

Zweijahresbericht

GeoForschungsZentrum Potsdam
in der Helmholtz-Gemeinschaft

2002/2003

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Das System Erde – Forschungsgegenstand des GFZ Potsdam	V
Aus der wissenschaftlichen Arbeit	
DESERT - Struktur und Dynamik der Dead Sea Transform	1
Ein Ozean taucht ab: Ergebnisse zur Dynamik des aktiven Kontinentalrandes in Südchile	19
Lithium-, Bor-, Strontium-, Neodym- und Blei-Isotope als Monitore fluid-induzierter Mineralreaktionen in kontaktmetamorphen Marmoren	35
Dimensionen und Dynamik des Kohlenstoffkreislaufs in Sedimentbecken	45
MALLIK - Gashydrate unter Permafrost	59
Trizonia Island – simultanes Deformations- und Temperaturmonitoring mit faseroptischen Sensoren in einer Rift-Bohrung	77
Kleine Proben – große Aussagen: Experimente als „Fenster in das Innere der Erde“	85
Focused Ion Beam-Technik FIB: eine Nanotechnologie ermöglicht neue Erkenntnisse in den Geowissenschaften	99
GRACE - Eine Schwerefeld- und Klimamission	109
Signaturen des Erdmantels im Schwerefeld der Erde	119
Die Departments	
Department 1 „ <i>Geodäsie und Fernerkundung</i> “	126
Department 2 „ <i>Physik der Erde</i> “	166
Department 3 „ <i>Geodynamik</i> “	238
Department 4 „ <i>Chemie der Erde</i> “	280
Department 5 „ <i>Geoengineering</i> “	332
Gremien des GFZ Potsdam	361
Organisation, Verwaltung und zentrale Dienste	362
Personal- und Sozialwesen	
Haushalt und Finanzen	
Bibliothek des Wissenschaftsparks Albert Einstein	
ICDP Operational Support Group	
Daten- und Rechenzentrum	
Das Jahr der Geowissenschaften 2002	
Auszeichnungen und Ehrungen	394
Habilitationen, Promotionen	394
Ausgewählte Publikationen 2002/2003	396
Glossar	406

DESERT - Struktur und Dynamik der Dead Sea Transform

Michael Weber, Oliver Ritter, Ute Weckmann, Nils Maercklin, Christoph Janssen, Ayman Mohsen, Georg Rümpker, Hans-Jürgen Förster, Stephan Sobolev

It goes without saying that planet Earth is dynamic - the actual shape of the Earth's outer shell is continuously being formed and changed through processes of plate tectonics. Three key elements in the deformation and movement of these massive plates are

- 1. plate rifting*
- 2. plate subduction in the Earth's mantle*
- 3. horizontal transform faulting*

Despite numerous investigations at different fault zones such as the San Andreas Fault Zone in California (SAF), essential processes controlling such large transforms could not yet be fully understood. The Dead Sea Transform is, alongside the SAF, a key location for the study of transform faulting (Fig. 1) The apparently simple structure of the DST system and the relatively low movement rate of approx. 0.5 cm per year distinguishes the DST significantly from the SAG which moves at a rate of 3.5 cm per year due to the complicated interaction of oceanic plate movement. Apart from the necessity for basic research, a further important reason for our study is that the investigation of historical earthquakes, paleoseismic studies and instrumental seismology over the past 100 year have shown that a number of destructive earthquakes have occurred along the DST. The DST, thus, represents a significant seismic risk for the inhabitants of Palestine, Israel and Jordan.

Due to the political situation in the Middle East in recent years, an investigation of the DST has not been possible up to now. The Dead Sea Rift Transect (DESERT) project is thus the first geoscientific project to cross the DST (DESERT Group, 2000; 2003). This research group aims to study

- the structure and dynamic of the crust and the outer Earth's mantle*
- the fine structures and dynamic of the DST*
- the thermal conditions and the geodynamic evolution.*



Abb. 1: Migmatit aus der Abu-Barqa Metamorphic Suite (Wadi Abu-Barqa). Die dunklen Melanosome bestehen aus parametamorphen Sillimanit-Granat-Schiefern und -Gneisen, die hellen Leukosome sind Granodiorite und Pegmatite der Turban Suite (Foto: H.-J. Förster, GFZ).

Migmatite of the Abu-Barqa Metamorphic Suite (Wadi Abu-Barqa). The dark melanosoms consist of parametamorphic sillimanite-garnet schists and gneisses, the light leucosomes are granodiorites and pegmatites of the Turban Suite.

Wir leben auf einem dynamischen Planeten, dessen äußere Form durch Prozesse der Plattentektonik geformt und laufend verändert wird. Drei Schlüsselemente bei der Deformation und Bewegung der Erdplatten sind: (1) Das Aufbrechen von Platten (rifting), (2) Das Abtauchen von Platten in den Erdmantel (subduction) und (3) Das horizontale Vorbeigleiten/Schrammen der Platten (transform faulting); das Thema diese Beitrags.

Die wichtigsten Prozesse, die die großen Transformstörungen kontrollieren, sind trotz vieler Untersuchungen an verschiedenen Scherzonen, wie z.B. der San Andreas Fault (SAF), noch nicht vollständig verstanden. Die Dead Sea Transform (DST) ist deswegen neben der SAF eine der Schlüssel-Lokationen für die Untersuchung von Transformstörungen (Abb. 2). Die scheinbar einfache Struktur des DST-Systems und die relativ geringe Bewegungsrate von ca. 0,5 cm/Jahr unterscheidet die DST andererseits aber auch deutlich von der SAF, welche durch komplizierte Interaktion ozeanischer Mikroplatten an einem akkretierten Kontinentalrand gekennzeichnet ist und größere relative Plattenbewegungen (3,5 cm/Jahr) aufweist. Ein weiterer wichtiger Grund für unsere Studien ist neben grundlegenden Fragen, dass die Untersuchung historischer Erdbeben, paläoseismische Untersuchungen und die instrumentelle Seismologie der letzten hundert Jahre (Abb. 2) gezeigt haben, dass eine Reihe zerstörerischer Erdbeben entlang der DST aufgetreten sind. Die DST stellt somit für die Anlieger Palästina, Israel und Jordanien ein signifikantes seismisches Risiko dar.

Aufgrund der politischen Lage im Nahen Osten war allerdings eine Untersuchung der DST bisher nicht möglich. Das **DEAD SEA RIFT TRANSECT (DESERT)** Projekt ist nun das erste geowissenschaftliche Projekt, das die DST überquerte (DESERT Group, 2000; 2003; Abb. 2, 3). Es versucht folgende offene Fragen zu beantworten:

- Wie sieht die Struktur und die Dynamik der Kruste und des oberen Erdmantels im Bereich der DST aus ?
- Wie sieht die kleinräumige Struktur und Dynamik der DST aus ?
- Was sind die thermischen Bedingungen und wie lief die geodynamische Entwicklung ab ?

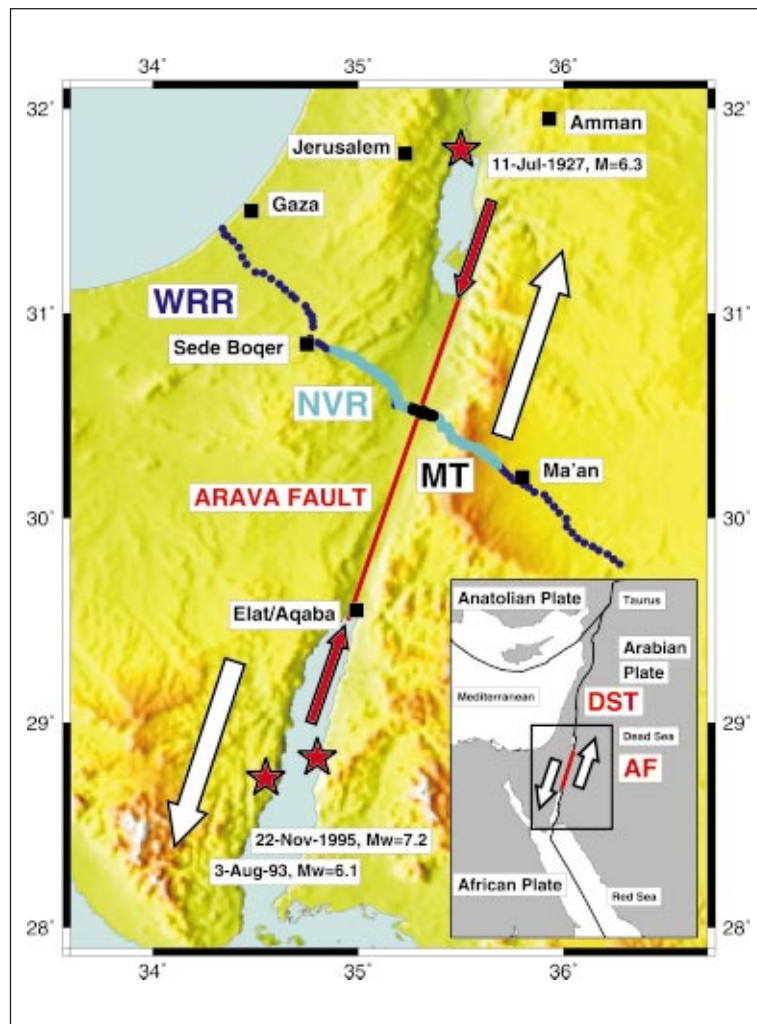


Abb. 2: Lage der DESERT-Profile im Nahen Osten und tektonischer Rahmen der Dead Sea Transform (DST; Insert). Das 260 km lange seismische Weitwinkel-Profil (WRR, blaue Punkte) quert Palästinensisches Territorium, Israel und Jordanien. Das Steilwinkel-Profil (NVR, Zyan) liegt auf den innersten 100 Kilometern des WRR-Profiles. Das Magnetotellurik-Profil (MT, schwarze Punkte) liegt wiederum auf den innersten 10 Kilometern des NVR-Profiles. Die rote Linie und die roten Pfeile kennzeichnen die Arava Fault (AF, das dominante Segment der DST im Arava-Tal) zwischen dem Toten Meer und dem Roten Meer. Die weißen Pfeile zeigen die sinistrale Verschiebung von 105 km zwischen der Afrikanischen und der Arabischen Platte. Rote Sterne markieren die Epizentren der großen Erdbeben der letzten hundert Jahre.

DESERT profiles in the Middle East and tectonic setting of the Dead Sea Transform (DST; insert). The 260 km long wide-angle reflection/refraction profile (WRR, blue dots) crosses Palestine, Israel and Jordan. The near-vertical seismic reflection profile (NVR, cyan) coincides with the inner 100 km of the WRR-profile. The magnetotelluric (MT)-profile coincides with the inner 10 km of the NVR-profile. A red line and two red arrows indicate the Arava Fault (AF) between the Dead Sea and the Red Sea. The white arrows indicate the left-lateral motion of 105 km between the African and Arabian plates. Red stars mark the epicenters of large earthquakes.

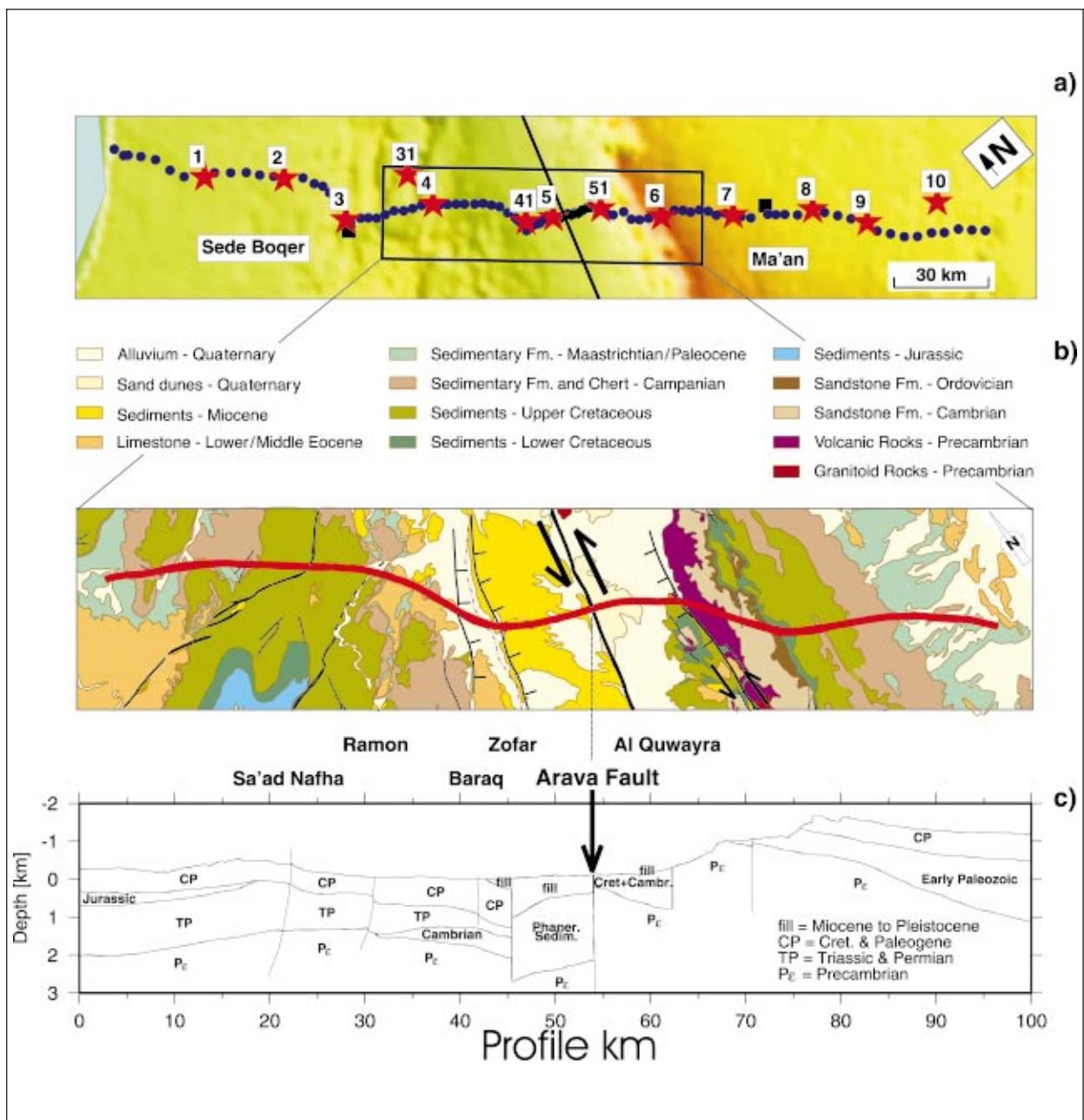


Abb. 3:

(a) Karte des WRR-Profiles mit 13 Schüssen (rote Sterne) und den 99 Dreikomponenten-Seismometern (blaue Punkte, 1 bis 4,5 km Abstand). Die 125 Vertikal-Komponenten-Geophongruppen (schwarze Punkte zwischen Schuss 5 und 51) hatten einen Abstand von 100 m entlang der 12,5 km langen Auslage im Arava-Tal.

