

Technische Universität Bergakademie Freiberg  
Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau  
Institut für Geologie  
Lehrstuhl für Tektonophysik



Helmholtz-Zentrum Potsdam  
Deutsches GeoForschungszentrum GFZ  
Department 3 Geodynamik und Geomaterialien  
Sektion 3.1 Dynamik der Lithosphäre



Diplomarbeit

# The interaction of two indenters in analogue experiments and implications for the Tajik fold-and-thrust belt

Karsten Reiter

Geologie/Paläontologie  
Matrikelnummer: 46 810

17. Mai 2010

Betreuer/1. Korrektor:

Prof. Dr. Nina Kukowski  
GFZ Potsdam, jetzt:  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

2. Korrektor:

Prof. Dr. Lothar Ratschbacher  
TU Bergakademie Freiberg

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, habe ich in jedem einzelnen Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Diese Versicherung bezieht sich auch auf die bildlichen Darstellungen.

## **Statutory Declaration**

I declare that the work presented in this thesis is, to the best of my knowledge and belief, original except as acknowledged in the text. Passages in the text, which have been taken literally or analogously from other sources, are marked as such. This statement also includes any figures.

17. Mai 2010

Karsten Reiter

## Abstract

Scaled analogue experiments are used to investigate the indentation of two basement blocks into a sedimentary basin and the formation of a fold-and-thrust belt. The experimental set-up has two indenters moving in parallel with a velocity difference in which the slow indenter moves with a relative velocity ranging from 40–80 % of that of the fast one. In a first experimental series quartz sand and low-friction glass beads represent the sediment stack and its basal detachment, respectively; silicone oil simulates a viscous detachment in the second series of experiments. The surface evolution and the spatio-temporal strain distribution are derived from particle image velocimetry (PIV). Together with the 3D finite structure derived by cutting the models at the end of each experiment, this allows the analysis of the structural evolution of the experimental wedges.

Thrusting wedge development depends crucially on the relative velocity: When the slow indenter moves with a velocity of more than 55 % of the fast one, a single curved thrust wedge develops. The wedge becomes decoupled along strike-slip zone at large velocity differences, i.e. when the slow indenter moves slower than 55 % of the velocity of the faster one. Consequently the thrust front is strongly curved at high (55–60 %) and smoothly curved at low velocity differences (70–80 %); in all cases curvature increases during indentation. Along the most strongly curved portion of the thrust wedge, the transfer zone rise, particle rotation and material transport oblique to the indentation direction occur directed toward the front of the slow indenter. Thrusting cycles are timed by the fast indenter and influence thrusting in front of the slow indenter. Thrusts nucleate in front of the fast indenter wedge and propagate laterally to the slow indenter front. This implies distant effects of wedge growth active hundreds of kilometres along-strike of orogens.

Silicone oil as a detachment induces a low-angle wedge, which is less curved than in the glass beads experiments, and shows variable thrust vergence with fore- and back-thrusts. We compare our experimental results with the curved fold-and-thrust belts of the Tajik basin in front of the Hindu-Kush and Pamir indenters; our results are able to explain several first-order features.

## Zusammenfassung

Mittels skaliertes Analogexperimente wurde die Entstehung und Deformation eines Falten- und Überschiebungsgürtels durch das Einpressen von zwei rigiden Blöcken in ein sedimentäres Becken untersucht. Der experimentelle Aufbau besteht aus zwei Indentern, welche sich parallel bewegen. Dabei wurde eine Spanne zwischen 40 % und 80 % Geschwindigkeit des langsamen Indenters im Verhältnis zu dem schnellen untersucht. In der ersten Experimentserie repräsentiert Quarzsand die Beckensedimente und Glaskugeln mit geringer Reibung das Detachment. Silikonöl verkörpert in der zweiten Experimentserie das Detachment. Mit der Particle-Image-Velocimetry-Technik wurde die Entwicklung der Oberfläche aufgezeichnet, woraus die raum-zeitliche Deformationsverteilung abgeleitet wurde. Dies zusammen mit den 3D-Strukturen, beobachtet an Profilschnitten in den Modellen, erlaubt die Analyse der strukturellen Entwicklung der experimentellen Keile vor den Indentern.

