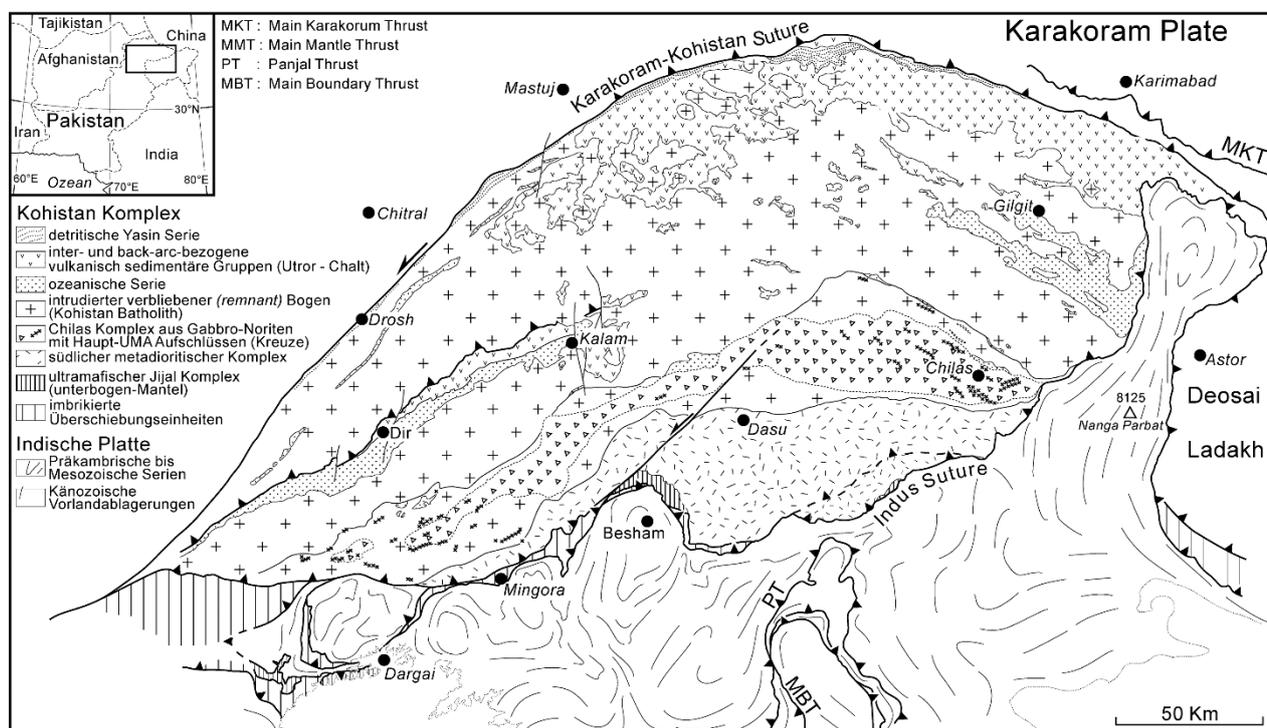


Kohistan - West-Himalaja: Inselbogen-Kontinent Kollision

Durch die Schliessung des Tethys Ozeans und die darauffolgende Kollision von Indien und Asien entstand das Himalaja-Gebirgssystem. Der Westhimalaja im nördlichen Pakistan ist aus drei tektonischen Einheiten aufgebaut:

- Im Norden befindet sich die asiatische Platte, welche den Karakoram Batholith enthält, der in der späten Kreide bis ins frühe Miozän intrudiert ist.
- Im Süden befindet sich die indische Platte. Sie umfasst verformte und metamorphe Schelf- und Plattformsedimente, die auf einem präkambrischen Grundgebirge liegen. Früh-eozänen Graniten und karbonisch-permischen alkalischen, magmatischen Gesteinen intrudieren das Ganze. In einem sehr grossen Vorland-Becken wurden Molassesedimente abgelagert.
- Zwischen der indischen und der asiatischen Platte befindet sich der Kohistan Komplex. Dieser wird im Norden vom Karakoram Batholith Asiens durch die Karakoram-Kohistan Suture abgegrenzt, und im Süden gegen Indien durch die Indus Suture, auch als *Main Mantle Thrust* (MMT, d.h. Haupt-Mantel-Überschiebung) bekannt. Der Name ist auf die Mantelperidotite, die in die Kontaktzone hineingequetscht wurden, zurückzuführen.

Das östliche Äquivalent des Kohistan Komplexes ist der Ladakh-Batholith in Nordwest Indien und das östliche Äquivalent des Karakoram Batholiths ist der kontinentale Transhimalaja Intrusionsgürtel in Süd-Tibet, wo die Yalu Tsangpo Suture die östliche Fortsetzung der Indus Suture ist. Der Kohistan-Ladakh Komplex wurde im Mesozoikum als Inselbogen innerhalb der Tethys gebildet, nach Süden auf den Indischen Rand überschoben, um dann zwischen den konvergierenden indischen und asiatischen Platten stark zerquetscht zu werden. Deshalb ist der Westhimalaja ein Beispiel für eine Inselbogen-Kontinent Kollision.



Inselbogen-Kontinent Kollisionssysteme sind eher selten, da diese gewöhnlich einen Zwischenschritt in der Schliessung eines Ozeans darstellen und deshalb relativ kurzlebig sind (wie Obduktionssysteme, siehe Oman). In Wirklichkeit sind die meisten vulkanischen Inselbögen instabile Systeme. Viele Inselbögen spalten sich häufig auf. Die Subduktionszonen können ihre Polarität von einer Seite eines Inselbogens zur anderen leicht wechseln, und eine Subduktionszone kann den Inselbogen verlassen und zu einer neuen Stelle mit einer neuen Orientierung springen. Obwohl

Subduktionszonen den Erzeugungsort von neuem SiAl-Material (d.h. kontinentalem Material) darstellen, bleiben die Inselbögen selten intakt; sie bewegen sich relativ zu den Kontinenten. Kontinentales Wachstum resultiert aus der tektonischen Akkretion, die eine Inselbogen-Kontinent Kollision miteinbezieht. Z.B. stellt Taiwan die aktive Akkretion eines vulkanischen Inselbogens auf den Ostrand von Eurasien dar. Ein Beispiel für eine heutige Inselbogen-Kontinent Kollision ist der Banda Inselbogen, der mit Timor und Neu-Guinea kollidiert.

Paläomagnetische und kinematische Daten

Die Rolle Indiens im Plattentektonikssystem kontrollierte die tektonische Geschichte des Himalajas.

Ozeanbodenspreizung - Tethys

Permische magmatische Alter von Granit-Gneisen und tholeiitischen Metabasalten, die am Nordrand des indischen Kontinentes gefunden wurden, wurden während der Riftbildung im Zusammenhang mit dem Aufbrechen von Pangäa produziert. Dieser durchgreifende Magmatismus deutet darauf hin, dass Indien der obere passive Rand des asymmetrischen Dehnungssystems war. Wie in Arabien, markiert spät-permisches Abtauchen ins Meer den Beginn der thermischen Subsidenz; vertiefende marine Bedingungen folgten in der frühen Trias. Spätere mesozoische, karbonat-dominierte und pelagische Sequenzen zeichnen die Subsidenz / Meeresspiegel Geschichte und die Paläogeographie dieses passiven Tethys Kontinentalrandes auf.

Schliessung des Tethys Ozeans

Das mehr oder weniger äquatoriale spreading das bis in den späten Jura (155-140 Ma) in der Tethys dominiert hatte, änderte sich mit der Entwicklung eines nach SW gerichteten Spreizungsrücken, der Gondwana zerteilte (Rifting des Argo-Burma Terrains in NW Australien und Abtrennung von Madagaskar/Indien von Afrika). Um 140 Ma Stoppte Indiens Rotation im Uhrzeigersinn und begann mit der noch immer andauernden Rotation im Gegenuhrzeigersinn. Die gleichzeitige nordwärts Bewegung Indiens begann zu dieser Zeit und scheint eine Konvergenz ohne Breitenänderung zwischen 100 und 80 Ma gewesen zu sein.

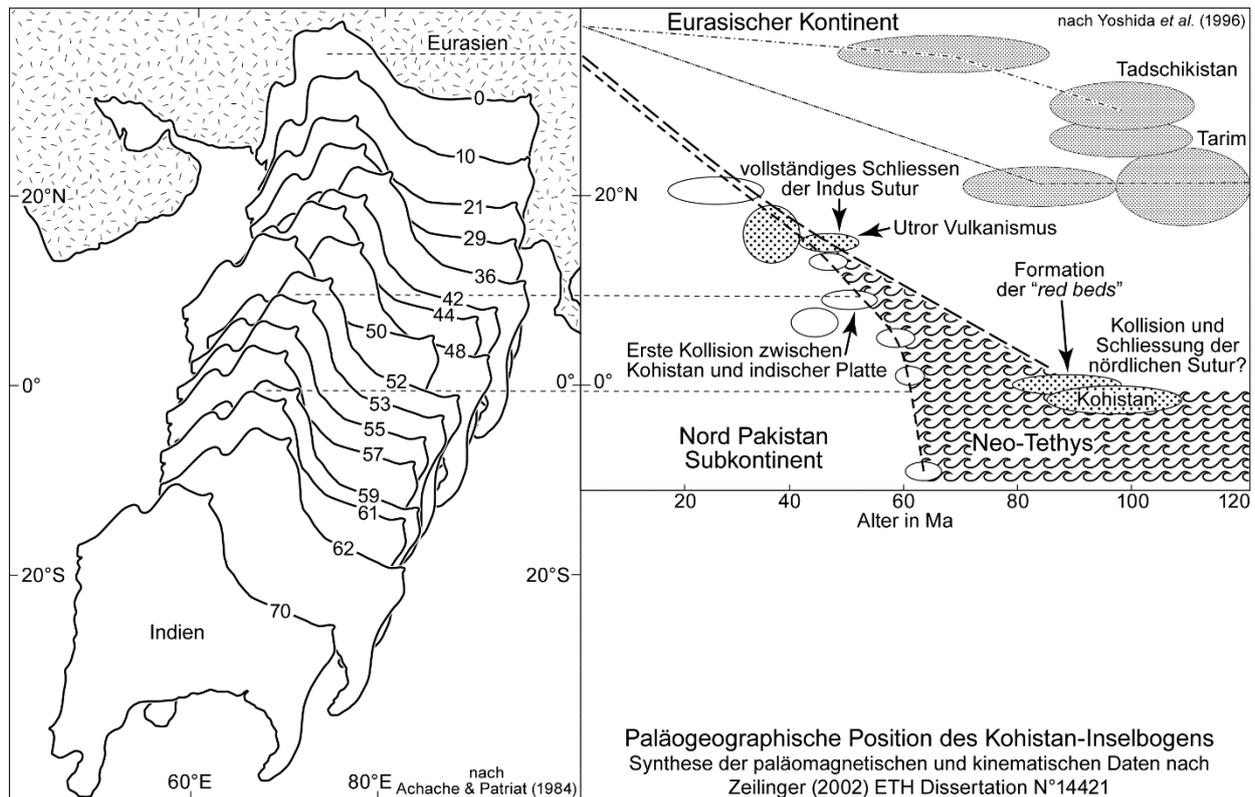
Der Vergleich von paläomagnetischen Ergebnissen für Süd-Tibet mit den scheinbaren Polwanderkurven der indischen Platte zeigt, dass die Kollision zwischen Indien und Asien in äquatorialen Breiten stattfand, mit fortschreitender Ausbildung einer Suture beginnend im Paleozän für den nordwestlichen Himalaja (um 62-60 Ma) und bis zum frühen Eozän (ca. 50 Ma) für den östlichen Himalaja. Paläomagnetische Daten in Nordpakistan zeigen, dass die nordgerichtete Bewegung des indischen Kontinentes bis um 58 Ma schnell war. Dieses Alter kennzeichnet den Beginn der tektonischen Interaktion zwischen Indien und Asien. Die Konvergenzrate wurde nach dieser Anfangskollision deutlich langsamer. Durch die Schliessung des Tethys Ozeans und der folgenden Kollision von Indien und Asien entstand das Himalaja-Gebirgssystem.

Intraozeanische Subduktion

Der Inselbogenmagmatismus begann im mittleren bis späten Jura, in zeitlicher Übereinstimmung mit einer grundlegenden Änderung in den Plattenbewegungen, aber die Ereignisse, die zur Bildung des Himalajas führten, begannen in der frühen Kreide, als der indische Kontinent nordwärts driftete und dadurch den indischen Ozean im Süden des Kontinents öffnete, während der Tethys-Ozean im Norden von Indien geschlossen wurde. Zu dieser Zeit bildete sich der ozeanische Kohistan Inselbogen über einer Subduktionszone, die nach Norden unter den Inselbogen eintauchte.

