

MAMUT

Makran-Murray Traverse
Geophysik plattentektonischer Extremfälle

SONNE FAHRT
SO123

ABSCHLUßBERICHT

- 03G00123A -

Berichtszeitraum: 1. Juli 1997 bis 31. Dezember 1999

Ernst R. Flüh, Christian Kopp, Nina Kukowski, Katrin Huhn, Stephan Husen, Timothy Minshull, Rose Edwards, Jürgen Fröhn, Dirk Kläschen, Jörg Bialas, and C. Reichert

GEOMAR
Forschungszentrum für Marine Geowissenschaften
an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Wischhofstraße 1 - 3
24148 Kiel

März 2000

Schlußbericht

1. Aufgabenstellung

Die Hauptzielsetzung im Projekt MAMUT war es, mittels geophysikalischer Methoden den Murray Ridge und den Makran Akkretionskeil unter dem Aspekt ihrer plattentektonischen Einzigartigkeit zu untersuchen. Dabei bilden die tektonische Entwicklung, die Quantifizierung von Stoff- und Energietransport und die Seismizität im Untersuchungsgebiet die Schwerpunkte des Projektes.

Der Makran Akkretionskeil ist das Ergebnis der Konvergenz der Arabischen und der Eurasischen Platte. Er erstreckt sich im Bereich des Golfes von Oman submarin über eine Länge von etwa 150 km in nordsüdlicher Richtung und reicht zudem 200-300 km weit ins iranisch-pakistanische Hinterland. An ihn werden bis zu 7 km mächtige, wasserreiche Tiefseesedimente der Arabischen Platte mit einer relativ hohen Konvergenzrate von 40 km/Ma (DeMets, 1990) herangeführt und somit ist er einer der größten Akkretionskeile der Erde mit einem hohen Entwässerungspotential.

Unser Ziel war es deshalb, mittels moderner Ozeanbodenhydrophone (OBH) die Plattengrenze klar abzubilden und ein seismisches Untergrundmodell des Akkretionskeils zu erstellen. Darauf aufbauend sollte es möglich sein, die Entstehung des Akkretionskeiles zu rekonstruieren und die Entwässerung der Sedimente während dieser Zeit zu berechnen. Die geplanten Untersuchungen sollten uns in die Lage versetzen, Stoff- und Energiebilanzen am Makran Akkretionskeil aufzustellen. Die refraktionsseismischen Daten bestimmen Massen- und Fluidbilanz, die Wärmeflußwerte liefern die Energiebilanz.

Am Murray Ridge kann in beispielhafter Weise das Aufbrechen alter (70 bis 100 Ma (Hutchison et al., 1981)) ozeanischer Kruste untersucht werden. Unser Ziel war es, die dabei entstandenen Strukturen abzubilden und mit den an anderen Riftsystemen vorgefundenen Strukturen zu vergleichen. Insbesondere interessiert die Segmentierung entlang des Grabens, welche in ähnlicher Ausbildung an kontinentalen Riftsystemen gefunden wurde, wo sich eine solche Segmentierung infolge von Verschiebungen an internen Schwächezonen gebildet hat. Ein ähnlicher Mechanismus kann auch für den Murray Ridge angenommen werden.

Der Murray Ridge ist die nordöstliche Verlängerung der Owen Bruchzone und somit Teil der arabisch-indischen Plattengrenze. Während die Owen Bruchzone eine einfache rechtsseitige Transformstörung ist, überlagert mittelozeanische Extension diese Verschiebungen am Murray Ridge und ergibt ein schräges, extrem langsames Auseinanderdriften der beiden Platten. Es ist mit 2mm/Jahr die weltweit langsamste Rate - 100 mal langsamer als die höchste Rate am East Pacific Rise (Gordon und DeMets, 1989). Der Murray Ridge selber ist als topographisches Hoch ein noch in vieler Hinsicht ungeklärtes Phänomen. Als Ursache für seine Entstehung kommen sowohl Vulkanismus als auch ein ehemaliges Kompressionsstadium am Plattenrand in Frage (Minshall et al. 1992). Die gegenwärtige Extension wird durch eine Reihe von Grabenstrukturen belegt, deren bedeutendste der Dalrymple Trough ist. Er erreicht eine Wassertiefe von 4100 m und liegt somit etwa 800 m tiefer als die umgebenden Tiefsee-Ebenen. Die Hauptabschiebung befindet sich an der südlichen Grabenschulter, antithetische Verwerfungen werden auf der nördlichen Seite beobachtet. Die Grabensohle ist mit mehr als 5.0 km Sediment bedeckt. Etwas weiter nordöstlich weist die Grabenachse einen Versatz von etwa 20 km auf und es gibt zusätzliche Hinweise aus Schweredaten, daß es eine ganze Serie von Versatzsegmenten gibt (Edwards et al., 1995). Die Schweredaten deuten zudem auf eine sehr geringmächtige Kruste (ca. 3 km) hin. Durch weitwinkelseismische Messungen sollte im Rahmen des Projektes die Krustenstruktur bestimmt werden. Dazu sollte auch ein neu entwickeltes Ozean Boden Seismometer (OBS) eingesetzt und getestet werden. Das Ziel der seismologischen Messungen war es, mittels einer Langzeitregistrierung die Seismizität in beiden Gebieten zu untersuchen. Dazu sollten die Mikrobeben sowohl im Bereich des Dalrymple Trough als auch des Makran Akkretionskeils detailliert lokalisiert werden, um den Spannungsauf- und -abbau besser zu erfassen.

2. Voraussetzungen

Das Vorhaben wurde in enger Anlehnung an die Fahrtplanung für FS SONNE durchgeführt. Während der Bearbeitung hat es stets eine enge Kooperation mit folgenden Gruppen gegeben:

BGR, Hannover

Bullard Laboratories, Universität Cambridge

GEOMAR, Abteilung Marine Umweltgeologie (E. Suess, P. Linke)

GFZ (Potsdam): Nach dem Wechsel von Frau Kukowski vom GEOMAR zum GFZ bleibt die enge Zusammenarbeit bestehen.

National Institute of Oceanography (NIO), Karachi, Pakistan.

Institute of Geophysics, Kiew (V. Pylypenko)

Die Zusammenarbeit der verschiedenen Gruppen ist auch durch die eingereichten Tagungsbeiträge und Veröffentlichungen dokumentiert.

3. Planung und Ablauf

Die Fahrt fand in der Zeit vom 07.09 bis 03.10.1997 statt, Ausgangs- und Endhafen war Maskat, Oman. Von wenigen Einschränkungen durch unvorhergesehen Ereignisse (vor allem durch die rege Fischerei Tätigkeit) abgesehen konnte das geplante Fahrtprogramm realisiert werden. Die anschließende Aufbereitung und Auswertung der Daten erfolgte an den beteiligten Instituten, wobei gelegentlich nicht eingeplante kleine Verzögerungen auftraten. Diese waren durch die Komplexität und Qualität der Daten bedingt, die gelegentlich Arbeitsansätze, die über das ursprünglich geplante Programm hinausgingen, sinnvoll erscheinen ließen. Diese Mehrarbeit hat sich meist gelohnt, wie auch den beiliegenden Publikationen zu entnehmen ist. Über Zwischenergebnisse wurde auf vielen Tagungen berichtet, die auch innerhalb der Arbeitsgruppe für intensive Planungsgespäche und Arbeitstreffen genutzt wurden.

Der Austausch der akquirierten seismischen Daten (Bathymetrie und OBH/OBS Messungen) wurde während der Ausfahrt vorgenommen. Die Daten wurden von den jeweiligen Gruppen aufbereitet und in SEG-Y Format umgewandelt (siehe auch Fahrtbericht). Sowohl das GEOMAR als auch die BGR, die Universität Cambridge und die beteiligten Pakistanischen Institute erhielten einen vollständigen digitalen Satz der akquirierten seismischen Daten sowie Papierkopien der Parasounddaten und der gravimetrischen und magnetischen Meßreihen. Die Weitwinkeldaten wurden am GEOMAR und in Cambridge bearbeitet, wobei ältere britische Reflexionsdaten und ein Reflexionsprofil der Fahrt SO122 in die Auswertung einbezogen wurden. Die magnetischen und gravimetrischen Daten wurden bei der BGR zusammen mit den Daten der Fahrt SO122 aufbereitet und interpretiert. Die bathymetrischen Daten der Fahrt SO123 wurden am GEOMAR, zusammen mit den Daten der Fahrten SO90, SO122, SO124 und SO130 aufwendig aufbereitet und zu Karten zusammengestellt, die auch für die Fahrtplanung bei SO124 und SO130 genutzt wurden.

