

**Der Einfluss von rheologischer Heterogenität auf die
krustale Entkopplung in Orogenen: Hinweise aus
skalierten Analogexperimenten**

**DIPLOMARBEIT
IM FACHGEBIET GEOWISSENSCHAFTEN
UNIVERSITÄT POTSDAM**

VORGELEGT VON

ULRIKE SCHÖNROCK

2007

Gutachter

1 2

Dr. Nina Kukowski Prof. Dr. Manfred Strecker

Geoforschungszentrum Potsdam Institut für Geowissenschaften

Freie Universität Berlin Universität Potsdam

eingereicht im Juli 2007

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	8
1. Einführung	11
1.1. Konvergente Plattenränder	11
1.2. Orogenese	13
1.3. Forschungsgrundlagen und Ziele	15
1.4. Analogmodellierung	17
2. Physikalische Grundlagen	19
2.1. Deformationsverhalten	19
2.1.1. Elastische Verformung	20
2.1.2. Plastische Verformung	21
2.1.3. Viskoses Verhalten	23
2.2. Modelansätze	24
3. Messungen der Materialeigenschaften	27
3.1. Ringschergerät	27
3.2. Viskosimeter	30
4. Versuchsaufbau und Datenanalyse	34
4.1. Skalierung	34

Inhaltsverzeichnis

4.2. Vorversuche	34
4.3. Hauptversuche	36
4.4. Datenaufnahme	38
4.5. Datenauswertung	39
5. Vorversuche	41
5.1. Beschreibung der Versuche	41
5.2. Ergebnisse	43
6. Hauptversuche	45
6.1. Ergebnisse des Versuches V-11-01	45
6.2. Ergebnisse des Versuches V-11-02	51
6.3. Ergebnisse des Versuches V-11-03	57
7. Diskussion und Schlussfolgerungen	65
7.1. Vergleichsversuche	65
7.2. Diskussion	75
7.3. Ausblick	79
A. Versuchsdetails	88

Abbildungsverzeichnis

1.1. Konvergente Plattenränder a) Kontinent-Kontinent-Kollision b) Kontinent-Ozean-Kollision c) Ozean-Ozean-Kollision	12
1.2. vereinfachtes Andenprofil von West nach Ost (bearbeitet nach [?])	13
1.3. Kontinent-Kontinent-Kollision von der Indischen- und Eurasischen Platte mit Heraushebung des Himalayas und der Tibet- Plateaus im Miozän (bearbeitet nach [22]).	14
1.4. Schematisches Bild eines sich entwickelnden bivergenten Keil.	17
2.1. Oberflächenkräfte dargestellt durch die Normal-(F_n) und Scherkräfte (F_s), die im Körper Normal- und Scherspannung bewirken.	20
2.2. Spannungs und Dehnungsdiagramm bearbeitet nach [30].	21
2.3. Zweidimensionale Darstellung des Mohr-Coulomb-Kriterium: $\tau = c + \mu\sigma_n$	22
2.4. Viskoses Verhalten zwischen zwei Grenzflächen	24
2.5. Spannungszustand in einem kompressiven Keil (modifiziert nach Davis et al. 1983) (Parameter: α =Oberflächenwinkel, β =basaler Winkel, μ_I =interner Reibungskoeffizient, μ_B =basaler Reibungskoeffizient, λ =interner Porendruckparameter, λ_b =basaler Porendruckparameter, p =Dichte, σ_1 =maximale Hauptspannung, σ_3 =minimale Hauptspannung, ψ_0 =Winkel zwischen σ_1 und α , ψ_b =Winkel zwischen σ_3 und β)	25

