In diesem Kontext ist es sinnvoll, die Bohrerergebnisse von Site 1256 neu zu interpretieren. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sowie die Einordnung sind in einem Vorentwurf einer Publikation zusammengefasst (Grevemeyer et al., Seismic wide-angle constraints on the crustal thickness at Ocean Drilling Program Site 1256: how typical is its structure for oceanic crust? Geology).

ii) Über die Mächtigkeit der ozeanischen Kruste im Guatemala Becken, die „quer“ Profil P300 und P400 und Vergleiche hinsichtlich „normaler“ ozeanischer Kruste

Die primäre Quelle unseres Wissens über die Struktur der ozeanischen Kruste basiert primär auf der Interpretation von refraktionsseismischen Daten. Eines der auffälligsten

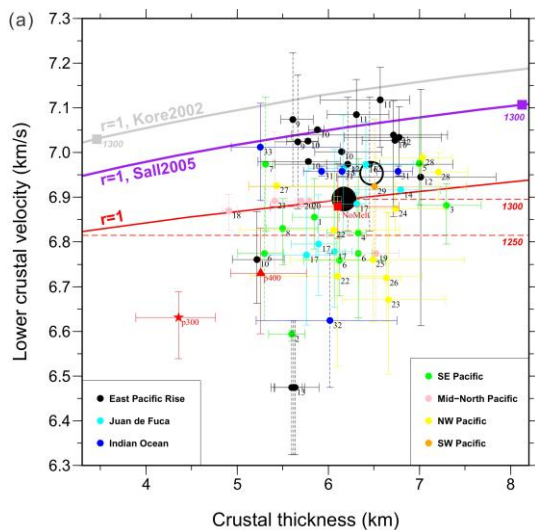


Abbildung 6a): Die Krustenmächtigkeit im Guatemala Becken ist mit ca. 5 km entlang von P400 und mit 4.4 km entlang von P300 ungewöhnlich dünn im Vergleich zu den Beobachtungen entlang anderer seismischer Profile einer im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Kompilation (Punkte mit Nummern) und deuten somit auf eine anormale Struktur hin.

unsere Zusammenstellung nur Daten, welche in der Form digitaler Geschwindigkeitsmodelle vorliegen und zum überwiegenden Teil durch das Verfahren der seismischen Tomographie abgeleitet wurden. Diese Kompilation ergibt eine Krustenmächtigkeit von 6.17 ± 0.64 km.

Generell wird Pazifische Kruste als Referenz angenommen, da generell der gesamte Ozeanboden im Pazifik bei schneller Spreizung gebildet wurden. Diese These wollten wir mit einer Reanalyse archivierten Daten des US Amerikanischen NoMelt Experiments verifizieren. In der Tat lag auch hier die mittlere Krustenmächtigkeit bei 6.1 km, mit einer Streuung von wenigen Hundert Metern. Im Unterschied dazu fanden wir entlang der Profile P300 und P400, wie bereits entlang von P100, eine Kruste mit einer Mächtigkeit von nur 4.8-5.2 km. Diese sehr dünne Kruste scheint im Untersuchungsgebiet weitverbreitet zu sein und unterscheidet sich somit erheblich vom statistischen Mittel des Pazifischen Ozeans. Eine Erklärung dieses Phänomens wäre, dass die Bildung der Kruste im Guatemala Bcken durch das Aufschmelzen eines verarmten Erdmantels passierte (Geldmacher et al., 2013). Die Kruste im Guatemala Becken wurde bei einer extremen Spreizungsrate von 220 mm/yr gebildet. Im Vergleich dazu liegt z.Zt. die schnellste Spreizungsrate weltweit bei „nur“ 150 mm/yr, so dass auch eine andere und von uns favorisierte Erklärung möglich wäre. Da die Bildungen und Extraktion von Schmelzen aus dem Erdmantel nicht instantan passiert

Ergebnisse der seismischen Untersuchungen war, dass die ozeanische Kruste im Vergleich zur kontinentalen Kruste eine nahezu einheitliche Dicke aufweist. Die beiden meist zitierten globalen Zusammenstellungen von Daten zeigten, dass die ozeanische Kruste 6.57 ± 1.61 km (Raitt, 1963) bzw. 7.08 ± 0.78 km (White et al., 1992) dick ist. Die großen Standardabweichungen deuten jedoch darauf hin, dass es schwierig ist, die Ergebnisse in Bezug zur strukturellen Variabilität zu interpretieren. Aus diesem Grund haben wir eine neue Kompilation erstellt, wobei wir uns nur auf Regionen konzentriert haben, welche Spreizungsraten von über 50 mm/yr zeigen, so dass die Datensätze nur aus dem Pazifischen und Indischen Ozean stammen (Abb. 6). Darüber hinaus nutzten wir für

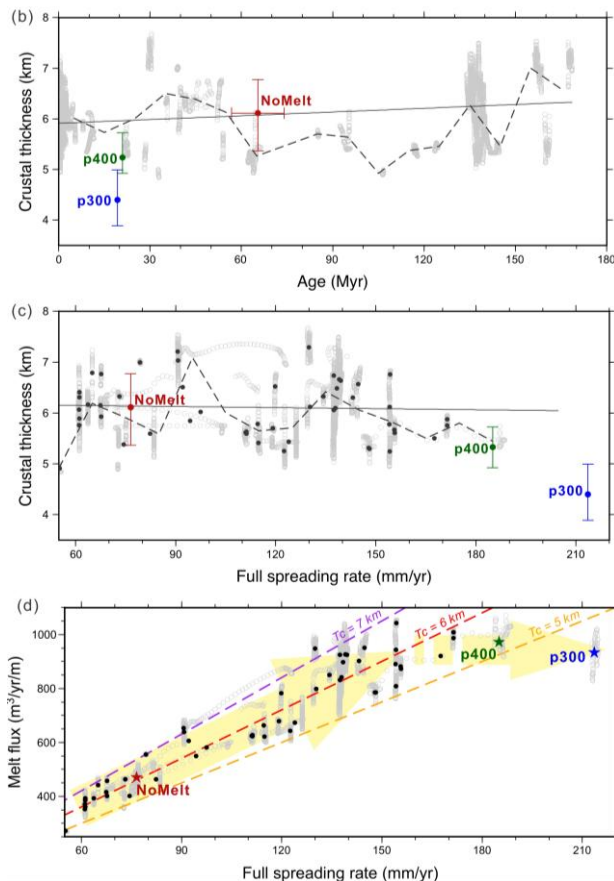


Abbildung 6 fortgesetzt: b) und c) globale Verteilung der Krustenmächtigkeit als Funktion des Krustenalters und der Spreizungsrate d) Schmelzfluss abgeleitet aus der Krustenmächtigkeit. Gibt es einen max. Fluss; d.h., ist bei sehr hohen Spreizungsraten die Menge an Schmelzen limitiert?

schlagen wir vor, dass die sehr hohe Spreizungsrate dazu geführt hat, dass die Schmelzextraktion limitiert war, so dass nicht genügend Schmelze für die Generierung einer 6 km mächtigen ozeanischen Kruste verfügbar war. Die Analyse der Profile P300 und P400 wurden am GEOMAR durch den Postdoc im Vorhaben Dr. Yuhan Li ausgeführt. Ein vorläufiges Manuskript für die Publikation der Ergebnisse liegt bereits vor (Li et al., Arbeitstitel: „Thin oceanic crust formed in the Guatemala Basin supports deficit melt extraction at superfast spreading rates“), soll jedoch noch durch die Anwendung numerischer Modelle basierend auf einen Ansatz von Prof. Richard Katz aus Oxford verifiziert werden.

