

# Können Kontinente untertauchen?

## Kontinentkollision und -subduktion – Tektonik, Tiefenstruktur und geodynamische Prozesse unter dem Pamir, Tien Shan und Hindukusch

Bernd Schurr, James Mechie, Xiaohui Yuan, Felix M. Schneider, Christian Sippl  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*The Pamir and Hindu Kush seismic zones, at the northwest corner of the India-Asia collision zone, are unique in that they are the only seismic zones in the heart of a continent with deep earthquakes at 90 to 250 km depth. Since 2008, the GFZ has operated several temporary seismological networks in the central Asian region in Tajikistan, Kyrgyzstan and most recently Afghanistan, together with local partners. The aims of these experiments have been to try to understand these deep seismic zones and to elucidate the crustal and mantle structure beneath the region. To date, the analysis of the seismological data shows that under the Pamir, the cold Asian mantle lithosphere descends (subducts), together with the lower crust and a part of the overlying middle crust, in a strongly curved, cone-shaped arc. At about 90 to 100 km depth, the middle crust detaches from the lower crust, pools and subsequently either stays there or rises back towards the surface due to its buoyancy. Only the lower crust descends completely to greater depths. Mineral reactions within the lower crust are most probably responsible for the deep earthquakes. Thus, in answer to the question posed by the title, only the lower continental crust seems able to descend (subduct), together with the continental lithospheric mantle, back deep into the Earth. The bulk of the crust (i.e. the upper and middle crust) remains at crustal levels and contributes to crustal thickening and mountain building.*



Mit der Theorie der Plattentektonik können die groben Bewegungs- und Verformungsmuster unserer Kontinente und Ozeane erklärt werden. Zwar unterscheiden sich ozeanische Platten mit ihrer dünnen, basaltischen Kruste und kontinentale Platten mit ihrer mächtigen, granitischen Kruste in ihren physikalischen und mechanischen Eigenschaften deutlich, trotzdem ist ihr Verhalten, zumindest an divergenten und konservativen Plattengrenzen, sehr ähnlich. In intrakontinentalen Riftzonen brechen Kontinente auseinander und an mittelozeanischen Rücken entsteht neue Ozeankruste jeweils entlang langer, schmaler Grabensysteme. An Transformergrenzen gleiten ozeanische oder kontinentale Platten als Blattverschiebungen aneinander vorbei. Nur an konvergenten Plattenrändern ist das Verhalten dieser zwei Krustentypen grundverschieden. Ozeanische Platten tauchen aufgrund ihrer großen Dichte in Subduktionszonen unter und werden im Erdmantel verschluckt. Kontinentale Lithosphäre ist dagegen leichter als die darunter liegende Asthenosphäre und anstatt abzutauchen werden kollidierende Platten zusammengefaltet und verdickt. Das resultierende Verformungsfeld an der Oberfläche ist meist komplex und auf eine Vielzahl von Störungen in oft hunderte bis tausende Kilometer breiten Gürteln verteilt. Der Himalaya und die dahinter liegenden zentralasiatischen Gebirge sind ein beeindruckendes Beispiel für diese Prozesse. Sie entstanden durch den Zusammenstoß der Indischen mit der Eurasischen Platte (Kind und Yuan, 2010), der vor rund 50 Mio. Jahren begann und bis heute die beiden Kontinente mit Raten von mehreren Zentimetern pro Jahr ineinander verkeilt. Die Verformungsgürtel in Kollisionszonen sind meist seismisch sehr aktiv. Allerdings lässt sich, im Gegensatz zu Subduktionszonen, aufgrund der Vielzahl aktiver Störungen kaum vorhersagen, wo Erdbeben auftreten. So stammen zwar nicht die stärksten, aber die mit Abstand verheerendsten Erdbeben aus innerkontinentalen Lagern und nicht etwa von Plattengrenzen des Subduktions- und Transformtypus. Beispiele aus der jüngeren Geschichte sind etwa das Muzaffarabad-Beben in Pakistan von 2005 und das Wenchuan-Beben in China von 2008, die mit jeweils über

70 000 Opfern ein Vielfaches von z.B. dem 2011er Beben in Japan mit nachfolgendem Tsunami forderten. Die Forschungsarbeiten des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ haben daher das Ziel, die Tektonik und die geodynamischen Prozesse von Gebirgsregionen besser zu verstehen, um z.B. das seismische Gefährdungspotential genauer quantifizieren zu können (vgl. auch Artikel von Pittore et al. und Boxberger et al. in diesem Heft).

