

Schlussbericht

Prof. Dr. Wilfried Jokat



ALFRED-WEGENER-INSTITUT
HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR POLAR-
UND MEERESFORSCHUNG
Am Alten Hafen 26
27568 Bremerhaven

SO 230 – MOCOM Asymmetrisches Aufbrechen von Gondwana im Mosambik Becken

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BMBF Förderkennzeichen: 03G0230A

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2013 – 30.11.2016

Berichtszeitraum: 01.10.2013 – 30.11.2016



Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

1. Inhaltsverzeichnis

1. Inhaltsverzeichnis	2
2. Kurzdarstellung der Ziele des Vorhabens	3
3. Instrumentierung zur Durchführung des Vorhabens	3
4. Stand der Wissenschaft vor Beginn des Vorhabens	4
5. Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern	5
6. Planung und Ablauf des Vorhabens	5
6.1. Integration von Datensätzen anderer Quellen	8
6.2. Datenerfassung- und Bearbeitung	8
6.2.1. Refraktionsseismik	8
6.2.2. Magnetik- und Schwerefelddaten	9
7. Ergebnisse der Expedition	10
7.1. Ergebnisse der Refraktionsseismik	10
7.2. Ergebnisse Magnetik/Gravimetrie	12
7.3. Diskussion der Ergebnisse	13
7.3.1. Krustenaufbau des Kontinentalrandes von Zentralmosambik	13
7.3.2. Vulkanismus	13
7.3.3. Tektonische Entwicklung von SE-Afrika und Dronning Maud Land	15
7.4. Zusammenfassung	17
8. Verwendete Programme	17
9. Veröffentlichungen und Weitergabe der Daten an andere Institutionen	18
10. Literaturverzeichnis	18
11. Anhang	19

2. Kurzdarstellung der Ziele des Vorhabens

Ziel dieses Vorhabens war es, den Kontinentrand vor Zentralmosambik mit seinen wesentlichen geologischen Elementen zu verstehen und diese Erkenntnisse in entsprechende geodynamische Modelle einzubauen. Das vorgelagerte Mosambik Becken ist vor ca. 160 Millionen Jahren entstanden. Es ist, zusammen mit dem nördlicher gelegenen Somali Becken, das erste und älteste Ozeanbecken, das beim Aufbruch von Gondwana entstanden ist. Geologische Kartierungen im südlichen Afrika und der Antarktis zeigen, dass vor dem eigentlichen Aufbruch ein massiver Vulkanismus aktiv gewesen ist. Große Teile von Mosambik sind wahrscheinlich von dicken Karoo Basaltlagen (ca. 180 Millionen Jahre alt) unterlagert. In der Antarktis ist der größte Teil dieser Basaltlagen inzwischen erodiert oder vom Eisschild bedeckt. Die Frage ist, wie symmetrisch/asymmetrisch die Bildung der Kontinentränder in der Riiser Larsen See (Antarktis) und vor Mosambik verlief. Hierbei sind insbesondere die ältesten Teile des Beckens direkt vor der Küste von Mosambik von Interesse. Es waren daher ergänzende magnetische als auch tiefenseismische Messungen vor Mosambik geplant. Messungen, die im Jahr 2005 (Magnetik, RV Sonne) und 2007 (Refraktions- und Reflexionsseismik, Gravimetrie und Magnetik RV Marion Dufresne) durchgeführt wurden, sollten ergänzt werden, damit ein komplettes geodynamisches Szenario über die frühe Geschichte dieses Ozeanbeckens erstellt werden kann.

3. Instrumentierung zur Durchführung des Vorhabens

Das Projekt MOCOM wurde mit Hilfe des deutschen Forschungsschiffes Sonne durchgeführt. Zur Navigation wurden die bordeigenen GPS-Systeme sowie selbstinstallierte GPS-Empfänger verwendet. Für den seismischen Teil des Experimentes wurden insgesamt 37 Ozeanbodenseismometer eingesetzt, die für dieses Vorhaben vom GEOMAR ausgeliehen wurden. Alle Geräte konnten nach erfolgter Profilfahrt wieder geborgen werden. Als seismische Quelle wurden insgesamt 8 G-Guns mit einem Gesamtkammervolumen von 64 ltr. verwendet. Die Erfassung des Erdmagnetfeldes entlang der Messprofile erfolgte mittels eines SeaSpy™ Gradiometersystems der BGR. Das System bestand aus drei Sensoren: zwei Overhauser Gradiometersystem und ein Magson Fluxgate Sensor. Diese wurden in linearer Anordnung mit einer Minimalentfernung von 750 m hinter dem Schiff gezogen. Konkret:

- in 750 m Overhauser Sensor #1,
- in 825 m Magson Fluxgate,
- in 900 m Overhauser Sensor #2 (Jokat, 2014).

Da durch das Gradiometersystem der Tagesgang eliminiert werden kann, wurde keine separate, magnetische Basisstation an Land benötigt.

Zur Messung des Erdschwerefeldes wurde an Bord ein Seegravimeter der BGR (KSS32M, S/N 22) und ein Gerät vom AWI (KSS32M, S/N 25) installiert. Das Gerät vom AWI wurde für einen Test installiert, da nach einer größeren Reparatur im Vergleich mit dem BGR Gerät geprüft werden sollte, ob die Fehler behoben worden sind. Dieser Test war erfolgreich. Beide Geräte lieferten stabil vergleichbare Daten. Für Landanschlussmessungen stand ein tragbares LaCoste & Romberg – Gravimeter zur Verfügung. Die bathymetrische Vermessung des Meeresbodens wurde mit der fest im Schiff installierten Fächersonaranlage Kongsberg Simrad EM 302 durchgeführt, sowie einem Parasound Sediment Echolot.

4. Stand der Wissenschaft vor Beginn des Vorhabens

Die Rekonstruktion der Prozesse während des Aufbruchs von Gondwana ist nur im Ansatz verstanden. Die Schwierigkeiten liegen einerseits in der Tatsache begründet, dass in vielen Regionen nach wie vor die geowissenschaftliche Datenlage mangelhaft ist. Zusammen mit der z.T. erheblichen Komplexität der geologischen Strukturelemente sowie der Mehrdeutigkeit von geophysikalischen Daten ist eine sichere Interpretation schwierig. Dies trifft insbesondere auf das Mosambik Becken, die Geologie von Mosambik sowie dem weiter südlich gelegenen Mosambik Rücken zu.

Der Kontinentalrand des südöstlichen Afrikas ist überwiegend ein gescherter Kontinentalrand, der sich in der unteren Kreide im Zuge der Trennung von Westgondwana (Südamerika) von Afrika entwickelte. Das Falkland Plateau trennte sich entlang der ausgedehnten Agulhas-Falkland-Bruchzone vom südlichen Afrika. Das östlich des Mosambikrückens gelegene Mosambikbecken und der nördlich davon befindliche Mosambikkanal wurden hingegen durch die Relativbewegung zwischen Afrika und der Antarktis früher gebildet. Innerhalb einer relativ kleinen Region Gondwanas grenzten somit die Kontinentalmassen Afrikas, Südamerikas und Ostgondwanas im nördlichen Natalbeckens aneinander.