(b) Vereinfachte geologische Karte entlang des NVR-Profiles. Die rote Linie ist die geglättete Reflexionslinie des NVR-Profiles. Die Anregung erfolgte durch 5 Vibratoren (50 m Schußabstand) und die Registrierung durch roll-along, d.h. kontinuierliches Umbauen einer 18 km langen Auslage mit 100 m Empfängerabstand. Sechs große Scherzonen (Saad Nafha, Ramon, Baraq, Zofar, Arava, Al Quwayra) sind in Schwarz eingezeichnet.

(c) Geologischer Tiefenschnitt entlang des NVR-Profiles. Die AF ist das dominante Segment der DST im Arava-Tal.

(a) Location map for the WRR-profile. During the experiment 13 shots (red stars) were executed and recorded by 99 three-component instruments (blue dots) spaced 1 to 4.5 km apart along the whole length of the profile and 125 vertical component geophone groups (black dots between shots 5 and 51) with 100 m spacing along a 12.5 km long section of the profile in the Arava Valley.

(b) Simplified geological map of the NVR-profile area. The red line is the smoothed reflection line of the NVR-profile. The sources were 5 vibrators (50 m shot spacing) and the receiver line was realized via an 18 km long roll-along with 100 m spacing. Six dominant faults (Saad Nafha, Ramon, Baraq, Zofar, Arava, Al Quwayra) are indicated in black.

(c) Geological cross section along the NVR-profile. The AF is the dominant segment of the DST in the Arava Valley.

Struktur und Dynamik von Kruste und oberem Erdmantel

Hier werden die Ergebnisse seismischer Weitwinkel- und Steilwinkel- Messungen (WRR- und NVR-Profile), sowie die Receiver-Function-Ergebnisse (RF; vgl. auch Zweijahresbericht 2000/2001) und die Untersuchung der Anisotropie dargestellt. Das im Rahmen von DESERT für ein Jahr betriebene temporäre seismologische Netz in Israel, Palästina und Jordanien hatte eine Apertur von ca. 250 km in NW-SO-Richtung und 150 km in SW-NO-Richtung. Zentrale Fragen, welche mit diesen Untersuchungen beantwortet wurden, sind:

(1) Wie sieht die krustale Struktur im Bereich der DST aus ?

Das wesentliche Merkmal der Krustenstruktur im Bereich der DST ist die stetige Zunahme der Krustendicke (Abb. 4a) von ca. 25 km im Nordwesten (Gaza, Mittelmeer) auf ca. 39 km im Südosten (südöstlich von Ma'an). Diese

Zunahme, sowie die kleine asymmetrische Topographie der Moho unter der Arava Fault (<1,5 km) ist sowohl in den NVR- als auch den WRR-Daten beobachtbar. Abb. 5 zeigt die aus den RF abgeleiteten Moho-Tiefen und die zugehörigen v_p/v_s Verhältnisse. In Abb. 6 sind die Ergebnisse der drei Methoden (Steil- und Weitwinkel-Seismik und RF) entlang des Steilwinkel-Profiles (rote Linie in Abb. 5) dargestellt. Die Moho-Tiefen stimmen sehr gut überein, d.h. die Tiefe der Moho nimmt entlang des Profils nach Osten zu, und die Arava Fault (AF) führt nur zu einer kleinen Topographie in der Moho. Mit der flächenhaften Verteilung der Stationen des seismologischen Netzes erkennt man zusätzlich, dass östlich der AF die Moho nördlich und südlich des seismischen Profils wieder auf Werte um 33 km ansteigt. Eine auffällige Struktur in der Unterkruste ist die Zone hoher Reflektivität in ca. 28 km Tiefe zwischen Profilkilometer 78 und 92 (Abb. 4b). Reflexionen von dieser Struktur sind auch in den WRR-Daten sichtbar, wurden jedoch im WRR-Modell nicht berücksichtigt, weil sie keine starken seismischen Einsätze produzierten.

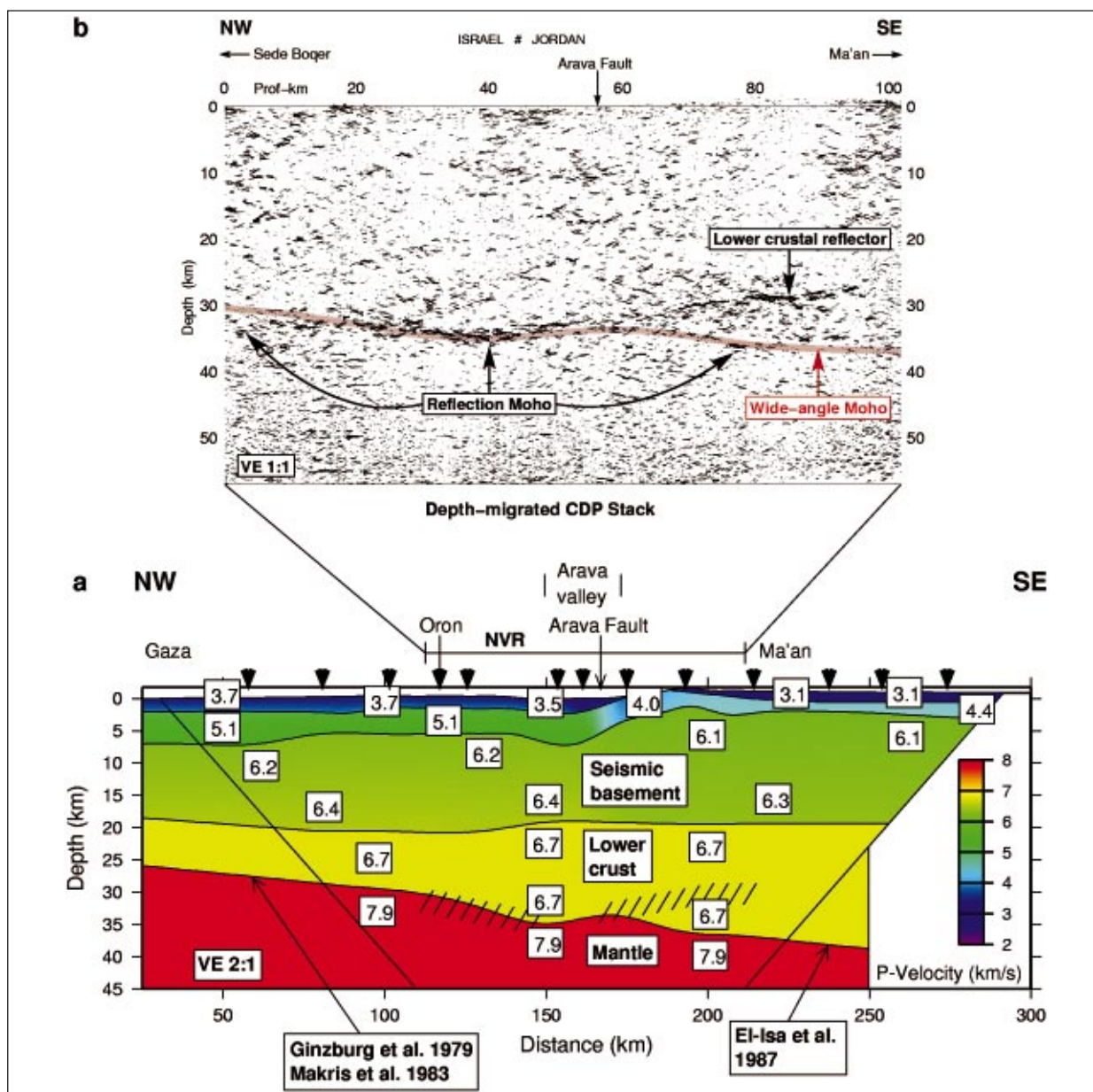


Abb. 4: (a) 2-D-P-Wellen-Geschwindigkeitsmodell (Geschwindigkeiten in km/s) für das WRR-Profil. Die Schüsse (Dreiecke am oberen Rand) wurden von 99 Dreikomponenten Seismometern entlang des ganzen WRR-Profiles und den 125 Vertikal-Komponenten Geophon-Gruppen im Arava Tal registriert (siehe auch Abb. 3a). Nur der zentrale Bereich innerhalb der diagonalen Linien ist hier aufgelöst. Außerhalb dieses Gebiets basiert das Modell auf früheren Arbeiten. Die schraffierten Symbole nahe der Moho (Kruste-Mante-Grenze), die mit dem Farbsprung von gelb auf rot zusammenfällt, kennzeichnen die Lage des Bands starker Reflexionen in der NVR-Sektion. Die vertikale Überhöhung ist 2:1. (b) Auto-matisches Line-Drawing der tiefenmigrierten Common Depth Point (CDP) Sektion des NVR-Profiles (Abb. 2, 3). Die rote Linie stellt die Moho aus dem WRR-Profil in (a) dar. Die schwarzen Pfeile zeigen die untere Grenze der starken unterkrustalen Reflektivität in den NVR-Daten, welche typischerweise als Moho in Reflexionsdaten interpretiert wird.

(a) 2-D P-velocity model (velocities in km/s) for the WRR-profile. The shots (triangles at top) were recorded by 99 three-component instruments along the whole profile and 125 vertical component geophone groups in the Arava Valley (see also Fig. 3a). Only the central area inside the diagonal lines is resolved in this study. Outside this area the model is based on previous work. The hatched symbols near the Moho (crust/mantle boundary), the border between yellow and red colors, indicate the location of bands of strong reflections in the NVR migrated section. Note vertical exaggeration of 2:1. (b) Automatic line drawing of the depth-migrated seismic CDP section of the NVR-profile (Figs. 2, 3). The red band indicates the location of the Moho as derived from the WRR-profile in (a). The black arrows mark the break-off of reflectivity, generally interpreted as the Moho in seismic reflection data.

Auch in den RF (Abb. 6, gelbe Rauten) ist noch eine Diskontinuität in der unteren Kruste östlich der AF zu erkennen. Ein möglicher Grund für diese starken Reflektoren könnte *Underplating* im Zusammenhang mit der in der Region beobachteten starken magmatischen Aktivität im Späten Präkambrium/Frühen Kambrium, in der Kreide oder im Neogen sein. Eine andere Möglichkeit wäre eine Zone lokalisierter Deformation an der Basis der Kruste (Sobolev et al. 2003).

(2) Schneidet die DST durch die ganze Kruste ?

Die Abbildung steilstehender Strukturen mittels NVR-Profilen ist nicht trivial (siehe Maercklin et al., 2003, für einen neuen Ansatz). Obwohl die DST in Satellitendaten als nahezu gerade Linie sichtbar ist, ist sie in den Common Depth Point (CDP) -Daten (Abb. 4b) nicht eindeutig zu identifizieren. Folgende Gründe sprechen allerdings dafür, dass die DST durch die ganze Kruste reicht: (a) In Moho-Tiefe zeigt eine ca. 15 km breite Zone unter der AF (Profil-kilometer 54 bis 70) eine

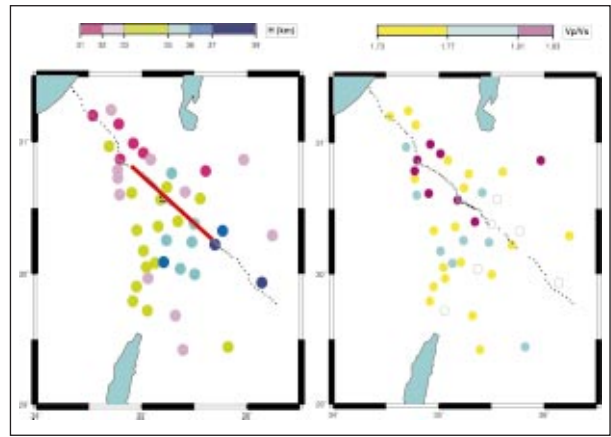


Abb. 5: Ergebnisse der RF-Analyse am temporären seismologischen Netz im Nahen Osten. Die gepunktete Linie bezeichnet das Weitwinkel-Profil (Abb. 2) und die durchgezogene rote Linie das Steilwinkel-Profil (Abb. 3). (Links) Moho-Tiefe. (Rechts) v_p/v_s -Verhältnis.

Results of the RF analysis at the seismological network in the Middle East. The dotted line marks the wide-angle profile (Fig. 2); the continuous red line the steep-angle profile (Fig. 3). (Left) Moho depth. (Right) v_p/v_s ratio.

