

Deformation, erosion and natural resources
in continental collision zones

Insight from scaled sandbox simulations

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Doktorgrades
doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)
im Fachbereich Geowissenschaften
der Freien Universität Berlin
vorgelegt von

Silvan Hoth

Potsdam, August 2005

Tag der Disputation: 09. November 2005

Gutachter

Prof. Dr. Onno Oncken (1. Gutachter)
Freie Universität Berlin, GeoForschungsZentrum Potsdam

Prof. Dr. Manfred Strecker (2. Gutachter)
Universität Potsdam

Sie begriffen, daß die Vernunft nur das einsieht, was sie selbst nach ihrem Entwurfe hervorbringt, daß sie mit Principien ihrer Urtheile nach beständigen Gesetzen vorgehen und die Natur nöthigen müsse auf ihre Fragen zu antworten, nicht aber sich von ihr allein gleichsam am Leitbände gängeln lassen müsse; denn sonst hängen zufällige, nach keinem vorher entworfenen Plane gemachte Beobachtungen gar nicht mit einem nothwendigen Gesetz zusammen, welches doch die Vernunft sucht und Bedarf...

Immanuel Kant, Zweite Vorrede zur Kritik der reinen Vernunft, Königsberg, 1787

Contents

Summary	iii
Zusammenfassung	v
1 Introduction	1
2 Orogen-scale erosion	5
3 Continental collision zones	13
3.1 Kinematic concepts of bivergent orogens	13
3.2 Kinematic models of fold and thrust belts	13
3.3 The Critical Coulomb Wedge concept	17
3.4 The minimum work concept of mountain building	23
4 Experimental method	25
4.1 Physical properties of analogue materials	26
4.2 Experimental setup	29
4.3 Data acquisition and processing with Particle Image Velocimetry	34
4.4 Data mining and its limitations	36
5 Kinematic boundary conditions and their influence on bivergent wedge evolution	41
5.1 Reference experiment	41
5.2 Experiments with other kinematic boundary conditions	50
5.3 Discussion	65
5.3.1 Four-staged evolutionary model for bivergent sand-wedges	65
5.3.2 Strain transfer in bivergent wedges	66
5.3.3 The timing of thrust initiation	72
5.3.4 The spacing of thrusts	72
5.3.5 Frontal accretion in the retro-wedge	73
5.3.6 Parameter combinations	75
5.3.7 Self-similar growth	76
5.4 Implications and predictions for natural bivergent wedges	77
5.5 Implications for erosion experiments	82

6	The influence of erosion on bivergent wedge evolution	83
6.1	Reference experiment without erosion	83
6.2	Experiments with erosion	86
6.3	Discussion	95
6.3.1	Concepts of bivergent wedge evolution and the accretion cycle	95
6.3.2	Discrete erosion versus continuous deformation	95
6.3.3	Influence of erosion on bivergent wedge kinematics	98
6.4	Implications and predictions for natural orogens	100
7	Deformation versus erosion	103
8	Foreland basin evolution and the growth of an orogenic wedge	105
8.1	Introduction	105
8.2	Method	106
8.3	Results and discussion	107
9	Perspectives	111
	Acknowledgements	113
	References	115
	Appendices	129
A	Abbreviations and symbols	131
B	Supplementary data on DVD	133
C	Technical specifications of tested springs	135
D	List of experiments	137
	Curriculum vitae	141

Summary

Mountain belts result from the interaction between deformation, flexure and surface processes. Previous research has either focused on the mechanics of orogenic evolution and thereby paid special attention to its shape, or on the influence of surface processes on deformation. Thus, both attempts follow the *bird's eye view*. However, conceptual models such as the Critical Coulomb Wedge concept or the forward- and the backward-breaking model of thrust propagation provide only little to no predictive power with respect to the magnitude and location of deformation and surface uplift. We therefore aim to elucidate the spatio-temporal evolution of strain-partitioning within and the associated surface uplift of bivergent wedges. However, such a methodological approach would require the *view from below*.