4. Wissenschaftlich-technischer Stand

Vor Beginn unserer Arbeiten lagen aus dem Untersuchungsgebiet einige ältere reflexionsseismische Linien der Universität Cambridge vor (White, 1982). Insbesondere im Bereich des Akkretionskeils mit geringen Wassertiefen bilden reflexionsseismische Methoden den Untergrund jedoch nur bis in wenige Kilometer Tiefe ab. So wurden die oberen Störungen und Bruchschollen bereits kartiert, auf tiefere Strukturen konnte bisher aber nur indirekt z.B. durch Hebungsraten (Harms et al. 1984) geschlossen werden.

Einen ersten Einblick in die tieferen Strukturen der Makran Subduktionszone, ergaben zwei refraktionsseismische Profile (sonobuoys), die in den siebziger Jahren parallel zur Küste aufgenommen wurden (White and Loudon, 1983). Anhand dieser konnte der Abtauchwinkel der arabischen Platte bestimmt werden, die Datenqualität ließ aber nur spärliche Schlüsse auf die daraufliegenden Sedimentschichten zu.

Einige dieser Vorarbeiten konnten in die Interpretation der OBH-Daten mit einbezogen werden. So ist es bei der Erstellung von Geschwindigkeitsmodellen hilfreich, die aus der Reflexionsseismik bekannten Strukturen der oberen Sedimente zu berücksichtigen. Ein Abgleich beider seismischer

Verfahren konnte bei den weitwinkelseismischen Profilen 7 und 8 vorgenommen werden, die zum Teil deckungsgleich mit den MCS Linien CAM30 und SO122-04 sind.

Mit Hilfe von reflexions- und refraktionsseismischen Daten wurde versucht, die austretenden Fluidmengen geophysikalisch zu quantifizieren, jedoch ließen bei den refraktionsseismischen Messungen der Abstand der Meßpunkte und die eingesetzten Methoden nur eine begrenzte Auflösung zu. Die gegenwärtigen geophysikalischen Abschätzungen über die Fluidmengen, die von akkretierten Sedimenten stammen, können daher mit den durchgeführten Messungen verbessert werden. Der Vergleich der bestehenden direkten Messungen und der geophysikalischen Abschätzungen sollte eine Kalibrierung erlauben, die Aufschlüsse über die Genauigkeit der Berechnungen globaler Fluidmengen anhand geophysikalischer Meßmethoden liefert. Solche Untersuchungen sind notwendig, um die zukünftigen globalen Abschätzungen der Fluidaustritte entlang der sich insgesamt über 44.600 km erstreckenden konvergierenden Plattengrenzen zu erreichen.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während der Laufzeit des Projektes, aber auch darüber hinaus, gab es eine stetige und fruchtbare Zusammenarbeit mit vielen anderen interessierten Kollegen, namentlich den unter 2. genannten Personen und Instituten. Die stetige und schnelle Präsentation der Ergebnisse auf nationalen und internationalen Tagungen führte zu einer intensiven Diskussion mit einem weiten Interessentenkreis.

6. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Die wissenschaftlich technischen Ergebnisse sind in eine Reihe von Publikationen eingeflossen, die schon im Druck, aber zum Teil noch in der Begutachtung sind. Darüber hinaus wird noch an einigen Teilaspekten der Daten gearbeitet, weitere Publikationen sind in Vorbereitung. Auf mehreren Tagungen wurde über erste Ergebnisse und Zwischenresultate berichtet (siehe 9b). Es besteht ein großes Interesse an unseren Ergebnissen, wie viele Nachfragen nach Vorabkopien der Publikationen dies belegen.

6.1 Anlage 1, Preprint der Arbeit:

C. Kopp, J. Fruehn, E.R. Flueh, C. Reichert, N. Kukowski, J. Bialas, D. Klaeschen, in press:

Structure of the Makran Subduction Zone from wide-angle and reflection seismic data; (**Anlage 1**).

* Zusammenfassung der Arbeit:

Die Arbeit befaßt sich mit der Struktur und Dynamik der Makran Subduktionszone. Anhand weitwinkelseismischer Profile der SONNE Fahrt SO123 und einer älteren MCS-Linie wird der Aufbau der ozeanischen Kruste diskutiert, sowie anhand von Sedimentstrukturen auf Akkretionstektonik geschlossen. Der Abtauchwinkel der ozeanischen Platte und die Geometrie des Akkretionskeils bestätigen bereits ältere Annahmen, daß hier Underplating stattfindet.

Besonders der nördliche Teil des Sedimentkeils ist von mehreren mächtigen Schichten erniedrigter Geschwindigkeit geprägt. Es wird angenommen, daß diese durch den Fluidaustritt aus bereits tiefer liegenden Sedimentschichten entstanden sind.

6.2 Anlage 2, Preprint der Arbeit:

Kukowski, N., Schillhorn, T., Huhn, K., v. Rad, U., Husen, S., Flueh, E. R., submitted to Marine Geology: Morphotectonics of the central Makran Accretionary wedge off Pakistan; (**Anlage 2**).

* Zusammenfassung der Arbeit:

Anhand von Fächerlot-Daten wird hier die Morphologie des Makran Akkretionskeils untersucht. Aufgrund von Hangneigung und unterschiedlicher Ausprägung der Akkretionsrücken wird der Kontinentalhang in drei morphologisch unterschiedliche Gebiete eingeteilt. Durch die Identifikation von in den Hang eingeschnittenen Canyons und die Analyse der Form dieser Einschnitte kann zwischen erosiven und sedimentären Bereichen unterschieden werden.

6.3. Anlage 3, Preprint der Arbeit:

Kukowski, N., Schillhorn, T., Flueh, E. R., Huhn, K., in press in Geology: A newly identified strike-slip plate boundary in the northeastern Arabian Sea; (**Anlage 3**).

* Zusammenfassung der Arbeit:

Anhand bathymetrischer Daten wird in dieser Veröffentlichung eine strike-slip-Störung identifiziert, die sich quer durch den Makran Akkretionskeil zieht. Sie ist durch einen Versatz der Akkretionsrücken charakterisiert und läßt sich auch anhand anderer geophysikalischer Parameter wie Erdbebenverteilung und magnetischer Anomalien verifizieren. Da sich der Versatz auch südlich des Akkretionskeils auf die arabischen ozeanischen Kruste verfolgen läßt muß es sich bei dem nordöstlichen Teil der arabischen Platte um eine bisher noch nicht erkannte separate Mikroplatte handeln.

6.4. Anlage 4, Preprint der Arbeit:

Edwards, R. A., Minshull, T. A., Kopp, C., Flueh, E. R., to be submitted to EPSL: Dalrymple Trough: An active strike-slip ocean-continent boundary in the northwest Indian Ocean; (**Anlage 4**).

* Zusammenfassung der Arbeit:

Vier weitwinkelseismische Linien um das Gebiet Murray Ridge/Dalrymple Trough werden in diesem Beitrag diskutiert. Die sehr unterschiedlichen Krustenmodelle nördlich und südlich des Dalrymple Grabens werden hier als Übergang von kontinentaler Lithosphäre im Süden zu ozeanischer Lithosphäre im Norden interpretiert.

6.5. Anlage 5, Reprint der Arbeit:

Bialas, J. and Flueh, E. R., 1999: Ocean Bottom Seismometers; *Sea Technology*, 40, 4, 41-46. (**Anlage 5**).

*Zusammenfassung der Arbeit:

In dieser Publikation wird das von uns auf der Fahrt SO123 erstmals eingesetzte Ozeanbodenseismometer beschrieben. Es ist in weiten Teilen kompatibel mit den Ozeanbodenhydrophonen, verfügt aber zusätzlich über ein vom Geräteträger entkoppeltes Dreikomponentengeophon.

6.6. Anlage 6, AGU Fall Meeting, 1999, Poster:

Huhn, K., Kukowski, N., Kopp, C.: Finite Element modelling of the deformation and mechanical behaviour of the Makran accretionary wedge offshore Pakistan; (**Anlage 6**).

6.7. Weitere Ergebnisse

6.7.1. Interpretation of Wide-angle Seismic Data - The Murray Ridge and Dalrymple Trough

(Abschlußbericht der TMR-Teilnehmer auf SO123)

Introduction

The four wide-angle reflection and refraction seismic lines acquired over the Murray Ridge and Dalrymple Trough were modelled individually using 2-dimensional ray-tracing. The shot-receiver ranges (offsets) were calculated from the navigation files, using the instruments deployed positions. The instrument locations were then checked by ray-tracing the direct water-waves. If it was necessary to adjust an instrument's location, the shot-receiver ranges were recalculated accordingly.