iii) Die Variabilität ozeanischer Kruste im Westlichen Teil des Arbeitsgebiets – die Suche nach einer potentiellen Lokationen für eine künftige IODP3 Tiefbohrung

Eines der Hauptziele des Vorhabens war die seismische Charakterisierung der Struktur ozeanischer Kruste und deren Variabilität entlang der Spreizungsrichtung. Hierzu wurde das insgesamt 500 km lange Profil P200 abgeschossen. Das Profil setzt sich aus zwei Segmenten zusammen; zuerst wurde der westliche Teil (P200w) abgeschossen und im Anschluss der östliche Teil (P200e), wobei nur Ozean-Boden-Seismometer in der Mitte des Profile Schüsse beider Profilabschnitte registrierten (OBS223 bis OBS242), während OBS201 bis OBS222 nur die westlichen Schüsse und OBS243 bis OBS264 nur die östlichen Schüsse registrierten. Die OBS des östlichen Teils werden im nächsten Abschnitt beschrieben, da sie in dem Bereich lagen, wo die Subduktion bereits Auswirkungen auf die Struktur der seewärts des Tiefseegrabens gelegenen Region hat (Stichwort „bending-related faulting“). Die OBS201 bis OBS246 wurden für die regionale Charakterisierung der ozeanischen Kruste verwendet und stellen darüber hinaus die Grundlage für die Voruntersuchungen für eine zukünftige Tiefbohrung in die ozeanischen Kruste (Pre-site survey) dar, welche im Rahmen des International Discovery Programs (IODP) geplant ist (Umori et al., 2012). Diese Arbeiten wurden in Southampton durch den Britischen Postdoc im Vorhaben Dr. Adam Robinson durchgeführt und primär durch den National Environmental Research Council (NERC) finanziert.

Das Bohren eines kompletten Abschnitts der ozeanischen Kruste ist eine große Herausforderung und kostspielig. Daher wurden in zahlreichen Treffen und Workshops

Kriterien definiert, die jeder potenzielle MoHole-Standort erfüllen sollte (Ildefonse et al., 2010). Zu diesen Kriterien des bestmöglichen Standorts gehört:

- Kruste, die mit einer schnellen Ausbreitungsrate gebildet wurde (>40 mm / Jahr).
- Einfaches tektonisches Umfeld mit glattem Relief des vulkanischen Grundgebirges; entfernt von Bruchzonen, Pseudoverwerfungen, fossilen überlappenden Spreizungszentren, Tiefseekuppen oder anderen Indikatoren für sekundären Intraplattenvulkanismus. Die geologisch kontinuierliche Verbindung zu der aktiven Spreizungsachse und einer destruktiven Subduktionszone könnte wichtige zusätzliche wissenschaftliche Informationen liefern.
- Die seismische Geschwindigkeitsstruktur der Kruste sollte nicht anomal im Vergleich zum derzeitigen Verständnis zu "normaler" schnell-spreizender pazifischer Kruste sein.
- Eine scharfe, starke, einfache reflexionsseismische Signatur der Moho in mehrkanalreflexionsseismischen Messungen (MCS) ist unabdingbar.
- Eine starke, weitwinkelseismische Moho-Reflexion (PmP) in refraktionsseismischen Daten mit deutlicher und klar identifizierbarer Mantelphase (Pn) ist ebenfalls essentiell.
- Eine deutlich ausgebildete seismische Anisotropie des oberen Mantels sollte zu beobachten sein.
- Die Kruste sollte auf einer ursprünglichen Breite von mehr als $\pm 15^\circ$ entstanden sein.
- Ein Standort mit relativ hohen seismischen Geschwindigkeiten in der oberen Kruste, die auf massive vulkanische Formationen hinweisen, um den Beginn eines tiefen Bohrlochs zu erleichtern.

Die Erfüllung der Anforderungen für die Punkte a)-e) ist zwingend notwendig für den Erfolg. Mehr Flexibilität ist bei der Erfüllung der Punkte f)-h) erlaubt, die sehr wünschenswert, aber nicht unbedingt erforderlich sind.

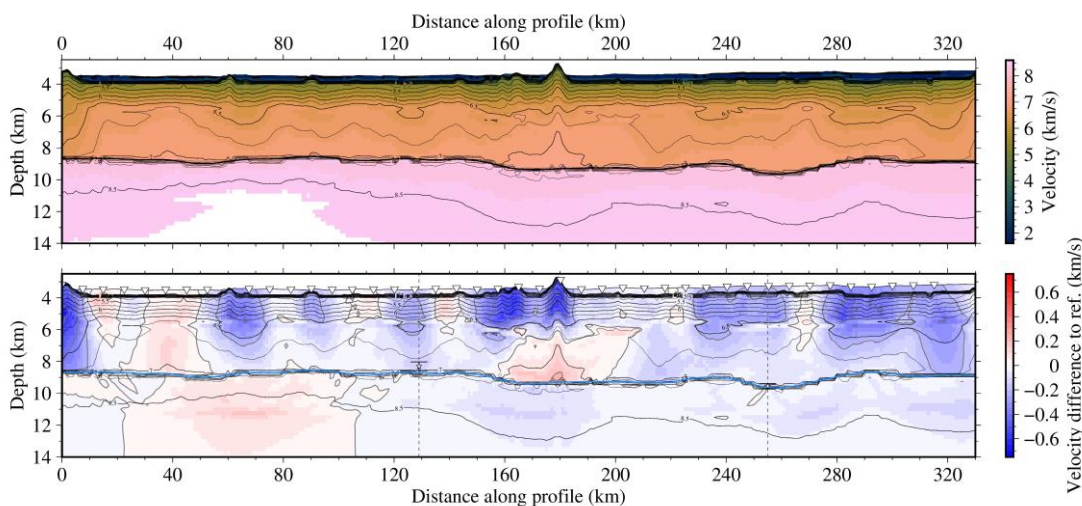


Abbildung 7: Seismisches Modell entlang des Hauptkorridors P200w erstellt an der Universität von Southampton und NOC (Adam Robinson & Tim Henstock).

Die Punkte a) und b) sind durch die Lage des Arbeitsgebiets gegeben, wobei g) nicht erfüllt wird, da die Kruste bei ca. 10°N gebildet wurde. Darüber hinaus ist die Spreizungsrate mit 220 mm/yr sehr hoch. Wie oben diskutiert spekulieren wir, dass „superfast spreading“ u.U. ein Defizit in der Menge generierten Schmelze bedingt, so dass die Kruste etwas

dünnere als der globale Mittelwert ist. Entlang P200w zeigt sich eine leichte Zunahme der Krustenmächtigkeit von 5 km bis zu max. 6 km seewärts des Tiefseegrabens, wobei eine Schwankung der Mächtigkeit von +/- 0.5 km seewärts des Tiefseegrabens verbreitet auftritt, während im westlichen Teil des Profils die Mächtigkeit generell <5.5 km ist. Dies zeigt sich auch in den Regionen wo wir die Profile P300 und P400 abgeschossen haben, so dass die Krustenmächtigkeit entlang von P300 bei <5 km liegen während P400 eine Mächtigkeit von ca. 5.5 km zeigt. Die Kreuzpunkte der Profile zeigen darüber hinaus die in f) geforderte Anisotropie im Oberen Endmantel. Generell sind sowohl in der Weitwinkelseismischen Daten als auch in der MCS Seismik klare Moho-Reflexionen zu beobachten, so dass die Punkte d) und e) ebenfalls erfüllt sind.

Bezgl. der seismischen Geschwindigkeitsstruktur zeigen die Modelle die erwartete Struktur einer gut ausgeprägten Oberkruste sowie einer homogenen Unterkruste mit seismischen Geschwindigkeiten von ca. 6.8-6.9 km/s, so dass Punkt c) ebenfalls erfüllt ist. Wie oben dargelegt, ist einzig die Krustenmächtigkeit etwas geringer als im globalen Mittel, wobei die Region in der Nähe von P400 die geringsten Abweichungen zeigt.

