

Seismisches Abbilden von Krustenstrukturen

Klaus Bauer, Trond Ryberg, Benjamin Braeuer, Christian Haberland, Michael Weber
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Deep seismic sounding provides important information on the seismic structure of the crust. Seismic experiments make use of controlled sources (explosions, Vibroseis) or natural sources (earthquakes, ambient noise), or combinations of both types. Seismic velocities are derived from modelling or tomographic inversion of diving waves and refractions. Particularly the combined interpretation of compressional and shear velocities allows for insight into the lithological structure of the crust. Seismic reflectivity is derived from imaging of waves reflected at geological boundaries. Typical patterns of crustal reflectivity are observed for specific tectonic settings. Case studies are shown from two studies at plate boundary systems. (1) The old plate boundary at the Namibian margin was formed by Cretaceous continental rifting and its interplay with the activities of the Tristan da Cunha mantle plume. Traces of intensive magmatic overprinting of the crust at the landfall region of Walvis Ridge can be seen in the derived velocity model and also in the reflectivity image. (2) The Dead Sea transform marks the active boundary between the African and Arabian plates. The Dead Sea basin was formed by pull-apart in response to step-over of the fault system. Results from tomography reveal a deep asymmetric basin structure. An anomalous body was found under the basin, between 13 and 18 km depth, which is interpreted as pre-basin sediments. Our results are supported by the distribution of earthquakes. The results provide new constraints for the modeling of plate boundary processes.



Die Krustenseismik liefert wesentliche Beiträge zum Verständnis des Aufbaus und der stofflichen Zusammensetzung der Erdkruste. Hierbei wird die aus Sedimentbecken sowie kristalliner Oberkruste und Unterkruste bestehende interne Struktur erkundet. Eine klare Unterscheidung von kontinentaler Kruste, ozeanischer Kruste und Übergangstypen ist mit Hilfe der Krustenseismik möglich und es können vulkanische Strukturen und Überprägungen der tieferen Kruste durch Magmatismus erkundet werden. Seismische Strukturen und deren Relation zur Verteilung von Bebenherden liefern wichtige Einblicke in Erdbebenprozesse und den tektonischen Zustand der Kruste. Schließlich sind krustenseismische Methoden ein wichtiges Werkzeug zur Erkennung und Kartierung der Grenze zwischen Kruste und oberem Erdmantel (Moho-Diskontinuität). Die Ergebnisse aus der Krustenseismik fließen in interdisziplinäre Forschungsarbeiten zu Helmholtz spezifischen, gesellschaftlich relevanten Themen ein. Ein Beispiel ist das Verständnis von Plattenrandsystemen und damit verbundenen Naturgefahren und Georesourcen.

Krustenseismische Experimente basieren auf der Untersuchung der Wellenausbreitung mit Hilfe spezifischer Verteilungen von seismischen Quellen sowie linienhaft oder flächenhaft angeordneten Empfängern. Die Wellenanregung erfolgt mit aktiven Quellen (Sprengungen, Vibroseismik) bei Kenntnis von Ort, Zeit und Charakteristik der abgestrahlten Signale (sogenannte kontrollierte Quellen). Alternativ können passive Experimente mit natürlichen Quellensignalen (Erdbeben, Umgebungsrauschen) durchgeführt werden. Die Datenauswertung richtet sich nach der Art der verwendeten Wellentypen. Von der Quelle direkt zum Empfänger laufende Tauchwellen und refraktierte seismische Phasen ermöglichen eine Modellierung bzw. tomographische Inversion der gesteinspezifischen Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten. Auf dem Ausbreitungsweg an geologischen Grenzen reflektierte Wellen werden zur Abbildung dieser reflektiven Grenzflächen in einem Untergrundmodell verwendet.

Seismische Geschwindigkeiten erlauben Rückschlüsse auf die stoffliche Zusammensetzung der Kruste (z. B. *Holbrook et al., 1992; Schoen, 1996*). Deutlich unterschiedliche Geschwindig-

keiten werden für Sedimente und verschiedene magmatische und metamorphe Gesteine in der kristallinen Oberkruste und Unterkruste beobachtet. Eine deutliche Zunahme der Geschwindigkeiten beim Übergang von der Unterkruste in den obersten Mantel bildet die Grundlage für die Detektion der Moho-Diskontinuität. Die lithologische Interpretation kann dabei weiter eingegrenzt werden, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeiten verschiedener Wellentypen (Kompressionswellengeschwindigkeit V_p und Scherwellengeschwindigkeit V_s) herangezogen werden. Durch Betrachtung des V_p/V_s -Verhältnisses können beispielsweise quartzarme von quartzreichen Gesteinen gut unterschieden werden. Besonders markante Anomalien ergeben sich im V_p/V_s -Verhältnis bei Anwesenheit von Fluiden in der Kruste.