Phase Identification and Travel-time Picking

From the OBH/OBS record sections along each line different travel-time phases were identified; where a phase represents a group of arrivals that have undergone the same propagation history. At the line intersections care was taken to ensure that phase identification was consistent between different lines. Several different phases representing both refracted and reflected arrivals were identified on each line, and the arrival times picked.

Each travel-time pick was assigned an estimated uncertainty in pick time depending on the data quality. The pick errors range between 20 ms to 100 ms. Refracted energy from the uppermost sediment layers, which appears as a first arrival at relatively short offsets (0 to ~15 km), was usually assigned a pick error of 20 ms. First arrivals corresponding to deeper sediment layers or the crust

observed at offsets of up to ~30 km have a pick error of 50 ms. Intra-sediment pre-critical reflections, observed within the direct water-wave cone, were also assigned pick errors of 50 ms. Weak amplitude first arrivals at longer offsets and second arrivals (eg. wide-angle reflections) were generally assigned a pick error of 100 ms, to allow for possible cycle skipping.

Two-dimensional Ray-Tracing

Once the instrument locations had been accurately determined the starting velocity models for the 2-dimensional ray-tracing were constructed. Each line was modelled individually, but the final models are all consistent at line intersections. The seabed was included in the models from the bathymetry measured during cruise SO123.

The travel-time data were modelled using the *RAYINVR* 2-D ray-tracing code of Zelt and Smith (1992). The velocity model constructed consists of a series of discrete layers separated by first-order or second-order velocity discontinuities (*interfaces*), the locations of which are defined by a series of *nodes*. The velocities at the top and bottom of the layers are specified by a series of velocity nodes, which may or may not be coincident with the interface nodes. Variations in velocity gradient both vertically and horizontally are therefore possible.

The data were modelled using a 'top down' approach - the velocities and interface depths of the uppermost layers were modelled first, and once a satisfactory travel-time fit had been obtained these layers were fixed while the deeper structure was modelled. A combination of both forward modelling, where velocities and depths are adjusted manually, and inversion was employed. The inversion was found to be particularly useful when modelling the sediment layers. The deeper crustal structure was largely determined from forward modelling. Once a satisfactory travel-time fit had been obtained synthetic seismograms were calculated for each OBH/OBS. Comparing the calculated amplitudes to the observed data helped to ensure that the phase identifications were correct.

The *RAYINVR* package allows a measure of the model misfit within the bounds of the travel-time pick errors to be determined using the χ^2 test for goodness of fit. Ideally, the best fit model should have a normalised χ^2 of approximately 1.0 (i.e. the travel-time misfit is the same magnitude as the pick errors). A normalised χ^2 of less than 1.0 indicates that the model has been overfitted, and contains unnecessary structure. This approach yields a minimum structure model. However, due to the rapidly varying structure in the experiment area, it was not always possible to achieve a model with a χ^2 as low as 1.0. The final models presented represent the best-fit model, chosen where the values of χ^2 for the different phases were at a minimum, and the model contained as simple a structure as possible. As well as the χ^2 test it is also important that the rays traced should reach as many of the observation points as possible; a model with a χ^2 of 1.0 yet for which rays can only reach 10% of the observed travel-times is clearly incorrect. As the χ^2 test is dependent on the user-assigned travel-time pick errors it is prudent to consider also the rms (root-mean-square) travel-time misfit.

This report discusses the crustal structure along lines 4, 6 and 7; line 5 is dealt with in the attached preprint.

Line 4

Line 4 is located along the axis of the Dalrymple Trough, and intersects both lines 5 and 7 (Figure 1). Eight OBH and one OBS were deployed along the line, which is 150 km in length. From the instrument record sections the following phases were identified:

- P1 Direct water-wave.
- P2 Refraction from sediment layer three.
- P3 Refraction from sediment layers 4 and 5.
- P4 Reflection from the top of basement and upper crustal turning rays.
- P6 Mid-crustal reflection.
- P7 Upper mantle turning rays.
- R1 Reflection from the base of sediment layer 1.
- R2 Reflection from the base of sediment layer 2.

Figure 2 shows the P-wave velocity model obtained for line 4. Five sediment layers overlie a two-layer crust of 9-12 km thickness. The upper three sediment layers are each modelled with a constant velocity of between 1.75 - 3.20 km/s, and are separated by first-order velocity

discontinuities. The fourth and fifth sediment layers are separated by a second-order velocity discontinuity (i.e. a change in velocity gradient). The velocity varies both vertically and laterally in these layers, between 3.36 - 5.00 km/s. The crystalline crust was modelled with two layers separated by a first order velocity discontinuity from which reflections were observed. A one-dimensional velocity structure of 5.20 - 5.80 km/s in the upper crust and 6.40 - 6.45 km/s in the lower crust was found to provide the best fit. The final model statistics are:

	rms misfit	\bullet^2	No. of picks reached (%)
Sediment arrivals	0.047 sec	4.832	2326/2680 (87%)
Crustal arrivals	0.159 sec	4.387	2360/2817 (84%)
Whole model	0.118 sec	4.604	4661/5497 (85%)

The statistics above show that the final model fit is adequate. The sediments have been fitted well, with an rms misfit of less than 50 ms. Larger misfits are seen for the crustal phases, where an rms error of 159 ms is observed. This relatively large misfit arises from difficulties in fitting the mid-crustal reflection on all instruments, particularly at the southwestern end of the line. This is most likely due to rapidly varying crustal structure perpendicular to the line. Modelling of line 5 (Edwards et al, attached) shows that the Moho rises sharply immediately to the northwest of line 4. It is possible that the southwestern end of line 4 is shot over this steeply dipping region of the Moho, making correct phase identification at this end of the line very difficult. Alternatively the records may be contaminated by out-of-plane reflections. A better travel-time fit may be achieved by invoking lateral velocity changes in the crust, although the paucity of crustal turning rays (see below) means that such structure may be difficult to justify. The overall travel-time misfit for the preferred model is 118 ms, yielding a \bullet^2 of 4.604. Eighty-five percent of observed travel-time picks were reached by the calculated arrivals.

Figure 3(a) shows the final model with two-point (source to receiver) ray-tracing for all the phases observed. This shows which regions of the model are well constrained by many crossing rays, and which regions are poorly constrained due to low, or zero, ray density. Figure 3(b)-(d) shows an example of the travel-time and amplitude modelling for one OBH. From Figure 3(a) it is apparent that the sediments and upper crust are well constrained with many crossing rays. However, the lower crust and Moho are rather poorly constrained. In particular, the lack of turning rays in the lower crust means that these velocities are not well defined. The Moho depth is constrained in the centre portion of the model (35 - 95 km) by upper mantle turning rays observed on three instruments. However, there is a trade-off between lower crustal velocities, which are not well constrained, and Moho depth; increasing the lower crustal velocities would necessitate an increase in Moho depth to fit the observed upper mantle arrivals.

From the low velocities (5.20 - 6.45 km/s) and thickness of 9 - 12 km, it would appear that the Dalrymple Trough is underlain by thinned continental crust. For further discussion of this please see Edwards et al. preprint attached (Anlage 4)

Line 6

Line 6 runs from SW to NE parallel to and to the NW of the Dalrymple Trough. Eight closely-spaced OBH were deployed on the line, which is 110 km long. This line was shot as a reference line away from major structural variations and shows the simplest structure of all the lines modelled. The following phases were identified:

- P1 Direct water wave
- P2 Refraction from sediment layer 3
- P3 Refraction from sediment layer 4
- P4 Refraction from sediment layer 5
- P5 Reflection from the top of the basement
- P6 Upper crustal turning rays
- P7 Lower crustal turning rays
- P8 Moho reflection
- R1 Reflection from the base of sediment layer 1
- R2 Reflection from the base of sediment layer 2
- R3 Reflection from the base of sediment layer 3
- R4 Reflection from the base of sediment layer 4

where the P phases are postcritical and the R phases are precritical. Figure 4 shows the resulting velocity model. Five sediment layers with a total thickness of 4-6 km overlie a two-layer crust of thickness 5-6 km. The upper sediment layers do not generate refracted arrivals; velocities in these layers are constrained by precritical reflections and gradients are not well constrained. The lower three sediment layers have significant velocity gradients and generate clear refracted arrivals (Figure 5). The velocities in these layers are well constrained by a large number of crossing raypaths. In all three layers, velocities increase significantly to the NE; this increase is not only due to the greater sediment thickness at the NE end of the line, and may indicate slight tectonic compaction effects as the Makran subduction zone is approached. Velocities reach 4.9 km/s in the deepest part of the sediments, so the velocity contrast with the basement is small and precritical basement reflections are not seen clearly. The vertical velocity gradient in the sediment column is sufficient to generate strong pegleg multiples by reflection of turning rays downward from the seabed; these are observed as late arrivals with low apparent velocities (Figure 5).