Eine markante Beobachtung ist, dass die MCS Daten generell eine sehr viel heterogenere seismische Moho zeigen als die OBS Daten. Dieses mag an dem Modellierungsansatz liegen (d.h., Weitwinkeldaten ergeben nur ein „indirektes“ abgeleitetes Abbild während MCS Daten eine direkte Abbildung der Moho erlauben). Trotzdem zeigen alle OBS sehr gute Weitwinkelreflexionen der Krustenbasis. Eine alternative Erklärung wäre, dass die Weitwinkeldaten durch eine tiefere Signalfrequenz geprägt sind, so dass sie über lokale Heterogenität „mitteln“ und somit ein kontinuierliches Image ergeben. Beispiele der Reflexionsseismischen Daten sind in den Abbildungen 8 und 9 gezeigt.

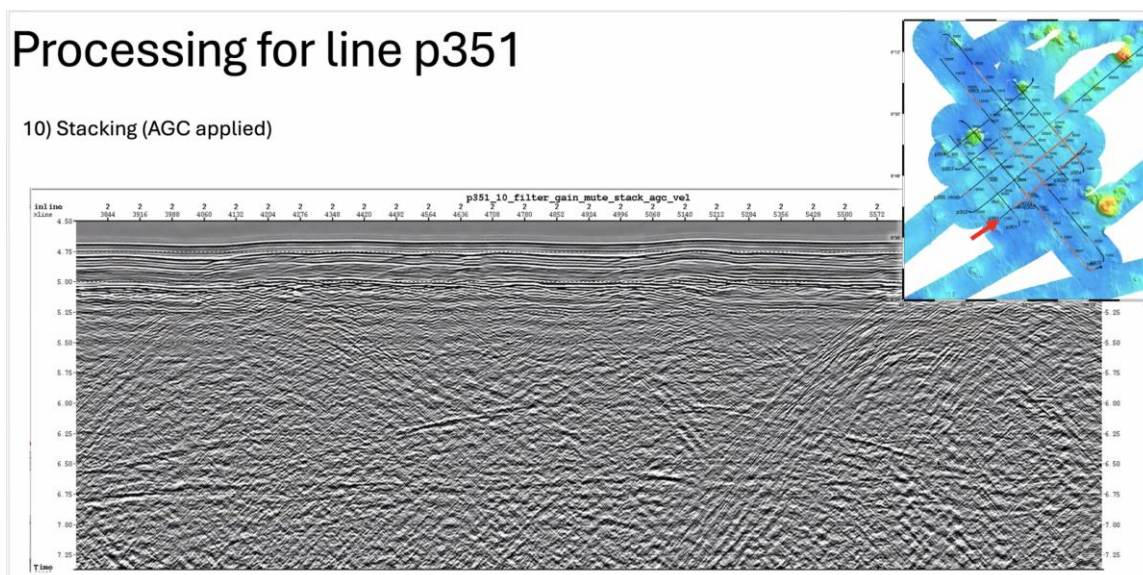


Abbildung 8: Seismisches Image entlang von P351 (bearbeitet von Dr. M. Marjanovic)

Unter Berücksichtigung von P100 im Westen des Arbeitsgebiets bei 92°W im Bereich von Site 1256 bis in den Tiefseegraben ergibt sich ein Bild, welches eine Spreizungsraten abhängige Krustenmächtigkeit zeigt. Sowohl P100, also auch P300 sowie der westliche Teil von P200w zeigen Krustenmächtigkeiten von <5 km bis 5.2 km. Hier liegt die Halbespreizungsrate noch unseren Magnetischen Messungen der Spreizungsanomalien bei 110 mm/yr, welche Richtung Tiefseegraben auf ca. 75 mm/yr abnimmt. Messungen auf der konjugierten Seite der Ostpazifischen Rückens zeigen für das gleiche Krustenalter eine Halbrate von >100 mm/yr (Wilson, 1996), so dass die „full rate“ noch immer im Bereich von

„superfast“ bleibt. Trotzdem nimmt die volle Rate um ca. 20% ab während sich die Krustenmächtigkeit um 0.5- 1 km zunimmt. Zusätzliche Untersuchungen mit Hilfe von numerischen Modellen sollen in den nächsten Monaten klären, ob das Phänomen von globaler Natur ist oder andere Ursachen, wie z.B. ein Verarmter Erdmantel (Geldmacher et al., 2013) dafür verantwortlich sind.

Processing for line p304

10) Stacking (AGC applied)

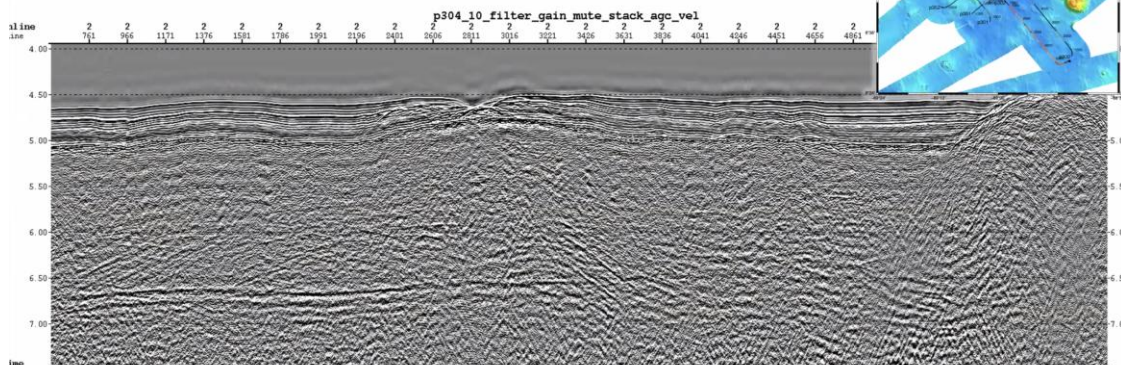


Abbildung 9: Seismisches Image entlang von P304 (bearbeitet von Dr. M. Marjanovic)

iv) Einflussnahme von Tiefseekuppen auf die Struktur und Hydrogeologie ozeanischer Kruste im Bereich von Tiefseegräben – Variabilität der ozeanischen Kruste im östlichen Teil des Arbeitsgebiets

Gebundenes Wasser, das in der ozeanischen Lithosphäre gespeichert ist, ist mit hydrothermaler Alteration verbunden. Im Allgemeinen nimmt die hydrothermale Aktivität ab, wenn sich die Lithosphäre von einem mittelozeanischen Rücken entfernt, da die oberste Kruste durch die Ausfällung von sekundären Alterationsprodukten versiegelt wird und die auf der Kruste abgelagerten Sedimente den Einstrom des Meerwassers in das magmatische Grundgebirge einschränken. Im Bereich der Region seewärts der Tiefseegräben (*trench-outer-rise*), wo sich die subduzierende Lithosphäre in den Tiefseegraben biegt, reaktivieren jedoch Verwerfungen, die mit der Biegung der abtauchenden Platte und großen Erdbeben verbunden sind, alte Verwerfungen und/oder schaffen neue aktive Störungszonen, die in den obersten Mantel einschneiden (Grevemeyer et al., 2007; 2018). In sedimentarmen Tiefseegräben können diese Verwerfungen die Sedimentdecke durchbrechen, und initiieren somit ein sekundäres hydrogeologisches Zirkulationssystem, so dass Meerwasser in den Erdmantel eindringen und ihn geochemisch verändern kann, so dass das wasserreiche Mineral Serpentin gebildet wird (Serpentinisierung). Hinweise fanden sie hierauf u.a. in reduzierten seismischen Geschwindigkeiten in der Kruste und vor allem im Erdmantel (Grevemeyer et al., 2007; Ivandic et al., 2008; Grevemeyer et al., 2018) sowie in einer Abnahme der Wärmestromdichte mit Abnehmender Entfernung zum Tiefseegraben (Grevemeyer et al., 2005). Aus diesem Grund wurden im Rahmen der Expedition JC228 durch die Arbeitsgruppe der Universität in Bremen auch neue Wärmestromdaten gesammelt. Diese Daten zeigen vor allem, dass im Bereich einer in die Subduktionszone einfahrender Tiefseekuppe sehr geringe Wärmeströme gemessen wurden, welche wiederum auf die Initiierung hydrothermaler Aktivität hindeuten, wobei der inzwischen inaktive Tiefseevulkan