Der Kontinentrand von Zentralmosambik sowie die angrenzende Tiefsee waren Zielgebiet von insgesamt 2 Schiffsexpeditionen (SO183, MoBaMaSis) an denen das AWI beteiligt war. Im Rahmen der BGR/IFREMER/AWI MoBaMaSis Expedition wurden basierend auf den magnetischen/gravimetrischen Daten, die mit der FS Sonne Fahrt SO 183 erhoben wurden, erstmalig vor der Küste von Mosambik moderne, tiefenseismische Daten erhoben sowie die SO 183 Magnetik ergänzt. Ziel war es, den Kontinent-Ozean Übergang (COT) definitiv zu erfassen und deren Struktur im Vergleich zum konjugierenden Kontinentrand der Ostantarktis zu interpretieren. Ergänzend wurden reflexionsseismische Profile erstmalig bis weit in den Mosambikkanal erhoben, um den generellen Aufbau zu verstehen. Ähnliches gilt für die bathymetrischen Daten. In insgesamt 4 Artikeln wurden die Ergebnisse der geophysikalischen Experimente veröffentlicht (Leinweber et al., 2013, Castelino et al., 2015, 2016, 2017). Diese Ergebnisse zeigten, dass für ein komplettes Verständnis dieses alten Kontinentrandes ein weiteres tiefenseismisches Profil über ein Schwerehoch (Beira Hoch) in der südwestlichen Ecke des Mosambikkanals sowie eine Verdichtung der vorhandenen MoBaMaSis Magnetikdaten wünschenswert war. Für eine solide Rekonstruktion war es eine zentrale Frage, ob das Beira Hoch ein kontinentales Fragment darstellt oder ozeanischer Natur ist. Die vorhandenen Industrie-Reflektionsdaten waren für unsere Fragestellungen wenig hilfreich, da diese räumlich nur auf die flache Schelfregion begrenzt sind. Nur die alten Sedimentbecken mit Kohlenwasserstoffpotential waren von Interesse.

5. Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern

Alfred-Wegener-Institut Helmholtz Zentrum für Polar- und Meeresforschung

Postfach 120161
27515 Bremerhaven
Deutschland

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Stilleweg 2
30655 Hannover
Deutschland

INP - National Petroleum Institute

Rua dos Desportistas, Parcela nº 259 E
Maputo
Mosambik

PASA Petroleum Agency of South Africa

151 Frans Conradie Drive
Parow, 7500
Südafrika

Schlumberger UK Limited

Schlumberger House,
Horley, Gatwick RH6 0NZ,
Vereinigtes Königreich

University von KwaZulu-Natal

King George V Ave,
Glenwood, Durban, 4041
Südafrika

6. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Zielgebiet für den Fahrtabschnitt SO230 war der Kontinentrand von Zentral und Nordmosambik. Das Forschungsvorhaben hatte zum Ziel, die geologische Entwicklung dieser Region zur Zeit des späten Juras zu untersuchen. Diese Untersuchungen vor der Sambesi-Küste ermöglichen es, diese Erkenntnisse mit ähnlichen Resultaten entlang des konjugierenden Kontinentrandes vor der Ostantarktis zu vergleichen. Sowohl die Struktur des Kontinentrandes sowie die Geometrie des Kontinent-Ozean Überganges entlang beider Kontinentränder sind wichtige Eingabeparameter für geodynamische Modelle, um den Aufbruch von Gondwana zu erklären.

Im ersten Teil der Reise SO230 wurde die tiefere Struktur des Kontinentrandes vor Zentralmosambik untersucht, hier insbesondere das Beira Hoch, um dessen Struktur und geologische Entwicklung einzugrenzen. Insgesamt 37 Ozeanbodenseismometer (OBS) wurden entlang des 373 km langen Profils ausgelegt. Nachdem Abschluß dieser Messungen, wurde das vorhandene magnetische Netzwerk vor dem Sambesi Delta verdichtet. Dabei wurde insbesondere die Lage alter Profile, die in

2005 mit FS Sonne und 2007 mit FS Marion Dufresne erhoben wurden, berücksichtigt. Zu unserer Überraschung hat das Beira Hoch eine magnetische Signatur, die nicht für den restlichen Kontinentrand typisch ist.

Im zweiten Teil dieses Fahrtabschnittes wurde der Übergang vom passiven Kontinentrand vor Zentralmosambik zum gesicherten Kontinentrand (Davie Rücken) von Nordmosambik mit insgesamt vier tiefenseismischen Profilen untersucht. Da dies Teil des PAGE_Four BMBF Vorhabens ist, soll in diesem Bericht nicht weiter auf die Ergebnisse eingegangen werden. Zusammenfassend ist festzustellen, dass alle Experimente für das MOCOM Vorhaben erfolgreich durchgeführt werden konnten. Entlang der gesamten Fahrtroute von FS Sonne wurden bathymetrische Daten erhoben, um die vorhandene Information über die Meeresbodentopografie weiter zu verdichten. Zusammen mit den alten und den MOCOM/PAGE_Four Expeditionen repräsentieren die Fächersonardaten die umfangreichste Datenbasis, um junge Sedimentationsprozesse in dieser Region zu interpretieren und verstehen zu können. Um alle Experimente durchzuführen, legte FS Sonne auf dieser Expedition insgesamt 17.942 km (96.88 SM) zurück.

