

# Three-dimensional numerical multilayer models for continental deformation

Application to the India-Asia collision

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Lechmann, Sarah M.

**Publication date:**

2012

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007595433>

**Rights / license:**

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

DISS. ETH NO. 20710

**Three-dimensional numerical multilayer models  
for continental deformation:  
Application to the India-Asia collision**

A dissertation submitted to  
ETH Zurich

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

**Sarah Maria Lechmann**  
MSc ETH in Earth Sciences

born 29.06.1984

citizen of  
Sumvitg (GR)

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Jean-Pierre Burg - ETH Zurich - Examiner  
Prof. Dr. Stefan M. Schmalholz - University of Lausanne - Co-examiner  
Prof. Dr. Boris J. P. Kaus - J. Gutenberg-University Mainz - Co-examiner  
Prof. Dr. Leigh H. Royden - Massachusetts Institute of Technology -  
Co-examiner

2012

# Summary

Understanding tectonic deformation within continents during collision and later gravitational collapse – especially in the Tibetan Plateau and the crustal antiforms of the Himalayan syntaxes – remains a major challenge. Most studies investigating the processes leading to the formation of these important features use simplified numerical or analytical models. Simplifying assumptions are made for both the mathematical equations governing the models and the processes under consideration. Models like the thin viscous sheet or the slip-line field theory, though focusing on specific processes, clarified the understanding of the considered processes, but only separately. To improve the knowledge and understanding of the respective roles of processes acting simultaneously during continent collision new three-dimensional (3D) models were developed in this thesis. These resulting models deliver new information on the behaviour and properties of the lithosphere.

This thesis presents the 3D numerical model of a continental lithosphere with both vertical and horizontal heterogeneities. The model is based on the finite element method and is written in C, using the PETSc library. It can simulate linear viscous, power-law viscous and temperature dependent viscosities.

Results of 3D models are compared to results from thin-sheet and two-dimensional (2D) models in order to assess the advantages and benefits of each of these approaches. Application of the 3D numerical model allows identifying and quantifying coeval processes that take place on a wide range of temporal and spatial scales along with the impact of different model and material parameters. Furthermore, stresses and deformation in 3D geological structures can be predicted precisely.

Thickening, buckling and lower crustal flow are recognized to be the main processes acting during continent collision. Buckling and lower crustal flow are particularly pronounced on the small scale (100's of km) and for power-law viscous rheologies. The thin-sheet model, in contrast, accounts for thickening and is a good approximation of the horizontal velocity field, especially on the large scale (1000's of km) and for linear viscous rheologies.

An existing elevated plateau or mountain has gravitational potential energy (GPE) which induces stresses and deviations from lithostatic pressure in the crust. Knowing the crustal thickness distribution, stresses can be predicted from lateral variations in GPE for simple large scale geometries. However, 3D numerical simulations are needed for complex structures. Not accounting for active continent indentation but separately studying stresses and deformation arising from lateral variations in GPE, reveals that

the Himalayan syntaxes are not due to buckling induced by excess GPE of the Himalayas or the Tibetan Plateau.

A realistic 3D model setup exhibiting a well constrained geometry, density and viscosity distribution of today's India-Asia collision zone, is presented. This model allows constraining material parameters and is a tool to test geophysical sections from seismological surveys. For viscosities of  $10^{21} - 10^{24}$  Pas the strength of the underplating Indian lower crust appears to have a moderate impact on surface strain rates and a minor impact on surface velocities. With Indian lower crustal viscosities of  $10^{21} - 10^{24}$  Pas it is possible to fit the horizontal surface velocity field known from GPS data over the larger collisional zone. For Indian lower crustal viscosities of  $10^{21} - 10^{22}$  Pas it is possible to correlate zones of high upper crustal stresses with the location of the Main Boundary Thrust and the Main Frontal Thrust of the Himalayas.

This thesis shows that mechanically layered 3D numerical models yield a more complete picture of the timing, location and relative importance of thickening, buckling and lower crustal flow during continent collision than simplified models of continent collision. The presented line of work, building up a detailed model both in terms of material parameters and geometry, opens new possibilities for future work on the role of different parts of the lithosphere.

# Resumaziun

Capir la deformaziun tectonica che ha liug els continents cu els collideschan resta ina gronda sfida – specialmein per il plateau Tibetan ed ellas antiformas crustalas dallas syntaxas dil Himalaya. La maioritad dils studis che perscruteschan ils process che formeschan quellus structuras impurtontas drovan models numerics ni analitics che ein simplificai. Supposiziuns simplificontas vegnan fatgas buca mo per las equaziuns matematikas sin las qualas ils models sebasan, mobein era per ils process intercuretgs. Models sco il “thin viscous sheet” (fegl fin viscos) e la teoria da “slip-line field” (feld da lingias ruschnontas), interquoran mintgamai mo in process specific, han denton tuttina contribuì alla capientscha dils process examinai. Per engrondir la savida e capientscha dalla muntada ed influenza dils differents process che opereschan simultanmein duront ina collisiun da continents, ein novs models treidimensiunals (3D) vegni sviluppai per questa lavur. Quels dattan a nus novas informaziuns davart il cumportament e las atgnadads dalla litosfera.

