

Kohistan - West-Himalaja: Inselbogen-Kontinent Kollision Tektonik-WS2010-2011

Educational Material

Author(s):

Burg, Jean-Pierre

Publication date:

2011

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007204647>

Rights / license:

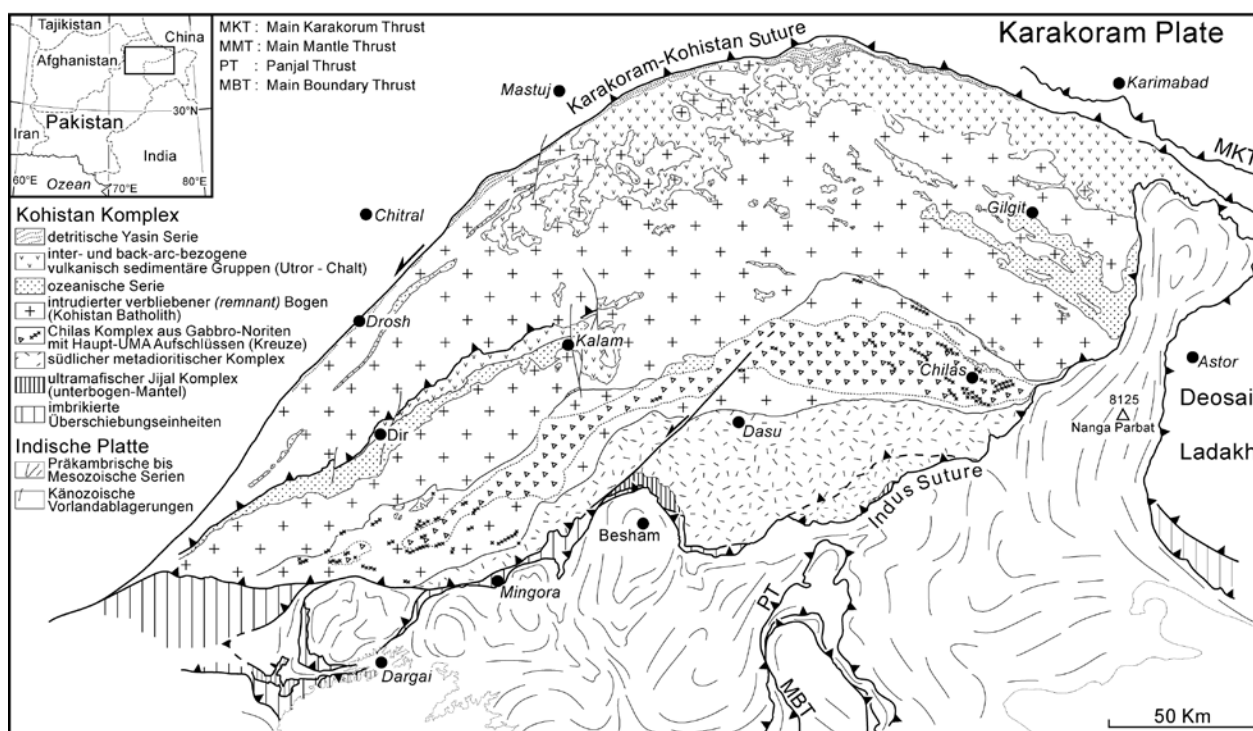
[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Kohistan - West-Himalaja: Inselbogen-Kontinent Kollision

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, welches von früh-eozänen Graniten und karbonisch-permischen alkalischen, magmatischen Gesteinen intrudiert wurde. 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.

Die Indus Suture ist die westliche Fortsetzung der Yalu Tsangpo Suture in Südtibet. Das östliche Äquivalent des Kohistan Komplexes ist der Ladakh-Batholith in Nordwest Indien und der kontinentale Transhimalaja Intrusionsgürtel in Süd-Tibet. Der Kohistan 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 er ein Beispiel für eine Inselbogen-Kontinent Kollision.



Inselbogen-Kontinent Kollisionssysteme sind eher selten, da diese gewöhnlich ein Zwischenschritt in der Schliessung eines Ozeans 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. Die Inselbögen bleiben selten intakt. Obwohl Subduktionszonen den Ort der Erzeugung von neuem SiAl-Material darstellen, bewegen sie 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 Neuguinea kollidiert.

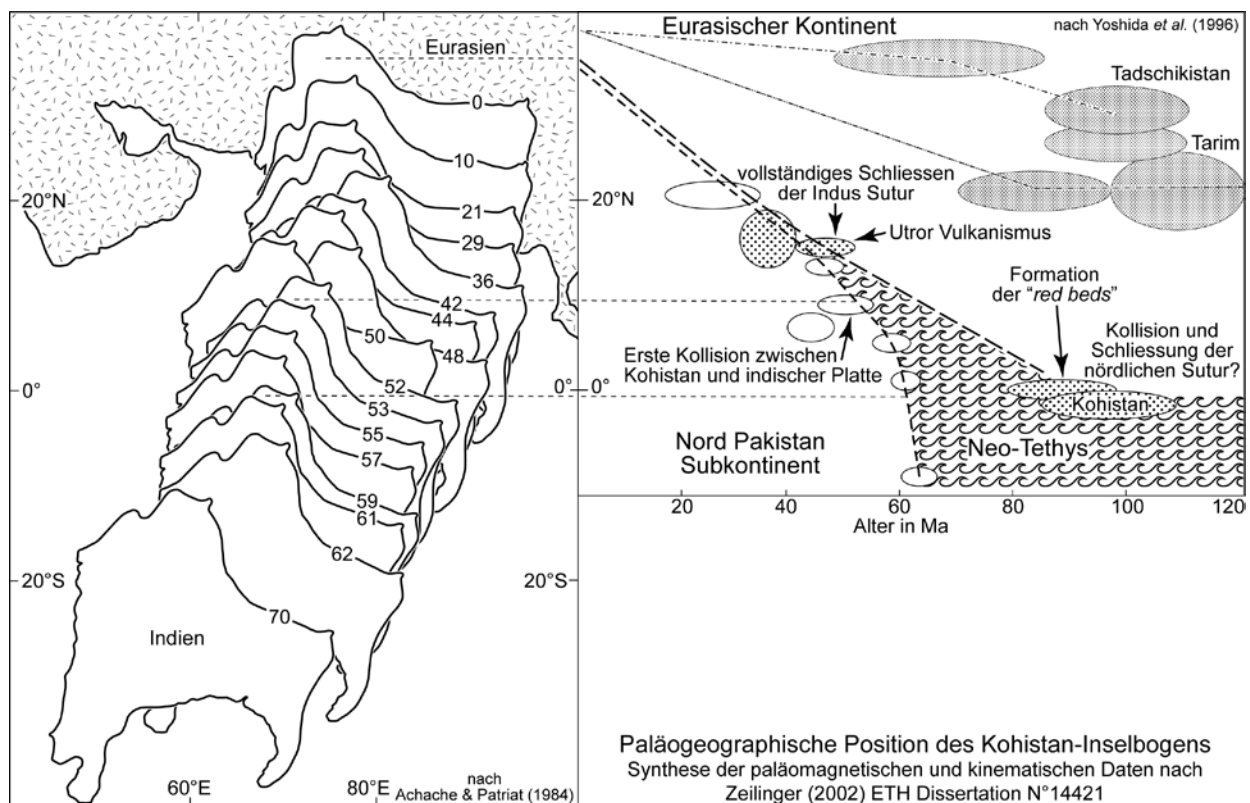
Ozeanboden-Spreizung

Früh-permische, magmatische Alter der indischen Granit-Gneise deuten auf einen durchgreifenden Magmatismus, der mit der Bildung des passiven Randes zusammenhängt, im Norden dieses Kontinentes hin. Metabasalte und permische metabasaltische Gänge, die südlich der Indus Suture im indischen Kontinent gefunden wurden, wurden während des Rifting im Zusammenhang mit dem Aufbrechen von Gondwana produziert. 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 unter den Inselbogen nach Norden eintauchte.