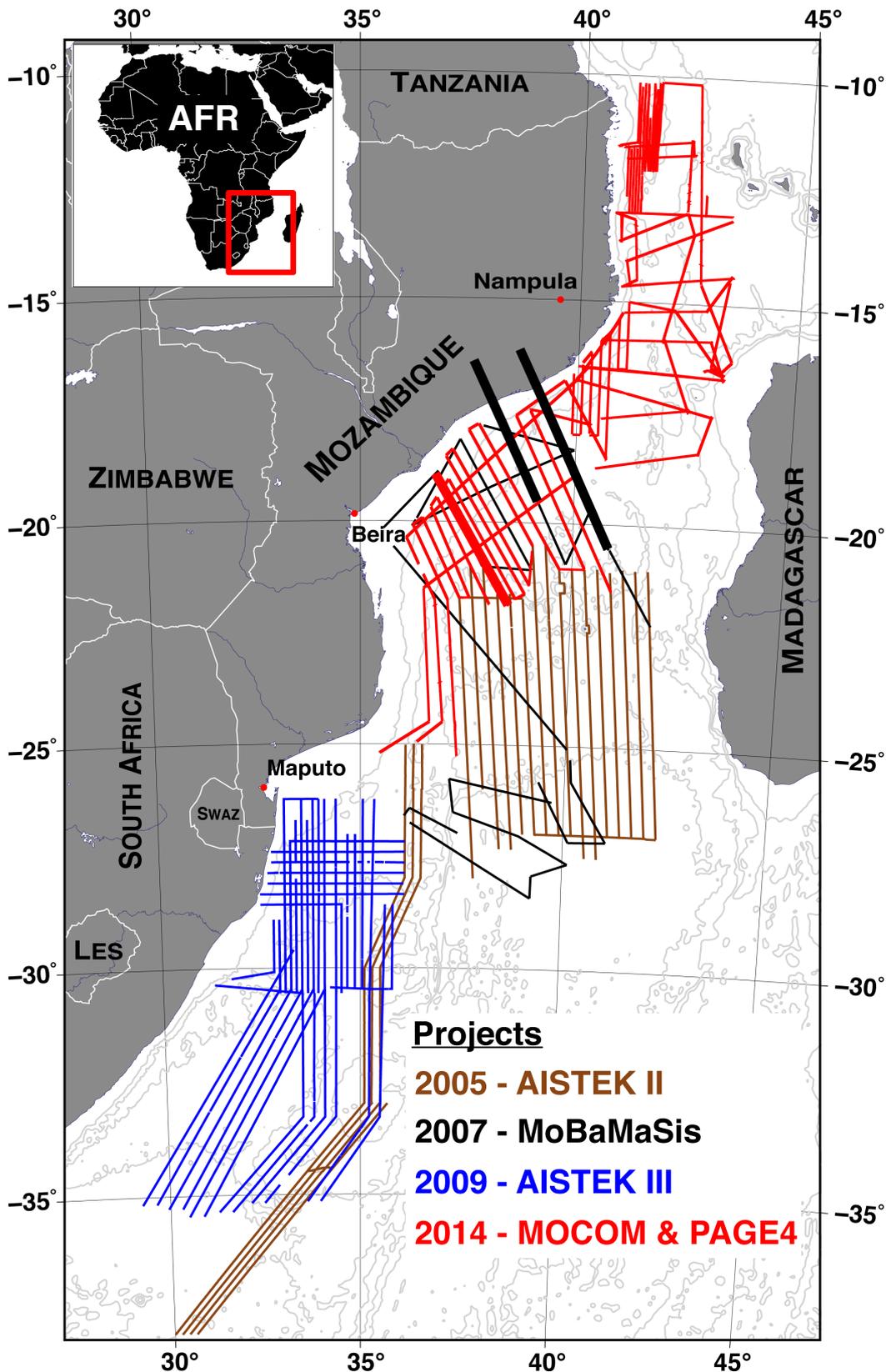


Abb. 1: Übersichtskarte der Expeditionen mit Beteiligung des AWI im Mosambikbecken, die systematisch Magnetikdaten aufgezeichnet haben. Die dick gezeichnete rote Linie markiert die Lage des im Rahmen dieses Projektes aufgezeichneten Refraktionsprofils. Die dicke gezeichnete schwarze Linie markiert die Refraktionsprofile der früheren MoBaMaSis-Fahrt (Reichert and Neben, 2008).

6.1. Integration von Datensätzen anderer Quellen

Im Rahmen der Kooperation mit der Petroleum Agency of Mosambik (INP) wurden alte Potentialfelddaten bereitgestellt, die im südlichen Teil des Landes erhoben wurden. Die Potentialfelddaten wurden im Rahmen der Analyse der Region mit einbezogen, floßen jedoch aufgrund des geringen zusätzlichen Erkenntnisgewinns weder in die Auswertung noch in die Abbildungen ein.

Neben den auf früheren FS Sonne/Marion Dufresne Expeditionen gewonnenen Magnetikdaten sowie alten Schiffsmagnetikdaten aus der NGDC-Datenbank wurden alle verfügbaren Datensätze in einer magnetischen Kompilation/Interpretation der gesamten Region einbezogen [Jokat, 2005, 2009; Leinweber & Jokat, 2012, Müller, 2017].

6.2. Datenerfassung- und Bearbeitung

6.2.1. Refraktionsseismik

Entlang eines 375 km langen Refraktionsprofils wurden insgesamt 33 OBS (Ozeanbodenseismometer) und 4 OBH (Ozeanbodenhydrophon) auf dem Meeresboden positioniert. Das Luftpuls Array wurde in rund 10 m Tiefe hinter dem Schiff geschleppt und etwa alle 150 m seismische Wellen angeregt. Die Signale durchlaufen den Wasserkörper, die Sedimente, Kruste und oberen Mantel und kehren zum Meeresboden zurück, wo sie von den ausgesetzten Empfängern registriert werden. Die gesamte Messung verlief ohne Komplikationen und nach deren Abschluss konnten alle Geräte erfolgreich geborgen werden. Die Datenqualität ist durchgehend gut bis sehr gut. Lediglich eine einzige Station erbrachte keine verwertbaren Daten.

Bereits an Bord wurde mit Hilfe von Navigations-Daten des Schiffes eine zeitliche Driftkorrektur, sowie eine Relokalisierung der OBS-Daten durchgeführt. Diese wurden anschließend bzgl. ihres Offsets zum OBS sortiert und durch geeignete Filterung und eine laufzeitabhängige Verstärkung der Signale für die weitere Untersuchung vorbereitet. Nachfolgend wurden Ersteinsätze und Reflektionen in den aus den OBS-Daten erzeugten Seismogrammen identifiziert und entsprechenden Schichten im Untergrund zugeordnet. Unter Einbeziehung der reflexionsseismischen Ergebnisse zur Lagerung der Sedimente entlang des Profils (Castelino et al., 2015) konnte so ein Startmodell für die Geschwindigkeitsanalyse erstellt werden. Anschließend wurde basierend auf der Strahlenwegmethode eine Vorwärtsmodellierung des Geschwindigkeitsmodells durchgeführt, bis eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen den berechneten und den in den aufgezeichneten Daten identifizierten Einsätzen erreicht wurde.

Aufgrund einer geringen Anzahl an Phasen für die Bestimmung des Geschwindigkeitsgradienten der unteren Kruste des Beira Hochs, aber dessen Wichtigkeit für die Klärung dessen Ursprungs und damit für die tektonische Entwicklung der Region, wurde zusätzlich eine Amplitudenmodellierung der Reflexionen an der Krusten-Mantel-Grenze (PmP-Phase) durchgeführt. Die dafür notwendigen synthetischen Seismogramme wurden basierend auf der Methode der finiten Differenzen erstellt, welche gerade in Bereichen starker Topographie deutlichere Einsätze als die Strahlenwegmethode in den Seismogrammen liefert. Anschließend wurden für verschiedene Untergrundmodelle die Amplituden der PmP-Phase in den synthetischen und aufgezeichneten Daten extrahiert und verglichen

und basierend auf der besten Übereinstimmung das endgültige Geschwindigkeitsmodell bestimmt.

Um die neuen Ergebnisse mit älteren refraktionsseismischen Studie im Nordosten des Kontinentalrandes (Leinweber et al., 2013) zu vergleichen, wurden die Unterkrustengeschwindigkeiten ebenfalls mit Hilfe der Amplitudenmodellierung verifiziert und leicht modifiziert.

6.2.2. Magnetik- und Schwerefelddaten

Entlang der Küste von Zentralmosambik wurden insgesamt fast 18.000 km gravimetrische und mehr als 12.000 km hochauflösende magnetische Daten aufgezeichnet. Deren Profillage und -ausrichtung zielt auf die Ergänzung bereits früher aufgezeichneter Datensätze in diesem Gebiet und resultiert in einer nahezu vollständigen Abdeckung des zentralen und nördlichen Mosambikbeckens mit Magnetikdaten auf Profilen im Abstand zwischen 20 und 40 km.

Für die kontinuierliche Aufnahme der Schweredaten während der MOCOM Expedition wurde im Gravimeterraum des Schiffes ein Bodenseewerke Seegravimeter KSS32M (S/N 22) der BGR genutzt. An Bord wurden den Daten bereits die korrekten Koordinaten zugeordnet und Ausreißer entfernt. Durch Anschlussmessungen in Durban wurden die gemessenen relativen Schweredaten an das Internationale Schwerenetz gebunden. Um anschließend die in der marinen Geophysik standardmäßig genutzte Freiluftschwere zu erhalten, wurden die Instrumentendrift- und Eötvöskorrektur, sowie eine Normalschwerereduktion angebracht.