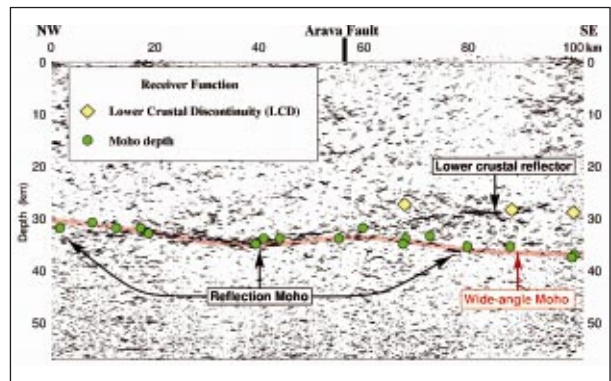


Abb. 6: Vergleich der Moho-Tiefen: Steilwinkel-Seismik (schwarz), Weitwinkel-Seismik (rote Linie) und RFs (grüne Punkte). Östlich der AF ist ein weiterer Horizont in der Unterkruste zu erkennen (gelbe Rauten für RF).

Comparison of the Moho depth: steep angle reflection (black), wide angle reflection/refraction (red line) and RFs (green dots). Note strong reflector in all data sets in lower crust east of the AF (yellow diamonds for RF).

reduzierte Reflektivität relativ zu Bereichen westlich und östlich, was, wie auch an der SAF, als Verbreiterung der Scherzone in der unteren Kruste interpretiert wird. (b) Die asymmetrische Topo-graphie der Moho unter der AF ist wahrscheinlich durch den transtensionalen Charakter der DST zwischen Rotem Meer und Totem Meer verursacht (siehe auch Sobolev et al. (2003)). (c) Reflektoren in der unteren Kruste (25 bis 32 km Tiefe, Profilkilometer 55 bis 70) kippen von der hier postulierten Scherzone weg nach Osten und sind möglicherweise durch anisotrope Strukturen entlang mylonitisierter Scherzonen verursacht.

Weitere Evidenz, dass die DST durch die gesamte Kruste schneidet und die Relativbewegung der Afrikanischen und der Arabischen Platte ermöglicht, kommt (d) aus der Beobachtung von SKS-Splitting. Eine Voraussetzung hierfür war die Entwicklung eines neuen seismologischen Verfahrens, das die frequenzabhängigen Eigenschaften teleseismischer Erdbebenwellen ausnutzt („frequency-dependent shear-wave splitting analysis“) und somit Rückschlüsse über die Änderungen der anisotropen Tiefenstruktur zulässt (Rümpker et al. 2003). Der geringe Stationsabstand entlang des NVR-Profiles ermöglichte zum ersten Mal eine gute Auflösung von Änderungen der Anisotropie entlang des Profils. Es stellte

sich heraus, dass der Bereich der stärksten Gesteinsverformungen entlang der Grenze zwischen Arabischer und Afrikanischer Platte auf eine relativ schmale, nur etwa 20 km breite Zone in der Kruste beschränkt ist (Abb. 7). Dieser Bereich umfasst an der Oberfläche die AF und an der Moho das Gebiet der lokalen Hochlage (ca. Profilkilometer 45 bis 65 in Abb. 4b). Im oberen Erdmantel (zwischen etwa 30 und 100 km Tiefe) bildet diese Zone eine mechanische Grenzschicht die ein relativ ungestörtes Vorbeigleiten der Platten aneinander ermöglicht. Außerhalb dieses Bereichs bleibt das Gestein von den Deformationsvorgängen in unmittelbarer Umgebung der Plattengrenze nahezu unbeeinflusst.

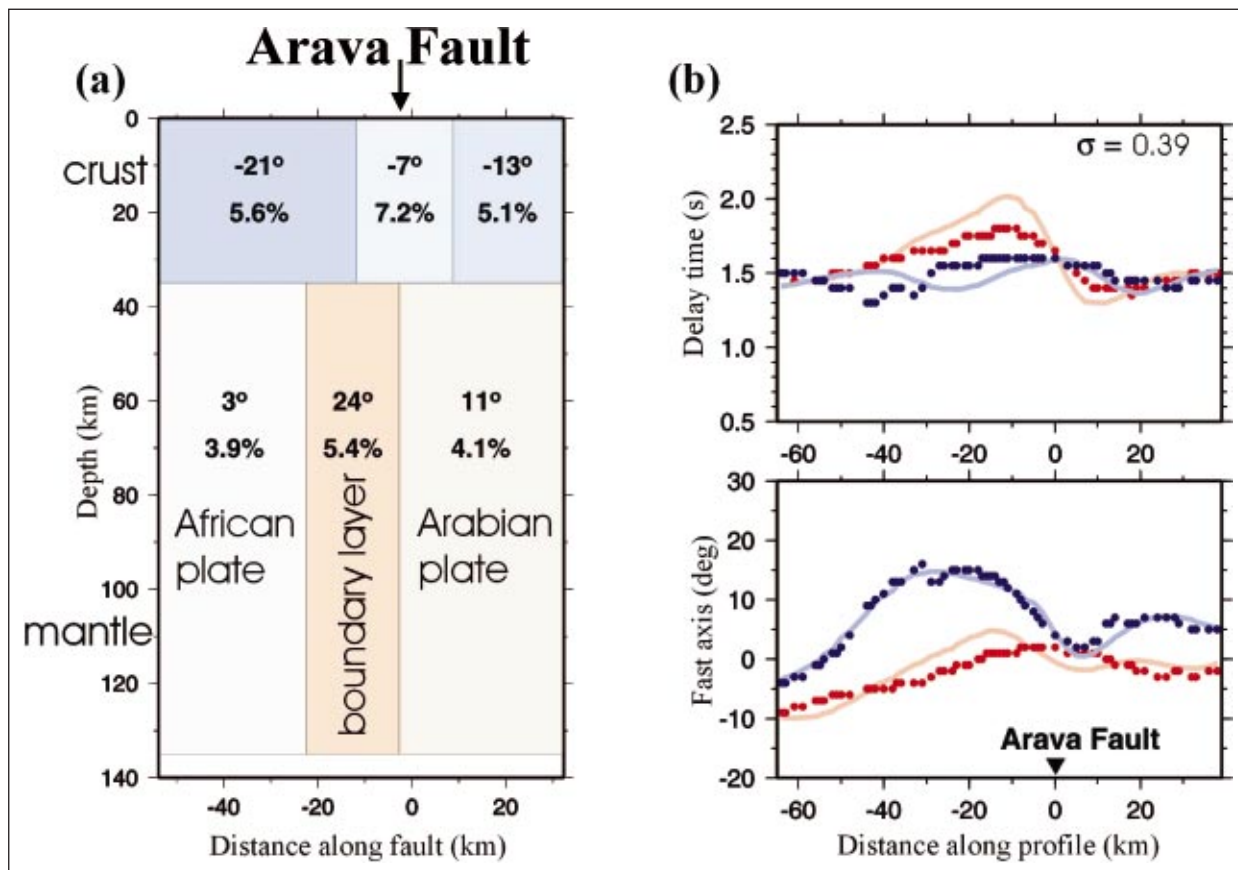


Abb. 7: Modell der Anisotropie unterhalb des NVR-Profiles und Vergleich zwischen beobachteten und berechneten Splittingparametern (die Verzögerungszeit zwischen schneller und langsamer Scherwelle bzw. die Polarisationsrichtung der schnellen Welle). (a) Best-fitting 2-dimensionales Modell der Anisotropie in der Kruste und im oberen Mantel. Die Winkelangaben beziehen sich auf die Ausrichtung der horizontalen Symmetrieachse innerhalb der anisotropen Bereiche. Prozentangaben geben die Stärke der Anisotropie an. Die zentrale Zone im Mantel zeichnet sich durch störungs-parallel ausgerichtete Olivinkristalle aus. Hierbei handelt es sich um eine vertikale Grenzschicht mit maximaler Deformation des Mantelmaterials aufgrund der Transform-Bewegung zwischen der Afrikanischen und der Arabischen Platte. (b) Die Linien entsprechen den gemessenen Splittingparametern, die Punkte entsprechen den Ergebnissen der Modellrechnung (Blau – Periodenbereich von 2 bis 5 sec; Rot – Periodenbereich von 5 bis 7 sec). Die relative Varianz zwischen Beobachtungen und Berechnungen liegt bei $\sigma = 0,39$. Dies entspricht einer Varianzreduktion von 61% im Vergleich zu einem homogenen Modell mit einer einzelnen anisotropen Schicht. Model of anisotropy beneath the profile and comparison between observed and calculated shear-wave splitting parameters.

(a) Best-fitting 2D model with lateral variations of crustal and mantle anisotropy beneath the DST obtained from the simultaneous inversion of the observed splitting parameters. Angular values indicate the orientation of the horizontal symmetry axes within the anisotropic domains. The strength of the anisotropy (in per cent) is determined from the relative velocity difference between vertically propagating split shear waves. The central zone in the mantle with fault-parallel olivine a-axis and increased anisotropy is interpreted as a vertical boundary layer of subhorizontal mantle flow that accommodates the transform motion between the Arabian and African plates. The model is shown

with respect to distance normal to the AF, which strikes at N20E. **(b)** Lines represent (smoothed) splitting parameters (delay times and fast polarization directions) obtained from synthetic waveform parameters. Blue is for the period range of 2 to 5 sec; red for the period range from 5 to 7 sec, respectively. Dots indicate corresponding splitting modeling using a complete finite-difference method. The relative variance between observed and calculated splitting parameters is $s = 0.39$, which corresponds to a variance reduction of 61% compared to the model with a single uniformly anisotropic layer.

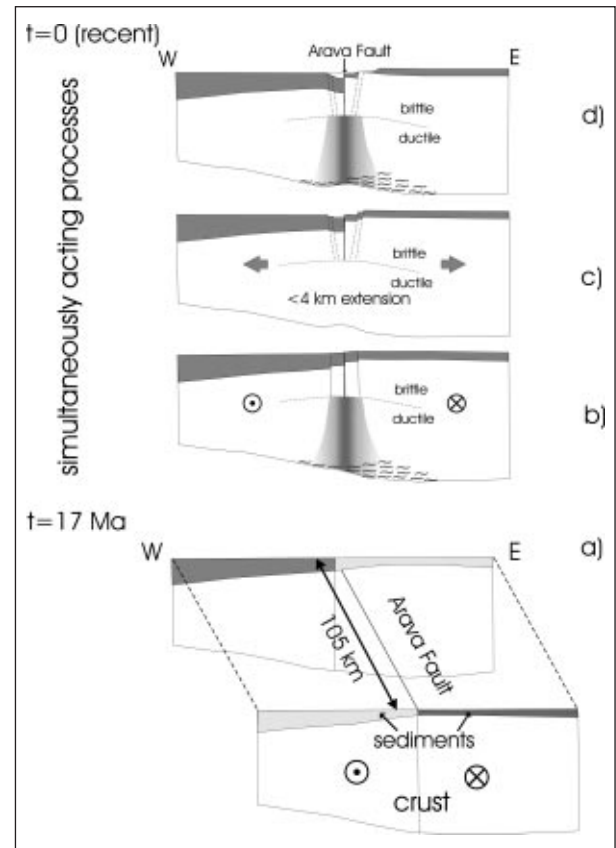
(3) Spielt Rifting/Extension eine wichtige Rolle in der Dynamik der DST ?

Die schmalen, nur etwa 10 km breiten, hauptsächlich westlich der DST gelegenen Sedimentbecken (Abb. 3), ein 3 bis 5 km großer Anstieg des seismischen Basements auf der östlichen Seite des Arava Tals (Abb. 4a) sowie die kleine asymmetrische Topographie der Moho unter dem Arava-Tal sind untypisch für Rift-Strukturen. So ist zum Beispiel am Kenya-Rift, welches einen bis zu 200 km breiten Riftgraben aufweist, die Moho um 5 bis 10 km angehoben. Die Schlussfolgerung, dass Rifting (Extension senkrecht zur DST) keine dominante Rolle bei der Ausformung der krustalen Struktur der DST spielt, wird auch durch thermo-mechanische Modellierungen gestützt (Sketch in Abb. 8, siehe auch detaillierteren Beitrag am Ende dieses Kapitels). Die heutige Krustenstruktur ergibt sich im Wesentlichen aus der geologisch dokumentierten sinistralen Verschiebung von 105 km zwischen Afrika-nischer und Arabischer Platte, verbunden mit geringer transversaler Extension (ca. 4 km).

Abb. 8: Skizze der Dynamik der DST entlang des DESERT-Profiles basierend auf den Ergebnissen in Abb. 4, 7 und Sobolev et al. (2003). **(a)** Krustenstruktur vor ca. 17 Millionen Jahren vor dem Beginn der Transform-Bewegung von 105 km. Phanerozoische Sedimente sind in Grau gegeben und Sektionen, die sich heute gegenüberliegen und durch das DESERT-Profil überquert wurden, sind dunkler. **(b)** Die Transform-Bewegung von ca. 105 km erzeugt eine Krustensektion mit signifikant unterschiedlicher Struktur westlich und östlich der DST. Die schattierte Region ist der Bereich duktiler Scherdeformation (Sobolev et al. 2003). Wellenartige Symbole liegen im Bereich erhöhter Reflektivität (Abb. 4), welcher möglicherweise durch Deformation in der unteren Kruste entsteht. **(c)** Ein kleiner Extensions-Beitrag (ca. 4 km) erzeugt die kombinierte Absenkung des westlichen Blocks und Anhebung des östlichen Blocks. **(d)** Erosion und Sedimentation produzieren die heutige Struktur.

Sketch of the DST dynamics along the DESERT profile, based on results shown in Fig. 4, 7 and the results of Sobolev et al. (2003). **(a)** Crustal structure before the beginning of transform motion, i.e. 17 Ma ago. The Phanerozoic sedimentary cover is shaded, dark colors

indicate sections which today are facing each other and were crossed by the DESERT profile. **(b)** Transform motion of ~105 km results in a crustal cross-section with a significantly different structure east and west of the AF. The shaded domain shows the region of ductile shear deformation (Sobolev et al. 2003). Wavelike symbols indicate lower crustal regions of high reflectivity (Fig. 3) possibly related to lower crustal flow. **(c)** Associated minor tension (~4 km) produces subsidence and flexure in the western block accommodated by uplift of the eastern block, with a similar small amplitude flexure at the Moho (Fig. 3). **(d)** Erosion and sedimentation produce the present day structure.