Die paläogeographische Position des Kohistan-Inselbogens ist unsicher. Vorhandene Daten grenzen seine spät-kretazische Position (100-80 Ma) auf die äquatoriale Zone und nahe dem Karakoram-Kontinentalrand des eurasischen Kontinentes ein. Gleichzeitig waren die Tadschikistan- und Tarim-Becken von Eurasien mehr als 2000 km nördlich der Karakoram- und Kohistan-Blöcke, während Indien noch immer in der südlichen Hemisphäre lag.

Paläomagnetische Ergebnisse und die scheinbaren Polwanderkurven der indischen Platte zeigen, dass die nordgerichtete Bewegung des indischen Kontinentes bis um 58 Ma schnell war. Dieses Alter kennzeichnet den Beginn der tektonischen Interaktion zwischen Indien und Asien.



Schliessung des Tethys Ozeans

Die Schliessung des Tethys Ozeans vor 65-60 Ma wird durch lithostratigraphische und strukturelle Informationen auf beiden Seiten des Kohistan Bogens eingeschränkt. Gegen Osten hin, wird die Obduktion und die nachfolgende Interaktion zwischen Indien und Asien im Ladakh-Himalaja um >50 Ma und im zentralen Himalaja auf etwa 65 Ma datiert. Weiter gegen Süd-Südwest, in den Waziristan-Kurram Regionen, begann die Obduktion auch bei ca 65 Ma. Die paläomagnetischen Rekonstruktionen zeigen auch, dass die Kollision zwischen Indien und Asien in äquatorialen Breiten stattfand, mit fortschreitender Ausbildung einer Suture beginnend im Paleozän im nordwestlichen Himalaja (um 62-60 Ma) und bis zum frühen Eozän (ca. 50 Ma) im östlichen Himalaja. Die Konvergenzrate wurde nach dieser Anfangskollision deutlich langsamer. Spät-paläozäne bis mittlereozäne (65-45 Ma) Sandsteine des auf Indien liegenden Vorlandbeckens enthalten ophiolitische und vulkanische Klaster, die Obduktion / Kollision zu dieser Zeit bestätigen.

Im mittleren Eozän (um 45 Ma) gibt es keinen Unterschied zwischen den Paläobreiten von Indien und dem Kohistan-Inselbogen, was auf die komplette Schliessung entlang der Indus-Suture deutet.

Karakoram, vormals aktiver Kontinentalrand Eurasiens

Die Haupttrasse des Karakorams besteht aus mittelkretazischen bis früh-känozoischen (120-155 Ma) Dioriten, Tonaliten und Granodioriten mit einer kalkalkalischen Signatur. Diese Granitoide bilden den zusammengesetzten Karakoram Batholith, der die paläozoischen und triassischen Sedimente, mit einer Affinität zur asiatischen Platte, und ihr proterozoisches Grundgebirge intrudiert hat. Die Bildung dieses Anden-Typ südasiatischen Kontinentalrandes erfordert mindestens eine nach Norden eintauchende Subduktionszone innerhalb der Karakoram-Kohistan-Suture.

Die Ähnlichkeiten in der Anordnung, dem Alter und der chemischen Zusammensetzung legen nahe, dass der Karakoram Batholith die westliche Fortsetzung des Transhimalaja-Batholiths im Süd-Tibet ist. Diese Interpretation wird gestützt durch die starke stratigraphische Ähnlichkeit der aufgeschlossenen Gesteine. Die darauffolgende Korrelation deutet auf einen rechtsinnigen Versatz von ca. 150 km entlang der Karakoram-Blattverschiebung, welche die östliche Grenze des Karakoram Terrans ist. Im Süden des Karakoram Batholiths, überprägt ein Gürtel von jungen (20-3 Ma)

Niederdruck-Hochtemperatur metamorphen Gesteinen und damit im Zusammenhang stehenden Migmatitdomen ein känozoisches (65-35 Ma) tektonisches und metamorphes Ereignis, welches zeitlich mit dem Beginn der Indien-Asien Kollision übereinstimmt. Der tiefste südlichste Teil des strukturellen Stapels, über der Karakoram-Kohistan Suture, besteht aus niedrig gradigen kambro-ordovizischen Turbiditen und Kalksteinen. Die nach Süden und Südwesten gerichtete Haupt Karakoram Überschiebung (MKT) trennt diese niedrig gradigen untere-grünschieferfaziellen Gesteine von Paragneisen, in denen der Metamorphosegrad ansteigt und Amphibolitfazies erreicht (Staurolit-Granat dann Kyanit-Granat Zonen). Obere amphibolitfazielle Bedingungen werden am Kontakt mit dem Batholith erreicht (Sillimanitzone, 650-700°C; 10 kbar). Auf dem Höhepunkt dieser krustalen Verdickungsphase bildeten sich durch partielles Schmelzen der Kruste die Leukogranite (40-35 Ma). Das jüngste (< 21 Ma) metamorphe Ereignis wird der Advektionshitze von Magmen mit Mantel- und unterer Krustenherkunft in die verdickte Karakoram Kruste zugeschrieben.

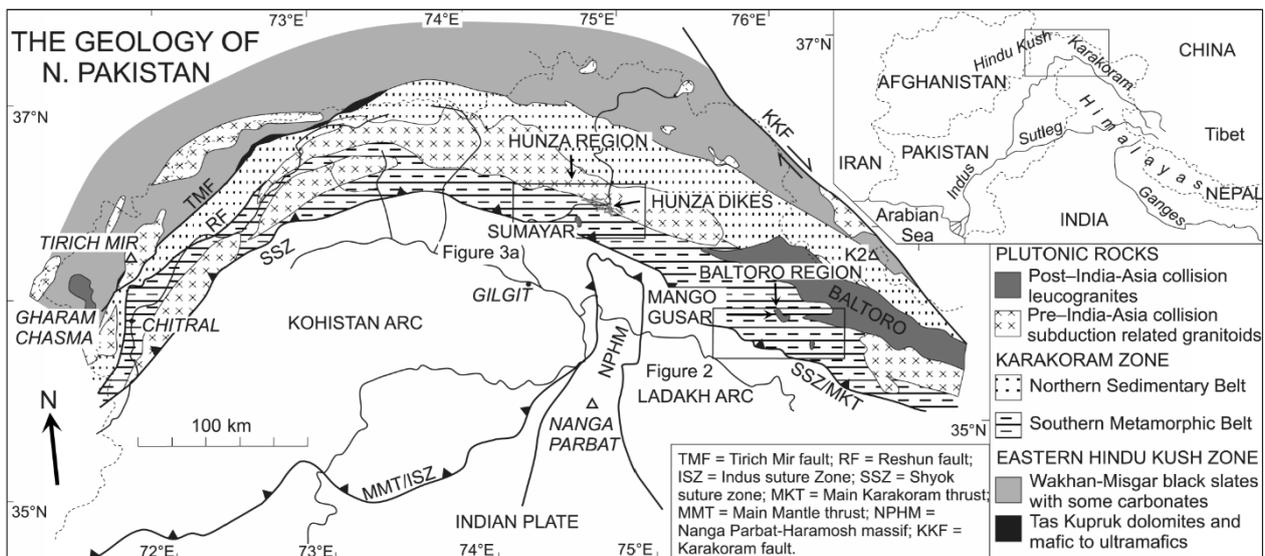


Figure 1. Location map showing the position of the Hunza Valley and Baltoro regions in relation to the rest of the Karakoram (after Searle, 1991; Hildebrand et al., 1998, 2001). Inset shows the figure in relation to Asia.

nach Fraser *et al.* 2001 *Geol. Soc. Am. Bull.* **113**(11) 1443-1455

Über die heutige Dicke der Karakoram Platte ist sehr wenig bekannt. Die verfügbaren Informationen weisen auf eine Moho in einer Tiefe von 50 km hin.

Die Karakoram-Kohistan Suture

Die Karakoram-Kohistan-Suture besteht aus verschuppten, vulkanischen und vulkanoklastischen Grünsteinen, roten Tonsteinen, Kalksteinen, Schiefen und Serpentinitten. Wie für seine östliche Fortsetzung, die Shyok-Suture in Indien, wird die Karakoram-Kohistan-Suture entweder als der Ort der Subduktion eines breiten Tethys-Ozeans oder als Randbecken entlang des südlichen Randes von Asien gedeutet. N- und S-vergente Strukturen werden auf beiden Seiten, wie auch innerhalb der Suture gefunden. Die Verschuppung fand aufgrund späterer Störungen statt, welche die ursprüngliche Suturezone überprägt haben.

Nicht deformierte subalkaline Plutonite eozänen Alters sind auf beiden Seiten der Karakoram-Kohistan-Suture zu finden. Das 75 Ma Alter eines unverformten Ganges, der geschieferte Gesteine schneidet, wurde als zusätzlicher Schlüssel herangezogen, um die Schliessung dieser Suture auf die Oberkreide (zwischen 100 und 85 Ma) festzulegen. Jedoch dauerte der kalk-alkalische Magmatismus im Kohistan Bogen bis mindestens 35 Ma, und einige Karakoram-Granitoide sind 20 Ma oder jünger. Paläomagnetische, strukturelle, metamorphe und geochemische Argumente deuten eher darauf hin, dass die Schliessung der Karakoram-Kohistan Suture jünger als die Kollision zwischen dem Kohistan Bogen und India ist, wie frühe Interpretationen vorgeschlagen hatten. In jedem Fall zeigen die gleichen Apatit Spaltspurenalter auf beiden Seiten der Suture, dass keine oder nicht wahrnehmbare

vertikale Bewegung entlang dieser Störungszone seit dem späten Miozän (11-13 Ma) stattgefunden hat.

Der Kohistan Inselbogen

Die Kohistan-Abfolge stellt einen nahezu strukturell vollkommenen Querschnitt eines Inselbogens dar. Dieser besteht aus einer 30 bis 40 km mächtigen Abfolge von metamorphen, plutonischen, vulkanischen und sedimentären Gesteinen. Sechs Haupteinheiten von Gesteinen können von Norden

Obere Kruste

Die Abfolgen der oberen Kruste lassen sich zwei verschiedenen geographischen Bereichen zuordnen:

Nordrand des Inselbogens

Direkt südlich der Karakoram-Kohistan-Sutur bestehen die Abfolgen aus wechsellagernden vulkanoklastischen Sedimenten, Vulkaniten und eher unreifen Turbiditen, die in einem Tiefseemilieu abgelagert wurden.

Die Sedimente (die sogenannte Yasin-Gruppe) bestehen aus Tonsteinen, Grauwacken und vulkanoklastischen Gesteinen und bilden wohl ein Backarc-Becken kretazischen Alters. Sie gradieren nach oben zu feinkörnigen Tonsteinen und Tuffen und enthalten Kalksteine mit einer Fauna aus dem Alb-Apt (ca. 100-120 Ma).

Die (Chalt) Vulkanite enthalten kalkalkalische Andesite bis Rhyolithe und nachfolgend andesitische Laven, Tuffe und Agglomerate frühkretazischen Alters. Hervorragend erhaltene Kissenlaven aus primitiven tholeiitischen Laven des Inselbogen-Typus sind möglicherweise Teil eines Ophiolites, der während der Kollision von Kohistan mit Asien obduziert wurde. Die Grösse dieses *Backarc*-Beckens (in Bezug auf Kohistan) kann nur vermutet werden.

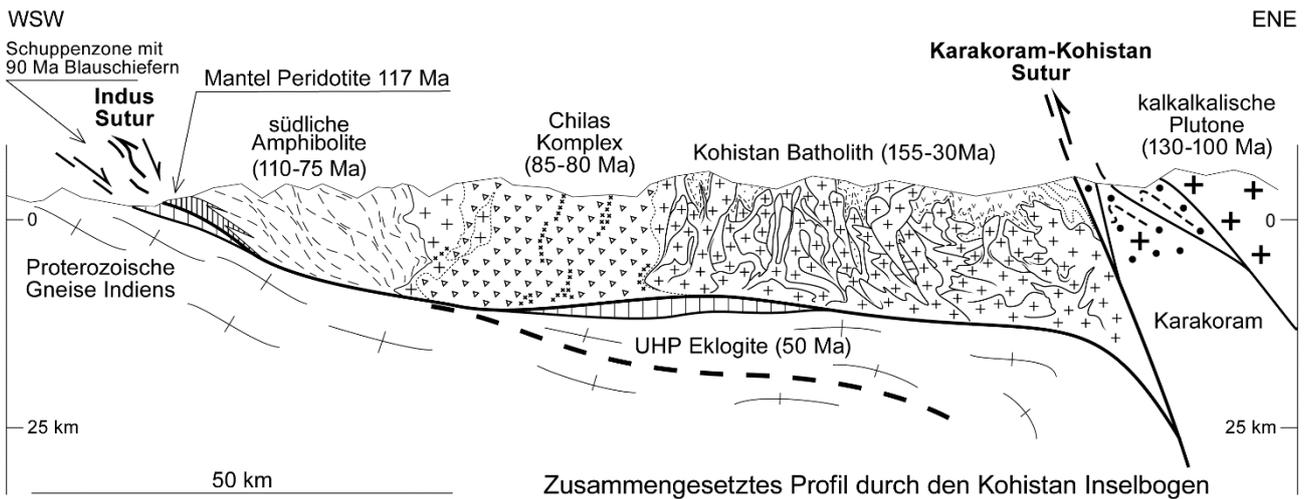
Intra-Inselbogen Becken

Metasedimentäre Tiefsee-Abfolgen (Dir, Kalam und Utror-Gruppen) zeigen im Südwesten und im Kohistan Komplex teilweise spät-paleozäne (60-55 Ma) Fossilien in Kalksteinen höheren Niveaus. Ablagerungsmodelle deuten auf eine rasche Subsidenz während des Paleozäns in einem extensionalen, vermutlich intra-Inselbogen Becken mit beschränkter Ausdehnung hin. Assoziierte Vulkanite und vulkanoklastische Serien bestehen aus kalkalkalischen Basalten, basaltischen Andesiten und Andesiten, und unterstreichen ein Inselbogen-Milieu.