Abbildungsverzeichnis

2.6. Keilentwicklung durch Deformation mit Detailansicht einer Störung in Bezug auf Geometrie und Spannungsverteilung (Θ Einfallswinkel der Störung, σ_n Normalspannung, σ_1 max.Spannung, σ_3 min.Spannung, τ Scherspannung) bearbeitet nach [21].	26
3.1. Das Ringschergerät wird verwendet um Materialeigenschaften von granularen Medien zu messen (N ist die Normalkraft, ω ist die Winkelgeschwindigkeit, F1 und F2 sind die Scherkräfte, nach Hoth 2006).	28
3.2. Spannungs-Deformationskurve von Sand und Variation der Probedichte als Funktion des Scherwinkels aus zwei Belastungszyklen mit undeformiertem und deformiertem Material. Der 1. Zyklus zeigt das Verhalten eines undeformierten Materials und der 2. Zyklus zeigt eine Reaktivierung des deformierten Material, dabei sind γ Scherwinkel und τ Scherspannung (modifiziert nach [18]).	29
3.3. a) Prinzip eines Kegel-Viskosimeter b) Abbildung des Kegel-Viskosimeter das zur Messung im GFZ-Labor verwendet wurde.	32
3.4. Viskositätsmessungen von den verwendeten Materialien (HTU-Gel/ Silikonöl)	33
4.1. Aufbau der analogen Sandkastenapparatur für die Vorversuche.	36
4.2. Aufbau der analogen Sandkastenapparatur für die Hauptversuche.	37
4.3. Deformationsbild vom Versuch V-11-03 sichtbar gekennzeichnet die Deformationsflächen der Schuppenbildung und der konjugierten Rücküberschiebung. Exy zeigt die horizontale Scherung.	39
4.4. Bild 95 vom Versuch 11-02 farbliche Darstellung der Vektorlängen in mm an Abscherhorizont zwischen dem Medium Sand und Silikonöl.	40
4.5. Vektorlänge am Abscherhorizont vom Bild 202 aus dem Versuch 11-02. . .	40
5.1. Endbild vom Vorversuch Vv-11-12 mit granularen Medium/ Glasperlen 400 μm als Basismaterial auf Teflonfolie.	42

Abbildungsverzeichnis

5.2.	5.2 Endbild vom Vorversuch Vv-11-20 mit viskosem Material/ HTU-Gel als Testmaterial.	43
6.1.	Foto vom Versuchsaufbau der Hauptapparatur.	46
6.2.	V-11-01 Bildnummer 52: Bildung eines <i>pop up</i> über der Singularität. . . .	46
6.3.	V-11-01 Bildnummer 100: Bildung eines <i>pop up</i> über der Singularität mit den dazugehörigen Deformationsflächen die den Pro- und Retokeil bilden .	47
6.4.	Entwicklungsverlauf des Prokeil vom Versuch V-11-01 a) zeigt die Konvergenz in cm die zur Neubildung einer Schuppe benötigt wird. b) zeigt den zeitlichen Verlauf die zwischen den Schuppenneubildungen (Typ1 klein(rot), Typ2 mittel(grün), Typ3 groß(blau)	47
6.5.	Der Geschwindigkeitsplot zeigt die Geschwindigkeitsminima und Maxima des Retokeils. Die Farbskala entspricht den Geschwindigkeiten in mm/s. Auf der x-Achse ist die Profillänge vom S-Punkt ausgehend dargestellt (siehe Abb. 6.3). Auf der y-Achse ist der gesamte Versuchsablauf in Sekunden dargestellt, so dass für jeden Zeitpunkt des Versuches eine Geschwindigkeit ablesbar ist.	48
6.6.	In der Abbildung sind Geschwindigkeitsprofile mit einer Entfernung von 3cm, 15cm, 25cm vom S-Punkt dargestellt. Auf der x-Achse ist der Versuchsablauf bis zum Bild 800 s zu sehen und auf der y-Achse die dazugehörigen Geschwindigkeiten. Zusätzlich ist mit einer vertikalen Linie die Schuppenbildung eingezeichnet, die zeigt das die Geschwindigkeit im Retrokeil kurz vor einer neuen Schuppe am größten ist.	49
6.7.	Die grüne Linie zeigt die Topographie vom Versuchs V-11-01.	49
6.8.	Entwicklungsverlauf des Prokeil vom Versuch V-11-02 a) zeigt die Konvergenz in cm die zur Neubildung einer Schuppe benötigt wird. b) zeigt den zeitlichen Verlauf die zwischen den Schuppenneubildungen (Typ1 klein(rot), Typ2 mittel(dunkelblau), Typ3 groß(orange), Typ4 (blau))	51

