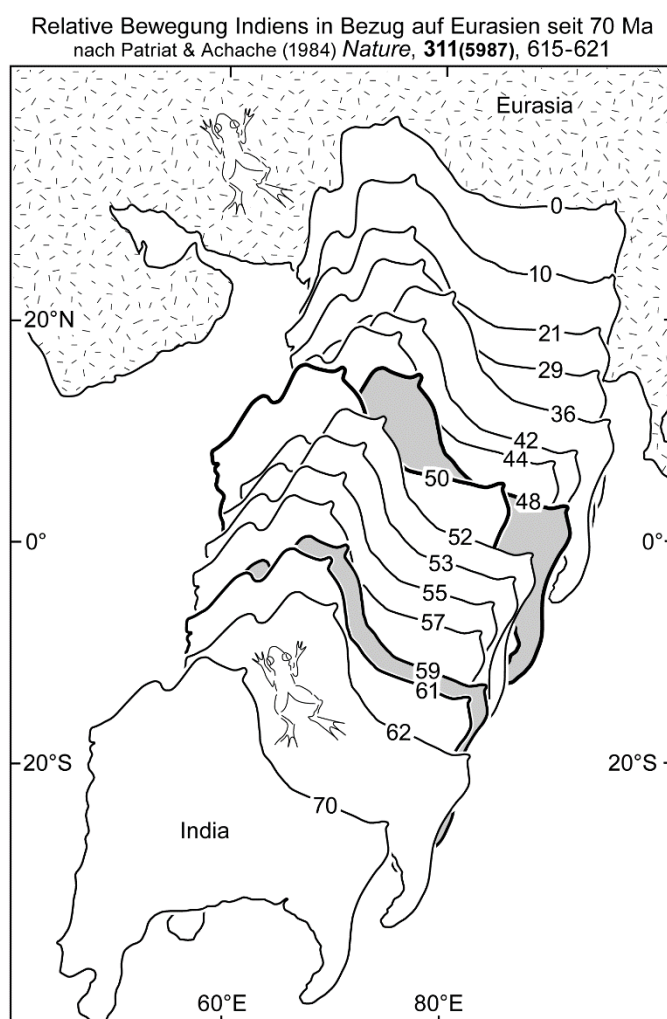


## Asien: Anhaltende Kollisionstektonik

Die Beispiele des Omans und des Himalajas zeigen, dass die Schliessung eines Ozeans und die anschliessende Kollision von zwei Kontinenten in einen komplizierten Prozess von Überschiebung und Deformation resultiert und die Konvergenz zwischen den Platten reduziert oder gestoppt wird, da der Auftrieb der kontinentalen Kruste eine Subduktion als Ganzes in den Mantel verhindert. Andere Platten reorganisieren sich und die Bewegung wird anderswo aufgenommen. Wie im Oman produzieren die aktiven Kräfte, welche für die Kollision verantwortlich sind, den Beginn einer ozeanischen Subduktionszone an einem neuen Kontinentalrand oder einem intraozeanischen vulkanischen Inselbögen. Die Tektonik von Asien zeigt, dass das Verhalten von Kontinenten nach der Kollision komplex ist. Das anhaltende Eindringen von Indien in Eurasien steuert das Wachstum und die Entwicklung des tibetischen Plateaus. Die Verformung wird aufgeteilt zwischen Verkürzung (die aufgenommen wird durch Falten und Überschiebungen) und seitliche Extrusion (aufgenommen entlang grosser Blattverschiebungen). Seitliche Heterogenität in der Festigkeit der Kruste bestimmt die Magnitude und Verteilung der Deformation in der anhaltenden Kontinent-Kontinent-Kollision. In der verdickten kontinentalen Kruste Tibets drücken Abschiebungen eine Ost-West-Extension und gleichzeitige eine Nord-Süd-Verkürzung aus.

### Plattentektonischer Hintergrund

Seit dem Beginn der Kollision zwischen 50 und 70 Ma, erfahren der Himalaja und seine angrenzenden Regionen infolge der anhaltenden Konvergenz zwischen den indischen und eurasischen Platten eine kontinuierliche Kompression.

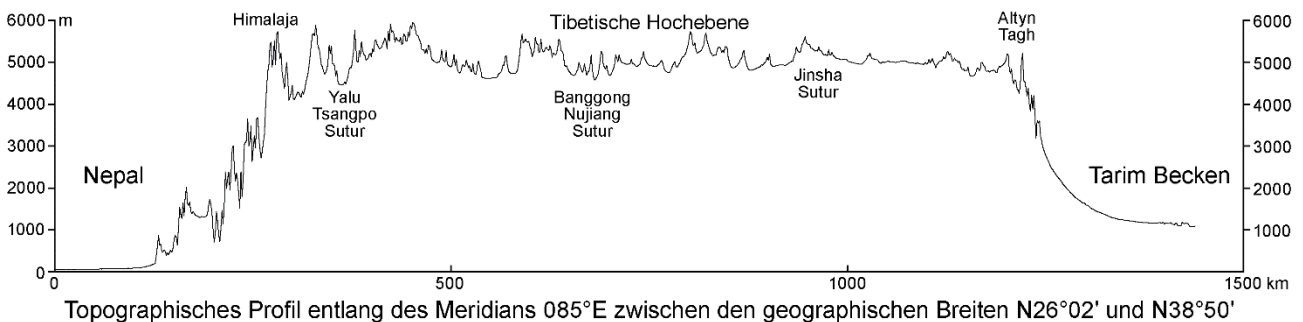


Die Zahlen am nördlichen Rand Indiens geben das Alter in Ma und die dazuhörige Position an.  
Die Frösche beziehen sich auf eine Kontinentalbrücke vor 65 Ma.  
Die geringste relative Translation fand zwischen 61 und 59 Ma statt,  
zu der Zeit also in der höchstwahrscheinlich die Kollision began.

Durch geophysikalische Methoden ist es möglich Erkenntnisse über die Bewegung der indischen Platte zu gewinnen, z.B. durch die magnetischen Anomalien im Indischen Ozean und durch die Paläomagnetik. Die Plattenbewegungen zeigen, dass seit dem Beginn der Kollision über 2000 km intrakontinentale Verkürzung zwischen dem stabilen Indien und stabilen Asien stattgefunden hat. Die Konvergenzrate wird heute ca. auf 5 cm/Jahr geschätzt. Seismische Studien und die Geschwindigkeit mit der das Vorlandbecken nach Süden wandert, zeigen, dass aktuell innerhalb des Himalajas nur 1 bis 2,5 cm/Jahr Verkürzung aufgenommen werden. Der Rest der gesamten Konvergenz muss im Norden, innerhalb und um die tibetische Hochebene, aufgenommen werden. Deswegen scheint diese gehobene Region eng mit der Entwicklung der nahe gelegenen Kollisionszone verbunden zu sein. So kann keine Diskussion über das Indien-Eurasien Kollisionssystem vollständig sein, ohne die Natur und Entwicklung der asiatischen Regionen, die um die Kollisionszone liegen, zu betrachten.

## Tibet

Tibet ist der bekannteste topographische Effekt kontinentaler Deformation. Es ist mit einer Fläche von nahezu  $3 \times 10^6$  km<sup>2</sup> und einer nahezu gleichmässigen Höhe von ca. 5000m das grösste und höchste Plateau der Erde.



Der interne Bereich der Hochebene ist flach und durch interne Entwässerung, geringen Niederschlag und eine niedrige Erosionsrate gekennzeichnet. Das Plateau wird von hohen Gebirgszügen eingerahmt:

- Die Nordgrenze liegt am Kunlun - Altyn Tagh Gebirge, wo die dünne Lithosphäre Tibets über die kontinentale Lithosphäre Asiens geschoben wird;
- Im Süden bildet der Himalaja die Grenze, an der Tibet über die kontinentale Lithosphäre Indiens geschoben wird.
- Im Osten bildet der Long Men Shan die Grenze, wo die kontinentale Lithosphäre Süd-Chinas unter Tibet geschoben wird.
- Die Westgrenze folgt dem Karakoram-Pamir Gebirge.

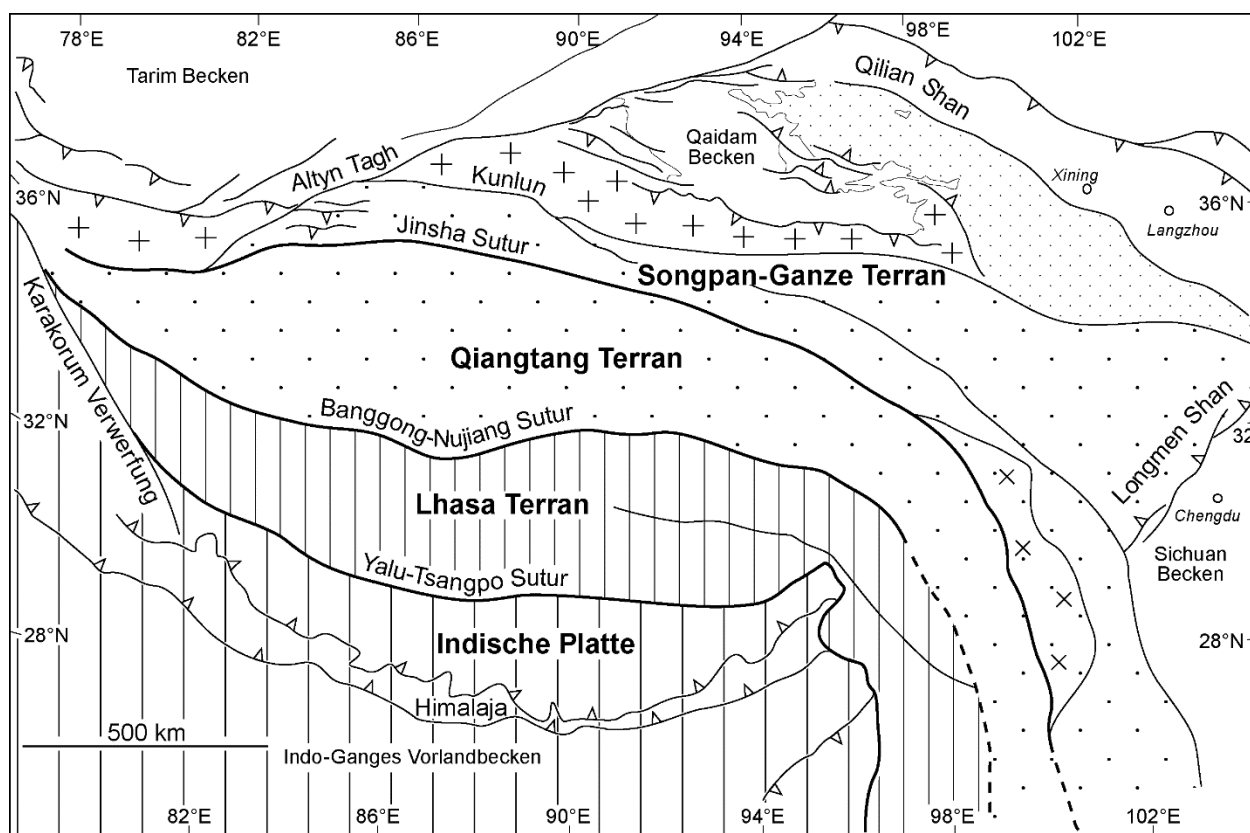
Diese angrenzenden Gebirge befinden sich dort, wo die Hochebene über die umliegenden Sedimentbecken mit geringer Meereshöhe geschoben wird. Diese Becken, die auf stabilen präkambrischen Kratonen liegen, sind:

- das Tarim Becken im Nordwesten
- das Qaidam Becken im Norden
- das Sichuan Becken im Osten.
- das Indo-Ganges Becken im Süden.

Nebengebirgszüge wie der Tien Shan und Altai erreichen Höhen über 4000m.

Frühere (18. Jahrhundert) Forscher erkannten schnell die gravitative Anziehungskraft von grossen Gebirgszügen und begannen diese Anziehungskraft zu messen. Das Ergebnis zeigte, dass sich unter den Gebirgszügen eine Kruste befindet, die dicker als die durchschnittliche Kruste ist. Ein Pendelausschlag kleiner als erwartet deutete an, dass Material leichter als der Mantel unter den Gebirgszügen die zusätzliche Masse von Gebirgsketten über der Oberfläche des umgebenden Tieflands ausgleichen muss. Es ist daher eine Herausforderung für Geologen zu erforschen, wie die

Verdickung der Kruste die Gebirgswurzel ausbildete. Aber bitte beachten Sie, dass, im Gegensatz dazu, die Berge in den Ozeanen Gebirge mit beinahe keiner Kruste auf dem Mantel sind. Hiermit soll noch einmal der grosse Effekt unterschiedlicher Dichte und Auftriebskraft zwischen ozeanischer und kontinentaler Lithosphäre betont werden.



Geologischer Rahmen Tibets

Debatten über die Art der Entstehung des tibetischen Plateaus betreffen im Wesentlichen drei grundlegende Fragen:

- (1) Wie werden die 1000-2000 km krustaler Verkürzung vom Zeitpunkt der Kollision bis heute aufgenommen?
- (2) Wann begann sich die Hochebene zu heben? und
- (3) Wie wurde ihre bemerkenswert konstante Höhe (ca. 5 km über Meeresspiegel) erreicht und aufrechterhalten?

Diese Fragen beziehen sich auf den Spannungszustand innerhalb der Hochebene, wie er durch die Wechselbeziehung zwischen Höhe und Deformationsregimen dokumentiert wird: Überschiebung, folglich horizontale Kompression, dominiert in den Flachländern um die Hochebene, während N-S orientierte Gräben, und folglich horizontale Extension den südlichen Teil der Hochebene dominieren. Blattverschiebungen, die horizontale Kompression und Extension miteinander kombinieren, dominieren die nördliche Hochebene.

### Vorstellungen über das Verkürzungs-/Verdickungsmodell

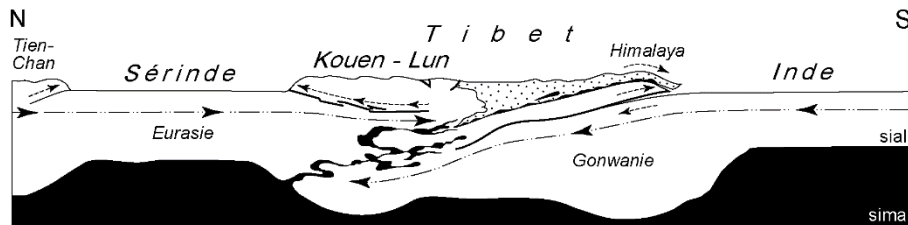
Die Indien-Eurasien Kollision ist die grösste Zone kontinentaler Deformation der Welt. Wie kommt dieses unstarre Verhalten einer kontinentalen Platte zum Ausdruck? Die Hypothesen zur Klärung der Verkürzung und der darauffolgenden krustalen Verdickung können in drei Hauptkategorien eingeteilt werden: Überschiebungstektonik, homogene Verkürzung und Verdickung und „Collage“.

#### Überschiebungstektonik

Die grosse Menge an Überschiebung, die aus der metamorphen- und Strukturgeologie des Himalajas abgeleitet werden konnte, führte zu verschiedenen aber konsistenten Modellen.

### ***Unterschiebung des „grösseren“ indischen Kontinents unter Asien***

Argand (1924) schlug vor, dass erhobene oder topographisch hoch gelegene Gebiete durch die mehr als 1000 km weitreichende horizontale Unterschiebung des indischen Kontinentes unter das moderne Himalaja Gebirgssystem und unter das gesamte Tibet Plateau bis zur nördlichsten Grenze im Kunlun-Altyn Tagh Faltengürtel entstanden sind. Die Oberfläche des indischen Blockes vor der Kollision, musste viel grösser als die heutige indische Halbinsel gewesen sein, daher wird der indische Block auch „Gross-Indien“ genannt.



Profil durch Tibet

nach Argand 1924 C. R. 13<sup>ème</sup> Cong. Géol. Int., Bruxelles, Fascicule 1, 171-372

Holmes (1965) erklärte, dass das durchschnittlich 5000 m empor gehobene Tibet Plateau durch isostatische Auftriebskräfte entstand, als Antwort auf die Verdopplung der unverformten kontinentalen Krustenmächtigkeit der Umgebungsgebiete. Deshalb sollte die Kruste unter Tibet eigentlich tektonisch auf 60-75 km verdickt sein, mit der Annahme, dass der Dichteunterschied zwischen der Kruste und dem Mantel 400-500 kg/m<sup>3</sup> ausmacht. Demzufolge akzeptierte Holmes, dass die Indische Platte unter der tibetischen Hochebene liegt.

Doppelstock-Krustenmodelle, wie sie durch die Interpretation von Argand angeregt wurden, erfordern mehr oder weniger intrakrustale Verformung und Verkürzung in den vorderen Teilen der indischen und asiatischen Kontinentalblöcke.

### ***Verteilte Überschiebung***

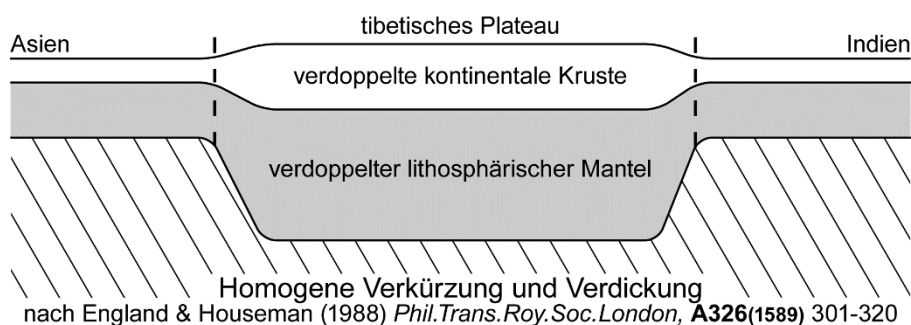
Intrakrustale Verkürzung und Krustenverdickung entstehen aus divergenten Überschiebungen in den konvergenten Kontinentalrändern Indiens und Asiens. Alles ist symmetrisch um eine Suture in der Mitte gefaltet.

### ***Krustale Injektion***

Eine Anpassung der Interpretation von Argand involviert eine Unterschiebung (Injektion) der relativ starken indischen Kruste nach Norden in die sehr schwache Kruste Asiens. Stellt man sich die niedrigviskose migmatitische Kruste, wie im „Kanalfloss“ Modell des Himalajas vor, würde das die erforderliche mechanische Entkoppelung zwischen der oberen Kruste von Tibet und der unterschobenen indischen Lithosphäre anbieten.

### ***Homogene Verkürzung und Verdickung***

Im Gegensatz dazu wurde das tibetische Plateau der homogenen, zweifachen Verdickung der heissen und weichen kontinentalen Lithosphäre Tibets zugeschrieben. Die kontinentale Lithosphäre Asiens wird dabei als viskoses Kontinuum mit nicht-newtonischer Rheologie betrachtet. Die tibetischen Terrane werden als Teil eines heissen, duktilen Asiens vor dem vorrückenden, kalten und steifen indischen Subkontinent wie ein Akkordeon verkürzt und verdickt.