Plutonische Kruste

Kohistan-Batholith

Der Kohistan-Batholith beinhaltet mehrere intrusive kalkalkalische Granitoide. Das älteste plutonische Alter ist ca. 150 Ma und Magmatismus war ein durchgehender Prozess bis ca. 50 Ma. Die frühen Plutone zeigen eine Isotopen-Signatur charakteristisch für eine Mantelherkunft. Die Isotopen-Charakteristik jüngerer Plutone bezeugt ein zunehmendes Krusten/Mantel-Verhältnis, wobei die jüngsten Magmen ausschliesslich aus der Kruste stammen. Diese Entwicklung wird als Resultat einer Inselbogenverdickung und des Schmelzens der unteren Inselbogenkruste interpretiert, welche der Ausbildung der Sutur-Zone mit Asien folgt.



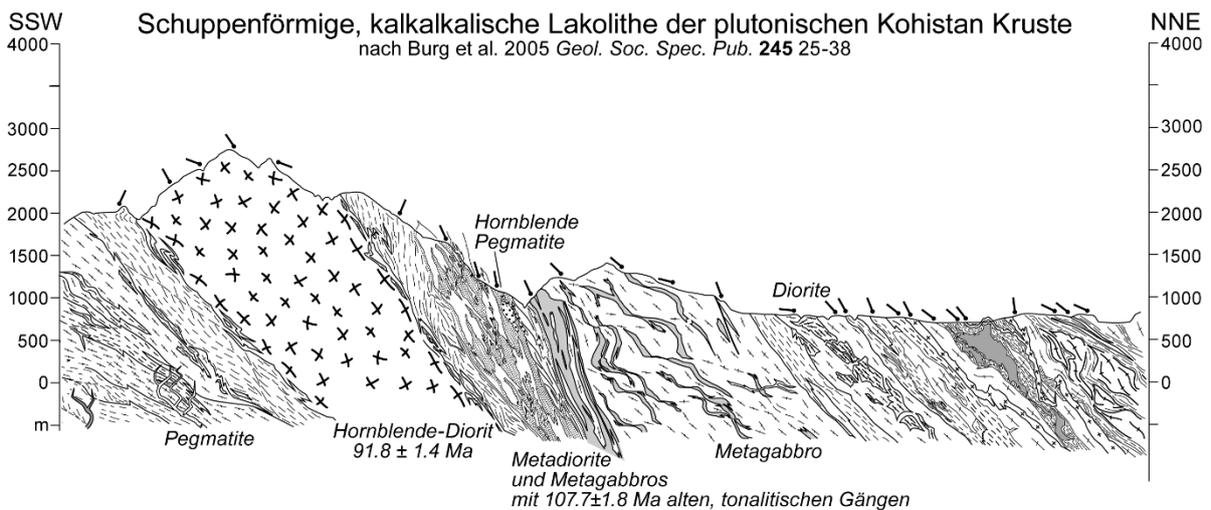
Gabbronorite

Die Achse des Inselbogens wird durch einen massiven Körper von lokal geschichteten Gabbronoriten markiert. Dies ist der mehr als 8 km mächtige und 300 km lange Chilas Komplex, der als geschichtete Magmakammer verstanden wird, welche in den Inselbogen zu Kreidezeiten intrudierte. Im Detail handelt es sich hier um einen stratiformen Komplex mit Noriten, noritischen Gabbros und einem Streifen von Linsen von verschiedenen ultramafischen-mafischen-anorthositischen (UMA) Assoziationen.

Der Gabbro-Norit kühlte sich ab und equilibrierte das letzte Mal bei 600 – 800°C und 6 – 8 kbar. Eine interne Sm-Nd Isochrone liefert ein Alter von ca. 70 Ma, was mit der gebräuchlichen Zirkon U-Pb Datierung von 85 Ma übereinstimmt.

Meta-Gabbros bis Tonalite:

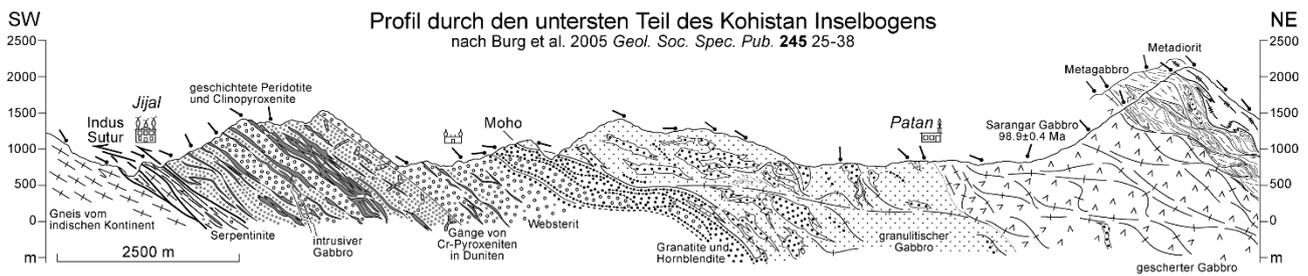
Die sogenannten Kamila Amphibolite bilden einen dicken Stapel schuppenförmiger kalkalkalischer Lakolithe, die unter amphibolitfaziellen Bedingungen verschieden stark geschert wurden. Sie wurden auf Alter zwischen 110 und 75 Ma datiert. Ar-Ar Abkühlalter an Hornblenden gruppieren sich um etwa 80 Ma.



Der Mantel

Der sogenannte Jijal-Patan Komplex besteht aus mehr als 3 km mächtigen, ultramafischen Gesteinen, die von Granat-Plagioklas Granuliten überlagert werden. Granat- und Plagioklas-freie Peridotite und wenige Pyroxenite dominieren den untersten Teil. Die Jijal ultramafischen Gesteine repräsentieren

den Sub-Inselbogen Mantel vor ca. 120 Ma, im Falle dass eine Sm-Nd Isochrone an Klinopyroxeniten deren Kristallisation datiert.



Der scharfe Kontakt, zwischen ultramafischen Gesteinen und darüberliegenden Granuliten mit gut erhaltenen Strukturen, stellt den intrusiven Kontakt von kalkalkalischen Granat-Gabbros (Granulite) der unteren Kruste innerhalb der Mantelgesteine dar. Dieser Kontakt ist ebenso die untere Grenze der Inselbogen-Kruste, d.h. die Inselbogen-Moho. In den granulitischen Gabbros markiert die metamorphe Überprägung eine isobare Abkühlung innerhalb von granulitfaziellen Bedingungen (Start-Temperatur > 1150°C in Tiefen > 50km, obwohl früh-metamorphe Drucke höher gewesen sein können). Die granulitischen Gabbros reequilbrierten später bei > 700°C und 15 ± 4 kbar, was den Druckbedingungen ähnlich ist, die für die unterliegenden ultramafischen Gesteine berechnet wurden. Sm-Nd Isochronen bei ca. 95 Ma datieren die Abkühlung.

Diese Abfolge wird insgesamt als kalkalkalische Plutonserie interpretiert, die in eine ozeanische Kruste eindrang und von kalkalkalischen Laven und damit zusammenhängenden Sedimenten überlagert wird. Entsprechend wird sie als intra-ozeanischer Inselbogen gedeutet, welcher sich während der Kreide irgendwo in der Tethys bildete; eine Situation, die an die kalkalkalinen Ophiolite von Oman erinnert, wenn auch weiter in ihrer Entwicklung als im Oman.

Inselbogen-Trennung

Zuerst wurden die kalkalkalischen Chilas-Norite und noritischen Gabbros als in der Magmenkammer unterhalb des Inselbogens auskristallisierte Gesteine interpretiert. Später haben jedoch geochemische Analysen Hinweise darauf gegeben, dass sie im Zuge der Inselbogen-Trennung (*arc splitting*) und des nachfolgenden Mantel-Diapirismus entstanden sind. Diese zuletzt genannte Interpretation stimmt mit der Tatsache überein, dass die Gabbro-Norite in vulkanische und sedimentäre Anteile des Inselbogens intrudiert sind. Zusätzlich deuten petro-strukturelle Beobachtungen darauf hin, dass die ultramafisch-mafisch-anorthositischen (UMA) Vergesellschaftungen, die als Kette von Linsen über die mehr als 300 km langen Gabbro-Norite auftreten, Teile von Intra-Inselbogen Manteldiapiren repräsentieren, die als Kanäle für poröses Fließen dienen, um die Gabbro-Norite zu speisen.

Die Chilas-Abfolge von Manteldiapiren deutet auf eine Auftrennung des Kohistan-Inselbogens hin, mit einem beginnenden Rifting, das im Inselbogen stattfand, so wie es in modernen Inselbogen-Systemen dokumentiert ist (z.B. Rocas Verdes in Südchile). Die möglichen Entsprechungen des intra-ozeanischen Inselbogen-Riftings schliessen die Fidschi und die Izu-Bonin-Marianen Subduktion mit ein, ein 2500 km langes Inselbogensystem, in dem die pazifische Platte unter die philippinische ozeanische Platte subduziert wird.

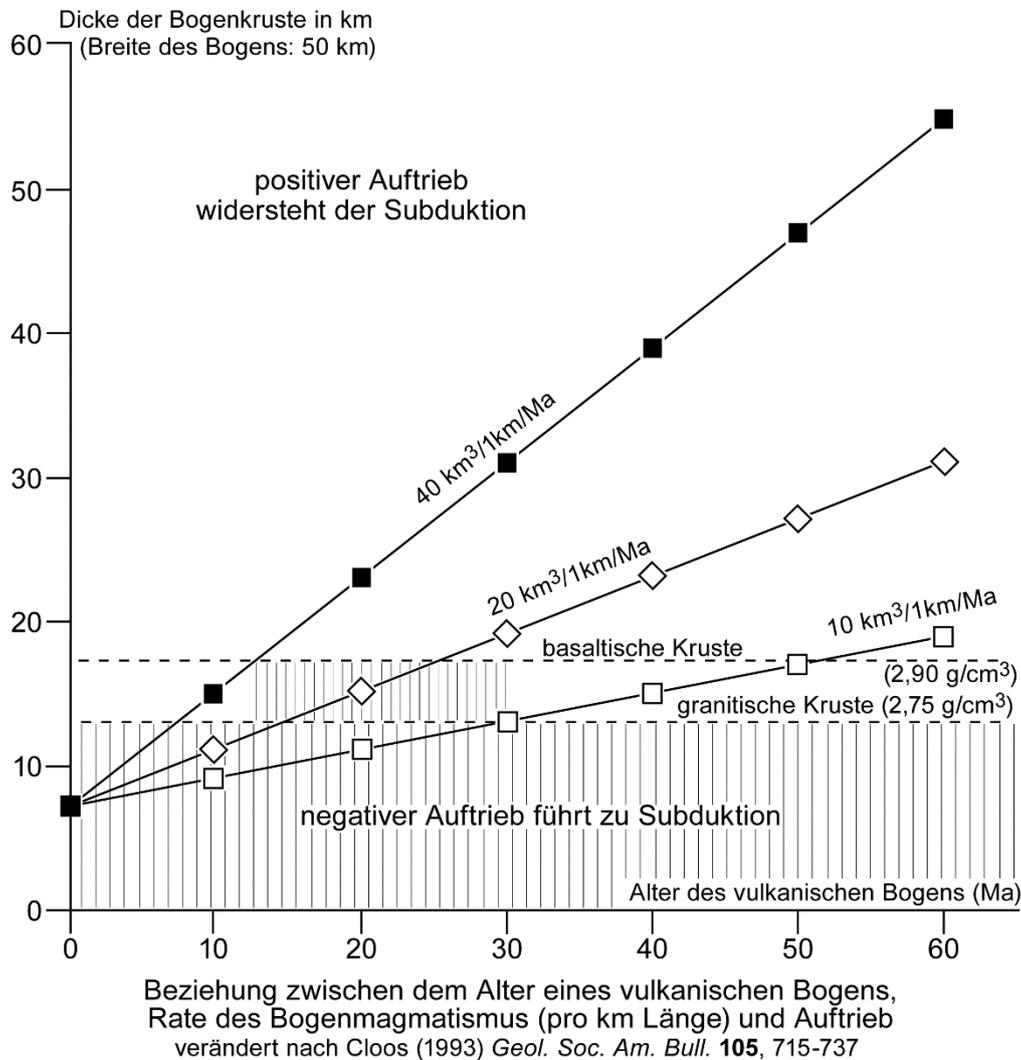
Die UMA Aufschlüsse sind Hinweise darauf, dass Mantel-Diapirismus einer der Schlüsselmechanismen bei der Öffnung eines 'backarc' Beckens zwischen einem weiterhin vulkanisch aktiven und einem verbleibenden, nicht mehr aktiven Inselbogen ist, dessen Gesteine nun den Kohistan-Batholith darstellen.