(4) Gibt es Ähnlichkeiten zwischen DST und SAF trotz unterschiedlicher Geologie und Dynamik ?

Der Vergleich mit der SAF zeigt einige Unterschiede in der flacheren Struktur, aber auch Gemeinsamkeiten in der tieferen Struktur. Untersuchungen von *fault-guided-waves* an der DST (Haberland et al. 2003) zeigen, dass die innere Scherzone im Gegensatz zur SAF, bei der die Breite 100 bis 170 m beträgt, nur wenige Meter breit ist. Im Gegensatz zur SAF wirkt die DST auch als Barriere für Fluide zwischen einem Block mit niedriger und einem Block mit hoher seismischer Geschwindigkeit (vgl. Ritter et al., 2003). Wenn allerdings die tieferen Krustenstrukturen und die Strukturen im oberen Erdmantel verglichen werden, erkennt man, dass beide Systeme tiefreichende Deformationszonen aufweisen, welche zusammen mit starker Asymmetrie bei subhorizontalen Reflektoren (Deformationsbahnen, Intrusionen?) auftreten. Diese Strukturen scheinen folglich gemeinsame Charakteristika großer kontinentaler Transform-Faults zu sein.

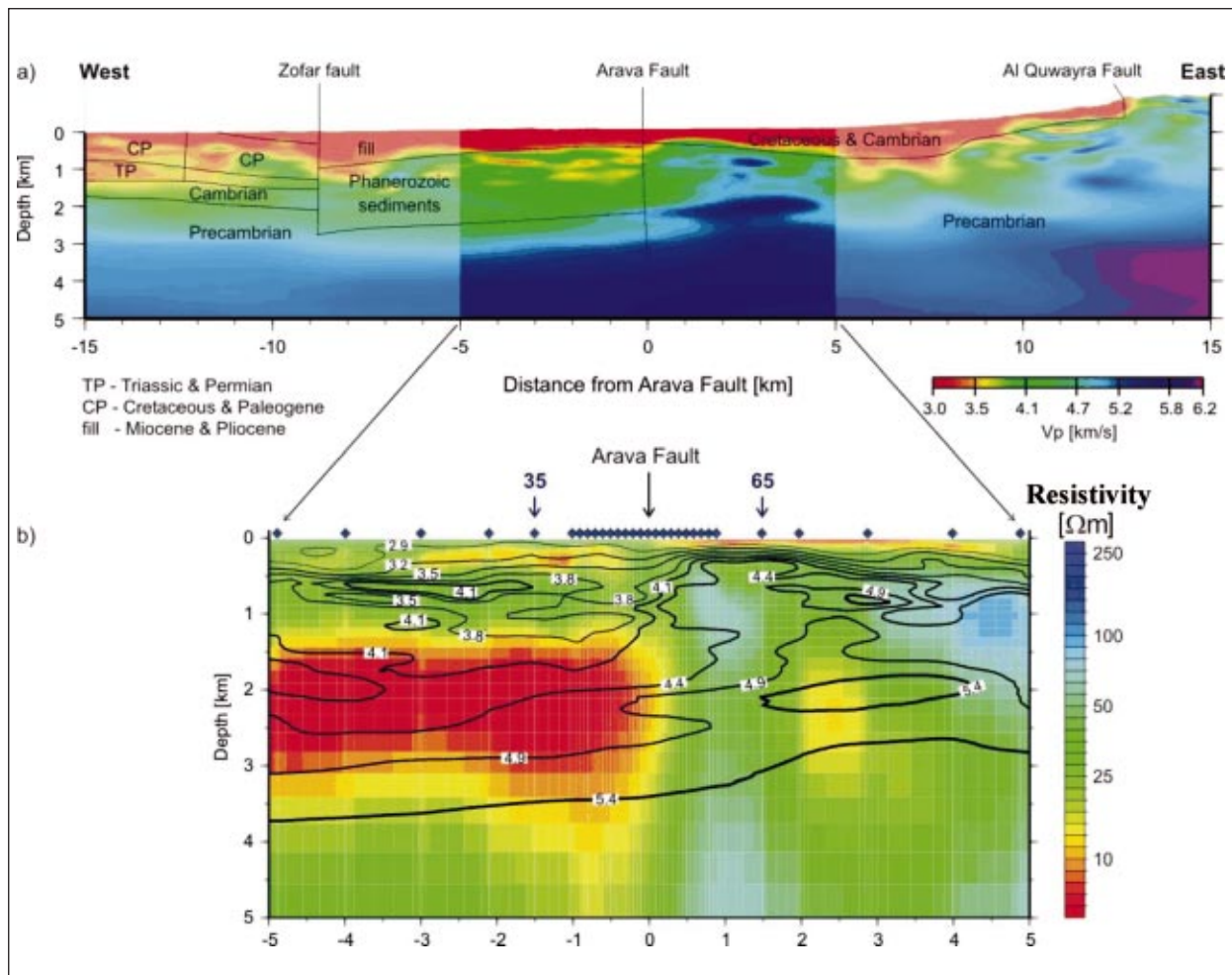


Abb. 9: (a) Teilstück des tomographischen P-Wellen Geschwindigkeitsmodells aus NVR-Daten an der AF. Das Modell ist bis in eine Tiefe von etwa 3 km sehr gut aufgelöst. Die geologischen Einheiten sind in schwarz gegeben. (b) Vergrößerung des magnetotellurischen Teilprofils mit der Verteilung der elektrischen Leitfähigkeiten (2D Inversion, farbig) und der tomographischen Inversion (Isolinien aus (a)). Die 30 MT-Stationen sind als Symbole oberhalb des Modells eingezeichnet. Siehe Abb. 2 für die Lage des Profils. Rote und gelbe Farbtöne weisen auf Bereiche hoher Leitfähigkeit hin, die jeweils durch die AF begrenzt sind. Die elektrische Leitfähigkeit sowie seismische Geschwindigkeiten zeigen übereinstimmend signifikante laterale Änderungen im Bereich der AF.

(a) Part of the tomographic P-velocity model from NVR-data, centered on the AF. The model is well resolved down to 3 km. Geological units are given in black. (b) Blowup of superimposed magnetotelluric (color coded) and seismic P-velocity results (contour lines derived from (a)). The 30 MT recording sites are shown as diamonds at the top. The location of the profile is given in Fig. 2. Red and yellow colors indicate zones of high conductivity, which are cut by the AF. Both the electrical conductivity and seismic velocities indicate significant lateral changes of the physical properties across the AF.

Kleinräumige Struktur und Dynamik der DST

Neben der krustalen Struktur ist die kleinräumigere Struktur der DST/AF von besonderem Interesse, für deren Bestimmung im Rahmen von DESERT die Kombination verschiedener geowissenschaftlicher Methoden verwendet wurde.

(1) Kombinierte Seismik und Magnetotellurik an der Arava Fault

Im Jahr 2000 wurden an der AF neben umfangreichen seismischen auch magnetotellurische (MT) Experimente

durchgeführt (Abb. 2). Die Kombination dieser beiden Verfahren eignet sich besonders gut, um Scherzonen (faults) abzubilden. Die zweidimensionale Verteilung der seismischen P-Wellen Geschwindigkeiten wurde aus den Laufzeiten refrakterer Phasen des Steilwinkel-Experimentes (Abb. 3) mittels tomographischer Verfahren abgeleitet (Abb. 9a). Das Modell zeigt einen charakteristischen Sprung der Geschwindigkeiten von unter 4 km/s im Westen der AF auf Werte von über 5 km/s im Osten. Diese hohen Geschwindigkeiten werden mit präkambri- schen kristallinen Gesteinen in Verbindung gebracht (Abb. 3).

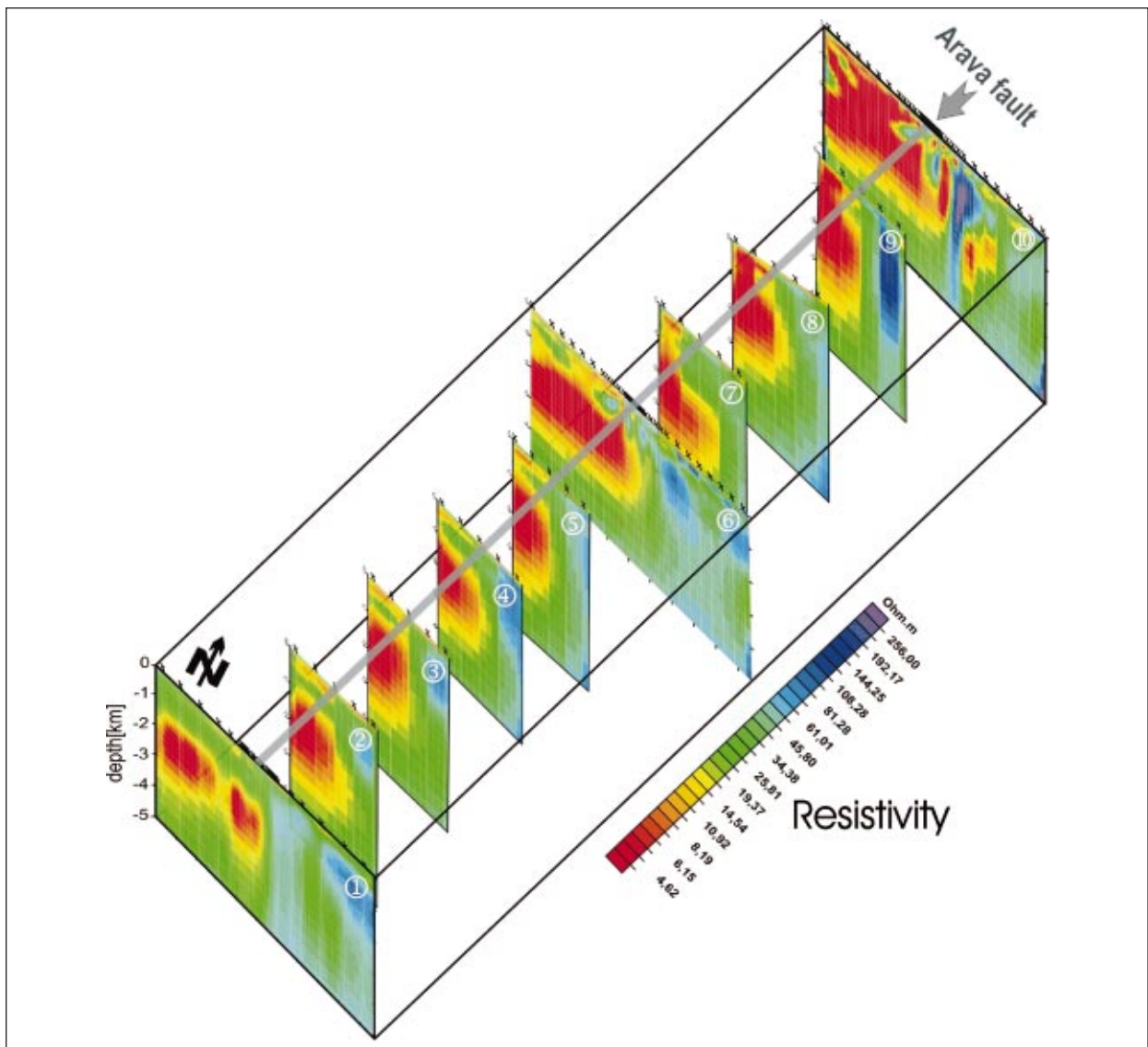


Abb. 10: Darstellung der elektrischen Leitfähigkeitsverteilung entlang sieben kurzer (5 km) und drei langer Profile (10 km) einer flächenhaften Vermessung (10x10 km Gebiet) über die AF. Profil 1 ist das MT-Profil aus Abb. 9b. Die 2-D-Inversionsmodelle zeigen deutlich, dass sich die Hauptstruktur, eine Zone erhöhter Leitfähigkeit (rote Farben) in 1,5 bis 3 km Tiefe, nach Norden hin fortsetzt. Insbesondere die beiden langen Profile 6 und 10 weisen aber auf eine generell komplizierte Leitfähigkeitsverteilung im Norden hin.

Image of the electrical conductivity distribution on 7 short (5 km) and 3 long profiles (10 km) in an area of 10x10 km across the AF. Profile 1 is the MT-profile (Fig. 9b). The 2-D inversion models clearly show that the main feature, a zone of high conductivity (red colors) in 1.5 to 3km depth, continues northerly along the fault. In particular, profiles 6 and 10 indicate a generally more complex conductivity distribution of the subsurface towards the North.

Die Magnetotellurik-Daten wurden auf einem 10 km langen Abschnitt des NVR-Profiles gewonnen. Die Stationsüberdeckung entlang des MT-Profiles ist dabei symmetrisch zur Lage der AF an der Erdoberfläche gewählt. Durch eine dichte Vermessung mit einem Stationsabstand im zentralen Bereich von nur 100 m lässt sich ein außergewöhnlich klares Abbild der elektrischen Leitfähigkeitsverteilung gewinnen (Abb. 9b). Zweidimensionale Inversionen der MT-Daten zeigen einen starken lateralen Leitfähigkeitskontrast unterhalb der AF. In einer Tiefe von ca. 1,5 km werden dabei vermutlich Sedimentgesteine mit salzhaltigen Wässern im Westen von kristallinen Gesteinen im Osten getrennt. Die AF scheint dabei als Permea-

bilitätsbarriere zwischen den zwei Gesteinsformationen zu wirken. Ein ähnliches Ergebnis, d.h. ein scharfer Kontrast an der AF, ergibt sich auch für einen oberflächennahen Leiter in ca. 150 m Tiefe (siehe Abb. 9b), bei dem es sich wahrscheinlich um einen Grundwasserhorizont handelt. Eine Permeabilitätsbarriere ist kompatibel mit Modellen von Störungszonen, wurde aber in dieser Form erstmalig mit geophysikalischen Verfahren abgebildet.