Paläomagnetische und kinematische Daten

Der Inselbogen Magmatismus begann im mittleren bis späten Jura, in zeitlicher Übereinstimmung mit einer grundlegenden Änderung in den Plattenbewegungen. 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).

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 Kontinents ein. Gleichzeitig waren die Tadschikistan- und Tarim-Becken von Eurasien mehr als 2000 km nördlich der Karakoram- und Kohistan-Blöcke, während Indien noch in der südlichen Hemisphäre lag.



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.

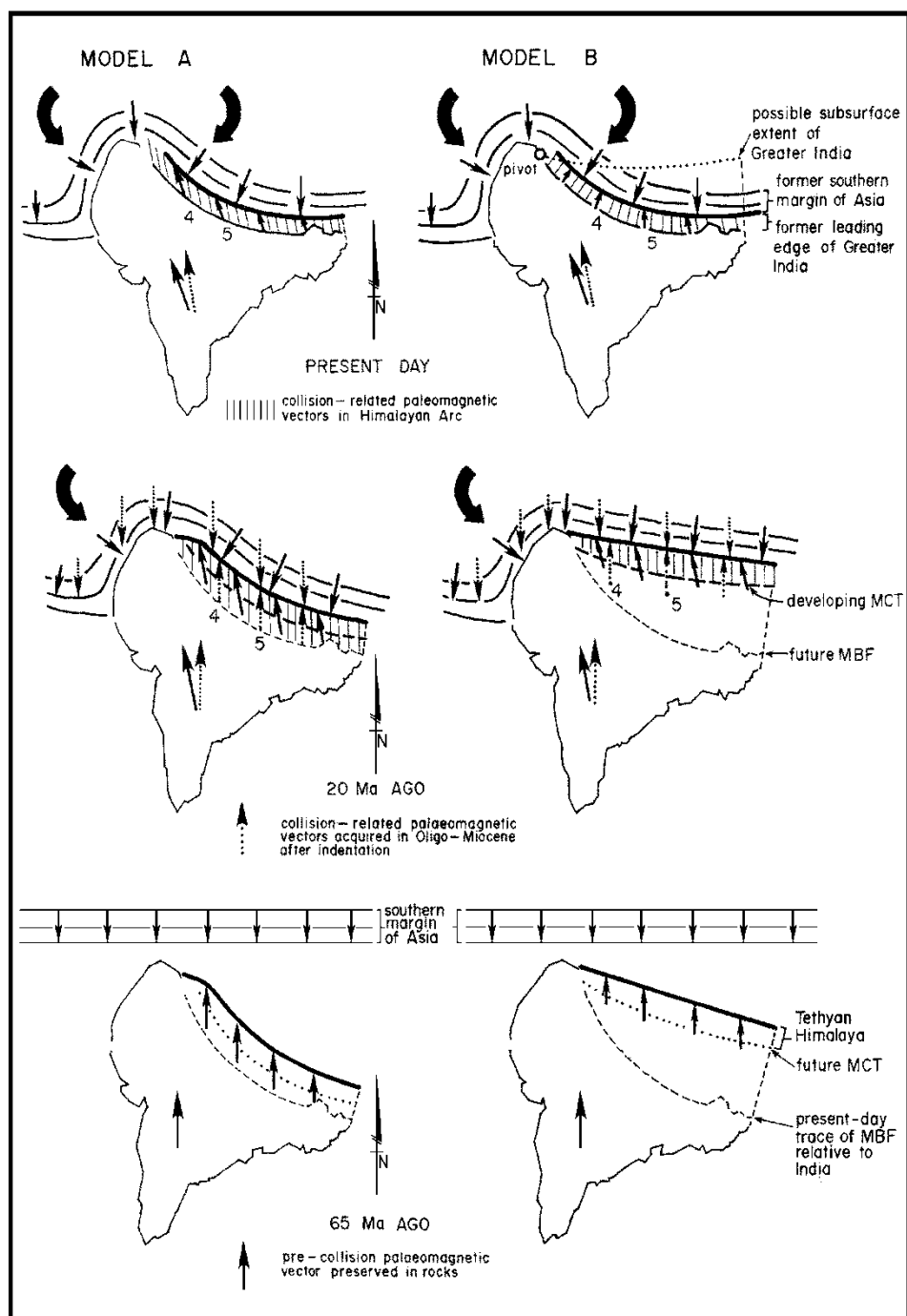


Fig. 3. Schematic comparison of the palaeomagnetic directions expected depending on whether the shape of Greater India is small (Model A) or large (Model B). The broad arrows indicate sense of oroclinal bending during formation of the Hindu Kush–Pamir–Karakorum syntaxial bend. The other arrows in each diagram represent magnetization acquired: before collision (bottom); after indentation (middle); and after underthrusting and oroclinal bending (top). Greater India has rotated counterclockwise by a little less than 20° during the Cainozoic, and thus the amount of rotation of any palaeomagnetic vector depends on when it was acquired as well as the model. The arrows represent real magnetic directions orientated with respect to true north. 4 and 5 denote arrows corresponding to palaeomagnetic vectors expected at locations 4 and 5 in Fig. 1. By contrast, in Fig. 1, the azimuth of the arrows represents the sense and magnitude of rotation with respect to the Indian Shield. See text for fuller elaboration.

nach Klootwijk, Conaghan & Powell (1985) *Earth Planet. Sci. Lett.* **75**, 167-183

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-Sutur deutet.

Karakoram, vormals aktiver Kontinentalrand Eurasiens

Die Haupttrasse des Karakorams besteht aus mittelkretazischen bis spät-känozoischen Dioriten, Tonaliten und Granodioriten mit einer kalkalkalischen Signatur. Diese Granitoide bilden den zusammengesetzten Karakoram Batholith und haben paläozoische und triassische Sedimente, mit einer Affinität zur asiatischen Platte, und ihr proterozoischen Grundgebirge intrudiert. Die Bildung von solch einem Anden-Typ Kontinentalrand am südasiatischen Kontinentalrand erfordert mindestens eine nach Norden eintauchende Subduktionszone innerhalb der Karakoram-Kohistan-Sutur. Der südlichste Rand besteht aus einem Gürtel von jungen (10-3 Ma) Niederdruck-Hochtemperatur metamorphen Gesteinen und damit im Zusammenhang stehenden Migmatitdomen. Sie überprägen ein känozoisches (55-37 Ma) tektonisches und metamorphes Ereignis, welches zeitlich mit dem Beginn der Indien-Asien Kollision übereinstimmt.

Ähnlichkeiten in Anordnung, Alter und chemischer Zusammensetzung legen nahe, dass der Karakoram-Magmatismus die westliche Fortsetzung des Transhimalaja-Batholiths war, der in der Kreide den südlichen Kontinentalrand Eurasiens darstellte. Diese Interpretation wird unterstützt durch die starke stratigraphische Ähnlichkeit der aufgeschlossenen Gesteine. Die Korrelation beider Kontinentalränder impliziert einen dextralen Versatz von ca. 300 km entlang der Karakoram-Blattverschiebung, 150 km davon fanden allein in den letzten 20 Ma statt.

Strukturelle und metamorphe Studien haben gezeigt, dass der südliche metamorphe Karakoram Komplex eine kaum erforschte und verstandene, frühe Verdickungsphase mit einer nachfolgenden nach Süden und Südwesten gerichteten Überschiebungsphase erlebte. Der tiefste südlichste Teil des strukturellen Stapels, über der Karakoram-Kohistan Sutur, besteht aus niedrig gradigen kambro-ordovizischen Turbiditen und Kalksteinen. Die 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 axialen Batholith erreicht (Sillimanitzone, 650-700°C; 10 kbar). Am Höhepunkt dieser krustalen Verdickungsphase bildeten sich durch die teilweise Schmelzung der Kruste Leukogranite (20-25 Ma).