Die Prozesse, die zur Verkürzung der Lithosphäre führen, sind noch in vielen Details unverstanden. Es ist klar, dass wenn die Oberkruste verkürzt und verdickt wird, die tieferliegenden Schichten, inklusive des obersten Erdmantels, ebenfalls verdickt werden. Trotzdem ist die Lithosphärenschicht bei vielen Gebirgen sehr dünn, was bedeutet, dass ein Teil der Lithosphäre verlorengegangen sein muss. Numerische Modellierungsstudien geben hierfür eine Reihe möglicher Erklärungen. In einem Modell wird unter bestimmten Bedingungen kontinentale Lithosphäre mit oder ohne Kruste zum Beispiel dann subduziert, wenn sie nach dem Schließen eines Ozeanbeckens am Ende des plattentektonischen Wilson-Zyklus von einer schweren ozeanischen Platte mit nach unten gezogen wird. Ultrahochdruckgesteine zeugen von einem solchen, zumindest kurzzeitigen Aufenthalt von Krustengesteinen in über 100 km Tiefe (vgl. Artikel von F. Wilke in diesem Heft).

Die Frage, ob und wie kontinentale Kruste subduzieren kann, ist bei der Rekonstruktion der tektonischen Geschichte von Gebirgen von großer Bedeutung. Hierbei werden die Gebirge unter der Voraussetzung, dass das gesamte Krustenmaterial bei der Verkürzung erhalten bleibt, in Computermodellen wieder auseinandergefaltet. Wenn man zeigen kann, dass ein Teil der Kruste im Erdmantel verschwindet, muss dieser Verlust an Krustenmaterial in den Modellen berücksichtigt werden. Auch für die Geochemie ist die Beantwortung dieser Frage wichtig, denn verschluckte kontinentale Kruste mit den darin enthaltenen radioaktiven und inkompatiblen Elementen, leicht schmelzenden Mineralen und möglicherweise Wasser würde auch massiv die Chemie des Erdmantels kontaminieren und zu dessen Heterogenität beitragen.

*Links: Blick von Sary Tash (Kirgisistan) über das Alaital auf die bis zu 7000 m hohe Pamirfront. Am Ende des Tals verläuft die Pamirhauptüberschiebung, entlang der vermutlich die asiatische Platte verschluckt wird (Foto: B. Schurr, GFZ).*

*Left: View from Sary Tash (Kyrgyzstan) across the Alai valley towards the mountains of the Pamir range with peaks up to 7000 m high. The Main Pamir Thrust, down which the Asian plate presumably disappears, runs along the base of the mountains.*

## Pamir und Hindukusch

Die Gebirgszüge Pamir und Hindukusch in Zentralasien sind sehr gut geeignet, um die oben skizzierten Fragen zu untersuchen (Abb. 1). Sie befinden sich im nordwestlichen Teil der indisch-eurasischen Kollisionszone, nördlich von Himalaya und Karakorum und somit im Hinterland des durch Indiens Vorrücken gebildeten Orogens. Diese entlegene Region wurde trotz ihrer geodynamischen Bedeutung bisher nur wenig untersucht.