Die Strukturen an der AF haben eine andere Erscheinungsform als die an der San Andreas Fault (SAF). Charakteristisch für die SAF sind keilförmige Zonen erhöhter elektrischer Leitfähigkeit, die mit der Zerrüttungszone der Störung korrelieren. Entlang der SAF sind diese Bereiche

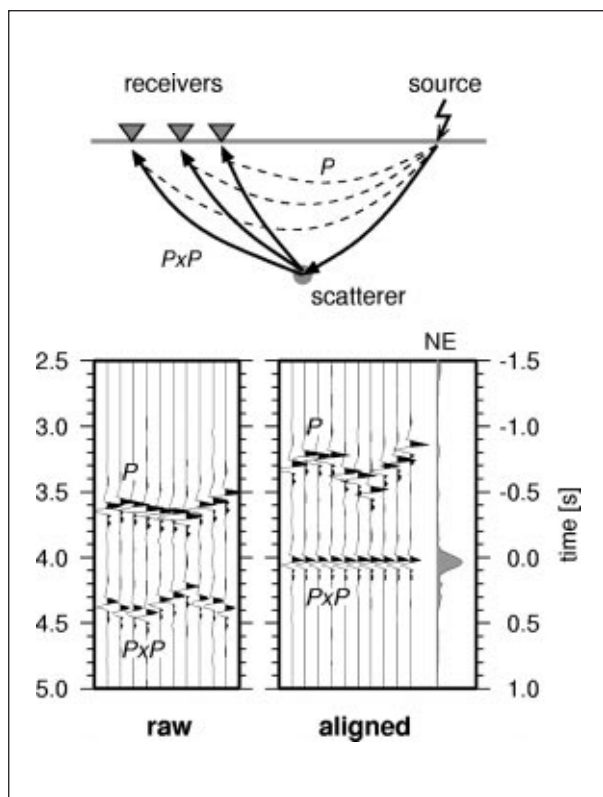


Abb. 11: (Oben) Schematischer Verlauf von Strahlwegen von direkten (P) und gestreuten Wellen (PxP). (Unten links) Unbearbeitete simulierte Aufzeichnung eines Seismometer-Arrays für einen Schuss und einen einzelnen Punktstreuer. (Unten rechts) Dasselbe Seismogramm mit zeitlich angeglichenen PxP-Einsätzen. Die Kohärenzspur (NE) verdeutlicht, dass ein hoher Wert zur vorhergesagten PxP-Laufzeit die richtige Ausrichtung von PxP und damit die richtige Lokalisierung des Streuers anzeigt.

(Top) Sketch showing ray paths for direct (P) and scattered waves (PxP). (Bottom left) Raw synthetic seismometer array recording for one shot and a single point scatterer. (Bottom right) The same panel with traces aligned according to the scatterer onsets of PxP. The semblance trace (NE) illustrates, that a high semblance value at the predicted PxP travel time indicates correct alignment of PxP, i.e. correct localization of the scatterer.

in der Regel mehrere hundert Meter breit, während sie an der AF nicht festgestellt werden konnten. Dies deutet darauf hin, dass die Zerrüttungszone der AF extrem schmal ist, so dass auch die meisten geophysikalischen Verfahren, ausser Fault Zone Guided Waves (siehe Zweijahresbericht 2000/2001), diese Zone nicht auflösen können.

(2) Ein 3D-Abbild der Arava Fault aus magnetotellurischen Daten

Da das MT-Profil zeigt, dass die AF eine Barriere für salzhaltige Wässer darstellt, sollte durch ein flächenhaftes MT-Experiment geklärt werden, ob und wie weit sich die damit verbundene Leitfähigkeitsanomalie entlang der Scherzone fortsetzt. Auf sieben kurzen (5 km) und zwei langen (10 km) Profilen wurde die AF in einem Gebiet von etwa 10x10 km vermessen (Abb. 10). Das südlichste Profil (Nummer 1) ist das bereits gezeigte MT-Profil (Abb. 9b). Die beiden langen Profile besitzen ein ähnliches Stationslayout. Auf den kurzen Profilen ist die Auflösung geringer, da jeweils nur an fünf Stationen in einem Abstand von 1 km gemessen wurde. Abb. 10 zeigt die aus zweidimensionaler Inversion gewonnenen Leitfähigkeitsmodelle. Die Hauptstruktur, eine Zone erhöhter Leitfähigkeit in einer Tiefe von etwa 1,5 bis 3 km (rote Farben), lässt sich über das gesamte Gebiet von Süden nach Norden verfolgen.

Von Profil 5 an scheint sie sich allerdings nach Norden hin mit einer oberflächennahen Struktur im Westen der AF zu verbinden. Insbesondere die beiden langen Profile 6 und 10 weisen auf eine generell komplizierte Leitfähigkeitstiefenverteilung im Norden hin. Das äußert sich vor allem auch darin, dass die östliche Grenze des guten Leiters nicht mehr mit dem Verlauf der AF an der Erdoberfläche übereinstimmt, sondern ca. 1 km nach

Osten verschoben ist. Das nördlichste Profil 10 deutet sogar einen weiteren Ast der Störung östlich der in Abb. 10 eingezeichneten Spur der AF an. Dieser ist auch auf Satellitenbildern, hochauflösenden seismischen Daten und in der Oberflächengeologie sichtbar (siehe auch nächstes Kapitel). Geologisch gesehen befinden wir uns mit dem Profil 10 im Bereich eines Druckrückens (siehe übernächstes Kapitel über störungsbedingte Deformation), der durch die komplexe Interaktion zueinander nicht vollständig paralleler Störungssegmente gekennzeichnet ist. Dies erklärt, dass sich hier die AF nicht durch einen so eindeutigen Leitfähigkeitskontrast auszeichnet wie bei den weiter im Süden gelegenen Profilen. Die im Profil 10 deutlich erkennbaren Leitfähigkeitskontraste ca. 2 km östlich der AF liegen im Bereich einer NNO-SSW streichenden weiteren Störung, die oberflächennah präkambrische Granite im Westen von eozänen Sedimenten im Osten trennt.

(3) Ein 3D-Abbild der Arava Fault aus gestreuten seismischen Wellen

Seismische Wellen werden an kleinen Inhomogenitäten im Untergrund gestreut. An der AF treten Streuer erwartungsgemäß entlang von geologischen Störungen auf. Deshalb kann die Analyse und Migration von gestreuten seismischen Wellen dort zur Abbildungen von steil stehenden Strukturen führen, die mit konventioneller Steilwinkelseismik nicht bzw. nur schwer abgebildet werden können. Wir benutzen hierzu folgenden Ansatz: Von ihrer Quelle breitet sich eine seismische Welle im Untergrund aus und wird von einer flächenhaften Anordnung (Array) von Seismometern registriert (Abb. 11). Der erste Einsatz ist die direkte P-Welle. Befindet sich im Untergrund ein einzelner, isolierter Streuer, wird die einfallende seismische Welle von diesem in alle Richtungen gestreut und das Seismometer-Array registriert einen weiteren Einsatz (PxP) nach der direkten P-Welle. Die Laufzeit von PxP ist gegeben durch die Summe der Laufzeiten von der seismischen Quelle zum Streuer und von diesem zum jeweiligen Seismometer.

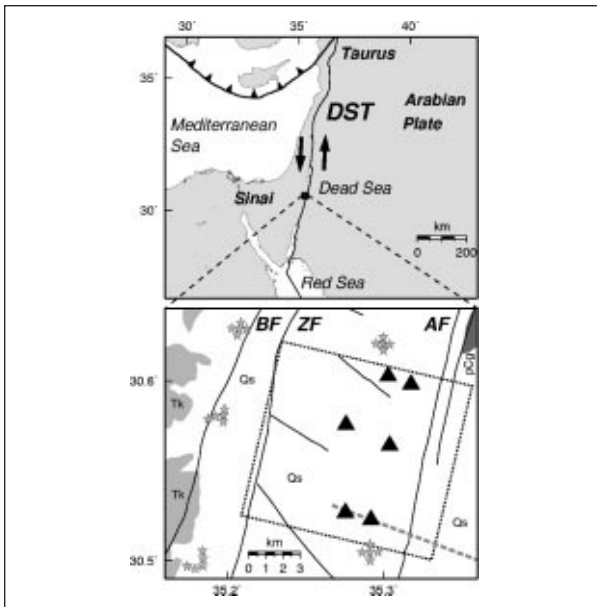


Abb. 12: (Oben) Lage des Untersuchungsgebiets. (Unten) Stationskarte des seismischen Experiments an der AF. Sterne zeigen Schusspunkte, Dreiecke Seismometer-Arrays, ein gepunkteter Kasten die Grenzen von Abb. 13, und eine gestrichelte Linie zeigt die Lage des seismisch/magnetotellurischen Profils (Abb. 9). BF = Barak-Störung, ZF = Zofar-Störung; Qs = unkonsolidierte quartäre Sedimente; Tk = Kalke und Mergel (unteres Tertiär, Kreide); pCg = präkambrische Granite.

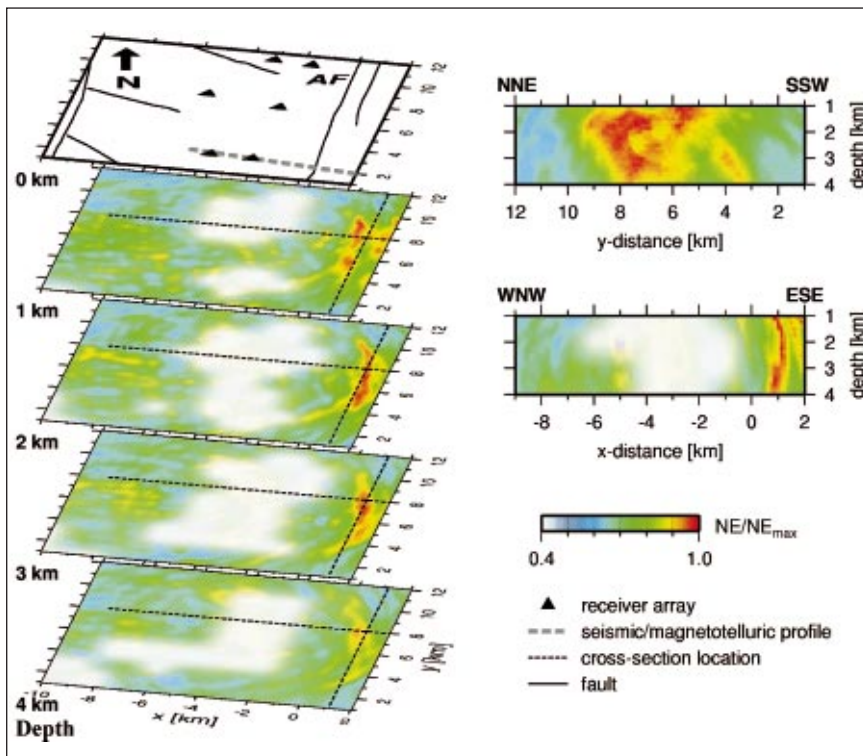
(Top) Location of the study area. (Bottom) Site map of the seismic experiment at the AF. Stars indicate shot locations, triangles seismometer arrays, a dotted box outlines the boundary of Fig. 13, and a dashed line marks the seismic/magnetotelluric profile (Fig. 9). BF = Barak Fault; ZF = Zofar Fault; Qs = unconsolidated Quaternary sediments; Tk = lower Tertiary/ Cretaceous limestones, chert, marl; pCg = Precambrian granites.

Durch Beamforming (d.h. Verschieben und Aufsummieren von seismischen Spuren) an einem Array kann der PxP-Einsatz kohärent aufsummiert werden (Abb. 11, rechts unten, Normalized Energy Ratio (NE) -Spur). Hohe Werte der Kohärenz weisen auf die Existenz eines Streuers am betrachteten Untergrunds-punkt hin. Wird die Kohärenz auf diese Weise für jeden Punkt im Untergrund bestimmt, lassen sich Zonen stärkerer Streuung abbilden. Das endgültige Abbild ergibt sich aus der Summe solcher Einzelbilder für alle im Untersuchungsgebiet vorhandenen Kombinationen von seismischen Quellen und Seismometer-Arrays.

Um mit gestreuten Wellen die Untergrundstruktur in der näheren Umgebung der AF bis in etwa 4 km Tiefe abzubilden, wurde die in Abb. 12 gezeigte Anordnung von Quellen und Seismometer-Arrays realisiert. Als Quellen

dienten Schüsse in 20 m tiefen Bohrlöchern mit Ladungsmengen von 45 und 60 kg Sprengstoff. Die Seismometer-Arrays bestanden aus jeweils zehn Instrumenten, die so angeordnet waren, dass eine optimale Auflösung für einfallende Wellen aus allen Richtungen erreicht wurde. Die Migration erfolgte in einem Gebiet von 12 mal 12 km

Abb. 13: Farbcodierte Verteilung von Streuern (NE/NE_{max} -Verhältnis) in der Umgebung der Arava-Störung (AF). Gebiete starker Streuung sind in rot wiedergegeben und Gebiete mit schlechter Auflösung in weiß. (Links) Der oberste Schnitt zeigt Störungen, Seismometer-Arrays und die Lage des seismisch/magnetotellurischen Profils (Abb. 9) an der Oberfläche. Darunter zeigen vier horizontale Tiefenschnitte die Verteilung von Streuern.



(Rechts) Zwei senkrechte Schnitte durch das abgebildete Untergrundvolumen entlang der links eingetragenen, gestrichelten Linien.

