

Ultrahochdruck-Eklogite aus dem nord-westlichen Himalaya: eine Studie zu den Druck-Temperatur-Zeit-Bedingungen ihrer Exhumation

Franziska D. H. Wilke

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Using petrology, isotope geochemistry and thermochronology, continental rocks were investigated that have been subducted and metamorphosed under ultra high-pressure (UHP) conditions. The metamorphic conditions during burial and exhumation of eclogites, schists and gneisses from the tectonically and climatically influenced north-western Himalaya, from the Kaghan Valley in Pakistan, were analysed, and ages and rates of exhumation determined. A multi-stage exhumation path is evident. It is shown that the UHP rocks initially experienced very rapid exhumation of up to 14 cm/a from mantle depths (~140 km) to the base of the continental crust (~40 km) where exhumation slows down to 1 to 2 mm/a. The initial exhumation is buoyancy driven and as fast as recent plate movements (ca. 10 cm/a). Changes in the exhumation rate point to changes in buoyancy and to particular processes forcing further exhumation and final exposure such as thrusting, folding and back sliding. Similar processes have been recognized at Tso Moriri, Ladakh, NW India where comparable rock assemblages occur and where research is in progress.



Ansicht von Saleh Gali, nördliches Kaghan-Tal, Pakistan (Foto: P. O'Brien, Universität Potsdam)

View of Saleh Gali, northern Kaghan Valley, North Pakistan

Die großen Gebirgszüge, wie wir sie heute kennen, sind bei Subduktions- und Kollisionsprozessen tektonischer Platten über Jahrmillionen entstanden. Allgemein kann man zwischen zwei Typen von Subduktionszonen unterscheiden: während der pazifische Typ die langandauernde Subduktion von ozeanischer Kruste in den Mantel umfaßt, ist der alpine Subduktionstyp durch die Versenkung einer ozeanischen Platte mit anschließender Kollision eines mitgeführten Kontinents mit einem anderen Kontinent, Mikrokontinent oder Inselbogen charakterisiert. Mit der Subduktion ozeanischer Kruste geht eine mineralische Umwandlung (Metamorphose) der Gesteins- und Sedimentabfolgen unter Hochdruck (HP: high pressure; bis etwa 8 bis 16 kbar) aber bei niedriger Temperatur (LT: low temperature; bis etwa 500 °C) einher. Kommt es im Anschluß zur Kollision von Kontinenten, kann die vorderste Kante des kollidierenden Körpers bis in den Erdmantel mit hinunter gezogen werden, so dass felsisches Krustenmaterial unter Hochdruck oder sogar Ultrahochdruck (UHP: ultra high-pressure; ab 27 kbar) metamorph überprägt wird (Gilotti, 2013). Terrane, die derlei hochgradig metamorphe Gesteine beinhalten, sind z. B. der nordwestliche Himalaya oder auch nördlich Teile der Varisziden in Europa, z. B. im Erzgebirge (Massonne und O'Brien, 2003).

Bei der Subduktion bzw. Kollision entstehen typische Gesteine, wie z. B. Gneise, Glimmerschiefer, Blauschiefer und Eklogite, die an der Erdoberfläche als anstehendes Gestein, in Geschieben (vgl. auch Artikel von K. Hahne in diesem Heft) oder als Sediment auftreten. Oberflächennahe Abläufe, die zur morphologischen Strukturierung eines Orogens führen, sind ansatzweise verstanden, während Prozesse im Erdinnern weit weniger bekannt sind. Informationen hierüber können jedoch aus den Festgesteinen, ihren Mineralen und wiederum deren chemischen Komponenten gewonnen werden, da diese die Entstehung und Entwicklung der Gebirgsbildung „mitemlebt“ und die Informationen gespeichert haben. Die hier vorgestellten Arbeiten tragen zur Validierung geophysikalischer Ergebnisse und geodynamischer Modellierungen bei und versuchen, ungelöste Fragen der Geodynamik schrittweise zu beantworten.