**Kontakt:** B. Schurr  
(schurr@gfz-potsdam.de)

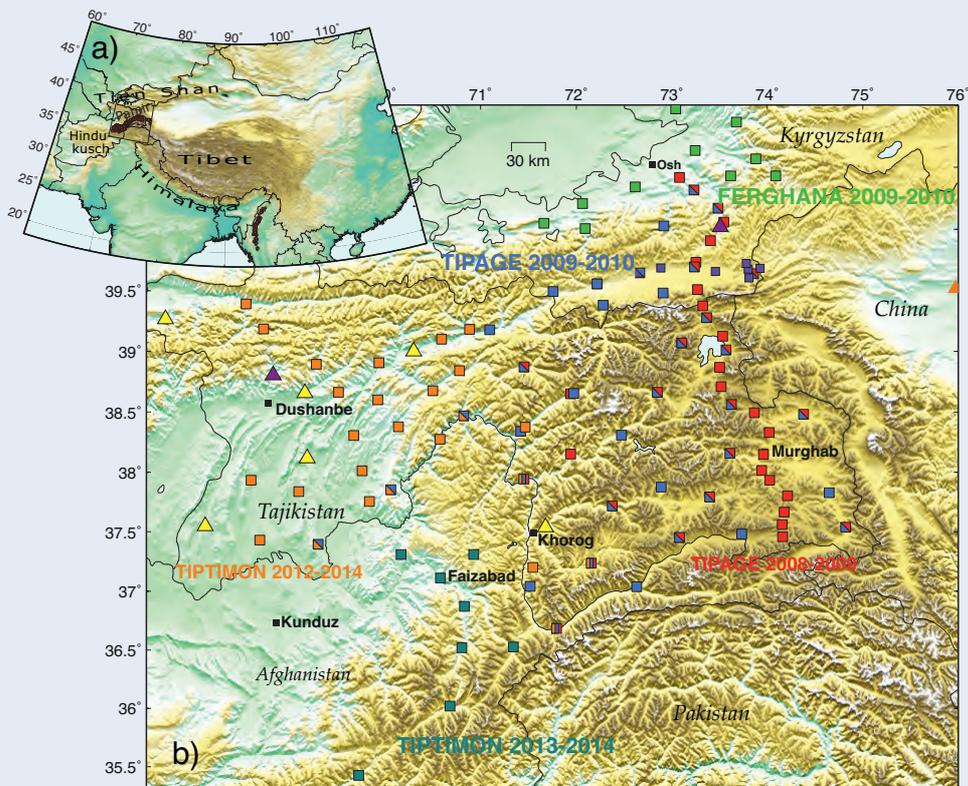


Abb. 1: a) Topographie hervorgerufen durch die Kollision zwischen der indischen und asiatischen Platte. Der Pamir befindet sich in der nordwestlichen Ecke der Kollisionszone. Rote Kreise zeigen Erdbeben in 100 km oder mehr Tiefe. Die Karte zeigt, dass die Tiefherdbeben auf die Flanken der Kollisionszone beschränkt sind und z. B. nicht unter Himalaya und Tibet auftreten. b) Übersichtskarte der zentralasiatischen Gebirge mit den zwischen 2008 bis 2013 installierten temporären Seismometernetzen.

Fig. 1: a) Topography induced by the collision between the Indian and Asian plates. The Pamir is located in the northwestern corner of the collision zone. Red circles show earthquakes at depths of 100 km or more. The map shows that the deep earthquakes are confined to the syntaxes of the collision zone and are absent from e.g. beneath the Himalaya and Tibet. b) Location map of the mountain ranges in the central Asian region showing the temporary seismological networks installed between 2008 and 2013

Der Pamir liegt zum größten Teil in der früheren Sowjetrepublik Tadschikistan. Er war für westliche Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler lange Zeit nicht zugänglich, zuerst auf Grund seiner Randlage im Grenzgebiet zu Afghanistan, Pakistan und China und später, nach Tadschikistans Unabhängigkeit, wegen eines dort jahrelang wütenden Bürgerkriegs. Erst die, zumindest für Tadschikistan, ruhigeren Zeiten nach der Jahrtausendwende erlaubten intensivere Arbeiten vor Ort. Die Lage des Hindukuschs im Nordosten Afghanistans macht die Arbeit dort aus politischen Gründen bis heute sehr schwierig.

