

Ilka Hamann

**Die Entstehung scheinbarer Boudinagestrukturen
in Pegmatiten und Quarzadern
anhand von Analogexperimenten und
einem Geländebeispiel aus dem Cap de Creus Gebiet (NE Spanien)**

Diplomarbeit

Betreuer:

Prof. Dr. Cees. W. Passchier (Universität Mainz)

Prof. Dr. Paul D. Bons (Universität Tübingen)

Institut für Geowissenschaften
der
Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Mainz
September, 2002

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Mainz, September 2002

„Eppur si muove!“
Galilei

Danksagung

Ich möchte als erstes Paul Bons und Cees Passchier nicht nur für die Idee und Vergabe dieser spannenden Arbeit danken, sondern auch für den motivierenden Enthusiasmus, zahlreiche Anregungen und Kritiken. Paul Bons danke ich im Speziellen für die aktive Teilnahme und Unterstützung, trotz der räumlichen Distanz. Für praktische Unterstützung, besonders die Konstruktion des Prototypen des Öffnungsobjekts möchte ich mich bei Cees Passchier besonders bedanken.

Jordi Carreras und Elena Druguet stellten viele Fotos und Informationen zur Verfügung, die die Geländearbeit sehr unterstützten. Vielen Dank für alle ihre Hilfen.

Finanzielle Unterstützung in der einen Woche Geländearbeit erhielt ich vom PPP-Projekt des DAAD mit Spanien.

Daniel Köhn, Jochen Arnold und Nicolas Walte danke ich für die Hilfestellungen, (besonders bei nervenaufreibenden Computerproblemchen), Anregungen und Mutzuspruch jeglicher Art. Nico hat mit mir die erste, schwierige Experimentphase gemeinsam besprochen, wofür ich ihm sehr verbunden bin.

Für tatkräftige Unterstützung bei den oft langwierigen Experimenten und fürs „Fest-an-die-Sache-Glauben“, wenn mal nicht alles lief wie es sollte, danke ich Christian Weikusat. Ohne ihn hätte ich in den gelegentlich auftretenden Löchern der Desillusion oft sicher länger verweilt.

Zum Schluß danke ich meinen Eltern, dass sie mir dieses aufregende Studium ermöglicht haben, immer mitfiebernd dabei sind und einfach so sind, wie sie sind.

Abstract

In the Cap de Creus area (NE Spain), pegmatites are found in metasediments that experienced polyphase deformation. The pegmatites form lens-shaped bodies that are arranged in strings. Structural elements are deflected around the pegmatite bodies. Up to now, these pegmatite structures were interpreted as boudins that resulted from stretching. However, distinct intrusion structures contradict this interpretation. Inflation and collapse as emplacement mechanisms can produce structures that are quite similar to boudins. Analogue experiments reveal the differences in structures and strain distribution between emplacement and boudinage. Deformation and deflections of structural elements with boudinage are much more intense than in case of inflation and collapse. Structural elements, such as bedding and cleavage, commonly cut across „boudin necks“ at Cap de Creus. This cannot occur in case of boudinage. Comparison of the Cap de Creus pegmatites with the analogue experiments shows that emplacement is the main mechanism that produced the particular shape and arrangement of pegmatite bodies. Several published strain measurements based on boudinage theory need to be reconsidered.

Kurzfassung

Im Cap de Creus Gebiet (NE Spanien) treten Pegmatite in Metasedimenten auf, die mehrphasig tektonisch überprägt wurden. Die Pegmatite bilden linsenförmige Körper, die als Reihen zu verfolgen sind. Die Strukturelemente sind um die Pegmatitkörper herum verbogen. Als Entstehungsmechanismus dieser Objekte wurde bislang Boudinage angenommen. Deutlich typische Intrusionsstrukturen sprechen jedoch gegen Boudinage. Inflation und Kollabieren als Inplatznahmemechanismen von Pegmatitkörpern können boudinähnliche Formen bilden. Analogexperimente zu den Entstehungsmechanismen (Inplatznahme und Boudinage) machen die Unterschiede der Strukturen um die Körper und die Unterschiede der Deformationsfelder deutlich. Die Deformation und Verbiegungen der Strukturelemente sind bei Boudinage durch Extension sehr viel höher als bei Inflation oder Kollaps. Ein Durchlaufen von Strukturen durch Boudinnecks ist nicht möglich. Der Vergleich der Cap de Creus Pegmatite mit den Analogexperimenten zeigt, dass Inplatznahme der Hauptmechanismus ist, um die Form der Pegmatitkörper zu erzeugen. Einige der anhand der Boudinagetheorie durchgeführten Verformungsmessungen müssen daher neu überdacht werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Fragestellung	1
2 Geländebeispiel	3
2.1 Einleitung	3
2.1.1. Geologie der Pyrenäen im Überblick	3
2.1.2 Geologie von Cap de Creus	5
2.2 Pegmatite	10
2.2.1 Einleitung	10
2.2.2 Strukturen	12
2.3 Quarzadern	19
2.3.1 Älteste Quarzadern	19
2.3.2 Junge Quarzadern	20
2.4 Zusammenfassung und Diskussion der Strukturen	20
2.5 Alternativen zur Boudinage	23
3 Analogexperimente	26
3.1 Einleitung	26
3.2 Methode	27
3.2.1 Scherapparat	27
3.2.2 Materialien	28
3.2.3 Blankoexperimente	30
3.2.4 Vorversuche	32
3.2.5 Auswertungsmethoden	35
3.3 Durchführung	37
3.3.1 Echte Boudinage	37
3.3.2 Inflation	39
3.3.3 Kollabieren	42
3.4 Resultate	43
3.4.1 Allgemeine graphische Auswertung	44
3.4.2 Spezielle graphische Auswertung	54
3.4.3 Strainanalyse	58
4 Vergleich des Geländebeispiels mit den Experimenten	67
5 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	74
6 Literaturverzeichnis	77
Fototafeln	
Anhang	

1 Einleitung

Unterschiedliche Extensionen in verschiedenen kompetenten Lagen eines Gesteinsverbandes führen zur Fragmentierung der kompetenteren Schicht. Diese Bruchstücke bilden im Anschnitt meist kissenförmige Objekte (Boudins), in der dritten Dimension sehen diese Körper länglich zylindrisch aus. Bei fortschreitender Extension werden sie voneinander getrennt. Die dabei entstehenden Zwischenräume werden Boudinnecks genannt. Boudinage wurde vielfach in der Literatur beschrieben (u. a. CLOOS 1947, LLOYD et. al. 1982, SENGUPTA 1983, NEURATH & SMITH 1982). Boudins werden zur Strainanalyse in deformierten Gesteinen verwendet. Dabei kann die Extension ermittelt werden, indem die ursprüngliche Länge der Schicht (aus der Summe der Längen der Einzelboudins) mit der heutigen Länge der Boudinreihe (inklusive der Boudinnecks) verglichen wird (RAMSEY & HUBER 1983, S. 7). Bei dieser Untersuchung des Strains geht man davon aus, dass die Boudins vor der Deformation eine gleichmäßig mächtige Schicht bildeten. Dies kann man bei sedimentären Schichten annehmen.

Intrusiva können auch gleichmäßig mächtige Gänge bilden und ebenso wie sedimentäre Schichten boudiniert werden. Bei Pegmatiten allerdings handelt es sich meist um unregelmäßige Formen. Die Form, Orientierung und Größe der Intrusionskörper von Pegmatiten werden von einem komplexen Zusammenspiel des Drucks der Pegmatitschmelze, der Rheologie des Umgebungsgesteins und lithostatischen und äußeren Beanspruchungsbedingungen am Ort und zur Zeit des Eindringens gesteuert (BRISBIN 1986). Die Pegmatite von Cap de Creus (Nordost Spanien) wurden bisher als Boudins interpretiert (z. B. VICTOR 1996, DRUGUET et. al. 1997). Für Boudins ungewöhnliche Erscheinungen an diesen Körpern ließen daran Zweifel aufkommen (siehe Kap. 2.2 und 2.4).

1.1 Fragestellung

Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit ist es, die Herkunft und Bildung boudinähnlicher Strukturen in Adern, wie Pegmatiten und Quarzadern, zu untersuchen. Dazu werden Pegmatit- und Quarzgangbeispiele aus Cap de Creus detailliert

beschrieben und Analogexperimente zur Modellierung dieser Strukturen vorgestellt. Eine Vorhypothese ist dabei die Bildung boudinähnlicher Strukturen durch Inplatznahme (Pseudoboudinage). Die Analogexperimente sollen zeigen, welche Strukturen Boudinage bzw. Pseudoboudinage erzeugen. Anhand von Vergleichen des Geländebeispiels und Literaturbeispielen für echte Boudinage mit Ergebnissen der Analogexperimente sollen signifikante Unterschiede zwischen echter Boudinage und Pseudoboudinage festgestellt werden. Damit kann eine Aussage über die Entstehung der Pegmatit- und Quarzkörper des Geländebeispiels Cap de Creus getroffen werden.

2 Geländebeispiel

2.1 Einleitung

Das Geländebeispiel stammt vom östlichsten Rand der Pyrenäen, der Cap de Creus Halbinsel, die ins Mittelmeer hineinragt. Sie liegt ca. 100 km nordöstlich von Barcelona und 6 km nordöstlich von Cadaqués. Die Aufschlußverhältnisse sind außergewöhnlich gut.

2.1.1. Geologie der Pyrenäen im Überblick

Die Pyrenäen bilden ein Ost-West gerichtetes Gebirge an der spanisch-französischen Grenze, das während der Alpen Orogenese (im frühen Tertiär) herausgehoben wurde. Dabei kam herzynisches Grundgebirge in der Axialzone, dem Ost-West verlaufenden Kernbereich, und in vier externen Massiven an die Oberfläche (Abb.2.1.1). Nördlich, südlich und westlich der Axialzone, in der Nordpyrenäenzone und der Südpynäenzone, sind in alpidischen Faltengürteln mesozoische bis tertiäre Sedimente aufgeschlossen (MAJESTE-MENJOULAS & DEBAT 1994), die im Norden eine Nordvergenz und im Süden eine Südvergenz zeigen. Zur alpidischen Faltungsphase bildeten sich in den gesamten Pyrenäen zusätzlich Ost-West verlaufende Störungssysteme, die hauptsächlich die alpidische Deformation in der Axialzone übernahmen (ZWART 1986). Zum Teil sind diese Störungssysteme in herzynischen Zeiten angelegt und im Tertiär als Aufschiebungen reaktiviert worden.

Die Axialzone wird im Norden von der alpidischen Nordpyrenäenstörung begrenzt (Abb.2.1.1). Das Grundgebirge der Axialzone besteht aus kambrischen bis karbonischen Schichten, die während der Variszischen Orogenese (Karbon) in mehreren Phasen deformiert wurden und dominierend WNW-ESE streichende Strukturelemente bildeten (CARRERAS & CAPELLA 1994). Dabei herrschte eine Niedrigdruck-Hochtemperatur-Metamorphose, die ungewöhnlich steile Temperaturgradienten aufweist (DRUGUET 2001). Zwei strukturelle Zonen sind hier zu unterscheiden: die Infrastruktur und die Suprastruktur (ZWART 1986). Die Infrastruktur enthält Metasedimente des Kambro-Ordoviziums, Gneise und wenige granitische Intrusionen und ist durch eine flachliegende Hauptfoliation charakterisiert. Die metamorphen Grade sind mittel bis hoch (amphibolitfaziell).