Rund 750 m hinter dem Schiff in durchschnittlich rund 30 m Wassertiefe wurde ein aus 3 Sensoren bestehendes SeaSpy Gradientenmagnetometersystem zur Aufzeichnung der Magnetikdaten geschleppt. Die Daten des Magson Vektormagnetometer konnten aufgrund von Schwierigkeiten in der Bestimmung der azimutalen Orientierung des Sensors leider nicht weiter verwendet werden. Hingegen die zwei Overhausersensoren, platziert am Anfang und Ende des Arrays, erbrachten qualitativ sehr gute Daten. Nach Zuweisung der korrekten Koordinaten konnte durch die Integration des gemessenen Gradienten zwischen den zwei Sensoren über die Länge des Profils die variationsfreie Totalmagnetfeldintensität berechnet werden. Um die relevante magnetische Anomalie zu erhalten wurde anschließend das Hauptmagnetfeld subtrahiert, Ausreißer entfernt, eine Feldfortsetzung nach oben zur Meeresoberfläche angewandt und ein Levelling der Daten durchgeführt.

Eine erstellte Kompilation der Magnetikdaten im Mosambikbecken beinhaltet neben aller durch das AWI aufgezeichneter Profile (Jokat, 2009, 2005; Reichert and Neben, 2008) Daten von weiteren Expeditionen seit den 1960er Jahren und aus der Industrie in diesem Gebiet. Die Profile wurden untereinander gelevelt und eine Feldfortsetzung nach oben auf 350 m durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit zur bereits bestehenden Magnetikkompilation am konjugierenden Kontinentalrand zu schaffen.

Die identifizierten Schichtgrenzen aus den Geschwindigkeitsmodellen wurden in die Erstellung von Startmodellen der Schwere- und Magnetikmodellierung integriert. Startwerte der Dichten wurden durch geeignete Konvertierungsregeln der identifizierten Geschwindigkeiten erlangt. Um auch die Information der Geschwindigkeitsgradienten der jeweiligen Schicht zu nutzen, wurde zudem die

neuerliche Verwendung von Dichtegradienten eingesetzt. Typische Magnetisierungen der einzelnen Schichten wurden aus Untersuchungen in angrenzenden Gebieten und früheren Studien genutzt. Anschließend wurde jeweils eine Vorwärtsmodellierung für verschiedene geologisch plausible Szenarien durchgeführt, bis eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Daten erreicht wurde.

Zur Identifizierung magnetischer Spreizungsanomalien entlang der Profile wurden diese mit synthetisch erzeugten Magnetikprofilen, basierend auf der geomagnetischen Polaritätsskala der mesozoischen Serie, verglichen.

7. Ergebnisse der Expedition

7.1. Ergebnisse der Refraktionsseismik

Es konnte ein Geschwindigkeitsmodell für das Refraktionsprofil über dem Beira Hoch erstellt werden (Abb. 2c). Übereinstimmend zur früheren Studie im nordöstlichen Teil des Kontinentalrandes (Leinweber et al., 2013), zeigt sich am südlichen Ende des Profils eine zweischichtige, insgesamt 5.5-7 km mächtige Kruste mit Unterkrusten Geschwindigkeiten von 6.5-7.0 km/s. Nordwestlich davon wird ein schmaler Übergang zur bis zu 23 km mächtigen Kruste des Beira Hochs beobachtet. Diese weist einen geringen Geschwindigkeitsgradienten der mittleren und unteren Kruste von $0.025-0.035 \text{ s}^{-1}$ auf. Mit Hilfe der Amplitudenmodellierung konnte ein Geschwindigkeitskontrast von 7.0 zu 8.0 km/s an der Krusten-Mantel-Grenze des Beira Hochs eingegrenzt werden. Weiter nordwestlich ergibt sich ein breiterer Übergang zur 7 km dünnen und mit bis zu 11.5 km Sediment überlagerten Kruste in der Senke des Sambesi Deltas unter dem Schelfbereich. Die untere Kruste zeigt hier Geschwindigkeiten von 6.3-6.7 km/s und ist unterlagert von einem rund 190 km breiten Hochgeschwindigkeitskörper mit 7.1-7.4 km/s. Eine Neubewertung der gepickten Einsätze der krustalen Phasen entlang der älteren Profile im Norden, sowie deren Amplitudenmodellierung ergaben eine Verringerung der bisher angenommen Ausdehnung des Hochgeschwindigkeitskörpers in der unteren Kruste (Abb. 2a, b). Die finalen Modelle zeigen im Übergangsbereich eine gleichmäßige 190-220 km weite Ausdehnung des Hochgeschwindigkeitskörpers.

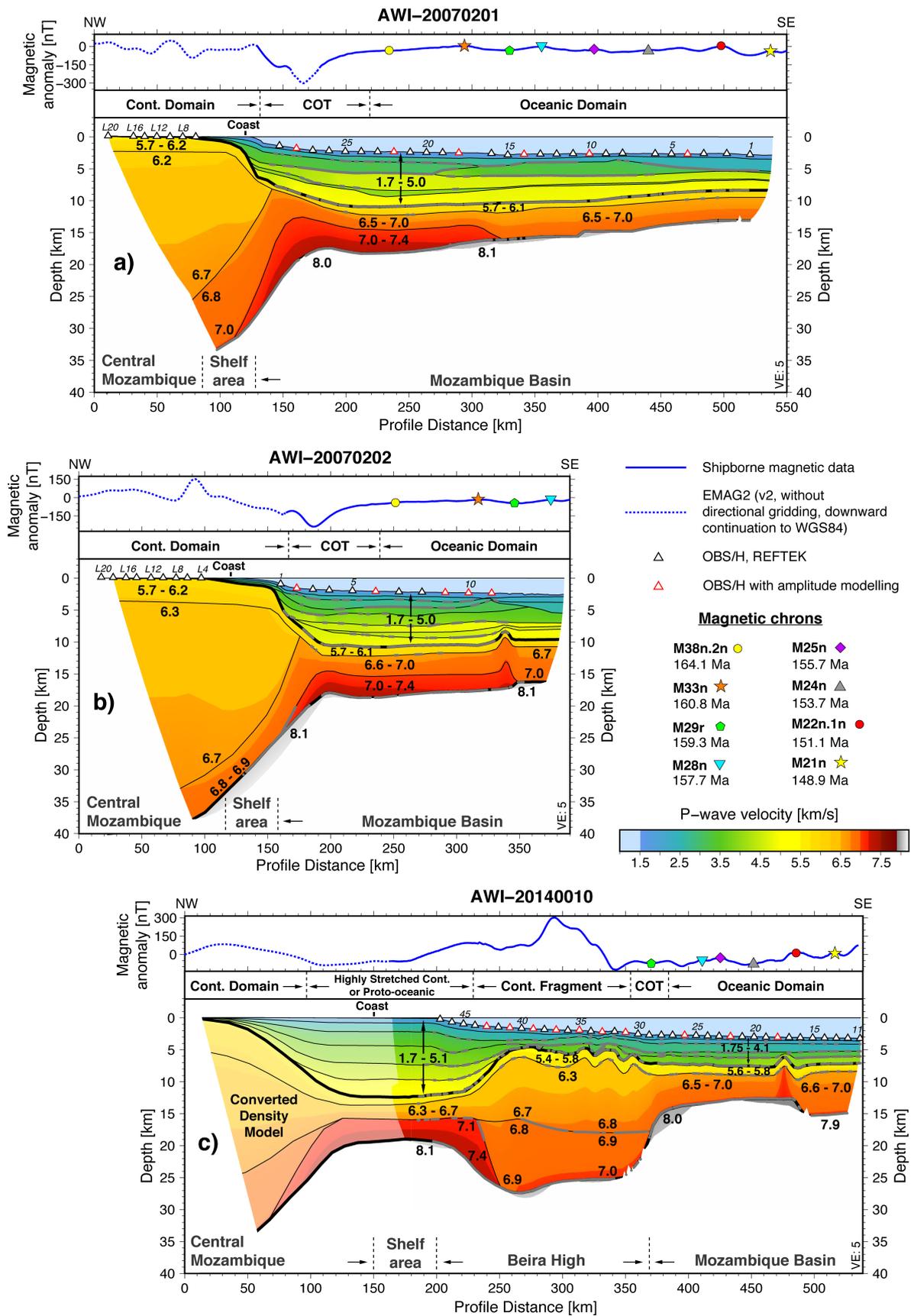


Abb. 2: Finale Geschwindigkeitsmodelle und Interpretation entlang der drei Refraktionsprofile am Kontinentalrand von Zentralmosambik.