The crystalline basement, identified from crossing reflection profiles, dips gently to the NE at 1-2°; again, this may be due to the distal effects of the lithospheric slab bending downward into the Makran subduction zone. The crust is 5-6 km thick and has a structure typical of mature oceanic crust. Velocities increase from 4.9-5.8 km/s to 6.4 km/s in a 2.5 km upper layer and from 6.4 km/s to 7.3 km/s in a 2.5-3.5 km lower layer. The boundary between these two layers does not generate reflections, and has been fixed at 2.5 km below the basement surface; a division into two layers is necessary because the traveltimes and amplitudes of basement arrivals cannot be satisfied with a single uniform vertical velocity gradient. Ray coverage is good throughout the crust in the central part of the profile (Figure 5), and Moho reflections indicate small variations in crustal thickness along the profile. None of these fluctuations are large enough to indicate the presence of fractures zones along the profile. No mantle phases were identified, so the mantle velocity is not well constrained. However, a sharp velocity contrast is required to explain the observed wide-angle Moho reflections, and the amplitude of these reflections is consistent with an upper mantle velocity of 8.0 km/s.

The final model statistics are:

	rms misfit	χ^2	No. of picks reached (%)
Sediment arrivals	0.046 sec	1.765	2719/2801 (97%)
Crustal arrivals	0.061 sec	1.468	1720/1958 (88%)
Whole model	0.052 sec	1.649	4439/4759 (93%)

Line 7

Line 7 lies perpendicular to the strike of Dalrymple Trough and is coincident with multichannel reflection profile SO122-04. Nine OBH and one OBS were deployed on this line, which is 160 km long. Line 7 is the most complex profile in the Dalrymple Trough area and travel-time modelling is therefore challenging. The following phases were identified:

- P1 Direct water wave
- P2 Refraction from sediment layer 2
- P3 Refraction from sediment layer 3
- P4 Refraction from sediment layer 4
- P5 Refraction from sediment layer 5 (SE end only)
- P6 Reflection from the top of the basement
- P7 Upper crustal turning rays
- P8 Intracrustal reflection (NW part only)
- P9 Lower crustal turning rays
- P10 Moho reflection
- P11 Mantle turning rays

- R1 Reflection from the base of sediment layer 1
- R2 Reflection from the base of sediment layer 2
- R3 Reflection from the base of sediment layer 3
- R4 Reflection from the base of sediment layer 4 (SE end only)

The final model statistics are:

	rms misfit	χ^2	No. of picks reached (%)
Sediment arrivals	0.073 sec	2.654	1190/1898 (63%)
Crustal arrivals	0.096 sec	1.794	1159/1250 (93%)
Whole model	0.085 sec	2.231	2349/3148 (75%)

The fit is variable, and in some regions it is clear that the full complexity of the structure cannot be represented by the approach used; hence the emphasis in modelling was on the crustal arrivals, which are the main phases of interest. The final model is shown in Figure 6. This model will be further updated by adding in sediment velocity information from prestack depth migration and crustal thickness information from gravity modelling. Four types of crust are traversed: the Indus Fan, the Murray Ridge, the Dalrymple Trough and the oceanic crust to the NW of Dalrymple Trough.

The SE, Indus Fan end of the line is the best-constrained part, though the line is unreversed for the deeper structure here. The sediment column is up to 7 km thick and velocities increase from 1.7 km/s at the seabed to up to 5.3 km/s immediately above basement. Five distinct sediment layers were modelled. Velocities in the upper 1 km of sediment are constrained only by precritical reflections and velocity gradients in this region are not well constrained, but the deeper sediment layers generate clear refracted arrivals. As on line 6, the velocity contrast at the basement is small; no precritical basement reflections are seen, but postcritical reflections are clear on some instruments. The amplitude of this reflection is highly variable, and for example on OBH55, which is the only instrument to show clear arrivals to long ranges from both sides of the Murray Ridge, the basement reflection from the Indus Fan side is very weak (Figure 7). Refracted energy from beneath the basement is seen only on two instruments, and the crustal velocity structure is constrained mainly by strong Moho wide-angle reflections. These data indicate a 3-4 km crustal section with a velocity increasing with depth from 6.1 km/s to 7.0 km/s. This is not a typical oceanic crustal structure, and the weak magnetic anomalies in this area also suggest that the presence of oceanic crust is unlikely. The crustal section could represent highly thinned continental crust, or possibly an ocean-continent transition zone consisting of serpentinised upper mantle with sparse magmatic intrusions as suggested for some margins in the North Atlantic; these possibilities cannot be distinguished by the available data.

As the Murray Ridge is approached, the sediments thin and the crust thickens. Sediment cover is absent on some parts of the ridge and the record sections are disrupted by considerable scattered noise. Here, two crustal layers have been modelled, though the boundary between them generates reflected arrivals on only one instrument. Upper crustal velocities are very low, typically 4-4.5 km/s, suggesting perhaps an extrusive component or large fracture porosity. Velocities drop below 4 km/s within acoustic basement on the SE flank of the Ridge; here, acoustic basement may represent the top of some kind of mass wasting deposit rather than true crystalline crust. Lower crustal velocities are constrained mainly by sparse Moho wide-angle reflections; these phases suggest that velocities are low and vertical gradients are low, with a maximum velocity of around 6.5 km/s at the base of the crust. The crustal thickness is about 10 km, not significantly thicker than the crust beneath Dalrymple Trough (see Line 4 above), and this lack of isostatic compensation explains the very large gravity anomaly in this area. The large crustal thickness and low crustal velocities of Murray Ridge are consistent with a continental origin.

Four sediment layers were modelled in Dalrymple Trough. The velocity structure in the top two layers is constrained only by precritical reflections, though some refracted arrivals are observed from the second layer on the NW flank of the Murray Ridge. Velocities in the deeper layers are constrained both by turning rays and by reflections, including wide-angle reflections from the

basement. Velocities reach 4.8 km/s at the base of the sediment column in the centre of the Trough, and here the velocity contrast at the top of basement is weak. However, this contrast increases as the sediment column thins on the NW flank of the Trough. The crustal structure beneath the Trough is only weakly constrained by the data from Line 7; the structure from the crossing point with Line 4 was used here, and minor adjustments made to basement geometry made to fit the few crustal arrivals in this region. The lower crustal structure to the NW of the Trough is also unconstrained by Line 7, but clear basement reflections and upper crustal arrivals constrain the basement geometry and suggest a sharp lateral velocity gradient in this region, with velocities at the top of the lower crust increasing to 6.4 km/s. The data are consistent with the presence of an oceanic crustal velocity structure similar to that of Line 6 close to the NW edge of the Trough, and an abrupt transition between oceanic and thinned continental crustal structure as on Line 5 to the NE.

6.7.2. Passive Seismology

To monitor local seismicity across the Makran accretionary wedge, a seismic network was temporarily deployed (Figure 8). The network consisted of 12 OBH with an average station spacing of 20 nm. The instruments were deployed during the days 09.09. and 10.09.1997. Two instruments were recovered after four days. The remaining 10 instruments were recovered after 12 days during the days 23.09. and 24.09.1997. All instruments were operated at 10 ms sampling rate and in continuous mode. The latter ensures that no events will possibly missed due to a badly calibrated trigger. Hardware problems and power failure causes data loss of three instruments. The remaining nine instruments recorded without any problems over the entire observation period.

After downloading the raw data of all instruments, a software trigger was used to detect possible events. The code is based on the AUTOPICK software of the IASPEI Software Library Supplement #1. It applies a second order bandpass frequency cutoff at 2 Hz and 10 Hz before analyzing long term and short term average. The long term average (LTA) is defined as the average amplitude over a window length of 4 s, whereas the short term average (STA) is calculated over a window length of 0.1 s. If the STA to LTA ratio is greater than a predefined value and lasts over a predefined time length (event length), a trigger will be set and added to the triggerlist of this station. In this study we used a STA to LTA ratio of 8 and an event length of 0.3 s. To identify a triggered event as a possible earthquake a coincidence test will be applied to the merged triggerlist of all instruments. A triggered event will be accepted as an earthquake if more than four instruments observed the same event within a specified window length. In general, the window length is the travel time for the distance between the most spaced instruments of the network.

Only one earthquake was found for the entire observation period applying the procedure described above. Decreasing the STA to LTA ratio and the event length, thus increasing sensitivity, did not result in more events. Four instruments triggered the detected earthquake on 12.09.1997 at 04:47 (UTC). Figure 9 shows the signals of all instruments operating at that time. Clear onsets of the first P-wave arrival are observed at OBH 09, 12, 13, and 22. The remaining instruments show rather noisy and weak signals. This could indicate that the observed earthquake is of small magnitude and is located close to OBH 09, 12, 13 or OBH 22 in the northeastern part of the network.