This challenge is addressed with two series of sandbox experiments, each with a specific purpose. The 1st experimental series was designed to analyse the influence of flexure, the mechanic stratigraphy as well as the strength contrast between the lower and the upper plate on the ratio between internal deformation versus foreland-ward propagation of deformation. With the 2nd experimental series, special emphasis was devoted to the effect of the location of erosion with respect to the convergence geometry as well as the mode of erosion on the tectonic mass transfer in bivergent wedges.

We introduce a setup, which allows for the first time in sandbox experiments, the simulation of load-driven flexure. Incorporation of Particle Image Velocimetry provided time-series of the incremental displacement field and its derivatives such as horizontal shear-strain. To facilitate interpretation and to successfully communicate results, two new display types, i. e., the surface uplift and the evolution of deformation map are introduced.

Based on the 1st experimental series we suggest a four-staged evolutionary model for bivergent orogenic wedges. An initial crustal scaled pop-up (stage I) or backfold is followed by a proto pro-wedge, in which frontal accretion dominates (stage II). Basal accretion commences if a mid-crustal detachment is present (stage III). Frontal accretion within the retro-wedge occurs during stage IV.

We propose the conceptual model of an accretion cycle. Each accretion cycle consists of a thrust initiation, an underthrusting and a re-activation phase, where the first and the third phase of two consecutive accretion cycles are coeval. It follows that strain transfer between thrusts is a gradual process. Furthermore, each accretion cycle initiates a surface uplift and a strain wave at the toe of the pro-wedge and both migrate coevally towards the retro-wedge. Thereby, strain accumulation and surface uplift depend on the phase within the accretion cycle and thus vary predictably in space and time. Although Mohr-Coulomb is time-independent, strain hardening and strain softening processes within fault zones determine the timing and magnitude of slip. We therefore consider the accretion cycle as an internal clock of orogenic deformation.

We strongly emphasise that this conceptual model combines previously unrelated observations, such as the periodicity of thrusting, the topographic evolution of bivergent wedges and the cumulative slip history of thrusts. Additionally, this conceptual model highlights farfield connections between the initiation of a new thrust within the pro-layer (cause) and the resulting “strain- and uplift pulse” at the retro-shear zone (response). However, the degree of “strain communication” between the pro- and the retro-wedge decreases, as the former grows laterally.

Surface uplift of the pro-wedge is highly episodic and reflects individual accretion cycles. Thereby, re-activation of thrusts leads to order-of-magnitude variations in surface uplift. Thus,

changes of the kinematic or mechanic boundary conditions as well as surface processes should not necessarily be invoked to explain the observed variability.

Continuous vertical stacking and retro-ward translation of basally accreted duplexes results in a smooth and dome-like shape of the axial-zone and the retro-wedge. We therefore question the possibility to detect basal accretion episodes within the surface uplift signal.

This conceptual model indicates further that geodetic, paleoseismologic and geologic estimates of fault slip are not necessarily the same. It follows that interpolation of slip rates from different temporal scales and resulting predictions of earthquake recurrence intervals can only be successful if the phase within the accretion cycle is known. In addition, each structure might have its own b -value, which changes through time as accretion proceeds. We finally explore further implications of the accretion cycle model with respect to kinematic modeling as well as fluid flow and hydrocarbon maturation studies.

Experimental results additionally suggest an end-member scenario in which either thrust spacing or the timing of thrust initiation is constant and the respective other parameter variable. Thus, one should be very careful while deriving one information from the other. This end-member model is thought to resemble the time- and the slip-predictable earthquake model, but on a larger spatial and temporal scale.

Based on the 2nd experimental series, we found that retro-wedge erosion amplifies the displacement of the basally accreted material, whereas pro-wedge erosion accelerates and additionally redirects the particle flow of the frontally accreted material. Pro- and retro-wedge erosion retard the propagation of deformation into the foreland. This effect is stronger for pro-wedge erosion. Retro-wedge erosion amplifies vertical growth and leads to increased strain accumulation along the retro shear-zone and the mid-level detachment. Thus,

cause (retro-wedge erosion) and response (deformation within the pro-wedge) are significantly offset in space. Since pro-wedge erosion evokes a complete decoupling of the retro-wedge from the pro-wedge, cause and response are spatially more closely related. Both results highlight the need for orogen-wide climate-tectonics studies. We also found that more focused erosion is associated with a more focused tectonic response.