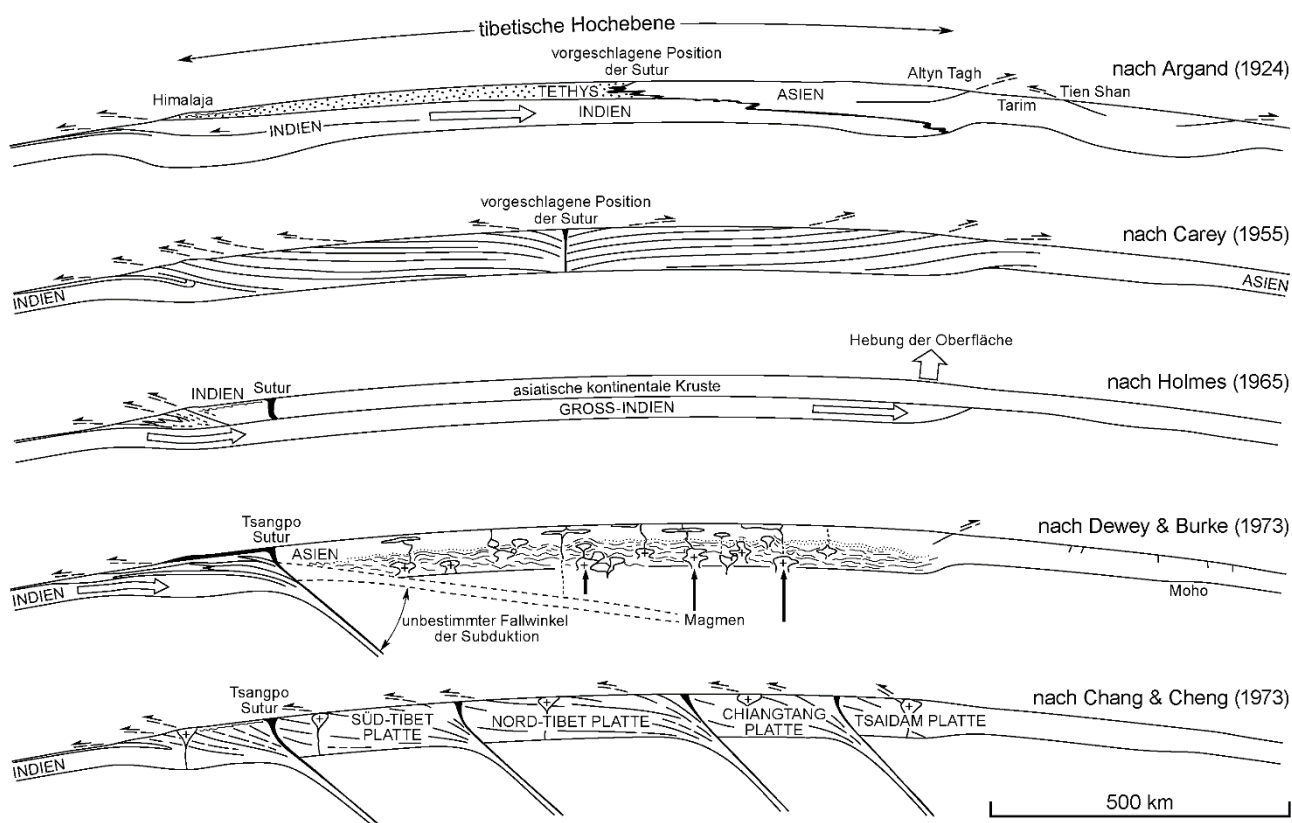
Die N-S orientierte Verkleinerung der Anfangsfläche Tibets um 50% (d.h. um ca. 1000 km), wird mit ebenso viel duktiler Verformung in tieferen Niveaus begleitet. Folglich ist es logisch, dass die Falten in Tibet überwiegend Ost-West orientiert sind. In flacheren Niveaus wird die Verkürzung hauptsächlich durch spröde Bruchbildung postuliert.

Symmetrische oder asymmetrische Keile von Krustenstapeln sind verschiedene Möglichkeiten gesamthafter homogener Verdickung als Reaktion auf die Verkürzung der asiatischen Kruste.

### Collage

Das tibetische Plateau zeigt mindestens drei West-Ost verlaufende Hauptsuturzonen auf. Von Norden nach Süden:

- Die Yalu-Tsangpo Suturzone, die die indische Platte im Süden vom Lhasa Block im Norden trennt.
- Die spät jurassische bis früh-kretazische Banggong-Nujiang Suturzone, die den Lhasa Block im Süden vom Qiangtang Block im Norden trennt. Diese Suturzone erstreckt sich ungefähr 300 km nördlich der Yalu-Tsangpo Suturzone.
- Die triassische Jinsha Suturzone trennt den Qiangtang Block vom Songpan-Ganze Terran im Norden.



Krustenmodelle der tibetischen Hochebene

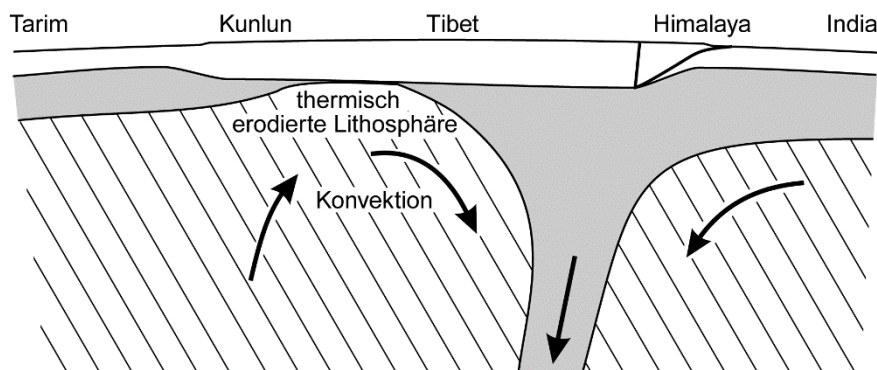
Synthese nach Powell & Conaghan (1975) *Geology*, **3(12)**, 727-731

Diese drei Suturen stellen die Reste des Neo-, Meso- beziehungsweise des Paläo-Tethys-Ozeans dar. Dementsprechend wurde Tibet als das Resultat einer sukzessiven Kollision von mehreren kontinentalen Blöcken, die wahrscheinlich durch das Auseinanderbrechen von Gondwana entstanden sind, mit Asien interpretiert. Die Akkretion von Kontinental-Blöcken und/oder Inselbogen-artigen Platten trug folglich zum südwardigen Wachstum des asiatischen Kontinentalrandes bei. Noch zwei weitere paläozoische Suturen existieren weiter im Norden Asiens. Mehrere Ereignisse werden mit den fünf "tektonischen Zyklen" korreliert, von denen angenommen wird, die Phanerozoischen Gebirgsbildungen zu dominieren: kaledonische (frühes Paläozoikum), variszisch-herzynische (spätes Paläozoikum), indo-sinische (frühes Mesozoikum), yenshanische (spätes Mesozoikum) und himalajaische (Känozoikum) Gebirgsbildung.

Krustenverdickung und Plutonismus werden dargestellt, als hätte beides in den untergeschobenen südlichen Platten wiederholt stattgefunden. Das Modell weist besonders auf das hohe Alter der durchgehenden Deformation und Metamorphose vieler Gesteine des tibetischen Plateaus hin. Es bedeutet aber auch, dass sich das Plateau während des gesamten Phanerozoikums durch die sukzessive Kollision und Akkretion entlang des südlichen Seitenrandes Asiens ausbildete. Es erklärt andererseits nicht, warum dann die Anhebung des Plateaus nicht vor dem späten Tertiär stattfand.

### Konvektive Entfernung des lithosphärischen Mantels

Die Hebung Tibets als Ganzes zu seiner heutigen Höhenlage wurde ausgelöst, als seine Kruste aufgrund der Ablösung von einem Teil seines verdickten lithosphärischen Mantels auftriebsbedingt zurückfederte. Dieser gesamte Prozess wiederum löste Extension und Vulkanismus aus.



Modell der tibetischen Hochebene  
durch konvektive Entfernung des lithosphärischen Mantels  
nach Molnar 1988 *Nature* 335(6186) 131-137

Der Magmatismus, der nach der Kollision mit Indien stattfand, war aber weder weitverbreitet und volumenreich, noch synchron. Das Magma stammt aus partiellen Schmelzen des subkontinentalen lithosphärischen Mantels und zu einem geringen Anteil auch aus der Kruste. Es stammt nicht aus der Asthenosphäre oder aus Mantelplumes. Die Lokalisierung des känozoischen, kalkalkalinen Magmatismus entlang von drei Gürteln unterschiedlichen Alters folgt den drei Hauptsuturen. Diese passen mehr zu Schmelzquellen, die mit der Subduktion in Verbindung stehen als zu konvektiver Ausdünnung des lithosphärischen Mantels.

### Unstimmigkeiten und Schwächen der Modelle

Da sich die Yalu-Tsangpo Suture am südlichen Ende des Plateaus befindet, können die symmetrisch verteilten Überschiebungsmodelle an beiden Seiten der Kollisionszone abgelehnt werden. Die wichtigsten Widersprüche zwischen den Modellen und den geologischen und geophysikalischen Befunden können folgendermassen zusammengefasst werden:

1) In Argands Modell reicht der untergeschobene indische Kontinent unter Tibet bis zum Altyn Tagh - Kunlun- Gebirge im Norden, die im tektonischen Stil des Himalajas dargestellt werden. Seismische Weitwinkel-Daten stehen im Widerspruch zu einem Modell in dem angenommen wird,

dass sich ein mehrere hundert Kilometer grosses Stück kontinentaler Lithosphäre unter Tibet befindet.

2) Geologische Profile durch das ganze tibetische Plateau zeigen an der Oberfläche nirgendwo Anzeichen von 50% homogener Krustenverkürzung, wie dies bei einer homogenen Verdoppelung der Krustendicke Asiens vorausgesetzt wird.

3) Unterschiebungen nach der Kollision von mehreren Hundert Kilometern durchgehender indischer Kruste unter Tibet heisst, dass die Anhebung des Plateaus von Süden nach Norden im Tertiär fortschritt. Die Anhebung wurde nicht direkt durch die Kontinent-Kontinent-Kollision verursacht, welche im frühen Tertiär stattfand. Sie fand stattdessen mindestens 30 Millionen Jahre später statt, im Miozän.

4) Unterschiebung von Indien unter Asien erfordert **“Mantel-Abstreifung”** (*mantle peeling*, Ablösung), das Abschälen des Mantels unter der asiatischen kontinentalen Kruste. Dies führt zu zwei ernsthaften Fragen:

- Was passiert mit der Lithosphäre unterhalb der Kollisionszone (Ablösung oder thermische Erosion)?

- Warum verhindern die Auftriebskräfte der Kruste nicht grosse Unterschiebungen?

5) Injektion der kalten indischen Kruste in die heisse asiatische Kruste würde die Wärmezufuhr der Asthenosphäre stoppen und Magmatismus im südlichen Lhasa-Terran beenden, in Widerspruch zu geologischen Informationen. In jedem Fall macht es die grosse Festigkeit der indischen kontinentalen Lithosphäre schwierig, die Kruste von seiner Lithosphäre zu entkoppeln, wie es in Injektion Modellen erforderlich ist. S-Wellen-Geschwindigkeiten scheinen mit einer kalten Lithosphäre, wie der von Indien unter Tibet, nicht in Einklang zu stehen

6) Collage während des gesamten Phanerozoikums erklärt andererseits nicht, warum dann die Anhebung des Plateaus nicht vor dem späten Tertiär stattfand.

Das Hauptproblem dieser Modelle betrifft den Unterschiebungsmechanismus von einem leichten Kontinent unter den anderen. Die Unterschiebung des indischen Kontinents könnte weniger zurückhaltend sein, wenn die dichte asiatische Lithosphäre durch leichteres Material ersetzt wird. Die Details eines solchen Prozesses sind unklar. Dem Problem kann ausgewichen werden indem man den Mantelteil der asiatischen kontinentalen Lithosphäre ignoriert, aber das wirft die Frage auf, was passiert mit diesem Teil der Lithosphäre, oder ob er wirklich existiert.

## Hebung der Erdoberfläche

Die Hebung der Oberfläche ist gleichzusetzen mit der Hebung der Gesteine, wobei die Gesteine exhumiert und erodiert werden {Oberflächenhebung = Gesteinshebung – Exhumation (Erosion)}.

Die Änderungen in der Höhe des tibetischen Plateaus werden durch die Kollision zwischen der indischen und asiatischen Platte und deren anhaltenden Konvergenz seit ca. 50 Ma kontrolliert. Die Hebungsgeschichte seit der Kollision ist eine Hauptfrage, die mit der Erforschung der krustalen Verdickung in Verbindung steht. Ausserdem wird das Timing der Anhebung der tibetischen Hochebene wegen der vorgeschlagenen Beziehung, zwischen hoher Topographie und (1) Änderungen im regionalen und globalen Klima, (2) der südasiatischen Paläoökologie und (3) der Ozeanchemie, viel diskutiert.

### Hebung und Schaffung des Monsun Wettersystems

Das gehobene tibetische Plateau ist während des Sommers eine ausgedehnte Heizquelle für die untere Atmosphäre. Dies verursacht ein beträchtliches Niedrigdrucksystem über dem zentralen Asien wodurch warme und feuchte Luft vom Indischen Ozean in Richtung der Hochebene strömt. Der Luftstrom wird aufwärts gezwungen, wenn dieser auf die physikalische Sperre des Himalajas trifft. Dies verursacht einen intensiven Monsunniederschlag an den südlichen Hängen des Plateaus. Datierungen von Lössablagerungen in China zeugen von der Stärke der Wintermonsun-Winde bis auf 22 Ma zurück.

### Hebung und Umlagerung von voluminösen Sedimentmassen

Die Hebung eines Gebietes, das so gross ist wie Tibet, verursachte einen regionalen Klimawechsel, der wiederum die Erosion des Gebirges verstärkt hat. Die grossen Flüsse werden durch den umfangreichen Abfluss infolge der Monsune gespeist. Dies sind:

- der Ganges, der Indus, der Sutlej und der Brahmaputra, die südwärts aus dem tibetischen Plateau heraus durch den Himalaja fliessen;
- der Salween, der aus der östlichen Grenze von Tibet stammt und ins südöstliche Asien fliesst;
- der Mekong, der Yangtze und der Huanghe, die ostwärts in das Ost- und Südchinesische Meer fliessen.

Die grossen Flüsse sind antezedent, d.h. Tibet wurde darunter gehoben. Diese Flüsse fliessen nun durch tiefe Schluchten. Ein Effekt der Hebung war die verstärkte Erosion und die Schüttung riesiger Sedimentmassen, wovon viel in den grossen marinen Schuttfächern in der Bucht von Bengal und im Arabischen Meer an den Mündungen des Ganges, beziehungsweise des Indus akkumuliert wurde. Die Sedimentationsraten, die aus seismischen Profilen im Südchinesischen Meer abgeleitet wurden, zeigen an, dass der Monsun im frühen-mittleren Miozän (11-16 Ma) sehr aktiv war. Analysen von stabilen Isotopen, ebenfalls aus dem Südchinesischen Meer, zeigen Änderungen in terrestrischen Ökosystemen, die mit der Entwicklung des ostasiatischen Monsuns im mittleren Miozän zusammenhängen können. Grosse Mengen an organischem Kohlenstoff werden in den Sedimenten begraben. Infolgedessen kann sich der Kohlenstoff aus dem Reservoir absondern und in den Kreislauf zwischen Atmosphäre und Oberfläche gelangen. Dies wiederum führt zu einem Abkühlungstrend im globalen Klima.

### Hebung und Ozeanchemie

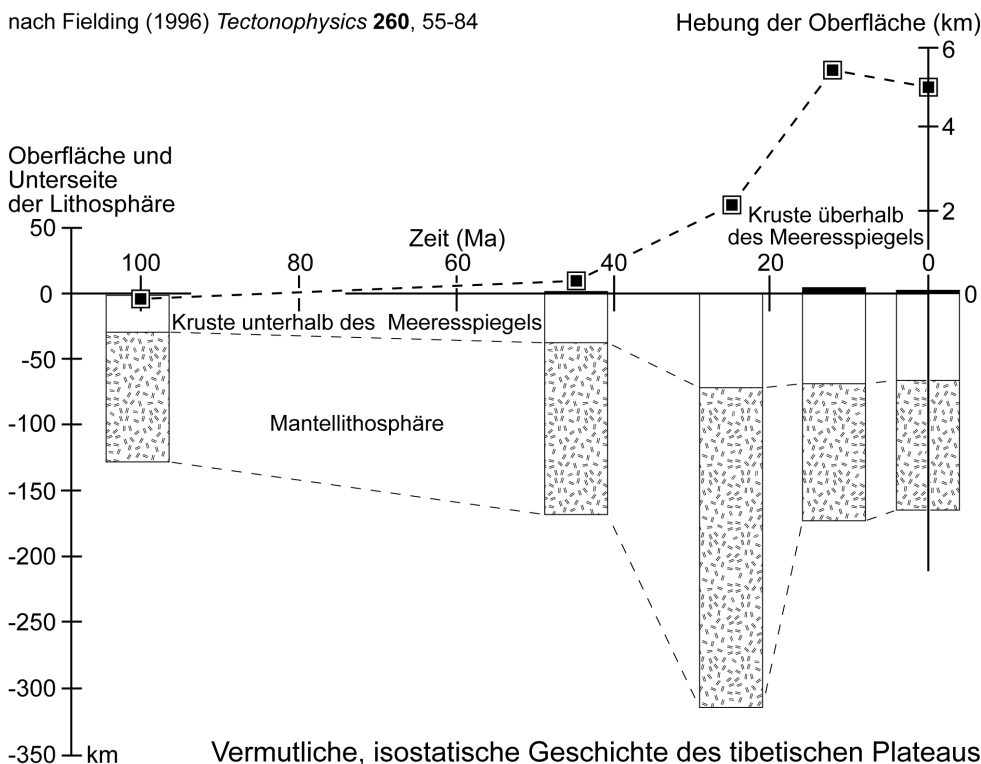
Die Kombination aus mechanischer Erosion und chemischer Lösung durch das gewaltige Flusssystem verursacht erhebliche chemische Durchflussmengen vom Kontinent in den Ozean. Flüsse, die aus Tibet kommen, steuern 25% des gesamten gelösten Materials bei, das weltweit von Flüssen in die Ozeane transportiert wird. Folglich sind diese Flüsse verantwortlich für einen extrem hohen Durchfluss an Silikatverwitterungsprodukten, die eine Hauptsenke für atmosphärisches CO<sub>2</sub> sind. Aus diesem Grund verbinden einige Autoren die Hebung Tibets und den erhöhten Durchfluss von Silikatverwitterungsprodukten mit der globalen Abkühlung während des gesamten Känozoikums. Des Weiteren besteht eine anhaltende Debatte über die Kopplung zwischen der Oberflächenhebung Tibets und globalen Veränderungen. Einige Modelle suggerieren, dass die durchschnittliche Temperatur der Erde um 1-6°C wärmer wäre, wenn es kein so grosses und gehobenes Plateau in Zentralasien geben würde. Die Zusammensetzung der Isotope in Muscheln aus Sedimenten, die im Himalaja Vorlandbecken abgelagert wurden, dokumentiert einen starken indischen Monsun vor 10.7 Ma mit einem Klima, das nach 7.5 Ma deutlich trockener wurde.