7.2. Ergebnisse Magnetik/Gravimetrie

Die Schweremodellierung entlang des Refraktionsprofils über dem Beira Hoch bestätigt grundsätzlich die Ergebnisse der Geschwindigkeitsanalyse. Auffällig sind allerdings die vergleichsweise geringen Dichten von maximal 2.94 g/cm^3 im nordwestlichen Teil des Beira Hochs. Des Weiteren weisen die ältesten Sedimente in über 11 km Tiefe in der Senke des Sambesi Deltas hohe Dichten von bis 2.67 g/cm^3 auf. Außerdem zeigt sich der Übergang zu mehr als 30 km mächtiger Kruste deutlich landwärts am nördlichen Ende des Sambesi Deltas.

Die Magnetikmodellierung entlang des nördlichsten tiefenseismischen Profils (20070201) zeigt, dass die prominente negative Magnetisierung vor der Küste Zentralmosambiks nur zur Hälfte durch einen Randeffect von unterschiedlich magnetisierter mächtiger kontinentaler Kruste zu dünner ozeanischer Kruste verursacht wird. Zur vollständigen Modellierung der Anomalie sind zwei weitere magnetische Quellkörper mit starker natürlicher Remanenz (NRM) vorwiegend im Bereich der oberen Kruste im Übergangsbereich des Kontinentalrandes notwendig, wobei sich die Körper in ihrer Suszeptibilität unterscheiden und einer eine reverse Polarisierung aufweist. Ein ähnliches Ergebnis zeigt die Magnetikmodellierung entlang des Refraktionsprofils über das Beira Hoch (20140010), wo es ebenfalls einen zusätzlichen magnetischen Quellkörper mit starker NRM in der oberen Kruste, sowohl im Zentrum des Beira Hochs als auch an dessen nordwestlicher Flanke, bedarf.

Eine Fortsetzung der Untersuchung magnetischer Spreizungsanomalien im Mosambikbecken zur Erkundung des Verlaufs der Kontinent-Ozean-Grenze ergab im nordöstlichen Teil des Beckens eine Identifizierung bis zur magnetischen Isochrone M38n.2n. Das Vorhandensein der in einer früheren Studie durch Extrapolation erhaltenen Isochrone M41n in diesem Gebiet (Leinweber and Jokat, 2012) konnte nicht bestätigt werden. Diese negative Anomalie wird nach der neuen Interpretation durch seewärts geneigte Reflektoren verursacht, die innerhalb der Kontinent-Ozean Grenze liegen. Eine deutliche Änderung des Anomalienmusters wird über dem Beira Hoch und zum Teil über der Senke des Sambesi Deltas beobachtet. Verlässlich lassen sich hier magnetische Isochronen bis zu M28n.2r südlich des Beira Hochs identifizieren. Erstmals können im Bereich des Mosambikrückens und Teilen des südlichen Natalbeckens fundierte Hinweise auf deren Entstehungszeit durch die Identifizierung der mesozoischen Isochronen von M24n an bis zum kretazischen Superchron (153-118 Ma) erlangt werden. Des Weiteren zeigt sich im nördlichen Natalbecken eine signifikante Ähnlichkeit zu den magnetischen Isochronen von M24r.1r bis zu M45r (153-171 Ma). Eine Identifizierung noch älterer Isochronen ist nach aktuellem Wissenschaftsstand über die Historie des Erdmagnetfeldes während des Mesozoikums nicht möglich. Magnetische Daten von den Küstenebenen Mosambiks zeigen ein ähnliches Anomalienfeld wie die im Natalbecken und unterscheiden sich deutlich von dem alter Kratone in Südost-Afrika, lassen aber keine eindeutigen Identifikationen zu.

Ein Vergleich der neuen Magnetikkompilation und globaler Schweredaten im Mosambikbecken zu denen vom konjugierenden Teil in der Antarktis (Mieth, 2014; Sandwell et al., 2014; Scheinert et al., 2016) erlaubt zum einen die Identifikation von vier Hauptbruchzonen, die den Afrikanisch-Antarktisch-Korridor (AAK) begrenzen und in drei Hauptsegmente unterteilen. Berechnete Schweregradienten erlauben die

Verfolgung der Bruchzonen bis nahest an die jeweilige Küste und liefern somit wichtige Hinweise über die initiale Öffnungsgeschichte des AAK.

7.3. Diskussion der Ergebnisse

7.3.1. Krustenaufbau des Kontinentalrandes von Zentralmosambik

Die beobachtete Geschwindigkeitsverteilung in der Kruste des Beira Hochs (Abb. 2c), die geringen Geschwindigkeitsgradienten in der mittleren und unteren Kruste, sowie das Fehlen eines deutlich ausgeprägten Hochgeschwindigkeitskörpers stimmen mit typischen Eigenschaften der Krustenstruktur kontinentaler Fragmente überein und zeigen deutliche Unterschiede zu der ozeanischer Plateaus. Die vergleichsweise geringe Dichte der Kruste des Beira Hochs deutet das Vorhandensein eines hohen Anteils felsischen Materials bis in große Tiefen an, wohingegen die Magnetikmodellierung den Eintrag von lokalen magmatischen Körpern signalisiert. Daraus ergibt sich die Interpretation von gedehnter, aber teils stark intrudierter kontinentaler Kruste im Bereich des Beira Hochs. Südlich davon findet sich normale ozeanische Kruste, während nördlich des Beira Hochs die Geschwindigkeitsstruktur in der Senke des Sambesi Deltas die Existenz von stark gedehnter kontinentaler Kruste vermuten lässt.

Daraus resultiert eine Segmentierung der Krustenstruktur entlang des Kontinentalrandes von Zentralmosambik, bestehend zum einen aus einem nordöstlichen Teil, wo alte ozeanische Kruste bis nah an die Küste reicht (Abb. 2a, b) und ein schmaler Übergang von dünner ozeanischer Kruste im Mosambikbecken zu mächtiger kontinentaler Kruste Mosambiks beobachtet wird. Zum anderen aus in einem südwestlichen Teil, welcher durch das kontinentale Fragment des Beira Hochs charakterisiert ist und eine breitere Zone des Rifting bis deutlich innerländisch Mosambiks aufweist. Diese krustale Diversität steht im Einklang zur beobachteten Basementvariation am konjugierenden Kontinentalrand von Dronning Maud Land in der Antarktis (Leitchenkov et al., 2008) und liefert damit die erhofften Erkenntnisse zu deren Verständnis und deutet einen komplexen initialen Aufbruch innerhalb des AAK an.

7.3.2. Vulkanismus

Neue Erkenntnisse können ebenfalls zur Quantifizierung des mit dem Aufbruch verbundenen Magmatismus erlangt werden. Geschwindigkeiten zwischen 7.0 bis 7.4 km/s und modellierte Dichten über 3.1 g/cm^3 des sich entlang des gesamten Kontinentalrandes von Zentralmosambik identifizierten Hochgeschwindigkeitskörpers lassen dessen Charakterisierung als intrudierte Kruste mit dem Eintrag von mafischen bis zu ultramafischen Gesteinen zu.