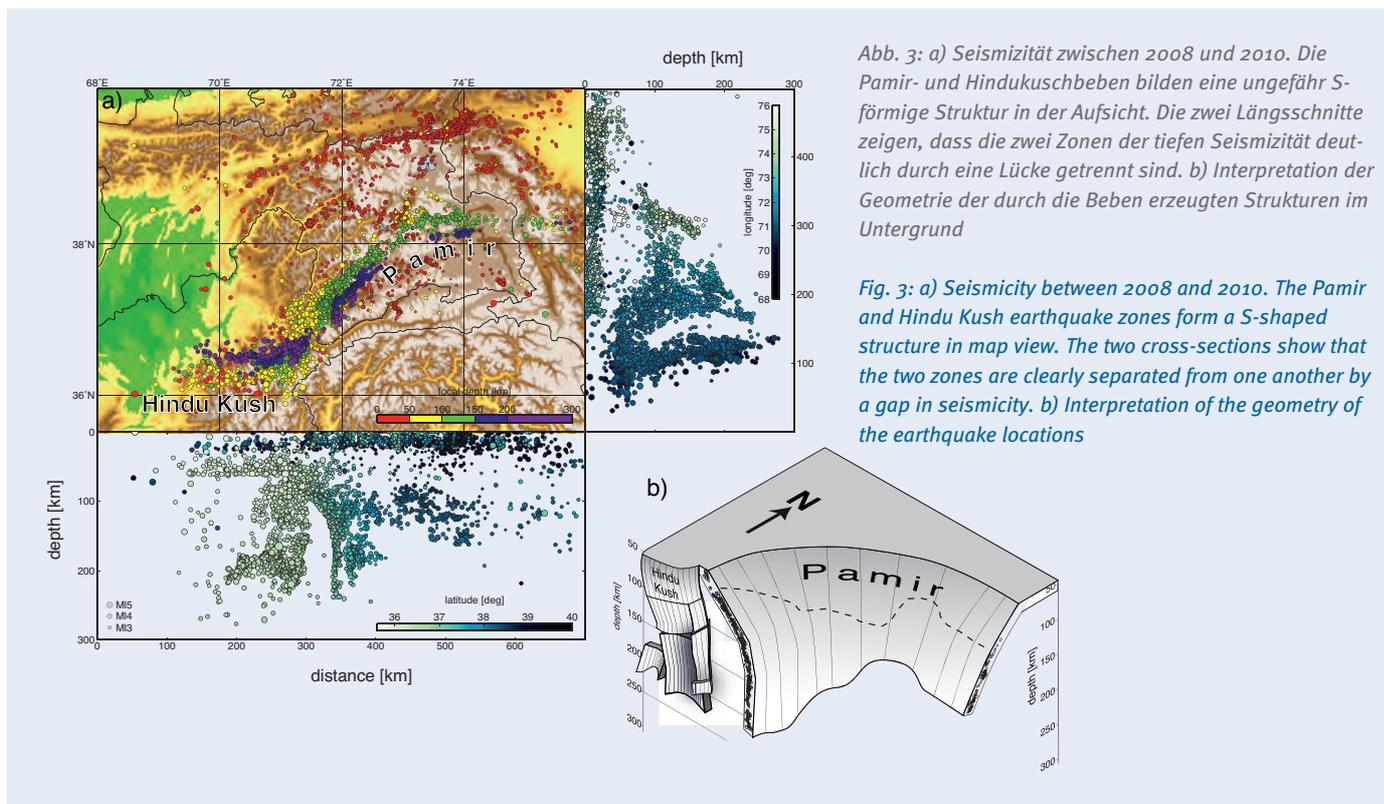
Was Pamir und Hindukusch von allen anderen Gebirgen unterscheidet, sind die dort häufig auftretenden tiefen Erdbeben (90 bis 250 km Tiefe). Diese sind einzigartig für ihre Lage im Herzen eines Kontinents. Zwar kennt man seit Langem Erdbeben im Erdmantel in sogenannten Wadati-Benioff-Zonen, allerdings treten diese praktisch ausschließlich dort auf, wo eine ozeanische Platte verschluckt wird. Gesteine verformen sich bei den im Erdmantel herrschenden hohen Drücken und Temperaturen plastisch und somit aseismisch, d. h. ohne Erdbeben zu erzeugen. Erst die in ozeanischen Platten reichlich eingebundenen Fluide, die beim Vordringen der Gesteine in größere Tiefen bei Mineralumwandlungen freigesetzt werden und dabei den Umgebungsdruck absenken, ermöglichen Sprödbrüche und somit Erdbeben – so zumindest die gängige Vorstellung der Prozesse in diesen unzugänglichen Tiefen. Da solche Fluidreservoirs in

kontinentalen Platten fehlen, verlaufen die dynamischen Prozesse dort ruhig. Tatsächlich sind nahezu alle Faltengebirge, die durch den Zusammenstoß von Kontinenten entstanden sind, in größeren Erdmanteltiefen aseismisch, inklusive z. B. Himalaya und Tibet (Abb 1a). Nur Pamir und Hindukusch stellen eine Ausnahme dar. Die Gründe hierfür sind noch unklar. In jedem Fall ermöglichen die Erdbeben einen direkteren und genaueren Einblick in die in diesen Tiefen ablaufenden Prozesse,



Abb. 2: Seismische Station auf dem östlichen Pamirplateau in Rangkul, Tadschikistan (Foto: B. Schurr, GFZ)

Fig. 2: Seismological station at Rangkul, Tajikistan, in the eastern Pamir plateau



als es in irgendeinem anderen Faltengebirge möglich ist. Die Erdbebenquellen selbst zeugen vor Ort von den Gesteinsverformungen und dem dort herrschenden Spannungsfeld und ihre ausgesendeten Wellen durchdringen die darüber liegenden Strukturen und ermöglichen so geophysikalische Abbilder von hoher Auflösung.

Um sich diese besondere Situation zu Nutze zu machen, hat das GFZ seit 2008 mehrere temporäre seismische Netzwerke in Tien Shan, Pamir und Hindukusch und den an die Gebirge angrenzenden Becken installiert (Abb.1; Mechie et al., 2012, Haberland et al., 2012). Diese Netze produzierten die ersten modernen, digitalen seismologischen Daten der Region. Die Seismographen wurden in die Erde eingegraben und mit einer Photovoltaikanlage mit Strom versorgt (Abb.2). Über einen Zeitraum von ein bis zwei Jahren konnten so kontinuierlich und autark kleinste Bodenbewegungen registriert werden.