### Alter der Hebung von Tibet

Scheinbar gab es zwei Hauptpulse in der Hebung Tibets:

- einen zwischen 21 und 17 Ma (Bildung des Himalaja Reliefs).
- einen weiteren zwischen 11 und 7 Ma (Tibet selbst?), wobei angenommen wird, dass die spät Miozänen N-S orientierten Gräben durch den Kollaps eines verdickten, hohen Plateaus entstanden sind, und ihr Alter folglich einen Zeitrahmen der Anhebung angibt. Vor ca. 8 Ma verursachte, oder zumindest verstärkte, die Hebung das saisonale Sturmsystem, welches als asiatischer Monsun bekannt ist und heutzutage das Leben in Südostasien prägt.





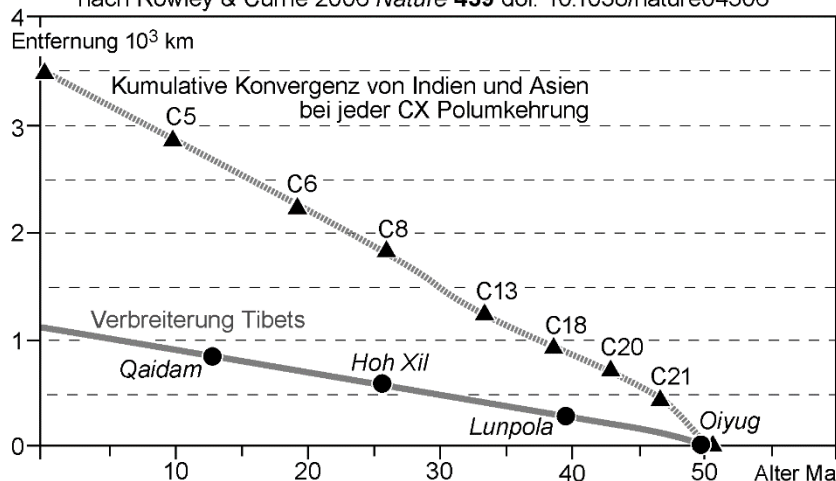
Eingeschränkte Beweise lassen vermuten, dass die Hauptepisode der Hebung post-Miozän ist. Die vorhandenen Daten, erhalten von fossiler Flora und Messungen stabiler Isotopen (einschliesslich Wasserstoff), scheinen jedoch die Details der Geschichte der Hebung nicht weiter auflösen zu können.

### Diachrone Hebung

Die Zusammensetzung der Sauerstoffisotope in kalkhaltigen Mineralen aus tibetischen Seesedimenten wurde benutzt, um den Höhenunterschied zwischen der Herkunft des Wassers aus dem Ozean und der Höhenlage, in der Regen und Schnee fällt, zu bestimmen.  $\delta^{18}O$  Paläo-Höhenmessungen zeigen an, dass seit den letzten 40-50 Ma die Hebung der Oberfläche auf 4000 m oder mehr (über dem Meeresspiegel) kontinuierlich nach Norden über das gesamte tibetische Plateau erfolgte.

### Vorhergesagte Verbreiterung des tibetischen Plateaus nach Norden aus Hebungsaltern verschiedener Becken nördlich der Yalu Tsangpo Suture am Längengrad 090°E

nach Rowley & Currie 2006 *Nature* **439** doi: 10.1038/nature04506



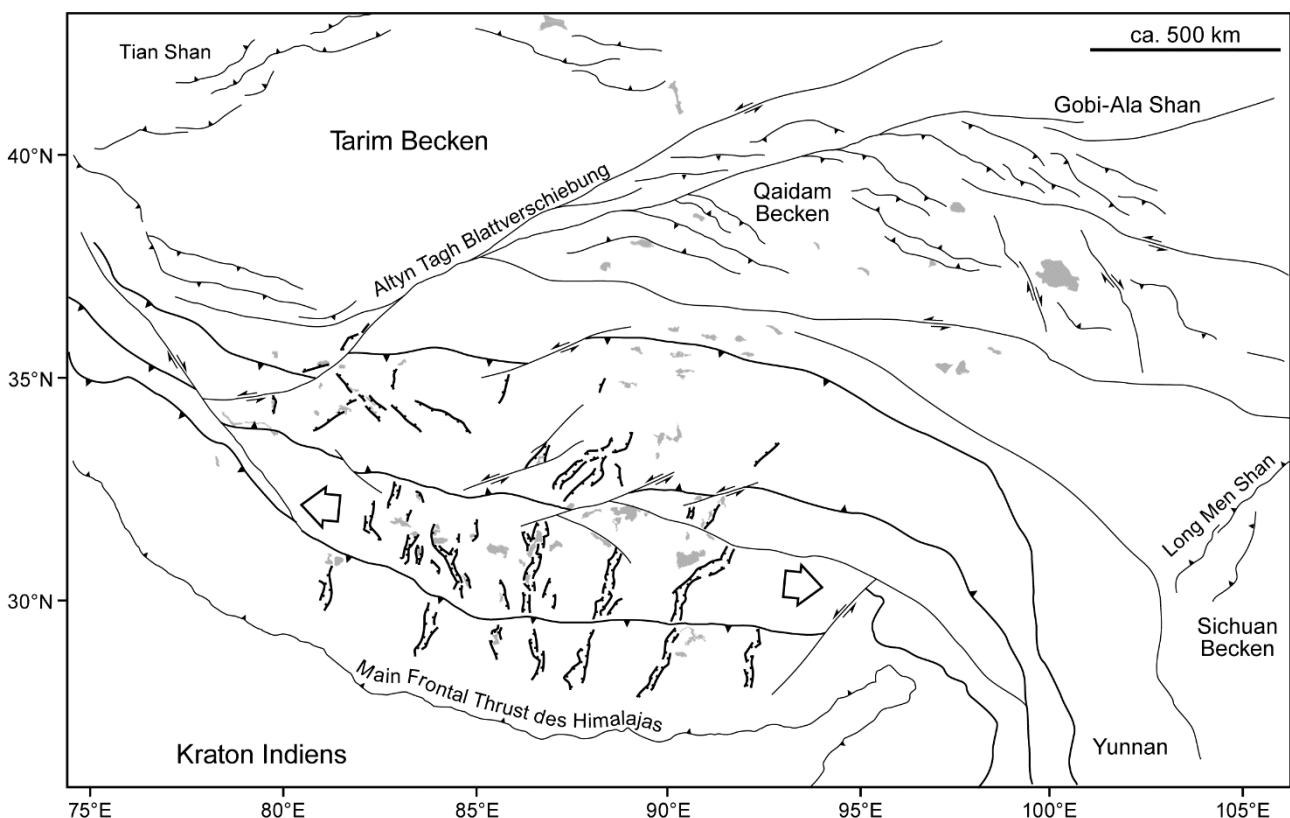
Dies ist zeitlich eng verbunden mit der Konvergenz zwischen Indien und Asien und verdeutlicht die Reaktion der Oberfläche auf die Verdickung der Erdkruste. Die Hebung Südtibets erfolgte während des Eozäns, das zentrale Tibet wurde im Oligo-Miozän gehoben und Nordtibet im Plio-Quartär. Diese Ergebnisse unterstützen die Idee, dass das Tibetische Plateau ein anhaltendes topographisches Merkmal ist, das aus der Kollision zwischen der indischen und der asiatischen Platte entstanden ist, und nicht ein neueres Produkt von anderen, tiefer sitzenden Prozessen.

## Gräben

Südtibet bietet möglicherweise das auffallendste Beispiel orogener Extension im Kontext einer kontinentalen Kollision.

### Beschreibung

Eine Serie von ungefähr Nord-Süd verlaufenden Gräben und kinematisch verbundenen Blattverschiebungen können beobachtet werden: vom Himalaja im Süden zum Qiangtang Terran im Norden und vom 78ten östlichen Längengrad im Westen zur Namche Barwa Syntaxe im Osten. Diese Gräben kennzeichnen weit verbreitete, spättertiäre bis rezente E-W krustale Extension, obwohl der Grossteil der Höhenlage und der Dicke der Kruste des tibetischen Plateaus aus der immer noch aktiven, und generell nach Norden gerichteten Verkürzung zwischen Indien und Eurasien resultiert. Die aktiven Abschiebungen nehmen immer noch ca. 10 mm/Jahr Ost-West Extension auf, während sich Indien immer noch mit einer relativ gleichmässigen Konvergenzrate von 40-50 mm/Jahr nordwärts gegen das stationäre Eurasien bewegt. Unterstützend zeigen die Herdlösungen der grössten seismischen Ereignisse in Tibet Kombinationen von Abschiebungen und Blattverschiebungen mit fast Ost-West orientierten T-Achsen. Die anhaltende Ost-West streichende Streckung wird durch GPS-Daten bestätigt, die die Verlängerung der Grundlinie zwischen Leh (Ladakh) und Lhasa (südöstliches Tibet) mit  $17,8 \pm 1$  mm/Jahr oder zwischen Leh und Bayi (weiter im Südosten) mit  $18 \pm 3$  mm/Jahr zeigen.



Pleistozänes Grabensystem in Süd-Tibet  
offene Pfeile= Allgemeine Extensionsrichtung nach Armijo *et al.* 1986 *J.Geophys.Res.* **91-B14**, 13803-13872

Während die Gräben in Tibet generell einen Nordwärtstrend zeigen, fächern ihre Orientierungen systematisch von Westen nach Osten von einer NW zu einer NE Richtung. Dieses Muster wird hauptsächlich durch die Kollisionsspannungen entlang des Himalaja Bogens erklärt. Es hebt die Bedeutung des Einflusses der aktuellen Kollision auf die heutigen Spannungszustände in der oberen tibetischen Kruste hervor.

### Alter

Unter der Annahme, dass die weitverbreitete Extension im südlichen Tibet das Ergebnis eines einzelnen Ereignisses ist, ist das Alter der Grabenbildung von grosser Bedeutung. Es markiert die Übergangzone von einem Kompressions- zu einem Extensionsregime. Die E-W Extension begann diachronisch, um 18-14 Ma im südlichen Plateau (Alter der nach Norden streichenden Gänge) und um etwa 4 Ma im Norden.

### Interpretationen

Abgesehen von der anhaltenden Konvergenz zwischen Indien und Asien wurde die Extension von Tibet fünf wahrscheinlich untereinander in Verbindung stehenden Prozessen, die lithosphärische und/oder lokale Kräfte involvieren, zugeschrieben:

#### ***Erweiterung des gebogenen Himalajas***

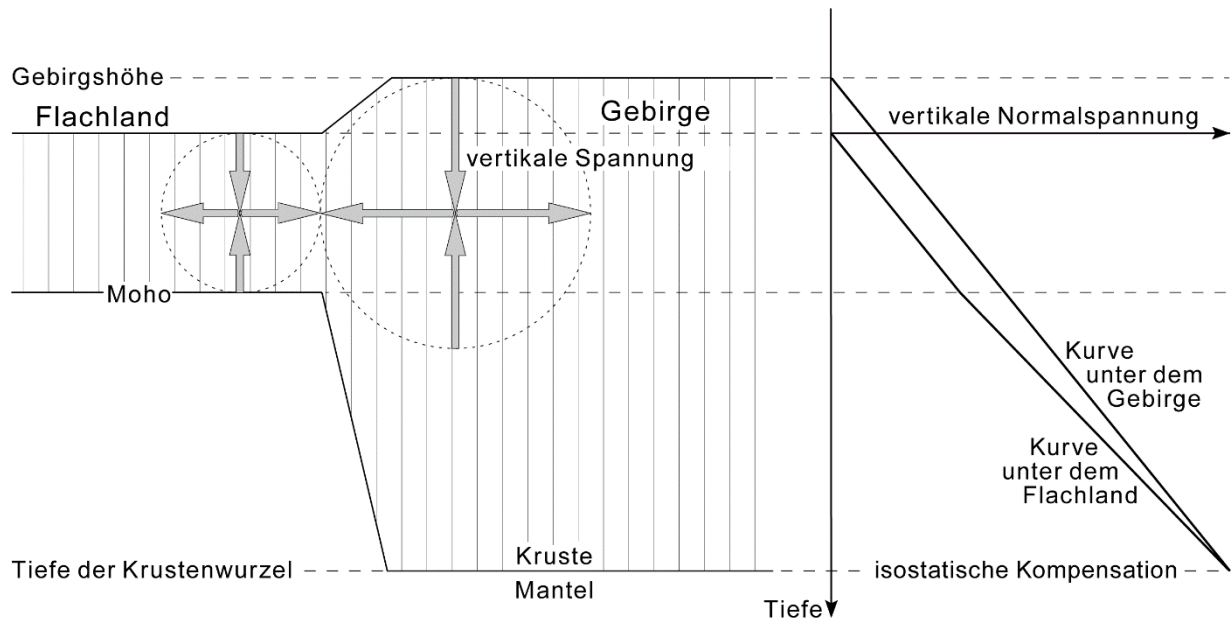
Der Gebirgszug des Himalajas ist gebogen. Extension würde die periphere Verlängerung des zuerst linearen Himalajas ausdrücken. Das Orogen biegt sich momentan zwischen seinen westlichen und östlichen Endpunkten. Jedoch deutet dieses Modell E-W Kompression im Kern des orogenen Bogens an, für die es keinen geologischen Beweis gibt.

#### ***Verteilte Verformung infolge der schiefen Konvergenz zwischen Indien und Asien***

Durch Extension würden lokale geometrische Zustände und Versatzbedingungen aufgenommen werden. In der Tat sind die Konvergenzvektoren Indiens in Richtung zum stabilen Asien nur in der Nepal-Region zum Himalaja senkrecht. Es gibt eine zunehmende Himalaja-parallele Blattverschiebungskomponente weg vom Zentralhimalaja. Transpression kann streckungsparallele Verlängerung verursachen. Geodätische Daten tendieren dazu, diese Interpretation für die heutige Deformation im Himalaja zu stützen.

#### ***Radiale Streuung infolge gravitativen Kollaps***

Tibet hat eine dickere Kruste als das benachbarte Tiefland. Folglich ist der lithostatische Druck unter Tibet grösser als der lithostatische Druck in der gleichen Tiefe im Tiefland, bis zur Ausgleichtiefe. Die **potentielle Gravitationsenergie** (*gravitational potential energy*) ist die Diagrammfläche unter den lithostatischen Druckkurven jeder Region. Die überschüssige, potentielle Gravitationsenergie (in der Annahme der gleichen Gesteinsdichten in beiden Regionen berechnet), die den Höhenunterschied von ca 5000 m zwischen der tibetischen Hochebene und den umgebenden Tiefländern verursacht, kann den krustalen Kollaps steuern. Extension in der tibetischen Hochebene drückt den mechanischen Ausgleich zwischen gravitativen Auftriebskräften der Hochebene und der tektonischen Kompression aus. Dreidimensionale, visko-elastische Modelle suggerieren, dass solange die Hochebene niedriger als 50% ihrer aktuellen Höhe war, Blattverschiebungen und Überschiebungen dominieren konnten. Bedeutende, krustale Extension würde vermutlich erst angefangen haben, wenn die Hochebene ~75% ihrer aktuellen Höhe erreicht hatte. Infolge der maximal tragbaren Höhe neigt die angehobene Hochebene dazu sich in alle Richtungen zu seinen Seitenrändern hin nach aussen zu verbreiten.



nach Tapponnier & Molnar 1976 *Nature* **264**(5584) 319-324 und Bird 1991 *J.Geophys.Res.* **96**(B6) 10275-10286

### ***Ablösung***

Es wird vermutet, dass Mantelkonvektion die konvektive Ausdünnung der Lithosphäre nach einem Zeitraum gradueller Verdickung auslöst. Die anschließende Erwärmung schwächt die mittlere und untere Kruste, die sich wie eine kontinuierlich viskose Flüssigkeit verhält und die fähig ist seitlich zu fließen. Die Schwächung der kontinentalen Kruste durch konduktive Erwärmung würde einige zehn Millionen Jahre erfordern, ausser wenn andere Prozesse wie die Ablösung von Mantelmaterial oder Reibungswärme beteiligt wären. Die isostatische Antwort zu diesem Ablösungsereignis ist die schnelle Hebung, bis die Hochebene eine Höhe erreicht, die nicht durch die Randspannungen gestützt werden kann. Die ansonsten nicht dokumentierte Ablösung und Senkung des dichteren unteren Teiles der Mantellithosphäre unterhalb des tibetischen Plateaus könnte dadurch die übermässig, durch Schwerkraft und Isostasie getriebenen lithosphärischen Körperkräfte dazu gebracht haben das Plateau zu heben und somit die hohe Topographie zu tragen. Die daraus entstandene potentielle Gravitationsenergie könnte dann dafür verantwortlich sein, dass die tibetische Lithosphäre horizontal gestreckt und vorwiegend in E-W Richtung ausgedünnt wurde. Diese Hypothese wird heute verworfen, da die Oberflächenwellentomographie zeigt, dass Tibet anscheinend auf einer ununterbrochenen Mantelschicht liegt.

### ***Abrollen der pazifischen Subduktionen***

Die schnelle ESE-WNW Ausdehnung im Tibetischen Plateau resultierte in ein laterales Ausweichen von Krustenmaterial nach Osten, weg von Indiens Bewegungspfad. Das Material bewegte sich zu Stellen die sich entlang der pazifischen Grenze Asiens geöffnet haben.