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

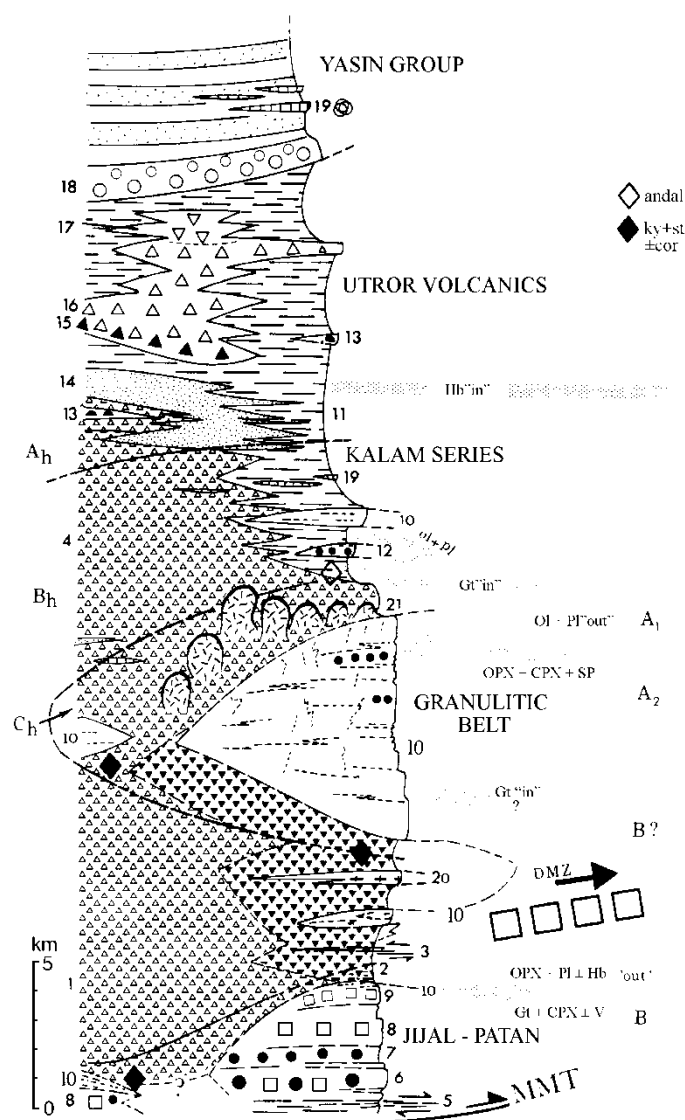
Die Karakoram-Kohistan Sutur

Die Karakoram-Kohistan-Sutur besteht aus verschuppten, vulkanischen und vulkanoklastischen Grünsteinen, roten Tonsteinen, Kalksteinen, Schiefen und Serpentiniten. Wie für seine östliche Fortsetzung, die Shyok-Sutur in Indien, wird die Karakoram-Kohistan-Sutur entweder als der Ort der Subduktion eines breiten Tethys-Ozeans oder als intrakontinentales Randbecken entlang des südlichen Randes von Asien gedeutet. N- und S-vergente Strukturen werden auf beiden Seiten, wie auch innerhalb der Sutur gefunden. Verschuppung findet man aufgrund späterer Störungen, welche die ursprüngliche Suturzone überprägt haben. Nicht deformierte subalkaline Plutonite eozänen Alters, die auf beiden Seiten der Karakoram-Kohistan-Sutur zu finden sind, werden herangezogen, um die Schliessung dieser Sutur auf die Oberkreide (zwischen 100 und 85 Ma) festzulegen. Der südliche Rand von Asien, einschliesslich des Kohistan Inselbogens, wurde ein für 20-40 Millionen Jahre aktiver, Anden-Typ Kontinentalrand, bis Indien vor 60-55 Ma mit Asien kollidierte. Jedoch dauerte der kalk-alkalische Magmatismus bis mindestens 35 Ma an, ein signifikanter Teil der Karakoram-Granitoide ist 25 Ma oder jünger. Das Alter und der Modus der Schliessung wird nach wie vor diskutiert, wahrscheinlich, weil bei einer Suturierung mehrere Ereignisse beteiligt sind.

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 nach Süden, d.h. von oben nach unten, unterschieden werden.



nach Bard (1983) *Geol. Bull. Univ. Peshawar* 16 105-184

Die obere Kruste

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

Der 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 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.

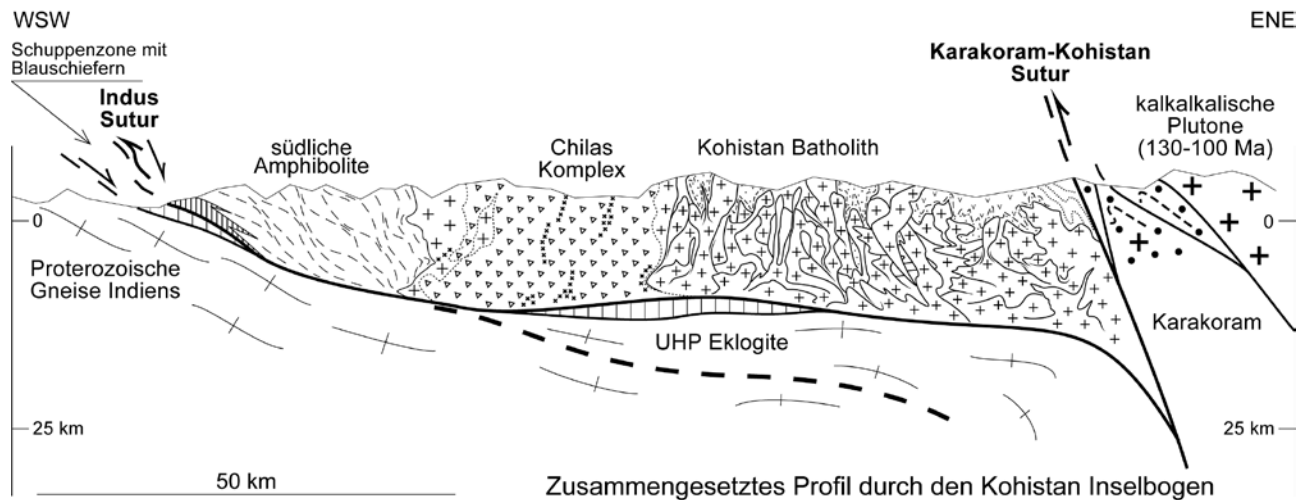
Das intra-Inselbogen Becken

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.

Die plutonische Kruste

Der 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 das Resultat einer Inselbogenverdickung und dem Schmelzen der unteren Inselbogenkruste interpretiert, welche der Ausbildung der Suture-Zone zu Asien folgt.

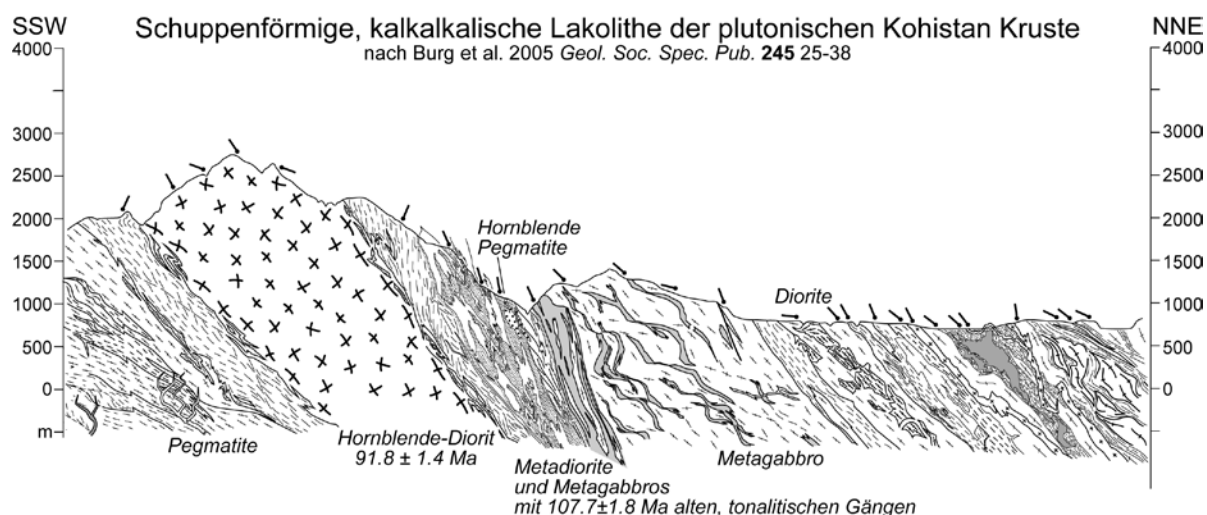


Die Gabbonorite

Die Achse des Inselbogens wird durch einen massiven Körper von lokal geschichteten Gabbonoriten 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. Die UMA repräsentieren Teile von intra-Inselbogen Manteldiapiren, die als Kanäle für poröses Fließen dienten, um die Gabbro-Norite zu speisen. 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 84 Ma übereinstimmt.