Obduktion

Der Kohistan Vulkanbogen und Indien kollidierten während der Überschiebung an der Indus Suture, als sich die Tethys schloss.

Isostatische Bedingungen

Einfache isostatische Berechnungen zeigen, dass eine 100-km-dicke ozeanische Lithosphäre (7-km-Kruste) mit einem intraozeanischen Inselbogen subduziert werden kann, wenn die Inselbogenkruste noch nicht die maximale Mächtigkeit von 8 km für granitischen oder 10 km für basaltischen Magmatismus erreicht hat. Die Frage, die sich hier stellt ist, wie lange muss ein Inselbogen aktiv sein und sich verdicken, bis der Auftrieb eine Subduktion verhindert.



Für Inselbögen mit schneller Magmenproduktion sind 10 Ma ausreichend. Die oberste Grenze beträgt ca. 40 Ma für langsame Magmenproduktion. Die letzte Schätzung ist vermutlich eine obere Grenze, da diese Berechnung den Heizeffekt nicht in Betracht zieht; durch diesen Effekt verjüngt sich die Lithosphäre aufgrund von Wärmeadvektion, die durch intrudierende Plutone entsteht.

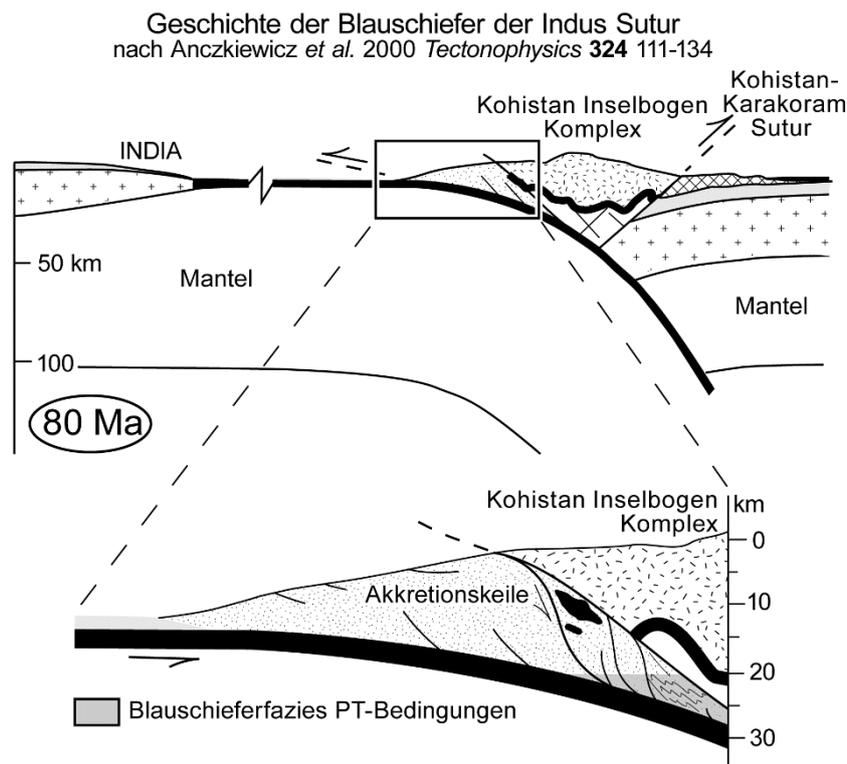
Daten der Metamorphose

Der Kohistan Vulkanbogen und Indien kollidierten während der Schliessung der Neo-Tethys, wobei es zu Überschiebung entlang der Indus Suture kam. Innerhalb der Suturezone befindet sich eine diskontinuierliche, aber bis zu 20 km breite Zone von verschuppten Ophioliten, Grünschiefern und Blauschiefern. Diese verschuppte Zone wird lokal als Mélange Einheit bezeichnet. Es ist eine überwiegend dem 'fore-arc' zugeordnete metasedimentäre und metavulkanische Abfolge, die auf die Indische Platte obduziert wurde. Im Liegenden ist die Geologie des Nordrandes der indischen Platte bemerkenswert konstant. Jedoch haben zwei metamorphe Hochdruckereignisse die Indien-Kohistan Konvergenz begleitet:

- Blauschieferfazielle Metamorphose um ca. 80 Ma im Zusammenhang mit ozeanischer Subduktion, während
- eine eklogitfazielle Metamorphose (mit Coesit) um ca. 50 Ma durch kontinentale Subduktion entstanden ist.

Prä-Kollisionsereignisse

Blauschiefer, verschuppt in der Suture Zone zwischen Indien und dem Kohistan Inselbogen, ergeben ein ^{40}Ar - ^{39}Ar , Rb-Sr Alter an Phengiten und Na-Amphibolen um 80 Ma. Dieses Alter entspricht einer Metamorphose in der frühen/späten Kreide, die der präkollisionalen Subduktion der Tethys Lithosphäre zugeschrieben wird. Die schnelle Exhumation und das Abkühlen dieser hochdruckmetamorphen Gesteine fanden vermutlich in einem Akkretionskeil statt, der durch „Corner-flow“ dominiert wurde.

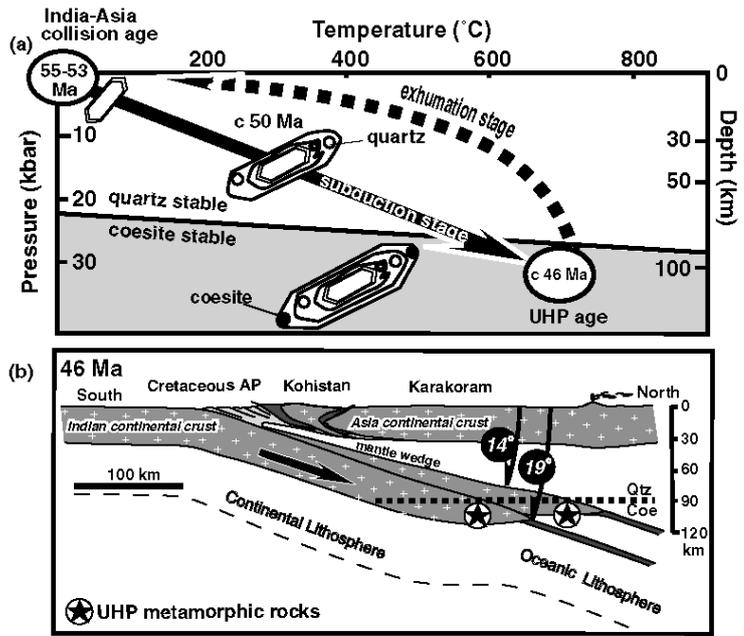


Kollisionsverbunde Ereignisse

Die Coesit-Eklogite von Kaghan, im direkten Liegenden der Indus Suture, stammen aus dem Perm (245-275 Ma Zirkon Alter) und entstanden aus basaltischen Gängen, welche in den Indischen Kontinentalrand während des Auseinanderbrechens von Gondwana intrudierten. Daher sind sie Beweise dafür, dass die Vorderkante des indischen Kontinentalrandes unter den Kohistan Inselbogen mit einer Mindesttiefe von 100 km (metamorphen Drücke von 2,7 bis 3,2 GPa) subduziert wurde. U-Pb, Rb-Sr und Sm-Nd Alter deuten darauf hin, dass sich die Metamorphose der Eklogit-Fazies bei etwa 50-45 Ma bildete. Dieses Alter stimmt mit den U-Pb Zirkon-Altern von Coesit-Eklogiten und von Gneisen des indischen Kontinentes im direkten Liegenden der Indus-Suture unter dem Ladakh Inselbogen (Tso Morari Region, weiter nach Westen) überein. Tiefe Subduktion des Nordrandes Indiens, nur ca. 10 Millionen Jahre nach der Ausgangskollision war deswegen weit unterhalb des Kohistan Inselbogens.

Nach Kaneko et al. (2003)
J. metamorphic Geol. **21** 589-599

Fig. 10. (a) Schematic pressure-temperature-time paths for coesite-bearing Himalayan gneisses. SHRIMP analyses of different zircon domains allow the separation of the formational and metamorphic history of the Himalayan UHP rocks into three different stages: 253–170 Ma protolith age, 50.0 ± 1.0 Ma for the quartz-stable metamorphism stage, and 46.2 ± 0.7 Ma for the UHP metamorphism. Coesite-quartz reaction curve (Bohlen & Boettcher, 1982) is also shown. (b) Schematic cross-sectional diagram showing subduction of the northern part of the Indian continental crust, and formation of UHP rocks in the subducted slab at 46 Ma. The subduction rate of crustal rocks and the time integrated subduction angle are estimated as approximately 4.5 cm per year and 14–19°, respectively, since the initiation of the India-Asia collision. AP = accretionary prism.



Übung

Berechnen Sie den Fallwinkel der subduzierenden Platte, mit der Kenntnis der Konvergenzrate = 4,5 cm/J. und unter der Annahme, dass die Vorderkante Indiens 10 Ma nach der Ausgangskollision 100 km tief war. Vergleichen Sie das Resultat mit heutigen Subduktionszonen.

Die Kollision mit Indien führte in den indischen Einheiten zu einer regionalen Barrow-Typ-Metamorphose.

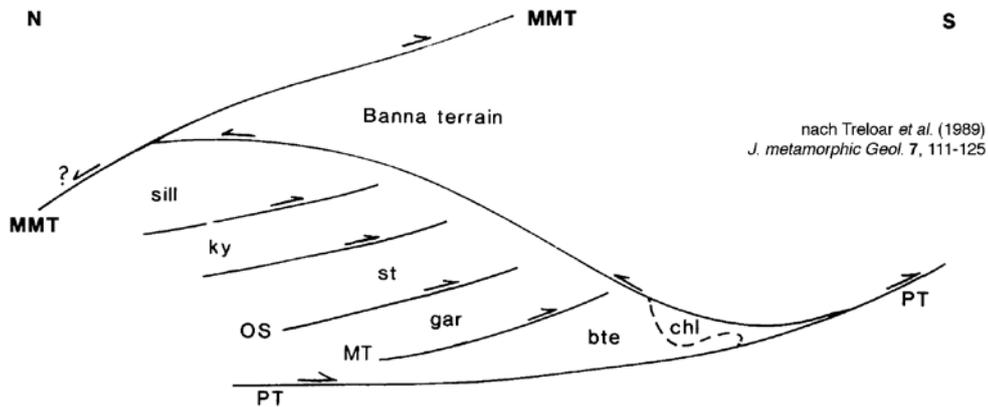


Fig. 9. A cross-section (X-X', Fig. 2) from the MMT to south of Manshra, showing the stacking of the metamorphic zones by late thrusts, such as the Oghi Shear (OS) in the Hazara metamorphic region, the emplacement of the low-grade rocks at Banna above the highest grade rocks in the Hazara metamorphic region along a major backthrust that is rooted in the south, and the folding of biotite and chlorite rocks south of, and in the footwall of, the Manshra Thrust (MT). PT = Panjal Thrust.

Ein Grossteil der Metamorphose der Gesteine der indischen Platte im Liegenden der Indus Suture erfolgte entlang eines metamorphen Gradienten vom Barrow Typ, von Chlorit- zu Sillimanitgraden. Die Höchstmetamorphose wurde auf 45-50 Ma datiert. Die syn-metamorphen Strukturen und Gefüge in diesen Gesteinen charakterisieren daher eine wichtige Phase der Kollision und der Platznahme des Kohistan Inselbogens mit diesem Teil der indischen Platte. Argon/Argon Abkühlalter liegen bei 38 Ma für Hornblende und bei 30 Ma für Muskovit.

Strukturen und Kinematik

Kohistan

Die Verformungslokalisierung erfolgte im tieferen Niveau des Kohistan-Komplexes von der magmatischen Platznahme bis hin zur Deformation im festen Zustand, während der Abkühlung der gabbroiden und dioritischen Plutone zwischen 100 und 83 Ma. Die dazugehörige Scherverformung stellt wahrscheinlich eine Deformation dar, die in Zusammenhang mit dem Inselbogen steht und die durch die Subduktion der ozeanischen Lithosphäre der Tethys unter den Kohistan Inselbogen-Komplex verursacht wurde.