Experimental results do further indicate that the kinematics of bivergent wedges are robust with respect to erosion. We therefore propose that only if erosion determines the active detachment, erosion has taken the lead.

Peripheral foreland basin systems form in direct response to orogenic loading. We therefore analytically explore the implications of the above results on the spatio-temporal evolution of foreland basin systems. Based on the observation that bivergent wedge growth follows a power law, we propose a kinematic model for the Flysch to Molasse transition. The latter would be thus an emergent result of the imposed kinematic boundary conditions. There would be thus no need to invoke a halt of convergence or a slab break-off.

We also found that retro-wedge erosion influences the spatio-temporal evolution of the proforeland basin system and should be thus taken into account. In addition, forebulge unconformities are preferred sites for Mississippi Valley Type deposits. Their formation might be controlled by an eroding orogen, hundreds of kilometers away.

Finally, boundary conditions do matter. The perception of how nature works commonly guides the setup of simulation studies. The results however, mirror only the interaction between the prescribed boundary conditions and thus influence the way nature is perceived. We therefore strongly suggest to examine the transferability of all boundary conditions to nature and to compare experimental with natural time series.

Zusammenfassung

Die räumlich-zeitliche Entwicklung von Kollisionsorogenen wird durch das Zusammenwirken von Deformation, Isostasie und Oberflächenprozessen kontrolliert. Bisherige Studien zur orogenen Entwicklung, welche im Wesentlichen auf dem kritischen Keil-Konzept beruhen, untersuchten einerseits den Einfluß der Materialeigenschaften auf die orogene Geometrie und analysierten andererseits den Einfluß von Erosion und Sedimentation auf die Verteilung von Deformation. Trotz der zum Teil sehr weitreichenden Implikationen des kritischen Keil-Konzepts hinsichtlich der Verteilung von Materialpfaden und Metamorphosegraden in orogenen Keilen, besitzt es nur eine begrenzte Vorhersagekraft bezüglich der räumlichen und zeitlichen Verteilung von Deformation und Oberflächenhebung.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die räumliche und zeitliche Verteilung von Deformation und Oberflächenhebung in bivergenten Keilen zu analysieren, gegebenenfalls Muster zu erkennen und diese in einen Prozesszusammenhang zu stellen. Letzteres würde nicht nur das Verständnis der geologischen Vergangenheit verbessern, es könnte auch zur genaueren Vorhersagbarkeit von Naturkatastrophen führen.

Dieser Herausforderung soll mit Hilfe zweier Serien skaliert 2D Simulationen begegnet werden. Dabei dient die erste Experimentserie der Klärung des Einflusses von Isostasie, mechanischer Stratigraphie und eines Festigkeitskontrastes zwischen Ober- und Unterplatte auf das Verhältnis von Interndeformation zur Propagation der Deformation. In der zweiten Experimentserie soll der Einfluß des Ortes maximaler Erosion hinsichtlich der Kollisionsgeometrie auf den tektonischen Massenfluß und die daran geknüpfte topographische Entwicklung bei jeweils zwei verschiedenen Erosionsmodi untersucht werden.

Der hierfür notwendige Experimentaufbau greift zum einen bestehende Konstruktionsansätze auf, erlaubt aber auch erstmalig die Simulation von auflastabhängiger Flexur. Der Einsatz von Particle Image Velocimetry ermöglicht die Berechnung des inkrementellen Partikelverschiebungsfeldes und seiner Ableitungen, inklusive der horizontalen Scherdeformation, als auch die Extraktion von Zeitreihen der Oberflächenhebung und der Störungsentwicklung. Diese Daten werden mit Hilfe zweier neu entwickelter Abbildungstypen, der Hebungs- und der Deformationskarte visualisiert.