### **Magmatismus**

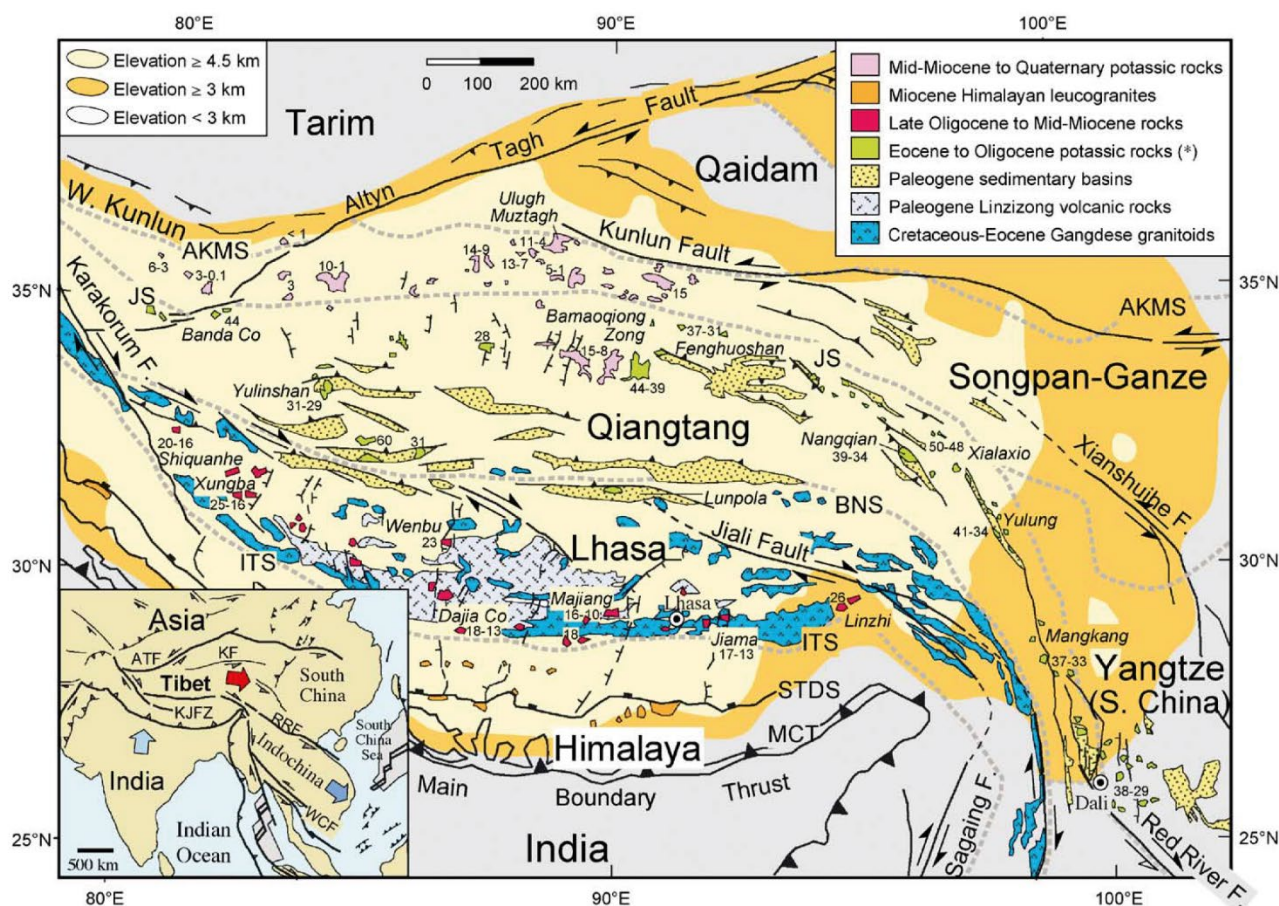
Magmatismus, der jünger als die frühe Kollision zwischen Indien und Asien ist, ist in Tibet weit verbreitet. Regionale, geochemische und zeitliche Abweichungen im Magmatismus deuten darauf hin, dass die gesamte Hochebene mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht durch einen einzigen Event verursacht wurde. Diese Abweichungen deuten weiter an, dass sich auch die thermische Struktur der tibetischen Lithosphäre weiter entwickelt hat.

Vier magmatische Hauptsuiten können abgegrenzt werden.

### ***Kreide bis Eozän: Bogenmagmatismus im südlichen Lhasa Terran***

Der Bogenmagmatismus begann in der frühen Kreide (ca. 130 Ma), und dauerte bis ins späte Eozän (ca. 40 Ma), mit einer möglichen magmatischen Unterbrechung zwischen 75 und 60 Ma. Der

Magmatismus der jünger als die Kollision ist, reicht von Basalt zu Rhyolit mit kalk-alkalischen und örtlich sub-alkalinen geochemischen Eigenschaften und scheint, auf den südlichen Teil des Lhasa-Terrans beschränkt zu sein. Isotopische Daten deuten eine bedeutende Miteinbeziehung von juvenilen Mantelbestandteilen aus der Asthenosphäre in der Magmaerzeugung an.



Altersverteilung von magmatischen Gesteinen in Tibet nach Chung *et al.* 2005 *Earth Sc.Rev.* **68**(3-4) 173-196

### Eozän bis Oligozän: Magmatismus im Qiangtang Terran

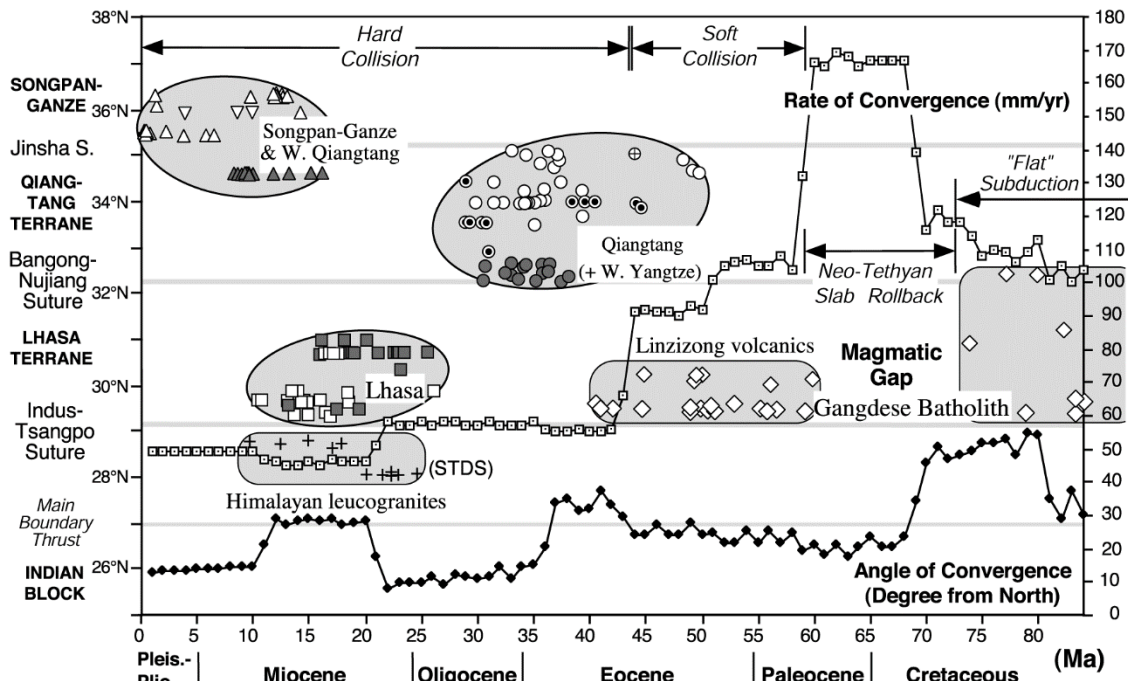
Eine Magmasuite von shoshonitischen und ultra-kaliumhaltigen Gesteinen, die durch einen hohen bis sehr hohen Alkaligehalt gekennzeichnet sind, treten weit über das zentrale Tibet (das gesamte Qiangtang Terran) auf und haben Alter von ca. 50 und 30 Ma. Die Geochemie deutet auf einen Ursprung der Magmatite aus geringer Aufschmelzung des angereicherten, lithosphärischen Mantels hin.

### Spätes-Oligozän bis Mittleres-Miozän: Magmatismus im Lhasa Terran

In der südlichen, tibetischen Hochebene hängen vulkanische Gänge und Pfropfen mit Gräben zusammen, die ein Alter von ca. 25 bis 8 Ma aufweisen. Folglich gibt es eine klare geographische Beziehung zwischen spätem tertiärem Vulkanismus und lokaler Extension. Geochemische Systematik deutet an, dass die post-kollisionalen vulkanischen Gesteine aus einem lithosphärischen, metasomatisierten Mantel (Phlogopit-Peridotite) mit einem niedrigen Grad partieller Schmelzung abgeleitet werden können. Die kalk-alkalischen Gesteine schliessen „Adakite“ ein, die sich aus teilweiser Schmelzung einer eklogitischen unteren Kruste ableiten. Dieses chemische Merkmal hängt nicht mit der aktiven Subduktion der ozeanischen Lithosphäre unter den südlichen Teil Tibets zwischen 25 und 8 Ma zusammen.

### Mittel Miozäner bis Quartärer Vulkanismus

Miozäner ultra-kaliumhaltiger, shoshonitischer und schwach kalkalkalischer Vulkanismus trat vor ca. 15 Ma nochmals in Nordtibet auf. Der Vulkanismus war weitverbreitet und nach ca. 13 Ma oder auch etwas später fast durchgängig. Der heutige Vulkanismus, der Früh-Quartär ist, steht im Zusammenhang mit kleinen *pull-apart* Becken entlang der nordwestlichen Grenze der tibetischen Hochebene. Dieser Vulkanismus ist ärmer an Kalium als der ältere, kaliumhaltige Magmatismus. Dieser junge Vulkanismus tritt nur in den westlichen Teilen Nordtibets auf, in einem Gebiet das weitestgehend einer Region entspricht, in deren oberem Mantel hohe Temperaturen herrschen, was aus seismischen Daten entnommen werden kann.



Verteilung des jungen Magmatismus in Tibet nach Chung et al. 2005 *Earth Sc.Rev.* **68**(3-4) 173-196

Drei Hauptmechanismen können die Genese des tertiären kaliumhaltigen Vulkanismus in der tibetischen Hochebene erklären.

- Es ist die Konsequenz der lithosphärischen Delamination eines grossen Teils der Mantellithosphäre. Dieser Mechanismus ist unwahrscheinlich, weil regionale Veränderung des Alters und der isotopischen Zusammensetzung nicht mit simultaner Ablösung der Lithosphäre unter ganzen Tibet konsistent ist.
- Abrollen und Auseinanderbrechen des Slabs. Abrollen entlang der Tsangpo Suture kann für die Einleitung einer „back-arc“ Extension im Qiangtang Terran verantwortlich gewesen sein, die die Ost-West-orientierten, sedimentären Becken und den dazugehörigen Magmatismus bei 65-45 Ma verursachte. Im Allgemeinen ersetzt der heisse asthenosphärische Mantel die kalte subduzierte Platte nach dem *break-off* um 45 Ma und heizt nach der Trennung die darüberliegende Platte einige Millionen Jahre lang auf.
- Die intrakontinentale Subduktion umfasst verschiedene vulkanische Gürtel mit unterschiedlichem Alter. Diese passen zu den Hauptüberschiebungsereignissen im Oligozän, als durch die Kollision Indiens das Qiangtang Terran von einem extensionalen in ein kompressives Regime wechselte.

### Tiefenstruktur

Mit Hilfe einer grossen Anzahl von seismischen und teleseismischen Daten kann die Struktur und die Dicke der Kruste und des oberen Mantels unter Tibet konstruiert werden. Die Daten zeigen, dass die gleichmässige Hebung des tibetischen Plateaus eine heterogene Struktur in der Kruste und dem

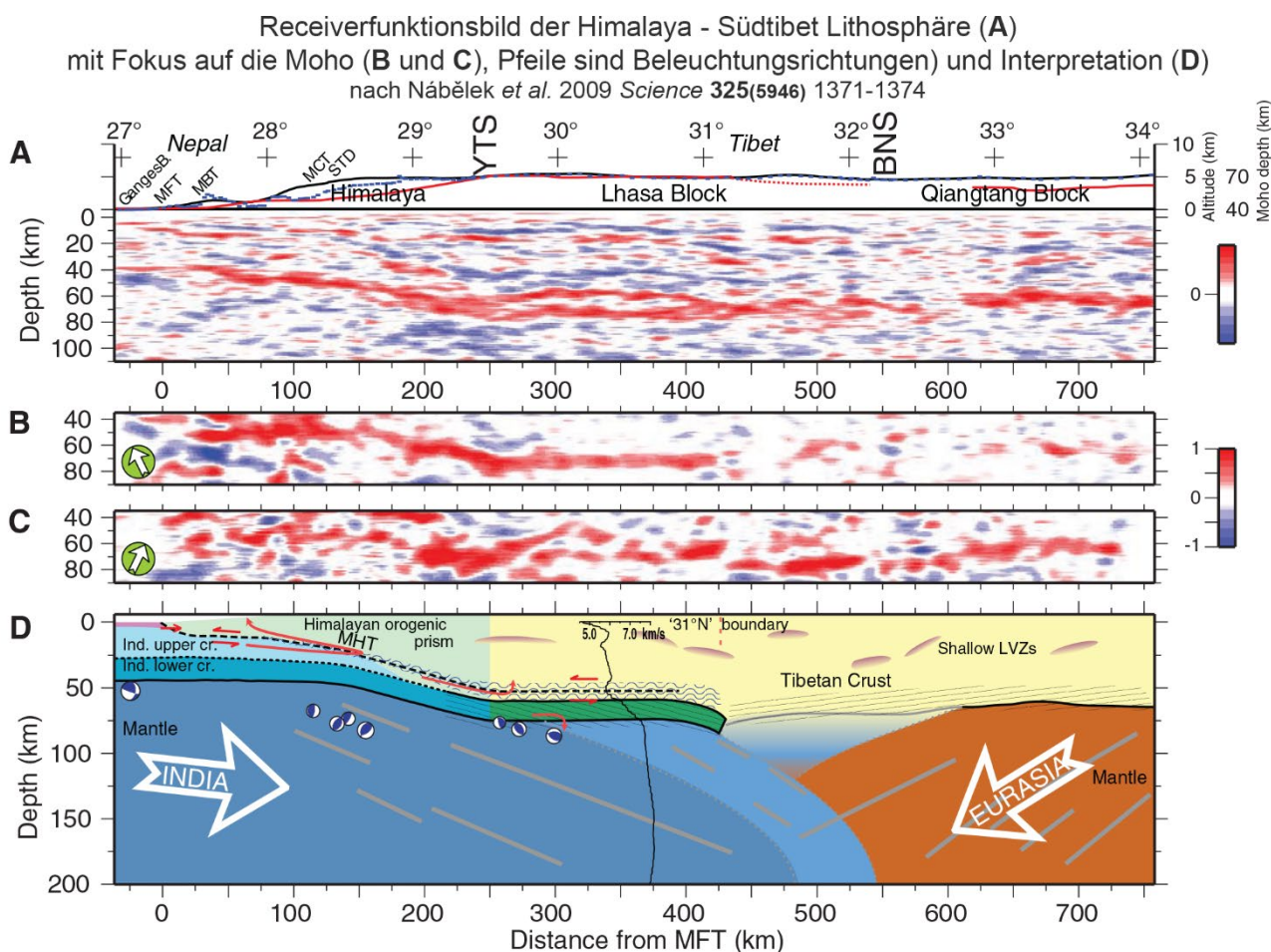
lithosphärischen Mantel verdeckt. Im Besonderen scheint es, dass die Banggong-Nujiang Suture eine steile, nach Norden einfallende Störungszone ist, die sich mindestens bis in eine Tiefe von 35 km erstreckt. Dies markiert die Hauptgrenze zwischen dem südlichen und nördlichen Tibet, an welche die Eigenschaften von Kruste und Mantel kontrastieren. Diese Grenze kann mit dem Nordrand der unterschobenen indischen Lithosphäre übereinstimmen.

### Krustenstruktur

Die geophysikalischen Studien, die Körper- und Oberflächenwellen, Refraktion und Schwerkraft verwenden, bestätigen, dass die 60-70km Krustendicke unter Südtibet nach Norden hin (in den Qiangtang und Songpan-Ganze Terranes) 10-20 km dünner wird. Die meisten Erdbeben sind jedoch überall flacher als 25km. Die tiefere Kruste verhält sich wahrscheinlich duktil.

### Süd-Tibet

Unter dem Lhasa Terran, wo der Übergang zwischen Kruste und Mantel besonders dick ist, ist auch die Kruste mit ca. 70-80 km am mächtigsten. Die obere Grenze einer Zone mit niedrigen Geschwindigkeiten der seismischen Wellen, weist auf eine teils geschmolzene mittlere Kruste hin. Jedoch erfordern Refraktionsanalysen keinen signifikanten Anteil an Schmelze. Die hohe magnetotellurische Leitfähigkeit der mittleren Kruste könnte wegen salzhaltigen Fluiden existieren.



### Zentrales und Nordtibet

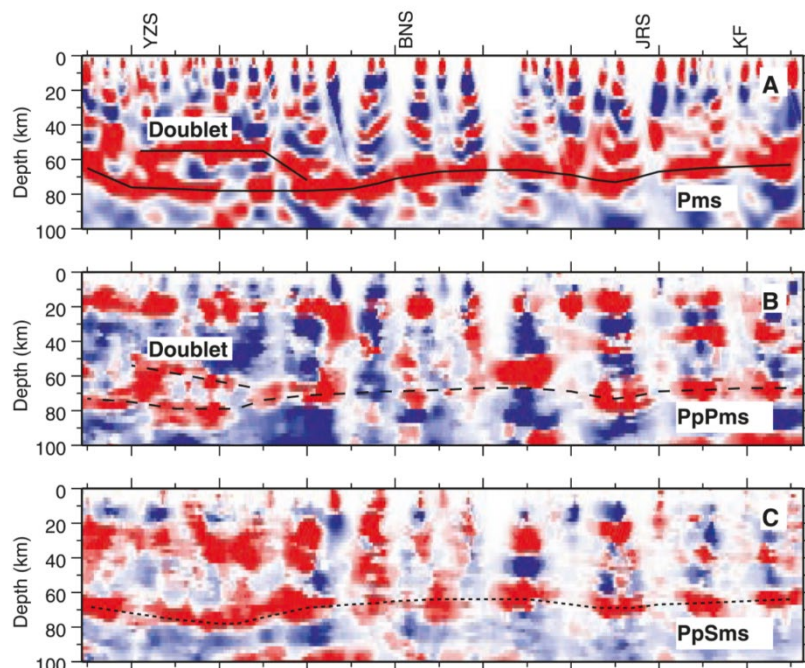
Die untere Kruste von Zentraltibet ist, im Gegensatz zur unteren Kruste im Himalaja und im Südtibet, sehr reflektierend. Dieser Unterschied kann aus Ereignissen resultieren, die nicht in der indischen Platte auftreten, die aber während der Entwicklung oder in der heutigen Hochebene stattgefunden haben. Seismische Profile zeigen, dass das Plateau nach Norden über das Tarim-Becken geschoben ist.

Moho

Verschiedene Autoren, die unterschiedliche Methoden verwenden, berichten am selben Ort über Schwankungen der Tiefe der Moho von mehr als 20 km. Die Kombination von teleseismischen und variablen  $V_p/V_s$ -Verhältnissen definiert unterschiedliche Moho-Tiefen auf beiden Seiten der Banggong-Nujiang Suture.