## Erdbebenverteilung

Abb.3 zeigt die Verteilung von über 9000 Erdbeben, die während der ersten Projektphase von 2008 bis 2010 aufgezeichnet und detektiert wurden. Die Region ist eine der seismisch aktivsten der Erde. Um diese hohe Anzahl von Ereignissen auswerten zu können, wurde ein automatisierter Prozess entwickelt und implementiert, der aus den kontinuierlichen Seismogrammen über mehrere Stufen die abgebildeten Hypozentren bestimmt (Sippl et al., 2013a). Die tiefe Seismizität formt mehrere wohl

definierte Flächen von nur rund 10 km Mächtigkeit und komplexer Geometrie (Abb.3b). Die Erdbeben unter dem Pamir lassen sich zu einem eng gekrümmten 90°-Bogen zusammenfügen, der sich nach Norden und Westen an die den Gebirgsbogen flankierenden Störungssysteme anbinden lässt. Diese Geometrie ist ein deutlicher Hinweis dafür, dass die Erdbeben in Gesteinen eurasischer Provenienz auftreten und nicht Teil der Indischen Platte sind, wie zuvor zum Teil angenommen wurde. Die Pamirzone ist von der Hindukuschzone deutlich durch eine sich nach oben verjüngende seismische Lücke getrennt. Die Zuordnung der Hindukuschbeben lässt sich nicht eindeutig klären, weil die stark streuenden Lokalisierungen – vor allem der flacheren Ereignisse – eine Anbindung sowohl an die Indische als auch die Eurasische Platte erlauben würden. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass sich die hier abgebildeten Hindukuschbeben außerhalb der seismischen Netze befinden und ihre Tiefenlage deshalb nicht immer gut bestimmt ist. Seit dem Frühjahr 2013 sind acht weitere Seismographen direkt über dem Hindukuschbeben in der afghanischen Provinz Badkhschan installiert (Abb.1). Diese neuen Daten sollen unter anderem dazu beitragen, die Herkunft der Hindukuschbeben und ihre Verbindung zum Pamir zu klären.

## Tiefe Struktur der Gebirge

Die Laufzeiten der von den Erdbeben ausgesendeten Wellen können in einem tomographischen Verfahren dazu verwendet werden, die seismischen Geschwindigkeiten dreidimen-

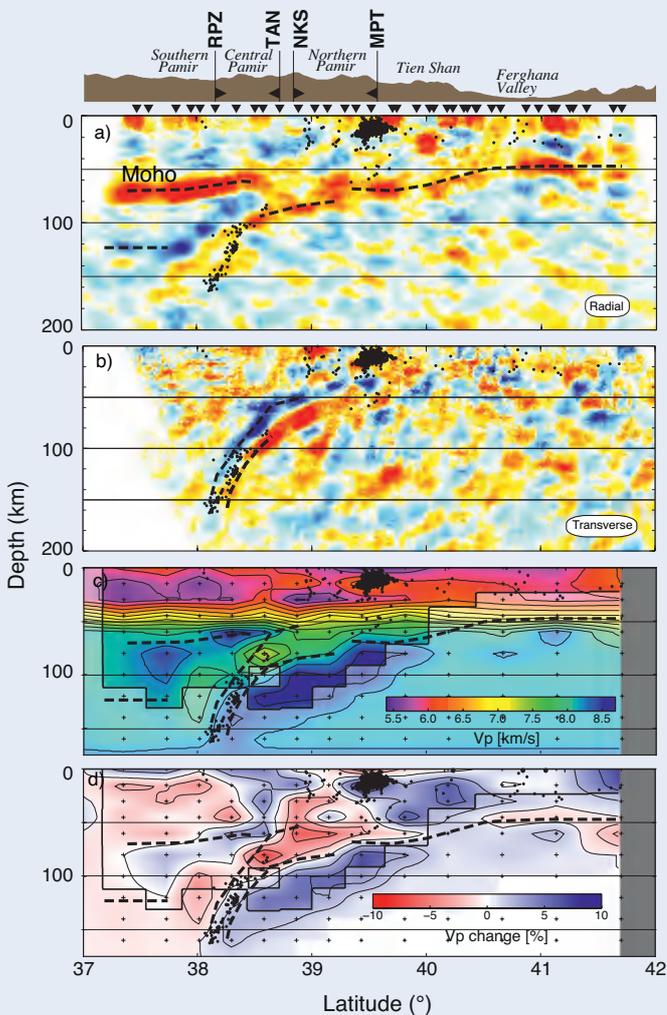


Abb. 4: Nord-Süd-Profil durch den Tien Shan und östlichen Pamir. a) CCP (common conversion point)-Stapelung der Radialkomponente von Receiver Functions. b) Transversalkomponente mit  $60^\circ$  Dipkorrektur. c) Schnitt durch das Tomographiemodell, absolute Geschwindigkeiten, d) Geschwindigkeiten relativ zu einem eindimensionalen Hintergrundmodell