Die Reflexionsseismik liefert strukturelle Abbilder der Kruste. Seismische Reflexionsmuster unterscheiden sich für Sedimente, Oberkruste, Unterkruste und obersten Mantel (*Meissner und Brown, 1991*). In Sedimenten kann aus den reflexionsseismischen Mustern auf die Verhältnisse bei der Ablagerung geschlossen werden. In diesem Zusammenhang spricht man auch von Seismo-Stratigraphie. Im kristallinen Grundgebirge deuten bestimmte reflexionsseismische Strukturen auf kompressive Tektonik oder Dehnungstektonik hin. Auch die rheologische Strukturierung des Kristallins in spröde Oberkruste und duktile Unterkruste spiegelt sich im reflexionsseismischen Abbild wider. So ergibt sich eine Zunahme der Reflektivität in der unteren Kruste, die auf das duktile Verhalten sowie eine starke stoffliche Differenzierung zurückzuführen sind. Reflexionsseismik eignet sich darüber hinaus zur direkten oder indirekten Abbildung von kristallinen Störungszonen (z. B. *Bauer et al., 2013*).

Die Krustenforschung am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ arbeitet sowohl mit aktiver Seismik als auch mit passiven seismologischen Experimenten. Die Auswertung der Daten erfolgt mit Methoden, die möglichst verschiedene, sich ergänzende Informationen für eine integrative Interpretation zur Verfügung stellen, z. B. seismische Geschwindigkeiten, reflexionsseismische Abbilder oder die Verteilung von Bebenherden. Im Folgenden werden zwei Beispiele solcher Untersuchungen beschrieben. Beide Fallstudien beschäftigen sich mit Strukturen und Prozessen an Plattengrenzen, einem Schwerpunktthema des GFZ. Am Kontinentrand von Namibia wurde eine ehemalige, sich in der Kreidezeit öffnende Plattengrenze seismisch beleuchtet. Hierbei ging es um die Auswirkungen von Ozeanöffnung und Mantelplume-Aktivität auf die heutige Krustenstruktur. Das zweite Beispiel beschreibt tomographische Untersuchungen im Bereich des Toten Meeres, wo ein tiefes Sedimentbecken an einer momentan aktiven Plattengrenze entstanden ist.

Links: Vorbereitungsarbeiten für eine seismische Sprengung im Rahmen von krustenseismischen Untersuchungen im Kaokoland im nördlichen Namibia (Foto: K. Bauer, GFZ)

Left: Preparation of a seismic explosion as part of a crustal-scale seismic study in the Kaokoland, northern Namibia



Kontakt: K. Bauer
(klaus.bauer@gfz-potsdam.de)

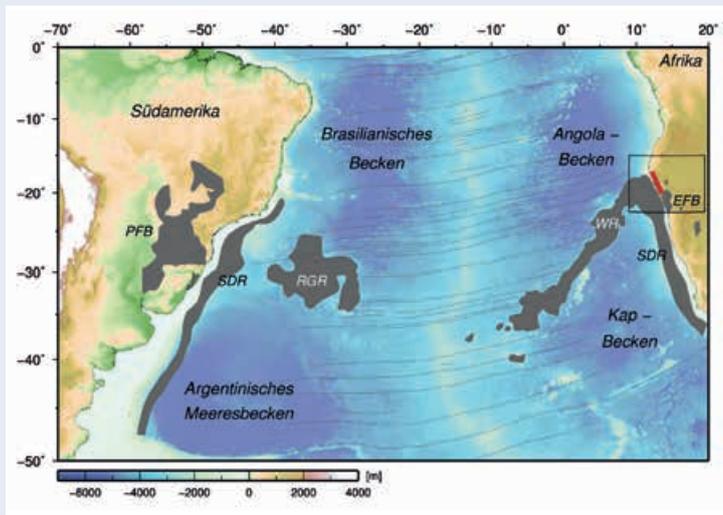


Abb. 1: Verteilung von magmatischen Komplexen der vulkanischen Großprovinz im Südatlantik (WR=Walfischrücken, RGR=Rio Grande-Schwelle, PFB=Paraná-Flutbasalte, EFB=Etendeka-Flutbasalte, SDR=seewärts geneigte submarine Vulkanitkomplexe). Die rote Linie zeigt den Verlauf der krustenseismischen Traverse in Nord-Namibia.