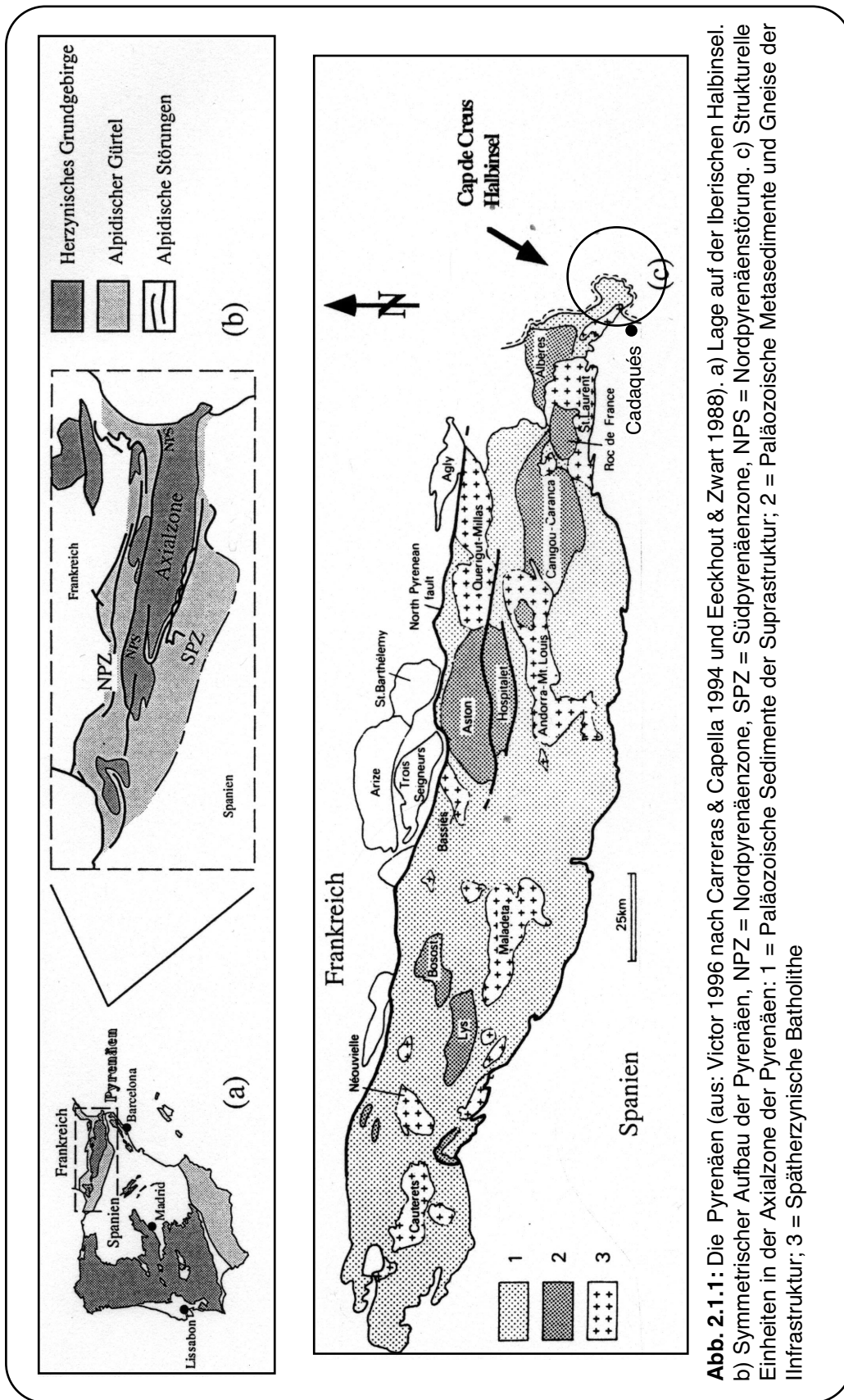
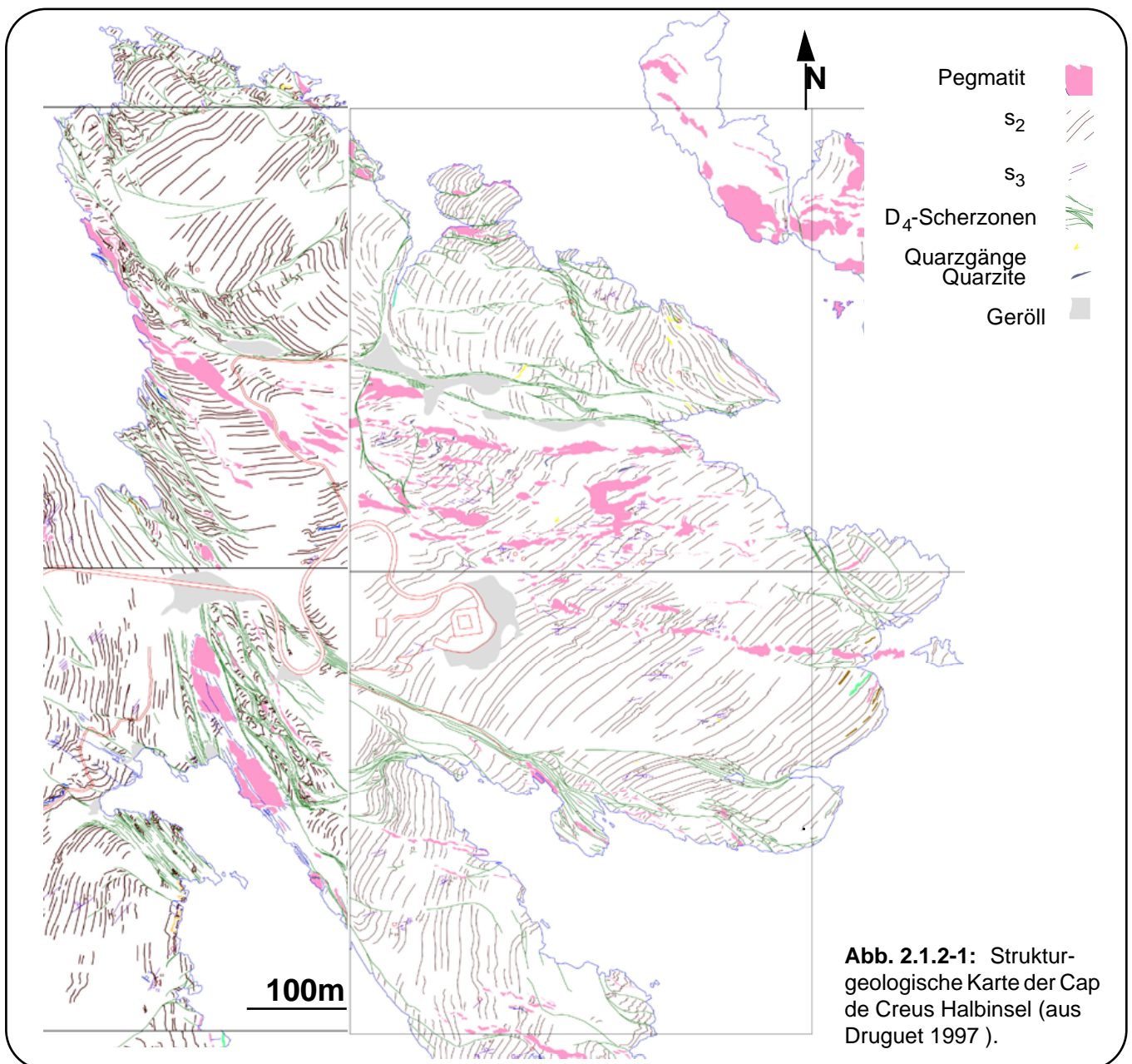


Abb. 2.1.1: Die Pyrenäen (aus: Victor 1996 nach Carreras & Capella 1994 und Eeckhout & Zwart 1988). a) Lage auf der Iberischen Halbinsel. b) Symmetrischer Aufbau der Pyrenäen, NPZ = Nordpyrenäenzone, SPZ = Südpyrenäenzone, NPS = Nordpyrenäenstörung. c) Strukturelle Einheiten in der Axialzone der Pyrenäen: 1 = Paläozoische Sedimente der Suprastruktur; 2 = Paläozoische Metasedimente und Gneise der Infrastruktur; 3 = Spätherzynische Batholithe

Die Suprastruktur umfaßt Metasedimente des Kambrium bis Oberkarbon und zeigt hauptsächlich aufrechte Falten und damit verbunden steilstehende Foliationen, die als Tonschieferung oder sehr durchdringende Krenulationsschieferungen auftreten. Hier herrscht eine sehr niedrig- bis niedriggradige (meist grünschieferfazielle) Metamorphose vor. In diese beiden Einheiten intrudierten im Perm Granodioritbatholite (ZWART 1986).

2.1.2 Geologie von Cap de Creus



Das Geländebeispiel stammt aus dem östlichsten zugängigen Bereich der herzynischen Axialzone, der Halbinsel „Cap de Creus“. Abb. 2.1.2-1 zeigt eine geologische Karte der Halbinsel. Dieses Gebiet gehört zur Suprastruktur der Axialzone, in die im Südwesten der Halbinsel Granodiorite des Rodes- und Roses-Massivs intrudierten. Diese sind z.T. mylonitisiert und formen zwei kleine in nordwest-südöstliche Richtung längliche Körper (CARRERAS&DRUGUET 1994). Die zweite lithologische Einheit der Gegend ist eine gleichmäßige Abfolge kambrischer bis ordovizischer Metasedimente. Diese machen mit den Pegmatiten den Hauptteil der Gesteine des östlichsten Cap de Creus aus. Die regionale Geologie von Cap de Creus wurde unter anderen von CARRERAS 2001, CARRERAS&DRUGUET 1994, PIAZOLO&PASSCHIER 2002, CARRERAS&CAPELLA 1994, DRUGUET 2001 beschrieben.

Schichtung

Die Metasedimente bestehen aus pelitischen und psammitischen Lithologien, die eine Wechsellagerung im Dezimeter-Maßstab bilden (s_0). Die Psammitlagen sind hell- bis dunkelgraue, massige und sehr feinkörnige Schichten, die hauptsächlich aus Quarz bestehen. Viel grobkörniger treten die metapelitischen Glimmerschiefer auf, die meist dunkelgrau bis schwarz erscheinen. Sie sind weniger fest und löchrig verwittert (siehe z.B. Tafel I: I-1). Die häufigsten Mineralbestandteile sind Quarz (bläulich und plattig ausgezogen), Feldspäte und Glimmer. Gelegentlich treten Zentimeter- bis 0.5 m-breite Zwischenlagen von Plagioklas-Amphibol-Gesteinen auf, die boudiniert sein können. Ein solches Beispiel echter Boudinage wurde detailliert aufgenommen (Abb. 2.1.2-2 und 2.1.2-3). Desweiteren kommen einige wenige feinkörnige weiß-gelbe Quarzlitlagen vor.

D₁

Eine frühe Deformationsphase (D_1) ist in einer schichtparallelen Schieferung (s_1) erhalten. Deshalb wird diese Richtung als $s_{0/1}$ bezeichnet. S_1 kann innerhalb der Schichten isoklinale Falten bilden. Während D_1 wurden dünne (bis 15 cm mächtige), prä- D_1 - Quarzadern je nach Orientierung boudiniert und isoklinal verfaltet (DRUGUET 1997).

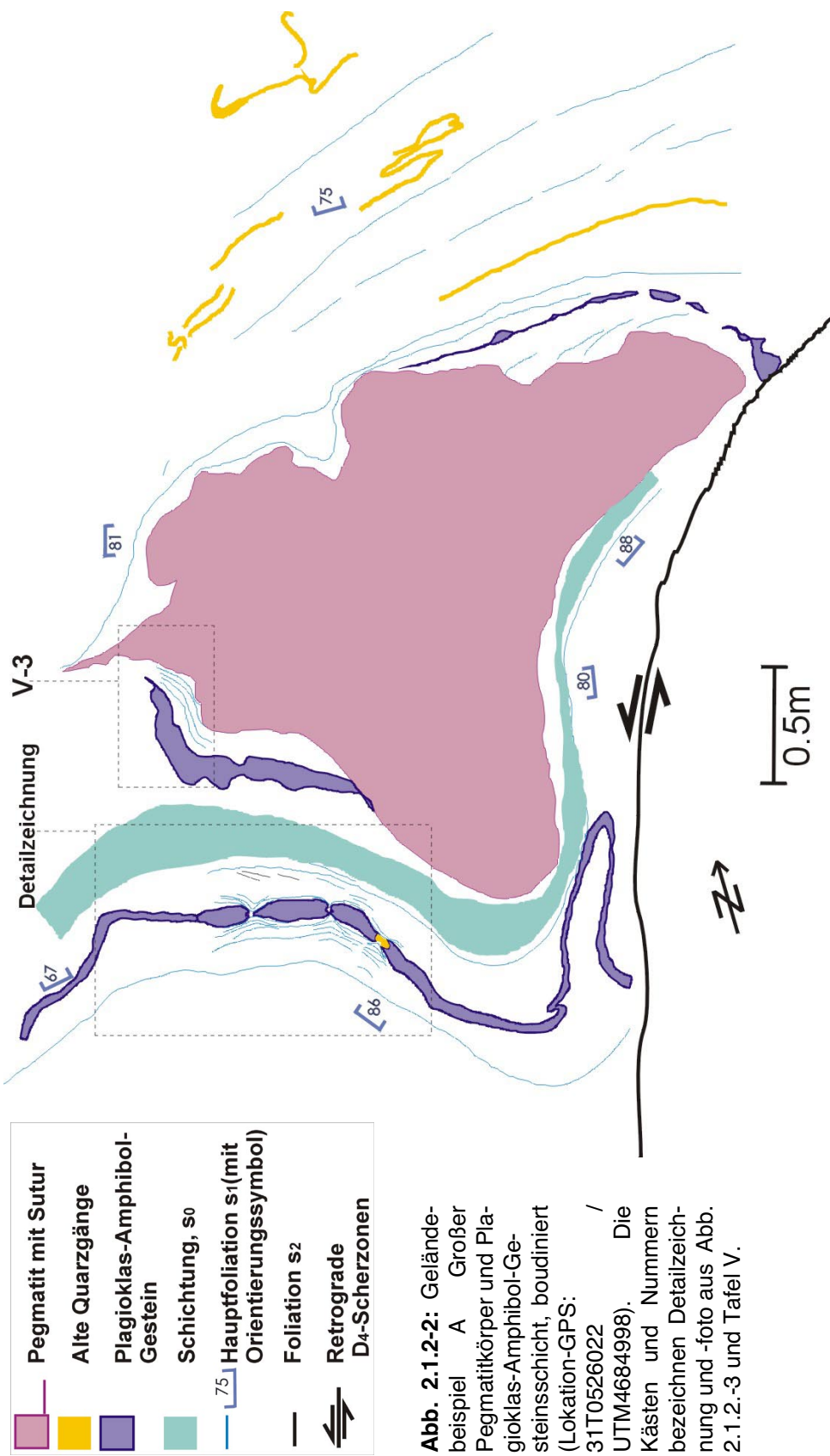


Abb. 2.1.2-2: Geländebeispiel A. Großer Pegmatitkörper und Plagioklas-Amphibol-Gesteinsschicht, boudiniert (Lokation-GPS: 31T0526022 / UTM4684998). Die Kästen und Nummern bezeichnen Detailzeichnung und -foto aus Abb. 2.1.2.-3 und Tafel V.