Quella lavur presenta il model 3D numeric dad ina litosfera continentala che cuntegn heterogenitads verticalas e horizontalas. Il model sebasea silla metoda dils elements finits ed ei screts en C utilisond la biblioteca PETSc. Il model sa simular viscositads linearas, potenzialas e talas ch’ein dependentas dalla temperatura.

Ils resultats dils models 3D vegnan cumparegliai cun resultats da models “thin-sheet” e cun models dusdimensiunals (2D) per giudicar ils avantatgs ed il nez da mintgina da quellus metodas. Cun duvrar models 3D numerics san ins definir e quantificar process che han liug sur grondas distanzas temporalas e spazialas sco era l’influenza da differents parameters dil model e da materials. Plinavon eis ei pusseivel da predir precisamein tensiuns e deformaziuns en structuras 3D geologicas.

Ils process principals che han liug duront ina collisiun continentala ein engrossar, faldar e cular ella part sutcrustala. Faldar e cular ella sutcrusta ein ils process dominants sin ina scala pintga (100s kilometers) e per ina reologia viscosa potenziala. Il model “thin-sheet” da l’altra vart manifestescha engrossaziun ed approximescha bein las spertadads horizontalas, spezialmein sin ina scala gronda (1000s kilometers) e per ina reologia viscosa lineara.

In plateau ni in cuolm existent ha energia potenziala gravitaziunala (EPG) che caschuna tensiuns e deviazions dalla pressiu litostatica ella crusta. Sche la distribuziun dalla grossezia crustala ei enconuschenta, eis ei pusseivel da predir tensiuns en geometrias semplas e lontanias, utilisond las variaziuns lateralas dall’EPG. Senza dubi drova ei simulaziuns 3D per structuras cumplexas. Sch’ins considerescha buca ch’in continent

stauscha activamein, mobein interquera separadamein las tensiuns e la deformaziun che vegnan dallas variaziuns lateralas dall'EPG, semuossi che las syntaxas dil Himalaya ein buc seformadas cun fauldaziun caschunada digl excess dall'EPG, ni dil Himalaya ni dil plateau Tibetan.

En questa lavur vegn presentau in model 3D realistic dalla situaziun dad ozildi dalla collisiun denter l'India e l'Asia. La geometria e la distribuziun da spessadads e viscositads ein circumscrettas precisamein. Il model survescha per definir parameters da materials e per verificar profils geofisicals da studis seismologics. Per viscositads denter  $10^{21}$  Pas e  $10^{24}$  Pas para la fermezia dalla sutcrusta indiana, ch'ei vegnida stuschada sut la crusta asiata, dad haver moderata influenza silla deformaziun superficiala e pintga influenza sillas spertadads superficialas. Sche la sutcrusta indiana ha ina viscositad denter  $10^{21}$  Pas e  $10^{24}$  Pas eis ei pusseivel dad agiustar las spertadads horizontalas superficialas cun indicaziuns da GPS. Supplementaramein, cun viscositads dalla sutcrusta indiana denter  $10^{21}$  Pas e  $10^{22}$  Pas eis ei pusseivel da correlar zonas dad aultas tensiuns ella crusta sisura cun la localitad dil Main Boundary Thrust e dil Main Frontal Thrust.

Quella lavur demonstrescha che models 3D numerics che differenzieschan funs mechanics dattan in maletg pli detagliau dalla distribuziun temporala e spaziala e dall'influenza dils process (engrossar, faldar, cular ella sutcrusta) che han liug duront ina collisiun continentala. Cun construir in model detagliau che concerna ils parameters da materials e la geometria arvan ins novas pusseivladads per studis futurs che interqueran l'influenza da differentas parts dalla litosfera.

# Zusammenfassung

Tektonische Deformation, die aufgrund von Kontinent-Kontinent-Kollision und späterem gravitativem Kollaps, innerhalb von Kontinenten stattfindet, zu verstehen, bleibt eine grosse Herausforderung – speziell in der Tibetischen Hochebene und in den Krustenantiformen der Syntaxen des Himalaya. Die meisten Studien, die Prozesse untersuchen, die zur Bildung dieser wichtigen Strukturen führen, verwenden vereinfachte numerische oder analytische Modelle. Vereinfachende Annahmen werden sowohl für die den Modellen zugrunde liegenden mathematischen Gleichungen als auch für die untersuchten Prozesse gemacht. Modelle wie das “thin viscous sheet” (dünnnes viskoses Blatt) oder die “slip-line field” (Rutschlinien-Feld) Theorie, betrachten zwar jeweils nur einen einzelnen Prozess, trugen aber massgeblich zum Verständnis dieses untersuchten Prozesses bei. Um das Wissen und das Verständnis der Bedeutung und des Einflusses der verschiedenen Prozesse, die gleichzeitig während einer Kontinent-Kontinent-Kollision wirken, zu verbessern, wurden in dieser Arbeit neue dreidimensionale (3D) Modelle entwickelt. Diese liefern neue Informationen zum Verhalten und zu den Eigenschaften der Lithosphäre.