UHP-Gesteine in kontinentalen Kollisionszonen

Es existieren einige Modelle, mit denen das Vorkommen von UHP-Gesteinen in kontinentalen Kollisionszonen erklärt werden könnte. Davon sind insbesondere zwei für den Himalaya von Bedeutung (Abb. 1), da sie den inversen metamorphen Gradienten – d. h. hochgradig metamorphe Gesteine (HP/UHP) liegen über Gesteinen mit niedrigerem Metamorphosegrad (HP/LP) – erklären könnten. In einem dieser Modelle führt der Auftrieb von subduzierter, leichter Kruste zur Separation des oberen,

felsischen Krustenmaterials vom unteren, basischeren (und damit dichteren) Krustengestein sowie vom noch dichteren oberen Erdmantel (Abb. 1a). Hierdurch kommt es zur Stapelung von Krustenmaterial in der Subduktionszone. Der sich bildende Stau könnte zu Zugspannungen und zum Abbruch der subduzierten Platte führen (slab break-off). Durch den zeitlichen Verzögerung und durch Hitzeeinwirkungen des aufsteigenden asthenosphärischen Mantels wäre eine Erwärmung des gestapelten Gesteins möglich. Eine andauernde Subduktion würde nach dem slab break-off unter einem flacheren Winkel stattfinden, so dass sich in der Folge keine weiteren UHP-Gesteine mehr bilden sondern „nur“ noch HP-Gesteine. Demzufolge würden UHP-Gesteine zuoberst und über HP-Gesteinen liegen, wie es im Himalaya beobachtet wird. Durch Stapelung und Faltung von geologischen Einheiten wäre ein finaler Aufstieg von vormals tief subduzierten Gesteinen gewährleistet.

In einem zweiten Modell wird angenommen, dass es eine Rückkopplung zwischen Klima, insbesondere der Erosion durch den Monsun, und Tektonik gibt (Abb. 1b). Beim sogenannten „channel flow“-Modell werden duktile HP-Gesteine zwischen kompakten und rigiden Krustengesteinen herausgepresst (extrudiert). Oberflächennahe Prozesse, wie die verstärkte Erosion bei hohen Niederschlagsmengen an der Extrusionsfront, führen zur Kanalisation von partiell geschmolzenem Gestein. Die notwendige partielle Schmelzbildung in den kristallinen Sequenzen setzt eine lange Verweildauer der subduzierten Gesteine in größeren Tiefen voraus. Generell bestünde eine gegenseitige Abhängigkeit zwischen Klima und Tektonik insofern, als mit der Hebung der tektonischen Barriere, hier dem Tibetplateau, der Monsun initiiert wird und dieser wiederum die Hebung unterstützt.

Arbeitsablauf und Schwierigkeiten

Um die Exhumation von UHP-Gesteinen zu quantifizieren und die Mechanismen dahinter zu verstehen, muss ein Druck-Temperatur-Zeit-Pfad (P-T-t) rekonstruiert werden. Mit dem Wechsel zwischen subduktionsbedingten zu kollisionsbedingten Prozessen kommt es zu mehreren metamorphen Überprägungen des Gesteins, was die Rekonstruktion des P-T-t-Pfads deutlich erschwert, aber auch detaillierte Untersuchungen ermöglicht. Problematisch ist in diesem Zusammenhang auch die Datierung von mehrfach metamorph überprägten Gesteinen, da z. B. (1) mehrere ineinander übergehende Generationen von datierbaren Mineralen vorliegen oder ältere Generationen partiell zeitlich zurückgesetzt worden sein können und (2) es generell schwierig ist, das Alter datierbarer Minerale einem bestimmten metamorphen Stadium zuzuschreiben. Die Erstellung



Kontakt: F. Wilke
(fwilke@gfz-potsdam.de)