Die weiteren modellierten magnetischen Quellkörper im Bereich der oberen Kruste stellen Intrusionen und basaltische Lavaflüsse dar. Revers polarisierte Lavaflüsse im Bereich des Kontinent-Ozean-Übergangs tragen zur stark negativen magnetischen Anomalie am Kontinentalrand von Zentralmosambik bei. Die positive magnetische Anomalie am konjugierenden Kontinentalrand in der Antarktis wird durch Intrusionen in der untersten Sedimentsschicht aus einer späten Phase des Riftvulkanismus

verursacht, welche das magnetische Signal älterer magmatischer Strukturen in diesem Bereich überprägen.

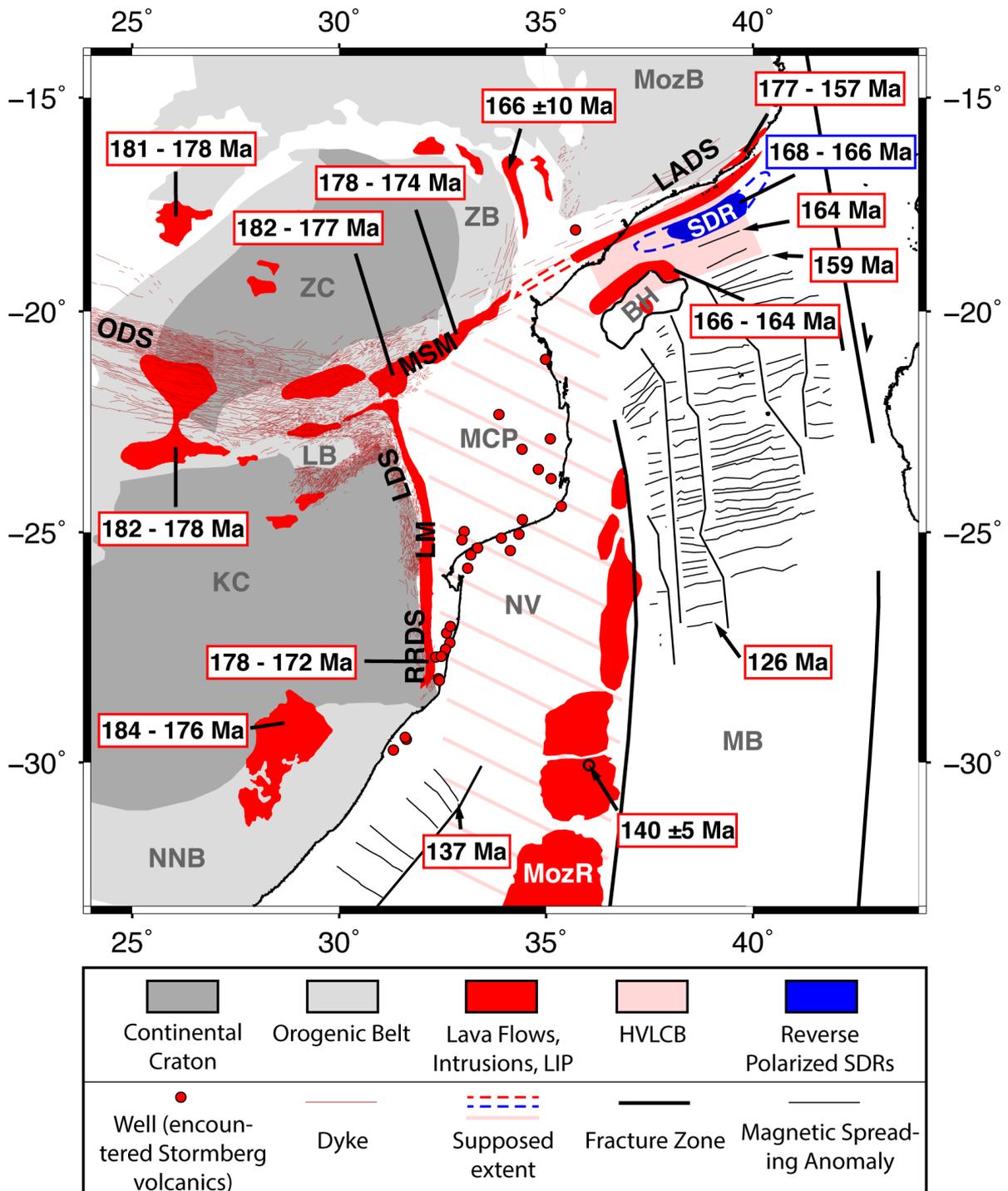


Abb. 3: Verteilung und Alter des mit dem Aufbruch verbundenen Vulkanismus des Karoo-LIP in Südost-Afrika.

Weitere magmatische Gesteine sind bereits an Land entlang der Küste von Zentralmosambik (Abb. 3) in Form von vulkanischen Aufschlüssen mit einem Alter von 177-157 Ma im Bezirk Moma bekannt (Jaritz et al., 1977), sowie dem in Magnetikdaten identifizierten basaltischen Limpopo-Angoche Gangschwarm (Reeves et al., 2016). Zusammen mit dem nun in dieser Studie identifizierten

seewärtigen Magmatismus in dieser Region lässt sich der Verlauf des nordöstlichen Zweiges des Karoo LIP (Large Igneous Province – Großmagmatische Provinz) entlang des vulkanischen Kontinentalrandes von Zentralmosambik postulieren (Abb. 3). Erstmals kann nun auch entlang eines Astes des Karoo LIPs eine Abschätzung für die Dauer des Magmatismus auf maximal 20 Millionen Jahre (177-157 Ma) beziffert werden; mit einer Hauptaktivität von mindestens 12 Millionen Jahren (169-157 Ma). In diesen Zeitraum fallen auch die Extrusion der Lavaflüsse zwischen M42 und M38 (167-164 Ma) und die nachfolgende Entstehung der ersten vollständig entwickelten ozeanischen Kruste am Kontinentalrand von Zentralmosambik um 164.1 Ma (Isochrone M38n.2n). So ein kontinuierlicher Magmatismus von ähnlicher Dauer ist auch von den Parana-Etendeka Flutbasalten in den angrenzenden Gebieten des Südatlantiks bekannt. Diese neuen Erkenntnisse liefern nun wertvolle Hinweise für die Untersuchung der treibenden Kräfte des Gondwana-Aufbruchs im AAK. Idealerweise sollten diese durch weitere geochemische Untersuchungen und Messungen im Bereich der Küstenebenen Mosambiks vervollständigt werden, um so die Gültigkeit der Resultate für den gesamten Karoo LIP zu bestätigen und eine fundierte Aussage über die magmatische Quelle (Plume oder thermische Anomalie) machen zu können.

7.3.3. Tektonische Entwicklung von SE-Afrika und Dronning Maud Land

Durch Rotation der afrikanischen und antarktischen Platten entlang der neu identifizierten Bruchzonen lässt sich deren Fit vor dem Gondwana-Aufbruch herbeiführen (Abb. 4). In den magnetischen Daten zeigen sich so mehrere Fortsetzungen von haupttektonischen Strukturen über die jeweilige Plattengrenze hinweg und erlauben so eine deutlich vereinfachte Interpretation der magnetischen Strukturen in der Ostantarktis und neue Erkenntnisse über deren Geologie.