At regional scale, 16 events were found in the global NEIC catalogue of the U.S. Geological Survey (Figure 10). These events occurred mainly along the Main Zagros Thrust close to the Strait of Hormuz and within the Himalayan region. Table 1 lists all hypocentral parameters of these events. Three of these events marked in bold were observed at the OBH network (Figure 10). Due to the low frequency content of the signals the data has been low pass filtered with a cutoff frequency of 3 Hz.

Worldwide, five events with a magnitude larger than 6.0 occurred within the operation period of the OBH network. None of these events were observed, possibly due to the expected low frequency content of the signals which is below the natural frequency of the OBH and the ambient noise level.

We successfully deployed a seismic network of 12 OBH to monitor local seismicity across the Makran accretionary wedge. Except three instruments, all instruments faultlessly recorded over the entire operation period of 14 days. The network recorded only one local event. It possibly occurred in the northeastern part of the network on 12.09.1997 at 04:47 (UTC). The network also recorded

three regional events of a magnitude about 4.3 (Mb) close to the Strait of Hormuz. In addition, airgun shots could be clearly identified over a distance up to 300 km. This clearly demonstrates that the ambient noise level was rather low and local earthquakes were not missed because of a high noise level. The observed low level of local seismicity is in good agreement with other studies in this area (e.g. Byrne et al. 1992) based on global network data. The low seismicity suggest that subduction at the Makran subduction zone occurs aseismically or that the plate boundary is currently locked and experiences great earthquakes with long repeat times.

6.7.3. Bearbeitung der bathymetrischen Fächerlot-Daten

Die Identifikation der Ormara-Mikroplatte

In den bathymetrischen Daten wurde eine sinistrale Blattverschiebung identifiziert, *Sonne Störung* genannt, die den vermessenen Teil des Makran Akkretionskeils SE-streichend durchzieht. Diese Störungszone führt zu einem nach Norden größer werden den Versatz der Akkretionsrücken, versetzt den Little Murray Ridge und die durch ihn verursachten magnetischen Anomalien. Sie separiert den westlichen und östlichen Teil der Makran Subduktionszone, die sich durch sehr unterschiedliche Seismizitätsmuster, sowie einen unterschiedlichen Abtauchwinkel und daraus resultierendem unterschiedlichen Abstand von quartären Vulkanen von der Deformationsfront charakterisieren lassen. Daher wurde sie als Plattengrenze identifiziert, die den nordöstlichsten Teil der Arabischen Platte abtrennt, die damit eine eigene Mikroplatte, genannt *Ormara Platte*, ist. Dieses neue plattentektonische Konzept für den Bereich der nordöstlichen Arabischen See wurde bei *Geology* zur Publikation eingereicht (Kukowski et al., 2000) und wird im Heft 28/4, April 2000 gedruckt (vgl. anliegende endgültige Fassung des Manuskriptes, Anlage 3).

Morphotektonik des Makran Akkretionskeils

Die kartierende Vermessung der Morphologie des Makran Akkretionskeils zeigt, daß er in seinem westlichen Bereich in einen unteren Hang mit einer Neigung von 1° bis 2°, eine fast ebene „mid-slope“, Terrasse und einen relativ steilen oberen Hang gegliedert werden kann. Im östlichen Teil fehlt

	Year	Month/Day	Origin Time	Latitude [N]	Longitude [E]	Depth [km]	Magnitude [Mb]
1	1997	09 / 13	183635.09	30.10	88.03	33	
2	1997	09 / 13	183809.50	30.12	88.19	33	4.30
3	1997	09 / 13	183827.88	27.64	53.07	10	4.30
4	1997	09 / 15	164110.61	30.09	88.29	33	
5	1997	09 / 16	164324.88	28.28	57.76	33	4.30
6	1997	09 / 17	012214.04	29.74	83.70	33	4.30
7	1997	09 / 17	214429.79	27.50	56.40	33	4.30
8	1997	09 / 18	073710.01	28.87	88.15	33	4.60
9	1997	09 / 18	145253.83	27.11	53.19	33	4.80
10	1997	09 / 18	202446.29	28.99	47.44	10	4.60
11	1997	09 / 19	203705.32	27.14	53.92	33	4.20
12	1997	09 / 20	032041.64	27.14	53.96	33	
13	1997	09 / 21	032850.22	31.51	72.06	33	4.10
14	1997	09 / 21	083727.24	26.94	53.98	33	
15	1997	09 / 21	152135.80	31.66	78.37	33	
16	1997	09 / 21	153103.85	31.86	78.61	33	

Table 1: Hypocentral parameters of regional events found in the NEIC catalogue. The events marked in bold were observed at the OBH network.

die „mid-slope,, Terrasse. Die Akkretionsrücken weisen eine sehr große Steilheit auf, was auf eine große Festigkeit des akkretierten Materials hinweist. Im Untersuchungsgebiet wurden zwei Canyon-Systeme identifiziert und näher analysiert. Die Ergebnisse der Interpretation der bathymetrischen Daten sind ausführlich in dem anliegenden Manuskript (Kukowski et al., eingereicht) beschrieben, das sich im Review-Verfahren bei *Marine Geology* befindet (Anlage 2).

Modellierung der Mechanik der Makran Akkretionskeils mit Hilfe von numerischen und analogen Methoden

Der multidisziplinäre Einsatz verschiedener geophysikalischer Meßmethoden im Rahmen des Projektes MAMUT stellt aufgrund der damit verbundenen hohen Datendichte eine sehr gute Basis für numerische Modellierungen dar. Basierend auf den Untersuchungsergebnissen der reflexions- und refraktionsseismischen Messungen, sowie den Fächerecholotmessungen können mit Hilfe numerischer und auch analoger Modellierungsmethoden die mechanischen Prozesse, die die Bildung des Makran Akkretionskeils kontrollieren, identifiziert werden. Diese Arbeiten wurden sehr erfolgreich auf internationalen Tagungen vorgestellt und werden in den nächsten Monaten zur Publikation vorbereitet.

Dabei kommt vor allem die finite Elemente Methode zum Einsatz. Aufbauend auf grundlegenden Untersuchungen zum Spannungsfeld in Akkretionskeilen (Kukowski et al., 1998) wurden Modellrechnungen für den Makran Akkretionskeil konzipiert und durchgeführt (Huhn et al., 1999). Dabei konzentrieren sich die Untersuchungen vor allem auf die Rolle des „mid-level detachments,, das die Basis für die frontal akkretierten imbrikierten Schuppen bildet. Die Ergebnisse der numerischen Modellierung werden durch die Resultate von Sandkastenanalogversuchen unterstützt und erweitert.

Grundlage für die Konstruktion des finite Elemente Gitters ist die kombinierte Interpretation des reflexionsseismischen Profils CAM30 (Fruehn et al., 1997, Abb.11a) und des koinzidierenden refraktionsseismischen Profils (Kopp et al., in press) (Abb.11b). Die obersten etwa 4km der an die Deformationsfront herangeführten Sedimente werden frontal akkretiert, während die unteren etwa 3 km unterschoben werden. Des weiteren kann in den refraktionsseismischen Daten ca. 40 km entfernt von der Deformationsfront ein unterplatteter Körper identifiziert werden. Während langzeitige frontale Akkretion typisch ist für einen mechanisch schwachen Abscherhorizont (Davis et al., 1983), tritt Unterplattung nur im Fall eines Dècollement mit hoher basaler Reibung auf (Gutscher et al., 1998).

Basierend auf diesen Kenntnissen zur Geometrie des Makran Akkretionskeils wurde ein Finite Elemente Gitter zur Modellierung des Spannungs- und Deformationsverhalten erzeugt (Abb. 11c). Dieses Modell umfaßt bei einer Länge von 115 km ca. 4000 *shell*-Elemente. Als Randbedingungen bei der Berechnung der Spannungs- und Deformationsraten wurden Gravitation, der durch die Wassersäule ausgeübte Druck und als iterativ zu berechnende Größe ein Displacement, welches implizit die Bewegung der Unterplatte darstellt, vorgegeben. Zur Beschreibung der Rheologie wurde ein tiefenabhängiger Coulomb-Ansatz verwendet.

Die Startwerte für die systemrelevanten Materialparameter, wie Elastizitätsmodul, Dichte, Kohäsion und interner Reibungswinkel, wurden mit Hilfe von vorangehenden intensiven Modellrechnungen an allgemeinen Akkretionskeilen abgeleitet. Dabei wurden bereits interne Reibungswinkel und Elastizitätsmodul als für das Spannungsfeld wichtigste Parameter bestimmt. Bei allen Berechnungen wurde eine tiefenabhängige Mohr – Coulomb - Rheologie verwendet.