**Süd-Tibet**

Erdbeben treten unter Südtibet und dem hohen Himalaja in Tiefen bis zu 70-80 km auf. Unter dem nördlichen Lhasa Terran, wo die maximale Mächtigkeit  $78 \pm 3$  km beträgt (ca. 100km nördlich der Yalu-Tsangpo Suture), besitzt die Moho eine leicht gewölbte Form. Ungefähr 100km südlich der Banggong-Nujiang Suture erreicht die Moho mit  $65 \pm 3$  km ihre flachste Tiefe. Weitwinkel Reflexionsdaten zeigen ganz bestimmte, auffällige Versetzungen von nahezu 20 km in der Moho, zusammen mit der Verschuppung der Krusten/Mantel-Grenze und folglich auch mit einer Entkopplungszone im lithosphärischen Mantel unter der bis zu 70-80 km dicken Kruste.



Krustenprofil über das tibetische Plateau mit direkter Umwandlung (A) und zwei Vielfachen (B und C) von SSE (links) nach NNW (rechts) nach Kind et al. 2002 Science 298(5596) 1219-1221

Im Fall diese Unterkrustentopographie auf post-miozänen Störungen zurückzuführen ist, wie es geologische Daten nahe legen, fand die Krustenverdickung nicht nur durch Unterschiebungen von mehreren Hundert Kilometern kontinuierlicher indischer Kruste unter Tibet (600-1000 km mit einer mittleren Geschwindigkeit von 3-5 cm pro Jahr seit 20 Ma) statt.

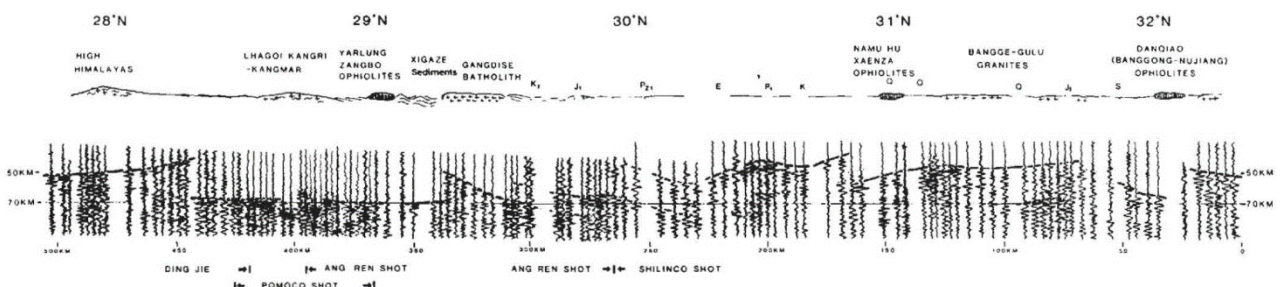
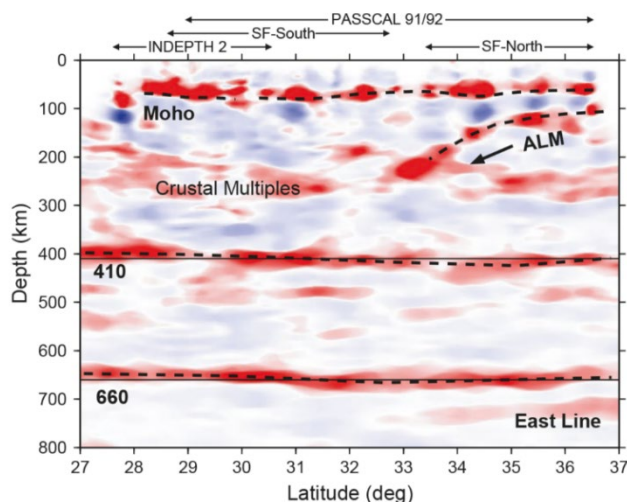


Bild von Moho-Reflexionen und Topographie unter Tibet nach Hirn et al. 1984 Nature 307(5946) 25-27



### Zentral- und Nordtibet

Unter dem Qiangtang Block (dessen Kruste ca. 65 km dick ist) wird die Moho flacher und zeigt ungefähr 50km nördlich der Banggong-Nujiang Suture eine Rinne. Weiter im Norden, ist die Kruste des Songpan-Ganze Terrans ca. 55 km dick. Die Moho ist gebogen und taucht nach Süden unter die nördliche Front Tibets, was auf eine Unterschiebung der Tarim-Kruste unter das Altyn-Tagh-Kunlun Gebirge hinweist.



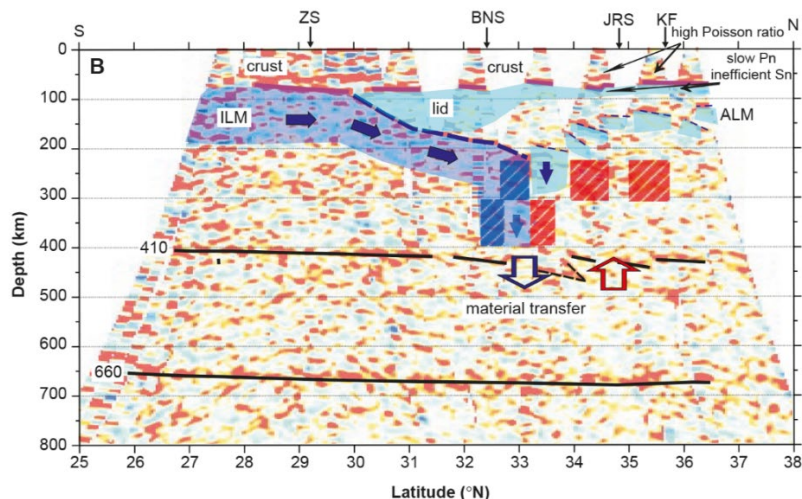
Seismisches Bild von Kruste und Obermantel unter Tibet  
(ALM = lithosphärischer Mantel Asiens)  
nach Kind *et al.* 2002 *Science* **298**(5596) 1219-1221

### Lithosphäre

Die Lithosphäre unter Tibet scheint dünner zu sein als unter Indien. Dies deutet darauf hin, dass sich die indische Platte zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht unter das tibetische Plateau schiebt, und dass Tibet keine typische Schild-Region ist. P- und S-Wellen deuten auch darauf hin, dass die oberen 30-40 km des Mantels lithosphärisch sind. Dies schließt Modelle aus, in denen die ganze Mantellithosphäre durch asthenosphärisches Material ersetzt wurde, um die dünne Mantellithosphäre unter Nordtibet zu erklären. Es gibt immer mehr Beweise, dass die Banggong-Nujiang Suture unterschiedliche Lithosphären trennt.

### Süd-Tibet

P- und S-Wellen Geschwindigkeiten zeigen, dass die Unterseite der indischen Lithosphäre nordwärts von einer Tiefe von 160 km unter den Himalaja in eine Tiefe von 220 km südlich der Banggong-Nujiang Suture einfällt.

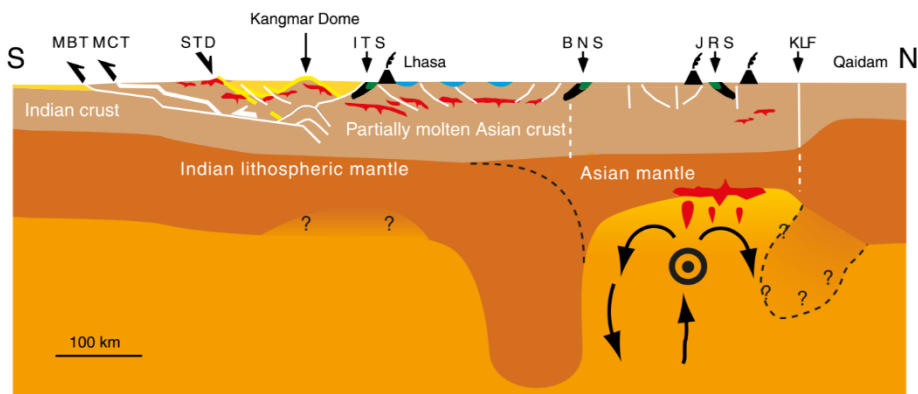


Receiverfunktionsbild des Tibetischen Plateaus und Interpretation  
nach Kosarev *et al.* 1999 *Science* **283**(5406) 1306-1309

Die Mantellithosphäre unter Südtibet und dem Lhasa Terran hat eine hohe Geschwindigkeit, mit einem plötzlichen Abfall an der Banggong-Nujiang Suture. Dieser vermutlich kalte und starke Erdmantel wird als Unterschiebung der indischen kontinentalen Lithosphäre unter das tibetische Plateau bis ungefähr zur Mitte der Hochebene interpretiert. Die tomographischen Bilder weisen darauf hin, dass der Nordrand der indischen Lithosphäre entlang der Banggong-Nujiang Suture bis in eine Tiefe von ungefähr 400km nahezu vertikal verläuft. Eine Konsequenz dieser Wölbung nach unten wäre ein Verlust der Asthenosphäre, was durch einen sich nach oben wölbenden Gegenfluss ausbalanciert sollte. Dies könnte den warmen Mantel unter dem nördlich-zentralen Tibet erklären.

### **Zentraltibet**

Nördlich der Banggong-Nujiang Suture beweisen langsamere Ausbreitungsgeschwindigkeiten von P- und S-Wellen einen vermutlich warmen und schwachen Mantel. Die Unterseite der Lithosphäre ist vom zentralen bis ins nördliche Tibet in einer Tiefe von ungefähr 100 km nahezu horizontal. Die Verminderung der Geschwindigkeit der seismischen Wellen kann eine partiell geschmolzene Lithosphäre aufzeigen. Diese Informationen deuten auf einen Sprung von ungefähr 50 km zwischen den unteren Grenzen der indischen und asiatischen Lithosphären entlang der Banggong-Nujiang Suture.



Interpretation aktueller Prozesse im Mantel unter Tibet  
nach Tilmann et al. 2003 *Science* **300**(5624) 1424-1427

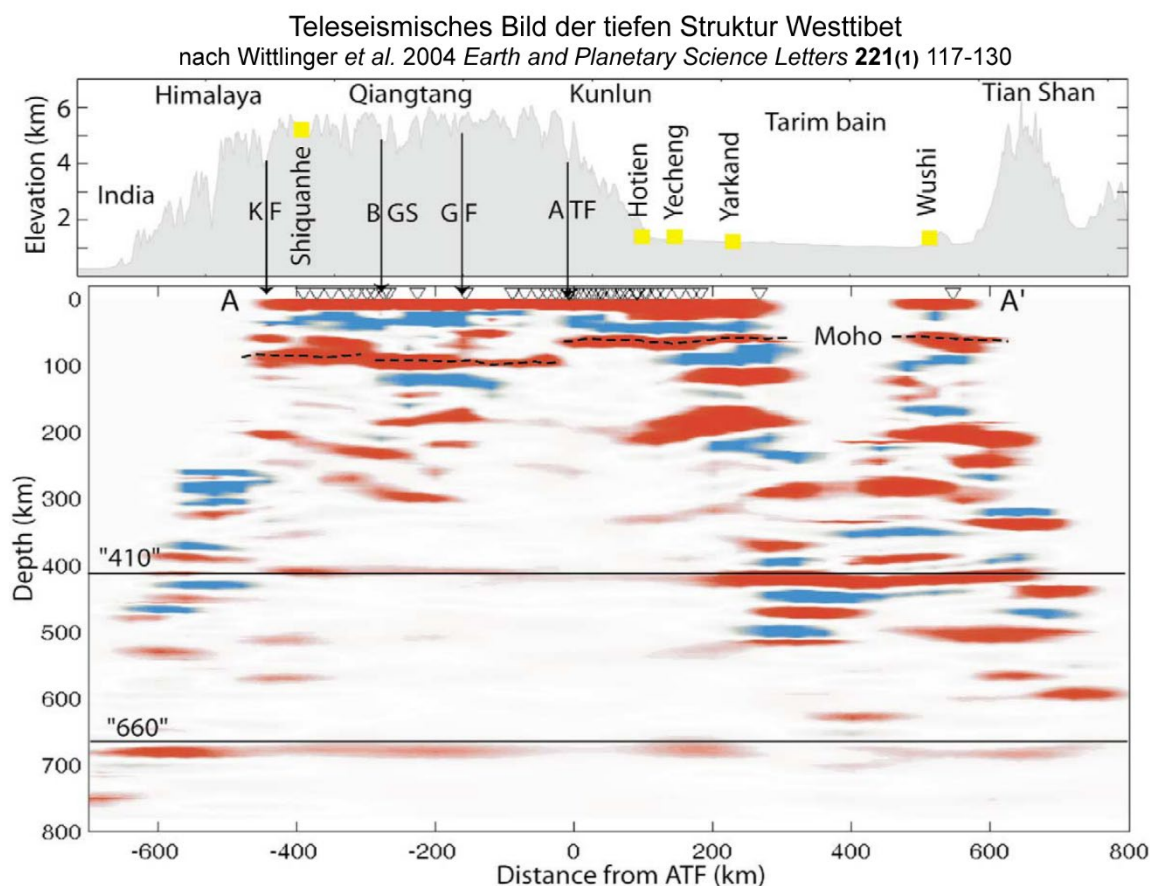
Teleseismische P-Wellen-Tomographie suggeriert den Aufstieg von Material mit niedriger Geschwindigkeit bis 150-200 km unter die Oberfläche. Die allgemeine Krustenausdünnung nach Norden ist hauptsächlich mit der gleichmäßigen Höhenlage der Plateauoberfläche verbunden. Dies unterstützt die Annahme, dass sich unter dem nördlichen Tibet bis zum Qaidam Becken eine dünnere Kruste erstreckt, die im Vergleich zu Südtibet isostatisch durch einen relativ niedrig-dichten, heisseren Mantel gestützt wird.

### **Nordtibet**

Eine nach Süden einfallende Grenzfläche unterhalb Nordtibets kann nach Süden von 100 km Tiefe unterhalb der Kunlun Störung bis in 250 km Tiefe unter dem Zentrum des Qiangtang Terrans verfolgt werden. Hier werden die mehrfachen Reflexionen innerhalb der Kruste unklar. Es könnte ein Hinweis auf die nach Süden einfallende Mantellithosphäre der eurasischen Platte (Qaidam Becken) sein, die unter Nordtibet geschoben wird. Seismische Daten weisen ebenfalls darauf hin, dass die Lithosphäre des Tarim Beckens nach Süden unter die nordwestliche Grenze des tibetischen Plateaus in den Mantel einfällt.

### **Tiefste Diskontinuitäten unter Tibet**

Die gut abgebildeten Geschwindigkeitsdiskontinuitäten bei 410 und 660 km Tiefe markieren die Ober- und Unterseite der Übergangszone des Mantels. Die Diskontinuität bei 410 km zeigt den Übergang von Olivin zu  $\alpha$ -Spinel und die Diskontinuität bei 660 km den Übergang von  $\beta$ -Spinel zu Perowskit+Magnesiumwüstit. Die Kontinuität und Parallelität der 410 und 660 km Grenzflächen deuten an, dass es keine lithosphärische Platte gibt, die in die Mantelübergangszone unter Tibet eindringt.



### Zusammenfassung

Das Modell des konvektiven Abbaus einer verdickten asiatischen Lithosphäre ist inkonsistent mit den lithosphärischen Strukturen die aus seismischen Information interpretiert werden können.

Es ist unwahrscheinlich, dass der abgebildete, vertikale Nordrand von Südtibet ein Überrest der ozeanischen Lithosphäre von der Schliessung der Banggong-Nujiang Suture ist. Dies kann gesagt werden, da ein solch dichter und aus kaltem Material bestehender Körper nicht über 130 Ma oder mehr stabil sein kann. Er wäre stattdessen in den Mantel abgesunken oder wäre thermisch absorbiert worden. Nach all der Argumentation kann diese "Platte" (Slab) mit der indischen Platte verbunden werden.

Eine Konvergenz von 1500 bis 2500 km kann mit Hilfe von magnetischen Anomalien und der Extrapolation der heutigen Verkürzungsrate von etwa 15 mm/Jahr zwischen Indien und der Yalu Tsangpo Suture seit der Kollision Indiens mit Asien abgeschätzt werden. Diese Menge erfordert einen nicht-verformten, indischen, lithosphärischen Mantel weit über die heutige Banggong-Nujiang Suture hinaus. Entweder wurde die unterschobene, indische Lithosphäre seit der Kollision verkürzt, oder es besteht eine zusätzliche Lithosphäre im oberen Mantel unter Zentraltibet. Oder die indische Platte, die zurzeit unter das südliche Tibet geschoben wird, wurde von der ozeanischen Lithosphäre durch die vorangegangene Kollision mit der eurasischen Platte abgetrennt.

Die Hochgeschwindigkeitszonen, die in globalen seismischen, tomographischen Inversionsprojektionen unter der Oberfläche Indiens erkannt werden, sind mögliche Slabs der Tethys-Platte. Mit dieser Interpretation wäre der ozeanische Slab der Tethys vom Nordrand Indiens bevor oder früh in der Kollision abgelöst worden und wäre dann von Indien durch dessen kontinuierliche Nordwärtsdrift überfahren worden.

## Feldtheorie der Gleitlinien: Eindrückungsgeometrien und Zentral-Asiatische Tektonik

Molnar und Tapponnier (1975) erstellten eine kombinierte Interpretation von Satellitenbildern und Herdflächenlösungen von Asien. Die erste Bemerkung ist, dass die aktiven Verwerfungen weit über Asien verteilt sind, wohingegen Indien relativ unberührt bleibt. Daher verformt sich die asiatische Lithosphäre vor und um ein starres Indien.

Darüber hinaus zeigt das Muster der aktiven Störungen in Asien, dass:

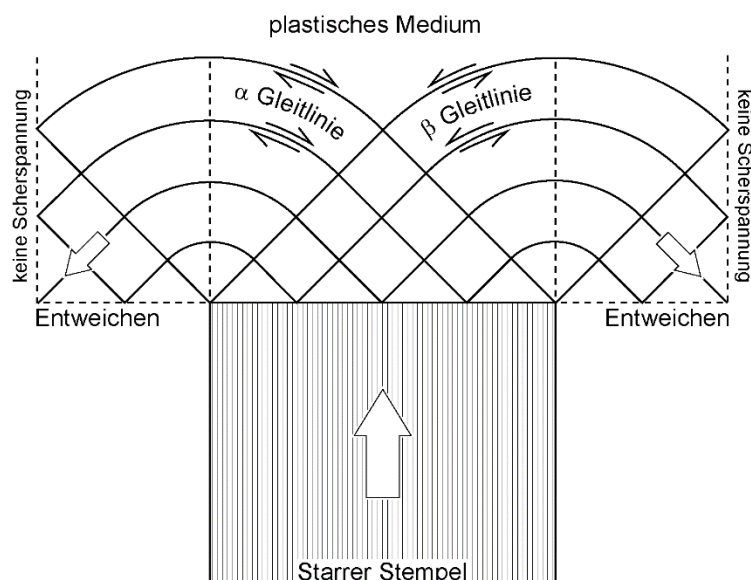
- Überschiebung auf einen engen Gürtel nahe des Himalajas beschränkt ist.
- Blattverschiebungen eine Region dominieren, die über 3000 km breit ist und sich nördlich des Himalajas und im Osten nach Indochina ausbreitet.
- Krustendehnung und Abschiebungen weiter nördlich der Baikalsee-Region Sibiriens zum nördlichen Chinesischen Meer hin dominieren.