Die Identifizierung der Bruchzonen bis dicht an den jeweiligen Kontinentalrand sowie der ältesten Spreizungsanomalien in den einzelnen Segmenten des AAK erlauben nun erstmals eine detaillierte Rekonstruktion des initialen Aufbruchs in diesem Gebiet. Eine ausführliche Beschreibung des Aufbruchs wird in der entsprechenden Veröffentlichung gegeben. Als ein Hauptaspekt ist anzuführen, dass das Beira High anfänglich als Teil Ost-Gondwanas mit nach Süden gedriftet ist, ehe es durch einen Sprung des Riftzentrums zur südwestlichen Grenze des Beira Hochs vor rund 160 Ma, vor der heutigen Küste Zentralmosambiks als kontinentales Fragment zurück geblieben ist. Die erste ozeanische Kruste entstand wohlmöglich vor rund 171 Ma im Bereich des heutigen nördlichen Teil des Natalbeckens. Basierend auf identifizierten Isochronen, entstand anschließend im selben Segment der wahrscheinlich vollständig ozeanische Mosambikrücken von 153-118 Ma. Auffällig ist allerdings eine sehr geringe Spreizungsrate im Zeitraum von M12 bis M8, welche Spekulationen über ein gleichzeitiges weiteres Rifting auf den heutigen Küstenebenen Mosambiks schürt, was zu deren Ausdehnung und einer kurzzeitigen Existenz einer Mikroplatte (bestehend aus Natalbecken und Mosambikrücken) führte. Die krustale Natur der Küstenebenen bleibt damit weiterhin unklar.

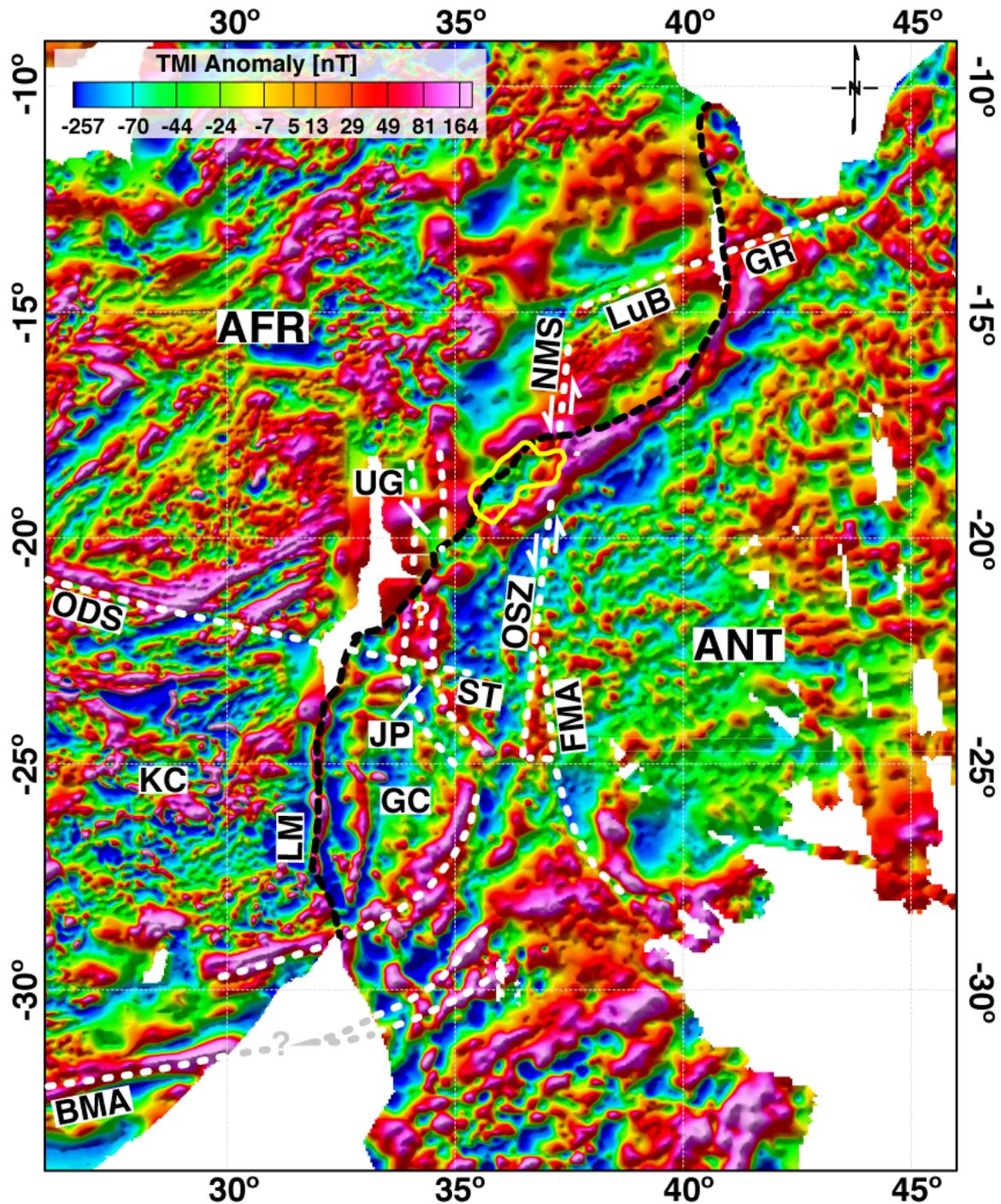


Abb. 4: Initiale Fit zwischen der heutigen afrikanischen und antarktischen Platte vor dem Gondwana-Aufbruch.

Gleichzeitig kann mit dem selben Parametersatz von Rotationen aus dem AAK auch die Öffnung des Somalibeckens und damit die Drift Madagascars als Teil Ost-Gondwanas von der Küste Somalias zu seiner heutigen Position erklärt werden. Das somit erhaltene in sich konsistente Aufbruchmodell berücksichtigt die heute bekannten gültigen geologischen, geophysikalischen und geodynamischen Randbedingungen und kann somit auch für die Untersuchungen des nachfolgenden weiteren Zerfalls zwischen den benachbarten Platten fungieren.

7.4. Zusammenfassung

Das Refraktionsprofil im südwestlichen Bereich des Kontinentalrandes von Zentralmosambik (Abb. 1) orientiert sich am Verlauf einer früheren reflexionsseismischen Linie (Reichert and Neben, 2008) und lieferte ein Abbild der Geschwindigkeitsstruktur des Beira Hochs. Unter Einbeziehung weiterer geophysikalischer Daten erlaubt dies die Erstellung eines geologischen Modells des Beira Hochs, womit Rückschlüsse auf dessen Ursprung gezogen werden können. Ein Vergleich zu Ergebnissen vom nordöstlichen Teil des Mosambikbeckens erlaubt die Charakterisierung des krustalen Aufbaus und Einordnung des gesamten Kontinentalrandes sowie dessen Vergleich zum konjugierten Rand in der Antarktis. Die Schweredaten finden Verwendung in einer Schweremodellierung entlang des Refraktionsprofils und sollen weitere Erkenntnisse über die Zusammensetzung der krustalen Schichten des Beira Hochs erbringen. In Kombination mit den weiteren geophysikalischen Untersuchungen dienen die Magnetikdaten zur Quantifizierung des mit dem Aufbruch verbundenen Vulkanismus. Dazu wurde eine Magnetikmodellierung entlang zweier Refraktionsprofile durchgeführt, um möglich vorhandene magmatische Körper entlang des Kontinentalrandes zu charakterisieren und die unterschiedliche magnetische Signatur der konjugierenden Kontinentalränder zu erklären. Zusätzlich lassen die Magnetikdaten eine teilweise Verifizierung des Verlaufs der Kontinent-Ozean-Grenze in der Region zu, sowie die Identifizierung von magnetischen Spreizungsanomalien, welche Hinweise auf die Entstehungszeit ozeanischer Kruste in dieser Region geben. Eine Integration der Daten in eine Gesamtkompilation der Magnetikdaten im Mosambikbecken erlaubt außerdem den Vergleich zu einer bereits bestehenden Kompilation am konjugierenden Kontinentalrand (Mieth, 2014) und die Identifizierung von einzelnen Krustensegmenten und Bruchzonen. Die sich aus den Untersuchungen neu ergebenden Erkenntnisse sind essentiell für die nachfolgende Erstellung eines konsistenten Modells des initialen Gondwana-Aufbruchs und dem Verständnis der treibenden Kräfte (Plume oder Non-Plume).