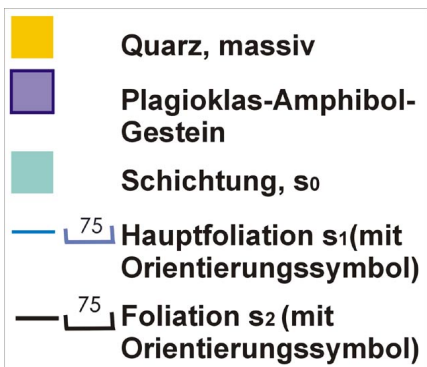
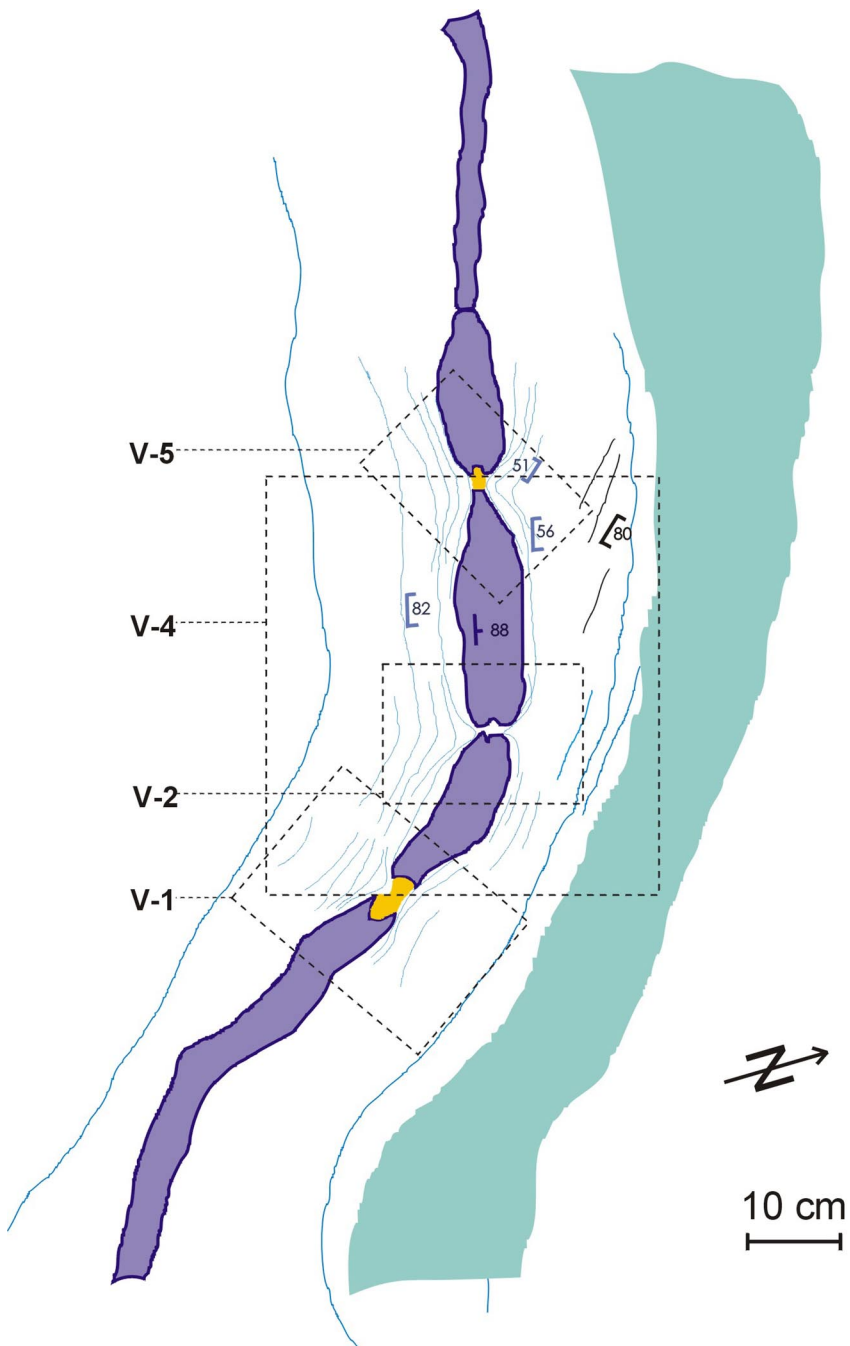


Abb.2.1.2-3: Geländebeispiel A Plagioklas-Amphibol-Gesteinsschicht, boudiniert. Die Kästen und Nummern bezeichnen Detailfotos aus Tafel V.

D₂ - Metamorphose – Pegmatit

Eine weitere Deformation (D₂) erzeugte eine schichtparallele sinistrale Scherkomponente, die die alten Quarzboudins in S-förmige Strukturen umwandelte (Tafel I: I-2). Gleiche Geometrien erhielten isoklinale Falten von s₁. S₂ bildete sich als Krenulationsschieferung aus. S₂ ist in den meisten detailliert beschriebenen Beispielen (siehe Abb. 2.2-1 bis 2.2-4, Abb. 2.3-1) die Hauptfoliation, wobei diese meist subparallel zu s_{0/1} läuft, jedoch oft nah an den Pegmatiten einen Winkel bis zu 30° mit s_{0/1} einschließt (z.B. Abb. 2.2-1: Kasten IV-1). Eine variszische Regionalmetamorphose verursachte Metamorphosegrade von der Chlorit-Muskovit-Zone im Süden bis zur Sillimanit-Kalifeldspat-Zone im Norden der Halbinsel (DRUGUET 2001). Während der Spitze der variszischen Orogenese, die partielles Schmelzen bei ~750°C im Norden der Cap de Creus-Halbinsel verursachte (DRUGUET 1997), intrudierten die Pegmatite in die Gesteine der Sillimanit-Muskovit- und Sillimanit-Kalifeldspat-Zonen (DRUGUET & HUTTON 1998).

D₃ - Metamorphose

Zum Höhepunkt dieser variszischen Metamorphose, jedoch nach der Intrusion der Pegmatite, setzte eine dritte Deformationsphase (D₃) ein, die in einem Ost-West gerichteten dextralen Schersinn die s_{0/1}-Flächen von einer etwa Nord-Süd-Orientierung in eine Südwest-Nordost- bis Ost-West-Orientierung transpositionierte. Diese Transposition ist in turmalinimprägnierten Randbereichen von Pegmatiten erhalten (siehe Kap. 2.2.2 Turmalinränder). In der Scherebene (steil Ost-West) fand dabei keine Verkürzung oder Extension statt; in dieser Orientierung ausgerichtete schmale (<10 cm) Pegmatitgänge sind weder boudiniert noch gefaltet (siehe Kap. 2.2.2 Formen der Pegmatitkörper). An einigen Stellen entwickelte sich eine s₃-Schieferung, ebenfalls wie s₂ meist als Krenulationsschieferung. Die Hauptorientierung von s₃ ist Ost-West, allerdings kann dies besonders in der Nähe der Pegmatite von Südwest-Nordost bis Südost-Nordwest stark variieren (siehe Abb. 2.2-1 bis 2.2-4, Tafel II: II-1, II-2).

In der Literatur wird zum Teil diskutiert, dass die Deformationen D₂ und D₃ zu einem sich fortentwickelnden, heterogenen Deformationsereignis gehören (DRUGUET et. al. 1997, CARRERAS & DRUGUET 1994, DRUGUET 1997, DRUGUET &

HUTTON 1998). Hier wird die sinistrale Scherkomponente von D_2 mit fortschreitender Deformation durch eine sehr großräumige dextrale Scherzone überlagert. Die Pegmatite sollen während dieses gekoppelten Ereignisses eingedrungen sein.

retrograde Scherzonen D_4

In einer letzten Deformationsphase (D_4) bildeten sich unter retrograden Metamorphosebedingungen Nordwest-Südost streichende, anastomosierende, duktile Scherzonen (PIAZOLO & PASSCHIER 2002, CARRERAS 2001, CARRERAS & CASAS 1987). Es handelt sich hierbei um sehr lokalisierte Strukturen, die den Großteil des Geländes nicht beeinflussen. Sie durchqueren und mylonitisieren die Pegmatite und Metasedimente, sowie deren Strukturen.

2.2 Pegmatite

Auf Luftbildern sind die Pegmatite als helle Bänder gut zu verfolgen (Abb. 2.2). Abb. 2.2 zeigt die Lokationen der detailliert beschriebenen Pegmatite.

2.2.1 Einleitung

Die meisten Pegmatite treten als linsenförmige Körper auf, die in ihrer Längserstreckung in Reihen hintereinander liegen. Viele dieser Reihen liegen parallel zueinander. Sie fallen steil ein und haben eine Ost-West- bis Nordwest-Südost-Orientierung (helle Bänder in Abb. 2.2). Sehr wenige Pegmatitadern treten Nord-Süd streichend auf, sie sind gefaltet. Ebenfalls wenige, späte Pegmatite liegen sehr flach und schneiden die steil stehenden ab. Auch diese können gefaltet sein. Alle Pegmatite zeigen einen scharfen Kontakt zum Umgebungsgestein.

Abb. 2.2:
 Luftfotos
 der Leuchtturmumgebung Cap de Creus. Freundsicherweise zur Verfügung gestellt von Elena Druguet. Rote Kästen und Buchstaben geben die Lokationen der Geländebeispiele an (siehe Abb. 2.1.2-2, 2.1.2-3, 2.2-1 bis 4 und 2.3-1).



Mineralogisch bestehen die Pegmatite im wesentlichen aus Quarz, Feldspat (Mikroklin und Albit-Oligoklas (ALFONSO ABELLA 1995)) und Muskovit. Relativ häufig sind auch idiomorpher Granat, Turmalin und Biotit. Akzessorisch treten dazu noch Sillimanit und Cordierit auf (ALFONSO ABELLA 1995). Die Pegmatite zeigen gelegentlich eine schwach ausgebildete Internstruktur, die meist aus der Einregelung von Muskoviten resultiert und nur sehr lokal auftritt (Tafel III: III-1).

Hohe $\delta^{18}\text{O}$ -Werte ($>10\%$) (DAMM et. al. 1992) und hohe Mangan-Anteile in den Granaten (ALFONSO ABELLA 1995) charakterisieren die Pegmatite als Aufschmelzungsprodukte partieller Anatexis der kambro-ordovizischen Metapelite, die bei ca. 600°C völlig kristallisierten (DAMM et. al. 1992). Die Kristallisation muß sehr langsam vonstatten gegangen sein, da das Nebengestein am Höhepunkt der D_2 -Metamorphose ähnliche und höhere Temperaturen aufwies (ca. 670°C in der Sillimanit-Zone, DRUGUET 2001).