Abbildungsverzeichnis

6.9. In der Abbildung sind Geschwindigkeitsprofile mit einer Entfernung von 3cm, 5cm, 20cm, 25cm vom S-Punkt dargestellt. Auf der x-Achse ist der Versuchsablauf bis zum Bild 14000 s zu sehen und auf der y-Achse die dazugehörigen Geschwindigkeiten. Zusätzlich ist mit einer vertikalen Linie die Schuppenbildung eingezeichnet, die zeigt das die Geschwindigkeit im Retrokeil kurz vor einer neuen Schuppe am größten ist.	53
6.10. V-11-02 Geschwindigkeitsplot mit ausgewählten Profil bei Bildnummer 840. Im Profil a) ist ein Plateau zu erkennen, was einer Geschwindigkeit von 0,03mm/s entspricht. Aus Abbildung b) ist ersichtlich, dass sich das Plateau bei Bildnummer 710 einstellt.	54
6.11. V-11-02 Bild-856 zeigt den Beginn einer Rücküberschiebung im Retrokeil. .	54
6.12. Versuch V-11-02 Darstellung der Spannung in Profilen. Die ausgewählten Profile haben eine Entfernung von 2cm, 10cm, 17cm vom S-Punkt. In Abbildung a) sind zusätzlich die Zeitpunkte der Schuppenbildung eingetragen.	55
6.13. Die rote Linie zeigt die Topographie vom Versuchs V-11-01..	56
6.14. Die Abbildung zeigt das Endbild vom V-11-03. Dabei sind die rotierenden Markerhorizonte an der konjugierenden Rücküberschiebung (gelb) zu erkennen und die beiden <i>popup</i> im Retrokeil.	58
6.15. Entwicklungsverlauf des Prokeil vom Versuch V-11-03 a) zeigt die Konvergenz in cm die zur Neubildung einer Schuppe benötigt wird. b) zeigt den zeitlichen Verlauf die zwischen den einzelnen Schuppen (Typ1 klein(rot), Typ2 groß(blau))	58
6.16. V-11-03 Geschwindigkeitsplot mit ausgewähltem Profil bei Bildnummer 640. Im Profil a) ist ein Plateau zu erkennen, was einer Geschwindigkeit von 0,17mm/s entspricht. Aus Abbildung b) ist ersichtlich, dass sich das Plateau bei Bildnummer 600 einstellt.	60
6.17. Versuch V-11-03 Darstellung der Spannung in Profilen. Die ausgewählten Profile haben eine Entfernung von 2cm, 10cm, 17cm, 30cm vom S-Punkt. In a) sind zusätzlich die Zeitpunkte der Schuppenbildung eingetragen.	61

Abbildungsverzeichnis

6.18. Für den gesamten Versuch V-11-03 ist zu erkennen das ab der Bildnummer 600 eine einheitliche Spannung für den Bereich vom S-Punkt einstellt. Für den Bereich ab 30 cm gilt dies nicht mehr.	62
6.19. Die blaue Linie zeigt die Topographie vom Versuchs V-11-01.	63
6.20. Die gesamte Entwicklung des Versuchs V-11-03.	64
7.1. In dieser Abbildung sind die Schuppenentwicklungen im Bezug auf die benötigten Konvergenz von allen drei Versuchen gegenübergestellt.	66
7.2. In dieser Abbildung sind die Schuppenbildungen im Bezug auf Zeitabstände zwischen den Schuppen von allen drei Versuchen gegenübergestellt.	66
7.3. Fotos von den Endbilder der Versuche a) V-11-01 b) V-11-02 c) V-11-03	68
7.4. Geschwindigkeitsplots der Versuche (V-11-01 V-11-02 V-11-03) mit gleicher Intensitätsskala gegenübergestellt.	70
7.5. Spannungen mit einer Entfernung von 2cm und 3cm vom S-Punkt entfernt. a) Versuch V-11-02 zeigt Scherspannungen mit einem max. Wert von 200 Pa b) Versuch V-11-03 zeigt Scherspannungen mit einem max. Wert von 6 Pa	72
7.6. Scherspannungen von Versuch V-11-02 und V-11-03 gegenübergestellt.	73
7.7. Gegenüberstellung der Endbilder im Bezug auf den topographischen Verlauf: Versuch V-11-01 (grün), V-11-02 (rot), V-11-03 (blau).	74
7.8. Entwicklung der Pyrenäen in drei Stadien von der Oberkreide bis heute.(bearbeitet nach [9])	77
7.9. Pyrenäendarstellung von heute im Vergleich mit dem Versuch V-11-03 Pop up Strukturen im Retrokeil sind in beiden Darstellungen zu erkennen.	78