diese Zirkulation verstärkt. Der östliche Teil des Seismik-Profiles P200e sollte die Einflussnahme der Tiefseekuppe auf die Alterierung der ozeanischen Kruste evaluieren. Aus diesem Grund war hier der Abstand der OBS aus 3.75 km halbiert worden, um eine höhere Strahlendichte und somit eine verbesserte Auflösung zu erreichen.

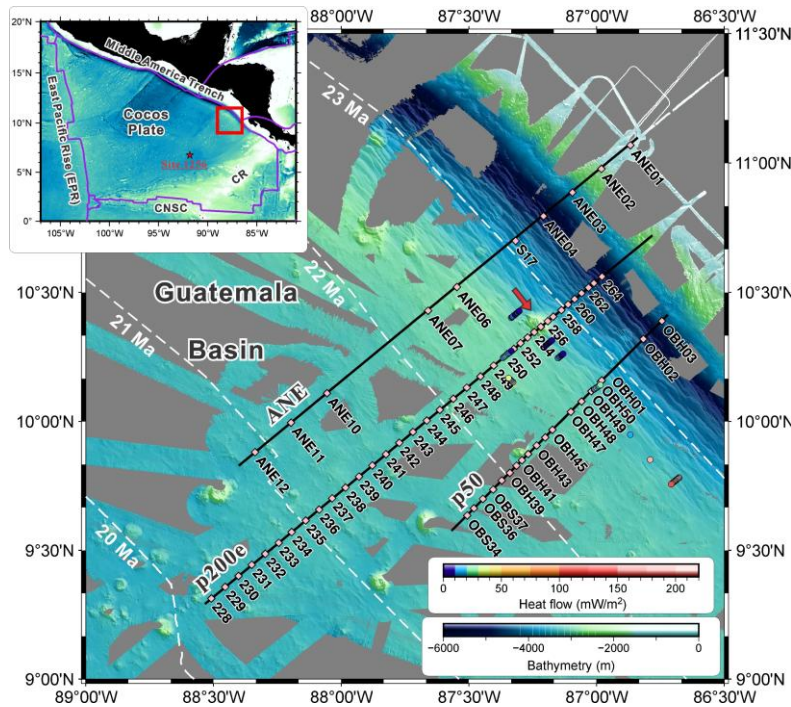


Abbildung 10: Lagekarte der im Tiefseeegraben bearbeiteten Profile; der rote Pfeil markiert den Seamount.

Um die Einflussnahme der von Tiefseekuppen auf die Hydrierung der ozeanischen Platte aufzuzeigen, haben wir des Weiteren zwei parallel zum Profil P200e re-analysiert. Eines der Profile wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB574 auf der FS SONNE Expedition SO173-1 im Jahr 2003 aufgenommen. Das zweite Profil durch US Kollegen im Jahr 2007 im Rahmen der Expedition MGL0807

des RV MARKUS G. LANGSETH registriert. Alle drei Profile wurden mittels seismischer Tomographie analysiert und Geschwindigkeitsmodelle für die Kruste und den Oberen Mantel abgeleitet.

Generell zeigen alle drei Profile ein einheitliches Verhalten. Die seismische Geschwindigkeit in Kruste und Mantel nimmt mit abnehmender Entfernung zum Tiefseeegraben ab. Die Abnahme wird durch die Ausbildung von Störungszonen und die Alteration der Kruste durch hydrothermale Prozesse gesteuert, wobei die Störungszonen als Wegsamkeiten für Seewasser agieren. Die Ausbildung der Störungen wird wiederum durch die Biegung des in die Subduktionszone einfahrenden und abtauchenden Platte bedingt. Bemerkenswert ist, dass die beobachteten Anomalien im Bereich der Tiefseekuppe sehr viel prominenter sind. Wir interpretieren diesen Umstand als Indiz für eine stärkere tektonische Belastung und Hydrierung von Kruste und Mantel, so dass der Fluss an Wasser in die Subduktionszone erhöht wird. Die Analyse der seismischen Daten wurde vom Postdoc Dr. Yuhan Li geleitet. Die Ergebnisse sind in einer Publikation zusammengefasst. Diese ist in der Fachzeitschrift „Geology“ zur Publikation angenommen und umfasst auch Daten und Ergebnisse weiterer Projektpartner, vor allem Wärmestromdichtemessungen der Universität Bremen (Li et al., Impact of seamounts on the hydration of subducting plates; Geology, <https://doi.org/10.1130/G53355.1>).