2.2.2 Strukturen

Formen der Pegmatitkörper

Die typische Form der Pegmatite sind Reihen von linsenähnlichen Objekten, hier Pegmatitketten genannt, die durch schmale Pegmatitgänge oder eine kluftähnliche Linie (s. u. Absatz Suturlinie) miteinander verbunden sind. Die Länge der Körper variiert dabei von ca. 20 cm (z.B. Tafel III: III-2) bis zu über 10 m (siehe Abb. 2.2). Innerhalb einer Kette können die Pegmatitkörper verschiedene Größen haben (Abb. 2.2-3). Es handelt sich oft nicht um ideale Ellipsen sondern um unregelmäßige Formen mit Aus- und Einbuchtungen (Abb. 2.2-1 bis 2.2-4). Ein weiteres Beispiel für die sehr unregelmäßige Form der Körper zeigt Foto I-5 (Tafel I). Hier weitet sich der Körper plötzlich aus einem schmalen Gang in ein schulterförmiges Objekt.

Dünne Pegmatitbänder (< 10 cm), die parallel zu den beschriebenen Ketten laufen, sind weder boudinförmig noch gefaltet (Tafel I: I-1). Das heißt sie sind weder verkürzt noch gedehnt.

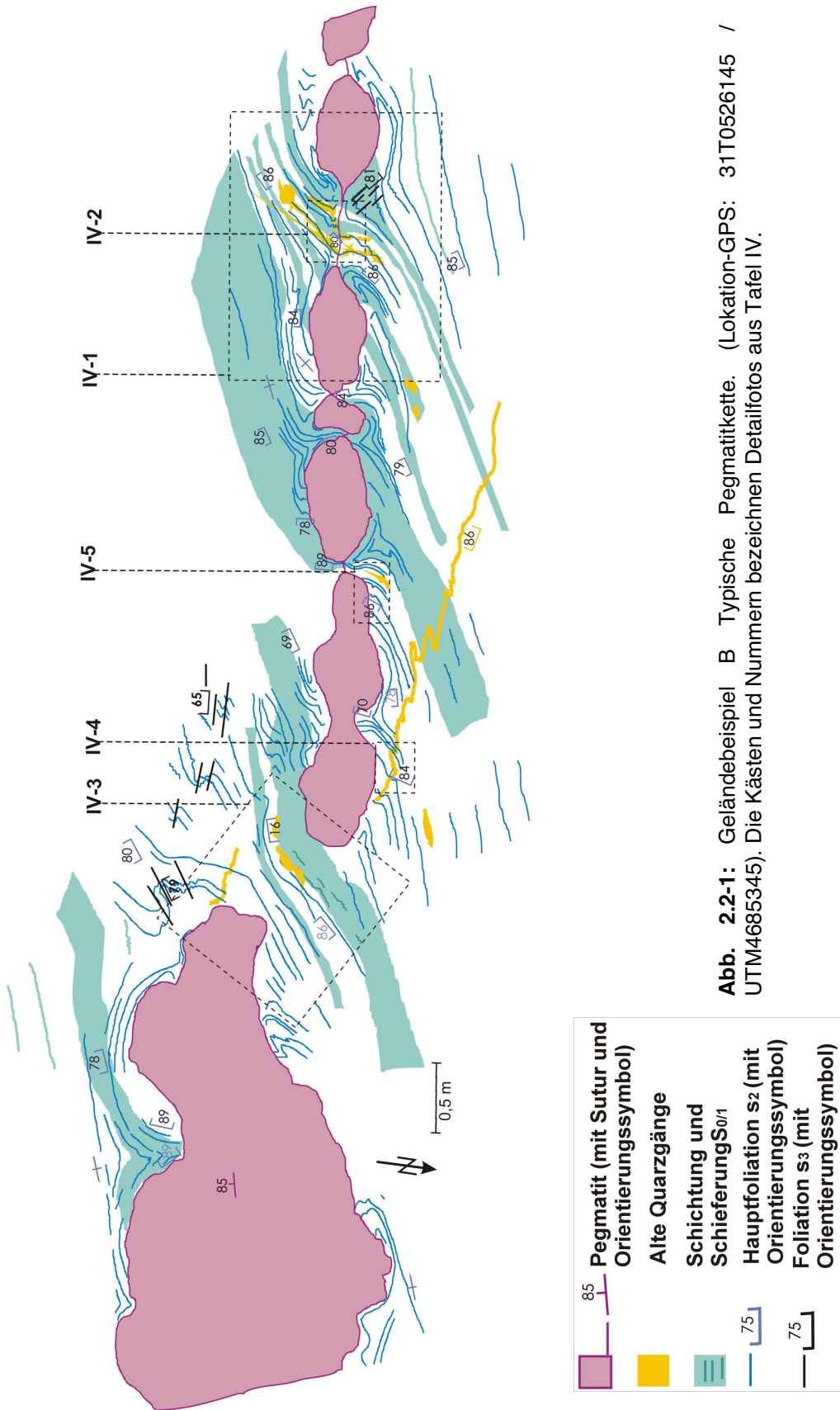


Abb. 2.2-1: Geländebeispiel B Typische Pegmatitkette. (Lokation-GPS: 31T0526145 / UTM4685345). Die Kästen und Nummern bezeichnen Detailfotos aus Tafel IV.

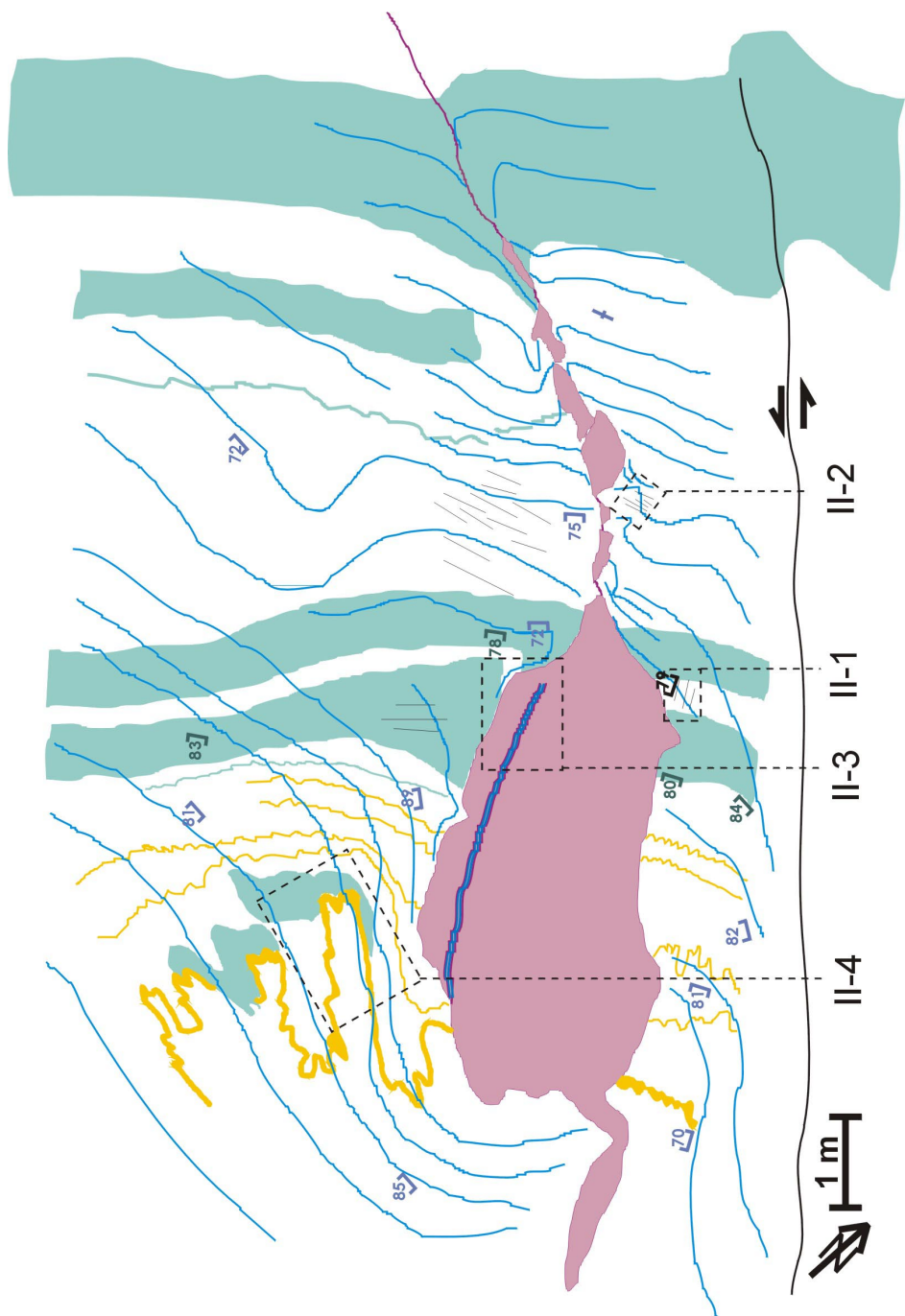
Gelegentlich sind tropfenförmige Objekte zu finden, die an einer Seite abgerundet und an der anderen langgezogen erscheinen (Tafel III: III-2 und III-4, Abb. 2.2-4: I-3). Erreicht die langgezogene Seite, die immer am östlichen Rand des Körpers liegt, eine Mächtigkeit von ca. 10 cm verliert der Pegmatitkörper die sonst übliche unregelmäßige Form und wird gleichmäßig und gangartig. Er dünnt sich oft auf unter 1 mm Mächtigkeit aus und kann 10er von Metern weiterlaufen.

Entlang der Pegmatitketten, zwischen den linsenförmigen Objekten, sind flammenartige Pegmatitformen zu beobachten (Tafel I: I-4). Sie sehen aus wie intrusive Abzweigungen eines Hauptganges, vergleichbar mit den injection veins eines Pseudotachyliten.

Eine auffällige Form zeigt Abb. 2.2-2. Hier trennt ein schmaler Streifen Nebengestein einen Teil des Boudinkörpers vom Rest ab. Der abgetrennte Teil Pegmatit (der westlich bis südwestliche, siehe Abb. 2.2-2) hat allerdings noch Verbindung zum Rest (Kasten II-3). Es könnte sich um eine Intrusionsstruktur handeln, die dadurch entstand, dass sich eine Abzweigung der Ader mit Pegmatitmaterial füllte. Diese Abzweigung verläuft parallel zum Hauptpegmatit, und schließt mit ihm dadurch eine Linse von Nebengestein ein (ähnlich einer Intrusionsbrücke). Die Spitze des Nebengesteinsstreifens zeigt Foto II-2 (Tafel II). Dieses Nebengestein im Pegmatit ist sehr stark geschiefert.

Suturlinie

Die Pegmatitkörper einer Kette sind durch einen millimeter- bis dezimeter-breiten Saum, die Suture, verbunden. Es handelt sich dabei um eine durchgängige Linie, die einer Kluft oder Störung ähnlich sieht, jedoch keinen Versatz zeigt und kein oder nur sehr wenig Pegmatitmaterial enthält (z.B. Abb. 2.2.-1, Tafel IV: IV-1, IV-2). Schichtung, Quarzgänge und Schieferung können über die Suturlinie hinweg verfolgt werden (Abb. 2.2.-1: Kästen IV-1 und IV-2). Entlang der Suturlinie treten die oben erwähnten flammenförmigen Pegmatitkörper auf.



- Pegmatit (mit Suture)
- Alte Quarzgänge
- Schichtung und Schieferung S_{0/1}
- Hauptfoliation s₂ (mit Orientierungssymbol)
- Foliation s₃ (mit Orientierungssymbol)
- Retrograde D₄-Scherzonen

Abb. 2.2-2: Geländebeispiel C Typische Pegmatitkette. (Lokation-GPS: 31T0526320 / UTM4685013). Die Größe der Pegmatitkörper variiert sehr stark. Die Kästen und Nummern bezeichnen Detailfotos aus Tafel II.

Verbiegung der Strukturelemente um die Pegmatitkörper

Die Schichtung ($s_{0/1}$) und die Hauptfoliation (s_2) sind um die Pegmatitlinsen herum verbogen. Stehen die Strukturen in einem kleinen Winkel zur Pegmatitkette, zeichnen sie kleinräumig betrachtet die Form der umbogenen Körper nach (z.B. Abb. 2.1.2-1, Tafel V: V-3), schmiegen sich an die Form der Körper an. Mit Anschmiegen ist zum Einen das Nachzeichnen der Form der Objekte gemeint, zum anderen eine beobachtete Zunahme der Engständigkeit der Schieferung.

Schichtung, die in großem Winkel auf ein Pegmatitobjekt trifft, verändert dort ihre Mächtigkeit. Sie wird in den häufigsten Fällen breiter (z.B. Abb. 2.2-2). Dies ist auch an weniger mächtigen Pegmatiten, die gangartig ausgebildet sind zu beobachten (Tafel I: I-1).

Zwischen den Linsen laufen Schichtung, Hauptfoliation und Quarzadern kontinuierlich weiter (z.B. Abb. 2.2-1: Kasten IV-1, IV-2, IV-3), wobei diese hier nur leicht verbogen werden.