Fig. 4: N-S profile through the Tien Shan and eastern Pamir. a) CCP stack of the radial-component receiver functions. b) CCP stack of the transverse-component receiver functions with  $60^\circ$  dipping layers. c) Cross-section through the tomography model, showing absolute velocities. d) Cross-section through the tomography model, showing relative velocities with respect to a 1-D background model

sional abzubilden. Diese sind einerseits Indikatoren für die Gesteinszusammensetzung – ein starker Kontrast (Impedanz) wird z. B. durch die unterschiedlichen Mineralgehalte von Krusten- und Mantelgesteinen hervorgerufen. Andererseits sind sie, bei gleicher oder ähnlicher Lithologie, auch empfindlich für Temperaturunterschiede, wobei kältere Gesteine höhere seismische Geschwindigkeiten aufweisen. Abb. 4c und 4d zeigen ein Nord-Süd-Profil durch das tomographische Modell in absoluten seismischen Druckwellengeschwindigkeiten ( $v_p$ ) und Abweichungen relativ zu einem Hintergrundmodell (Sippl et al., 2013b). Dieses Profil quert den Tien Shan, das Alaital mit der Pamirhauptüberschiebung (MPT) und den gesamten Pamir. Wie erwartet, wird ein starker Geschwindigkeitsgradient durch die Krusten-Mantel-Grenze (auch Mohorovičić-Diskontinuität oder Moho) hervorgerufen (Abb. 4d). Im Erdmantel sieht man eine

seismisch schnelle (blau in Abb. 4c und 4d) Struktur nach Süden abtauchen. Die seismischen Geschwindigkeiten sind typisch für kalte Mantelgesteine und diese Anomalie bildet höchstwahrscheinlich kalte (weil sie ursprünglich näher an der Erdoberfläche war) eurasische Mantellithosphäre ab. Parallel darüber sieht man eine Zone mit sehr niedrigen Geschwindigkeiten bis in 90 km Tiefe, so niedrig, dass die Abweichung nicht allein von Temperaturunterschieden herrühren kann. Diese Niedriggeschwindigkeitszone stellt mit größter Wahrscheinlichkeit Krustengestein dar, das von der kalten Lithosphärenplatte nach unten gezogen wurde. Die Erdbeben befinden sich direkt unterhalb der Niedriggeschwindigkeitszone. Das vermutete Krustengestein ist klar durch einen kleinen Mantelkeil von der Oberplatte getrennt. Betrachtet man die gesamte dreidimensionale Struktur, sieht man, dass sich die tiefe Zone mit Krustengeschwindigkeiten um den ganzen Pamirbogen verfolgen lässt, im Südwesten aber der Mantelkeil verschwindet und die Niedriggeschwindigkeitszone zu einem sehr tiefen „Mohograben“ wird (Abb. 5). Dabei scheinen sich die Erdbeben direkt an den unteren Rand der Niedriggeschwindigkeitszone anzuschmiegen.

Eine weitere, von der Tomographie unabhängige Methode zur Abbildung von seismischen Strukturen sind die Receiver Functions (Kind und Sodoudi, 2013). Hier macht man sich zu Nutze, dass an Geschwindigkeitskontrasten, wie z.B. der Moho, seismische Druckwellen (P-Wellen) von Fernbeben teilweise in Scherwellen (S-Wellen) konvertiert werden (und umgekehrt). Mit der Receiver Function-Methode werden diese Konversionen in den Seismogrammen isoliert und mit einem Migrationsverfahren wieder zurück projiziert, um dadurch ein Abbild des Untergrunds zu schaffen. Während die Tomographie ein verschwommenes, kontrastarmes Bild des Untergrunds erzeugt, liegt die Stärke der Receiver Function-Methode in der Abbildung der Kontraste. Daher ergänzen sich beide Methoden in idealer Weise. Abb. 4a und 4b zeigen das migrierte Bild der radial ausgerichteten Q- und transversalen T-Komponenten entlang ungefähr desselben Nord-Süd-Profiles über den Ostpamir wie bei der Tomographie (Schneider et al., 2013). Rote Phasen zeugen von einem Kontrast, bei dem sich die Geschwindigkeiten von unten nach oben verringern, wie es z. B. bei der Kruste-Mantel-Grenze zu erwarten wäre. Im Abbild der Radialkomponente ist demzufolge auch die Moho die dominierende Struktur (Abb. 4a). Man sieht eine stufenweise Krustenverdickung von ungefähr 45 km Mächtigkeit am Rand des Ferganabeckens, über 60 km unter dem Tien Shan, bis zu ungefähr 75 km unter dem Südpamir. Dieser ungefähre Verlauf wurde unabhängig davon durch das Modellieren von Tauchwellen und reflektierten Phasen einzelner Erdbeben entlang desselben Profils bestätigt (Mechie et al., 2012). Die Kruste unter dem Pamir zählt damit zu den dicksten weltweit und diese große Mächtigkeit ist eine direkte Konsequenz des Zusammenstoßes von Indien mit Asien. Ungefähr unter dem Zentralpamir sieht man in Abb. 4a eine weitere rote Phase nach Süden abtauchen. Diese Phase könnte das gesuchte Signal für die möglicherweise verschluckte Kruste sein, scheint aber eine geringere Neigung als die Erdbebenzone zu haben. Allerdings werden in dem hier verwandten Migrationsverfahren nur Konverter, die etwa horizontal liegen, wie z. B. die Moho, richtig abgebildet, stark geneigte Strukturen aber falsch. Für das in Abb. 4b dargestellte Profil wurde dies korrigiert. Hier wurden die korrekten Strahlverläufe der seismischen Wellen