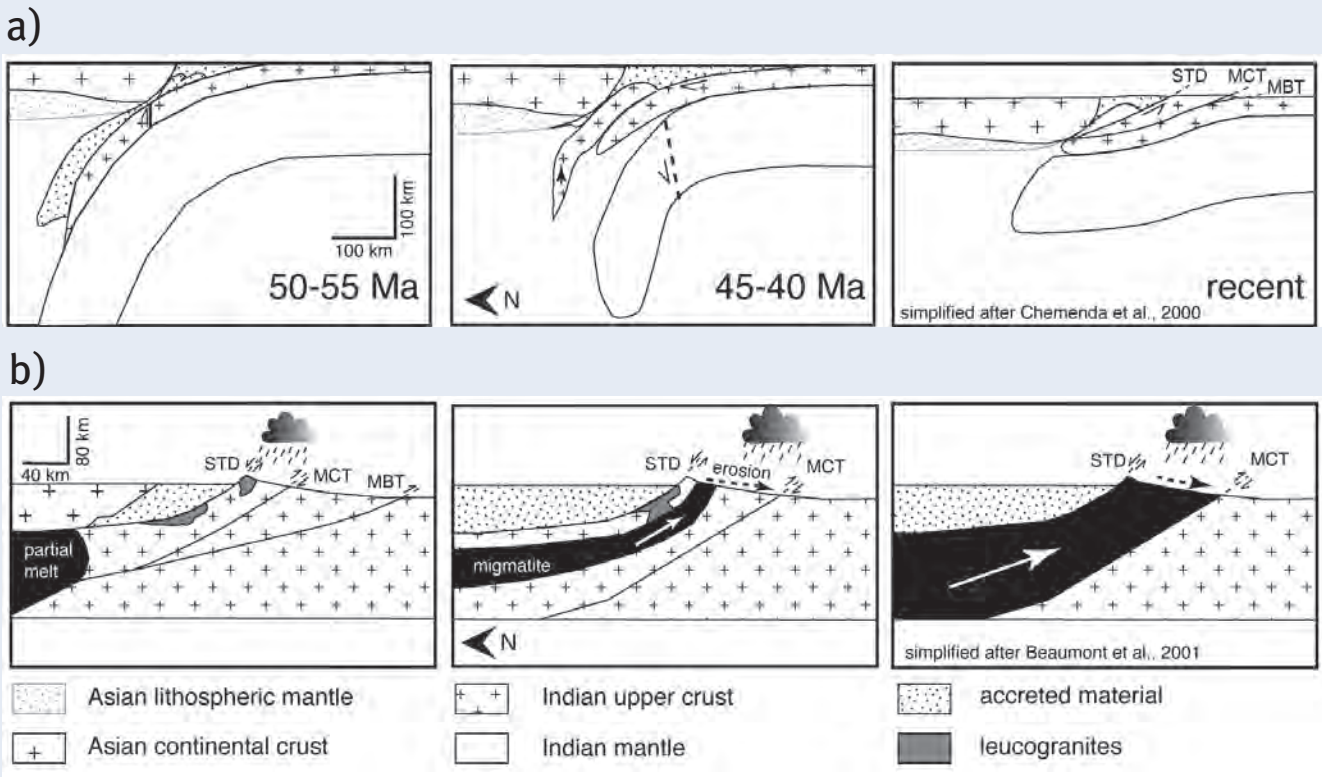


Abb. 1: a) Leichte, kontinentale Kruste wird aufgrund von Auftriebskräften nach der Subduktion wieder exhumiert; b) Gesteine mit einem geringen Grad an partieller Schmelze werden durch gerichtete Erosion zwischen rigidem Krustenmaterial extrudiert.

Fig. 1: a) Less dense continental crust become exhumed due to buoyancy; b) crystalline sequences with a presence of partial melt extrude between rigid upper and lower crustal bodies, supported by an enhanced erosion at the extrusion front.



Abb. 2: Aufschluss bei Saleh Gali: gefalteter und beprobter Eklogit (Foto: P. O'Brien, Universität Potsdam)

Fig. 2: Outcrop at Saleh Gali: outcrop of sampled folded eclogite



Abb. 3: Anschliff eines Eklogits von Saleh Gali; rot: Granat; vertikale dunkle Lagen: Klinopyroxene und Amphibole; horizontale dunkle Adern: späte Amphibole (Foto: F. Wilke, GFZ)

Fig. 3: Hand specimen of an eclogite from Saleh Gali; red: garnet, dark vertical layers: clinopyroxene and amphiboles, horizontal veins: late amphiboles

eines aussagekräftigen P-T-Pfads hatte daher erste Priorität. Es wurden detaillierte petrographische und, mittels Mikrosonde, geochemische Analysen durchgeführt, um die Mineralparagenesen während der metamorphen Stadien und die chemischen Zonierungen in den Mineralen herauszuarbeiten. Auf dieser Grundlage wurden geothermobarometrische Berechnungen

durchgeführt und zur Implementierung von Fraktionierungs- und Zonierungsinformationen ein thermodynamisches Modell erstellt. Nachfolgende Isotopenanalysen von verschiedenen Mineralen und Spaltspurendatierungen ergaben Alter über einen großen Druck- und Temperaturbereich, die eine Aussage zur Aufstiegsgeschwindigkeit erlauben.