Die Ablenkungsmuster um die Körper zeigen fast immer eine monokline Symmetrie (z.B. Abb. 2.2-1: Kasten IV-1). Dies ist jedoch kaum erkennbar, wenn der Winkel zwischen der Pegmatitkette und der Hauptschieferung sehr groß ist (Abb. 2.2-3).

Divergenzpunkte

An Suturlinien zwischen Pegmatitkörpern treten gelegentlich Divergenzpunkte der Hauptfoliation auf. Es handelt sich um Stellen, wo parallele Schieferung senkrecht auf die Pegmatitkette zuläuft, dann jedoch in unmittelbarer Nähe der Suture divergiert (Abb. 2.2-3, Tafel III: III-3). Diese Divergenzpunkte treten an der Suturlinie zwischen zwei Pegmatitkörpern auf. Sie liegen meist direkt an der Linie oder an schmalen Pegmatitgängen. Zwischen Pegmatitlinsen können mehrere Divergenzpunkte auftreten (Abb. 2.2-3).

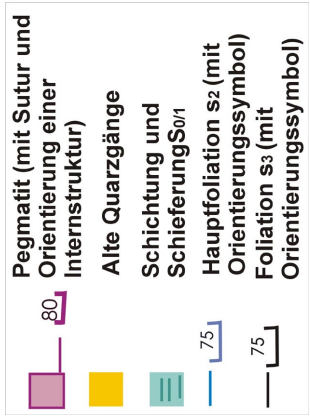
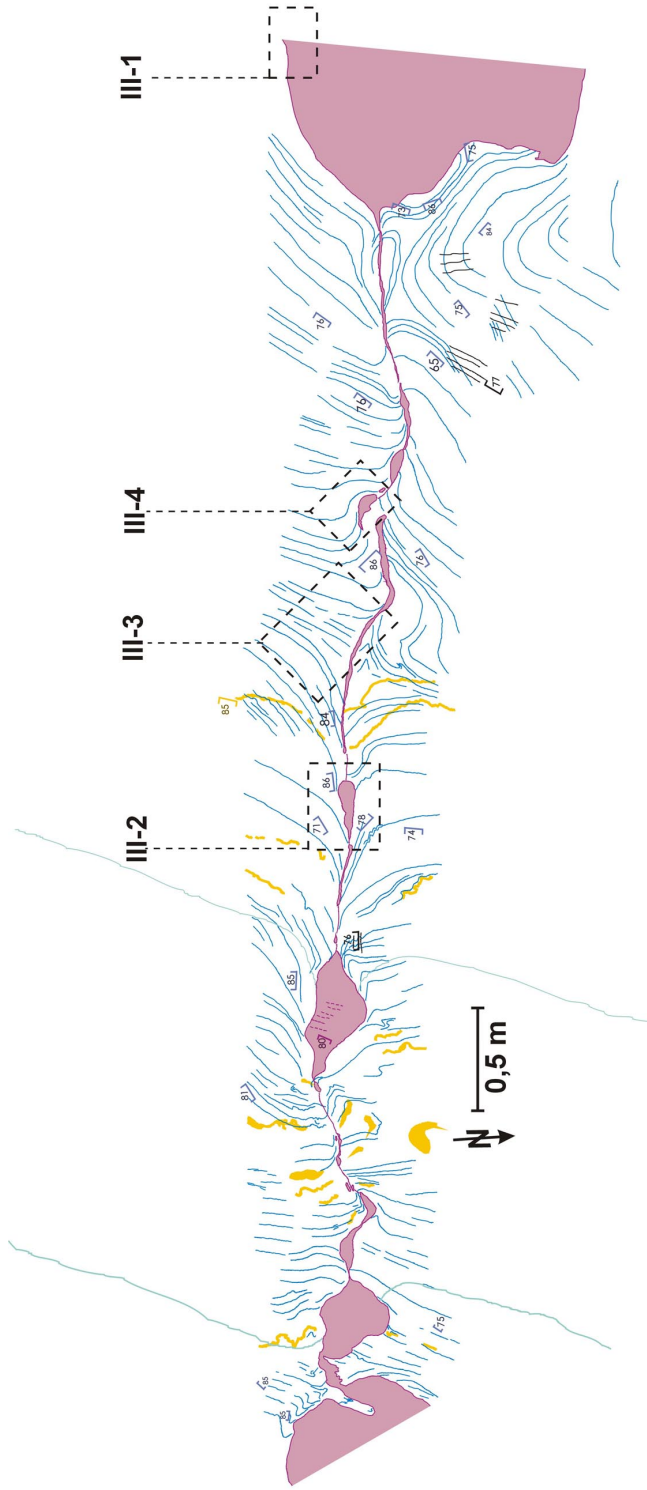


Abb. 2.2-3: Geländebeispiel D Lange Kette von kleinen Pegmatitvorkommen zwischen zwei sehr großen Körpern (Lokation-GPS: 31T0526302 / UTM4685025). Die Kästen und Nummern bezeichnen Detailfotos aus Tafel III. Von den beiden großen Körpern im Osten und im Westen des Bildes sind jeweils nur die spitzen dargestellt. Sie sind 3m lang und 1,2m breit (im Osten) und 3,3m lang und 1m breit (im Westen).

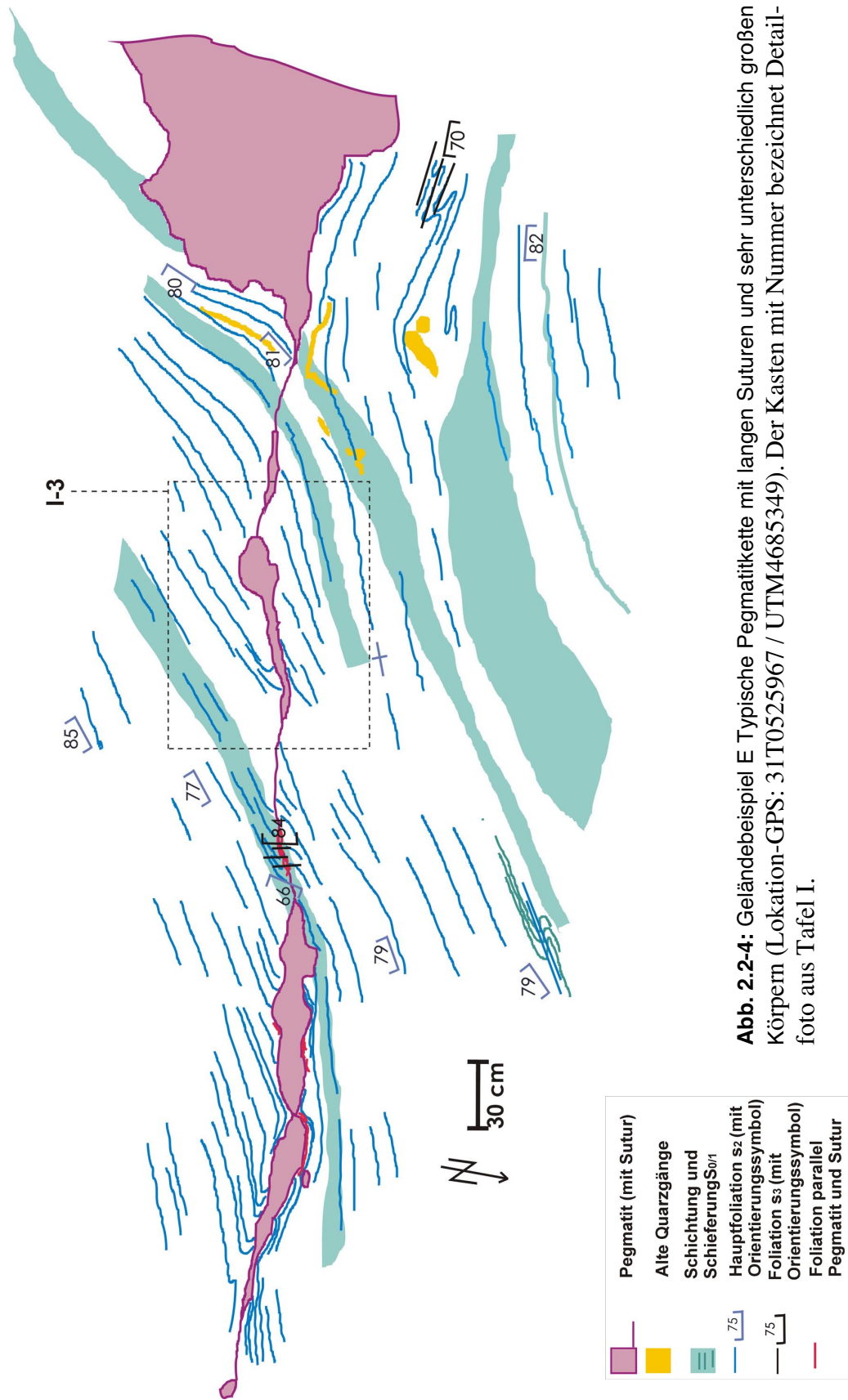


Abb. 2.2-4: Geländebeispiel E Typische Pegmatitkette mit langen Suturen und sehr unterschiedlich großen Körpern (Lokation-GPS: 31T0525967 / UTM4685349). Der Kasten mit Nummer bezeichnet Detailfoto aus Tafel I.

Turmalinränder

Am Kontakt der Pegmatite mit dem Nebengestein sind Turmalinanreicherungen zu beobachten, die das Nebengestein sehr viel massiger und dunkler als normalerweise erscheinen lassen (z.B. Tafel IV: IV-5). Die bis zu 3 cm breiten Turmalinimprägnationen sind nur in Glimmerschieferlagen ausgebildet, da sich hier durch Bormetasomatose erst Glimmer und später auch Feldspat zu Turmalin umbilden konnte (VICTOR 1996, DRUGUET et. al. 1997). Die Schieferung setzt sich aus dem Nebengestein in diese Randbereiche hinein fort. Die Turmalinränder scheinen sich während der nachfolgenden Deformation rigider verhalten zu haben als die normale Schieferung: die Hauptschieferungen sind hier von einer Nord-Süd-Richtung (in den Turmalinrändern) nach einem Südwest-Nordost-Streichen (außerhalb der Turmalinränder) um bis zu 45° dextral transpositioniert (Tafel IV:IV-5). Die Winkelbeziehung zwischen der Foliation und den Pegmatitkörpern während der Intrusion ist in diesen turmalinimprägnierten Zonen eingefroren worden (DRUGUET 1997). Die entstehenden Strukturen werden „Flankenfalten“ (flanking fold) genannt (PASSCHIER 2001). Diese Turmalinränder sind auch in Quarzgängen beobachtet worden (siehe Kap. 2.3).

2.3 Quarzadern

Zwei Generationen von Quarzadern treten auf. Die älteste Generation ist stark deformiert und mindestens ebenso alt, wie die D_1 -Deformation, jedoch meist noch älter. Diese Gänge sind sehr häufig zu beobachten. Die junge Generation kommt seltener vor und ist weniger deformiert.

2.3.1 Älteste Quarzadern

Sehr häufig zu finden sind Quarzgänge, die 0,5 bis 15 cm mächtig und grobkristallin sind. Die Mehrzahl dieser alten Adern läuft heute parallel bis subparallel zur Schichtung ($s_{0/1}$). Es ist allerdings erkennbar, dass sie ursprünglich variable Orientierungen gehabt haben müssen, da während D_1 einige boudiniert (Tafel I: I-2) und andere gefaltet (Tafel II: II-4) worden sind (DRUGUET 1997). Die zweite Deformationsphase rotierte die Quarzboudins sinistral, wodurch S-förmige

Strukturen entstanden (Tafel I: I-2). Die Quarzadern werden sowohl von den Pegmatiten als auch von jüngeren Quarzadern abgeschnitten (Abb. 2.2-2, Tafel VI: VI-3). In unmittelbarer Nähe zu den Pegmatiten weisen auch diese Quarzgänge Turmalinränder auf (Tafel IV: IV-4).

2.3.2 Junge Quarzadern

Eine jüngere Quarzader ist in Abb. 2.3-1 detailliert beschrieben. Foto VI-3 (Tafel VI) zeigt ihre Beziehung zur älteren Generation. Im Gegensatz zu den alten Quarzgängen sind die jüngeren feinkörniger, massiger und reiner. Es handelt sich hierbei um eine Kette von linsenförmigen Körpern, die bis zu ca. 20 cm breit und bis zu 0,5 m lang sind. Deren Deflektionsmuster sehen denen der beschriebenen Pegmatite sehr ähnlich: monokline Symmetrie der Hauptfoliation um die Linsen herum, Anschmiegen der Schieferung an die linsenähnlichen Objekte (Tafel VI: VI-5), Mächtigungszunahme der Schichtung unmittelbar an den Quarzkörpern. Die Zwischenräume zwischen den Körpern sind nur sehr kurz, so dass nicht zu sagen ist, ob die Schichtung durch sie hindurchläuft; die Foliation allerdings tut dies (Tafel VI: VI-4). Ebenso wie bei den Pegmatiten treten turmalinverstärkte Ränder auf (Tafel VI: VI-2), die die Schieferung senkrecht zum Gang eingefroren hat. Auch hier wurde die Schieferung später dextral transpositioniert. Auffällig ist ein kleiner Nebengang, der wie eine Intrusionbrücke erscheint und kräftige Turmalinimpregnationen aufweist (Tafel VI: VI-1).