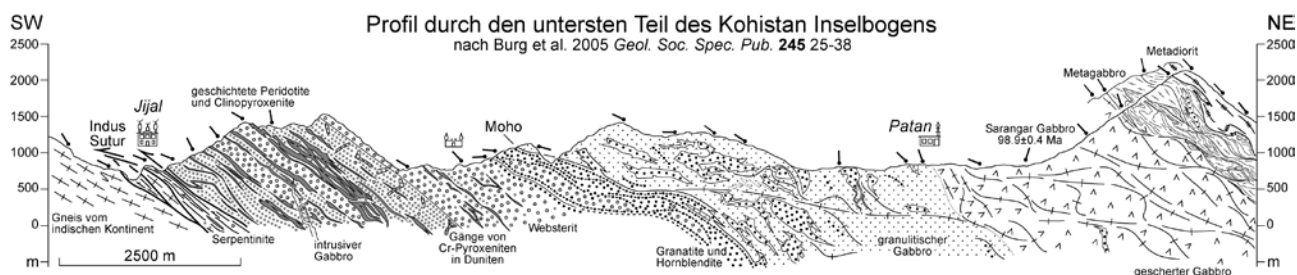
Meta-Gabbros bis Tonalite:

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-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, in dem Falle das 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, indem die pazifische Platte unter die philippinische ozeanische Platte subduziert wird.

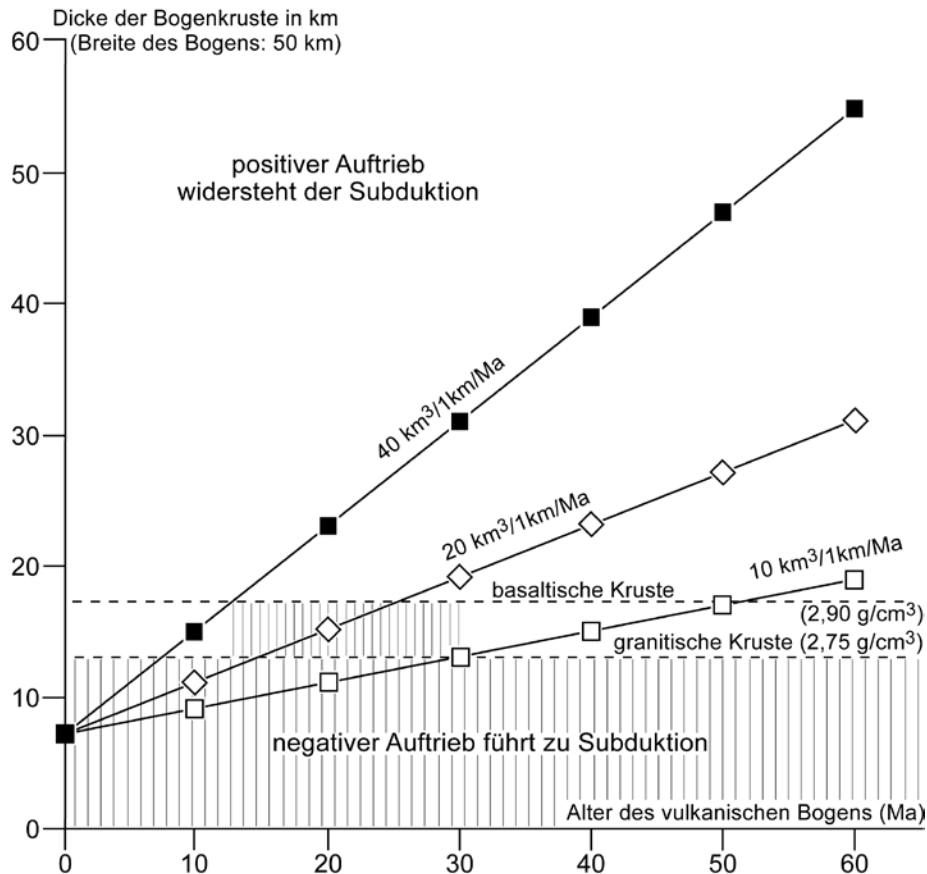
Die UMA Aufschlüsse sind Hinweise darauf, dass Mantel-Diapirismus einer der Schlüsselmechanismen bei der Öffnung eines 'back-arc' Beckens zwischen einem weiterhin vulkanisch aktiven und einem verbleibenden, nicht mehr aktiven Inselbogen ist, dessen Gesteine nun den Kohistan-Batholith darstellen.

Obduktion

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

Isostatische Bedingungen

Einfache isostatische Berechnungen zeigen, dass eine 100-km-dicke ozeanische Lithosphäre (7-km-Kruste) mit einem 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.



Beziehung zwischen dem Alter eines vulkanischen Bogens, Rate des Bogenmagmatismus (pro km Länge) und Auftrieb verändert nach Cloos (1993) *Geol. Soc. Am. Bull.* **105**, 715-737

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.

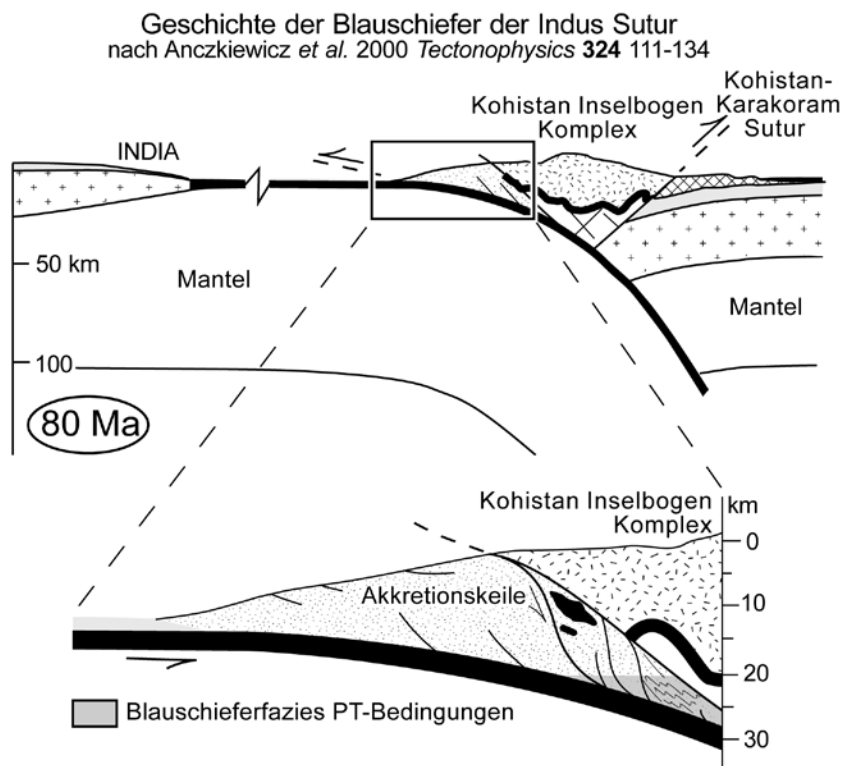
Daten der Metamorphose

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:

- Blauschieferfazies 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-Kollisionsergebnisse

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.