verwendet, die sich durch eine nach Süden geneigte Struktur ergeben. Außerdem wurde hier die Transversalkomponente (T) verwendet, die bei horizontaler Schichtung an sich keine Energie trägt, bei geneigten Strukturen aber ein besonders klares Signal liefert. Das Bild aus den T-Komponenten zeigt eine deutlich nach Süden geneigte blau-rote Doppelphase, ein Hinweis auf eine Niedriggeschwindigkeitszone eingebettet in ein Hochgeschwindigkeitssubstrat. Diese scheint die tiefen Erdbeben einzuhüllen. Das Modellieren der von der Niedriggeschwindigkeitszone stammenden konvertierten Phasen mit synthetischen Seismogrammen ergab, dass die Schicht etwa 11 km dick sein muss. Für einen Vergleich mit der Tomographie wurden die horizontalen und geneigten Hauptkonverter aus den beiden Receiver Function-Profilen interpretiert und auf die Tomographieschnitte kopiert (Abb. 4). Man findet im Allgemeinen eine sehr gute Übereinstimmung, was eine kombinierte Interpretation der Datensätze ermöglicht, die in Abb. 5 skizziert ist. Demnach taucht unter dem Pamir asiatische Mantellithosphäre in einem stark gekrümmten Bogen, wie in einem Trichter ab. Mit ihr werden wahrscheinlich die untere Kruste und ein Teil der darüber liegenden mittleren Kruste ebenfalls in die Tiefe transportiert. In Tiefen zwischen ungefähr 90 bis 100 km

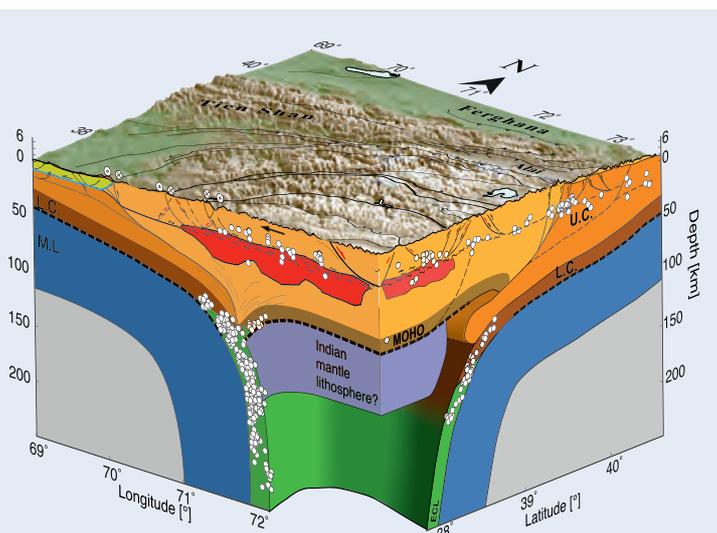


Abb. 5: Interpretatives Modell: Unter dem Pamir taucht kalte asiatische Mantellithosphäre (M. L.) in einem stark gekrümmten Bogen, wie in einem Trichter ab. Mit ihr werden die untere Kruste (L. C.) und ein Teil der darüber liegenden mittleren Kruste (U. C.) ebenfalls in die Tiefe transportiert. In Tiefen zwischen ungefähr 90 bis 100 km löst sich die mittlere von der unteren Kruste, um sich dort zu sammeln und zu verweilen oder auf Grund ihres Auftriebs wieder nach oben zu wandern. Nur die untere Kruste wird ganz verschluckt. Mineralumwandlungen sind hier wahrscheinlich für die Erdbeben verantwortlich.