Tabellenverzeichnis

3.1. Ringschergemessene Materialien zur Ermittlung der physikalischen Eigenschaften 1ϕ Reibungskoeffizient max, 2ϕ Reibungskoeffizient stabil, 3ϕ Reibungskoeffizient dyn.	31
4.1. Physikalischen Parametern mit ihren Skalierungsfaktoren zwischen der Natur und den verwendeten Labormaterialien	35
7.1. Zusammenfassung der mechanischen und kinematischen Parameter und die daraus resultierenden Scherfestigkeiten an der Basis des Retrokeils.	71
A.1. Alle Vorversuche die in der Entwicklungsphase durchgeführt wurden sind in dieser Tabelle aufgelistet.	93
A.2. Versuch 11-01 Entwicklungen vom Prokeil im Bezug auf die Schuppenentwicklung.	93
A.3. Versuch 11-02 Entwicklungen vom Prokeil im Bezug auf die Schuppenentwicklung.	94
A.4. Versuch 11-03 Entwicklungen vom Prokeil im Bezug auf die Schuppenentwicklung.	95

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden granulare und viskose Medien eingesetzt, um eine mögliche krustale Entkoppelung in Orogenen mit Hilfe von skalierten Analogexperimenten zu untersuchen. Um diese Medien in den Analogexperimenten zu verwenden, müssen ihre Materialeigenschaften bestimmt werden. Diese Messungen wurden mit einem Ringschergerät und einen Viskosimeter durchgeführt. Die Experimente in denen durch Verkürzung bivergente Orogene aufgebaut wurden, wurden in einer zweidimensionalen Apparatur im Analoglabor des GFZ-Potsdam durchgeführt. Daten über die Strukturentwicklung und Kinematik der Modellorogene wurden mit einem optisch hochauflösenden digitalen Bildanalysesystem gewonnen.

Durch die Verwendung von verschiedenen Materialien an der Basis der sich entwickelnden Sandkeile sollte herausgefunden werden, wie sie auf die Deformation Einfluss nehmen und unter welchen Bedingungen Entkopplungen innerhalb des Systems auftritt, die sich als Rücküberschiebungen im Retrokeil zeigt. Dieses entspricht einem Abscherhorizont innerhalb der Kruste. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden zuerst Vorversuche durchgeführt, in denen verschiedene Materialien in Kombination mit wechselnden Geometrien des Versuchsaufbau untersucht wurden. Dabei wurden immer nur ein Parameter verändert, um die jeweiligen Veränderungen bei der Keilentwicklung besser zu analysieren. Als Ergebniss der Vorversuche zeigte sich, dass sich bei der Verwendung von viskosem Material, Deformationen im Retrokeil entwickelten. Bei den anschließenden Hauptversuchen wurden Materialien mit verschiedenen Viskositäten verwendet. Zum Vergleich wurde

Tabellenverzeichnis

auch ein Versuch mit granularen Medien durchgeführt, bei dem eine sehr schwache Basis verwendet wurde, was durch Glasperlen in Kombination von Teflon erreicht wurde.

In den Versuchen mit viskosen Materialien konnten die Scherspannungen an der Basis der Keile ermittelt werden. Dabei zeigte sich, dass bei der Verwendung von Materialien mit einer niedrigen Viskosität die Entkopplung innerhalb des Systems zu einem früheren Zeitpunkt eintritt, als bei hochviskosen Medien. Durch diese Entkopplung entwickeln sich im Retrokeil Deformationen, wie zum Beispiel in Form von *popup* Strukturen. Die entstandenen Deformationsstrukturen im Keil wirken sich auf dessen Topographie aus. So ist zu sehen, dass sich der Keil durch einen hochviskosen Abscherhorizont in seiner Basis breiter ausbildet. Durch diese Entwicklung ist er in der Lage, seine Keilhöhe zu vergrößern. Bei der Verwendung von niedrigviskosen Materialien ist die Basis sehr schwach, und der Keil baut sich unter Ausbildung von mehreren konjugierten Rücküberschiebungen auf. Dabei bildet sich an der Keilspitze ein Plateau. Mit den Ergebnissen der hier vorgestellten Versuche lassen sich die Strukturen mit Entwicklungsstadien der Pyrenäen vergleichen. So sind im Hinterland der Pyrenäen Strukturen zu erkennen, die vergleichbar sind mit den Strukturen des Retrokeils vom Versuch, der eine niedrigviskose Basis hat.