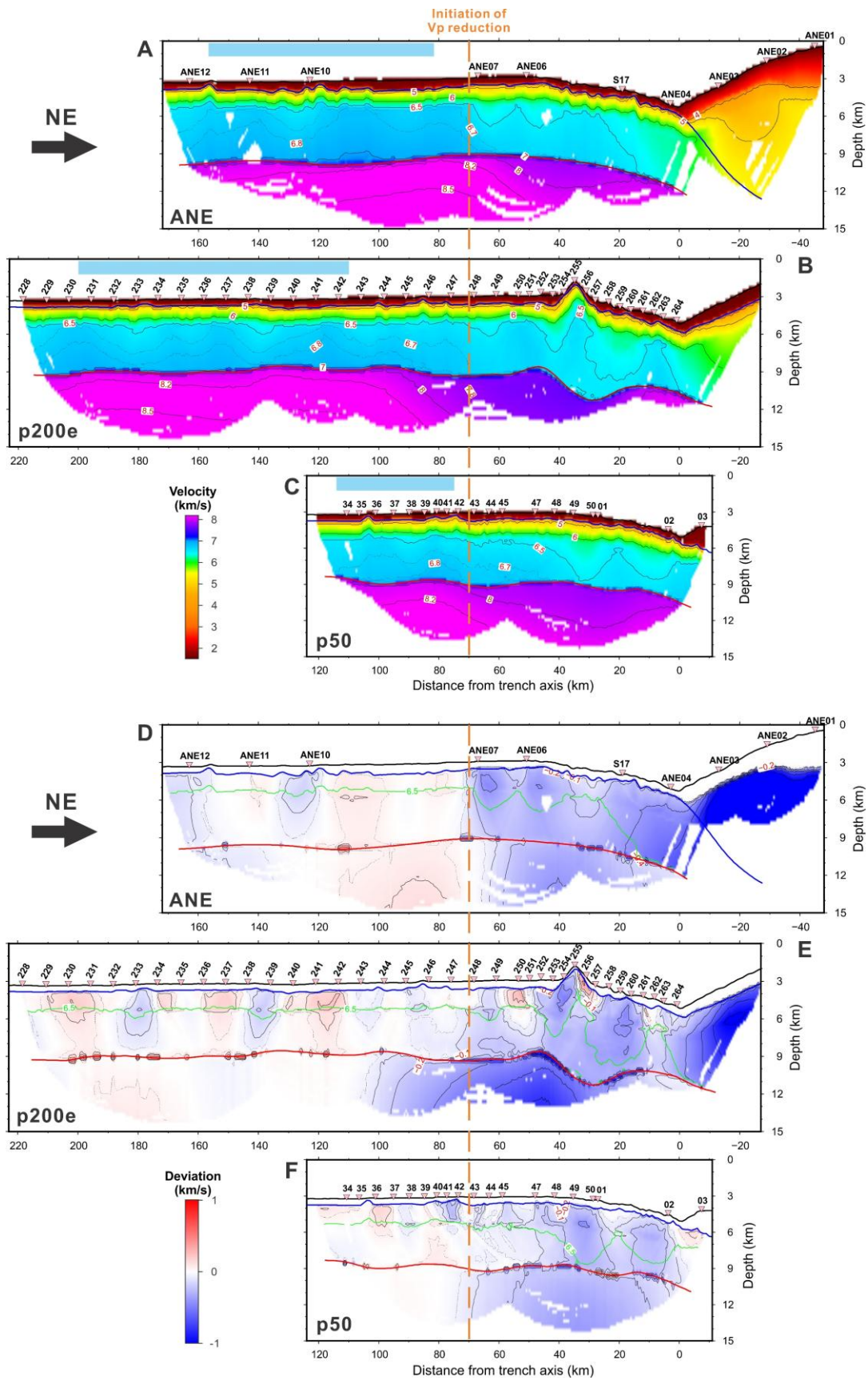


Abbildung 11: Seismischen Modelle im Tiefsee-graben; laterale Änderungen in den Geschwindigkeiten deuten auf die Einflussnahme der hydrogeologischen Aktivität am Tiefsee-graben auf die Krustenstruktur hin.

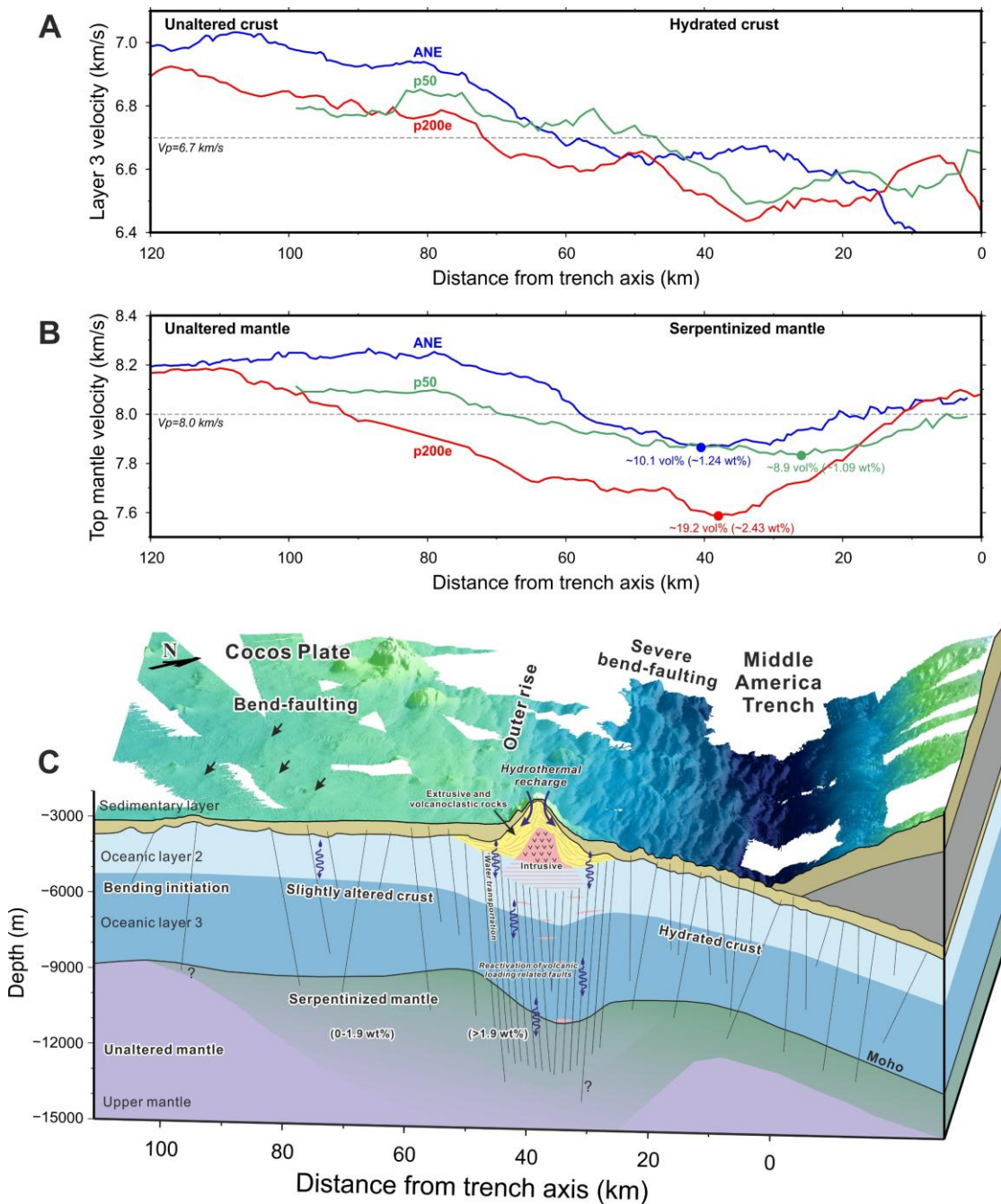


Abbildung 12: Konzeptionelles Modell für die am Tiefsee-graben ablaufenden Prozesse sowie ihr Einfluss auf die

II.2 Wichtigste Positionen des zahlungsmäßigen Nachweises

Personalkosten (Position 0837): entstandene Kosten von 211.715 €.

Diese Position umfasst die Personalkosten für einen Postdoc E13 (100%), die mit Herrn Dr. Yuhan Li besetzt wurde. Er war vor allem mit der Analyse, Auswertung, Interpretation und Publikation refraktionsseismischer und weitwinkelseismischer Daten befasst. Er bearbeitete die Profile P300, P400 und P200e. Darüber re-analysierte er zweit Profile aus der Region, um die Einflussnahme eines von uns überschossenen Tiefseevulkans auf die Subduktion zu evaluieren. Beide Datensätze waren aus Datenbanken entnommen. Zusätzlich umfasst

Position 0837 alle Gehälter für die Teilnahme der studentischen Hilfwissenschaftler des GEOMAR an der Ausfahrt. Die studentischen Hilfwissenschaftler waren neben den Zuarbeiten an Bord zum Einsatz der verschiedenen Geräte auch für die Kontrolle der seismischen und bathymetrischen Datenerfassung verantwortlich. Hierzu war die Unterstützung der studentischen Hilfskräfte durch das Personal der GEOMAR-Grundausrüstung (Prof. Ingo Grevemeyer, Dr. Anke Dannowski, Dr. Ingo Klauke) erforderlich.

Reisekosten (Position 0838): entstandene Kosten von 26,910 €.

Die Position beinhaltet die Reisekosten für die Teilnehmer des GEOMAR an der Ausfahrt JC228. Der Großteil der Reisekosten musste dabei für die Flüge Deutschland-Costa Rica aufgewandt werden. Weitere Kosten vielen für Tagungsbesuche sowie für den Austausch mit den Projektpartnern in Southampton an.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten waren umfänglich notwendig, um die Ziele des Vorhabens zu erreichen. Im Folgenden werden einzelne Arbeitstakte (AP) bzw. Meilensteine auch bzgl. einer Erfolgsbewertung dargelegt.