Fig. 1: Distribution of magmatic complexes forming the Large Igneous Province in the South Atlantic (WR=Walvis Ridge, RGR=Rio Grande Rise, PFB=Paraná Flood Basalts, EFB=Etendeka Flood Basalts, SDR=seaward dipping reflectors). Red line shows onshore deep seismic transect across the landfall of Walvis Ridge in northern Namibia.

Eine seismische Traverse über die afrikanischen Ausläufer des Walfischrückens

Die Öffnung des Südatlantiks in der frühen Kreidezeit wurde von intensiven magmatischen Aktivitäten begleitet. In Folge dieser Prozesse entstand eine magmatische Großprovinz (Abb. 1). Diese besteht heute aus untermeerischen Vulkanketten (Rio Grande-Schwelle – Walfischrücken), kontinentalen Flutbasaltprovinzen (Paraná in Brasilien, Etendeka in Namibia) sowie südlich davon ausgebildeten vulkanischen Kontinenträndern vor Afrika und Südamerika. Als Ursache für die Entstehung der magmatischen Großprovinz geht man von einem Zusammenspiel von kontinentalen Riftprozessen und dem etwa zeitgleich an der Lithosphärenbasis ankommenden Tristan da Cunha-Mantelplume aus (z. B. O'Connor und Jokat, 2015). Die zeitliche Abfolge von anfänglicher Ozeanöffnung (140 Mio. Jahre) und Entstehung der Flutbasalte (132 Mio. Jahre) deutet darauf hin, dass der Mantelplume bei diesem Prozess nicht der auslösende Faktor war (Steinberger et al., 2014). Noch offene Fragen gibt es vor allem hinsichtlich der Lage des Plumezentrums im Verlauf der Öffnungsgeschichte. Um die sehr ungleiche Verteilung der Flutbasalte beidseitig des Südatlantiks mit deutlich größeren Vorkommen in Brasilien zu erklären, geht man von einer initialen Lage des Plumekopfes in Südamerika aus. Es gibt aber auch Hinweise darauf, dass sich das Zentrum der magmatischen Aktivität vor der Öffnung auf afrikanischer Seite befand (z. B. Fromm et al., 2015).

Das DFG-Schwerpunktprogramm SAMPLE (South Atlantic Margin Processes and Links with onshore evolution) förderte Forschungen für ein verbessertes Verständnis der Prozesse der Südatlantiköffnung und deren Wechselwirkungen mit den Aktivitäten des Mantelplumes. Schwerpunkte bildeten einerseits Feldkampagnen, um die Auswirkungen des Riftings und Magmatismus auf die heutige Krustenstruktur zu studieren, und andererseits numerische Simulationen der Prozesse von der Entstehung des Plumes bis hin zur Interaktion mit der Ozeanöffnung. Das GFZ war mit zahlreichen Projekten in Kooperation mit Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen beteiligt. Im Folgenden werden Ergebnisse der krustenseismischen

Untersuchungen im Bereich der Etendeka-Flutbasaltprovinz (Ryberg et al., 2015; rote Linie in Abb. 1) beschrieben.

Die seismische Struktur der Kruste im Bereich des Walfischrückens wurde in einem Verbund von GFZ, AWI, GEOMAR sowie Geologischem Dienst von Namibia (GSN) mittels mariner Seismik, amphibischen Messungen und seismischen Experimenten an Land studiert (Fromm et al.; 2015, Ryberg et al., 2015). Mit einem etwa 300 km langen Profil wurde der Walfischrücken erstmals an seiner landseitigen Begrenzung seismisch sondiert (Ryberg et al., 2015). Verschiedene Telexperimente wurden für tomographische und reflexionsseismische Untersuchungen konzipiert. Als Quellen für die Wellenanregung kamen an Land Sprengungen zum Einsatz. Auf der Empfängerseite wurden Instrumente des Gerätepools am GFZ (GIPP) verwendet.