Basierend auf diesem Modellaufbau wurden die Spannungsverteilungen und Deformationsraten in Abhängigkeit von der Zeit, die in Form der Displacements an der Platte gegeben werden, berechnet (Abb. 12, vgl. auch das im Kleinformat anliegende AGU-Poster, Anlage 6).

Bereits direkt nach dem Einsetzen der Bewegung entlang der Basis des Modells beginnen sich Scherspannungen an der Flanke des unterplatteten Körpers zu akkumulieren (Abb. 12a). Wie die Verschiebungen in Abb. 12a zeigen, liegen die maximalen Verschiebungswerte, dargestellt durch rot / pink in der Farbskalierung, vor bzw. direkt im Bereich der Deformationsfront. Verschiebungen sind aber im gesamten Akkretionskeil zu beobachten. Eine Ausnahme bildet nur der hinterlandwärtigste Teil des Modells, was sich mit Randeffekten erklären läßt. Die gesamte Displacementverteilung zeigt aber, daß unterhalb des schwachen Horizontes wesentlich geringere Verschiebungen berechnet wurden als oberhalb. Dies belegt, daß bereits bei sehr geringem Versatz entlang der unteren Platte das schwache mid – level - Dècollement aktiv beginnt zu agieren. Damit bestätigt sich die Annahme, daß ein schwaches Dècollement wesentlich früher zu aktivieren ist, als ein starkes Dècollement. Untersuchungen zu einem späteren Zeitschritt verdeutlichen (Abb. 12b), daß bereits nachdem eine Verschiebung von nur 10 m an der Basis aufgebracht wurde, der schwache Horizont vollständig aktiv ist. Es akkumulieren sich sehr hohe Scherspannungen kurz oberhalb des Schwächehorizontes im Bereich des unteren Hanges. Diese hohen Spannungswerte sind zu interpretieren als Resultat einer Gleitbewegung entlang des schwachen Dècollements. In diesem Bereich liegt somit der bevorzugte Ort des mechanischen Versagens. Untersuchungen der Verteilung der Displacements zeigen, daß nur noch Bewegungen oberhalb des Horizontes erfolgen. Auch hier korreliert die Lage der Deformationsfront mit maximalen Verschiebungen.

Mit dieser Modellierung konnte bzgl. der Untersuchung der mechanischen Prozesse, die die Bildung des Makran Akkretionskeils kontrollieren, gezeigt werden, daß das schwache mid – level – Dècollement wesentlich früher als das starke tiefer gelegene Dècollement aktiv wird, während dieses vollständig inaktiv bleibt. Es läßt sich daraus schlussfolgern, daß beide Dècollements sowohl räumlich als auch zeitlich unabhängig voneinander agieren.

Während finite Elemente Modellrechnungen es somit erlauben, Spannungen und Deformationen quantitativ abzuschätzen, bietet eine Analogmodellierung die Möglichkeit, Massentransfermuster

und Partikelwanderwege zu untersuchen. Im folgenden sind die Ergebnisse eines Experimentes beschrieben, mit dem die Rolle des mid-level-décollements untersucht wurde. Ein solches kann zur mechanischen Entkopplung von frontalem und basalem Bereich eines Akkretionskomplexes führen (Kukowski et al., in press). Im vorliegenden Experiment gibt bei einem Skalenfaktor von 10^5 die 7 cm mächtige Schicht aus verschiedenfarbigem Sand (zur Sichtbarmachung der Deformationsmuster) mit einer dünnen Schicht aus mikro-Glaskugeln in etwa 3cm Höhe die an die Makran Deformationsfront herangeführten Sedimente wieder. Der graue Körper stellt den „Buttress“, dar, an den die Akkretion erfolgt. Er läßt sich etwa mit dem älteren, nicht mehr in aktiver Deformation befindlichen Akkretionskomplex korrelieren, ist mechanisch fester (Mörtel), doch deformierbar. In diesem Experiment wurde keine direkte Abbildung der Geometrie angestrebt, sondern es galt, mögliche Transfermechanismen zu identifizieren.

Dieses Experiment zeigt eindrucksvoll den dominanten Einfluß der geringmächtigen Lage an mechanisch schwächerem Material auf die Evolution des Akkretionskomplexes. Der frontale Akkretionskeil wächst schnell nach vorn. Die basale Unterplattung unterhalb der hinteren Teils der zuerst gebildeten Akkretionsschuppen und der frontalen Teils des Buttress führt zu deutlichem Uplift (in Korrelation zu den Befunden für Makran). Der frontale Öffnungswinkel ist sehr gering, dabei ist zu berücksichtigen, daß subaerische Keile wie im Sandkasten wegen des Fehlens des Porenfluids deutlich größere Winkel zeigen als submarine (Dahlen et al., 1990). Im Übergang zum Bereich der Unterplattung weist der Hang fast keine Neigung auf. Somit vermag schon dieses relativ einfache Konzept viele Aspekte der Mechanik des Makran Akkretionskeils plausibel zu erklären und bildet eine gute Basis für weitergehende Ansätze. Während die Spannungsakkumulation entlang des schwachen „mid-level Décollements“, gering ist, sind hier folgend aus dem Zusammenhang des Coulomb-mechanischen Ansatzes erhöhte Fluiddrücke zu erwarten, ein gegensätzliches Bild ergibt sich für das basale starke Décollement.

7. Voraussichtlicher Nutzen

Die Erkenntnisse, die innerhalb dieses Projektes über den Makran Akkretionskeil und das Gebiet um Murray Ridge gewonnen wurden haben wesentlich zum Verständnis der Tektonik des Untersuchungsgebietes beigetragen. Im Makran Akkretionskeil ließen sich eindeutig mehrere mächtige Schichten niedriger seismischer Geschwindigkeit nachweisen. Ihr Auftreten wurde in dieser Form bisher noch nicht beobachtet und könnte ausschließlich tektonisch bedingt sein, oder aber mit dem Auspressen von Fluiden aus tieferen (älteren) Sedimenten zu tun haben. Den geologisch-tektonischen Vorgängen an konvergenten Plattenrändern kommt eine herausgehobene ökologische und ökonomische Rolle zu. Ihre komplexe Dynamik ist bisher noch wenig verstanden und eine große Anzahl wissenschaftlicher Gruppen befaßt sich zur Zeit mit der Modellierung unterschiedlicher Parameter in Akkretionskeilen. Die Kenntnis seismischer Geschwindigkeitsmodelle wie der vor Makran aufgenommenen, stellt für diese Modellierungen ein großes Potential an erforderlicher Datengrundlage dar.

Über den Ursprung von Murray Ridge und Dalrymple Trough gibt es bisher eine Vielzahl von Spekulationen. Ein entscheidendes Ergebnis dieses Projektes ist die Erkenntnis, daß hier ozeanische Kruste (im Norden) und kontinentale Kruste (im Süden) zusammentreffen. Aufgrund dieser Tatsache müssen bisher entwickelte Plattenrekonstruktionen zumindest in bestimmten Bereichen verändert werden, was zu einem grundlegend besseren Verständnis der tektonischen Entwicklung des gesamten Gebietes beiträgt. Weiterführende Veröffentlichungen zu der in Anlage 4 beigefügten Arbeit sind bereits in Planung.

8. Ergebnisse Dritter

Dazu zählen die Arbeiten von v. Rad et al., (in press at GeoMarine Letters) und Burgath et al. (submitted to GeoMarine Letters). Sie basieren auf Daten, die während der SONNE Fahrt SO130 aufgenommen wurden. Die Ergebnisse sind, ebenso wie die Resultate der Fahrten SO122 und SO124 in eigenen Berichten dargestellt.