Eine Hauptsynklinale (die Jaglot Synklinale) scheint die gesamte obere Kruste von Kohistan mit einzubeziehen. Wie auch immer, die Steilstellung der Indus-Sutur und der Kohistan Sequenzen können erklärt werden durch passives Nach-hinten-kippen verursacht durch Bewegungen auf den jüngeren Überschiebungen, indem sie sich nach Süden über Rampen bewegten, oder möglicherweise durch eine nach Norden gerichtete Rücküberschiebung auf einer nach Süden einfallenden Störung.

Indische Platte

Die obersten Gesteine unterhalb der Suturzone sind eine niedriggradige metamorphe Abfolge, von der angenommen wird, Sedimente der Tethys darzustellen.

Kompressionsstrukturen

Der Nordrand der indischen Platte besteht aus niedrig- bis hochgradigen kalkhaltigen Schiefen, wenigen Marmoren, Amphiboliten und Grundgebirgsgneisen, die zu einem Deckenstapel aufgeschoben worden sind. Frühe hochgradige Gefüge und dazugehörige Falten werden mit nach Süden gerichteter Überschiebung assoziiert. Schersinnindikatoren parallel zu der ca. N-S verlaufenden Streckungslinierung in amphibolitfaziellen Gesteinen der indischen Platte sind Ausdruck der Süd-gerichteten Deformation, die bei der Obduktion entstand.

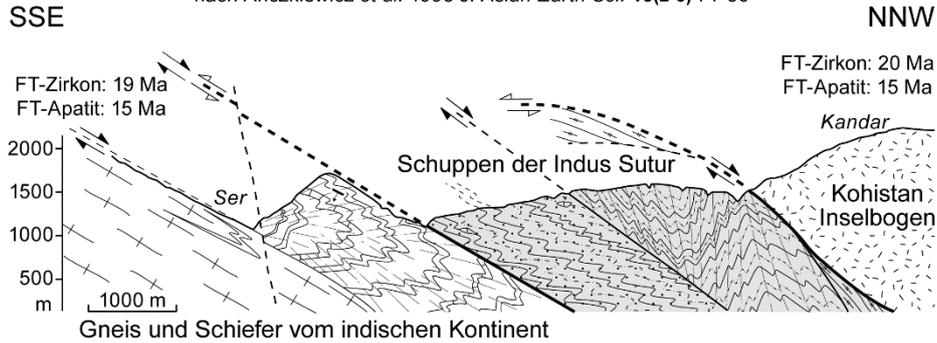
Post-metamorphe nach Süden gerichtete Überschiebung von Gesteinen, die zum nördlichen Rand Indiens gehören, resultiert in einer scharfen metamorphen Diskontinuität entlang von duktilen Scherzonen, in der hochgradigere Gesteine tiefgradigere strukturell überlagern, so dass das metamorphe Profil allgemein eine tektonische Inversion aufzeigt. Diese umgekehrte metamorphe Geometrie wird der aufeinanderfolgenden Überschiebung der metamorphen Gesteine der indischen Platte auf Gesteine niedrigen Grades der unterschoben Teile der Platte zugeschrieben.

Post-Eozäne Überschiebungsrichtungen erzeugten komplizierte, wiederum verfaltete Überschiebungsmuster, Verfaltung grosser und mächtiger Decken und rasche Anhebung mit entsprechender Bruchtektonik und seismischer Aktivität. Seit ca. 20 Ma hat keine bedeutende Bewegung entlang der Indus Sutur stattgefunden, was durch ähnliche Spaltspur-Alter auf beiden Seiten der Sutur angezeigt wird.

Extensionsstrukturen

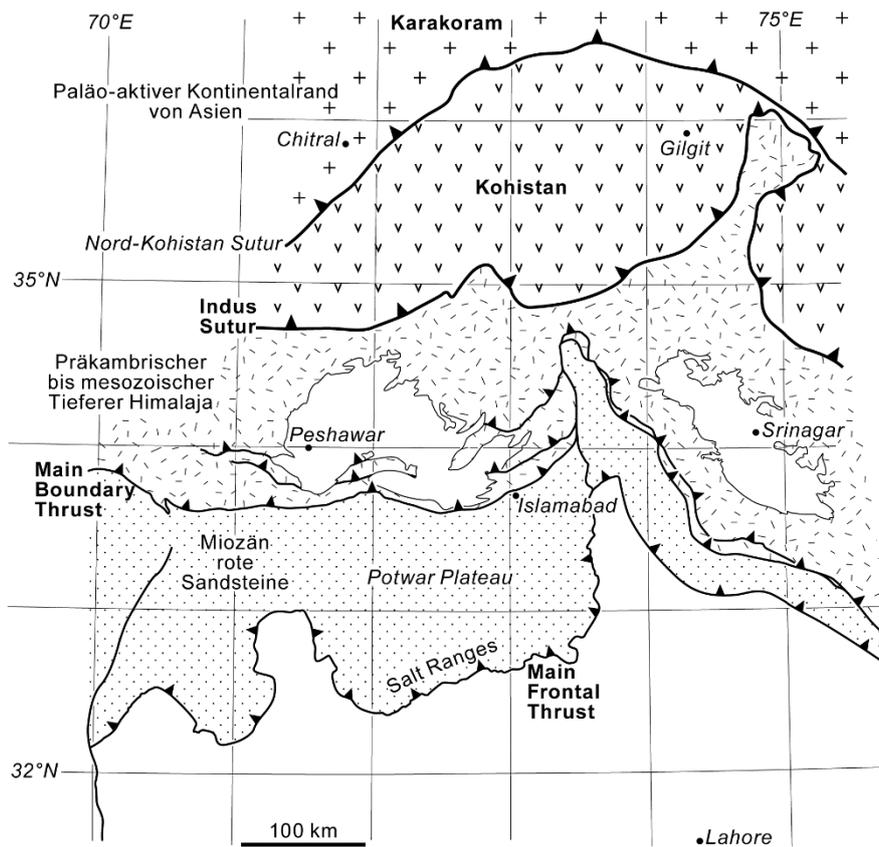
Eine spätere Reaktivierung der Indus-Sutur als spröde-duktiler Abschiebung ist durch Falten und Scherbänder dokumentiert. Die Mineralparagenesen, die sowohl in den Überschiebungs- als auch in den Extensionsscherzonen enthalten sind, zeigen, dass beide synchron während des Übergangs von Amphibolit- zu Grünschieferfazies aktiv waren. Das Ar-Ar Alter der Amphibole indiziert, dass dies bei 40-42 Ma stattfand. Die Abschiebung entlang der Sutur war noch (oder wieder) aktiv zwischen 29 und 15 Ma.

Profil durch die Indus Suture mit Abschiebungsbewegungen.
 Spaltspur-Alter zeigen, dass die Suture seit 15 Ma inaktiv ist.
 nach Anczkiewicz et al. 1998 J. Asian Earth Sci. 16(2-3) 74-80



Rezente Kompressionsstrukturen

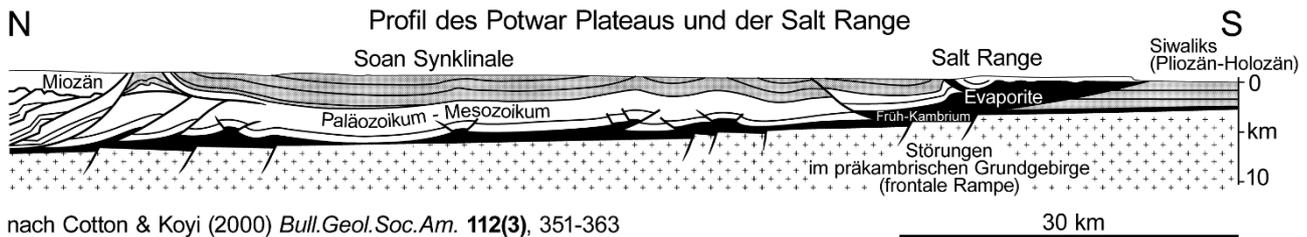
Spröde Auf- und Überschiebungen sind die letzte Stufe der Deformation. Sie zeigen, dass die Verkürzung die Abschiebungen überdauert hat. Insbesondere sind dies rezente Falten und Überschiebungen im Indus-Ganges Vorlandbecken parallel zur *Main Boundary Thrust*, der Gebirgsfrontseite und zur *Main Frontal Thrust*, welche ca. 100 km weiter im Süden zu finden ist. Mächtige Molasseablagerungen zeichnen die Entwicklung der Himalaja-Vortiefe seit 22 Ma auf. Erhöhte Absenkungsraten im gesamten Vorland indizieren, dass bedeutende Bewegung entlang der MBT ungefähr vor 11 Ma begann.



Tektonische Skizze des Nordwest-Himalajas

Der Salt Range und das Potwar Plateau sind die externsten und jüngsten Erscheinungen der Himalaja-Verkürzung. Seismische Reflexions- und Bohrdaten zeigen, dass als Deckschicht ein Falten- und Überschiebungsgürtel von kambrischen bis eozänen Plattformablagerungen die Überschiebungen im Vorland dominiert. Der Salt Range stellt die ausstreichende Front (die *Main Frontal Thrust*) der Hauptabscherfläche dar, welche entlang der ca. 500 m mächtigen, prä- und früh kambrischen Evaporite (meistens Halit) gelegen war. Die Potwar-Hochebene wurde passiv über diesem System

von Abscherhorizonten südwärts verschoben. Das Grundgebirge, das auf seismischen Profilen unter dem Salt-Range und dem Potwar Plateau identifizierbar ist, fällt leicht, mit 1 bis 4° nach Norden ein, und wird nur von Abschiebungen geschnitten.



Eine rechtsinnige Blattverschiebungszone ist die westliche Begrenzung des Salt Range. Sie ist gleichzeitig die laterale Begrenzung der Evaporite. Die Änderung im strukturellen Stil auf beiden Seiten dieser Störungzone reflektiert die laterale Änderung in der Rheologie des Abscherhorizontes (geringe Reibung entlang der Evaporite gegenüber der stärkeren Scherfestigkeit auf der Grundgebirgsoberfläche, wenn Evaporite abwesend sind). Sekundäre Abschiebungsbahnen treten innerhalb von eozänen Evaporiten und neogenen Schiefen auf. Ein Hiatus des Oligozäns, der durch Karstentwicklung ein Auftauchen anzeigt, kennzeichnet den Übergang zu den 6 km mächtigen, darüberliegenden Molasseablagerungen. Diese syntektonischen, klastischen Sedimente von miozänem bis quartärem Alter leiten sich von der Anhebung und von der gleichzeitigen Erosion des Himalajas ab, sie bilden eine transgressive Abfolge auf älteren Gesteinen mit klassischer Vorlandbeckengeometrie. Bilanzierte Profile und Modellierungen zeigen, dass die Bewegung, die auf der *Main Frontal Thrust* konzentriert wird (von 10 bis 5 Ma und seit 2 Ma), mit verteilter Verformung an Vorwärts- und Rücküberschiebungen entlang des vollständigen Profils zwischen 5 und 2 Ma abwechselt.

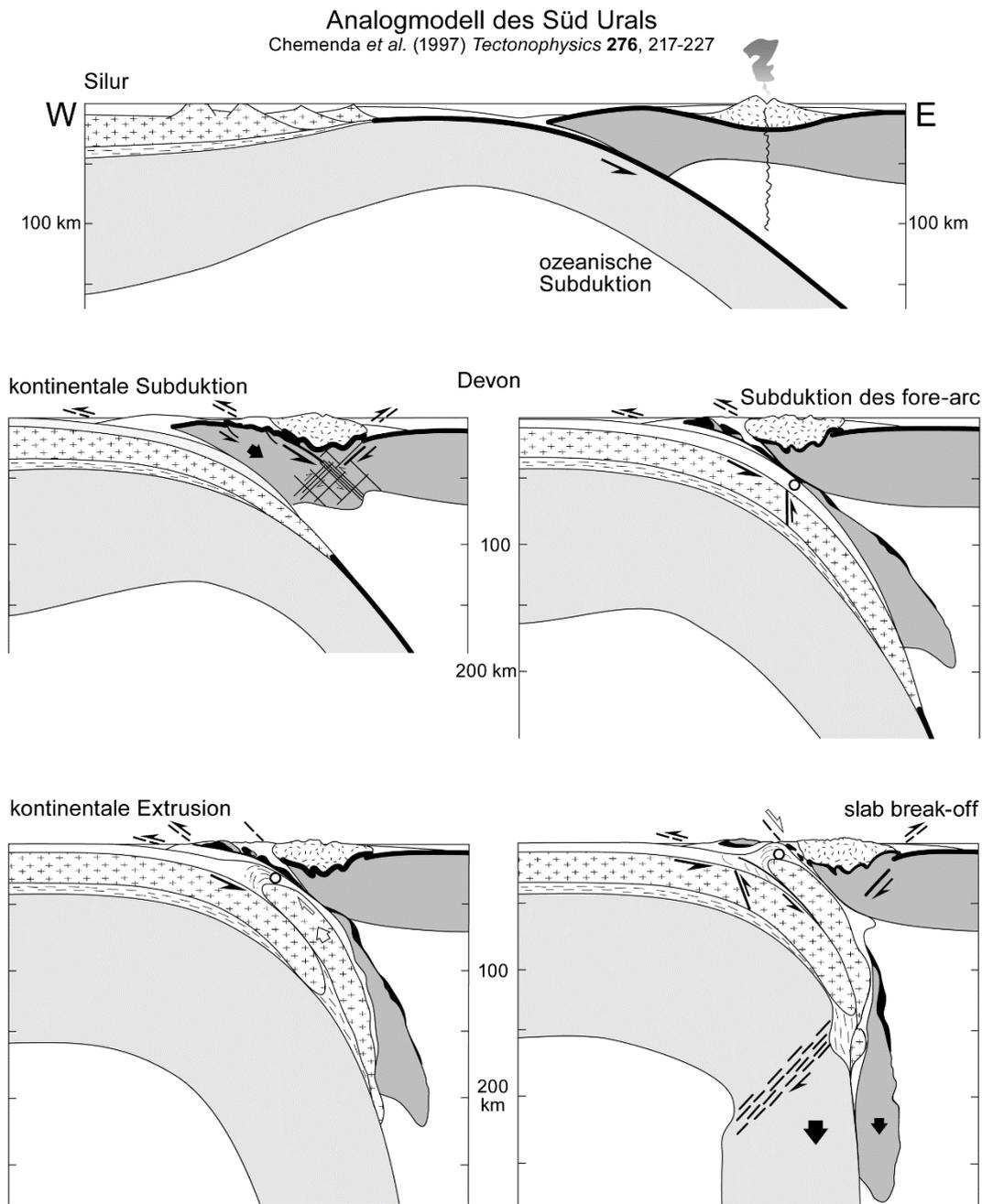
Dass Kompressionstektonik in dieser Region aktiv ist, zeigte das seismische Ereignis vom 08.10.2005, Mw = 7.6 im Falten- und Überschiebungsgürtel des Vorlands von Kohistan.