2.4 Zusammenfassung und Diskussion der Strukturen

Die Pegmatite von Cap de Creus sind als Boudins interpretiert worden (Hypothese I, z. B. DRUGUET et. al. 1997). Die Form der beschriebenen Pegmatit- und Quarzkörper und die Verbiegungsmuster der Schichtung und der Hauptschieferung (besonders das Anschmiegen der Schieferung an die Objekte) sehen Boudinagestrukturen ähnlich (vergleiche Abb. 2.1.2-3 und Abb. 2.2-1 bis 2.2-4).

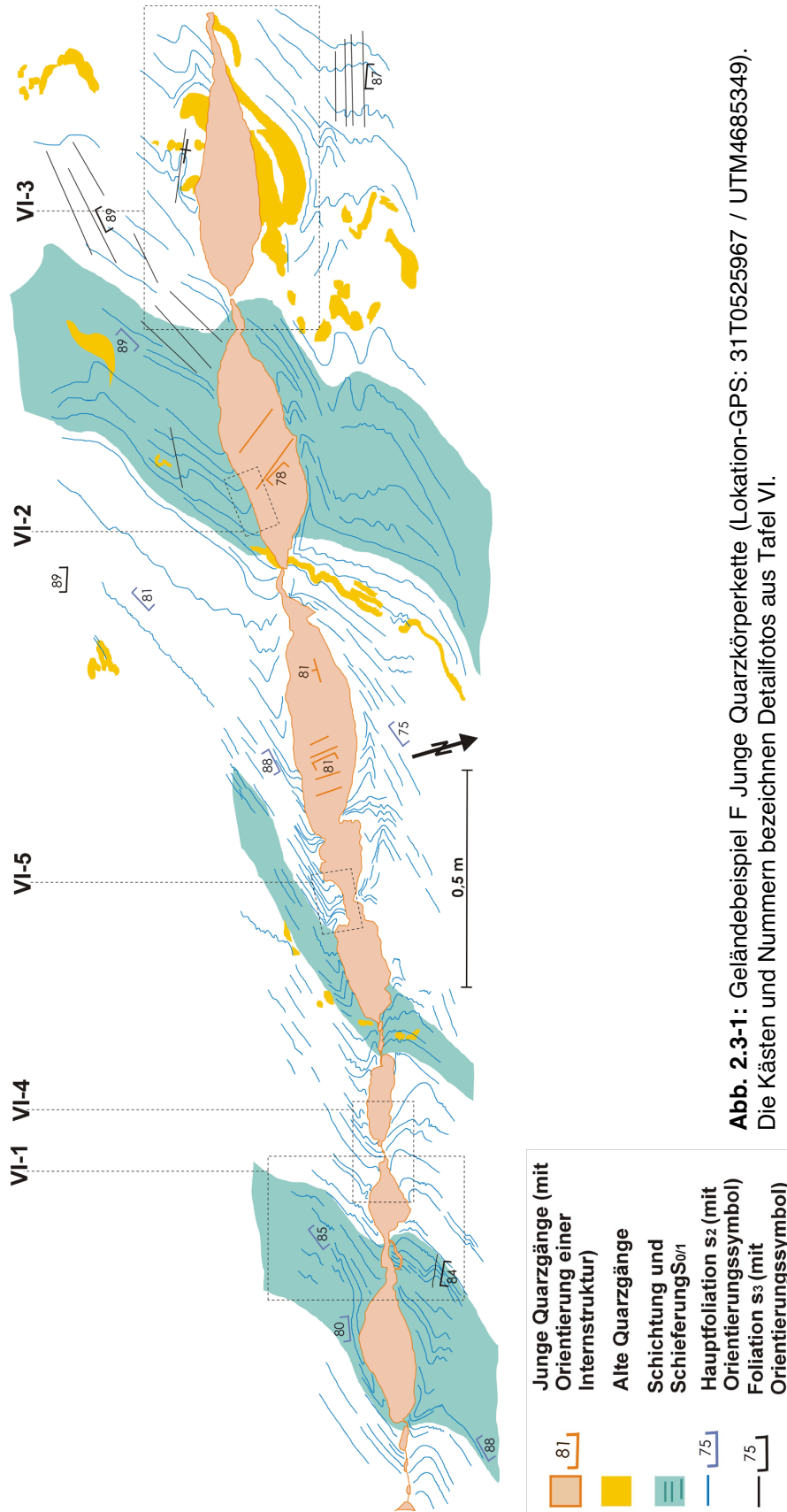


Abb. 2.3-1: Geländebeispiel F Junge Quarzkörperkette (Lokation-GPS: 31T0525967 / UTM4685349). Die Kästen und Nummern bezeichnen Detailfotos aus Tafel VI.

Allerdings sind einige Strukturen erkennbar, die Intrusionsstrukturen gleichen: flammenförmige Objekte entlang der Suturlinie, Intrusionsbrücken, tropfenförmige Pegmatitobjekte, die wie diapirförmige Aufstiegskörper erscheinen. Diese Konturen können nicht durch echte Boudinage erzeugt worden sein. Durch nachfolgende Extension und Kompaktion, die zu Boudinage führen, wären sie wahrscheinlich zerstört worden. Bei weiteren Formen der Pegmatite, die nicht typische Intrusionsstrukturen sind, ist es dennoch schwer vorstellbar, wie sie aus Boudinage entstanden sein können (z.B. Tafel I: I-5).

Das Durchlaufen der Schichtung durch die Zwischenräume der Körper, wäre bei Boudinnecks ebenfalls nicht zu erwarten. Die Ansatzpunkte der Schichten und Schieferungen (siehe Abb. 2.4.1), also die Stellen, an denen die Schichtung und Schieferung auf die kompetente Lage trifft, wandern mit den Boudins nach deren Trennung relativ zum Verlauf der Schichtung.

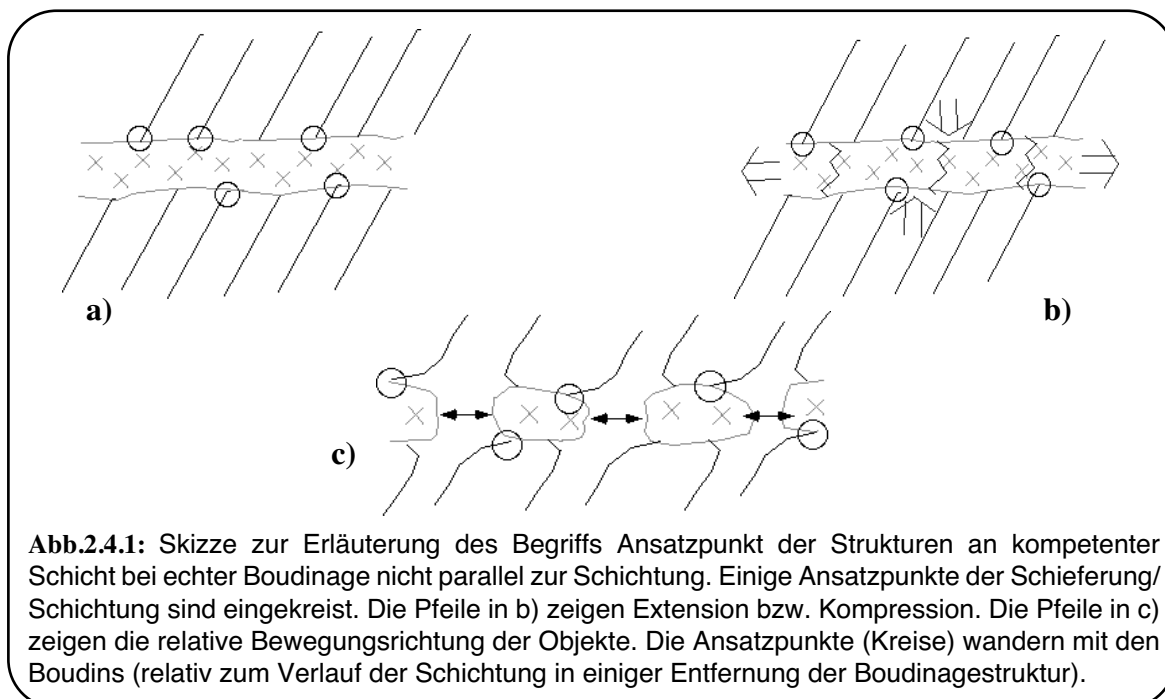


Abb.2.4.1: Skizze zur Erläuterung des Begriffs Ansatzpunkt der Strukturen an kompetenter Schicht bei echter Boudinage nicht parallel zur Schichtung. Einige Ansatzpunkte der Schieferung/Schichtung sind eingekreist. Die Pfeile in b) zeigen Extension bzw. Kompression. Die Pfeile in c) zeigen die relative Bewegungsrichtung der Objekte. Die Ansatzpunkte (Kreise) wandern mit den Boudins (relativ zum Verlauf der Schichtung in einiger Entfernung der Boudinagestruktur).

Eine denkbare Möglichkeit zum „Nichtmitwandern“ der Ansatzpunkte wäre, wenn sich an der Außenfläche des Boudins lokal eine kleine Störung mit einem Versatz entwickeln würde. Durch Lücken, die vor der Boudinage nicht existierten, können (abgesehen von der eben erwähnten Ausnahme, für die es im Gelände keine Anzeichen gab), vorher dagewesene Strukturen nicht durchlau-

fen. Dies ist bei den Pegmatiten von Cap de Creus jedoch der Fall. Die Zwischenräume können nicht durch Boudinage entstanden sein.

Divergenzpunkte können bei echter Boudinage ebenfalls auftreten. Allerdings sind sie hier mittig in Boudinnecks zu erwarten. Dabei haben die äußersten Punkte des Divergenzbereichs immer Kontakt zu einem Boudin. Divergenzpunkte, die nicht direkt zwischen zwei markanten Objekten auftreten, sondern entlang eines schmalen Ganges oder einer Suturlinie, sind nicht mit Boudinage zu erzeugen. Hinzukommt, dass in einem Zwischenraum zwischen zwei Objekten mehrere Divergenzpunkte auftreten können, auch hier gilt das Argument, dass keine, bzw. nicht genügend viele Boudins vorhanden sind, um die Schieferung divergieren zu lassen.

2.5 Alternativen zur Boudinage

Die Entstehung der Pegmatitkörper von Cap de Creus als Boudins (**Hypothese I**, z. B. DRUGUET 1997) wird der sinistralen Deformation einer Zone hohen Strains (high strain domains, siehe DRUGUET et. al. 1997) zugeschrieben (Abb. 2.5-1a).

Die auffälligen boudinähnlichen Formen der Pegmatite und die Verbiegungsmuster der Strukturelemente um sie herum, die der Hauptgrund für deren Interpretation als boudinierte Gänge sind, könnten auch durch Inplatznahmemechanismen während der Intrusion des Magmas entstanden sein. Die Falten der Schieferung des Nebengesteins in die Turmalinräder hinein, werden im Falle der Inplatznahmetheorie durch eine nachfolgende dextrale Deformation erzeugt (Abb. 2.5-1b). BRISBIN (1986) zeigt, dass Pegmatite, die während der Intrusion in Schmelz- oder Fluidzustand sind, ihre Linsenform oft schon während des Eindringens bilden.