Der obere Teil der Abb. 2 zeigt die Ergebnisse aus der seismischen Tomographie. Als wichtigstes Ergebnis erkennt man eine Zone deutlich erhöhter P-Wellengeschwindigkeiten (V_p) im Bereich der mittleren und unteren Kruste unter den Ausläufern des Walfischrückens. Diese werden als Ausdruck der intensiven magmatischen Überprägung der Kruste interpretiert. Geschwindigkeiten größer als 7 km/s deuten auf eine mafische Zusammensetzung hin, die durch Intrusion von Gabbro in die kontinentale Kruste erklärt werden kann. Geschwindigkeiten größer als 7,5 km/s in der untersten Kruste entsprechen wahrscheinlich Anreicherungen von schwereren Mineralkomponenten der eingedrungenen, partiell kristallisierten Schmelzen. Das reflexionsseismische Abbild (Abb. 2 unten) weist mit relativ transparenter Oberkruste und ausgeprägten Lamellenstrukturen in der Unterkruste typische Merkmale einer zuletzt vorwiegend durch Dehnungstektonik beanspruchten Kruste auf. Diese stehen wahrscheinlich im Zusammenhang mit einer großräumigen Dehnung der Lithosphäre beim Zerfall des Gondwana-Superkontinents in der frühen Kreidezeit. Reflexive Strukturen in der Oberkruste (Profilentfernung 20 bis 100 km) werden als Abbild der tektonischen Prozesse während der älteren, panafrikanischen Gebirgsbildung im Kaoko-Gürtel interpretiert. Als wichtigstes Resultat weist die Unterkruste im Bereich der erhöhten Geschwindigkeiten unter dem Walfischrücken reflektive

Strukturen auf, die als Abbild der Intrusionsprozesse gedeutet werden. Ein markantes Reflexionsband (weißer Pfeil in Abb. 2 unten) könnte einen Hauptförderkanal für die aufgestiegenen Etendeka-Flutbasalte darstellen.

Die Ergebnisse liefern wichtige Randbedingungen für Modellierungen der Prozesse bei der Ozeanöffnung und den überlagerten Aktivitäten des Tristan da Cunha-Mantelplumes. Es werden aber auch neue Fragen aufgeworfen. Insbesondere scheint die relativ engräumige Begrenzung der intrudierten Kruste unter dem Walvisrücken eher dagegen zu sprechen, dass ein großer Plume-kopf während der Öffnung der kontinentalen Riftzone an der Lithosphärenbasis eintraf (Fromm et al., 2015; Ryberg et al., 2015). Zumindest ist davon auszugehen, dass der Aufstieg von Schmelzen und die Intrusion der Kruste vor allem durch vorgezeichnete, vererbte Strukturen relativ engräumig lokalisiert worden ist.

Struktur eines tiefen Sedimentbeckens an einer Transformstörung

Die Tote Meer-Störung ist eine kontinentale Blattverschiebung an der Grenze zwischen Afrikanischer und Arabischer Platte (Abb. 3). Sie verläuft zwischen dem Roten Meer und der Maras-Dreibruchstruktur (triple junction), Süd-Türkei und weist eine Gesamtlänge von etwa 1000 km auf. Diese Transformstörung ist vor etwa 20 Mio. Jahren im Zusammenhang mit dem Aufbrechen des Arabisch-Afrikanischen Kontinents entstanden. Seitdem haben sich beide Platten um etwa 107 km gegeneinander verschoben. Als Teil dieser Prozesse hat sich am Toten Meer ein

tiefes Sedimentbecken gebildet. Heute hat es eine Ausdehnung von etwa 105 km in Nord-Süd Richtung und ist 15 bis 17 km breit. Erste Theorien zur Beckenbildung gingen von einer Absenkung in einem Teilabschnitt eines in Ost-West-Richtung gedehnten und sich öffnenden Kontinentalrifts aus. Moderne Konzepte favorisieren eher einen lateralen Versatz (step-over) an einer Segmentgrenze der Störungszone als primäre Ursache für die Beckengenese. Die Transformbewegung an der Plattengrenze hat sich dabei von einem östlicher verlaufenden Zweig im Süden auf einen westlicher verlaufenden Zweig im Norden verlagert. Die Kruste wird bei dieser Spannungsverlagerung *quasi* kontinuierlich auseinandergezogen (pull-apart) und somit ein allmählich wachsender Ablagerungsraum für Sedimente geschaffen.