Wenn sich der langsame Indenter mit einer Geschwindigkeit von mehr als mit 55 % derer des schnellen Indenters bewegt, dann entwickelt sich ein gebogener Überschiebungskeil. Bei größeren Geschwindigkeitsunterschieden, wenn sich also der langsame Indenter mit weniger als 55 % Geschwindigkeit des schnellen bewegt, entkoppelt der Keil. Die Überschiebungsfront ist stark gebogen bei hohen (55–60 %) und sanft gebogen bei geringen Geschwindigkeitsunterschieden (70–80 %), die Gebogenheit nimmt während der Entwicklung zu. In der Transferzone, dem Teil des Überschiebungskeiles, welcher gebogen ist, findet Rotation und seitlicher Materialtransport in Richtung des Vorlandes des langsamen Indenter statt. Die Überschiebungen entstehen in der Front des schnellen Indenterkeiles und breiten sich seitlich zu der langsamen Indenterfront aus, beeinflussen das Keilwachstum dort. Das bedeutet auf die Natur übertragen, dass sich Fernwirkungen entlang des Streichens der Überschiebungsfront über mehr als 300 km entwickeln können.

Das Silikonöl-Detachment bewirkt einen niedrigeren Keilwinkel, welcher weniger gebogen ist, als in Glaskugelexperimenten. Dabei zeigt sich auch eine variable Überschiebungsrichtung mit Vor- und Rück-Überschiebungen. Die Experimentergebnisse werden mit dem Falten- und Überschiebungsgürtel des Tadschikischen Beckens verglichen. Die Ergebnisse dieser Studie erklären einige Messergebnisse und Großstrukturen des Beckens.

## Vorwort und Danksagungen

Der Hauptteil der Arbeit ist so verfasst worden, dass er in einer wissenschaftlichen Publikation veröffentlicht werden kann. Das Manuskript wurde bereits zur Überprüfung eingereicht. Deshalb fehlen die in einer Diplomarbeit notwendigen detaillierten Einleitungen im Hauptteil der Diplomarbeit, welche in die einzelnen Themengebiete der Arbeit einführen. Trotzdem wurden einige Kapitel zur Einführung verfasst, welche in den Anlagen enthalten sind. Weitere detaillierte Abbildungen sind zusätzlich in den Anlagen enthalten, auf die aber vom Hauptteil aus nicht verwiesen wird.

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen beiden Betreuern für die sehr gute Unterstützung bedanken, Prof. Nina Kukowski (GFZ-Potsdam, jetzt Friedrich-Schiller-Universität Jena) besonders für die methodische Anleitung, Hilfestellung und Labornutzung, sowie Prof. Lothar Ratschbacher für die Idee der Arbeit, wertvolle Anregungen und regionalgeologische Unterstützung. Mein Dank geht an die Sektion 3.1 des GeoForschungsZentrums Potsdam für die Bereitstellung des Arbeitsplatzes und die kreativ-entspannte Arbeitsatmosphäre. Die Unterstützung war sehr vielschichtig, neben methodischer und technischer Hilfestellung auch regionalgeologische Diskussionen und Anregungen sowie der Korrektur der Arbeit. Beispielfhaft sollen hier Dr. Matthias Rosenau und Dr. David Boutelier erwähnt werden, die vor allem bei der Gestaltung des Aufbaus und der Anwendung der Aufzeichnungstechnik behilflich waren. Thomas Ziegenhagen und Frank Neumann sei gedankt für technische Unterstützung und Magdalena Bartels für die Umsetzung von einigen Grafiken. Weiterhin möchte ich mich bei Dr. Matthias Rosenau, Anne Schöpa, Dr. Silvan Hoth, Michael Warsitzka und Christian Sippl für Korrekturen und Diskussionen bedanken. Vielen Dank an den *Verein Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg e.V.* für die finanzielle Unterstützung eines Kongressbesuches.

Besonderer Dank gebührt meiner Mutter Margitt Reiter für die finanzielle Unterstützung während des Studiums sowie Dr. Ulrich Sebastian, ohne ihn hätte ich vielleicht nicht Geologie studiert. Bedanken möchte ich mich auch bei allen Freunden und WG-Mitbewohnern in Freiberg und Potsdam für die gemeinsamen letzten Jahre.