II.3.1 Expeditionsvorbereitung, Durchführung und Nachbereitung (AP 1, 2, 3)

Die Fahrvorbereitung und die Durchführung der Expedition waren von unmittelbarer Bedeutung für das Vorhaben und hätten „kritische“ Meilensteine bei einer nicht erfolgreichen Vorbereitung oder Expeditionsdurchführung dargestellt. Alle OBS des GEOMAR sowie alle Geräte der Britischen Projektpartner, u.a. für von NERC finanzierten Arbeitsschwerpunkte, waren jedoch erfolgreich verschifft worden. Darüber hinaus war für die gesamte Ausrüstung die technische Funktionalität gegeben. Gleiches gibt für die im Rahmen der Barter bereitgestellt RRS JAMES COOK. Die gesamte Logistik wurde unter Führung von J. E. Scott (NOC Southampton) erfolgreich und professionell koordiniert und abgewickelt.

Auf See während der Expedition JC228 war die Gewinnung qualitativ hochwertiger Daten die wichtigste Aufgabe. Dazu mussten die OBS ausgelegt und geborgen werden sowie die seismische Quelle exzellente Signale erzeugen. Das seismische Schießen oblag dabei den Technikern der National Marine Facility (NMF) welche Teil des National Oceanographic Centres ist. Die NMF hat im Rahmen der Barter die Luftkanonen gestellt und professionell betrieben. Alle seismischen Signale waren von sehr guter Qualität, so dass an Ende der Expedition seismische Weitwinkeldaten von exzellenter Qualität vorlagen. Die autonom registrierten Daten der OBS wurden bereit an Bord bzgl. der GPS-Zeit synchronisiert und u.U. bzgl. einer zeitlichen Drift der OBS-Uhr korrigiert. Darüber hinaus wurde die exakte Position der Ozean-Boden-Seismometer am Meeresboden bestimmt. Hierzu wurden die Navigationsdaten des Schiffes (Schusspunkte) sowie die direkte Welle (Wasserwelle) der seismischen Schüsse verwendet. Im Anschluss durchliefen alle Stationen ein Standard-Prozessing mit dem Aufsetzen der Geometrie und einer Signalschärfung (Filterung, Dekonvolution). Am Ende dieser Arbeitsschritte stand die seismische Sektion, welche bereits an Bord einen ersten Überblick über die im Untergrund vorhanden Heterogenität liefert und somit eine initiale Interpretation tektonischer Blöcke erlaubte.

Die NMF hat des Weiteren Mehrkanalreflexionsseismische Daten von sehr guter Qualität aufgezeichnet, welche jedoch Teil der am NOC durchgeführten und vom NERC finanzierten Arbeiten war.

Im Anschluss an die Expedition fand der Rücktransport der Ausrüstung nach Kiel (und

Southampton) statt. Sowohl am GEOMAR als auch am NOC wurden alle technischen Geräte sowie die Ozean-Boden-Seismometer überprüft und falls notwendig instandgesetzt sowie technische Defekte behoben (Demob).

Die Expedition war generell ein voller Erfolg. Leider konnte der Tauchroboter AUTO-SUB nicht erfolgreich eingesetzt werden, da das Geräte bei der Bergung im Rahmen relativ rauer Seebedingungen beschädigt wurde. Die Daten wären jedoch vor allem für die Englischen Projektpartner von Bedeutung. Darüber hinaus konnte im östlichen Teil des Arbeitsgebiets nur ein 3-km langer Streamer und nicht der 6-km lange Streamer verwendet werden. Dieses lag an einen Defekt des Begleitboots, welche Anfang Januar auftrat. Ohne Begleitboot war die Sicherheit des langen Streamers in Küstennahen Regionen durch vermehrte Fischerei nicht gegeben, so dass seine Länge vermindert werden musste. Weitere Informationen hierzu finden sich im Fahrtbericht der Expedition JC228 (Grevemeyer, Henstock & Klauke, 2023). Alle im Rahmen der Ausfahrt JC228 durchgeführten seismischen Arbeiten waren notwendig, um Informationen über die Variabilität und der Aufbau der ozeanischen Kruste zu liefern und die im Antrag dargelegten Arbeitsziele zu erreichen. Im Vergleich zum Antrag gab es keine größeren Abweichungen zwischen dem geplanten und durchgeführten Arbeitsprogramm.

II.3.2 Auswertung der Refraktions- und Weitwinkelseismik (AP 4, 5, 6 und 7)

Die im Rahmen der Expedition akquirierten Profile P100 über das ODP Site 1256, „Kreuz-Profil“ P300 und P400 sowie die Analyse des östlichen Teils von P200 Transect (P200e) waren Teil der Arbeitspakete des beantragten und am GEOMAR ausgeführten Vorhabens. Im Rahmen von GUATOPS waren für die Analyse der Daten ein Postdoc (26 Monate) sowie ein Wissenschaftlicher Mitarbeiter (12 Monate) beantragt worden, wobei nur der Postdoc bewilligt wurde. Die Kürzung der bereit gestellten Finanzmittel für das wissenschaftlichen Personals machte eine gewissen Anpassung der Arbeiten notwendig, wobei die Arbeiten in den Arbeitspaketen 4 und 5 in ihrer ursprünglichen Form durchgeführt werden konnten. Die im AP 6 geplante Analyse der MCS Daten wurde nicht wie geplant am GEOMAR durchgeführt, sondern am IGP von M. Marjanovic durchgeführt. Die Anwendung von Techniken, welche komplementär zur Analyse von MCS Daten sind, wie das seismische „Mirror Imaging“ zur Abbildung der Sedimentmächtigkeit und des vulkanischen Grundgebirges, wurde vor allem entlang von P100 exemplarisch ausgeführt. Entlang der Profile P300 und P400, welche beider mit dem 6-km Streamer überschossen wurden, wurde im Rahmen der notwendigen Konsolidierung der Aktivitäten auf diese Arbeiten verzichtet. Darüber hinaus haben wir entlang von P100 eine Migration der Weitwinkel-Reflexionen zur Untersuchung und Abbildung der Krustenmantel Grenze (seismische Moho) ausgeführt. Diese Arbeiten gehen über die im Antrag formulierten Aktivitäten hinaus und wurden durch Dr. Cord Papenberg (GEOMAR Haushalt) übernommen. Die Analyse der refraktionsseismischen Daten entlang von P100 wurde vom PI (I. Grevemeyer) übernommen, während der Postdoc Y. Li die Profile P300, P400 und P200e ausgewertet hat. Die in den seismischen Sektionen beobachteten Laufzeiten von Refraktionseinsätzen der Kruste (Pg), Weitwinkelreflexionen von der Krusten-Mantelgrenze (PmP) sowie Tauchwellen im Oberen Mantel (Pn) wurden durch seismische Laufzeitomographie in Geschwindigkeitsmodelle überführt und interpretiert. Aufgrund der beobachteten Homogenität der Kruste konnte auf die ursprünglich anvisierte MCS und Weitwinkelseismische Joint Inversion verzichtet werden und wir wendeten die besser etablierte „joint refraction & wide-angle reflection“ inversion (Korenaga et al., 2000) an. Die MCS Daten, welche in Paris und Southampton analysiert wurde, flossen jedoch in der Form

der beobachteten Sedimentmächtigkeit und zur Verifikation der Lage der seismischen Moho in die Analyse und Interpretation ein. Bzgl. der im Antrag formulierten Ziele konnte die Datenanalyse erfolgreich abgeschlossen werden.