Unter der Annahme, dass die Verwerfungen Ebenen maximaler Scherspannung sind, können die lenkbaren Variationen des Verformungsfelds in belasteten plastischen Materialien die regionalen Veränderungen der Bruchbildungsart erklären.

### Konzept

Die **Eindrückungs- (Indentation) Theorie** wurde von Mechanik-Ingenieuren entwickelt. Es ist der Prozess, durch den ein steifer Block (der **Stempel**, *indenter*) in einen weicheren Block eindringt. Die Theorie betrachtet die sich verformende Region im gestörten Zustand und leitet mögliche Störebene ab, die in zwei Dimensionen die so genannten **Gleitlinien** (*slip lines*) sind. Die Annahmen bekunden, dass:

- das ideal plastische (d.h. mit keiner Verfestigung und keiner Elastizität) gestempelte Material isotrop und homogen ist,
- die Temperatur, die Körperkräfte und die Verformungsrate keine Rolle spielen,
- die Verformung eben (d.h. zwei-dimensional) ist und
- die Scherspannungen an Grenzflächen konstant, d.h. reibungslos oder festgeklebt, sind.

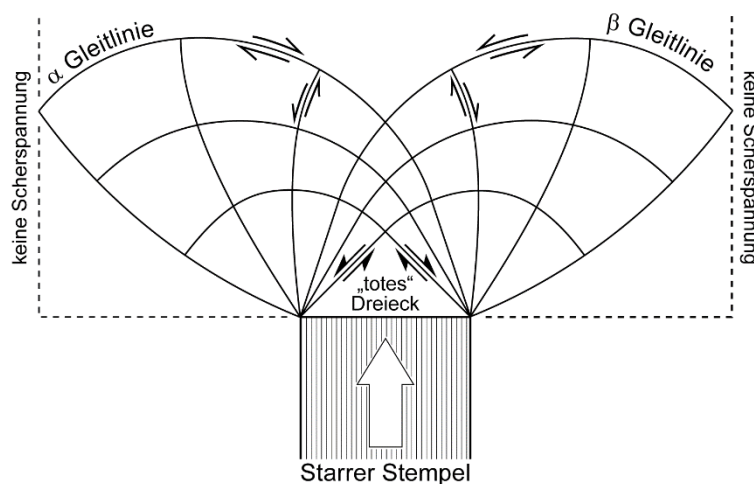


Indentationsdeformation eines semi-unendlich plastischen Körpers durch einen flachen, starren Stempel

Dann ist es möglich mathematisch die Konfiguration der Gleitlinien vorherzusagen. Die Lösung definiert ein Netz von zwei Familien von Gleitlinien, die üblicherweise  $\alpha$ - und  $\beta$ -Linien genannt werden, und rechtssinnigen bzw. linkssinnigen Blattverschiebungen entsprechen. Jede Linie ist überall tangential zur maximalen Scherspannung. Jede Linie ist normalerweise gekrümmt und jede Linie einer Familie kreuzt die Linien der anderen Familie im rechten Winkel.

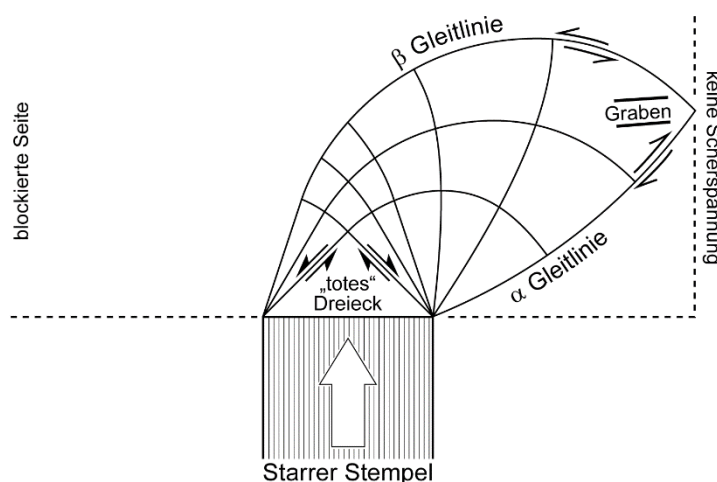
Das Muster der Gleitlinien hängt von der Form des eindrückenden Stempels, von den Randbedingungen und von der seitlichen Beschränkung des eingedrückten, plastischen Blockes ab.

- Wenn der Stempel flach und der eingedrückte Block an beiden Seiten, die zur Bewegung des Stempels parallel sind, begrenzt ist, dann reicht die Verformung symmetrisch im semi-unendlichen starr-plastischen Körper bis in eine Entfernung die ungefähr so gross ist wie die Breite des Stempels. Vor dem Stempel ist eine dreieckige Region ohne Verformung, die durch zwei konjugierte Gleitlinien begrenzt wird und sich mit dem Stempel ohne innere Deformation bewegt. Das Eindringen fährt mit der Aktivierung der Gleitlinien nahe der Spitze und vor der dreieckigen Zone von "totes Material" fort.



Symmetrische, ferne Deformation eines semi-unendlich plastischen Körpers durch einen engen, flachen und starren Stempel  
nach Molnar & Tapponnier 1977 *Geology* 5(4) 212-216

- Wenn der Stempel flach und der eingedrückte Block nur entlang einer Seite begrenzt ist, dann wird die Deformation des weichen Blockes asymmetrisch; die Verwerfungen, die zu den Gleitlinien parallel sind, erzeugen eine Bewegung der Blöcke zur freien Seite hin. Infolge der gebogenen Form der Gleitlinien, bringt die seitliche Blockschiebung eine Rotation um eine vertikale Achse mit sich.



Asymmetrische Deformation eines semi-unendlich plastischen Körpers mit einer freien Seite durch einen engen, flachen und starren Stempel  
nach Molnar & Tapponnier 1977 *Geology* 5(4) 212-216

- Wenn der Stempel ein Keil ist, kann die Verformung zu irgendeinem Zeitpunkt weiter in den Körper reichen als der Keil selbst, abhängig vom Winkel des Keils.

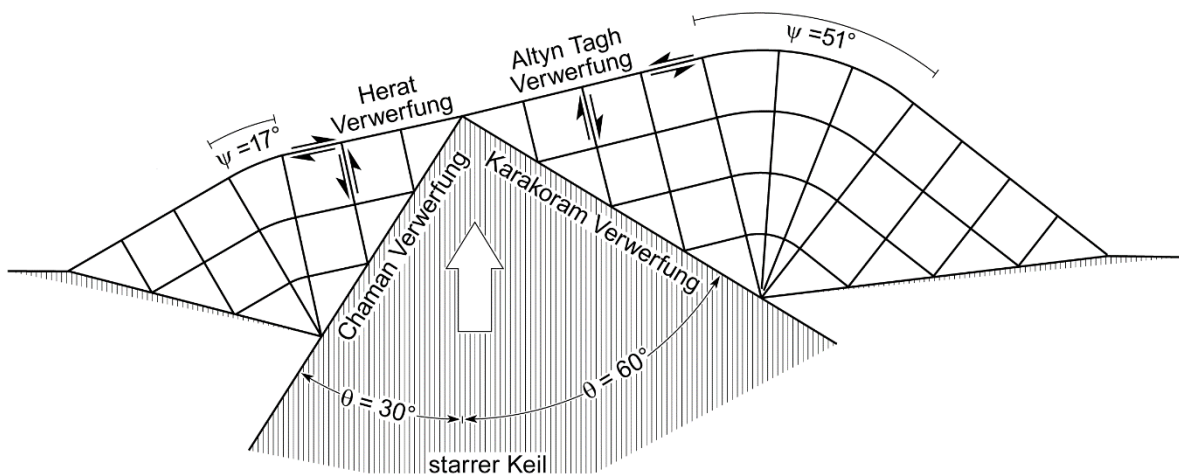
### Anwendung

Es wird ein Vergleich hergestellt zwischen der Verwerfungstektonik Asiens und den Gleitlinien in einem plastischen (Coulomb) Körper, der von einem anderen starren Körper eingedrückt wird. Unter der Annahme, dass die seitlichen Grenzen der indischen Platte im Westen parallel zur Chaman-Verwerfung quer durch das Kirthar und Sulaiman-Gebirge in Pakistan/Afghanistan und im Osten entlang der Sittang-Zone in Burma verlaufen, scheint es, dass Indien recht weit in Asien eingedrungen ist. Indien ist in diesem Fall der starre eindrückende Stempel, der das plastische Asien entlang der Himalaja Front stösst.

- Überschiebung im Himalaja und Südtibet definiert die südliche Verformungsfront des Kollisionssystems. Die Überschiebungsrichtung ist im Himalaja und Süd-Tibet ungefähr parallel zur kompressiven Hauptspannungsrichtung.

- Die Hauptblattverschiebungen Asiens entsprechen den Gleitlinien vor einem flachen Stempel.

Im westlichen Himalaja und in Pakistan ähnelt die Grenze Indiens einem Keil. Die Herat und Altyn Tagh Verwerfungen sind ungefähr parallel zu den  $\alpha$ - und  $\beta$ -Gleitlinien, die bei einer Keil-Eindellung entstünden. Da die Bewegungsrichtung zwischen Indien und Eurasien ungefähr Nord-Süd ist, ist der westliche Blattverschiebungsrand des indischen Keils (die Chaman Verwerfung) steiler als sein östlicher Rand, wodurch die Altyn Tagh-Verwerfung nordöstlicher als die Herat-Verwerfung streicht.

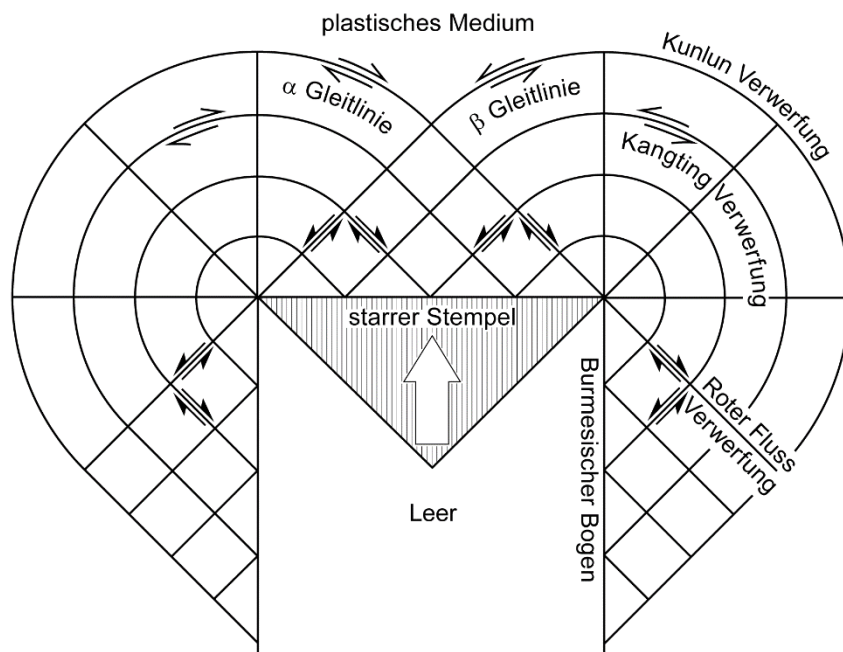


Modell der ebenen Indentation eines semi-unendlich plastischen Körpers durch einen starren Keil angewandt auf Pamir (westliches Ende des Himalajas)  
nach Tapponnier & Molnar 1976 *Nature* **264**(5584), 319-324

Im Nordosten Tibets sind die Kunlun- und Kangting-Verwerfung ungefähr parallel zu den  $\beta$ -Linien. Die ausgeprägte Krümmung, besonders der Kangting-Verwerfung, entspricht durchaus den Erwartungen. Man kann nämlich die erstere als nahe dem Rand eines flachen Stempels entstandene Verwerfung verstehen, wohingegen die letzteren sich in der Nähe eines keilförmigen Stempels entwickeln.

Im Gebiet um das östliche Ende des Himalajas biegen die Gleitlinien immer weiter um, bis  $180^\circ$ , um die Nord-Süd-Plattengrenzen im  $45^\circ$ -Winkel zu schneiden. Ausserdem ist die rechtssinnige Roter Fluss-Verwerfung ungefähr parallel zu einer  $\alpha$ -Linie.

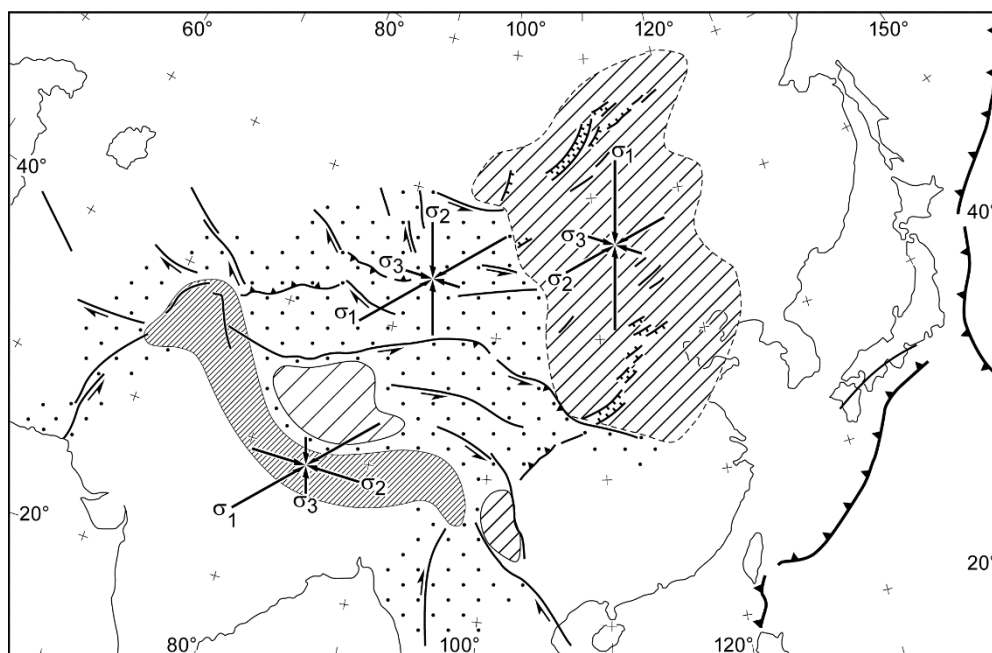
Hunderte Kilometer Versatz durch Blattverschiebung auf diesen Hauptverwerfungen sagen die Extrusion von kontinentalen Blöcken (Indochina), im Osten und Südosten des Himalajas, in Richtung der uneingeschränkten (Subduktions) Rändern voraus. Demzufolge können wahrscheinlich 500 km und vielleicht sogar 1000 km Konvergenz zwischen Indien und Eurasien durch laterale Ausweichbewegungen stabiler Blöcke erreicht werden, ohne dass Indien unter das gesamte Tibet unterschoben werden müsste.



Modell der ebenen Indentation eines semi-unendlich plastischen Körpers durch einen flachen, dreieckigen Stempel angewandt auf das östliche Ende des Himalajas nach Tapponnier & Molnar 1976 *Nature* **264**(5584), 319-324

Die Analogie zwischen den grossräumigen Strukturen und dem Eindringen von plastischem Material ist attraktiv, weil sie nämlich die Krümmung, den Bewegungssinn und die Richtung der aktiven Verwerfungen Asiens richtig voraussagt. Die Anwendung erklärt andere wichtige Eigenschaften:

- Wie ostgerichtete Unterplattung gleichzeitig am Burma-Bogen stattfinden kann. Subduktion resultiert durch das kontinentale Material, das nach Osten, durch die Nordbewegung von Indien, zur Seite geschoben wird.
- *Pull-apart* Becken die mit Blattverschiebungen verbunden sind, könnten angemessen die Deformation die innerhalb von Platten auftritt, erklären, die so abgelegene Regionen wie den Baikal und den Shansi Graben als auch die mittelozeanischen Rücken im chinesischen Meer und in Burma betreffen.



Verteilung der tektonischen Deformationsregime in Asien nach Tapponnier & Molnar 1976 *Nature* **264**(5584), 319-324

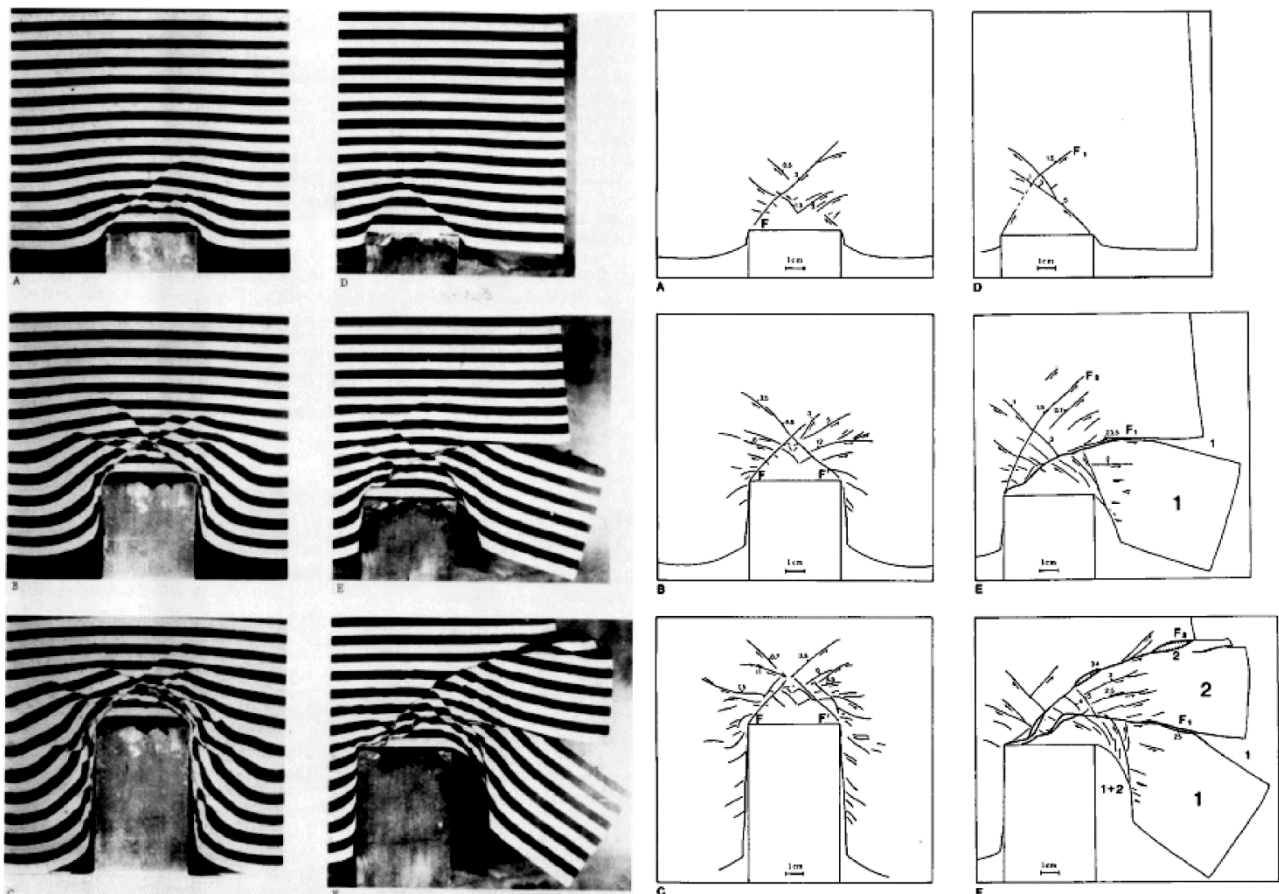
- Wenn ebene horizontale Verformung die dominante Art der Deformation ist, dann sollte die mittlere Erhebung eines Gebiets den lokalen Wert der Vertikalspannung wiedergeben. Die hohe Erhebung Tibets und die allgemeine Abnahme der Erhebung mit zunehmender Entfernung von Tibet innerhalb Asiens, könnte, zusammen mit der Verteilung tektonischer Stile, Ausdruck der abnehmenden Vertikalspannung sein.