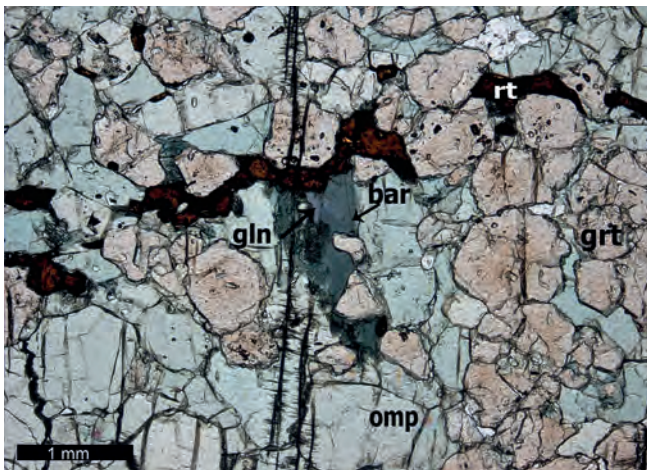


Abb. 4: Dünnschliff des Saleh Gali-Eklogits mit petrographischen Beweisen für eine eklogitfazielle Metamorphose (Granat: grt, Omphazit: omp, Rutil: rt) sowie blauschiefer- (Glaukophan: gln) und amphibolitfazieller (Barroisit: bar) Überprägung (Foto: F. Wilke, GFZ)

Fig. 4: Thin section of the Saleh Gali eclogite showing evidence for eclogite facies peak metamorphism (garnet: grt, omphacite: omp, rutile: rt), blueschist- (glaucofan: gln) and amphibolite facies (barroisite: bar) overprints

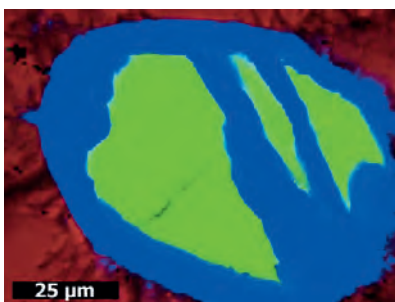


Abb. 5: Ramanspektroskopiekarte eines Coesit (grün) und Quarz (blau) in Omphazit von einem Eklogit aus Saleh Gali (Aufnahme: F. Wilke, GFZ, M. Ziemann, Universität Potsdam)

Fig. 5: Colour-coded Raman map showing coesite (green) rimmed and crosscut by quartz (blue), hosted in omphacite from a Saleh Gali eclogite

Probennahme und Analysen

Im oberen Kaghan-Tal im nördlichen Pakistan (Titelbild) wurden Eklogite im Norden (Abb. 2 und 3) und niedriggradigere Metabasite im Süden gefunden, was auf prägnante Unterschiede in der Metamorphose auf kleinem Raum schließen läßt, die durch tektonische Stapelung bedingt ist. Um Einflüsse der Gesamtgesteinschemie auf den P-T-t-Pfad auszuschließen und den Charakter der Ursprungsgesteine (Protolith) aller Metabasite zu bestimmen, wurden Haupt-, Spuren und

Seltenerdanalysen von den Proben am Deutschen GeoForschungszentrum GFZ und an der Universität Potsdam angefertigt. Die Ergebnisse belegen, dass alle Proben petrogenetisch verwandt sind, obwohl im Mikroskop deutliche textuelle Unterschiede und unterschiedliche Ausprägungen von Alteration erkennbar sind. Nach ihrer Geochemie konnten die Metabasite den in Kaschmir vorliegenden, nicht metamorph überprägten Panjal Traps – ein permo-triassischer kontinentaler Flutbasalt – zugeordnet werden.