Ein Exhumationsproblem

Die strukturelle Entwicklung der Inselbogen-Kontinent Kollision kann auf Analogmodellierungen der südlichen Ural Kollision bezogen werden. Die Entwicklung kann in 5 Schritte aufgeteilt werden:

- 1) – Der vordere Kontinentalrand von Indien begann vor 60-55 Ma. Aufgrund des Auftriebs der zunehmenden Menge an subduzierende kontinentale Lithosphäre, vergrößert die fortlaufende Subduktion progressiv die kompressiven Spannungen auf der Subduktionsebene und in der überfahrenden Platte. Die kontinentale Subduktion verlief, bis die überfahrende Platte entlang konjugierter Überschiebungen nachgab, im Speziellen auf beiden Seiten des Inselbogens. Das wichtigste, süd-vergente Überschiebungssystem würde mit der Indus Suture übereinstimmen und das konjugierte, nord-vergente System würde entlang der nördlichen Suture auftreten, an welcher nordwärts gerichtete Überschiebungen gefunden wurden. Die tiefe Subduktion (100-150 km) eines alten Kontinentes ist eine Situation, die heute unter dem Banda Bogen bekannt ist.
- 2) - Wegen der fortlaufenden Konvergenz beinhaltet die nordwärts gerichtete Subduktion sowohl die indische kontinentale Kruste als auch grosse Teile der *'fore-arc'* Region, die an die subduzierende kontinentale Lithosphäre geklammert ist. Da das äussere Becken aus relativ kalter, ozeanischer Lithosphäre besteht, trägt seine Subduktion dazu bei, niedrige Temperaturgradienten in der Subduktionszone zu erreichen; es schirmt auch den subduzierten Kontinent vor asthenosphärischen Temperaturen ab und erlaubt so Druck- und Temperaturbedingungen zur Bildung der Eklogiten mit Coesit zu bilden.
- 3) - Die kontinentale Kruste wird subduziert, bis ihr Zerbrechen aufgrund erhöhter Auftriebskräfte eine Überschiebung im Krustenmassstab vor der ursprünglichen Suture erzeugt. Im Nordwesthimalaja wird dieses Ereignis durch die Ultrahochdruck-Bedingungen auf ungefähr 45

Ma datiert. Die entsprechende Hautüberschiebung ist eine der vielen Überschiebungen, die im Süden, im indischen Kontinent, kartiert wurden.



- 4) - Die nach oben gerichtete Verdrängung des subduzierten kontinentalen Randes geschieht aufgrund seines relativ negativen Auftriebes. Das aufsteigende, kontinentale Stück schert vorher subduziertes Material ab, was Ophiolite, Metaophiolite und Hochdruck/Niedrigtemperatur Gesteine beinhaltet. Dies würde die Eklogite und Blauschiefer der Indus Suture und die Gesteine, welche innerhalb des indischen Kontinents gefunden wurden, erklären. Der Aufstieg des kontinentalen Bruchstückes wird durch zwei Hauptstörungssysteme aufgenommen: ein Abschiebungssystem entlang der oberen Grenze und ein Überschiebungssystem entlang des Bodens dieses Stückes. Das obere Abschiebungssystem würde der Reaktivierung der Indus Suture mit Abschiebungen entsprechen. Als Resultat der frühen Überschiebungen und überprägenden Abschiebungen liegen Blöcke von unterschiedlichem Ursprung und Metamorphosegrad nebeneinander. Das basale Überschiebungssystem könnte Überschiebungen weiter südlich beinhalten (z.B. die Panjal Überschiebung), die gleichzeitig zur Extension innerhalb der Suture

erfolgten. Demzufolge dienen die Abschiebungen entlang der Indus Suture der Aufnahme eines Aufstiegs, verursacht durch Auftrieb während der Konvergenz des Systems. Laut geochronologischen Daten wurde Exhumation zurück zur Grünschieferfazies vor ungefähr 40 Ma erzielt.

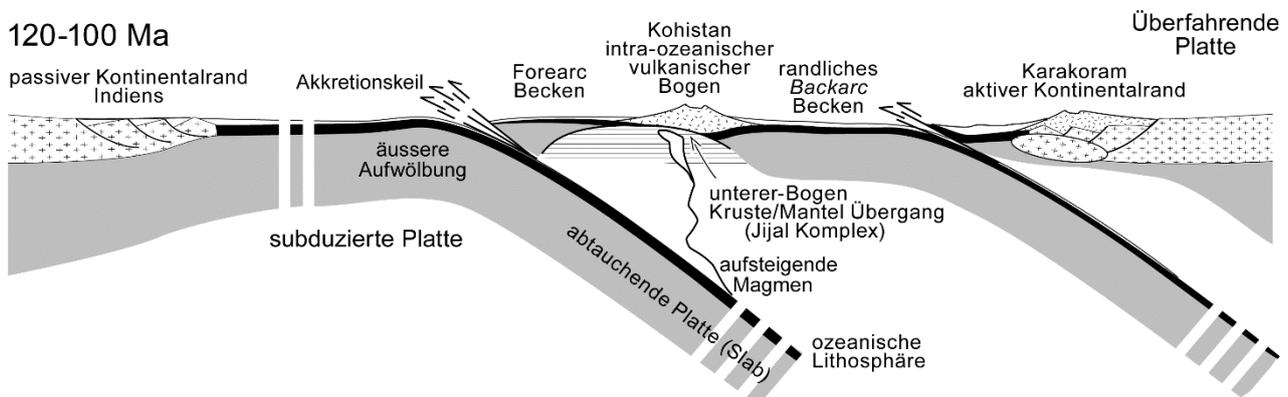
- 5) - Das gehobene kontinentale Stück intrudierte in die Grenze zwischen der überfahrenden und der subduzierten Platte und produzierte so ein breites, antiformes Gebiet. **Spaltspur** (*fission track*) Datierungen zeigen an, dass die Gesteine, die zum gehobenen kontinentalen Stück gehören, vor etwa 20 Ma abgekühlt sind. In Pakistan würde das antifforme Gebiet den grossen Domen zwischen der Suture und der Dargai Ophiolitdecke entsprechen. Diese Klippe würde einen tektonischen Ausreisser der ozeanischen Lithosphäre repräsentieren, in welcher der Kohistan-Inselbogen entstanden ist.

Tektonische Evolution des West-Himalajas

Die tektonischen Modelle, welche die Geschichte des West-Himalajas und der Tethys-Suturen in Pakistan beschreiben, beinhalten zwei Kollisionsereignisse.

Doppelte, nach Norden-tauchende Subduktionen

Doppelte Subduktionen während der frühen Kreidezeit (130-95 Ma) sind erforderlich, da Bogenmagmatismus jener Zeit sowohl innerhalb des Karakoram Randes Eurasiens und des Kohistans etabliert wurde. Die einfachste Lösung wäre, dass beide Regionen angeheftet wurden und den gleichen Bogen darstellten. Diese Lösung ist nicht nachhaltig, da die paläomagnetischen Daten zeigen, dass Karakoram und Kohistan zu dieser Zeit Tausende von Kilometern voneinander entfernt waren und die geochemischen Daten zeigen, dass der Karakoram ein Kontinentalrand ist, Kohistan aber auf einer ozeanischen Lithosphäre installiert wurde.



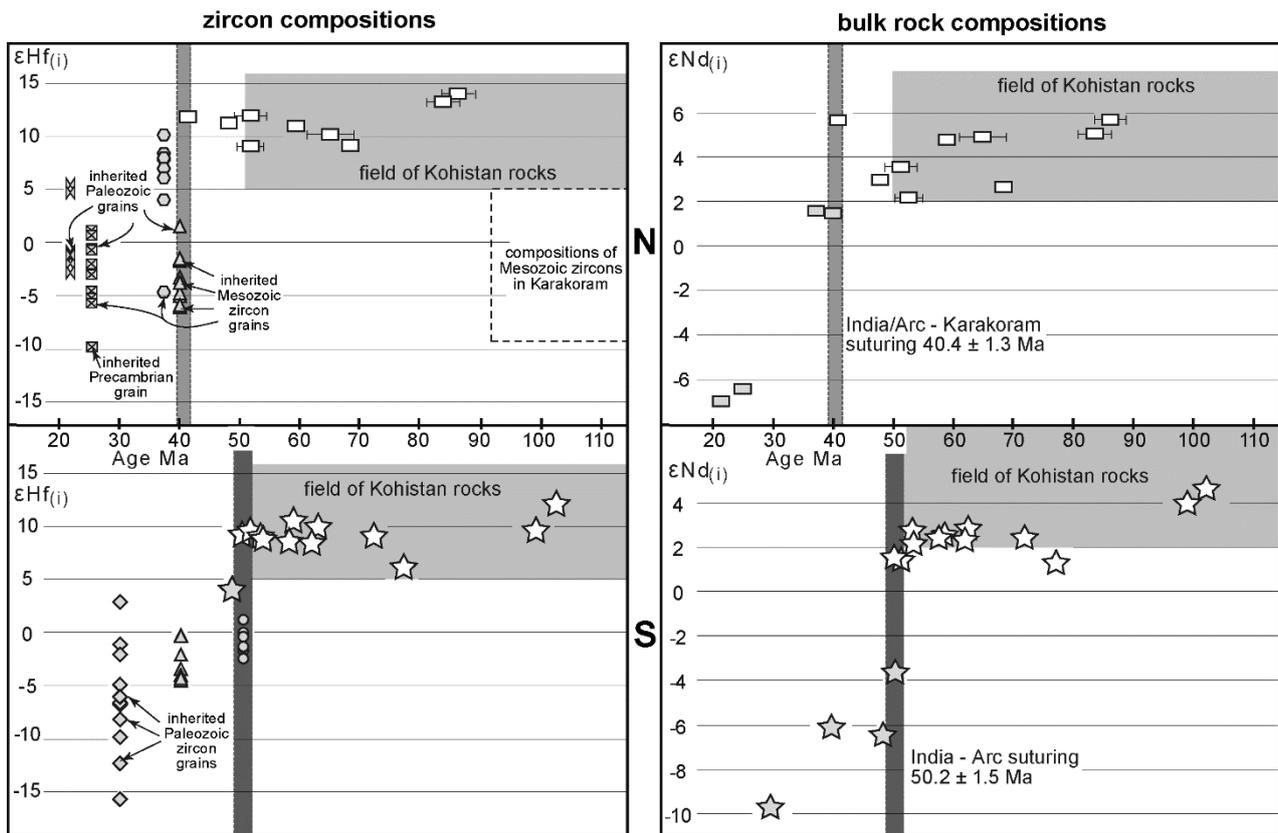
Die magmatische Geschichte der Karakoram deutet an, dass die KKS Subduktionszone vor ca. 95 Ma angehalten wurde. Das Fehlen von Beweisen für Subduktion eines grossen ozeanischen Slabs regte die Diskussion darüber an, dass die KKS ein geschlossenes Backarc-Becken darstellt.

Die Diskussion lässt die Frage der Verlinkung des Endes der Konvergenz / Subduktion und der kompletten Schliessung des Beckens entlang der Kollisionszone des Karakoram Forearc mit dem Kohistan Backarc offen.