- Als ergänzende Beobachtung deutet die Asymmetrie der Kollisionsdeformation in Asien legt den Schluss nahe, dass die kontinentale Lithosphäre des westlichen Eurasiens seitlichen Bewegungen mehr Widerstand entgegengesetzt als die Subduktionszonen entlang des pazifischen und indonesischen Kontinentalrandes.

### Flucht-Tektonik - Verdrängung

Die mathematische Analyse von Gleitlinienfeldern liefert eine sofortige Erklärung (d.h. für kleine Deformationsinkremente) der Orientierung und des Bewegungssinns von Hauptstörungen. Jedoch wird es komplex, wenn das Problem die Simulation von Systemen ist, welche sich mit der Zeit und über lange Zeiträume hinweg entwickeln, wie in der Geologie. Das Problem kann bis zu einem bestimmten Punkt umgangen werden, wenn das mathematische Modell durch ein mechanisches Analog ersetzt wird.

Tapponnier et al. (1982) haben ein mechanisches Modell entwickelt, in dem ein Block von Plastilin durch einen starren Indenter mit konstanter Verformungsrate deformiert wird.



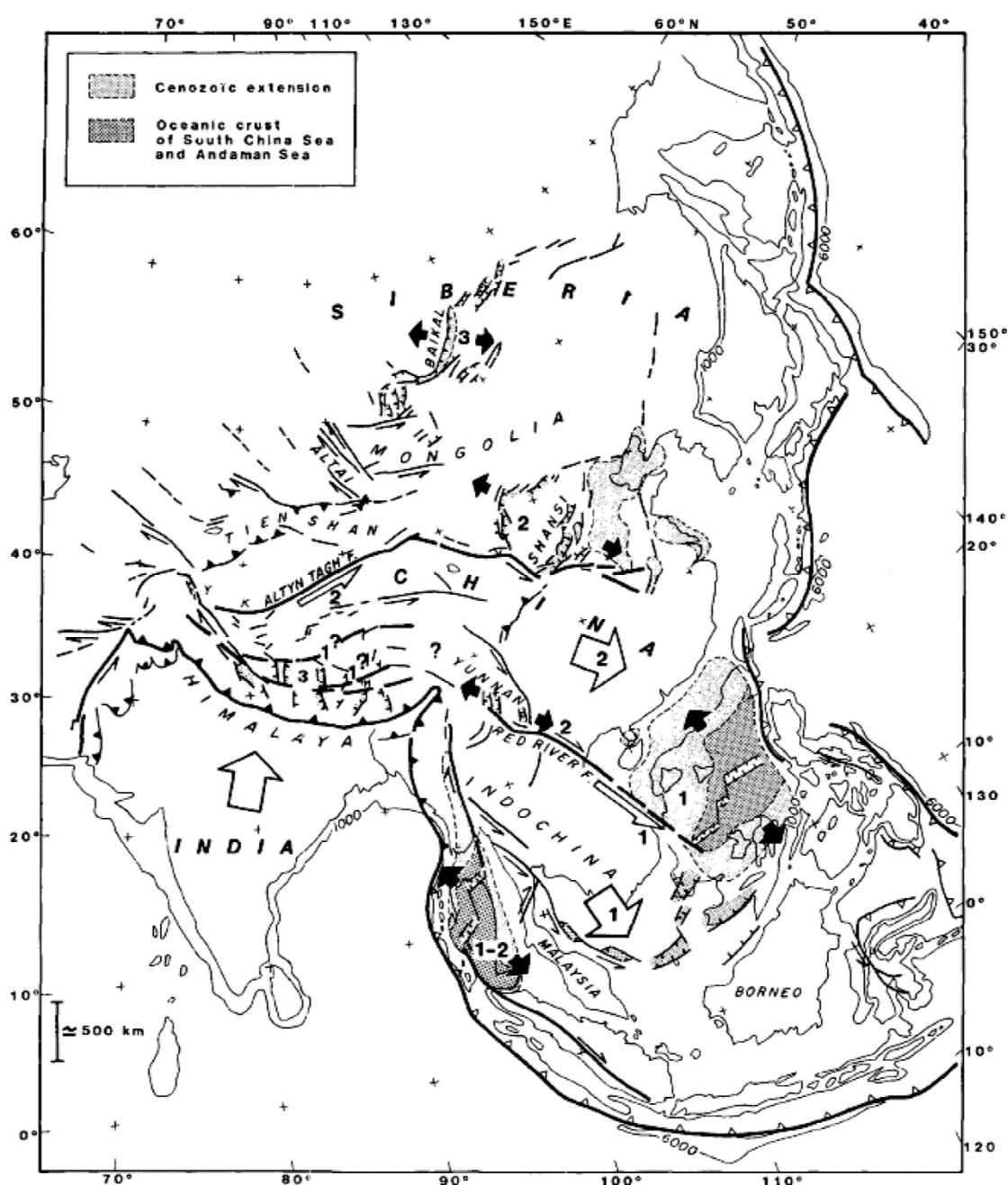
Drei aufeinanderfolgende Schritte von zwei Eindringversuchen an Plastilin (links) und Handzeichnung von Verwerfungen in den entsprechenden Stufen (rechts)  
nach Tapponnier et al. 1982 *Geology* 10(12) 611-616

In einseitig begrenzten Experimenten ist die Verformung asymmetrisch, und Verwerfungen, die schliesslich die Hauptrolle übernehmen, ermöglichen die Verschiebung von Blöcken in Richtung der unbegrenzten Seite. Insbesondere nehmen die linkssinnigen Verwerfungen ihren Ausgang von der linken Spitze des Stempels (die eingeschlossene Seite), sie werden grösser und biegen um sich die



freie Seite des Modells zu verbinden. Danach wird sie das dominierende Element und führt zur seitlichen Translation und Rotation eines Blockes, nahe der rechten Seite des Stempels (die offene Seite). Der Block wird **verdrängt** (*extruded*). Dies wird gefolgt von der Extrusion eines zweiten Blockes entlang einer weiteren linkssinnigen Störung, während der erste Block kontinuierlich rotiert. Viele *pull-apart*-Tröge entwickeln sich entlang der linkssinnigen Störungen infolge ihrer irregulären Geometrie. Mit fortschreitender Bewegung wächst ein Spalt zwischen dem Stempel und dem extrudierten Material. Die Größe der Blöcke hängt von der Breite des Stempels ab und von der Distanz zur freien Seite.

Dieses Analogmodell zeigt, dass krustale Teile **verdrängt** (*escaped*) und vom vorrückenden Stempel auswichen wurden. Das **kontinentale Flucht-Modell** (*continental escape model*) deutet darauf hin, dass sich große Teile des heutigen Südost-Asiens nach Osten bewegen, entlang von Hauptblattverschiebungen, die aus Tibet herausziehen, um Platz für Indien auf seinem Weg nach Norden Platz zu machen. Das Modell macht sehr genaue Vorhersagen über das Timing, die Geschichte der Störungen und über die Verschiebung der Blöcke.



Schematische Karte der känozoischen Verdrängung in Ostasien  
nach Tapponnier *et al.* 1982 *Geology* 10(12) 611-616

- Der linkssinnige Versatz entlang grosser Blattverschiebungen in Zentralchina kann mehrere hundert Kilometer betragen und ist viel grösser als der rechtslaterale. Die Rote Fluss-Störung und die Altyn Tagh-Störung sind zwei aufeinanderfolgende Hauptextrusionsstörungen. Die Blöcke, die durch diese Störungen begrenzt werden, entsprechen Indochina respektive Südost China.
- Lücken die sich im Model geöffnet haben, sind analog zu den Rifts und den Dehnungsbecken in Nordost-China, der Mongolei und Sibirien (Baikal). Dies kann als direkte Konsequenz des geringen Widerstandes der Subduktionszonen am pazifischen Rand Asiens gegen die Extension nach Osten gesehen werden. Öffnung durch Bewegung entlang von Blattverschiebungen passt auch in die Extensionstektonik, die im Andaman Meer, im Südchinesischen Meer und im Shansi beobachtet wird.
- Das Eindringen Indiens in den ersten 20-30 Ma der Kollision hat ein 800km grosses Stück Indo-China nach Südosten verdrängt und um 25° im Uhrzeigersinn rotiert.
- Die magnetischen Anomalien im Südchinesischen Meer werden benutzt, um die tektonische Flucht aufgrund der Kollision Indiens mit Asien zu datieren. Die Öffnung des Beckens wird durch zwei verschiedene Phasen markiert. Von 32 bis 27 Ma war die durchschnittliche Spreizungsrate 5 cm/Jahr. Gegen Ende dieser Öffnungsphase fand ein **Sprung des Rückens** (*ridge jump*) statt, gefolgt von einer langsameren Spreizung von ca. 3.5 cm/Jahr, welche vor etwa 16 Ma verschwand. Diese Chronologie stimmt mit dem zeitlichen Ablauf der Bewegungen an den Hauptblattverschiebungen überein. Die kontinentale Flucht im späten Oligozän an Bedeutung verlor und im mittleren Miozän endete.

Deshalb ist tektonische Flucht ein überzeugender Mechanismus, um intrakontinentale Deformationen auf lithosphärischer Ebene während der känozoischen Konvergenz zwischen Indien und Asien aufzunehmen.

Diese Experimente und Analogien sind allerdings nur für ebene Verformung gültig und geben keine Erklärung für die Dicke und Höhe des Tibetischen Plateaus. Die Überschiebungen und Blattverschiebungen könnten aufeinander folgende oder gleichzeitige Prozesse sein. Sie schliessen sich gegenseitig nicht aus, und eine mögliche Kombination der unterschiedlichen Aspekte beider Modi kann schliesslich die nötige Erklärung der hohen Erhebung (im Durchschnitt ca. 5 km) und der doppelten Krustendicke von ungefähr 70 km in Tibet geben.

### Deformation einer viskosen Platte

Numerische Modelle unter Verwendung der Kontinuumsmechanik wurden inspiriert durch das allgemeine Konzept eines steifen Stempels, der eine viskose Platte verformt. Die Verkürzung/Verdickung tritt vor dem Stempel auf, aber die Bruchbildung ist weniger wichtig als in den analogen Modellen. Simulationen umfassen seitliches Entweichen der kontinentalen Masse in Richtung zum freien, seitlichen pazifischen Rand. Die Resultate schlagen vor, dass die Gravitationskräfte grösstenteils das Deformationsmuster von Asien steuern.

## **Heutige Konvergenz**

Erdbeben lassen erkennen, dass das Hochplateau momentan einer E-W Extension unterliegt, während die Gebirgsseitenränder Kompression und Blattverschiebungen zeigen. Ein auffälliges Merkmal der Tektonik Asiens ist, dass Verformung in grossen Gebieten nordöstlich des Himalajas stattfindet.

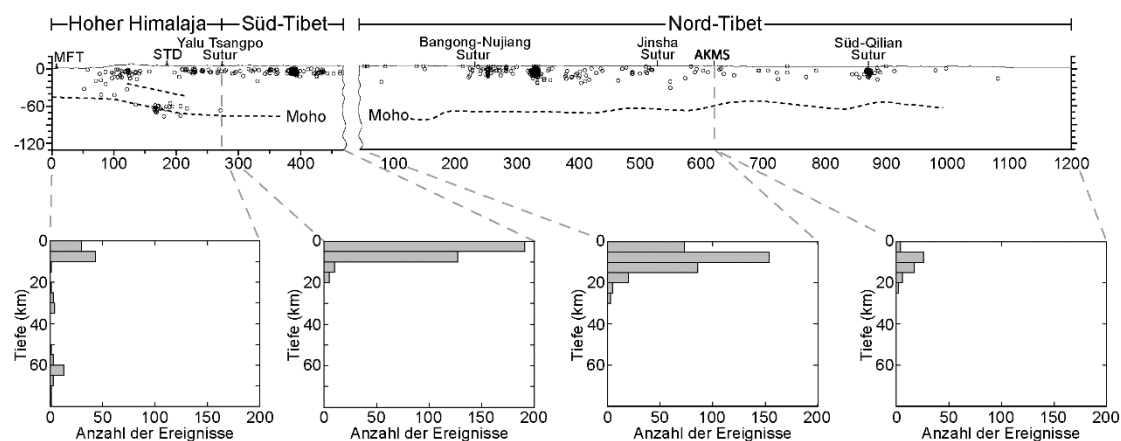
### Seismische Daten

Die tibetische Hochebene ist seismisch sehr aktiv. Erdbeben der Magnitude 8 sind häufig. Die Verteilung von Erdbeben-Epizentren auf der Karte veranschaulicht einen entscheidenden Punkt: die obere kontinentale Kruste ist über ein weites Gebiet zerbrochen, im Gegensatz zu den ozeanischen Platten, die sich nur in schmalen Streifen (mittelozeanischen Rücken) verformen. Das bedeutet, dass die kontinentale Lithosphäre viel schwächer ist als die ozeanische. Die erste wichtige Feststellung zur Verteilung von Erdbeben auf den Kontinenten ist, dass sie beinahe immer oberflächennah sind (im Allgemeinen weniger als 25 km tief). Allerdings gehen grosse,

kontinentale Erdbeben durch die gesamte obere Kruste. Die geophysikalischen Studien, die Oberflächenwellen, Refraktion und Schwerkraft verwenden, zeigen, dass die Kruste von Tibet ca. 70 km dick ist.

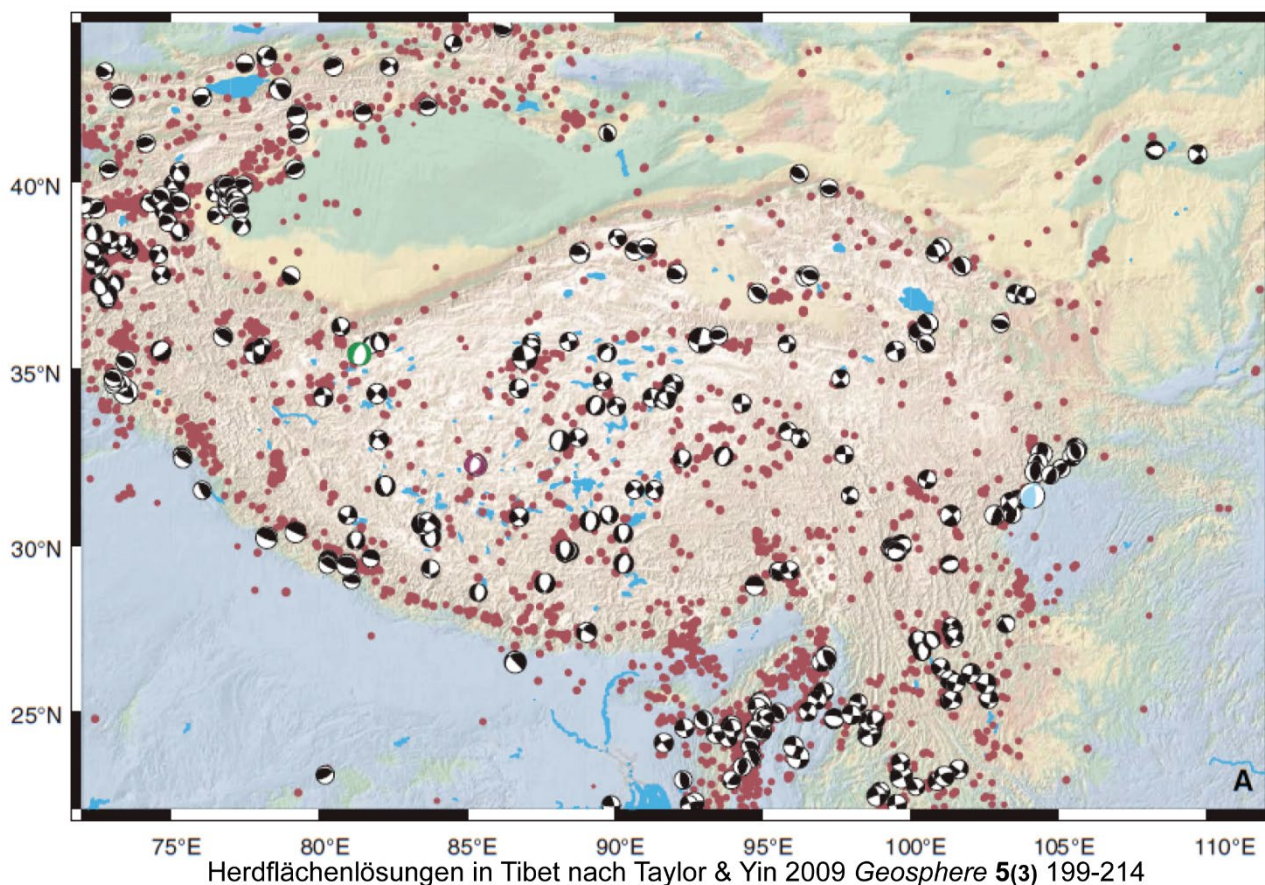
Die Erdbebenverteilung provoziert geradezu zwei Bemerkungen:

- Es gibt eine rheologische Schichtung.
- Die Untersuchung von Erdbeben ergibt ein klares Bild über den Deformationsstil in den mindestens, vielleicht aber auch ausschliesslich obersten 10 bis 25 km der Lithosphäre.



Tiefenverteilung der seismischen Ereignisse im tibetischen Plateau  
nach Wei *et al.* 2010 *Geophysical Research Letters* **37**, L19307, doi:10.1029/2010GL044800

Herdflächenlösungen von Überschiebungen entlang des Himalajas stehen im Gegensatz zu solchen von Abschiebungen im tibetischen Plateau.