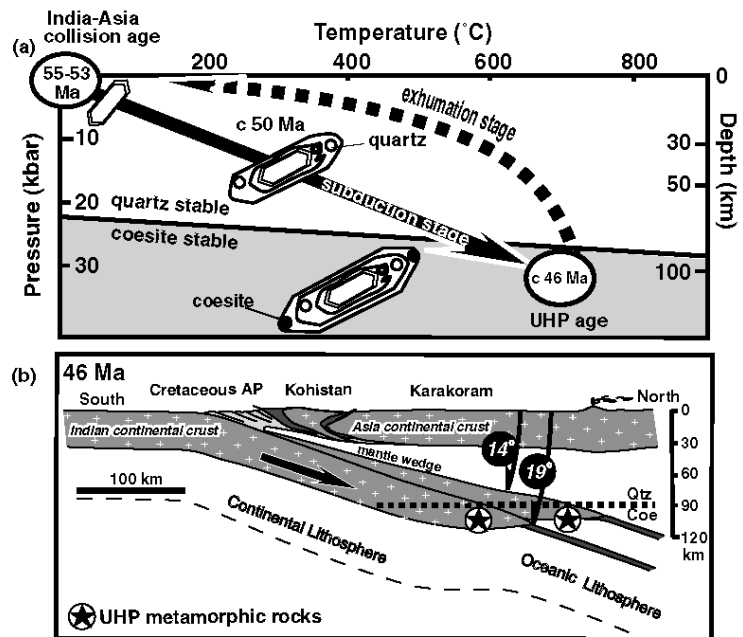


Kollisionsverbunde Ereignisse

Die Coesit-Eklogite von Kaghan sind ein Beweis dafür, dass die Vorderkante des Kontinentalrandes von Indien unter dem Kohistan Inselbogen mit einer Mindestdiefe von 100 km subduziert wurde. U-Pb, Rb-Sr und Sm-Nd Alter von Eklogiten deuten an, dass diese sich vor ungefähr 50 Ma bildeten. Dieses Alter stimmt mit den U-Pb Zirkon-Altern von Coesit-Eklogiten und von Gneisen des indischen Kontinentes im direkten Liegenden der Indus-Sutur unter dem Ladakh Inselbogen (Tso Morari Region, weiter nach Westen) überein. Der Nordrand Indiens war folglich nur ca. 10 Millionen Jahre nach der Ausgangskollision tief versenkt (ungefähr 100km).

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 $14-19^\circ$, 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.

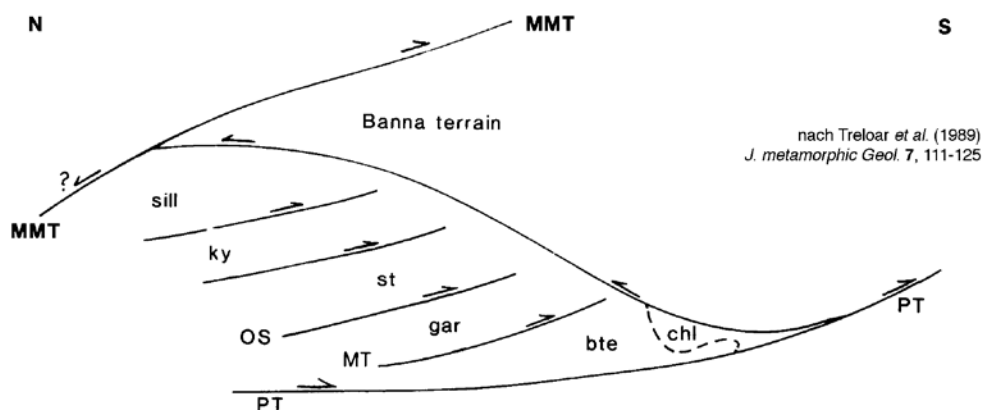
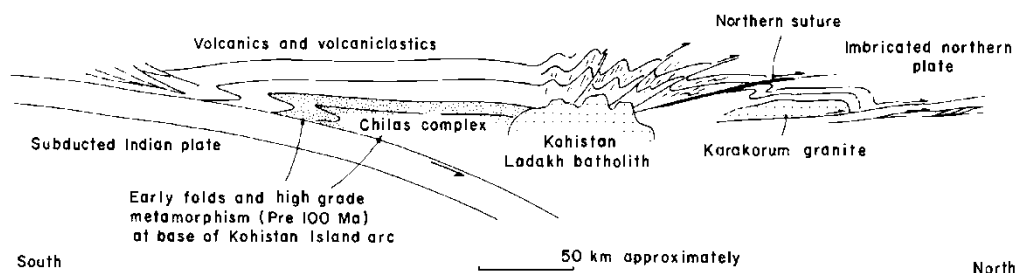


Fig. 9. A cross-section (X-X', Fig. 2) from the MMT to south of Mansehra, showing the stacking of the metamorphic zones by late thrusts, such as the Oghi Shear (OS) in the Hazara metamorphic region, the emplacement of the low-grade rocks at Banna above the highest grade rocks in the Hazara metamorphic 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 Mansehra Thrust (MT). PT = Panjal Thrust.

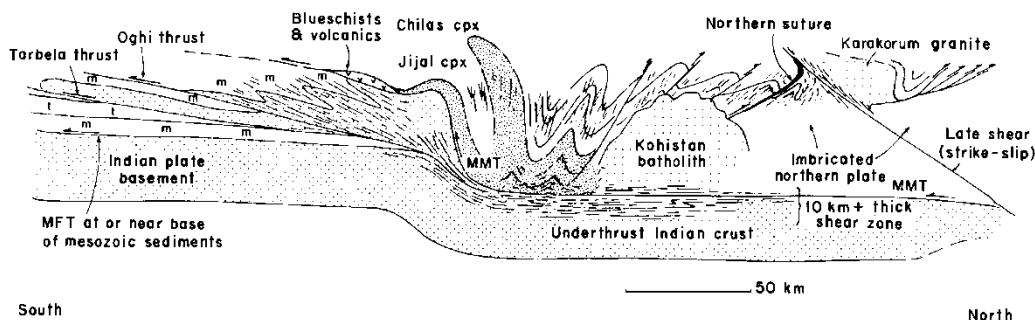
Kinematik und Strukturen

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 dem Kohistan Inselbogen-Komplex verursacht wurde.



Suggested cross-section through Kohistan in Late Cretaceous times, after the closure of the Northern Suture.



Section through Kohistan after the closure of the Southern Suture. m and t represent the Mesozoic and Tertiary sediments, respectively. The thrust structures on the Indian Plate are highly oversimplified.

nach Coward et al. (1986) *Geol. Soc. Spec. Pub.* 19, 203-219

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 durch passives nach hinten kippen verursacht sein, 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 Streckungslinieation in amphibolitfaziellen Gesteinen der indischen Platte sind Ausdruck der Süd-gerichteten Deformation, die bei der Obduktion entstand.

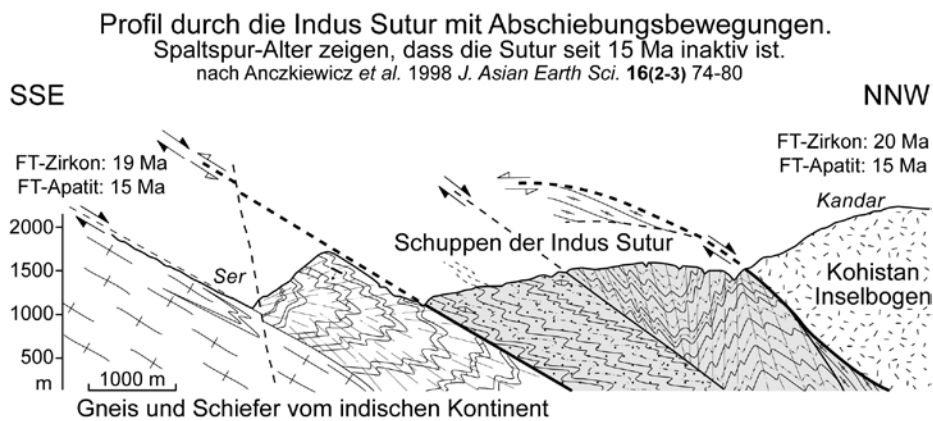
Ein Grossteil der Metamorphose der Gesteine der indischen Platte im Liegenden der Indus Sutur erfolgte entlang eines metamorphen Gradienten vom Barrow Typ, von Chlorit- zu Sillimanitgraden. Die Höchstmetamorphose wurde auf 45-50 Ma datiert.