In dieser Arbeit wird das 3D numerische Modell einer kontinentalen Lithosphäre, die sowohl vertikal als auch horizontal heterogen ist, vorgestellt. Das Modell basiert auf der Finite Elemente Methode und wurde in C mit Hilfe der PETSc Bibliothek geschrieben. Es kann lineare, Potenzgesetz- und temperaturabhängige Viskositäten simulieren.

Die Resultate der 3D Modelle werden mit Resultaten von “thin-sheet” und zweidimensionalen (2D) Modellen verglichen, um die Vorteile und den Nutzen dieser verschiedenen Ansätze zu beurteilen. Die Verwendung 3D numerischer Modelle erlaubt es, zeitgleiche Prozesse, die über grosse zeitliche und räumliche Massstäbe stattfinden, zu bestimmen und zu quantifizieren sowie gleichzeitig den Einfluss verschiedener Modell- und Materialparameter zu untersuchen. Ausserdem können Spannungen und Verformungen in 3D geologischen Strukturen präzise vorhergesagt werden.

Als Hauptprozesse, die während Kontinent-Kontinent-Kollisionen wirken, wurden Verdickung, Faltung und Fluss in der Unterkruste identifiziert. Faltung und Fluss in der Unterkruste herrschen auf kleinerem Massstab (100e von km) und bei einer viskosen Potenzgesetz-Rheologie vor. Das “thin-sheet” Modell hingegen eignet sich gut zum Aufzeigen von Verdickung und zur Approximation des horizontalen Geschwindigkeitsfeldes, insbesondere auf grossem Massstab (1000e von km) und für linear viskose Rheologien.

Eine bestehende Hochebene oder ein Berg besitzt Gravitationspotenzialenergie (GPE), was in der Kruste zu Spannungen und Abweichungen vom lithostatischen Druck führt. Ist die Verteilung der Krustendicke bekannt, können für einfache, grossräumige Geometrien Spannungen anhand der seitlichen Variationen des GPE vorhergesagt werden. Für komplexe Strukturen werden allerdings 3D numerische Simulationen benötigt. Betrachtet man nicht das aktive Eindringen eines Kontinents, sondern untersucht separat die Spannungen und die Deformation, die durch seitliche Variationen des GPEs hervorgerufen werden, zeigt sich, dass die Syntaxen des Himalaya nicht durch Faltung aufgrund eines Übermasses an GPE des Himalaya oder der Tibetischen Hochebene entstanden sind.

Es wird ein realistisches 3D Modell der heutigen Situation der Indien-Asien Kollisionszone präsentiert. Die Geometrie, Dichte- und Viskositätsverteilung des Modells sind gut eingegrenzt. Das Modell dient dazu, Materialparameter zu bestimmen und geophysikalische Profile aus seismologischen Studien zu überprüfen. Für Viskositäten zwischen  $10^{21}$  Pas und  $10^{24}$  Pas scheint die Festigkeit der unter Asien geschobenen indischen Unterkruste einen mässigen Einfluss auf die Verformungsraten an der Oberfläche und einen geringen Einfluss auf das oberflächliche Geschwindigkeitsfeld zu haben. Mit Viskositäten der indischen Unterkruste zwischen  $10^{21}$  Pas und  $10^{24}$  Pas ist es möglich, das horizontale Geschwindigkeitsfeld an der Oberfläche an GPS Daten anzugleichen. Für Viskositäten der indischen Unterkruste zwischen  $10^{21}$  Pas und  $10^{22}$  Pas ist es möglich, Zonen mit hohen Spannungen in der Oberkruste mit der Lage der Main Boundary Thrust und der Main Frontal Thrust zu korrelieren.

Diese Arbeit zeigt, dass mechanisch geschichtete 3D numerische Modelle, im Gegensatz zu vereinfachten Kollisionsmodellen, ein umfassenderes Bild der Zeitabfolge, der Lage und der relativen Bedeutung der Prozesse (Verdickung, Faltung und Fluss der Unterkruste) zeichnen, die während Kontinent-Kontinent-Kollisionen wirken. Die Vorgehensweise, ein in Bezug auf Materialparameter und Geometrie, detailliertes Modell aufzubauen, eröffnet neue Möglichkeiten für zukünftige Studien zur Bedeutung verschiedener Teile der Lithosphäre.