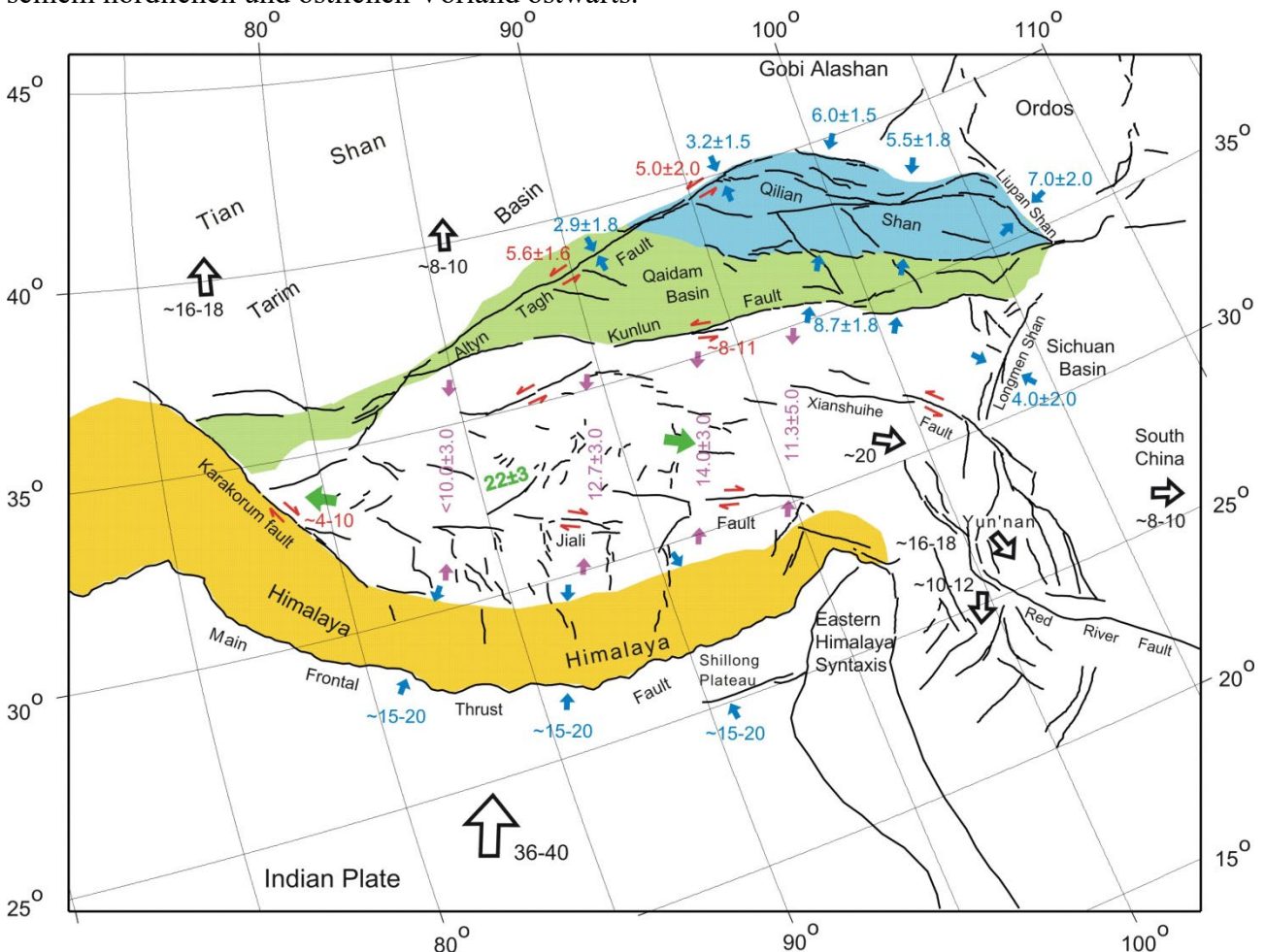


Herdflächenlösungen in Tibet nach Taylor & Yin 2009 *Geosphere* **5**(3) 199-214

Die Herdflächenlösungen unmittelbar nördlich der *Main Frontal Thrust*, im Himalaja, zeigen Überschiebungen an. Die nordeinfallenden Nodalflächen, die als Überschiebungsflächen angenommen werden, fallen mit weniger als  $10^\circ$  im Osten, aber mit bis zu  $20^\circ$  im Westen ein. Die Herdtiefen dieser Erdbeben sind ungefähr 15 km, und entsprechen gut dem Auftreten von Erdbeben auf der indischen Platte während ihrer Subduktion unter Südtibet. Allerdings findet weniger als die Hälfte der geschätzten Konvergenz zwischen Indien und Eurasien im eigentlichen Himalaja statt (1,5 cm/Jahr). Die restliche Konvergenz vermutet man im grossen Gebiet nördlich des Himalajas. Nördlich der Überschiebungen des Himalajas ändert sich der Deformationsstil. Die Herdmechanismen deuten auf Abschiebungen und Ost-West-Extension hin, was mit den beschriebenen Gräben der Hochebene übereinstimmt. Extension heisst grössere Fläche bei abnehmender Dicke der Kruste Tibets, wenn auch sie ein Teil der grössten aktiven Kontinent-Kollisionszone ist. Die Extensionsbrüche nehmen nach Norden ab und werden durch Überschiebungen am Nord- und Ostrand des Plateaus ersetzt. Abschiebungsbeben machen deutlich, dass die heute in Asien wirkenden Kräfte nicht nur die sind, die von den Relativbewegungen der indischen und eurasischen Platte verursacht werden.

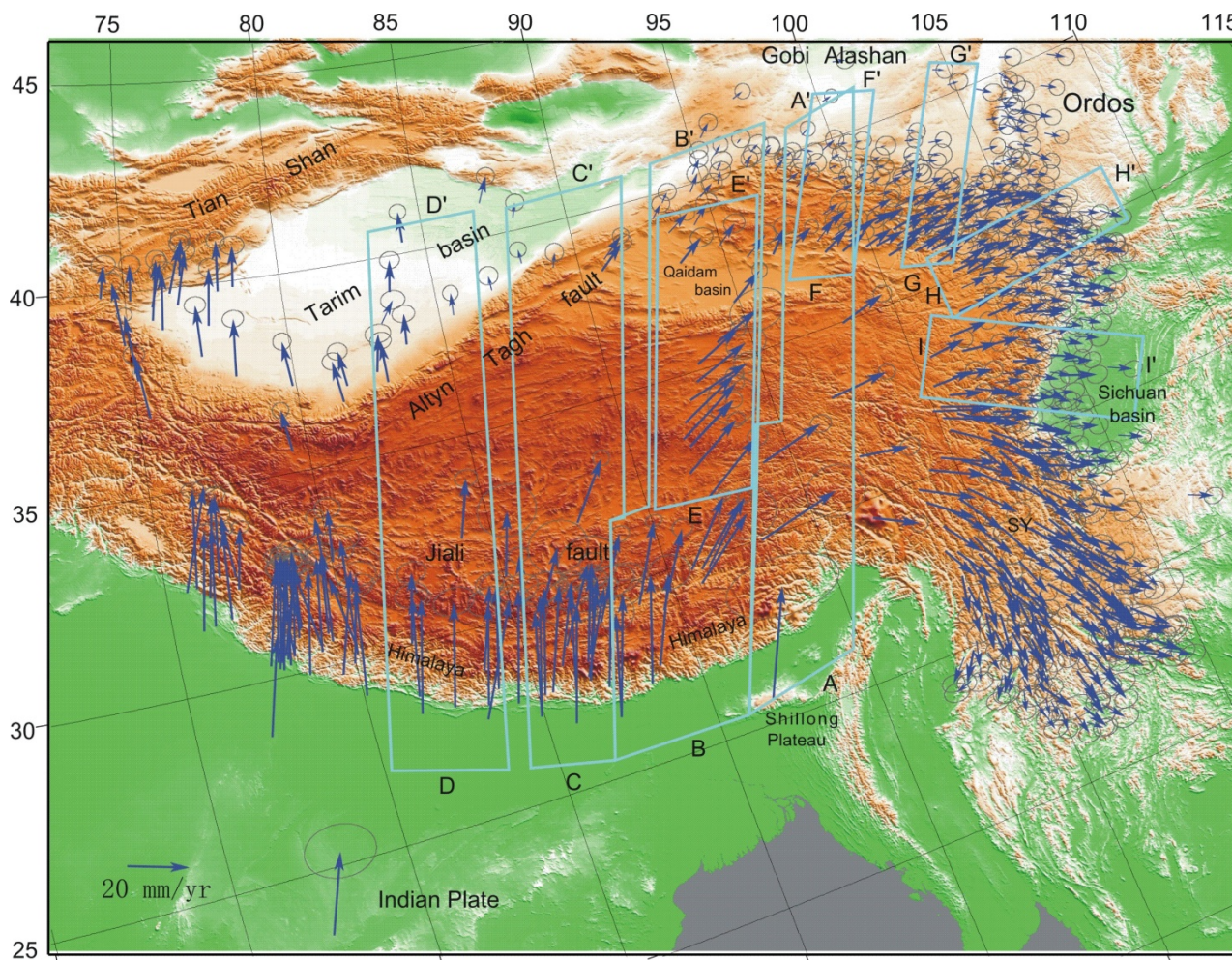
### Global Positioning System Messungen

GPS-Messungen von Oberflächenbewegungen und Geschwindigkeiten zeigen Gebiete mit fast konstanter Verformung zwischen den Hauptblattverschiebungen. Innerhalb des Plateaus tritt NNW-SSE Verkürzung in Richtung der Indien-Eurasien-Konvergenz mit einer Rate von 10 bis 15 mm/Jahr auf. Es gibt gleichzeitige, E-W Extension und das tibetische Hochplateau bewegt sich zusammen mit seinem nördlichen und östlichen Vorland ostwärts.



Aktive Bewegungen im tibetischen Plateau in mm/Jahr  
nach Zhang et al. 2004 *Geology* 32(9) 809-812

Die GPS-Geschwindigkeiten verringern sich entlang des Nordrandes der Tibet Hochebene von ungefähr 20 mm/Jahr am westlichen Ende bis auf null am östlichen Ende. Das Nordvorland verschiebt sich nach Nordost mit ca. 10 mm/Jahr. Dies zeigt an, dass die nördliche Grenze der Deformationszone im Norden der Hochebene liegt. Andere Bewegungen in der Gegend der östlichen Grenze der Tibet Hochebene zeigen radiale divergente Bewegungen an, wobei sich Südchina mit fast 10 mm/Jahr nach Ost-Südosten verschiebt, während sich die östliche Grenze der Tibet Hochebene mit ungefähr 15 mm/Jahr bewegt.



GPS-Geschwindigkeiten in und um das Tibetische Plateau im Bezug auf stabile Eurasiens.  
nach Zhang *et al.* 2004 *Geology* **32**(9) 809-812.

### Schlussfolgerung

Die Erdbebenausbreitung über Asien zeigt, dass die kontinentalen Teile der Lithosphärenplatten nicht so starr wie die ozeanischen Teile sind. Deformation der Kontinente breitet sich über Gebiete von Hunderten bis Tausenden von Kilometern aus, während sich die Verformung in den Ozeanen auf enge Verwerfungssysteme entlang der Plattengrenzen konzentriert, und konzentriert sich nicht auf einzelne Verwerfungen oder, wie entlang der ozeanischen Plattengrenzen. Im Allgemeinen scheint die Post-Kollisionskonvergenz von 2000-3000 km zwischen Indien und Asien, durch eine Kombination von

- (a) nordwärts gerichteter Unterschiebung von Teilen Indiens und Verschuppung der indischen Kruste,
- (b) durchdringender Verkürzung und Verdickung der asiatischen Lithosphäre, und
- (c) durch das Entweichen von kontinentalen Blöcken nach Osten entlang von Blattverschiebungen untergebracht worden zu sein.

Das Konzept der Indenter-Tektonik ist erfolgreich bei der Erklärung der räumlichen Verteilung und der Beziehung der verschiedenen Stile von Störungen und Deformation in einem sich verformenden Kontinent wie Asien. Jedoch zieht sie nicht die Krustenverdickung in Tibet in Betracht.

Die Einleitung zu diesem Kurs über Tektonik hat aufgefordert zu untersuchen, wie geographische Erscheinungen (Kartenverteilung und Topographie) und die Verformungsgeschichte von sowohl horizontalen bis zu 10-20 cm/Jahr als auch vertikalen bis zu 10-20 mm/Jahr Bewegungen abhängen. Ein weiteres Ziel war, einige der fundamentalen Unterschiede Verhalten sind auf wichtige mechanische Unterschiede zurückzuführen.

- Die Konvergenz in den Kontinenten ist anders als in den Ozeanen. Die ozeanische Lithosphäre bewegt sich als starre Platte, die entlang einer Ansammlung von Subduktionszonen in den Mantel gedrückt wird. Die kontinentale Lithosphäre schwimmt auf dem Mantel, wohingegen die ozeanische Lithosphäre mit zunehmendem Alter absinkt. Die Verteilung von Oberflächenerhebungen, Erdbeben und Verwerfungen über Asien zeigt, dass die Deformation auf den Kontinenten diffuser ist. Eine Zone kontinentaler Kompression wie Tibet ist eine Region, in der die Kruste verkürzt und verdickt wird. Die gleichzeitige Abnahme in der Oberfläche und Zunahme in der Dicke der kontinentalen Kruste führt zu Berggurten und Kollisionsplateaus.

Dadurch wird das Material der kontinentalen Kruste im Grossen und Ganzen erhalten. Es wird durch die Deformation umverteilt, aber weder durch Plattenerneuerung wesentlich vermehrt noch durch Subduktion verringert.

Der Deformationsstil, der zumindest in einzelnen Teilen der Kontinente beobachtet werden kann, deutet darauf hin, dass es in der kontinentalen Lithosphäre Kräfte gibt, die mit der Theorie der Plattentektonik nicht direkt erklärt werden können. So findet z.B. weit verbreitete Extension im Tibet nicht durch die Produktion neuer Lithosphäre an Spreizungszentren statt, sondern durch die weitverbreitete Ausdünnung der Kruste und wahrscheinlich auch der unteren Lithosphäre.

Das Endstadium der tektonischen Entwicklung vieler Gebirge ist möglicherweise ihr Kollaps durch Extension. Die Natur, die Grösse und der Ursprung der Kräfte, die kontinentale Deformation bewirken, sind eine Herausforderung für die aktuelle Forschung in der Geodynamik. Die Tektonik in Kontinenten ist nicht nur Plattentektonik.

### Frage

*Warum gibt es in den Alpen keine kontinentalen Plateaus und demzufolge verdickte Kruste äquivalent zu Tibet?*

## Empfohlene Literatur

- Armijo R., Tapponnier P., Mercier J.L. & Han T.-L. - 1986. Quaternary extension in southern Tibet: Field observations and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research*. **91** (B14), 13803-13872, 10.1029/JB091iB14p13803
- Barazangi M. & Ni J. - 1982. Velocities and propagation characteristics of *Pn* and *Sn* beneath the Himalayan arc and Tibetan plateau: Possible evidence for underthrusting of Indian continental lithosphere beneath Tibet. *Geology*. **10** (4), 179-185, 10.1130/0091-7613(1982)10<179:VAPCOP>2.0.CO;2
- Chen Z., Burchfiel B.C., Liu Y., King R.W., Royden L.H., Tang W., Wang E., Zhao J. & Zhang X. - 2000. Global Positioning System measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation. *Journal of Geophysical Research*. **105** (B7), 16 215-216 227, 10.1029/2000JB900092
- England P. & Houseman G. - 1989. Extension during continental convergence, with application to the Tibetan plateau. *Journal of Geophysical Research*. **94** (B12), 17561-17579, 10.1029/JB094iB12p17561
- England P.C. & Houseman G.A. - 1986. Finite strain calculations of continental deformation 2. Comparison with the India-Asia collision zone. *Journal of Geophysical Research*. **91** (B3), 3664-3676, 10.1029/JB091iB03p03664
- England P.C. & Houseman G.A. - 1988. The mechanics of the Tibetan Plateau. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. **A326** (1589), 301-320, 10.1098/rsta.1988.0089
- Liu M. & Yang Y.Q. - 2003. Extensional collapse of the Tibetan Plateau: Results of three-dimensional finite element modeling. *Journal of Geophysical Research*. **108** (8), 2301, doi: 2310.1029/2002JB002248,
- McNamara D.E., Walter W.R., Owens T.J. & Ammon C.J. - 1997. Upper mantle velocity structure beneath the Tibetan Plateau from *Pn* travel time tomography. *Journal of Geophysical Research*. **102** (B1), 493-505, 10.1029/96JB02112
- Molnar P., England P. & Martinod J. - 1993. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan plateau, and the Indian monsoon. *Review of Geophysics*. **31** (4), 357-396, 10.1029/93RG02030
- Molnar P. & Tapponnier P. - 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*. **189** (4201), 419-426, 0.1126/science.189.4201.419
- Ni J. & York J.E. - 1978. Late Cenozoic tectonics of the Tibetan plateau. *Journal of Geophysical Research*. **83** (B11), 5377-5384, 10.1029/JB083iB11p05377
- Nomade S., Renne P.R., Mo X.X., Zhao Z.D. & Zhou S. - 2004. Miocene volcanism in the Lhasa block, Tibet: spatial trends and geodynamic implications. *Earth and Planetary Science Letters*. **221** (1-4), 227-243, 10.1016/S0012-821X(04)00072-X
- Owens T.J. & Zandt G. - 1997. Implications of crustal property variations for models of Tibetan plateau evolution. *Nature*. **387** (6628), 37-43, 10.1038/387037a0
- Powell C.M. - 1986. Continental underplating model for the rise of the Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*. **81** (1), 79-94, 10.1016/0012-821X(86)90102-0
- Powell C.M. & Conaghan P.J. - 1975. Tectonic models of the Tibetan plateau. *Geology*. **3** (12), 727-731, 10.1130/0091-7613(1975)3<727:TMOTTP>2.0.CO;2
- Rodgers A.J. & Schwartz S.Y. - 1997. Low crustal velocities and mantle lithospheric variations in southern Tibet from regional *Pnl* waveforms. *Geophysical Research Letters*. **24** (1), 9-12, 10.1029/96GL03774

- Tapponnier P., Peltzer G., Le Dain A.Y., Armijo R. & Cobbold P. - 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*. **10** (12), 611-616, 10.1130/0091-7613(1982)10<611:PETIAN>2.0.CO;2
- Zhang P.-Z., Shen Z.K., Wang M., Gan W.J., Bürgmann R., P. M., Wang Q., Niu Z.J., Sun J.Z., Wu J.C., Sun H.R. & You X.Z. - 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology of the Pacific Ocean*. **32** (9), 809-812, 10.1130/G20554.1
- Zhao W.L. & Morgan W.J. - 1985. Uplift of Tibetan plateau. *Tectonics*. **4** (4), 359-369, 10.1029/TC004i004p00359

## Videos in der geologischen Bibliothek

Did Tibet cool the Earth? 1995 The Open University

Tibet - The Ice Mother 1994 D. Malone & D. Paterson BBC: Horizon

TIBET, where Continents Collide. part 1 only South Tibet and the Yarlung Suture 1989 David Howell Earthvision / SEPM