Das Tote Meer-Becken gilt als eines der prominentesten Beispiele für die Entwicklung von Sedimentbecken an Transformstörungen (z.B. Garfunkel, 1981). Dadurch steht es immer wieder im Fokus internationaler Forschungsaktivitäten, die sich sowohl mit Grundlagenforschung zur geodynamischen Entwicklung als auch mit gesellschaftlich relevanten Themen wie seismischer Gefährdung, Erdstürzen durch Verkarstung und Hohlraumbildung sowie Wasser beschäftigen. Seit der Jahrtausendwende wurden mit GFZ-Beteiligung zahlreiche geophysikalische Untersuchungen zur Krustenstruktur der Region am Toten Meer durchgeführt. Diese umfassten unter anderem aktive und passive seismische Experimente, magnetotellurische Messungen, Gravimetrie und Elektromagnetik.

Für ein seismisches Abbilden von Krustenstrukturen sowie zur Analyse der lokalen Seismizität wurde zwischen 2006 und 2008

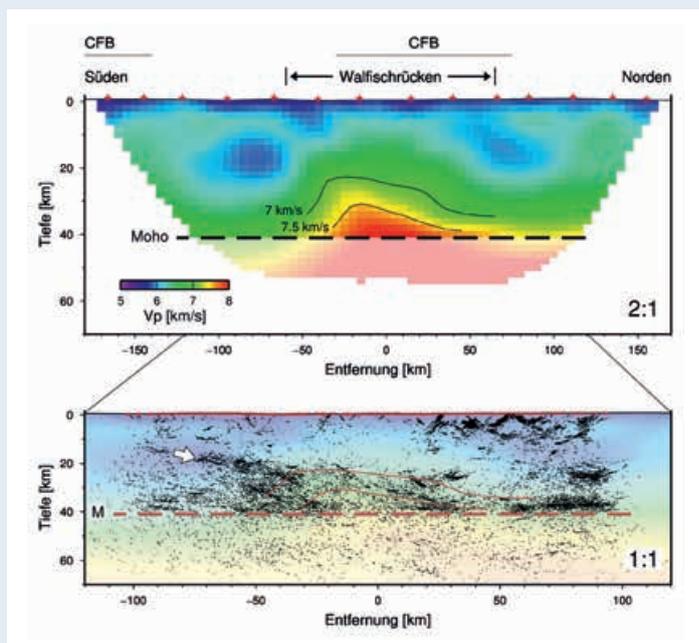


Abb. 2: Krustenseismisches Profil über die landseitigen Ausläufer des Walvisrücken in Namibia. Oben: Die seismische Tomographie ergab unter dem Walvisrücken eine Geschwindigkeitsanomalie mit sehr hohen Geschwindigkeiten (7 bis 7,8 km/s) in der mittleren und unteren Kruste. CFB= Kontinentale Flutbasalte. Unten: Ergebnisse der reflexionsseismischen Bearbeitung. (Abb.: neu veröffentlicht mit Zustimmung der Geological Society of America, aus Ryberg et al. (2015): Crustal structure of northwest Namibia: Evidence for plume-rift-continent interaction. - *Geology* 43, 8; Erlaubnis eingeholt über Copyright Clearance Center, Inc.)

Fig. 2: Deep seismic transect across the landfall of Walvis Ridge onshore Namibia. Above: Seismic tomography reveals high velocity anomaly (7-7.8 km/s) in the lower crust underneath the Walvis Ridge. CFB=Continental Flood Basalts. Below: Results of seismic reflection processing. The pattern of sub-horizontal lamellae in the lower crust appears distorted within the high velocity region below the Walvis Ridge. Arrow indicates possible pathway for ascending magma during break-up.