Post-metamorphe nach Süden gerichtete Überschiebung von Gesteinen, die zum nördlichen Rand von Indien 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 Gesteinen niedrigen Grades der unterschoben Teile der Platte zugeschrieben.

Die Dargai Klippe ist ein Überbleibsel des Ophiolitkomplexes, der auf der indischen Platte während der duktilen und spröden Überschiebung überschoben wurde.

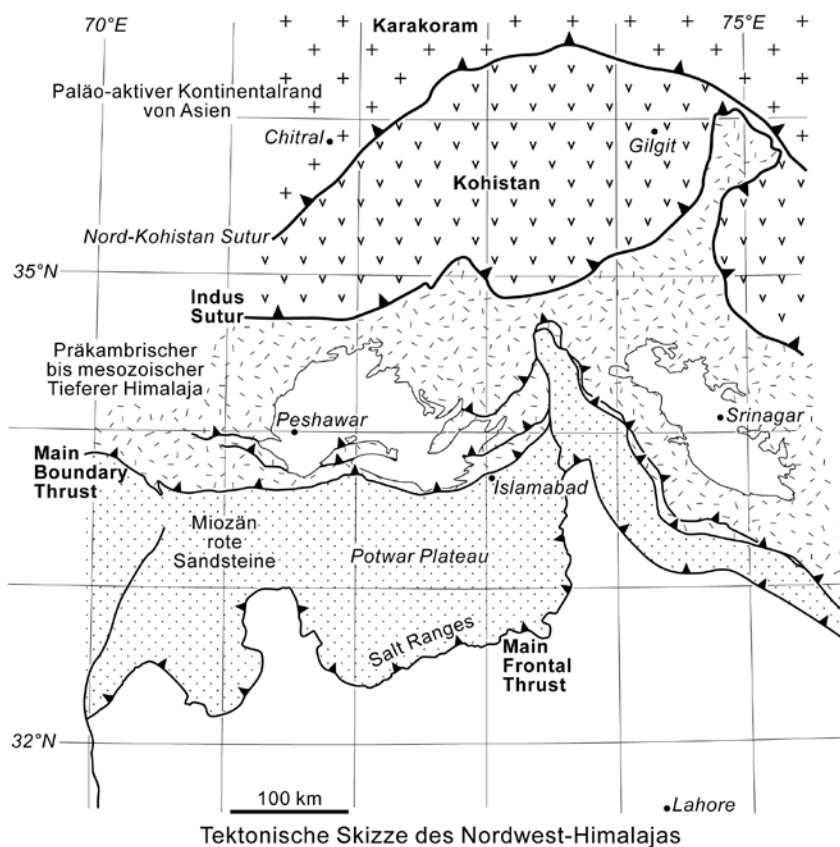
Extensionsstrukturen

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.



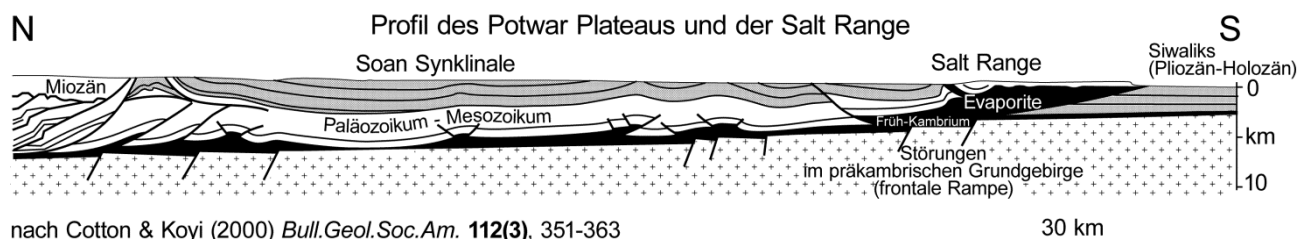
Rezente Kompressionsstrukturen

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.

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 austreichende 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 der Salt-Range und dem Potwar Plateau identifizierbar ist, fällt leicht, mit 1 bis 4° nach Norden ein, und wird nur von Abschiebungen geschnitten.



nach Cotton & Koyi (2000) *Bull. Geol. Soc. Am.* **112**(3), 351-363

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 Störungszone 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 Schieferen auf. Ein Hiatus des Oligozäns, die 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.

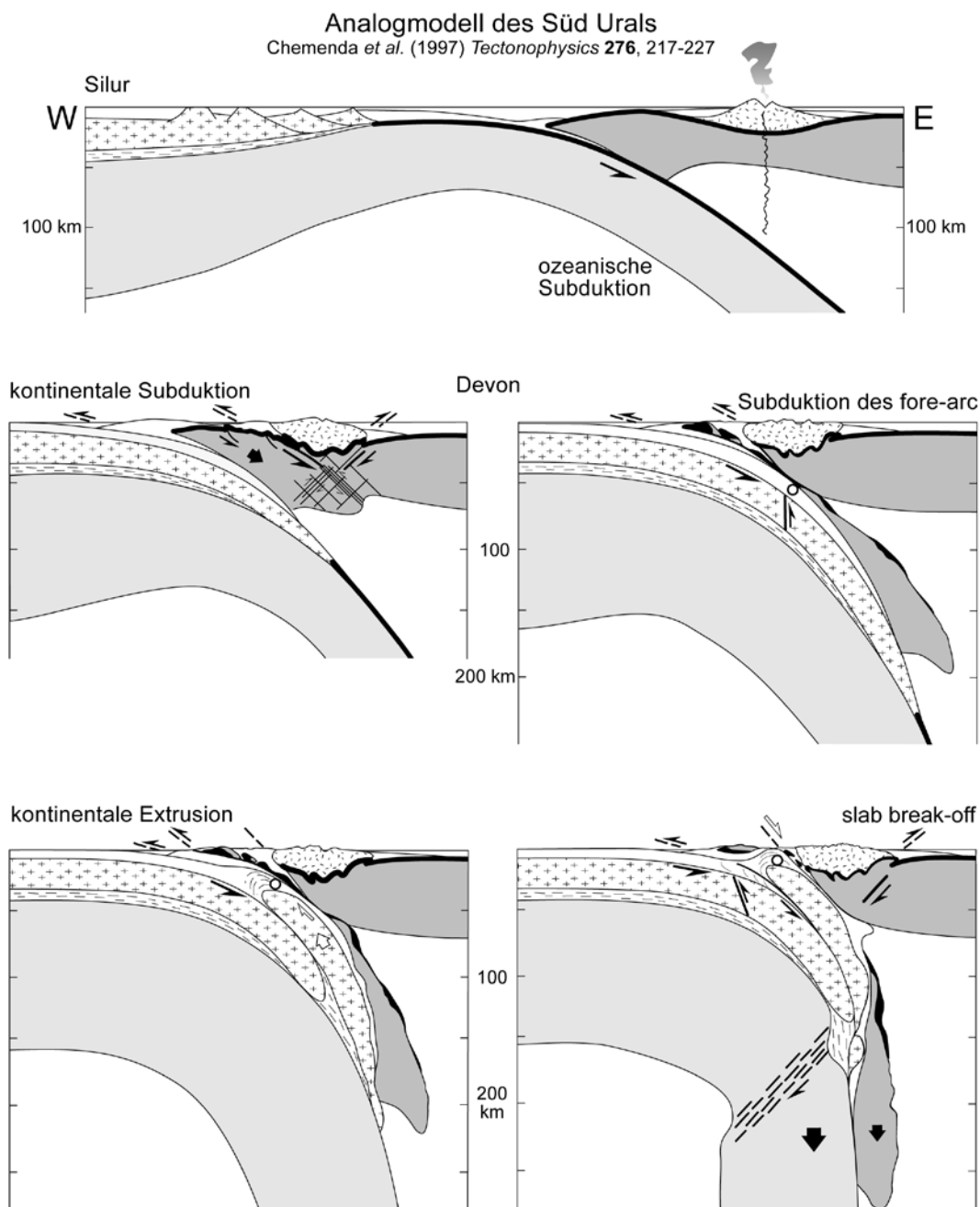
Dass Kompressionstektonik in dieser Region aktiv ist, zeigte das seismische Ereignis vom 08.10.2005, Mw = 7.6 im Falten- und Überschiebungsgürtel des Vorlands von Kohistan.