II.3.3 Integration und von Datensätzen und Interpretation (AP 8)

Am Ende des Vorhabens stehen umfangreiche seismische Datensätze bereit, um die Entstehung und Entwicklung ozeanischer Kruste zu evaluieren, vor allem die Bildung ozeanischer Kruste bei sehr hohen („superfast“) Spreizungsraten. Während der Expedition aufgenommene Messungen des Erdmagnetfelds bestätigen die sehr hohen Bildungsrate von ca. 110 mm/yr im Bereich von Site 1256 und in der Region von P300; Richtung Osten nahm die Bildungsrate dann ab, mit einem Hinweis asymmetrische Spreizung im Vergleich zur Westlichen Flanke des Ostpazifischen Rückens (Wilson, 1996).

Im Tiefseegraben bestätigen die durch die Universität Bremen ausgeführten Wärmestromdichtemessungen die Aktivierung effektiver hydrothormaler Zirkulation, welche große Wärmemengen abführt – vor allem in der Nähe der auftretenden Tiefseekuppen. Sowohl die seismischen Daten von P200e also auch die Wärmestrommessungen im Bereich des Tiefseegrabens sind in einer in der Fachzeitschrift „Geology“ akzeptierten Publikation eingeflossen (Li et al., 2025). Die Zusammenschau der unterschiedlichen Methoden ermöglichte eine umfassende Interpretation, wobei die Methoden sich unterstützt haben, um ein konzeptionelles Modell für die Einflussnahme von Seamounts in Tiefseegräben auf den globalen Wasserhaushalt der Erde zu bestimmen.

Die Krustenmodelle abgeleitet aus den weitwinkelseismischen Daten sowie die Reflexionsseismischen Daten befruchten sich hinsichtlich einer synoptischen Interpretation, vor allem finden sich in den beiden voreinander unabhängig abgeleiteten Mächtigkeit der ozeanischen Kruste eine große Übereinstimmung. D.h., der Einsatz unterschiedlicher seismischer Verfahren war zielführend und angemessen. Darüber hinaus erlaubt die beobachtete Reflektivität der Kruste wichtige Hinweise über die Bildungsprozesse der Kruste. Diese Arbeiten werden unter Federführung von Dr. M. Marjanovic vorangetrieben und sind zum heutigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen.

II.3.4 Archivierung der Daten (AP9)

Bedingt durch die Barter-Expedition werden einige der grundlegenden Daten nicht wie üblich über Deutsche Datenzentren, sondern über das British Oceanographic Data Centre or BODC (www.bodc.ac.uk) archiviert. D.h., Daten der Meeresbodenmorphologie, des Magnetfelds der Erde und des Schwerfelds sind über UK Datenbanken abrufbar.

Bedingt durch die Neustrukturierung des IODP3 werden alle Datensätze vor erst nicht wie im Antrag ursprünglich dargelegt in der IODP Pre-Site-Survey Datenbank gespeichert, sondern alle Daten sind in Internationalen Datenbanken archiviert und stehen der Allgemeinheit zur Verfügung. Alle im Vorhaben gesammelten Datensätze von Ozean-Boden-Seismometer (sowohl aus UK als auch aus Deutschland/GEOMAR) wurden unter Federführung des PI über PANGAEA bereits verfügbar gemacht. Die Reflexionsseismischen Daten wurden von den Britischen Kollegen im BODC archiviert.

II.3.5 Publikation der Ergebnisse (AP10)

Die exzellenten im Vorhaben aufgenommenen und bearbeiteten Daten bilden eine hervorragende Grundlage für wissenschaftliche Veröffentlichung; z.Zt. liegen drei Manuskripte vor, wobei erst eines der Manuskripte mit Ergebnissen über die Prozesse am Tiefseegraben und die Einflussnahme der dort ablaufenden Tektonischen Prozesse auf den Wasserzyklus der Erden (Li et al., Grology, 2025) publiziert ist. Ein weiteres Manuskript über

Hydrothermalsystemen wird Folgeprojekte und Kooperationen motivieren. Beispielsweise im Falle von zukünftigen Bohrungen in inaktive Hydrothermalfelder ist eine Kenntnis der regionalen Krustenstruktur, wie sie nur die Seismik abbilden kann, im Sinne einer Vorerkundung von großer Bedeutung. Das Vorhaben sowie die geplante Durchteufung der ozeanischen Kruste wird zum tiefergehenden Verständnis beitragen, aber auch neue spezifische Fragen aufwerfen. Hydrothermale Systeme haben ein hohes Rohstoffpotential, welches in Zukunft auch von wirtschaftlicher Bedeutung sein könnte.

II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Ergebnisse des Vorhabens JC228 werden direkt in die finale Initiierung einer IODP3 Bohrung zur Durchteufung der ozeanischen Kruste beitragen, denn die Untersuchung untersuchen eine von drei Regionen welche von der wissenschaftlichen Gemeinde für das sog. MoHole vorgesehen werden (Umori et al., 2012). Das MoHole ist eines der Flaggschiff-Projekte im „IODP Science Plan“. Leider bedingt der Austritt der USA im Jahre 2024 aus dem Vorhaben z.Zt. eine Verlangsamung bei der Durchführung entsprechend ambitionierter Projekte.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Fahrtbericht:

Grevenmeyer, I., T. Henstock & I. Klauke (2023), RRS JAMES COOK Barter Cruise JC228: IODP-Presite survey for “The MoHole”: Seismic structure of fast spreading lithosphere and hydrothermal circulation, Guatemala Basin, GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, https://www.bodc.ac.uk/resources/inventories/cruise_inventory/reports/jc228.pdf

Angenommene/erscheinende peer-review Publikationen:

Li, Y., I. Grevenmeyer, A. H. Robinson, T. J. Henstock, M. Marjanovic, A. Dannowski, N. Kaul, I. Klauke, P. Vannucchi, H.-S. Hilbert, D. A. H. Teagle & J. P. Morgan (2025), Impact of seamounts on the hydration of subducting plates, *Geology*, <https://doi.org/10.1130/G53355.1>

In Vorbereitung - mit verfügbaren Manuskript

Grevenmeyer, I., T. J. Henstock, M. Marjanović, C. Papenberg, A. Dannowski, Y. Li, A. H. Robinson & D. A. H. Teagle, Seismic wide-angle constraints on the crustal thickness at Ocean Drilling Program Site 1256: how typical is its structure for oceanic crust? *Geology*
Li, Y., I. Grevenmeyer, T. J. Henstock, A. H. Robinson, M. Marjanović, A. Dannowski & D. A. H. Teagle, Thin oceanic crust formed in the Guatemala Basin supports deficit melt extraction at superfast spreading rates, *Science Advances*

Präsentationen auf Tagungen und Wissenschaftlichen Fachtagungen:

Grevenmeyer, I., Henstock, T. J., Dannowski, A., Marjanovic, M., Hilbert, H.-S., Li, Y., and Teagle, D. A. H. (2023) Oceanic crustal structure at ODP Site 1256 from seismic wide-angle tomography and down-hole logging, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-4289, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-4289>, 2023.

Henstock T., M. Marjanović, I. Grevenmeyer, Robinson A.H., Y. Li, A. Dannowski, H.-S., Hilbert and D.A.H. Teagle (2023), Multichannel Seismic Imaging of Oceanic Lithosphere in the Guatemala Basin – Observations from a Site Survey for Potential MoHole Drilling [V31E-0142] 2023 Fall Meeting, AGU, San Francisco, 11-15 Dec.