Die Druck- und Temperaturkonditionen der verschiedenen Eklogite aus dem Kaghan-Tal wurden mit konventionellen Geothermobarometern an Granat-Klinopyroxen-Phengit- und Plagioklas-Hornblende-Gleichgewichten bestimmt (Abb. 4). Diese Methode erfordert sehr genaue Mikrosondenanalysen, die am GFZ angefertigt wurden. Für die Eklogite ergaben sich Gleichgewichtskonditionen innerhalb des Coesitfelds von 30 bis 36 kbar. Coesit, eine Hochdruckmodifikation von Quarz, ist ein Indexmineral für UHP-Metamorphose. Er liegt als Einschluss z. B. im Klinopyroxen (Omphazit) in den Eklogiten des nördlichsten Kaghan-Tals vor und wurde mittels Ramanspektroskopie an der Universität Potsdam bestätigt (Abb. 5). Während ihres Aufstiegs – ihrer Exhumation – wurden die Eklogite retrograd überprägt. Dies ist durch die Neubildung von Amphibolen, Plagioklasen, Biotit und Titanit belegt. Von großer Bedeutung war das Auftreten sekundären Glaukophans (Abb. 4), einem Na-Amphibol, der von Na-Ca- und Ca-Amphibolen (Barroisit, Pargasit) ummantelt ist. Glaukophan ist im Coesitfeld nicht stabil und kann sich daher nur später gebildet haben. Er zeigt relativ niedrige Temperaturen nach der UHP-Metamorphose an. Der umgebene Mantel von Na-Ca- und Ca-Amphibolen zeigt einen Temperaturanstieg an. Ilmenit, der wiederum Rutil ummantelt, unterstützt diese Beobachtung. Plagioklas-Hornblende-Thermometrie und modellierte Phasendiagramme, die auf der Gesamtgesteinschemie von Coesit- und Glaukophan führenden Eklogiten basieren, halfen diesen Teil des komplexen Exhumationspfads quantitativ zu beschreiben (Abb. 6 links). Die Exhumation beginnt bei etwa 640 bis 790 °C in 100 bis 140 km (30 bis 36 kbar) Tiefe. Während des nachfolgenden Aufstiegs auf 40 bis 35 km (10 bis 17 kbar) werden die Eklogite simultan auf 580 bis 630 °C abgekühlt, bevor sie in etwa 35 km Tiefe erneut auf 650 bis 720 °C aufgeheizt werden (Abb. 6 links).

Die Metabasite aus dem südlichsten Teil des Kaghan-Tals zeigen petrographisch keine Anzeichen für eine frühere eklogitfazielle Überprägung. Die metamorphen Bedingungen lagen bei 650 bis 750 °C und 8 bis 9 kbar und sind damit vergleichbar mit denen der späteren, amphibolitfaziellen Überprägung der Eklogite im nördlichen Kaghan-Tal. Dies impliziert, dass beide Gesteinseinheiten erst nach der UHP-Metamorphose der nördlichen Eklogite tektonisch zusammengefügt worden sind.