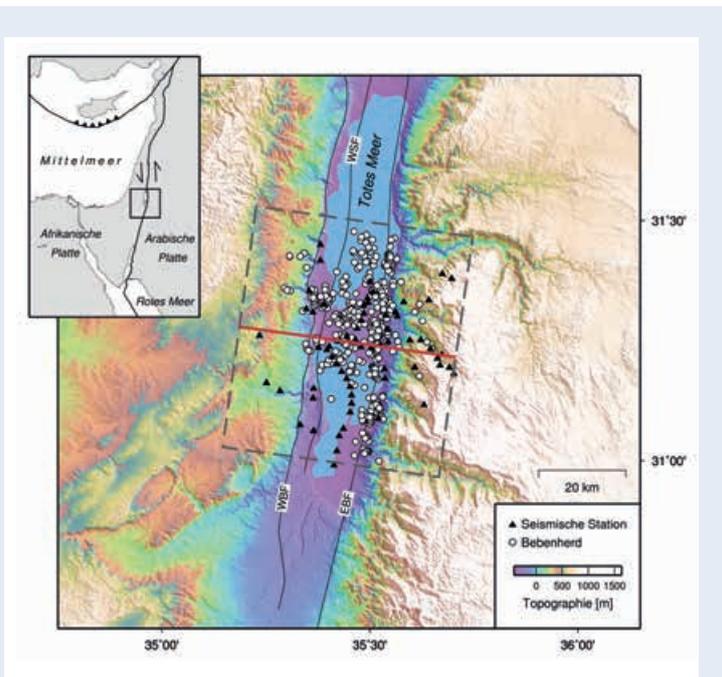


Abb. 3: Topographische Karte mit Lokation von seismischen Stationen und Bebenverteilung. Grau gestrichelte Box zeigt das Gebiet der tomographischen Inversion. Die rote Linie markiert die Lage des 2D Schnitts in Abb. 4. WBF = Westliche Randstörung; WSF = westliche Transversalverschiebung; EBF = Östliche Randstörung

Fig. 3: Topographic map shows seismic stations and distribution of earthquakes used in this study. Gray box indicates region of tomographic inversion. Red line marks seismic transect shown in Fig. 4. WBF = Western Boundary Fault; WSF = Western Strike-slip Fault; EBF = Eastern Boundary Fault

für 18 Monate ein dichtes Netzwerk mit 65 seismischen Stationen betrieben (Abb. 3). Zum Einsatz kamen wiederum Instrumente des Gerätepools am GFZ. Um eine gut überdeckte seismische Durchleuchtung im Zielgebiet zu gewährleisten, wurden die Stationen sowohl innerhalb des Beckens als auch im Bereich der Beckenschultern installiert. Nach sorgfältiger Analyse der Daten konnten 530 seismische Ereignisse identifiziert und für eine detaillierte Kartierung der Seismizität sowie Geschwindigkeitsbestimmung verwendet werden (Braeuer et al., 2012). Die Datenauswertung umfasste Laufzeitbestimmung, 1D-Modellierung sowie 2,5D- und 3D-tomographische Inversion zur Bestimmung der Geschwindigkeitsparameter V_p , V_s und V_p/V_s . Darüber hinaus wurden hochpräzise Verfahren zur Bebenlokalisierung angewendet sowie Untersuchungen zu den Herdprozessen und zur Statistik der Bebenmagnituden durchgeführt.

Abbildung 4a zeigt entlang eines 2D-Schnitts quer zur Beckenachse die Verteilung von seismisch abgeleiteten Gesteinsklassen. Hierbei wurden die verschiedenen Ergebnisse aus der Tomographie (Geschwindigkeitsparameter V_p , V_s , V_p/V_s)

mit Hilfe von Methoden aus der Neuro-Informatik gemeinsam analysiert und interpretiert (Braeuer und Bauer, 2015). Die Gesteinsklassen basieren auf jeweils spezifischen seismischen Eigenschaften, die mit Hilfe von Kreuzdiagrammen visualisiert werden können (Abb. 4b und 4c). Durch Vergleich mit petrophysikalischen Daten aus globalen Untersuchungen kann die Interpretation zusätzlich gestützt werden. Aus den Analysen der tomographischen Modelle ergaben sich drei Hauptgesteinsklassen, die als Beckensedimente, Pre-Beckensedimente und kristallines Grundgebirge interpretiert werden. Das Sedimentbecken weist dabei eine stark asymmetrische Form mit Mächtigkeitsvariationen von 5 km im Westen bis zu 13 km im Osten auf. Als wichtigstes Resultat wurde unter dem östlichen Teil des asymmetrischen Beckens ein anomaler Störkörper in Tiefen zwischen 13 und 18 km identifiziert. Das rötlich markierte Material weist ähnliche Geschwindigkeiten und V_p/V_s Werte auf wie die flach gelagerten alten Sedimentschichten außerhalb des Beckens (ebenfalls rötlich gefärbt). Deshalb wurde die anomale Zone unter dem Becken als ursprünglich an der Erdoberfläche gelagertes Sedimentpaket interpretiert, welches während der Beckenentwicklung immer tiefer abgesenkt worden ist. Frühere Arbeiten haben ebenfalls eine anomale Zone mit geringen V_p -Geschwindigkeiten unter den Beckensedimenten identifiziert, diese aber mit Anwesenheit von Fluiden und duktilen Scherprozessen in einer kristallinen Mittelkruste erklärt. Die zusätzliche Einbeziehung von V_p/V_s in dieser Studie spricht eher für die Interpretation als Pre-Beckensedimente. Allerdings ist auch diese Interpretation nicht völlig schlüssig, da ein entsprechender Körper stärker ausgedünnt sein müsste.