- Henstock, T., Grevemeyer, I., Dannowski, A., Marjanovic, M., Hilbert, H.-S., Robinson, A., Li, Y., and Teagle, D. (2023) Site survey for potential MoHole drilling sites in the Guatemala Basin, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-8488, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-8488>, 2023.
- Henstock, T., Grevemeyer, I., Marjanovic, M., Robinson, A., Li, Y., and Teagle, D. (2023) Site survey for potential MoHole drilling sites in the Guatemala Basin, IODP3 2023 meeting
- Li, Y., Grevemeyer, I., Robinson, A., Henstock, T. J., Marjanović, M., Dannowski, A., Hilbert, H.-S., and Teagle, D. A. H. (2024) Bending-related faulting, hydration, and mantle serpentinization in the incoming Cocos Plate at Middle America Trench: Evidence from wide-angle seismic refraction data, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-19448, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-19448>, 2024
- Li Y., I. Grevemeyer, T. Henstock, A.H., Robinson, M. Marjanović, A. Dannowski, H.-S., Hilbert and D.A.H. Teagle (2023) Oceanic Crustal Structure of the Guatemala Basin: Pre-site Survey for IODP Flagship Project "MoHole" Abstract [V31E-0143] 2023 Fall Meeting, AGU, San Francisco, 11-15 Dec.
- Marjanović, M., Henstock T., I. Grevemeyer, Y. Li, Robinson A.H., A. Dannowski, H.-S., Hilbert (2023), Site survey for potential MoHole drilling sites in the Guatemala Basin, IODP France, November 2023
- Robinson A.H., Y. Li, T. Henstock, I. Grevemeyer, M. Marjanović, A. Dannowski, H.-S., Hilbert and D.A.H. Teagle (2023) Wide-Angle Seismic Imaging of Crust and Upper Mantle Structure Along a Ridge Flow-Line in the Guatemala Basin – Observations from a Site-Survey for Potential MoHole Drilling [V43B-0178] 2023 Fall Meeting, AGU, San Francisco, 11-15 Dec.
- Robinson, A.H., Li, Y., Henstock, T.J., Grevemeyer, I., Marjanovic, M., Teagle, D.A.H. (2023) Wide-angle seismic imaging of crust and upper mantle structure for a potential Mohole drilling site – the Guatemala Basin, UKIODP 2023 annual meeting

Geplante peer-review Veröffentlichungen

- Marjanović, M., T. J. Henstock, I. Grevemeyer, Y. Li, A. H. Robinson, A. Dannowski & D. A. H. Teagle, Crustal reflectivity of superfast spreading oceanic crust in the Guatemala Basin, *J. Geophys. Res.*
- Robinson A.H., Y. Li, T. Henstock, I. Grevemeyer, M. Marjanović, A. Dannowski, & D.A.H. Teagle Wide-angle seismic structure of crust and upper mantle along a ridge flow-line in the Guatemala Basin, *J. Geophys. Res.*
- Vannucchi, P., J. P. Morgan, M. Marjanovic, M. Cooper, T. J. Henstock, I. Grevemeyer, N. Kaul, I. Klauke, & D. A. H. Teagle, Fluid migration and hydrogeology controlled by bending-related faulting at the Costa Rica Trench, *Communication Earth and Environment*

II.7 Literaturangaben

- Dilek, Y. 2003, Ophiolite concept and its evolution, *GSA Special Paper 373*, 1-16.
- Christeson, G.L., Goff, J.A., and Reece, R.S., 2019, Synthesis of oceanic crustal structure from two-dimensional seismic profiles: *Reviews of Geophysics*, v. 57, p. 504–529, <https://doi.org/10.1029/2019RG000641>.
- Geldmacher, J., Höfig, T.W., Hauff, F., Hoernle, K., Garbe-Schönberg, D., Wilson, D.S., 2013. Influence of the Galápagos hotspot on the East Pacific Rise during Miocene superfast spreading, *Geology* 41 (2), 183–186. <http://dx.doi.org/10.1130/G33533.1>.
- Grevemeyer, I., N. Kaul, J.L. Diaz-Naveas, H. Villinger, C.R. Ranero, C. Reichert, 2005, Heat flow and bending-related faulting at subduction trenches: case studies offshore of

- Nicaragua and Central Chile, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 236, 238-248.
- Grevenmeyer, I., C.R. Ranero, E.R. Flueh, D. Klaeschen, J. Bialas, 2007, Passive and active seismological study of bending-related faulting and mantle serpentinization at the Middle America trench. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 258, 528-542
- Grevenmeyer, I., Ranero, C.R., Ivandic, M., 2018, Structure of oceanic crust and serpentinization at subduction trenches: *Geosphere*, 14(2), 395–418, doi:10.1130/GES01537.1.
- Hallenborg, E., Harding, A. J., Kent, G. M. and Wilson, D. S. (2003) Seismic structure of 15 Ma oceanic crust formed at an ultrafast spreading East Pacific Rise: Evidence for kilometer-scale fracturing from dipping reflectors, *J. Geophys. Res.*, 108(B11), 2532, doi:10.1029/2003JB002400.
- Ildefonse, B., et al., 2010, The MoHole: A Crustal Journey and Mantle Quest, Workshop in Kanazawa, Japan, 3–5 June 2010. *Scientific Drilling*, 10, 56-62.
- Ivandic, M., I. Grevenmeyer, J. Berhorst, E.R. Flueh, K. McIntosh, 2008, Impact of bending related faulting on the seismic properties of the incoming oceanic plate offshore of Nicaragua, *J. Geophys. Res.*, 133, B05410, doi:10.1029/2007JB005291
- Korenaga, J., W. S. Holbrook, G. M. Kent, P. B. Kelemen, R. S. Detrick, H.-C. Larsen, J. R. Hopper, and T. Dahl-Jensen, 2000, Crustal structure of the southeast Greenland margin from joint refraction and reflection seismic tomography, *J. Geophys. Res.*, 105(B9), 21, 591–21, 614, doi:10.1029/2000JB900188.
- Korenaga, J., P. B. Kelemen, and W. S. Holbrook, 2002. Methods of resolving the origin of large igneous provinces from crustal seismology, *J. Geophys. Res.*, 107, 2178, doi:10.1029/2001JB001030.
- McKenzie, D. P., and M. J. Bickle, 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere, *J. Petrol.*, 29, 625–679.
- Müller, R.D., Sdrolas, M., Gaina, C., and Roest, W. R., 2008. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, Q04006, doi:10.1029/2007GC001743.
- Raitt, R.W., 1963. The crustal rocks, in *The sea*, Vol. 3, ed. M.N. Hill, Interscience, New York, 85-102.
- Teagle, D.,A.H., Ildefonse, B., 2011. Journey to the Mantle of the Earth, *Nature*, 471, 437-439.
- Teagle, D.A, et al., 2012, IODP Expedition 335: Deep Sampling in ODP Hole 1256D, *Scientific Drilling*, 13, 28-34.
- Teagle, D. A. H., J. C. Alt, S. Umino, S. Miyashita, N. R. Banerjee, D. S. Wilson, and the Expedition 309/312 Scientists (2006), *Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program*, vol. 309/312, Ocean Drill. Program, College Station, Tex., doi:10.2204/iodp.proc.309312.2006.
- Umori, S., et al., 2012, MOHOLE TO THE MANTLE (M2M), IODP-proposal 805-MDP
- White, R.S., D. McKenzie, and R.K. O'Nions, 1992. Oceanic crustal thickness from seismic measurements and rare earth element inversion. *J. Geophys. Res.*, 97: 19683-19715.
- Wilson, D.S., 1996. Fastest known spreading on the Miocene Cocos-Pacific plate boundary. *Geophys. Res. Lett.*, 23:3003–3006. doi:10.1029/96GL02893
- Wilson, D.S., Hallenborg, E., Harding, A.J., and Kent, G.M., 2003. Data report: Site survey results from cruise EW9903. In Wilson, D.S., Teagle, D.A.H., Acton, G.D., *Proc. ODP, Init. Repts.*, 206, 1–49, Texas A&M University, College Station TX 77845-9547, USA.
- Wilson, D. S., et al. (2006), Drilling to gabbro in intact ocean crust, *Science*, 312, 1016–1020, doi:10.1126/science.1126090.