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 um 60-55 Ma an der Subduktion teilzunehmen, was fortlaufend die kompressiven Spannungen in der überfahrenden Platte vergrößert hat. Die kontinentale Subduktion verlief einigermaßen gleichmässig, 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. Da der *'fore-arc'* aus relativ kalter, ozeanischer Kruste besteht, trägt seine Subduktion, zusätzlich zu der kalten, ozeanischen Lithosphäre, stark dazu bei, niedrige Temperaturgradienten in der Subduktionszone zu erreichen und so Eklogite mit Coesit zu bilden.



3) - Die kontinentale Kruste wird subduziert, bis ihr Zerbrechen aufgrund erhöhter Auftriebskräfte eine Überschiebung im Krustenmasstab 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 dem Boden dieses Stückes. Das obere Abschiebungssystem würde der Reaktivierung der Indus Suture mit Abschiebungen entsprechen. Als Resultat der frühen Überschiebungen und überprägenden Abschiebungen liegen

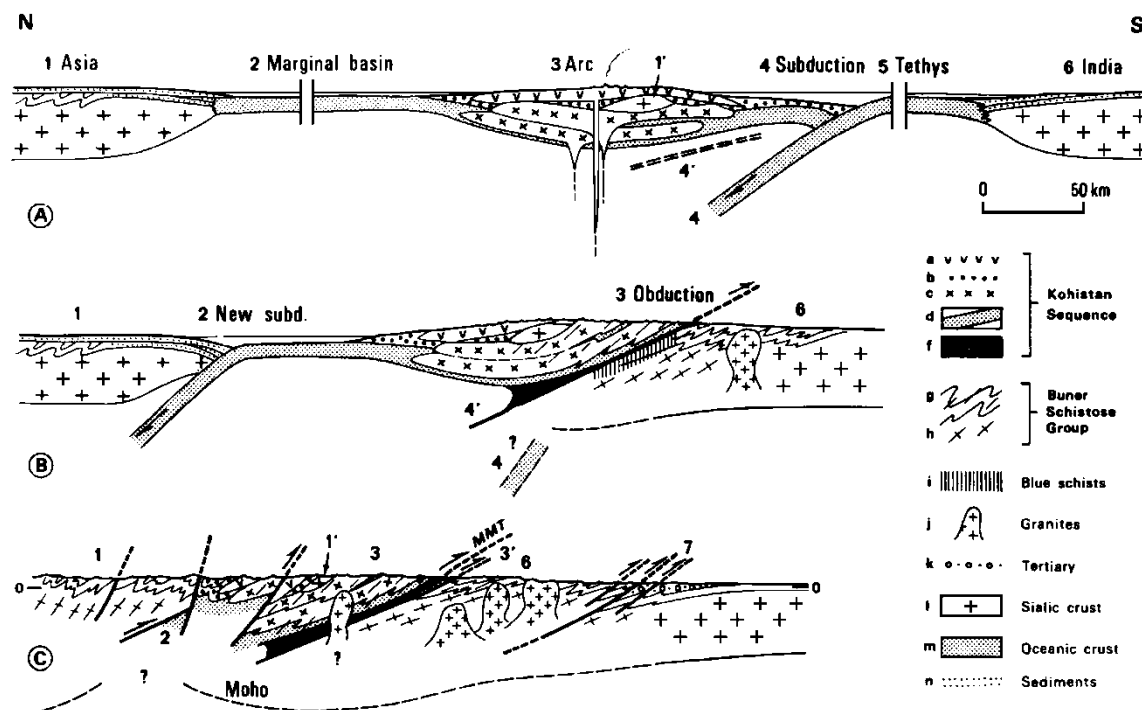
Blöcke von unterschiedlichem Ursprung und Metamorphosegrad nebeneinander. Das basale Überschiebungssystem könnte Überschiebungen weiter südlich beinhalten (z.B. die Panjal Überschiebung), die gleichzeitig zur Extension innerhalb der Suture erfolgten. Demzufolge dienen die Abschiebungen entlang der Indus 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 antiforme 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.

Die paläodynamische Evolution der Indus Suturezone

Die geodynamische Geschichte der Himalaja- und Tethys-Suture in Kohistan verzeichnet zwei Kollisionsereignisse:

- Dominanter, kalkalkalischer Magmatismus im Karakoram Batholith in der mittleren Kreide. Dieser markiert die nordwärts gerichtete Subduktion des nördlichen Tethys Ozeans unter Asien. Die folgende Akkretion des Kohistan-Komplexes an Asien entlang der Karakoram-Kohistan Suture wird traditionsgemäss zwischen 102 bis 75 Ma eingeklammert, ist aber schlecht definiert.
- Die Chilas-Abfolge von Manteldiapiren deutet auf die Trennung des Kohistan-Inselbogens hin, mit einem beginnenden Rifting, das im Inselbogen stattfand. Öffnung des 'back-arc' Beckens teilte einen vulkanischen vom restlichen Inselbogen, dessen Gesteine nun den Kohistan-Batholith darstellen.



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

- Zur gleichen Zeit fand starke Verfaltung und Zerschierung des unteren Kohistan-Inselbogens statt. Darauf folgte die Subduktion des Ozeanbodens südlich des Kohistan-Inselbogens, was zur Bildung der kalkalkalischen Batholithe führte, während Indien sich dem Inselbogen näherte, indem es den

dazwischenliegenden Ozean aufnahm. Während der Subduktionsphase wurden Blauschiefer gebildet.

- Die darauffolgende Schliessung des Tethys-Ozeans fand um etwa 65-55 Ma statt. Die subduzierende Indische Platte agierte dabei als Rampe entlang welcher der Kohistan-Inselbogen und der 'fore-arc' südwärts über Indien obduziert wurden.