Fig. 5: Interpretative model. Under the Pamir, the cold Asian mantle lithosphere descends (subducts), together with the lower crust and a part of the overlying middle crust, in a strongly curved, cone-shaped arc. At about 90-100 km depth, the middle crust detaches from the lower crust, collects there and either stays there or due to its buoyancy rises back towards the surface. Only the lower crust descends completely to greater depths. Mineral reactions within the lower crust are most probably responsible for the deep earthquakes.

löst sich die mittlere von der unteren Kruste, um sich dort zu sammeln und zu verbleiben oder auf Grund ihres Auftriebs wieder nach oben zu wandern. Diese Ansammlung von Material aus der mittleren Kruste erzeugt die markante Niedriggeschwindigkeitszone unterhalb des Zentralpamirs, die in der Tomographie sichtbar ist. Wahrscheinlich unterscheidet sich die Zusammensetzung der Gesteine aus der mittleren Kruste deutlich von denen aus der unteren. Der darin enthaltene Quarz wird bei den in der Tiefe herrschenden Temperaturen hoch duktil. Weil er leichter als die basaltischere untere Kruste ist, kann er sich von dieser ablösen. So bewegt sich nur die untere Kruste weiter in den Erdmantel. Mineralumwandlungen in der unteren Kruste sind wahrscheinlich für die in dieser Region registrierten Erdbeben verantwortlich. Unklar bleibt, welche Mineralumwandlungen hier stattfinden und warum die Tiefherdbeben nur hier auftreten. Ebenso konnte die Beziehung der Pamir- zur Hindukuschzone im Rahmen dieser Untersuchungen nicht endgültig geklärt werden. Ähnlich detaillierte Bilder des Untergrunds wie für den Pamir fehlen im Hindukusch. Die aktuell vom GFZ in Afghanistan installierten Seismographen sollen diese Lücke in den Meßdaten schließen.

Die im Titel gestellte Frage „Können Kontinente untertauchen?“ ist wohl nicht mit einem einfachen Ja oder Nein zu beantworten. Vermutlich wird nur ein kleiner Teil der Kruste zusammen mit der Mantellithosphäre verschluckt. Der größte Teil bleibt oben und trägt zur Krustenverdickung und Gebirgsbildung bei. Ganze Kontinente können also nicht einfach verschwinden. Dass unter extremen Bedingungen Material kontinentaler Kruste in den Mantel aufgenommen werden kann, scheinen die hier vorgestellten Ergebnisse im Pamir jedoch zu belegen.

## Literatur

- Haberland, C., Abdybachev, U., Schurr, B., Wetzel, H.-U., Roessner, S., Sarnagoev, A., Orunbaev, S., Janssen, C. (2011): Landslides in Southern Kyrgyzstan: Understanding Tectonic Controls. - *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 92, 20, 169-176, 10.1029/2011EO200001.
- Kind, R., Yuan, X. (2010): Seismic Images of the Biggest Crash on Earth. - *Science*, 329, 5998, 1479-1480, 10.1126/science.1191620.
- Kind, R., Sodoudi, F. (2013): Die Erde durchleuchten: Modellierung von seismischen Signalen. - *System Erde*, 3, 1, 26-31.
- Mechie, J., Yuan, X., Schurr, B., Schneider, F., Sippl, C., Ratschbacher, L., Minaev, V., Gadoev, M., Oimahmadov, I., Abdybachev, U., Moldobekov, B., Orunbaev, S., Negmatullaev, S. (2012): Crustal and uppermost mantle velocity structure along a profile across the Pamir and southern Tien Shan as derived from project TIPAGE wide-angle seismic data. - *Geophysical Journal International*, 188, 2, 385-407, 10.1111/j.1365-246X.2011.05278.x.
- Schneider, F., Yuan, X., Schurr, B., Mechie, J., Sippl, C., Haberland, C., Minaev, V., Oimahmadov, I., Gadoev, M., Radjabov, N., Abdybachev, U., Orunbaev, S., Negmatullaev, S., GIPP (2013): Seismic imaging of subducting continental lower crust beneath the Pamir. - *Earth and Planetary Science Letters*, 375, 1, 101-112, 10.1016/j.epsl.2013.05.015.
- Sippl, C., Schurr, B., Yuan, X., Mechie, J., Schneider, F., Gadoev, M., Orunbaev, S., Oimahmadov, I., Haberland, C., Abdybachev, U., Minaev, V., Negmatullaev, S., Radjabov, N. (2013): Geometry of the Pamir-Hindukush intermediate-depth earthquake zone from local seismic data. - *Journal of Geophysical Research*, 118, 4, 1438-1457, 10.1002/jgrb.50128.
- Sippl, C., Schurr, B., Typel, J., Angiboust, S., Mechie, J., Yuan, X., Schneider, F., Sobolev, S. V., Ratschbacher, L., Haberland, C. (2013): Deep burial of Asian continental crust beneath the Pamir imaged with local earthquake tomography. - *Earth and Planetary Science Letters*, 384, 165-177, 10.1016/j.epsl.2013.10.013.