Literaturverzeichnis

- Bialas, J. and Flueh, E. R., 1999: Ocean Bottom Seismometers; *Sea Technology*, 40, 4, 41-46.
- Burgath, K.P., von Rad, U., Block, M., Khan, A. A., Roeser, H. A., Weiss, W.: Ophiolite-type island-arc basalt and depleted peridotite from the Murray Ridge (Northeastern Arabian Sea), submitted to *GeoMarine Letters*.
- Byrne, D.E., L.R. Sykes, and D.M. Davis, 1992: Great thrust earthquakes and aseismic slip along the plate boundary of the Makran subduction zone. *J. Geophys. Res.*, 97, 449-478.
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., Stein, S., 1990: Current plate motions. *Geophysical Journal International*, 101, 425-478.
- Edwards, R. A., White, R. S., Minshull, T. A., 1995: Oblique extension across the Murray Ridge, NW Indian Ocean. AGU Fall Meeting San Francisco.
- Flueh, E. R., Kukowski, N. und C. Reichert (eds). Cruise Report SO 123 MAMUT, GEOMAR Report Vol. 62, 292pp, 1997.
- Gordon, R. G., DeMets, C., 1989: Present-day motion along the Owen Fracture Zone and Dalrymple Trough in the Arabian Sea. *Journal of Geophysical Research*, 94, 5560-5570.
- Gutscher M-A, Kukowski N, Malavieille J & SE Lallemand (1998): Material transfer in accretionary wedges from analysis of a systematic series of analog experiments. - *Journal of Structural Geology*, Vol. 20, 407 - 416
- Harms, J. C., Cappel, H. N. and Francis, D. C., 1984. The Makran coast of Pakistan: Its stratigraphy and hydrocarbon potential. In: Haq, B. U. and Milliman, J. D. (Editors), *Marine Geology and Oceanography of Arabian Sea and Coastal Pakistan*: 3-27.
- Hutchison, I., Loudon, K. E., White, R.S., 1981: Heat flow and age of the Gulf of Oman. *Earth and Planetary Science Letters*, 56, 252-262.
- Kopp C, Frühn J, Flueh ER, Reichert C, Kukowski N, Bialas J, Klaeschen D (2000): Seismic wide-angle investigations of the Makran subduction zone. – *Tectonophysics*, in press
- Kukowski N, Malavieille J, Gutscher M-A, Lallemand SE & TJ Reston: Mechanical decoupling and basal duplex formation observed in sandbox experiments with application to the Western Mediterranean Ridge accretionary complex. - *Marine Geology*
- Kukowski N, Schillhorn T, Flueh ER, Huhn K (2000): A newly identified transform plate boundary through the Makran accretionary wedge. – *Geology*, Vol. 28/4
- Kukowski N, Schillhorn T, Huhn K, von Rad U, Husen S & ER Flueh. The Makran accretionary wedge: morphotectonic analysis, erosive canyons, and implications for forearc mechanics. *Subm. to Mar. Geol.*
- Minshull, T. A., White, R. S., Barton, P. J., Collier, J. S., 1992: Deformation at plate boundaries around the Gulf of Oman. *Marine Geology*, 104, 265-277.
- von Rad, U., Berner, U., Delisle, G. Dooze-Rolinski, H., Fechner, N., Linke, P., Lückge, A., Roeser, H. A., Schmaljohann, R., Wiedicke, M., SONNE 122/130 Scientific Parties, in press at *GeoMarine Letters*.
- White, R. S., 1982. Deformation of the Makran accretionary sediment prism in the Gulf of Oman (north-west Indian Ocean). In: Leggett, J. K. (Editor), *Trench and Fore-Arc Geology: Sedimentation and Tectonics on Modern and Ancient Active Plate Margins*: 357-372.
- White, R. S., Loudon, K. E., 1983. The Makran Continental Margin: Structure of a Thickly Sedimented Convergent Plate Boundary. In: J. S. Watkins and C. L. Drake (Editors), *Studies in Continental Margin Geology*. Mem. Am. Ass. Petrol. Geol. 34: 499-518.

9. Liste der Vorträge und Veröffentlichungen

9.a Veröffentlichungen:

- Bialas, J. and Flueh, E. R., 1999: Ocean Bottom Seismometers; *Sea Technology*, 40, 4, 41-46.
(Anlage 5).
- Edwards, R. A., Minshull, T. A., Kopp, C., Flueh, E. R., to be submitted to *EPSL*: Dalrymple Trough: An active strike-slip ocean-continent boundary in the northwest Indian Ocean; (Anlage 4).
- Flueh, E. R., Kukowski, N. und C. Reichert (eds). Cruise Report SO 123 MAMUT, GEOMAR Report Vol. 62, 292pp, 1997.

N. Kukowski, T. Schillhorn, E. R. Flueh, K. Huhn & the MAMUT Working Group: A newly identified transform plate boundary trough the Makran accretionary wedge, *Geology*, in press, (**Anlage 3**)

Kukowski, N., Schillhorn, T., Huhn, K., v. Rad, U., Husen, S., Flueh, E. R., submitted to *Marine Geology: Morphotectonics of the central Makran Accretionary wedge off Pakistan*; (**Anlage 2**).

C. Kopp, J. Fruehn, E.R. Flueh, C. Reichert, N. Kukowski, J. Bialas, D. Klaeschen: Seismic wide-angle investigations of the Makran Subduction Zone; *Tectonophysics*, in press (**Anlage 1**).

9.b Tagungsbeiträge

Göttingen: 58. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGG), 30. März - 3. April 1998

Flueh ER für die MAMUT Working Group: Vortrag: Erste Ergebnisse der SONNE Fahrt 123 - MAMUT

Schillhorn T, Kukowski N, Flueh ER, Reichert C & MAMUT Working Group: Vortrag: Morphologie des Makran-Akkretionskeils zwischen 62°E and 63.5°E - Ergebnisse der Forschungsfahrt SO123

Nizza: XXIII General Assembly of the European Geophysical Society, 20.-24. April 1998

Flüh ER for the MAMUT Working Group: Vortrag: First Results of SONNE Leg SO123 - MAMUT.

Minshull TA, Edwards RA, White RS, Flüh ER and Kukowski N: Vortrag: Crustal structure of the Murray Ridge and Dalrymple Trough: Lithosphere under oblique extension.

Schillhorn T, Kukowski N, Flüh ER, Reichert C & MAMUT Working Group: Vortrag: Morphotectonics of the Makran accretionary wedge

Schillhorn T, Kukowski N, Flüh ER, and the MAMUT Working Group: Vortrag: Interaction of two active decollements and antiformal stacking in sandbox accretionary wedges

Barcelona: 8th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their Margins, 20.-25. September 1998

Kopp C, Fröhn J., Flüh ER, Reichert C, Kukowski N and Kläschen D: Poster: Seismic investigations of the Makran accretionary wedge

San Francisco: American Geophysical Union (AGU) 1998 Fall Meeting, 6. - 10. Dezember

Edwards RA, Minshull TA, Flüh ER, Kukowski N, Reichert C and the M. Working Group: Poster: Crustal Structure of the Dalrymple Trough: A Strike-slip Ocean –continent Boundary in the North-west Indian Ocean

Huhn K, Kukowski N, Schillhorn T, Flüh ER and the MAMUT Working Group: Poster: Morphotectonics of the Makran accretionary wedge imply new aspects for the plate tectonic situation in the northeast Indian Ocean

Kopp C, Fröhn J, Flüh ER, Reichert C: Poster: Seismic Images of the Makran Subduction Zone

Gastvorträge von GEOMAR-Mitarbeitern

Flüh ER: Results of SONNE cruise SO 123 - MAMUT, NIO, Karachi, Pakistan, 4.05.1998

Braunschweig: 59. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGG), 8. – 12. März 1999

Huhn, K., Kukowski, N., Schillhorn, T., Flüh, E. und die MAMUT Working Group: Vortrag: Die Ormara – Platte – eine neue Mikroplatte im nordwestlichen Indischen Ozean.

Kopp, C., Fröhn, J., Flüh, E., Reichert, C.: Poster: Seismic Investigations of the Makran Accretionary Wedge

Freiberg: Meeresforschung mit FS SONNE - Statusseminar 1999, 10. - 12. März 1999

Kopp, C., Fröhn, J., Flüh, E.R., Reichert, C., Kukowski, N. und Kläschen, D.: Poster: Seismic Investigations of the Makran Accretionary Wedge

Kukowski, N., Schillhorn, T., Flüh, E.R., Huhn, K., Husen, S., Rad, U. von und die MAMUT Working Group: Poster: From bathymetric images to plate tectonic implications: The Makran convergent margin.

Kukowski, N., Schillhorn, T., Flüh, E.R., Huhn, K., Husen, S., Rad, U. von und die MAMUT Working Group: Vortrag: From bathymetric images to plate tectonic implications: The Makran convergent margin.

Minshull TA, Edwards RA, Flüh ER, Kopp C and Reichert C: Poster: SO123: Crustal structure of the Murray Ridge - preliminary results

European Union of Geosciences (EUG) 10, Straßburg, 28. März bis -1. April 1999

Huhn, K., Kukowski, N., Schillhorn, T., Flüh, E. und die MAMUT Working Group: Vortrag: The Ormara Plate - A Micro Plate in the North-East Part of the Arabian Sea Evident from the Makran Accretionary Wedge Bathymetric Image.