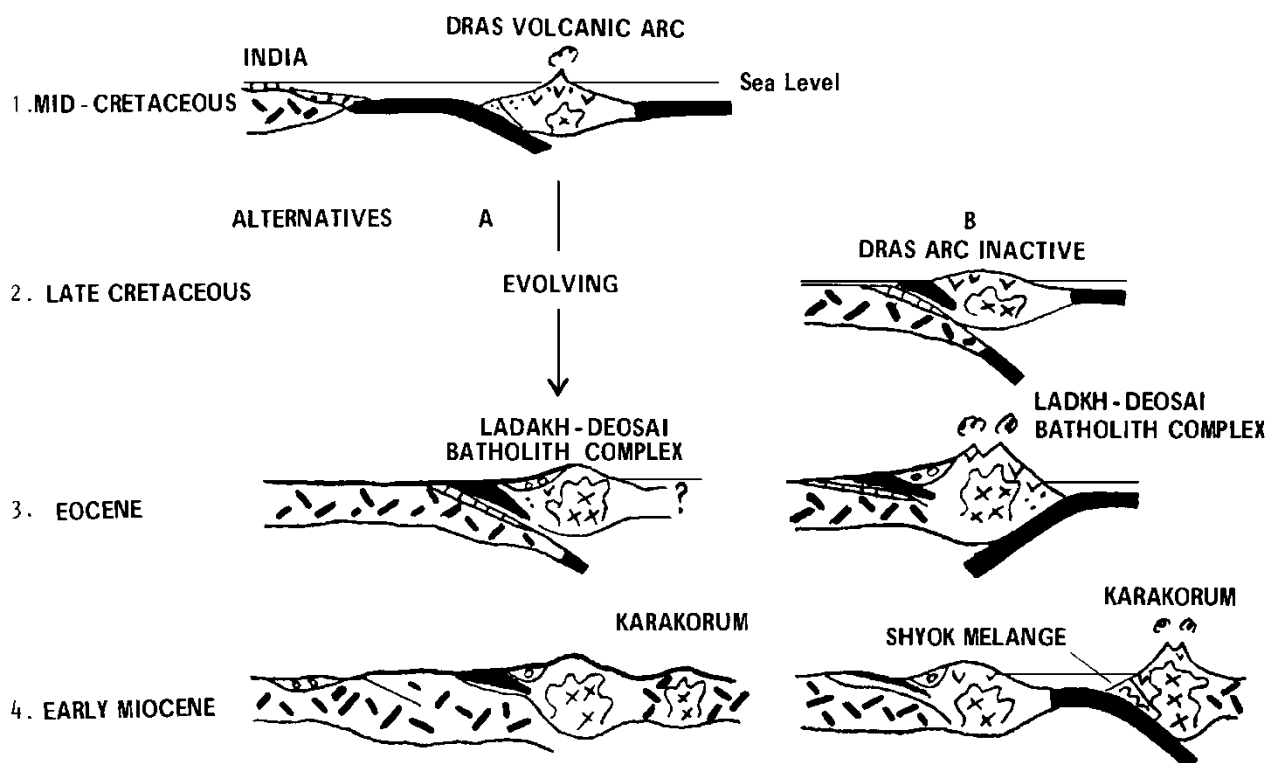


Fig. 2. Alternative views of the Cretaceous-Tertiary evolution of the collision zone: (A) with continuously evolving magmatic arc (based on Frank et al. [2]); (B) with two arcs of different ages and polarity (based on Andrews-Speed and Brookfield [3]).

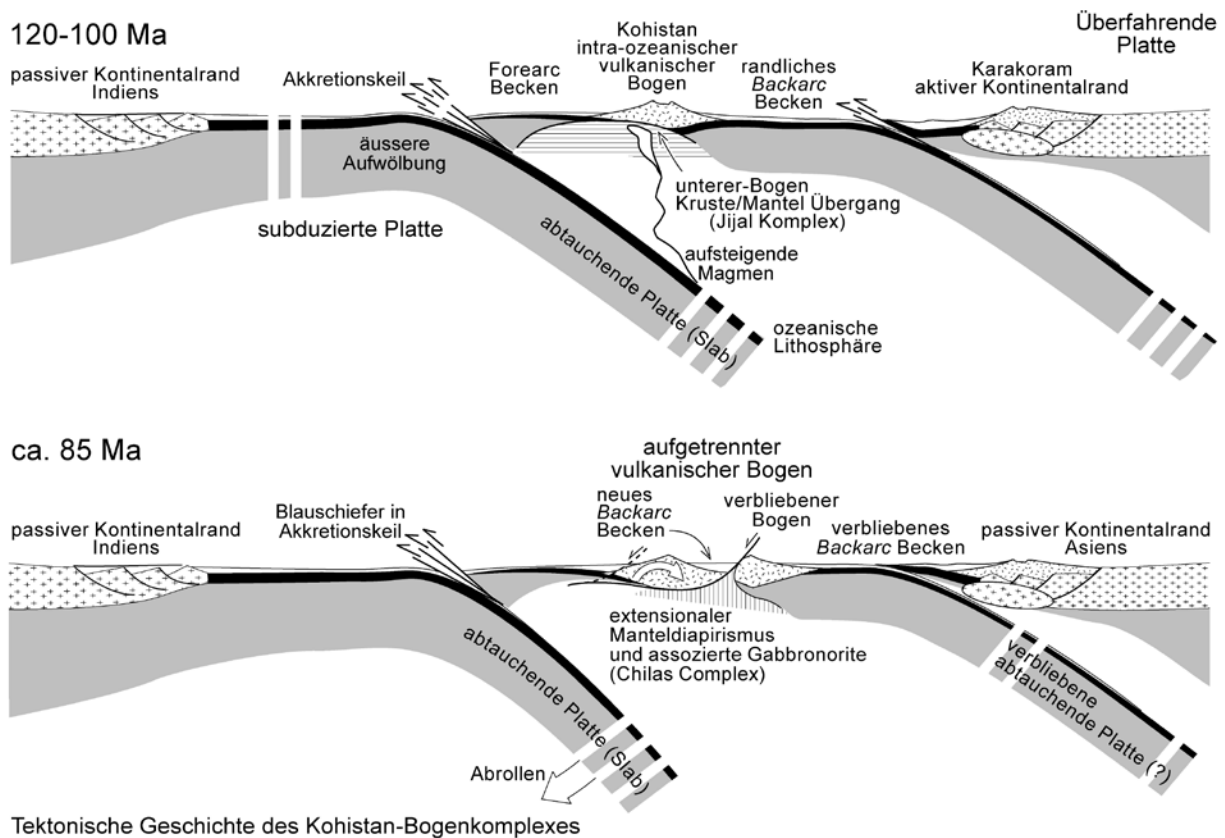
nach Brookfield & Reynolds (1981) *Earth Planet. Sci. Lett.* **55**, 157-162

- Die syn- und post-kollisionale Geschichte der Indus-Sutur wird als nach Süden gerichtete Überschiebung, gefolgt von Extension, interpretiert. Als der Indische Kontinentalrand in den Trog gefahren ist, wurde grössere Unterschiebung der kontinentalen Lithosphäre durch ihren Auftrieb verhindert. Überschiebungslinsen, synthetisch mit der frühen Subduktion, entwickelten sich in Richtung Kontinent während Sedimente und Linsen ozeanischer Kruste auf den Kontinentalrand geschoben wurden.

- Südgerichtete Überschiebungen wurden von der Reaktivierung der Indus Sutur durch spröduktile Abschiebungen gefolgt, was durch Auftrieb verursachte Bewegungen von kontinentalen Keilen beinhaltete, wie oben beschrieben ist.

- Die letzte Phase der Entwicklung der Indus-Sutur, dokumentiert durch Spaltspur Apatit Alter, zeigt keine differentielle Bewegung seit etwa 16 Ma.

Viele Geophantasie-Modelle sind zur Erklärung dieser Inselbogen-Kollision mit dem Kontinent vorgeschlagen worden.



Schlussfolgerung

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

Der kretazische Kohistan Inselbogen wuchs vermutlich auf der Nordseite der Neo-Tethys, während die Südseite nach Norden unter den Inselbogen subduziert wurde. Der Kohistan-Inselbogen wurde in der Oberkreide aufgetrennt und später während seiner Akkretion zwischen Indien und Asien eingeklemmt. Die magmatische Geschichte zeigt, dass vulkanische Inselbögen die Hauptgebiete für die Erzeugung neuer kontinentaler Kruste sind. Jedoch haben sie eine begrenzte Lebensspanne. Indien kollidierte mit dem Kohistan-Inselbogen im frühesten Eozän.

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**, 133-144.
- Bard, J.-P., Maluski, H., Matte, P. & Proust, F. 1980. The Kohistan sequence: crust and mantle of an obducted island arc. *Geol. Bull. Univ. Peshawar* **11**, 87-94.
- 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.

- Burg, J.-P., Chaudhry, M. N., Ghazanfar, M., Anczkiewicz, R. & Spencer, D. 1996. Structural evidence for back sliding of the Kohistan arc in the collisional system of northwest Pakistan. *Geology* **24**(8), 739-742.
- 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: *Marine geology and oceanography of Arabian Sea and Coastal Pakistan* (edited by Bilal, U. H. & Milliman, J. D.). Van Nostrand Reinhold Company, New York, 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: *Geodynamics of Pakistan* (edited by Farah, A. & De Jong, K. A.). Geological Survey of Pakistan, Quetta, 125-130.
- Tamaki, K. 1985. Two modes of back-arc spreading. *Geology* **13**(7), 475-478.
- Treloar, P. J., O'Brien, P. J., Parrish, M. & 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**, 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.