Kontinentalbogen-Inselbogen Andocken: Karakoram- Kohistan Kollision

Dominanter, kalkalkalischer Magmatismus im Karakoram Batholith in der mittleren Kreide markiert die nordwärts gerichtete Subduktion des nördlichen Tethys Ozeans unter Asien. Die folgende Akkretion des Kohistan-Komplexes an Asien entlang der KKS wurde verschiedentlich entweder zwischen 102 bis 75 Ma oder nach der 65-55 Ma Kohistan / Asien Kollision gesetzt. Geochronologische und Multi-Isotopenstudien von magmatischen Gesteinen aus dem Kohistan / Ladakh Bogen platzieren die Kollision mit Indien um $50,2 \pm 1,5$ Ma und die Kollision zwischen dem

zusammengebauten Indien+Bogen und Eurasia, entlang der KKS und ihrer östlichen Shyok Fortsetzung, um $40,4 \pm 1,3$ Ma.



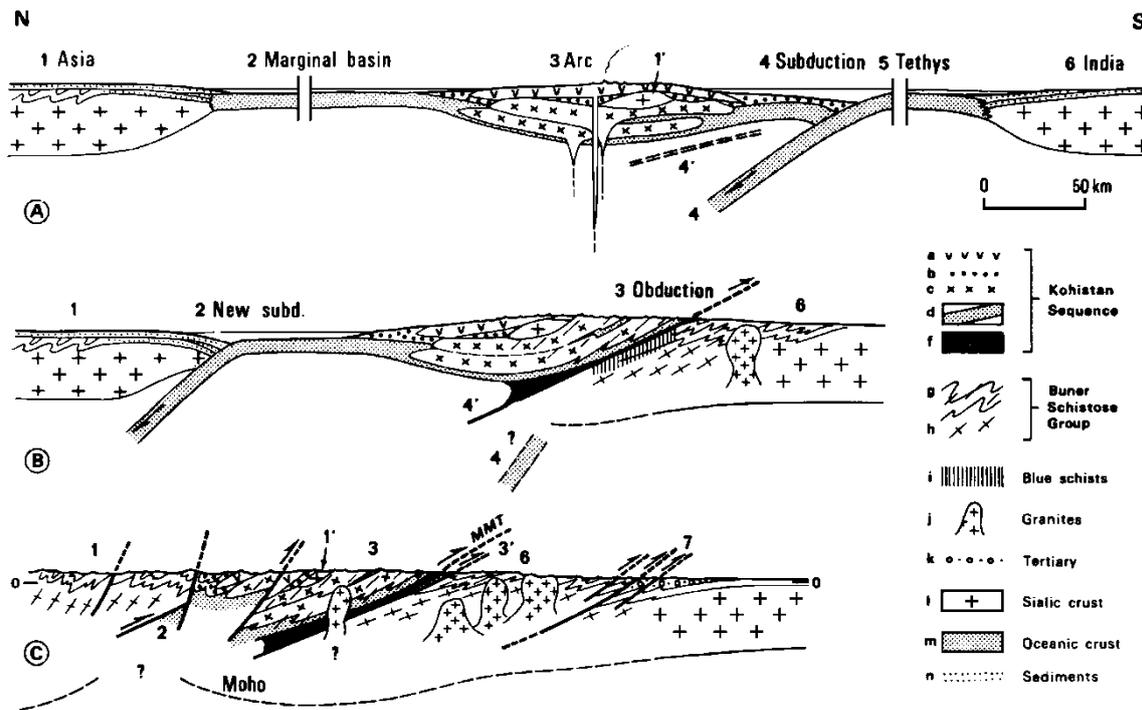
from Bouilhol et al. 2013 *Earth Planet. Sc. Lett.* **366** 163-175

Die tektonische und magmatische Aktivität existierte bis ca. 30 Ma auf der Kohistan Seite der KKS. Dies bot eine Zeitlücke, genügend lang um den Rest des ozeanischen Beckens, zumindest des Karakoram Forearc, zu schliessen. Im Vergleich mit modernen kontinentalen Forearcs könnte die Breite dieses Beckens von 50 km bis mehr als 500 km gewesen sein.

Mehrere Hypothesen über das Schicksal des KKS Slab sind möglich. Breakoff würde starken Magmatismus und starke isostatische Erhebung beider Platten auslösen. Es gibt keinen Beweis für diese beiden Zeichen. Thermische Absorption und / oder Eduktion (umgedrehte Subduktion) sind möglich. Im letzteren Fall wird die Exhumierung von Hochdruck-Gesteinen und prominente Beweise für Schersinn *top*-nach-Norden erwartet. Da diese zwei Beweise in der KKS fehlen, ist der Slab wahrscheinlich durch Wärmeableitung abgeköhlt.

Kontinentalbogen-Inselbogen Andocken: Karakoram- Kohistan Kollision

Dominanter, kalkalkalischer Magmatismus im Karakoram Batholith in der mittleren Kreide markiert die nordwärts gerichtete Subduktion des nördlichen Tethys Ozeans unter Asien. Die folgende Akkretion des Kohistan-Komplexes an Asien entlang der KKS wurde verschiedentlich entweder zwischen 102 bis 75 Ma oder nach der 65-55 Ma Kohistan / Asien Kollision gesetzt. Geochronologische und Multi-Isotopenstudien von magmatischen Gesteinen aus dem Kohistan / Ladakh Bogen platzieren die Kollision mit Indien um $50,2 \pm 1,5$ Ma und die Kollision zwischen dem zusammengebauten Indien+Bogen und Eurasia, entlang der KKS und ihrer östlichen Shyok Fortsetzung, um $40,4 \pm 1,3$ Ma. Die tektonische und magmatische Aktivität existierte bis ca. 30 Ma auf der Kohistan Seite der KKS. Dies bot eine Zeitlücke, genügend lang um den Rest des ozeanischen Beckens, zumindest des Karakoram Forearc, zu schliessen. Im Vergleich mit modernen kontinentalen Forearcs könnte die Breite dieses Beckens von 50 km bis mehr als 500 km gewesen sein.



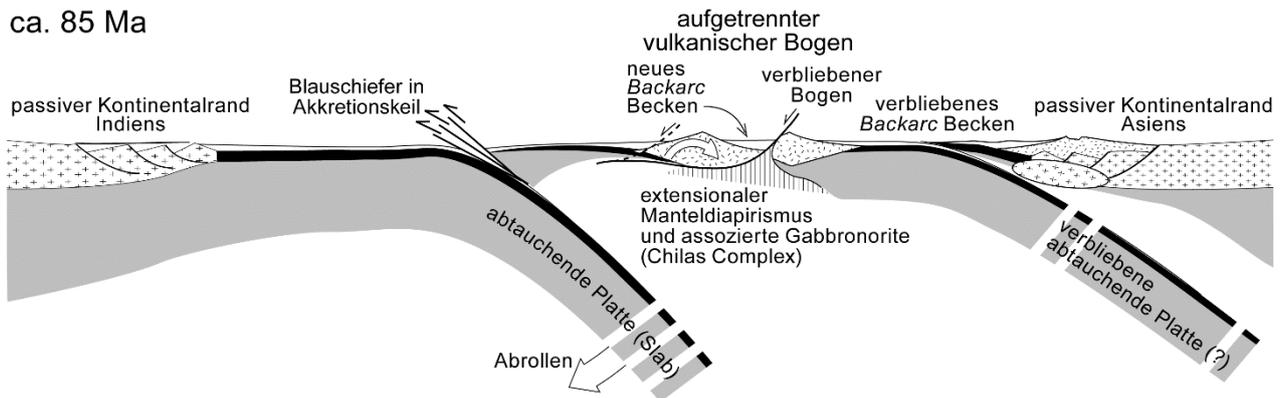
nach Khan Tahirkheli et al. (1979) In: Geodynamics of Pakistan (Farah & De Jong editors)
 Geol. Surv. Pakistan, Quetta, pp. 125-130

Mehrere Hypothesen über das Schicksal des KKS Slab sind möglich. Breakoff würde starken Magmatismus und starke isostatische Erhebung beider Platten auslösen. Es gibt keinen Beweis für diese beiden Zeichen. Thermische Absorption und / oder Eduktion (umgedrehte Subduktion) sind möglich. Im letzteren Fall wird die Exhumierung von Hochdruck-Gesteinen und prominente Beweise für Schersinn *top*-nach-Norden erwartet. Da diese zwei Beweise in der KKS fehlen, ist der Slab wahrscheinlich durch Wärmeableitung abgekühlt.

Rifting des Bogens – Slab Rückrollen

Die Chilas-Abfolge von Manteldiapiren und die magmatischen Strukturen des Chilas Gabbro-norits und der zugehörigen plutonischen Gesteine dokumentieren im Allgemeinen ein süd-eintauchendes Extensionssystem. Diese Beobachtungen ergänzen die geochemischen und petrologischen Argumente, die alle auf die Trennung des Kohistan-Inselbogens vor etwa 85 Ma hindeuten, mit einer beginnenden Riftbildung, die im Inselbogen entlang seiner Länge stattfand. Der gleichzeitige alkalische Plutonismus in Karakoram deutet an, dass dann das gesamte System extensional wurde. Die darauffolgende Öffnung des 'backarc' Beckens sollte einen vulkanischen vom restlichen Inselbogen, dessen Gesteine nun den Kohistan-Batholith darstellen, getrennt haben. Die allgemeine nord-einfallende Orientierung der südlichen Amphiboliten (die Metagabbros und Metadiorite der unteren Kruste) und ihre teilweise Freilegung (regional verteilte $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ Abkühlungsalter bei 83-80 Ma) können der Dehnungskippung zugeschrieben werden. Dieses Ereignis (Gravitationskollaps?) markiert das Ende der magmatischen Aktivität im südlichen Teil des Kohistan Bogenkomplexes.

ca. 85 Ma



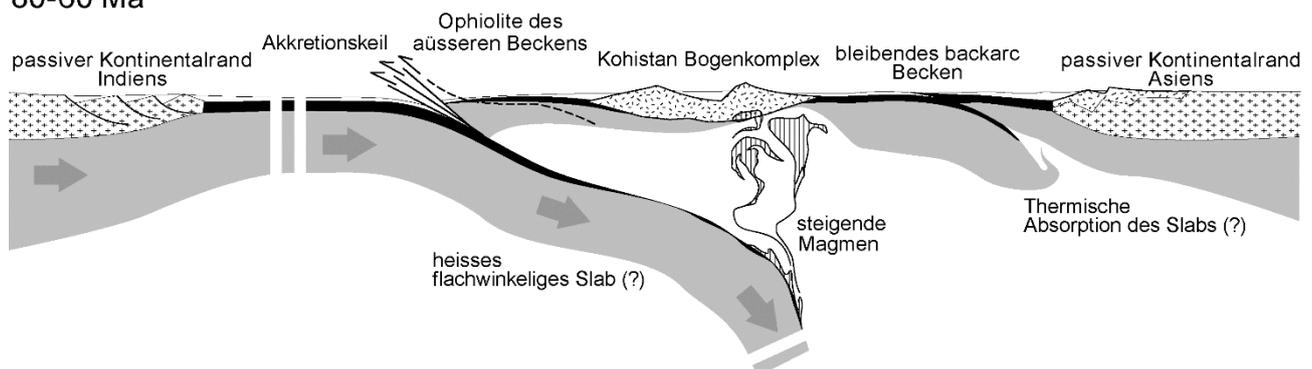
Tektonische Geschichte des Kohistan-Bogenkomplexes

Die Krustendicke von Kohistan war vor 100 Ma ca 50 km (Gleichwertigkeit der Tiefe mit dem metamorphen Druck von Granulitfazies Gabbros) und wurde während der Extension, zumindest lokal, auf 20-25 km (petrographischer Druck = Tiefe der Einlagerung der Chilas Peridotiten und Gabbro-norite) reduziert. Angesichts der modernen Referenzen wie das Lau-Becken hinter der Tonga-Rinne und das Marianen Becken-und-Rinnen System, wird die Trennung im Kohistan vorläufig mit Rückrollen verbunden. Rückrollen der ozeanischen Tethys Platte kann bereits vor 105 Millionen Jahren begonnen haben. Rückrollen und die anschliessende verbreitete Ausdehnung in der hängenden Platte kann auch die Freilegung der Blauschiefer im Akkretionskeil der Indus Suture, zwischen 90 und 80 Ma, begünstigt haben. Rückrollen kann auch die Beendigung der Subduktion unter den Karakorum, die kinematisch unnötig wurde, ausgelöst haben.