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Experimental set-up</b>	<b>4</b>
2.1	Previous analogue indenter models of curved fold-and-thrust belts . . . . .	4
2.2	Set-up of the sandbox experiments . . . . .	5
2.3	Material properties and scaling . . . . .	6
2.4	3D-Particle Image Velocimetry (3D-PIV) and strain analysis . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Results</b>	<b>10</b>
3.1	Relative velocity experiments with glass beads detachment . . . . .	10
3.1.1	Evolution of the wedge(s) in front of the indenters . . . . .	11
3.1.2	Lateral material transport and rotation in the transfer zone . . . . .	13
3.1.3	Lateral thrust propagation . . . . .	16
3.1.4	Topography of the models in front of the two indenters . . . . .	19
3.2	Second experiment series with a viscous silicone oil detachment . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Discussion</b>	<b>22</b>
4.1	Deformation of the experimental wedge in front of two indenters . . . . .	22
4.2	Comparison of exp. results with the Tajik fold-and-thrust belt . . . . .	25
4.3	Application of the two indenter model to other regions . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Conclusions</b>	<b>29</b>
	<b>References</b>	<b>30</b>
	<b>Appendices</b>	<b>40</b>
<b>A</b>	<b>Detailed remarks</b>	<b>42</b>
	Geological setting of the Tajik basin . . . . .	42
	Particle Image Velocimetry . . . . .	51
<b>B</b>	<b>Figures</b>	<b>55</b>
<b>C</b>	<b>Content of compact disk (enclosed)</b>	<b>69</b>

# List of Figures

1.1	Morphotectonic map of Central Asia and the Tajik basin . . . . .	1
1.2	Working hypothesis of two indenters . . . . .	2
2.1	Parameters controlling generation of a curved fold-and-thrust belt . . . . .	5
2.2	Sketch of the experimental set-up and mechanical stratigraphy . . . . .	6
3.1	Wedge structures with glass beads and silicone oil detachment . . . . .	10
3.2	Picture of the 70 % experiment in its final stage . . . . .	12
3.3	Structure map of the analogue-material experiments . . . . .	13
3.4	Development of the surface in all glass beads experiments . . . . .	14
3.5	Overview of lateral material transport in the transfer zone . . . . .	15
3.6	Counter-clockwise rotation in the transfer zone between the indenters . . . . .	16
3.7	Measurement of thrust distances in front of the slow indenter . . . . .	17
3.8	Thrust widths and wedge growth in front of the slow indenter . . . . .	18
3.9	Final stage of gb40, gb60, gb80, si60 and si-gb60 in 3D view . . . . .	20
3.10	Different thrust vergence in the same surface thrust . . . . .	21
4.1	Surface development of the experiments gb60, si60 and si-gb60 . . . . .	24
A.1	Position of Greater India during the last 80 Myr . . . . .	43
A.2	Tectonic sketch map of the eastern Indo-Eurasian collision zone . . . . .	44
A.3	Geological map and cross-sections of the Tajik depression . . . . .	46
A.4	Simplified columnar section of the Tajik basin . . . . .	48
A.5	Sketch of Image cross correlation . . . . .	51
A.6	Principle of multi-pass cross-correlation . . . . .	52
A.7	Stereoscopic recording for 3D-PIV . . . . .	53
A.8	Work flow of the 3D-PIV analysis . . . . .	54
A.9	Computation of the topography by cross-correlation function . . . . .	54
B.1	Cross-sections of the 40 % experiment (gb40) . . . . .	56
B.2	Cross-sections of the 50 % experiment (gb50) . . . . .	57
B.3	Cross-sections of the 55 % experiment (gb55) . . . . .	58
B.4	Cross-sections of the 60 % experiment (gb60) . . . . .	59
B.5	Cross-sections of the 70 % experiment (gb70) . . . . .	60
B.6	Cross-sections of the 80 % experiment (gb80) . . . . .	61
B.7	Cross-sections of the experiment with silicone oil detachment (si60) . . . . .	62
B.8	Cross-sections of the experiment with a mixed detachment (si-gb60) . . . . .	63
B.9	Overview of the surface angles in all experiments . . . . .	64
B.10	Overview of the surface uplift during the experiments with glass beads . . . . .	65
B.11	Overview of different curvature attributes I of gb60 . . . . .	66
B.12	Overview of different curvature attributes II of gb60 . . . . .	67
B.13	Pictures of the 70 % experiment in the final stage . . . . .	68

# List of Tables

2.1	Material properties of granular materials . . . . .	7
2.2	Scaling of the model properties . . . . .	8
3.1	Parameters used in the experimental series . . . . .	11
4.1	Comparison of thrust velocities to nature . . . . .	23