Die mit diesen Daten lokalisierten Beben treten verstärkt dort auf, wo verschiedene seismische Gesteinsklassen aneinandergrenzen (Abb. 4a). Besonders deutlich ist dies an der östlichen Begrenzung der Beckensedimente sowie der darunter lagernden Pre-Beckensedimente zu erkennen. Auch die obere westliche Begrenzung der Pre-Beckensedimente ist durch verstärkte Seismizität gekennzeichnet. Die Daten lassen die Interpretation zu, dass Deformationen sowie Akkumulation und Freigabe von Spannungen an lithologischen Grenzen besonders stark sind und somit zu einer verstärkten Bebenaktivität führen. Die Häufung der Beben in Grenzbereichen spricht auch gegen die Hypothese einer duktilen Scherzone im kristallinen Grundgebirge direkt unterhalb der Beckenfüllung (Braeuer und Bauer, 2015).

Ausblick

Die Krustenseismik wird sich in der Zukunft noch stärker hin zu einem Baustein in der interdisziplinären Forschung zum System Erde entwickeln. Schon seit längerem werden zunehmend aktive und passive seismische und seismologische Methoden miteinander verknüpft. Ein besonderer Fokus liegt momentan bei der Ausnutzung von Umgebungsrauschen für die bildgebende Strukturerkundung. Aktive seismische Verfahren können aber auf Grund ihres höheren Auflösungsvermögens nicht durch