Eine Subduktion

Die grosse Menge an Konvergenz und die schnelle Geschwindigkeit von Indien während spät Kreide-Paläozänen Zeiten sind offensichtlich Indikatoren für die Subduktion des Ozeanbodens südlich des Kohistan-Inselbogens, was zur Bildung des junger als 80 Ma kalkalkalischen Batholiths führte, während Indien sich dem Inselbogen näherte, indem es den dazwischenliegenden Ozean aufnahm. Das gleichzeitige Rückrollen könnte bis vor 55-50 Ma aktiv gewesen sein, um Platz für die Extrusion von Ultrahochdruck-Krustensplitter des indischen Vorderrandes im Rinnenbereich zu ermöglichen. Wenn der Abstand zwischen dem Bogen und der Rinne vom Subduktionswinkel abhängt, dann könnte das Flächenwerden des Slabs für die nordwärts Verschiebung der magmatischen Front von den südlichen Metagabbros bis auf den Kohistan Batholith verantwortlich sein. Ein wichtiger Mechanismus für eine flachwinklige Subduktion ist der Auftrieb. Entweder wurde ein junger Teil der Tethys Lithosphäre subduziert, was das Nähern und den Einzug des ozeanischen Rückens in die Rinne kennzeichnen würde, oder ein ozeanisches Plateau machte den flachen Slab. Ein weiterer Mechanismus für einen flachwinkligen Slab ist das Rückrollen der Rinne durch eine schnelle Konvergenzrate.

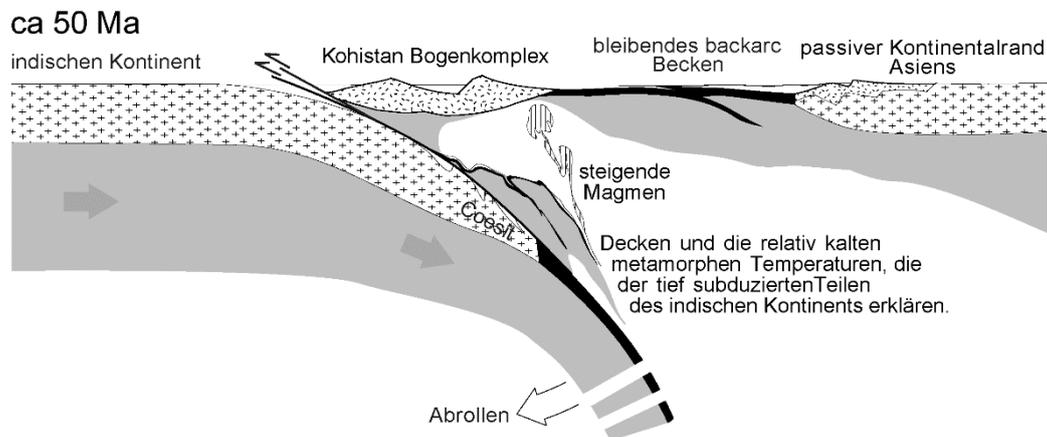
80-60 Ma



Analogmodellierung von intra-ozeanischen Subduktionssystemen bietet eine zusätzliche Erklärung für die zeitliche und räumliche Änderung der magmatischen Aktivität: Die magmatische Front könnte mit der Rinne verschoben worden sein, während der Forearc subduziert wurde. Forearc Subduktion würde die knappen Beweise auf ihn und den Akkretionskeil, das Fehlen von grossen Ophiolit-Decken und die relativ kalten metamorphen Temperaturen der tief subduzierten Teilen des indischen Kontinents erklären.

Inselbogen-Kontinent Kollision: Kohistan-India

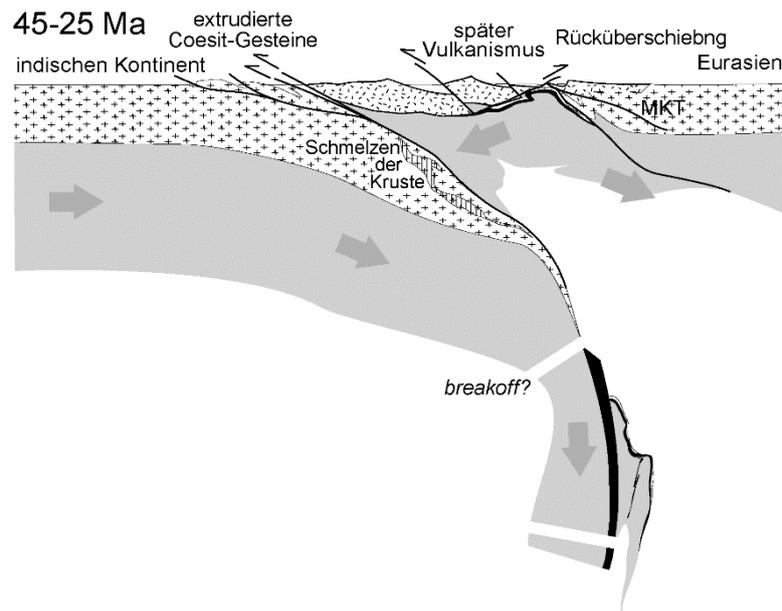
Die darauffolgende Schliessung des Tethys-Ozeans fand vor etwa 65-55 Ma statt. Vor ca. 55 Ma begann das tektonische Zusammenspiel zwischen den kontinentalen Teilen Indiens und Eurasiens und die frontalen Teile des indischen Kontinents wurden vor 45 Ma bis auf das Stabilitätsfeld von Coesit subduziert. Magmatismus war noch im Inselbogen aktiv, erzeugt von der Haupt Tethys Platte und/oder von dem ozeanischen Forearc. Die subduzierende Indische Platte agierte dabei als Rampe entlang welcher der Kohistan-Inselbogen und Reste des äusseren Beckens südwärts über Indien obduziert wurden. Als der Indische Kontinentalrand in den Trog gefahren ist, verhinderte sein Auftrieb grössere Unterschiebung der kontinentalen Lithosphäre. Überschiebungslinsen, synthetisch mit der frühen Subduktion, entwickelten sich in Richtung Kontinent während Sedimente und Linsen ozeanischer Kruste auf den Kontinentalrand geschoben wurden.



Südgerichtete Überschiebungen im indischen Kontinent fand gleichzeitig mit der Reaktivierung der Indus Suture durch spröde-duktilen Abschiebungen statt. Zahlreiche Schleppepfalten und Schersinnkriterien geben die Bewegung des Hangenden nach Norden an. Diese Strukturen werden dem Auftrieb zugeschrieben, der Extrusion von tief subduzierten kontinentalen Gesteinen über den hineinkommenden hinteren Teil des indischen Kontinents nach oben verursachte. Diese Phase ist ein wichtiger Teil der Entwicklung des Himalajas. Die Deformation wird sich weiter mit syn- und post-metamorphen Überschiebungen auf Kosten des indischen Kontinents und mit Abkühlung durch 500°C zwischen 40 und 35 Ma entwickeln.

Kollision: Schliessung von allen Becken

Erhöhte horizontale Spannungen im verdickenden Kollisionssystem führen zu seiner völligen Schliessung und Blockierung der Suture im Eozän-Miozän. Die Becken mit Sedimentation bis ins Eozän, wurden damals wahrscheinlich innerhalb des Kohistan Bogens und des Backarcs umgekehrt. Die Spaltspur Apatit Alter zeigen, dass sowohl die KKS und die Indus-Suture seit etwa 15 Ma geschlossen sind.



Schlussfolgerung

Der nordwestliche Himalaja ist ein Gebirgszug, der durch die Kollision eines Inselbogens mit einem Kontinent entstanden ist.

Die Geologie Kohistans stellt die Existenz eines fossilen, obduzierten Inselbogens dar, der während des Mesozoikums vermutlich auf der Nordseite der Tethys wuchs, während die Südseite nach Norden unter den Inselbogen subduziert wurde.

Die magmatische Geschichte zeigt, dass vulkanische Inselbögen die Hauptgebiete für die Erzeugung neuer kontinentaler Kruste sind. Jedoch haben sie eine begrenzte, instabile Lebensspanne, die von wichtigen Umstellungen im tektonischen Hintergrund, der magmatischen Produktion und Standort unterbrochen wird. Die Kohistan Geschichte umfasst in der Oberkreide eine Quertrennung als wichtigen Bildungsprozess eines reifen Stadiums des Inselbogens.

Frühe kontinentale Subduktion bezieht sich auf Obduktion und schrittweise erhöhte Horizontalspannungen bis die Kompression stark genug war, um volle Kollision auszulösen und während des Eozän-Miozäns alle ozeanischen Becken zu schliessen. Der Kohistan-Inselbogen wurde im frühen Eozän während seiner Akkretion zwischen Indien und Asien eingeklemmt. Das Ende des kalkalkalischen Magmatismus im Kohistan kennzeichnet die abnehmenden Stufen dieser Vollkollision während Hochspannungs- kontinentalen Kollision beginnt.

Der nordwestliche Himalaja repräsentiert einen Vorland-Überschiebungsgürtel, der gegenwärtig an seinem südlichen Ende im Salt Range aktiv ist, wo sich die basale Überschiebung immer noch bewegt, was aus der Inselbogen-Kontinent Kollision die mehrere hundert Kilometer im Norden liegt, resultiert.

Frage

Ist ein Vulkan-Inselbogen-Magmatismus ein kontinuierlicher Prozess?

Empfohlene Literatur

- Bard J.-P. - 1983. Metamorphism of an obducted island arc: Example of the Kohistan sequence (Pakistan) in the Himalayan collided range. *Earth and Planetary Science Letters* **65** (1), 133-144.
- Bard J.-P., Maluski H., Matte P. & Proust F. - 1980. The Kohistan sequence: crust and mantle of an obducted island arc. *Geological Bulletin of the University of Peshawar* **11**, 87-94.
- Bouilhol P., Jagoutz O., Hanchar J.M. & Dudas F.O. - 2013. Dating the India-Eurasia collision through arc magmatic records. *Earth and Planetary Science Letters* **366**, 163-175.

- Burg J.-P. - 2011. The Asia–Kohistan–India Collision: Review and Discussion, in: Brown D.& Ryan P.D. (Eds.), *Arc-Continent Collision*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 279-309.
- Burg J.-P., Bodinier J.-L., Chaudhry M.N., Hussain S.& Dawood H. - 1998. Infra-arc mantle-crust transition and intra-arc mantle diapirs in the Kohistan Complex (Pakistani Himalaya): petro-structural evidence. *Terra Nova* **10** (2), 74-80.
- Chamberlain C.P., Jan M.Q.& Zeitler P.K. - 1989. A petrologic record of the collision between the Kohistan island-arc and Indian plate, northwest Himalaya. *Geological Society of America, Special Paper* **232**, 23-32.
- Coward M.P.& Butler R.W. - 1985. Thrust tectonics and the deep structure of the Pakistan Himalaya. *Geology* **13** (6), 417-420.
- Coward M.P., Butler R.W.H., Khan M.A.& Knipe R.J. - 1987. The tectonic history of Kohistan and its implications for Himalayan structure. *Journal of the Geological Society of London* **144**, 377-391.
- Farah A., Lawrence R.D.& De Jong K.A. - 1984. An overview of the tectonics of Pakistan, in: Bilal U.H.& Milliman J.D. (Eds.), *Marine geology and oceanography of Arabian Sea and Coastal Pakistan*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, pp. 161-176.
- Kaneko Y., Katayama I., Yamamoto H., Misawa K., Ishikawa M., Rehman H.U., Kausar A.B.& Shiraishi K. - 2003. Timing of Himalayan ultrahigh-pressure metamorphism: sinking rate and subduction angle of the Indian continental crust beneath Asia. *Journal of Metamorphic Geology* **21** (6), 589-599.
- Petterson M.G.& Windley B.F. - 1985. Rb-Sr dating of the Kohistan arc-batholith in the Trans-Himalaya of north Pakistan, and tectonic implications. *Earth and Planetary Science Letters* **74** (1), 45-57.
- Tahirkheli R.A.K., Mattauer M., Proust F.& Tapponnier P. - 1979. The India Eurasia Suture Zone in Northern Pakistan: Synthesis and interpretation of recent data at plate scale, in: Farah A.& De Jong K.A. (Eds.), *Geodynamics of Pakistan*. Geological Survey of Pakistan, Quetta, pp. 125-130.
- Tamaki K. - 1985. Two modes of back-arc spreading. *Geology* **13** (7), 475-478.
- 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 of London* **160**, 367-376.
- Treloar P.J., Petterson M.G., Qasim Jan M.& Sullivan M.A. - 1996. A re-evaluation of the stratigraphy and evolution of the Kohistan arc sequence, Pakistan Himalaya: implications for magmatic and tectonic arc-building processes. *Journal of the Geological Society of London* **153** (5), 681-693.
- Treloar P.J., Rex D.C., Guise P.G., Coward M.P., M.P. S., Windley B.F., Petterson M.G., Jan M.Q.& Luff I.W. - 1989a. K/Ar and Ar/Ar geochronology of the Himalayan collision in NW Pakistan: constraints on the timing of suturing, deformation, metamorphism and uplift. *Tectonics* **8** (4), 881-909.
- Treloar P.J., Rex D.C.& Williams M.P. - 1991. The role of erosion and extension in unroofing the Indian Plate thrust stack, Pakistan Himalaya. *Geological Magazine* **128** (5), 465-478.
- Treloar P.J., Williams M.P.& Coward M.P. - 1989b. Metamorphism and crustal stacking in the North Indian Plate, North Pakistan. *Tectonophysics* **165**, 167-184.