Entlang einer Kluft oder ähnlichen Schwächezone im Gestein dringt das Magma in das Gestein ein. Es akkumuliert sich dabei an diskreten Stellen (Abb.2.5-2b),

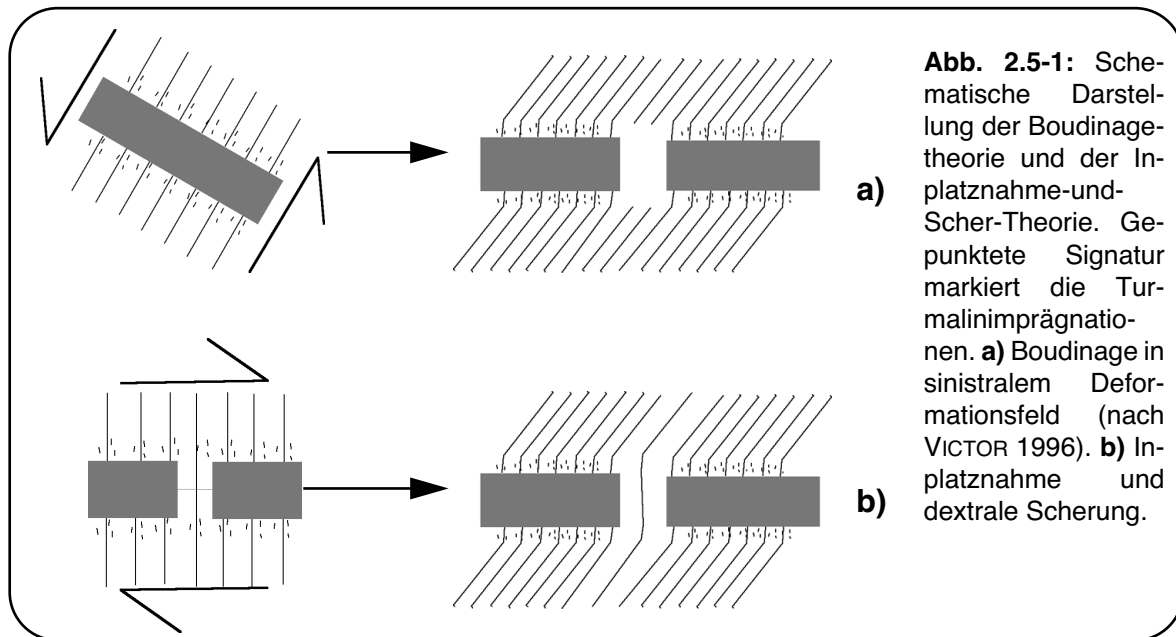
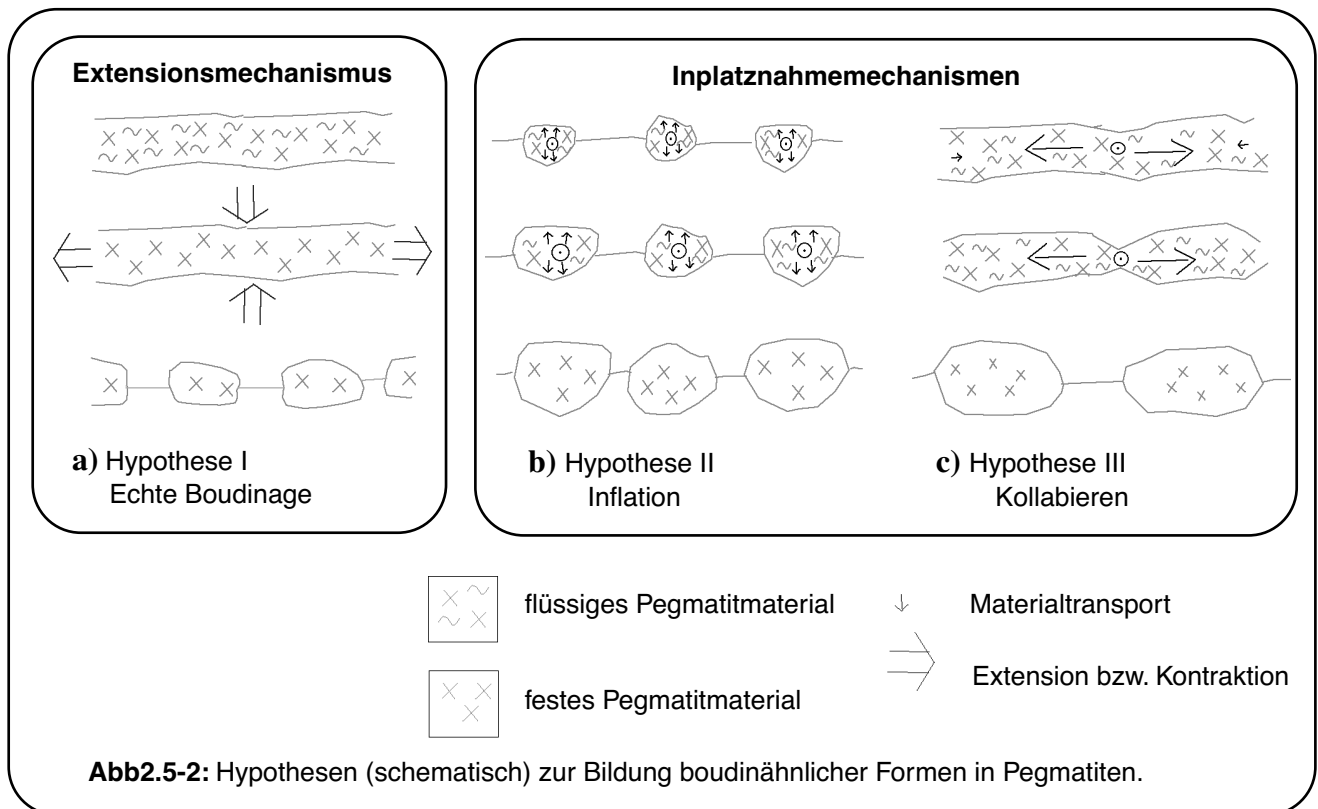


Abb. 2.5-1: Schematische Darstellung der Boudinagetheorie und der In-Platznahme- und Scher-Theorie. Gepunktete Signatur markiert die Turmalinimprägnationen. **a)** Boudinagetheorie in sinistralen Deformationsfeld (nach VICTOR 1996). **b)** In-Platznahme und dextrale Scherung.

an denen der hydrostatische Druck der Schmelze die umgebenden Druckbedingungen im Gestein überschreitet. Die umgebenden Druckbedingungen ergeben sich aus einer Vielzahl von Faktoren, besonders dem rheologischen Zustand des Nebengesteins. Dieser ist stark von der Tiefe abhängig (BRISBIN 1986). Weitere Zufuhr von Magma an diesen diskreten Stellen führt zu einer Aufblähung (Inflation, **Hypothese II**) des pegmatitgefüllten Bereichs. Je nach dem rheologischen Zustand des Nebengesteins, den lithostatischen Spannungsverhältnissen, eventuellen Anisotropien im Nebengestein, den gerichteten Spannungsverhältnissen und dem Fluiddruck der Schmelze ist diese Inflation in den verschiedenen Richtungen unterschiedlich intensiv. Wenn die Materialzufuhr beendet wird, bevor sich die pegmatitgefüllten Bereiche miteinander verbinden und ineinander verlaufen, bleiben linsenförmige Pegmatitkörper zurück.

Auf einen noch flüssigen Pegmatitbereich oder -gang, wirkt der Druck des Nebengesteins. Dieser hängt von der Rheologie des Nebengesteins ab, wobei die Zusammensetzung des Gesteins, der Wärmefluß, der lithostatische Druck und der Porendruck (alles tiefenabhängige Parameter) eine entscheidende Rolle spielen (BRISBIN 1986). Ist der äußere Druck des Nebengesteins höher als der Fluiddruck der Pegmatitschmelze, kann es zum Kollaps diskreter Stellen und

noch flüssiger Pegmatitbereiche (**Hypothese III**) entlang des Ganges kommen. Das Schmelzmaterial wird dabei in Niedrigdruck-Gegenden des Nebengesteins gedrückt (Abb.2.5-2c). Handelt es sich um duktil deformierendes Nebengestein (wie im Geländebeispiel), so kann dieses fließend die durch die Pegmatitintrusion entstandenen Volumina schließen und komplett kollabieren. Es entstehen Lücken zwischen einzelnen Pegmatitlinsen.



Eine Kombination der Hypothesen II und III ist ebenfalls denkbar, wenn Aufblähung und Kollabieren gleichzeitig nebeneinander oder kurz nacheinander eintreten.

3 Analogexperimente

3.1 Einleitung

Die Analogexperimente dienen dazu, die Inflations-, Kollaps- und Boudinagemechanismen zu modellieren und im Vergleich mit den Strukturen aus dem Geländebeispiel Entscheidungskriterien für die Entstehung solcher Strukturen zu finden. Aus den Beobachtungen im Gelände resultieren zwei Schritte für die Durchführung der Versuche: (1) der formbildende Mechanismus und (2) dextrale Scherung. Dazu wird jeweils im ersten Teil Inflation eines Objekts, Kollabieren eines Objekts oder Boudinage durchgeführt. Die echte Boudinage wird unter Bedingungen der Reinen Scherung simuliert, da die Extensionen, die mit einfacher Scherung der Scherapparatur erzeugt werden können zu niedrig sind. Der zweite Teil der Experimente besteht aus dextraler Einfacher Scherung, da eine solche Deformation (D_3) der Intrusion der Pegmatite in Cap de Creus nachfolgte: Da schmale Pegmatitgänge, die parallel zum Hauptteil der Pegmatite laufen, weder boudiniert noch extendiert sind, werden die Objekte in der Scherebene ausgerichtet. Sie liegen damit in einer Lage mit der Streckung ($=l/l_0$) 1 bzw. dem Strain ($=(l-l_0)/l_0$) 0 (siehe Kap. 2.2.2 Formen der Pegmatitkörper). An den Turmalinrändern mit der eingefrorenen Schieferung ist jedoch eine dextrale Deformation (D_3) nachzuweisen (siehe Kap. 2.2.2 Turmalinränder). Eine Raumlage, in der keine Extension oder Kompression auftritt, kann die Scherebene einer Einfachen Scherung sein.

In einem Versuch (Kap. 3.3.2 Inflation mit Öffnungsobjekt und gleichzeitiger Scherung) wird die Trennung dieser beiden Schritte nicht vorgenommen, was sich auf die Theorie der gekoppelten $D_{2/3}$ Deformation bezieht (siehe Kap. 2.1.3 Ende).

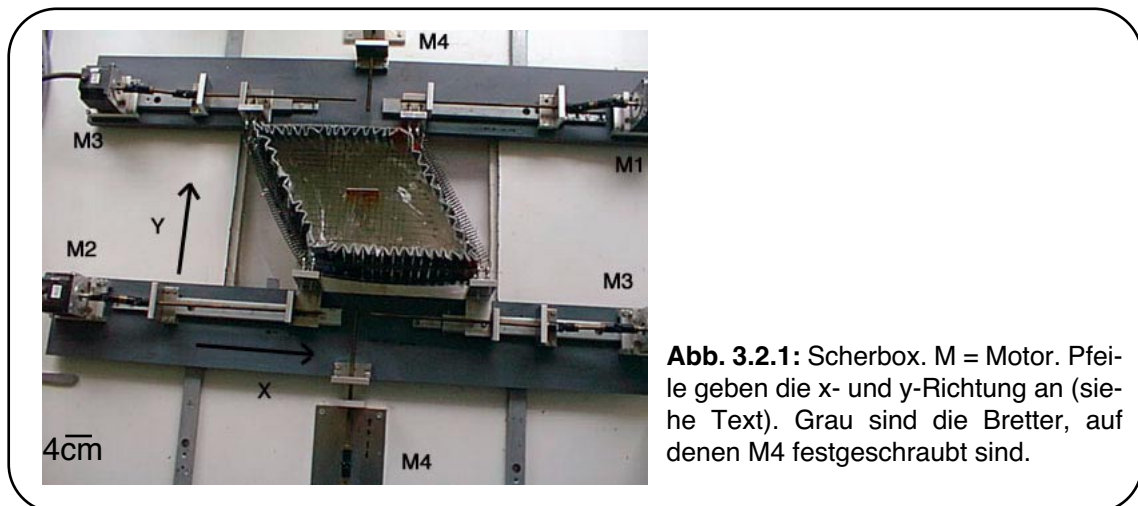
Im Folgenden werden die Namen der Experimente in Anführungszeichen verwendet (siehe Anhang 1). Diese Namen stimmen mit denen der Ordner überein, in denen sich die dokumentierenden Fotos der Versuche befinden (siehe beiliegende CD-Rom).

3.2 Methode

3.2.1 Scherapparat

Der für die Versuche verwendete Scherapparat (PIAZOLO et. al. 2001), ermöglicht die Modellierung der Deformation von Analogmaterialien unter homogenen Randbedingungen. Jede Kombination aus Einfacher Scherung (parallel zur xy -Ebene) und Reiner Scherung (parallel zu den x -, y - und z -Achsen) kann durchgeführt werden.

Die eigentliche Box besteht aus vier Faltwänden, mit einem Stück Latex als Unterlage, und ist nach oben offen. Die Ecken der Box werden von insgesamt sechs Motoren gesteuert. Zwei Motoren bewegen zwei gegenüberliegende Ecken der Box unabhängig voneinander in die x -Richtung (M1 und M2 in Abb. 3.2.1). Zwei weitere Motoren (diagonal gegenüberliegend) bewegen sich simultan. Die beiden restlichen Motoren (M4) steuern gleichzeitig die Bewegung in der y -Richtung, indem sie zwei Bretter bewegen, auf denen je zwei der vier bereits erwähnten Motoren sich gegenüberstehend befestigt sind.