Die im MOCOM Antrag aufgeworfenen Fragestellungen und Hypothesen konnten vollständig beantwortet werden. Die Verknüpfung der magnetischen Datensätze vor Mosambik mit denen der Ostantarktis zeigen überraschende Ähnlichkeiten. Diese neuen Erkenntnisse gehen über die ursprünglichen Vorhabensziele hinaus.

8. Verwendete Programme

Für die Auswertung der tiefenseismischen Daten wurden das Raytracing Programm RAYINVR und ZP zum Picken der Einsätze verwendet. Die synthetischen FD Seismogramme wurden mit dem Programm SOFI2D der Universität Karlsruhe berechnet. Die Daten des SeaSpy-Magnetometersystems wurden mit Hilfe des Programmes SeaLink aufgezeichnet. Die Bearbeitung der magnetischen und gravimetrischen Daten erfolgte mittels Oasis montaj™ Software der Firma Geosoft sowie stellenweise mit Matlab sowie vorhandener AWI Software. Zur Kartendarstellung wurde Generic Mapping Tools (GMT) verwendet.

9. Veröffentlichungen und Weitergabe der Daten an andere Institutionen

Die Potentialfeld- und tiefenseismischen Daten wurden im Rahmen einer Promotion an der Universität Bremen/AWI ausgewertet. Hieraus sind insgesamt 3 Publikationen und 1 Dissertation entstanden.

- Müller, C.O., Jokat, W., Schreckenberger, B. (2016). The crustal structure of Beira High, central Mozambique - Combined investigation of wide-angle seismic and potential field data, *Tectonophysics*, 683, 233-254, doi: 10.1016/j.tecto.2016.06.028
- Müller, C.O., Jokat, W. (2017). Geophysical evidence for the crustal variation and distribution of magmatism along the central coast of Mozambique, *Tectonophysics*, under review (moderate revisions)
- Müller, C.O. (2017). The Central Mozambique continental margin - Its tectonic evolution as the centrepiece of the initial Gondwana break-up, Dissertation an der Universität Bremen
- Müller, C.O., Jokat, W. (in prep.). The initial Gondwana break-up in the Africa-Antarctica Corridor – A Reconstruction based on new magnetic data, in preparation

10. Literaturverzeichnis

- Castelino, J.A., Reichert, C., Klingelhoefer, F., Aslanian, D., Jokat, W., 2015. Mesozoic and Early Cenozoic sediment influx and morphology of the Mozambique Basin. *Mar. Pet. Geol.* 66, 890–905. doi:10.1016/j.marpetgeo.2015.07.028
- Castelino, J.A., Eagles, G., Jokat, W. 2016. Anomalous bathymetry and paleobathymetry models of the Mozambique Basin and Riiser Larsen Sea, *Earth and Planetary Science Letters*, 455, 25-37, doi: 10.1016/j.epsl.2016.09.018
- Castelino, J.A., Reichert, C., Jokat, W. 2017. Cenozoic turbidite system response to tectonic activity and sea-level variation off Zambezi, *Marine Geophysical Research*, doi: 10.1007/s11001-017-9305-8
- Jaritz, W., Kreutzer, J., Müller, P., Harre, W., 1977. Die Vulkanitserien im Küstengebiet von Nordmoçambique, in: *Geologisches Jahrbuch B26*. pp. 147–165.
- Jokat, W., 2005. Southeastern Atlantic and southwestern Indian Ocean: reconstruction of the sedimentary and tectonic development since the Cretaceous AISTEK-II: Mozambique Ridge and Mozambique Basin, Reports on polar and marine research 521. Bremerhaven, Germany.
- Jokat, W., 2009. The expedition of the research vessel “Pelagia” to the Natal Basin and the Mozambique Ridge in 2009 (Project AISTEK III), Reports on polar and marine research 598. Bremerhaven, Germany.
- Leinweber, V.T., Jokat, W., 2012. The Jurassic history of the Africa-Antarctica corridor - new constraints from magnetic data on the conjugate continental margins. *Tectonophysics* 530–531, 87–101. doi:10.1016/j.tecto.2011.11.008
- Leinweber, V.T., Klingelhoefer, F., Neben, S., Reichert, C., Aslanian, D., Matias, L., Heyde, I., Schreckenberger, B., Jokat, W., 2013. The crustal structure of the Central Mozambique continental margin - Wide-angle seismic, gravity and

- magnetic study in the Mozambique Channel, Eastern Africa. *Tectonophysics* 599, 170–196. doi:10.1016/j.tecto.2013.04.015
- Leitchenkov, G., Guseva, J., Gandyukhin, V., Grikurov, G., Kristoffersen, Y., Sand, M., Golynsky, A., Aleshkova, N., 2008. Crustal structure and tectonic provinces of the Riiser-Larsen Sea area (East Antarctica): Results of geophysical studies. *Mar. Geophys. Res.* 29, 135–158. doi:10.1007/s11001-008-9051-z
- Mieth, M., 2014. Aerogeophysical constraints for the geodynamic evolution of Dronning Maud Land, East Antarctica, PhD Thesis. Bremen, Germany.
- Müller, C.O. (2017). The Central Mozambique continental margin - Its tectonic evolution as the centrepiece of the initial Gondwana break-up, Dissertation an der Universität Bremen
- Reeves, C. V., Teasdale, J.P., Mahanjane, E.S., 2016. Insight into the Eastern Margin of Africa from a new tectonic model of the Indian Ocean. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 431, 1–24. doi:10.1144/SP431.12
- Reichert, C., Neben, S., 2008. Research Cruise BGR07 - MOBAMASIS - Marine Geophysical Investigations offshore Central Mozambique, Federal Institute for Geosciences and Natural Resources. Hanover, Germany.
- Sandwell, D.T., Müller, R.D., Smith, W.H.F., Garcia, E., Francis, R., 2014. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science* 346, 65–67.
- Scheinert, M., Ferraccioli, F., Schwabe, J., Bell, R., Studinger, M., Damaske, D., Jokat, W., Aleshkova, N., Jordan, T., Leitchenkov, G., Blankenship, D.D., Damiani, T.M., Young, D., Cochran, J.R., Richter, T.D., 2016. New Antarctic gravity anomaly grid for enhanced geodetic and geophysical studies in Antarctica. *Geophys. Res. Lett.* 43, 600–610. doi:10.1002/2015GL067439

11. Anhang

In drei Dateien werden diesem Bericht folgende Informationen beigefügt:

1--Dissertation von Herrn Müller mit einem unveröffentlichten Artikel

2--Veröffentlichung von Herrn Müller in *Tectonophysics*, 2016

3--Aktueller (revidierter)Text des eingereichten Artikels von Herrn Müller in *Tectonophysics*. Dieser wird vermutlich noch bis Ende 2017 gedruckt werden.