Resultate der ersten Experimentserie belegen die gute Übereinstimmung mit bereits publizierten Ergebnissen hinsichtlich der generellen Entwicklung bivergenter Keile. Darüber hinausgehend postulieren wir ein Vier-Phasen Modell der orogenen Entwicklung, welches sich am Auftreten bestimmter Akkretionsmodi orientiert. Phase I ist durch die Bildung eines krustalen pop-up gekennzeichnet. In Phase II führt frontale Akkretion zur Herausbildung eines Proto-Prokeiles. Sofern ein interner Abscherhorizont vorhanden ist, kommt es in Phase III zur basalen Akkretion. Frontale Akkretion im Retrokeil markiert den Beginn der Phase IV.

Eines der Hauptresultate dieser Arbeit ist die Entwicklung des konzeptionellen Modelles Akkretionszyklus (*accretion cycle*). Demnach besteht jeder Akkretionszyklus aus einer *thrust initiation*, einer *underthrusting* und einer *re-activation phase*, wobei die letzte und die erste Phase zweier aufeinander folgender Akkretionszyklen zeitgleich sind. Dies belegt, daß der Transfer von Deformation zwischen zwei Überschiebungen ein gradueller und kein abrupter Prozess ist. Des Weiteren wird mit jedem Akkretionszyklus eine Hebungs- und Deformationswelle initiiert, welche sich durch den gesamten bivergenten Keil bis hin zum Retrokeil bewegt. Somit lassen sich Magnitude und Ort von Deformation und Oberflächen-

hebung in Abhängigkeit von der Phase im Akkretionszyklus vorhersagen. Diese Zeitabhängigkeit resultiert aus strain softening und strain hardening Prozessen in den Scherzonen. Der Akkretionszyklus kann somit als internes Metronom orogener Deformation angesehen werden. Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, daß das Akkretionszykluskonzept bisherige Einzelbeobachtungen nicht nur verknüpft sondern auch in einen Prozesszusammenhang stellt. Darunter fallen die Episodizität von Akkretion, die Oberflächenhebung und auch die Versatzentwicklung von Überschiebungen. Weiterhin zeigt dieses konzeptionelle Modell Kausalbeziehungen zwischen räumlich und zeitlich getrennten Phänomenen auf. So erzeugt die Initiierung eines neuen Überschiebungskörpers während der *underthrusting phase* einen Hebungs- und Deformationspuls entlang der Retroscherzone. Der Grad der Deformationspartitionierung zwischen Pro- und Retrokeil nimmt jedoch einer gedämpften Oszillation gleich, mit zunehmender Länge des Prokeils ab.

Die räumlich-zeitliche Entwicklung der Oberflächenhebung im Prokeil trägt einen episodischen Charakter, welcher sich durch die einzelnen Akkretionszyklen ergibt. Dabei kann es durch die Reaktivierung von Überschiebungen zu Änderungen der Hebungsbeträge um eine Größenordnung kommen. Somit müssen Änderungen der kinematischen oder dynamischen Randbedingungen als auch Änderungen im Erosions-Sedimentationsregime nicht notwendigerweise angenommen werden, um diese hohe Variabilität zu erklären. Im Gegensatz dazu erzeugt die kontinuierliche Stapelung basal akkretierter Duplexe in der axialen Zone und im Retrokeil ein eher domähnliches Hebungssignal, wobei sich die Bildung einzelner Duplexe nicht nachweisen ließ.

Weiterhin impliziert das konzeptionelle Modell des Akkretionszyklus, daß geodätisch, paläoseismologisch und geologisch ermittelte Überschiebungsraten nicht zwangsläufig übereinstim-

men müssen. Daraus folgt, daß die Interpolation von Versatzraten zwischen verschiedenen Zeitskalen und die sich daraus ergebenden Wiederkehrintervalle von Erdbeben nur erfolgreich sein kann, wenn die Phase im Akkretionszyklus bekannt ist. Demnach könnte jede Struktur mit einem unterschiedlichen b-Wert behaftet sein, welcher sich im Laufe des Akkretionszyklus ändert. Des Weiteren werden die oben vorgestellten Ergebnisse hinsichtlich ihrer Implikationen für kinematische Modellierungen, Fluiduntersuchungen als auch Kohlenwasserstoffgenese beleuchtet.