European Geophysical Society (EGS) XXIV General Assembly, Den Haag, 19.-23. April 1999

Kopp, C., Fröhn, J., Flüh, E.R., Reichert, C.: Poster: Tectonics of the Makran continental margin.

San Francisco: American Geophysical Union 1999 Fall Meeting, 13.-17. Dezember 1999

Huhn K, Kukowski N, Kopp C: Poster: Numerical Finite Element modelling of the deformation and mechanical behavior of the Makran accretionary wedge offshore Pakistan (s. Anlage 5).

Danksagung

Wir danken dem BMFT für die gewährte Unterstützung und dem Projektträger BEO-Warnemünde für die unbürokratische administrative Abwicklung. Besonderer Dank gilt Kapitän Andresen und der Besatzung des FS SONNE für ihre Kooperation während der Ausfahrt .

Erfolgskontrollbericht

1. Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms

Das Vorhaben ist eingebettet in das Programm Meeresforschung und Meerestechnik der Bundesregierung und berührt die unter 4.1.1 Geowissenschaftliche Grundlagenforschung genannten Aufgaben mit dem besonderen Schwerpunkt auf den geologischen Prozessen in Raum und Zeit an Kontinentalrändern und der Grundlagenforschung zu Umweltfragen. Es stellt weiterhin einen wichtigen deutschen Beitrag zur IDNDR (International Decade of Natural Disaster Reduction) dar. Ziel der IDNDR ist es, die negativen Auswirkungen natürlicher Katastrophen zu vermindern. Dazu sind grundlegende Erkenntnisse über die Ursachen dieser Prozesse notwendig, die hier im Rahmen des Vorhabens am Makran Akkretionskeil erarbeitet wurden. Das Arbeitsgebiet zeichnet sich durch den weltweit mächtigsten Akkretionskeil, eine moderate Konvergenzrate, sowie eine generell sehr geringe Seismizität aus. Durch vergleichende Untersuchungen mit anderen Subduktionszonen können ihre Ursachen und mögliche Wechselwirkungen besser verstanden werden.

2. Wissenschaftlicher und technischer Erfolg des Vorhabens

Die wissenschaftlichen Erfolge des Projektes sind in den dem Schlußbericht beigelegten fünf Publikationen sowie dem Fahrtbericht ausführlich beschrieben. Auf zahlreichen Tagungen wurde über das Projekt berichtet, und weitere Arbeiten, die auf den vorgelegten Ergebnissen aufbauen, wurden bereits initiiert.

3. Finanzierungs- und Zeitplan

Der im Antrag vorgestellte Finanzierungs- und Zeitplan wurde im wesentlichen eingehalten, kleinere Änderungen im Finanzierungsplan wurden nach Rücksprache mit dem Projektträger vereinbart.

4. Verwertbarkeit der Ergebnisse und die Verwertungsmöglichkeiten

Die gewonnenen Ergebnisse stellen die Grundlage für eine Reihe von weiterführenden Programmen dar, mit deren Realisierung teilweise bereits begonnen wurde. Dabei handelt es sich vornehmlich um rein wissenschaftliche Zielsetzungen, die jedoch auch von unmittelbarer Bedeutung für die seismische Risikoabschätzung und ein verbessertes Verständnis der Prozesse bei der Gashydratbildung und -zersetzung und somit auch für klimarelevante Fragestellungen aktuell sind.

5. Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen

Diese wurden nicht geltend gemacht.

6. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

An einer Reihe von Teilaspekten wird noch gearbeitet, diese Fragestellungen entstanden erst während der Laufzeit des Projektes.

Verzeichnis der Anlagen

Anlage 1, Reprint der Arbeit:

C. Kopp, J. Fruehn, E.R. Flueh, C. Reichert, N. Kukowski, J. Bialas, D. Klaeschen, in press:
Structure of the Makran Subduction Zone from wide-angle and reflection seismic data,
Tectonophysics.

Anlage 2, Reprint der Arbeit:

Kukowski, N., Schillhorn, T., Huhn, K., v. Rad, U., Husen, S., Flueh, E. R., submitted to Marine
Geology: Morphotectonics of the central Makran Accretionary wedge off Pakistan

Anlage 3, Reprint der Arbeit:

Kukowski, N., Schillhorn, T., Flueh, E. R., Huhn, K., in press in Geology: A newly identified
strike-slip plate boundary in the northeastern Arabian Sea

Anlage 4, Preprint der Arbeit:

Edwards, R. A., Minshull, T. A., Kopp, C., Flueh, E. R., to be submitted to EPSL: Dalrymple
Trough: An active strike-slip ocean-continent boundary in the northwest Indian Ocean

Anlage 5, Reprint der Arbeit:

Bialas, J. and Flueh, E. R., 1999: Ocean Bottom Seismometers; *Sea Technology*, 40, 4, 41-46.

Anlage 6, AGU Fall Meeting, 1999, Poster:

Huhn, K., Kukowski, N., Kopp, C.: Finite Element modelling of the deformation and mechanical
behaviour of the Makran accretionary wedge offshore Pakistan

Kurzfassung (für Berichtsblatt und Document Control Sheet), ca 1/2 Seite, jeweils deutsch und englisch

Das Hauptziel des Vorhabens war es, zu einem besseren Verständnis des Aufbaus der Krustenstruktur und der geodynamischen Prozesse am Makran Akkretionskeil und im Bereich des Murray Rückens zu gelangen.

Die Makran Subduktionszone zeichnet sich durch einen hohen Sedimenteintrag von etwa 7 km aus. Unterhalb des Decollements wird ein etwa 3 km mächtiges Sedimentpaket unter den Akkretionskeil subduziert und vermutlich zu einem großen Teil diesem durch Underplating angelagert. Im hinteren Akkretionskeil in eine Abfolge von Schichten hoher und niedriger Geschwindigkeit deutlich erkennbar. Die subduzierende ozeanische Kruste ist durch einen ungewöhnlich starken Geschwindigkeitskontrast zwischen Ober- und Unterkruste charakterisiert, der durch ausgeprägte Weitwinkelreflexionen belegt ist.

Die Auswertung der seismischen Daten über den Murray Rücken/Dalrymple Trog deutet auf eine ungestörte ozeanische Krustenstruktur nördlich des Dalrymple Trog hin. Eine starke Reflexion von der Grenze zwischen Layer 2 und Layer 3 wird auch hier bis in den Steilwinkelbereich der seismischen Daten beobachtet. Der Übergang von der mächtigen Kruste des Murray Rückens zu geringer Krustendicke nördlich des Dalrymple Grabens wird als Übergang von kontinentaler zu ozeanischer Lithosphäre interpretiert. Die ozeanische Kruste scheint südöstlich des Murray Rückens besonders dünn zu sein und weist sehr hohe seismische Geschwindigkeiten auf.

Auf den bathymetrischen Daten des Makran Akkretionskeils ist eine NW-SE orientierte, links-laterale strike-slip Verwerfung deutlich zu erkennen, die sich durch den gesamten Sedimentkeil zieht. In Kombination mit den hier zusammenlaufenden Plattengrenzen zwischen Eurasischer, Arabischer und Indischer Platte, kann somit die Existenz einer neuen Mikroplatte südöstlich von Makran gefolgert werden.

Schlagwörter: Kontinentalränder, Seismik, Ozeanbodenseismometer, Seismizität, Akkretion, Makran, Murray Rücken, Pakistan

The main objective of the project was to derive a better understanding of the crustal structure and geodynamic evolution of the Makran accretionary wedge and Murray Ridge.

The Makran Subduction Zone is characterized by a high input of sediments of about 7 km. Below the decollement, a sediment layer of about 3 km thickness is subducted beneath the accretionary wedge. Possibly a large portion of this sediment is added to the northern part of wedge by underplating. In the landward part of the wedge, a sequence of changing high and low velocities is clearly visible. The subducting oceanic crust shows an unusual high velocity contrast between upper and lower crust. Pronounced wide-angle reflections support this feature.

The interpretation of seismic data across Murray Ridge and Dalrymple Trough yield an undisturbed oceanic crustal structure north of the Dalrymple Trough. Here, a strong reflection between oceanic layer 2 and 3 is observed at large and small offsets. The transition from thick crust of the Murray Ridge to thin crust north of the Dalrymple Trough is interpreted as a transition from continental to oceanic lithosphere. South of the Murray Ridge the crust is particularly thin, with high seismic velocities.

The bathymetric data of the Makran accretionary wedge show a NW-SE trending strike-slip fault, clearly cutting through the whole wedge. In combination with the merging plate boundaries of the Eurasian, Arabian and Indian Plates, the existence of a new microplate can be concluded in southeast Makran.

Key words: continental margins, seismics, ocean bottom seismometers, seismicity, accretion, Makran, Murray Ridge, Pakistan