Color-coded scatterer distribution (NE/NE_{max} -ratio) in the vicinity of the AF. Zones of strong scattering are in red, and areas with poor resolution for point scatterers are whitened out. (Left) The top panel shows fault traces, receiver arrays, and the location of the seismic/magnetotelluric profile (Fig. 9) at the surface. Four horizontal depth slices show the distribution of scatterers. (Right) Two vertical cross-sections through the imaged volume at the two locations indicated by dashed lines in depth slices on the left.

Ausdehnung bis in eine Tiefe von 4 km. Der Gitterpunkt-Abstand für die Kohärenzanalyse betrug in alle Richtungen 125 m. Da dieses untersuchte Volumen lateral recht homogen ist, konnte ein nur in vertikaler Richtung variiertes Geschwindigkeitsmodell zur Berechnung der P_xP-Laufzeiten verwendet werden. Mit statischen Korrekturen wurden Einflüsse der Topographie und kleinere Geschwindigkeitsanomalien reduziert.

Abb. 13 zeigt die Verteilung von Streuern in einem lokalen Koordinatensystem mit der X-Achse senkrecht zur AF und der Y-Achse parallel dazu. Bereiche starker Streuung erscheinen in rot. Links sind vier horizontale Tiefenschnitte unter einer Karte der Oberflächengeologie zu sehen, und rechts sind zwei vertikale Schnitte im Tiefenbereich von 1 bis 4 km wiedergegeben. Deutlich bildet sich eine schmale, vertikale Zone verstärkter Streuung ab (Reflektor), die parallel, aber ungefähr 1 km östlich der an der Oberfläche kartierten AF verläuft und im Norden mit einer weiteren an der Oberfläche sichtbaren Störung zu korrelieren scheint (siehe Abb. 13, links oben). Der Reflektor erstreckt sich im Bereich von 3 bis 10 km in Y-Richtung und in 1 bis etwa 4 km Tiefe. Dies entspricht etwa auch dem Bereich, der mit der verwendeten Quell- und Arraygeometrie gut aufgelöst werden kann. Über eine mögliche weitere Ausdehnung des Reflektors nach Norden und nach Süden, wo z.B. bei $y = 2$ km das NVR-Profil verläuft (Abb. 13 oben links), kann keine Aussage getroffen werden.

Die vorherigen Studien in diesem Gebiet (Abb. 10) zeigen ebenfalls einen starken Kontrast in 1,5 bis 3 km Tiefe etwa 1 km östlich der AF, der mit der Lage des Reflektors übereinstimmt. Es ist deswegen wahrscheinlich, dass er vermutlich die Grenze zwischen zwei unterschiedlichen lithologischen Blöcken bildet, die durch die horizontale Verschiebung entlang der Störung nebeneinander zu liegen kamen. Aufschlüsse präkambrischer Granite knapp nördlich des Untersuchungsgebietes, die nur östlich des Reflektors auftreten und durch hohe seismische Geschwindigkeiten gekennzeichnet sind, stützen diese Vorstellung. Der westliche Block niedriger Geschwindigkeiten lässt sich mit jüngeren Sedimentgesteinen und der miozänen-rezenten fluviatilen Beckenfüllung in Verbindung bringen.

Zwei Modelle der Störungszone könnten die Beobachtungen des Reflektors 1 km östlich der Oberflächen-Spur der AF erklären. Die AF könnte im obersten Kilometer nach Osten einfallen und in größerer Tiefe senkrecht verlaufen. Wahrscheinlicher erscheint aber, dass die AF aus mindestens zwei Ästen besteht, von denen der östliche die Grenze zwischen den beiden Blöcken bildet. Die westlich davon sichtbare Oberflächenausprägung der AF (z.B. Druckrücken, Wasserlöcher und versetzte Schwemmfächer) lassen vermuten, dass dieser Ast derzeit aktiver ist. Der Gesamtversatz entlang des Störungssystems könnte sich räumlich und zeitlich über diese Äste der AF und möglicherweise andere Störungen, beispielsweise die Quwayra-Störung weiter östlich und die Zofar- und Baraq-Störungen weiter westlich (siehe auch Abb. 3), verteilt haben.

(4) Untersuchung der störungsbedingten Deformation

Scherzonen sind im spröden Teil der Kruste von einer Prozesszone intensiver Materialschädigung (Zone der störungsbedingten Deformation) umgeben. Informationen zur Entwicklung einer Scherzone sind in der Struktur und der Geometrie der Störung, in den Versatzbeträgen und vor allem in der Prozesszone selbst enthalten. Experimente und bruchmechanische Modelle lassen vermuten, dass die genannten Parameter in einer gesetzmäßigen Beziehung zueinander stehen. So korreliert zum Beispiel die Breite der Prozesszone mit der Störungslänge und dem Gesamtversatz an der Störung. Es ist bisher unklar, ob sich Störungen über einen weiten Skalenbereich durch ein einheitliches physikalisches Modell beschreiben lassen. Das Ziel der kombinierten strukturgeologisch-/geochemischen Untersuchungen zur störungsbedingten Deformation entlang der DST war es deshalb (1) die Architektur der Störungszone zu charakterisieren, (2) zu prüfen, ob die aus Modellen abgeleitete zyklische Entwicklung der Deformations- und Heilungsprozesse an großen Scherzonen nachweisbar ist und (3) die Herkunft und Transportgeschichte der Fluide zu untersuchen.

Die Feldarbeiten, verbunden mit einer umfangreichen Probennahme, wurden im Mai 2002 an verschiedenen Aufschlusspunkten im Arava-Tal durchgeführt. Dies ermöglichte, die Deformationsprozesse an derselben Störungszone in unterschiedlichen Krustenniveaus zu untersuchen. Die geologischen Ergebnisse zeigen eine eher untypische Störungszonenarchitektur. Das heißt, der für andere große Störungszonen charakteristische Aufbau mit einem Störungskern (bestehend aus Kataklastiten und Störungsletten) umgeben von einer störungsbedingten Deformationszone konnte nicht beobachtet werden. Allerdings sei auch darauf hingewiesen, dass die Aufschlussbedingungen an der AF durch die im Arava-Tal verbreiteten quartären Sedimente (Flussablagerungen und Sanddünen) verhältnismäßig ungünstig sind. In Übereinstimmung mit den Resultaten der geophysikalischen Messungen belegen die Daten der Strukturanalyse eine eher schmale Scherzone mit einer stark lokalisierten Deformation. So sind die untersuchten Druckrücken am Ende einzelner Blattverschiebungssegmente durch eine hohe Interdeformation charakterisiert (Abb. 14). Mikroskopische Untersuchungen zeigen, dass Sprödbrechbildungen, Deformationszwillinge und Drucklösungsprozesse die dominierenden Deformationsmechanismen waren. Die aus den Mikrostrukturen abgeschätzte Scherspannung beträgt bis zu 100 MPa. Die relativ konstante Orientierung der Kompressions- (NW-SO) und Dehnungsrichtung (NO-SW) entlang und angrenzend zur Störungszone zeigt an, dass die gesamte Störungszone kinematisch homogen ist.

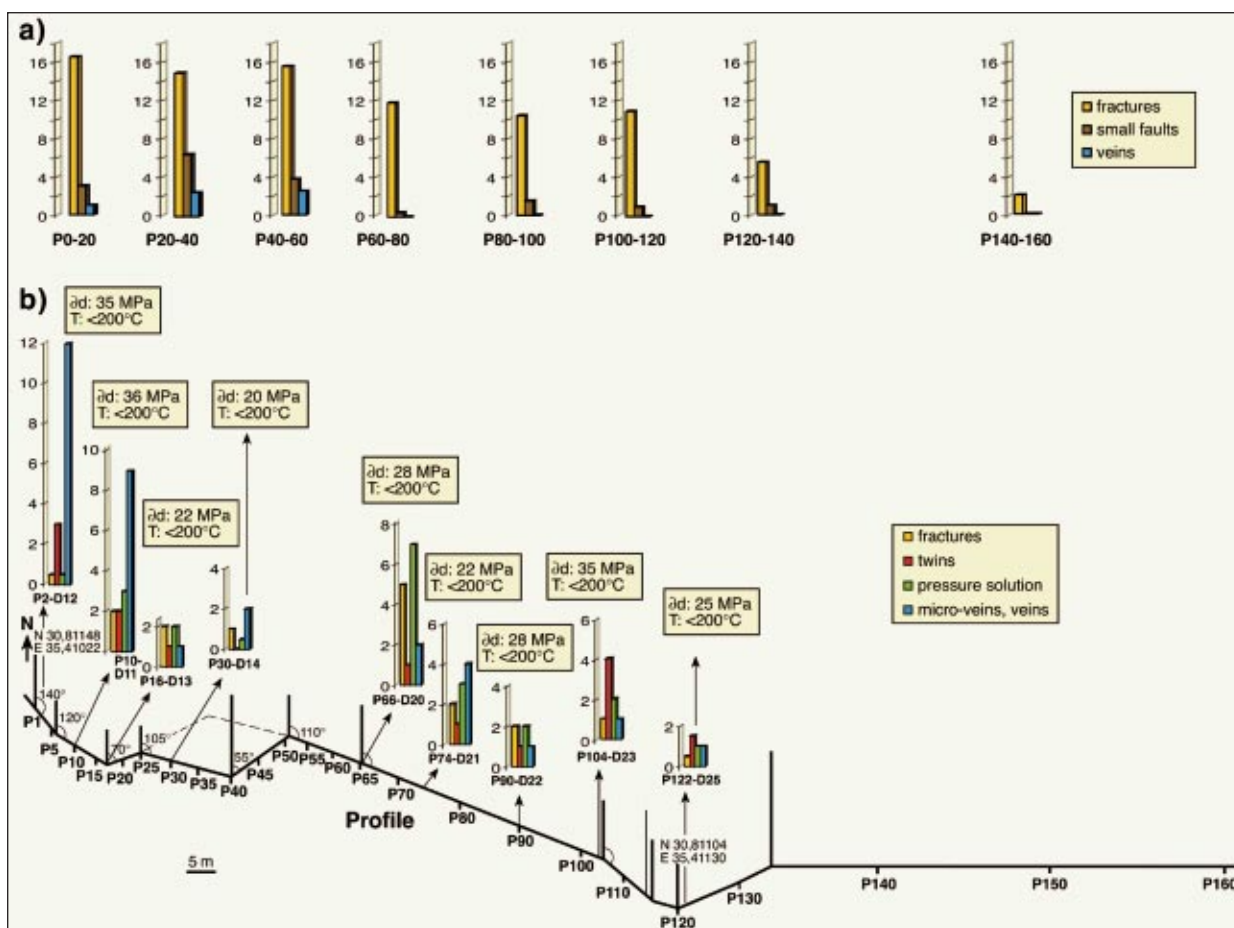


Abb. 14: Ergebnisse der Strukturanalyse (Meso- und Mikrostrukturen). (a) Die Säulen repräsentieren die Anzahl der Bruchflächen, untergeordneten Störungen und verheilten Klüfte pro Meter. (b) Die Säulen repräsentieren die prozentualen Anteile der gebrochenen, verzwilligten und von der Drucklösung betroffenen Kalzitkörner. Die Höhe der Differentialspannung (Δd) und die Temperatur wurden aus Deformationsmechanismen im Klufthalzit abgeleitet.

Results of structural analysis (meso- and microstructures). (a) Columns represent the number of fractures, subsidiary faults and veins per meter. (b) Columns represent normalized percentages of calcite grains that are fractured, twinned, and affected by pressure solution. Magnitudes of differential stress (Δd) and temperatures (T) are estimated from the deformation mechanism of vein calcite.

Erste Resultate von Kathodolumineszenz- (KL-) Untersuchungen an Karbonatdünnschliffen zeigen Farbalterationen in den verheilten Zementen und die wechselseitige Durchschlagung von Mikrostrukturen. Dies legt einen mehrfachen Wechsel von Deformations- und Heilungsprozessen nahe (Abb. 15). Mit Hilfe der Bestimmung der Sr-Isotope konnte eine großräumige Fluidzirkulation innerhalb der Störungzone nachgewiesen werden. Die Fluide kamen sowohl aus stratigraphisch höher liegenden Schichten als auch aus dem Untergrund (Abb. 16).

Insgesamt wird ein seismisch gesteuerter, mehrfacher Wechsel zwischen einem offenen und geschlossenen System angenommen (Deformation - Einströmen von Fluiden - Heilung/ Zementation - Anstieg des Porenwasserdruckes - erneute Deformation). Damit werden Modellvorstellungen zur Fluid-Gesteinswechselwirkung in Störungszonen bestätigt.