Die Ergebnisse der ersten Experimentreihe deuten außerdem ein Szenario an, in welchem entweder der zeitliche oder der räumliche Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Überschiebungen konstant ist und der jeweils andere Parameter erheblich variiert. Es scheint daher nicht möglich aus der Beobachtung eines Parameters, Schlußfolgerungen hinsichtlich eines anderen Parameters ziehen zu können. Ähnlichkeiten dieses Modells mit Erdbebenmodellen (*time-predictable versus slip-predictable*) sind beabsichtigt und kennzeichnen möglicherweise ähnliche Prozesse auf unterschiedlichen Zeit- und Längenskalen.

Ergebnisse der zweiten Experimentreihe zeigen, daß Prokeilerosion den Massenfluß des frontal akkretierten Materials beschleunigt und zu einer deutlichen Versteilung der Partikelpfade im Prokeil führt. Hingegen beschleunigt Retrokeilerosion den Massenfluß der basalen Akkretion. Sowohl Pro- als auch Retrokeilerosion verzögern die Propagation von Deformation in das Vorland, wobei dieser Effekt verstärkt bei Prokeilerosion auftritt. Retrokeilerosion steigert das vertikale Wachstum bivergenter Keile und führt zu einer erhöhten Akkumulation von Deformation entlang der Retroscherzone und des internen Abscherhorizontes. Somit evoziert Retrokeilerosion eine räumliche Entkoppelung von Ursache (Retrokeilerosion) und Wirkung (Deformation im Prokeil). Da Prokeilerosion

den Prokeil vom Retrokeil entkoppelt, stehen Ursache und Wirkung in einer engeren räumlichen Beziehung. Beide Resultate verdeutlichen, daß Klima-Tektonik-Studien immer das Gesamtsystem „Orogen“ in Betracht ziehen sollten.

Die Resultate deuten aber auch an, daß die Kinematik bivergenter Orogene sehr robust gegenüber der Erosion ist. Wir postulieren, daß ein Orogen nur dann in seiner Kinematik von der Erosion gesteuert wird, wenn letztere in der Lage ist, das aktive Abscherniveau und somit die Größe der Materialzufuhr zu bestimmen.

Periphere Vorlandbecken sind integraler Bestandteil kontinentaler Kollisionszonen. Im letzten Abschnitt werden die Auswirkungen der oben vorgestellten Ergebnisse auf die zeitlich-räumliche Entwicklung von Vorlandbecken untersucht. Basierend auf der Beobachtung, daß bivergente Orogene ein Höhen- und Längenwachstum zeigen, welches einem Potenzgesetz gehorcht, postulieren wir ein kinematisches Modell für den Flysch-Molasse Übergang. Letzterer wäre demnach ein Resultat der kinematischen Randbedingungen und nicht notwendigerweise ein Ergebnis der abklingenden Konvergenz oder eines *slab break off*. Weiterhin zeigen die Berechnungen, daß auch Retrokeilerosion einen erheblichen Einfluß auf die räumlich-zeitliche Entwicklung der Pro-Vorsenke hat. Überlegungen zur tektonostratigraphischen Position von Mississippi Valley Type Lagerstätten schließen sich an.

Ceterum censeo, daß die Vorstellung des Beobachters von der Natur seine Wahl der kinematischen und dynamischen Randbedingungen von physikalischen als auch numerischen Modellstudien beeinflußt. Die gewonnenen Resultate spiegeln jedoch nur das Zusammenwirken der Eingangsparameter wider und werden somit einschließlich ihrer Interpretation indirekt von der Vorstellung des Beobachters beeinflußt. Es scheint daher von großer Bedeutung die Übertragbarkeit aller experimentellen Randbedingungen und Zeitreihen auf die Natur zu prüfen.