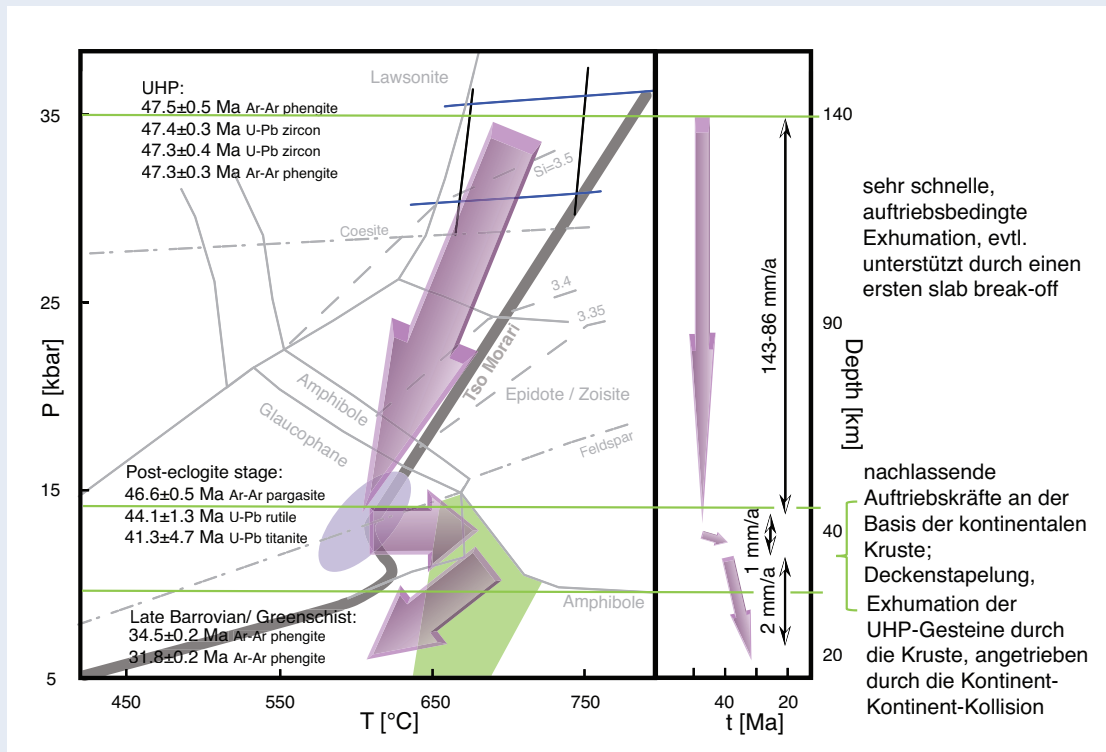


Abb. 6: Links: Phasendiagramm, errechnet aus der Gesamtgesteinschemie eines Saleh Gali-UHP-Eklogiten und der chemischen Zusammensetzung von Phengit (dunkelblaue Box) und Amphibolen (violettes und grünes Feld); große Pfeile zeigen den von uns abgeleiteten P-T-Pfad (Wilke et al., 2010a). Rechts: Das Gefälle der Pfeile im P-t-Diagramm visualisiert die Exhumationsgeschwindigkeit, welche aus der Geochronologie und Petrologie abgeleitet werden konnte. Man erkennt deutlich die sehr schnelle Exhumation von bis zu 14 cm/Jahr von etwa 140 km auf etwa 40 km tiefe und die danach abfallende Exhumationsgeschwindigkeit auf 1 bis 2 mm/Jahr (Wilke et al., 2010b).

Fig. 6: Phase diagram (left site) for bulk rock chemistry of the UHP eclogite from Saleh Gali and chemical characteristics of phengite (dark blue box) and amphiboles (lilac and green area). Large arrows show our preferred P-T-path (Wilke et al., 2010a). On the right, the slope of the arrows in the P-t-diagram show the exhumation velocities inferred from geochronology and petrology. Very rapid exhumation with up to 14 cm/a slowing down to 1 mm/a at the base of the continental crust (Wilke et al., 2010b).

Rekonstruktion der Exhumationsgeschichte

Mit diesen Untersuchungsergebnissen zu den Druck- und Temperaturbedingungen konnte anschließend der Zeitpunkt der metamorphen Stadien näherungsweise ermittelt werden. Um Exhumationsstufen sowohl unter hohen als auch niedrigeren Temperaturen zu datieren, mußten die passenden Minerale mit unterschiedlichen Methoden, mittels U-Pb und Ar-Ar datiert werden. Die U-Pb-Alter von Zirkonen aus felsischen Gneisen, die die Eklogite umgeben, wurden mittels Laser-ICP-MS an der Universität Frankfurt/Main bestimmt. Für die Zirkonkerne ergaben sich Alter von $276 \pm 37/-39$ und 303 ± 20 Mio. Jahren. Damit wurden diese zeitgleich, als Teil einer bimodalen Sequenz, zu den permo-triassischen Panjal Trap-Basalten gebildet und bestätigen so gleichzeitig die oben formulierte Interpretation, dass die Protolithe der Kaghan-Tal-Eklogite den Panjal Traps zuzuordnen sind. Die Ränder der Zirkone sind $47,25 \pm 0,43$ Ma und $47,42 \pm 0,25$ Mio. Jahre alt. Sie reflektieren Zirkonwachstum bei metamorphen Bedingungen, was an sichtbaren Überwachungsstrukturen, durch Kathodolumineszenzstrahlung, erkennbar ist. Eine definitive Zuordnung des Zirkonrands zur UHP-Metamorphose ist aber aufgrund des Fehlens von Einschlüssen