Thermische Bedingungen und geodynamische Entwicklung

(1) Die thermischen Bedingungen in der Lithosphäre Jordaniens

Eine der Schlüsselfragen für das Verständnis der Prozesse, die zur Entstehung der DST führten, ist die Frage nach den thermischen Bedingungen der Lithosphäre und damit der Rheologie von Kruste und oberem Mantel. Da Temperaturen nur bis in erbohrbare Teufen direkt bestimmt werden können, muss man für tiefere Bereiche auf Modellrechnungen ausweichen. Für die Erstellung solcher Temperaturmodelle sind detaillierte Kenntnisse über Aufbau und Zusammensetzung der Lithosphäre und deren thermische Eigenschaften sowie über den Oberflächenwärmefluss im Untersuchungsgebiet erforderlich. Die ersten Arbeiten dazu konzentrierten sich auf die Erarbeitung eines petrologischen Krustenmodells für die Region östlich der DST (Jordanien). Dieses Krustenmodell soll sowohl die stofflichen Eigenschaften der Gesteine als auch deren geophysikalische Parameter

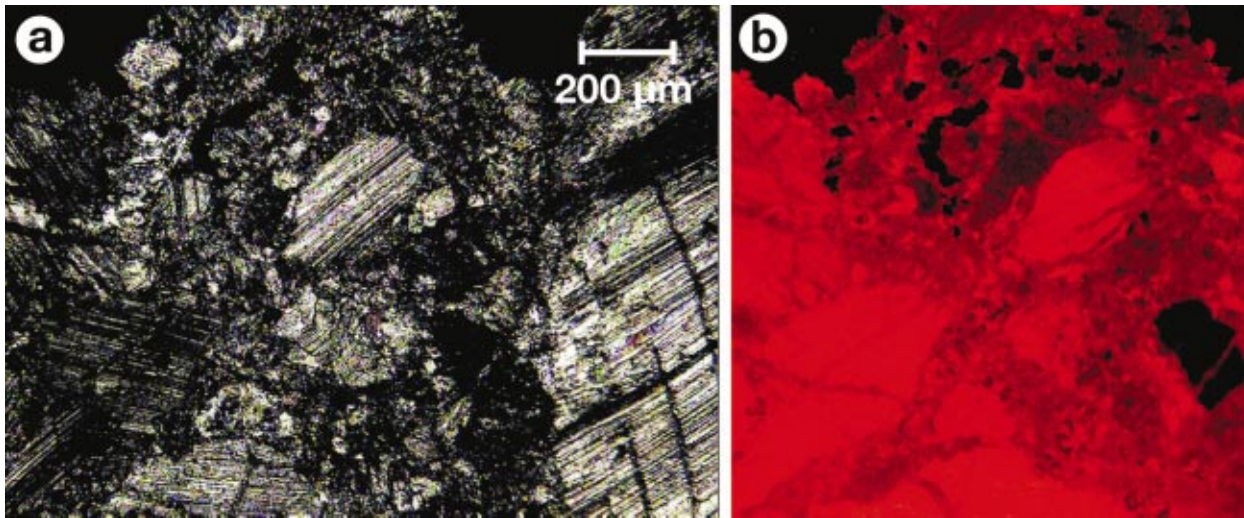


Abb. 15: Dünnschliffaufnahme von Mikrostrukturen im Kalzit. (a) Kontakt zwischen verzwilligtem Kluftezement und in der Matrix eingebetteten Karbonatfragmenten. (b) Kathodolumineszenz (KL)-Aufnahme des gleicher Bildausschnittes wie in (a). Die unterschiedlichen KL-Farben im Klufitkalzit weisen auf eine wiederholte Infiltration von Fluiden unterschiedlicher Zusammensetzung hin.

Thin section photomicrographs of microstructures. (a) Contact between twinned vein and sub-angular to sub-rounded carbonate fragments floating in fine-grained matrix, crossed nicols. (b) Cathodoluminescence (CL) image of the same area as in a. The different CL signatures of vein cement may suggest repeated infiltration of fluids with different trace element composition.

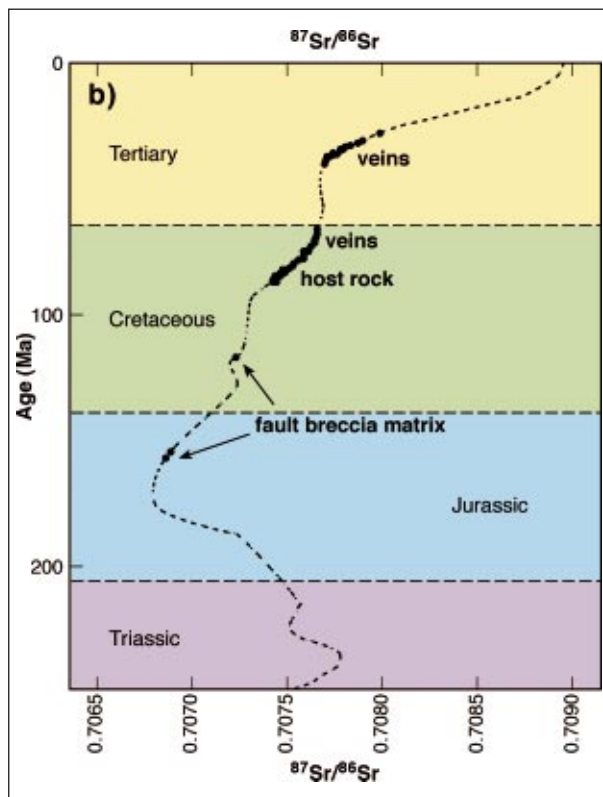


Abb. 16: Zeitlicher Trend der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Isotopen im Meerwasser und davon ausgehende Ablagerungsalter der Klufmineralisation, des Nebengesteins und der Störungsmatrix. Die Referenzkurve basiert auf Smalley et al. (1994).

Temporal trends of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in seawater and apparent depositional ages of the veins, host rock and fault breccia matrix. The reference curve is based on Smalley et al. (1994).

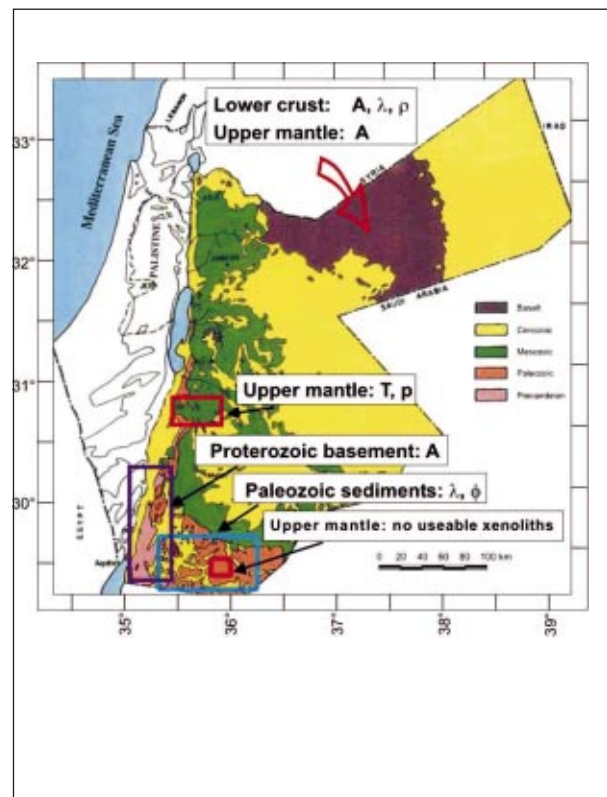


Abb. 17: Schematische Darstellung der Probenahme-Lokationen in Jordanien und derjenigen Gesteinsparameter, die in den Jahren 2002 und 2003 bestimmt wurden (T = Temperatur, p = Druck, A = radiogene Wärmeproduktion, λ = Wärmeleitfähigkeit, ϕ = Porosität).

Sample locations in Jordan and rock parameters determined during 2002-2003 (T = temperature, p = pressure, A = radiogenic heat production, λ = thermal conductivity, ϕ = porosity).

(seismische Geschwindigkeiten, Dichte) konsistent wiedergeben. Für die anschließende geothermische Modellierung standen thermische Parameter (radiogene Wärmeproduktion und Wärmeleitfähigkeit) zur Verfügung, die im Labor an Gesteinen von der Oberkruste bis zum oberen Mantel bestimmt wurden.

Die Aufschlussverhältnisse in Jordanien gestatteten eine Beprobung des Pan-Afrikanischen magmatischen (Monzodiorite bis Alkalifeldspatgranite) und metamorphen (Paragneise, granitische Orthogneise und Migmatite) Basements in seiner gesamten stofflichen

Vielfalt. Für die Bestimmung der Zusammensetzung, der petrophysikalischen Eigenschaften und der P-T-Bedingungen der Unterkruste und des oberen Mantels konnte auf Xenolithe zurückgegriffen werden, die mit dem subrezenten basaltischen Magmatismus an die Oberfläche gefördert wurden (Abb. 17 und Abb. 1).

Unter Nutzung seismischer und gravimetrischer Daten wurde ein erstes Krustenmodell erarbeitet, welches bereits die angestrebte hohe Äquivalenz von stofflichen und geophysikalischen Daten reflektiert (Tab. 1).

Teufe [Mächtigkeit] (km)	Vorherrschender Gesteinstyp	Wärmeleitfähigkeit bei P = 0,1 MPa und T = 20 °C (W/m/K)	Wärme- produktion ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)	Gesteins- dichte ($10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$)
0-19 [19]	Pan-Afrikanische magmatische und metamorphe Gesteine	2,6	1,4	2,7
19-37 [18]	Pan-Afrikanische plagioklasreiche mafische Granulite	1,7	0,1	2,9
> 37	Peridotite	4,1	0,03	3,3

Tab. 1: Vereinfachtes Dreischichten-Krustenmodell Jordaniens und Gesteinsparameter für die Berechnung der Geothermen.

Simplified 3-layer crustal model of Jordan and rock parameters for the calculation of geotherms.

Die zukünftigen Arbeiten konzentrieren sich auf die Untersuchung des Oberflächenwärmestroms, ein kritischer Parameter für jedes thermische Modell. Um den geringen Kenntnisstand über den ungestörten Oberflächenwärmestrom zu verbessern, wurden Temperaturprofil-Messungen in mehreren, bis zu 1000 m tiefen Bohrungen durchgeführt (Abb. 18) und die Wärmeleitfähigkeit der durchteuften Gesteinsformationen bestimmt (vgl. Abb. 17). Weitere Arbeiten beinhalten die Bestimmung der p-T-Bedingungen des oberen Mantels. Oberflächenwärmestromdichte, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeproduktion und Petrologie der Lithosphäre bilden wichtige Input-Parameter für die im folgenden beschriebenen thermo-mechanischen Modellierungen.



Abb. 18: Impressionen von der Bohrlochmessung 2002 in Süd-Jordanien nahe der Saudi-Arabischen Grenze (Foto: M. Poser, GFZ Potsdam).

Impressions from the borehole logging campaign in 2002 in southern Jordan close to the Saudi Arabian border.

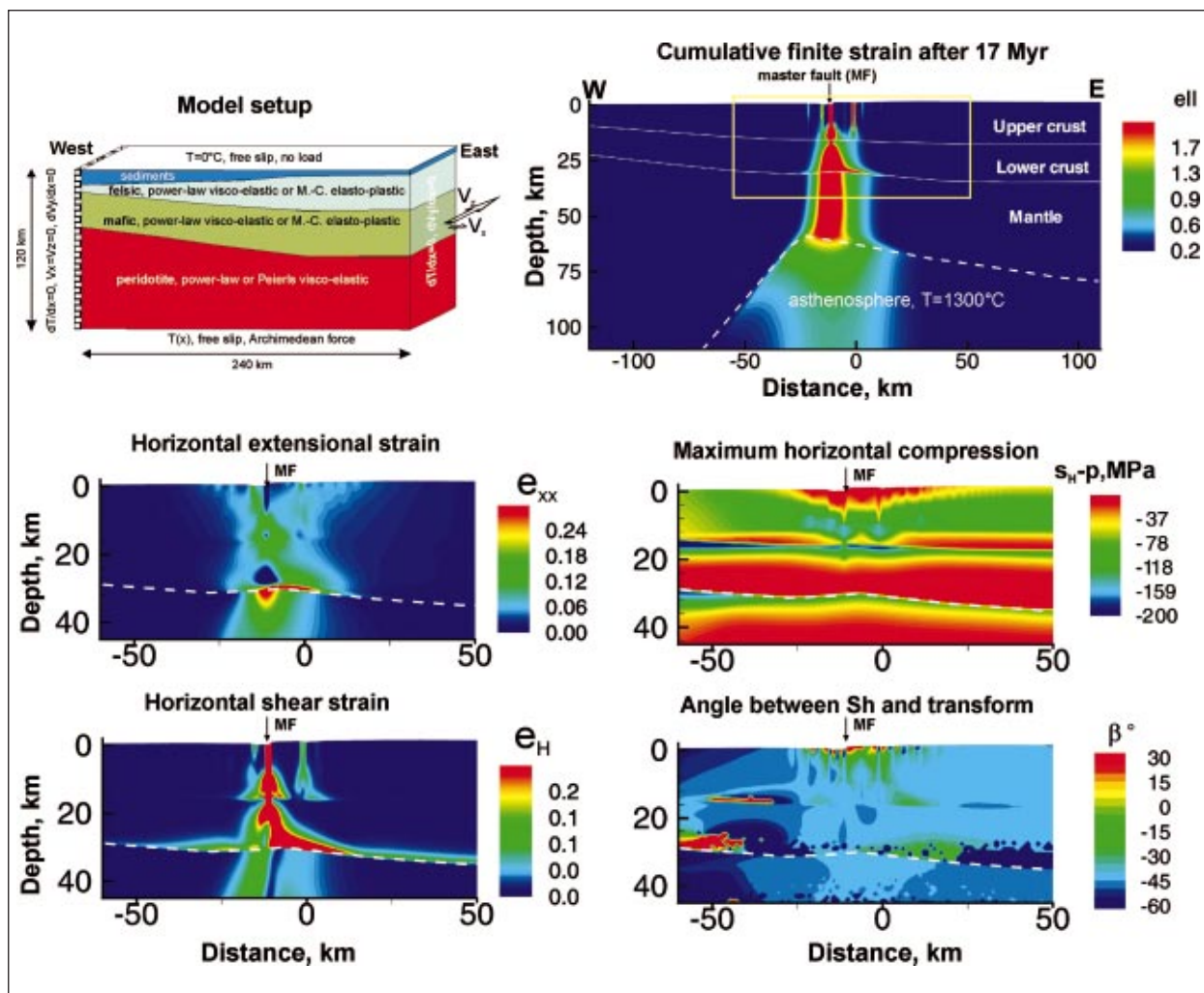


Abb. 19: Startmodell für die DST-Modellierung (oben links) und die berechnete Verformungs- und Spannungsverteilung nach 17 Millionen Jahren (oben rechts; der gelbe Kasten markiert den Ausschnitt, der in den darunter liegenden Bildern gezeigt ist). Das Modell umfasst die Kruste und den lithosphärischen Mantel und hat eine Ausdehnung von 240 auf 120 km. Das Verhalten der Modell-Lithologien entspricht im Falle spröder Verformung dem eines Mohr-Coulomb-Materials mit Verformungsentfestigung oder hat unter duktilen Bedingungen nichtlineare, temperaturabhängige, visko-elastische Eigenschaften. Der linke Modellrand ist fixiert, während sich der rechte Rand beginnend bei $t = 0$ in die z -Richtung (nordwärts) bewegt. Das Modell erzwingt anschließend 105 km sinistrale Verschiebung mit 4 km Dehnung senkrecht zur Scherrichtung in der bereits ausgedünnten Lithosphäre des Arabischen Schildes. Das Modell erklärt die heutige Topographie, die lithosphärische Struktur und das gemessene Spannungsfeld. Weiterhin zu erkennen: die leichte Topographie der Moho unter dem Arav-Tal, die Konzentration der Scherdeformation im Osten der Hauptstörung (möglicherweise der Grund für die höhere Reflektivität der Unterkruste östlich der AF, siehe Abb. 4) und die Rotation der horizontalen Haupteinengungsrichtung westlich der Störung, die übereinstimmt mit der seismischen Anisotropie der Oberkruste (Abb. 7).