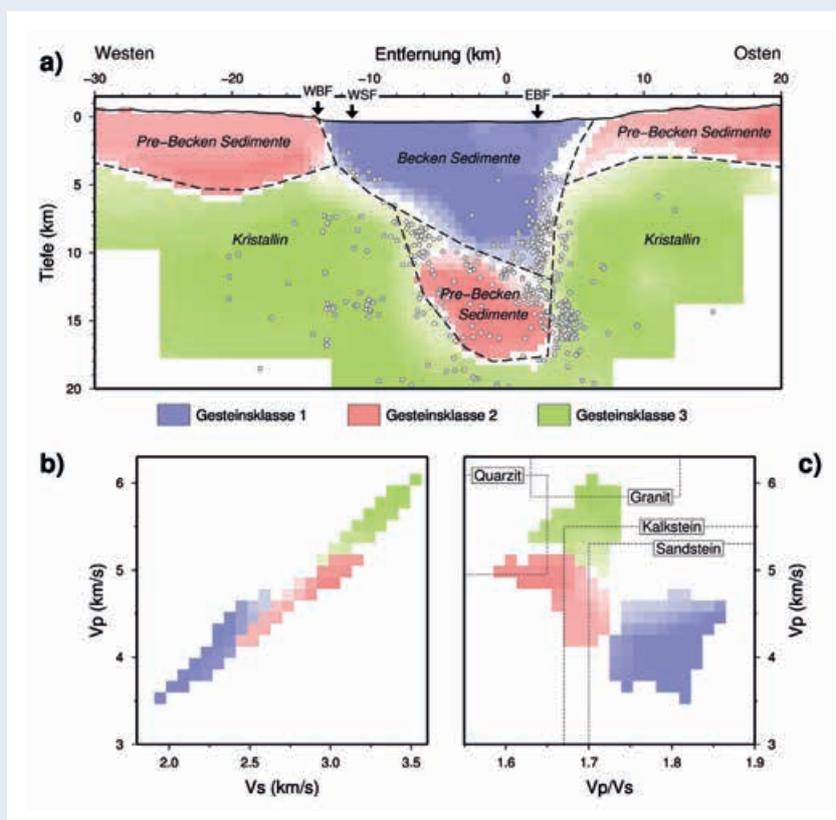


Abb. 4: (a) Der Schnitt entlang eines Profils über das Sedimentbecken unter dem Toten Meer zeigt die Verteilung seismisch abgeleiteter Gesteinsklassen sowie die bei der Tomographie verwendeten Bebenherde. WBF = Westliche Randstörung; WSF = Westliche Transversalverschiebung; EBF = Östliche Randstörung. (b) und (c) Seismische Eigenschaften der Gesteinsklassen. Petrophysikalische Daten nach Holbrook et al. (1992) und Schoen (1996) (Abb.: nach Braeuer und Bauer, 2015; Wiederverwendung der Abbildung mit freundlicher Genehmigung des Verlags John Wiley and Sons)

Fig. 4: (a) Distribution of rock types as classified by clustering of seismic velocities from seismic tomography. Earthquake distribution from joint inversion for seismic velocities and source localization. WBF = Western Boundary Fault; WSF = Western Strike-Slip Fault; EBF = Eastern Boundary Fault. (b) and (c) Seismic signature of rock types (classes) shown in crossplots of Vp vs. Vs and Vp vs. Vp/Vs. Petrophysical data after Holbrook et al. (1992) and Schoen (1996)

passive Experimente ersetzt werden. Neue Perspektiven zum seismischen Abbilden werden sich durch Verwendung einer deutlich größeren Anzahl an seismischen Empfängersystemen bei Experimenten ergeben. Für solche Entwicklungen ist das GFZ mit dem Gerätepool (GIPP) sowie nationalen und internationalen Vernetzungen sehr gut aufgestellt.

Literatur

- Bauer, K., Ryberg, T., Fuis, G. S., Lüth, S. (2013): Seismic Imaging of the Waltham Canyon Fault, California: Comparison of Ray Theoretical and Fresnel Volume Prestack Depth Migration. - *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 1, pp. 340–352.
- Braeuer, B., Asch, G., Hofstetter, R., Haberland, C., Jaser, D., El-Kelani, R., Weber, M. (2012): High-resolution local earthquake tomography of the southern Dead Sea area. - *Geophysical Journal International*, 191, 3, pp. 881–897.
- Braeuer, B., Bauer, K. (2015): A new interpretation of seismic tomography in the southern Dead Sea basin using neural network clustering techniques. - *Geophysical Research Letters*, 42, 22, pp. 9772–9780.
- Fromm, T., Planert, L., Jokat, W., Ryberg, T., Behrmann, J. H., Weber, M., Haberland, C. (2015): South Atlantic opening: A plume-induced breakup? - *Geology*, 43, 10, pp. 931–934.
- Garfunkel, Z. (1981): Internal structure of the Dead Sea leaky transform (rift) in relation to plate kinematics. - *Tectonophysics*, 80, 1-4, pp. 81–108.
- Holbrook, W. S., Mooney, W. D., Christensen, N. I. (1992): The seismic velocity structure of the deep continental crust. - In: Fountain, D. M., Arculus, R. J., Kay, R. W. (Eds.), *Continental Lower Crust*, (Developments in Geotectonics; 23), Amsterdam [u. a.]: Elsevier, pp. 1–43.
- Meissner, R., Brown, L. (1991): Seismic reflections from the Earth's crust: Comparative studies of tectonic patterns. - *Geophysical Journal International*, 105, 1, pp. 1–2.
- O'Connor, J. M., Jokat, W. (2015): Age distribution of Ocean Drill sites across the Central Walvis Ridge indicates plate boundary control of plume volcanism in the South Atlantic. - *Earth and Planetary Science Letters*, 424, pp. 179–190.
- Ryberg, T., Haberland, C., Haberlau, T., Weber, M., Bauer, K., Behrmann, J. H., Jokat, W. (2015): Crustal structure of northwest Namibia: Evidence for plume-rift-continent interaction. - *Geology*, 43, 8, pp. 739–742.
- Schön, J. H. (1996): *Physical Properties of Rocks: fundamentals and principles of petrophysics*, (Handbook of geophysical exploration; Sect. 1, Vol. 18), London [u. a.]: Geophysical Press, 583 p.
- Steinberger, B., Gassmüller, R., Trumbull, R., Sobolev, S. V., Weber, M. (2014): Manteldynamik und das Aufbrechen von Gondwana. - *System Erde*, 4, 2, pp. 14–19.