von Coesit nicht möglich. Stattdessen wurde das Alter der UHP-Metamorphose durch $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Plateaualter von $47,25 \pm 0,26$ Mio. Jahren an Si-reichen Phengiten, separiert aus Coesit-führenden Eklogiten, an der Universität Potsdam bestimmt (Abb. 6). Sekundär gebildete Ca-Amphibole, ebenfalls aus einem Eklogit separiert, ergaben ein $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Alter von $46,65 \pm 0,24$ Mio. Jahren. Dies zeigt, dass die Exhumation sehr schnell nach der UHP-Metamorphose stattgefunden haben muss. Die Geschwindigkeit liegt, eingerechnet der Unsicherheiten bei der Geothermobarometrie und der Geochronologie, bei etwa 86 bis 143 mm/Jahr (Abb. 6 rechts; Wilke et al., 2010b). Anhand der U-Pb-Alter von Rutil und Titanit ($44,1 \pm 1,3$ und $41,3 \pm 4,7$ Mio. Jahren) kann angenommen werden, dass die Gesteine für einen längeren Zeitraum bei gleichbleibenden Temperaturen, ähnlich der Bildung des Ca-Amphibols, in rund 40 km Tiefe verblieben. Durch diese Verlangsamung der Exhumationsgeschwindigkeit auf rund 1 mm/Jahr kommt es zur petrologisch sichtbaren Aufheizung unter amphibolitfaziellen Bedingungen. Phengite mit einem signifikant niedrigeren Si-Gehalt als der aus der UHP-Metamorphose, zeigen ein $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Alter von $34,47 \pm 0,20$ und $31,77 \pm 0,20$ Mio. Jahren. Sie repräsentieren Phengite, die durch Fluide zeitlich partiell zurückgesetzt wurden. Mit diesem

Alter ergibt sich eine unwesentlich höhere Exhumationsrate von 2 mm/Jahr bei oberen grünschieferfaziellen Bedingungen (550 bis 580 °C; 35 bis 20 km Tiefe). Biotite beginnen bei diesen Bedingungen die Phengite zu überwachsen und zu verdrängen. Ihr Alter beträgt 28 bis 29 Mio. Jahre. Biotite, die ein Alter von 22 Mio. Jahre zeigen, deuten bereits die finale Exhumation des Kristallins an. Entlang einer reaktivierten ehemaligen Aufschiebungsstörung glitt der während der Kollision aufgeschobene Inselbogen ab und legte die UHP-Gesteine frei.

Um auch diese jüngste Phase der Exhumierung zu quantifizieren, wurden Spaltspurendatierungen (AFT: apatite fission track) und U-Th/He-Datierungen an Apatiten durchgeführt. Die Spaltspuren wurden an der Universität Potsdam ausgezählt, die U-Th/He-Datierungen wurden am Department of Geology, University of Kansas, USA, durchgeführt. Die ermittelte Schließungstemperatur, also die Temperatur, bei der das Alter der Minerale gespeichert wurde, liegt für die AFT-Datierungen bei rund 110 °C, für die U-Th/He-Datierungen bei rund 68 °C. Für den nördlichsten Teil des Kaghan-Tals wurden Spaltspuren-Alter zwischen 24,5 ± 3,7 und 15,6 ± 2,1 Mio. Jahren und U-Th/He-Alter von 21,0 ± 0,6 bzw. 5,3 ± 0,2 Mio. Jahren ermittelt. Da die Abschiebung des Inselbogens auf etwa 25 Mio. Jahre datiert ist (z. B. Treloar et al., 2003), reflektieren diese Alter eindeutig die nachfolgende Abkühlung. Für das südliche Kaghan-Tal wurden jüngere Spaltspuren-Alter von 7,6 ± 2,1 bis 4,0 ± 0,5 Mio. Jahren ermittelt, was, wie bereits bei der petrographisch und petrologischen Untersuchung angedeutet, auf eine räumlich und zeitlich entkoppelte Entwicklung dieser beiden Teile des Kaghan-Tals schließen lässt. Diese jüngsten Abkühlungsalter sind sehr wahrscheinlich miozäner Hebung und Erosion zuzuschreiben, die entlang einer südlicheren Aufschiebungsstörung eine neue orographische Barriere entstehen ließ (Wilke et al., 2012).