The DST model setup (upper left) and calculated strain and stress fields at $t=17$ My (upper right, the yellow box marks the area shown in more detail in the four images below it). The model box is 240 km wide and 120 km thick and includes crust and mantle lithosphere. The rheological models for each rock type are either Mohr-Coulomb elasto-plastic with strain softening, simulating deformation of the brittle material, or non-linear temperature-dependent visco-elastic in the ductile deformation regime. The left-hand (western) boundary of the model is fixed for horizontal displacements, while the right-hand (eastern) boundary is moved in the Z direction, i.e. to the north, at time > 0 . The model combines 105 km left-lateral transform motion and 4 km transform-perpendicular extension of the already thinned Arabian Shield lithosphere. The model explains well the present day surface topography, lithospheric structure and measured stress field. Note the small flexure at the Moho below the Arava valley, the concentration of the horizontal shear strain east of the major fault (possibly related to the higher reflectivity of the lower crust east of the AF, Fig. 4) as well as rotation of the angle between maximal compression and fault westward from the major fault, which is in agreement with the seismic anisotropy in the upper crust (Fig. 7).

(2) *Thermomechanische Modellierung der Dead Sea Transform*

Ziel der numerischen thermomechanischen Modellierung der DST war die Integration der geologischen Befunde und der im Zuge von DESERT gewonnenen geophysikalischen Beobachtungen. Das Startmodell (Abb. 19) wurde aus den Ergebnissen der seismischen Experimente abgeleitet (DESERT Group, 2003, Abb. 4). Bei der Modellierungstechnik handelt es sich um einen expliziten Finite Elemente (FE) 2-D-Ansatz, der für einfache 3-D-Fälle modifiziert wurde (3D-Vektor- und Tensorfelder ohne Variation der Struktur und der Verformung im Streichen des Modells: „2 1/2-D“ Modellierung). Die Modellieretechnik schließt realistische visko-elasto-plastische Rheologien ein und ist somit in der Lage, die Deformation der gesamten Lithosphäre zu simulieren. Störungen und Scherzonen müssen nicht vorgegeben werden, sondern entwickeln sich innerhalb des Modells als Ergebnis spontaner Verformungslokalisierung.

Die Modellierungsergebnisse in Abb. 19 deuten darauf hin, dass die in DESERT beobachtete Struktur im wesentlichen von den Eigenschaften der Lithosphäre bestimmt wird. In einer relativ kalten und damit festen Lithosphäre wird Scherdeformation entlang von schmalen (20 bis 30 km), nahezu vertikalen Blattverschiebungszonen lokalisiert. Diese Scherzonen reichen von der Basis der Lithosphäre bis in die Oberkruste, wo die Deformation in einer oder zwei Hauptstörungen lokalisiert wird, siehe auch Rümpker et al. (2003). Der gesamte Lokalisierungsprozess wird von der Temperaturverteilung im lithosphärischen Mantel vor Beginn der Scherbewegung gesteuert. Bereiche erhöhter Temperatur repräsentieren durch die temperatur-, verformungs- und verformungsrateabhängige Gesteinsfestigkeit Zonen geringerer Festigkeit und bilden so die Ausgangspunkte trans-lithosphärischer Scherzonen. Während der sinistrale Seitenverschiebungsbetrag über hundert Kilometer erreicht, ergibt sich aus der Modellierung der DST eine nur geringe Dehnung quer zum Verlauf der Störung. Sie betrug auf dem DESERT-Profil im Arava Tal weniger als 4 km. Die Hebung des Arabischen Schildes im Bereich der DST kann möglicherweise auf eine junge (<20 Ma) Ausdünnung der Lithosphäre entlang und östlich der Plattengrenze zurückgeführt werden. Weiterhin kann das Modell die meisten lithosphärischen Strukturen erklären, die in der DESERT-Traversal beobachtet wurden, darunter die großräumige Topographie, die Störungsverteilung und Struktur der Moho im Arava-Tal (Abb. 19), die seismische Anisotropie von Kruste und Mantel und die asymmetrische Reflektivität der Unterkruste (siehe auch Abb. 4). Eine wesentliche Erweiterung hat die hier angewendete FE-Technik durch die Einführung offener Modellgrenzen (scherspannungsfreie Oberflächen, die Materialfluss erlauben) und die Nutzung paralleler Rechnerarchitekturen erfahren. Zusammen eingesetzt erlauben diese Neuerungen die Simulation komplexerer,

höher aufgelöster und räumlich ausgedehnter Probleme, die auch die Interaktion von Asthenosphäre und Lithosphäre einschließen. Vorläufige Modellierungsergebnisse mit diesem erweiterten Ansatz (Abb. 20) deuten darauf hin, dass die Lithosphärenausdünnung und die damit verbundene weiträumige Hebung des Arabischen Schildes auf relativ hohe Asthenosphären-temperaturen zurückzuführen sind (Einfluss des Afar-Mantelplumes ?).

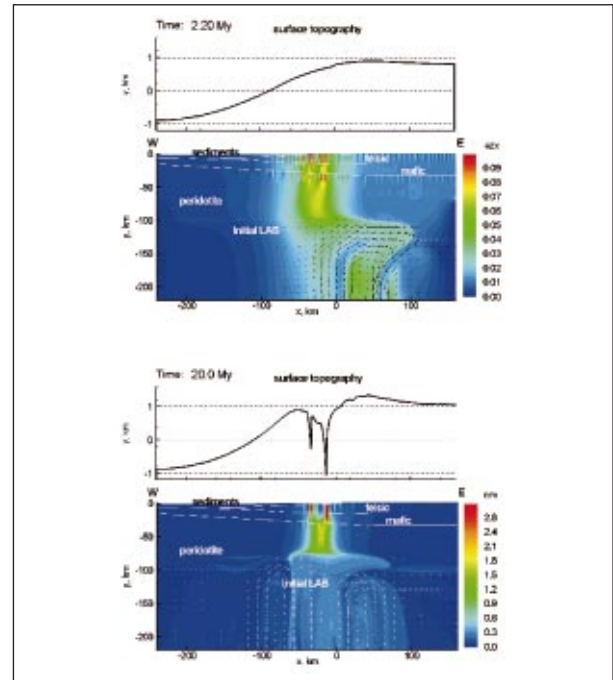


Abb. 20: Vorläufige Ergebnisse aus Modellierungen mit erhöhten Asthenosphärentemperaturen (+200°C), einer sinistralen Scherrate von 0,6 cm/Jahr und einer Dehnungsrate von 0,025 cm/Jahr. Die Abbildungen zeigen die Verteilung der finiten Scherverformung senkrecht zur Modellebene 2,2 Millionen Jahre und 20 Millionen Jahre nach Beginn der Deformation (beachte unterschiedliche Maßstäbe der Farbskalen). Die Pfeile geben die Geschwindigkeit des Materialflusses in der Modellebene an. Der obere Teil der Abbildungen zeigt jeweils die Topographie. Die Modellierung demonstriert, wie die heiße Asthenosphäre die Basis der zu Beginn dickeren Lithosphäre des Arabischen Schildes rasch erodiert und so eine asymmetrische Hebung entlang der DST nach sich zieht. In der Oberkruste ist die Deformation zunächst über eine relativ breite Zone verteilt, um dann in zwei Hauptstörungen lokalisiert zu werden. In der Unterkruste und dem lithosphärischen Mantel ist die Scherzone jeweils etwa 30 km mächtig. LAB ist die Lithosphären-Asthenosphären-Grenze.

Preliminary results of the modeling of the interaction of the hot asthenospheric material (+200°C) with the lithosphere at model time 2.2 and 20.0 Myr after initiation of the left lateral strike-slip with the velocity of 0.6 cm/year and extension with the velocity of 0.025 cm/year. Color code shows strike slip finite strain (note

different scales in the panels). Arrows show velocity vectors of the in-plain material flow. The upper sections present surface topography. The modeling shows that the hot plume material may rapidly erode initially thicker lithosphere below the Arabian Shield generating asymmetric uplift at the DST. The strike-slip deformation in the upper crust first takes place in relatively broad area, but then localizes at two major faults. In the lower crust and mantle lithosphere the deformation is localized within ca. 30 km wide zone, which extends to the bottom of the lithosphere. LAB is the lithosphere-asthenosphere-boundary.

Ausblick

Im Herbst 2003 fand in Israel eine MT-Messkampagne mit dem Ziel statt, die tiefere Krustenstruktur entlang des DESERT-Profiles zu kartieren. Im Frühjahr 2004 werden weitere Time-Domain-Elektromagnetikmessungen zur hochauflösenden Untersuchung der AF durchgeführt. Die Integration dieser Daten und die Einbeziehung der Ergebnisse der gravimetrischen Messungen, zusammen mit den Geothermie/Petrologie-Ergebnissen, sind die nächsten Ziele in diesem Projekt. All diese Daten werden dann in die abschließende 3D-thermomechanische Modellierung einfließen. Am Schluss des Projekts wird dann der Vergleich der DESERT-Ergebnisse mit anderen großen Transformstörungen stehen. Für die SAF sind hierfür im Herbst 2003 seismische Experimente zusammen mit kalifornischen Kollegen durchgeführt worden und für 2004 sind MT-Experimente an der SAF geplant. Für die SAF sind weiterhin thermo-mechanische Modellierungen im Gang (siehe weiter hinten), so dass dann durch den Vergleich der beiden Transformstörungen DST und SAF dieses Schlüsselement der Plattentektonik besser verstanden werden kann.

Literatur

- DESERT Team, 2000. *Multinational geoscientific research effort kicks off in the Middle East*, EOS, **81**, 609,616 - 617.
- DESERT Group, 2003. *Structure and dynamics of the Dead Sea Transform*, Geophys. J. Int., in press.
- El-Isa, Z., Mechie, J., Prodehl, C., Makris, J. & Rihm, R. 1987. *A crustal structure study of Jordan derived from seismic refraction data*, Tectonophysics, **138**, 235-253.
- Ginzburg, A., Makris, J., Fuchs, K., Prodehl, C., Kaminski, W. & Amitai, U. 1979a. *A seismic study of the crust and upper mantle of the Jordan-Dead Sea Rift and their transition toward the Mediterranean Sea*, J. Geophys. Res., **84**, 1569-1582.
- Ginzburg, A., Makris, J., Fuchs, K., Perathoner, B. & Prodehl, C. 1979b. *Detailed structure of the crust and upper mantle along the Jordan-Dead Sea Rift*, J. Geophys. Res., **84**, 5605-5612.
- Haberland, Ch., Agnon, A., El-Kelani, R., Maercklin, N., Qabbani, I., Rümpker, G., Ryberg, T., Scherbaum, F. & Weber, M., 2003. *Modeling of seismic guided waves at the Dead Sea Transform*, J. Geophys. Res., **108**, no. B7, 2342, doi: 10.1029/2002JB002309.
- Maercklin, N., A. Agnon, C. Haberland, R. El-Kelani, I. Qabbani, G. Rümpker, T. Ryberg, F. Scherbaum, M. Weber, A. Schulze, und DESERT Gruppe (2002). *Shallow structure of the Arava Fault (Dead Sea Transform) from seismic investigations*. EOS Transactions, American Geophysical Union 83(47). Fall Meeting Supplement, S61A-1106.
- Maercklin, N., Haberland, C., Ryberg, T. Weber, M. & DESERT Group, 2003, *Scattering of seismic waves at the Dead Sea Transform*, Geophys. J. Int., submitted.
- Makris, J., Ben-Avraham, Z., Behle, A., Ginzburg, A., Giese, P., Steinmetz, L., Whitmarsch, R.B. & Eleftheriou, S. 1983. *Seismic refraction profiles between Cyprus and Israel and their interpretation*, Geophys. J. R. astr. Soc., **75**, 575-591.
- Ritter, O., Ryberg, T., Weckmann, U., Hoffmann-Rothe, A., Abueladas, A., Garfunkel, Z. & and the DESERT Research Group, 2003. *Geophysical images of the Dead Sea Transform in Jordan reveal an impermeable barrier for the fluid flow*, Geophys. Res. Lett., **30**, no. 14, 1741, doi: 10.1029/2003GL017541.
- Rümpker, G., Ryberg, T., Bock, G. & DESERT Group, 2003. *Boundary-layer mantle flow under the Dead Sea Transform fault from seismic anisotropy*, Nature, **425**, 497-501.
- Sobolev, S. V., Babeyko, A.Yu., Garfunkel, Z. & DESERT Group 2003. *Thermo-mechanical model of the Dead Sea Transform*, submitted to EPSL.
- Smalley, P.; Higgins, A.; Hoearth, R.; Nicholson, H.; Jones, C.; Swinburne, N.; and Bessa, J. 1994. *Seawater Sr isotope variations through time: a procedure of constructing a reference curve to date and correlate marine sedimentary rocks*. Geology 22:431-434.