Eine wesentliche Erkenntnis dieser Studien ist, dass sich der S-förmige P-T-Pfad, der für die UHP-Eklogite aus den Kaghan-Tal in Pakistan ermittelt wurde, direkt mit dem aus dem Tso Morari-Areal in Indien vergleichen lässt (Abb. 6 links). Beide Pfade beschreiben die Exhumation aus Mantel- in Krustentiefen unter den sich ändernden Bedingungen. Inzwischen konnte zudem gezeigt werden, dass die UHP-Gesteine aus beiden Lokalitäten zur gleichen Zeit, vor 47 bis 43 Mio. Jahren gebildet worden sind (Donaldson et al., 2013). Die offensichtlichen Ähnlichkeiten in der Bildung und Exhumation von Kaghan- und Tso Morari-Eklogiten lässt die Vermutung zu, dass diese Prozesse eventuell allgemeingültig für UHP-Areale weltweit sind. Hierzu bedarf es aber noch weiterer Untersuchungen, die aktuell an Proben vom Tso Morari-Areal durchgeführt werden. Sicher scheint, dass ein einzelner Mechanismus, wie der „channel flow“, bis in Manteltiefen subduzierte Gesteine kaum wieder an die Oberfläche bringen kann. So konnte auch gezeigt werden, dass (1) keine Schmelze zur Reduzierung der Viskosität im Gesteinsverband vorhanden war und (2) der größte Teil der Exhumation der UHP-Gesteine schon vor der Initiierung des Monsuns (vor etwa 18 Mio. Jahren) stattgefunden hatte und damit (3) die benötigte

starke Erosionsrate an der Extrusionsfront fehlte. Ein positives Feedback zwischen Klima und Exhumation für die UHP-Areale im nordwestlichen Himalaya gab es also offenbar nicht.

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institut für Erd- und Umweltwissenschaften der Universität Potsdam: Patrick J. O'Brien, U. Altenberger, R. Oberhänsli, M. Konrad-Schmolke, M. J. Timmerman, M. Sudo, E. R. Sobel und Chr. Fischer sowie A. Gerdes von der Universität Frankfurt und D. Stockli, Jackson School of Geosciences, Texas, USA. Mein besonderer Dank gilt O. Appelt und D. Rhede vom GFZ.

Literatur

- Beaumont, C., Jamieson, R. A., Nguyen, M. H., Lee, B. (2001): Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. - *Nature*, 414, 6865, 738-742, 10.1038/414738a.
- Chemenda, A. I., Burg, J.-P., Mattauer, M. (2000): Evolutionary model of the Himalaya-Tibet system: geopoem: based on new modelling, geological and geophysical data. - *Earth and Planetary Science Letters*, 174, 3-4, 397-409, 10.1016/S0012-821X(99)00277-0.
- Donaldson, G. D., Webb, A. A. G., Menold, C. A., Kylander-Clark, A. R. C., Hacker, B. R. (2013): Petrochronology of Himalayan ultrahigh-pressure eclogite. - *Geology*, 41, 8, 835-838, 10.1130/G33699.1.
- Gilotti, J. A. (Ed.) (2013): Continental crust at mantle depths. - *Elements*, 9, 4, 243-320.
- Massonne, H. J., O'Brien, P. J. (2003): The Bohemian Massif and the NW Himalaya. - In: Carswell, D. A., Compagnoni, R., (Eds.), *Ultrahigh pressure metamorphism*, (EMU notes in mineralogy ; 5), Budapest, 145-187.
- Treloar, P. J., O'Brien, P. J., Parrish, R. R., Khan, M. A. (2003): Exhumation of early Tertiary, coesite-bearing eclogites from the Pakistan Himalaya. - *Journal of the Geological Society*, 160, 3, 367-376, 10.1144/0016-764902-075.
- Wilke, F., O'Brien, P., Altenberger, U., Konrad-Schmolke, M., Ahmed Khan, M. (2010 a): Multi-stage history in different eclogite types from the Pakistan Himalaya and implications for exhumation processes. - *Lithos*, 114, 1-2, 70-85, 10.1016/j.lithos.2009.07.015.
- Wilke, F., O'Brien, P., Gerdes, A., Timmerman, M., Such, M., Ahmed Khan, M. (2010 b): The multistage exhumation history of the Kaghan Valley UHP series, NW Himalaya, Pakistan from U-Pb and 40Ar/39Ar ages. - *European Journal of Mineralogy*, 22, 5, 703-719, 10.1127/0935-1221/2010/0022-2051.
- Wilke, F., Sobel, E. R., O'Brien, P. J., Stockli, D. F. (2012): Apatite fission track and (U-Th)/He ages from the Higher Himalayan Crystallines, Kaghan Valley, Pakistan: Implications for an Eocene Plateau and Oligocene to Pliocene exhumation. - *Journal of Asian Earth Sciences*, 59, 14-23, 10.1016/j.jseaes.2012.06.014.