Die Motoren werden durch ein Computerprogramm (Labview) gesteuert, welches nach den Angaben des Benutzers die einzelnen Geschwindigkeiten der Motoren berechnet (siehe Appendix in GROTENHUIS 2000 und PIAZOLO 2001). Diese Angaben sind bei Einfacher Scherung die Maße der Box, der Versatz in x -Richtung und die Geschwindigkeit. Bei der Kombination von Einfacher und Reiner Scherung werden die Maße der Box, die Länge der x -Seite nach der Defor-

mation, die Wortzitiertanzahl, und die Dauer des Experiments in Form einer Verkürzungsrare angegeben.

3.2.2 Materialien

Matrix

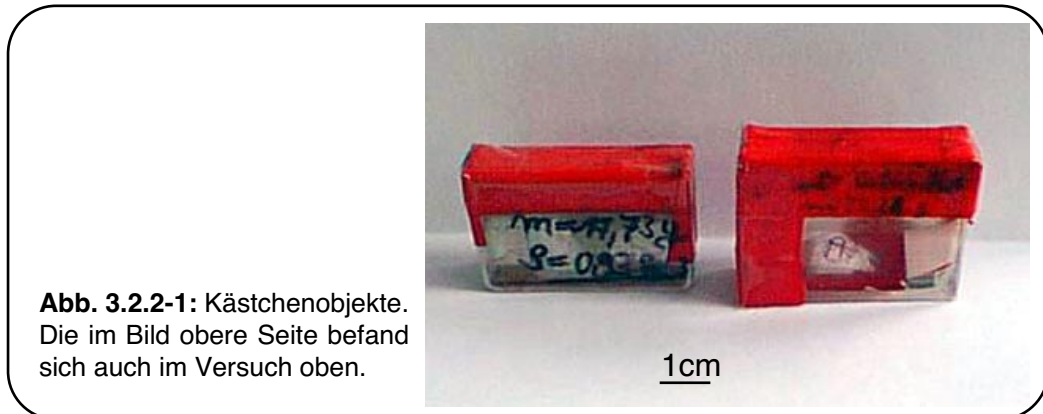
Im Scherapparat können Stoffe mit Viskositäten zwischen 10^3 und 10^6 Pa s deformiert werden (PIAZOLO et. al. 2001). Für die hier beschriebenen Versuche wird PDMS (Polydimethylsiloxane) der Firma Dow Corning (Großbritannien) verwendet. Es handelt sich um ein transparentes Polymer mit einer Dichte von 0.965 g/cm^3 und einer Viskosität von $5 \cdot 10^4$ Pa s, das bei Verformungsraten unter 10^{-1} s^{-1} newtonsches Fließverhalten zeigt (PIAZOLO et. al. 2001). Das Matrixmaterial simuliert das Nebengestein um die Pegmatitkörper herum.

Auf die Oberfläche des Matrixmaterials wird ein Gitter gezeichnet, um die Deformation und Verformung beobachten und aufzeichnen zu können und Markerpunkte oder -linien für die Auswertung zu erzeugen.

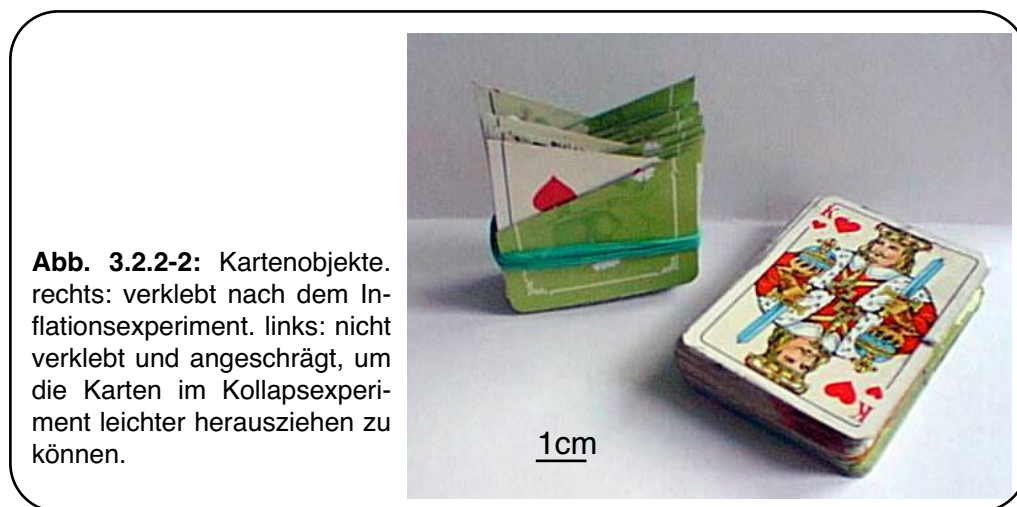
Objekte

Drei verschiedene Objekttypen kommen zum Einsatz: Spielkarten, in PDMS schwimmende oder schwebende Plastikkästchen und ein Öffnungsobjekt, das sich durch Drehen an einer Schraube weitet. Die Objekte simulieren die Pegmatitkörper des Geländebeispiels.

Die Plastikkästchen (Abb. 3.2.2-1) stellen Körper dar, die sich in ihren Ausmaßen nicht ändern. Sie sollen den Boden der Scherapparaturbox nicht berühren, um die Reibung damit zu verhindern (wichtig für die Rotationsfähigkeit der Objekte, siehe Kap. 3.2.3). Dazu ist ein Teil der Kästchen an die Dichte von PDMS angepasst, so dass sie an der Oberfläche von PDMS schwimmen (Dichte der Objekte 0.93 g/cm^3). Für Versuche im Inneren der PDMS (nicht an der Oberfläche) werden weitere Objekte mit einer Dichte von 0.965 g/cm^3 zum Schweben gebracht. Diese Objekte kommen bei der Simulation der Boudinage zum Einsatz.

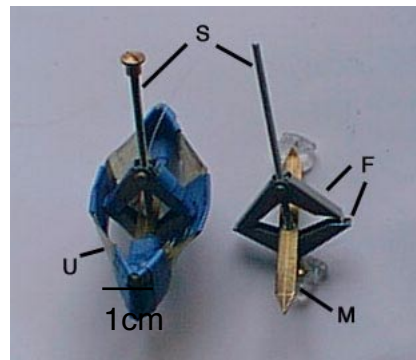


Die 4,4*6,5 cm großen Spielkarten simulieren einzeln und in verschiedenen großen Stapeln (Abb. 3.2.2-2) unterschiedlich aufgeblähte Körper der Hypothesen I und II (Abb. 2.5.2). Die Karten werden dabei einzeln hinzugesteckt (Inflation) oder herausgezogen (Kollabieren).



Das Schraubenobjekt ist ein Körper, der sich linsenförmig öffnet ohne seine Länge zu verändern. Es wird zur Simulation der Inflation eines Körpers in Hypothese II verwendet. Zwei Flügel, die gegeneinander geschraubt werden, weiten die Umhüllung. Diese Umhüllung besteht aus vier semiflexiblen Plastikstreifen, je an den Spitzen und den Flügeln befestigt, und dazwischen geklebten Latexstücken. Ein Metallstäbchen in der Mitte des Objekts gewährleistet die Längenkonzanz (Abb.3.2.2-3).

Abb. 3.2.2-3: Schraubenobjekt. S = Schraube. F = Flügel. M = Metallstäbchen. U = Umhüllung.
Das Objekt rechts stellt das Innere des eigentlichen Objektes dar.



3.2.3 Blankoexperimente

Zwei Blankoexperimente (ohne Objekte) helfen, das Verhalten des Scherapparates kennenzulernen. Es wird jeweils Einfache dextrale Scherung einmal ohne Unterlage („Basis3“, siehe Anhang 1C bis E) und einmal mit Latextuch als Unterlage („Basis4“) durchgeführt. Da die Anfangsparameter gleich sind (Länge x der Box, Breite y der Box, Winkel zwischen x - und y -Wand, Geschwindigkeit der Motoren) können gleiche Stadien (gleiche Fotonummern) direkt verglichen werden.

Abb. 3.2.3-1 und 3.2.3-2 zeigen jeweils Stadium 17, wo eine Scherverformung (shear strain) von 0,64 (Strainrate $2,1 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) vorliegt. Das auf die PDMS-Oberfläche gebrachte Gitter zeigt in der Mitte der Scherbox homogene Verformung. (Die Rechtecke sind etwa in der Mitte der Scherbox eingezeichnet.) Zu den Rändern hin biegen die Gitterlinien jedoch um. Abbildung 3.2.3-1c und 3.2.3-2c zeigen im direkten Vergleich das reale Parallelogramm (oben), entstanden durch die Scherung der Box, und das ideale Parallelogramm, konstruiert aus dem Ausgangsrechteck mit dem Zeichenprogramm Canvas (unten). Sie sind in beiden Experimenten identisch. Allerdings hat sich die Grundfläche des Objekts (identisch mit den ursprünglich waagerechten Gitterlinien auf der PDMS-Oberfläche) im Vergleich zum Ausgangsrechteck im Versuch ohne Latextuch um 6° , im Versuch mit Latexunterlage um 4° gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Im inneren Bereich der Box rotiert demzufolge das gesamte Gitter.

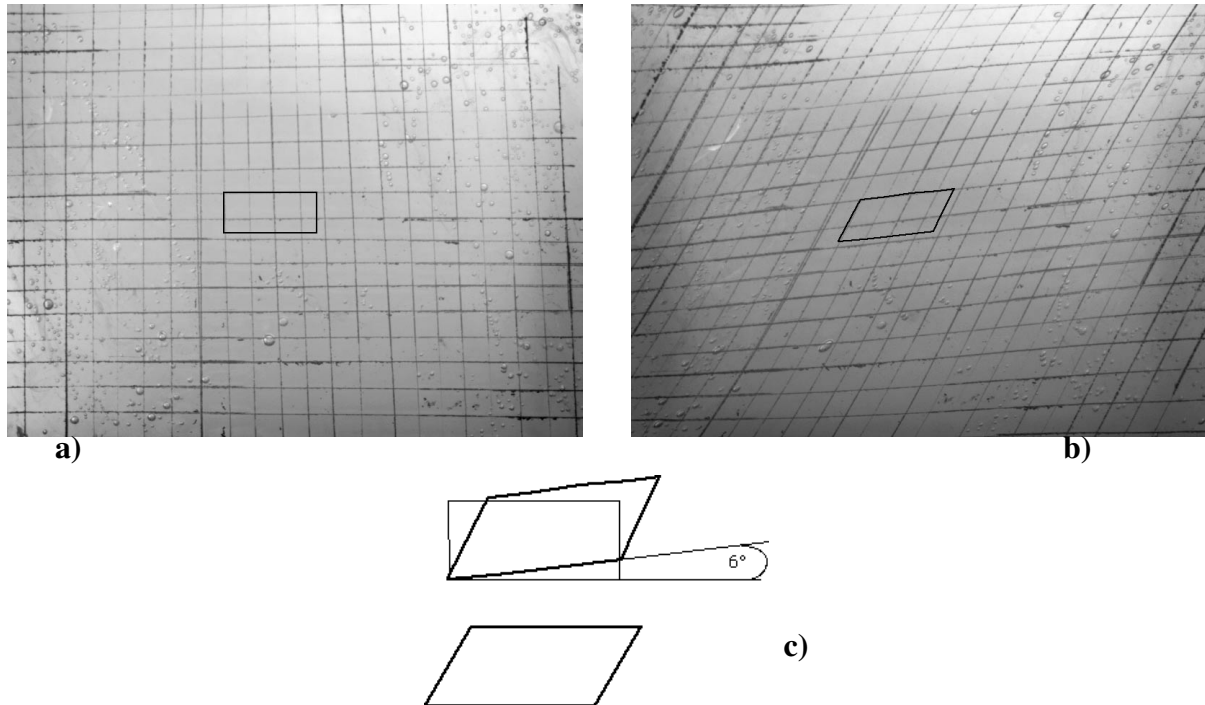


Abb. 3.2.3-1: Blancoexperiment ohne Unterlage (Experiment „Basis3“). **a)** Bild 1 des Versuchs. Das schwarze Rechteck (2,2 cm lang) ist nachträglich eingezeichnet. **b)** Bild 17 des Versuchs. Das schwarze Rechteck aus a) ist mit Hilfe des bestehenden Gitters konstruiert worden (siehe Kap. 3.4). **c)** Im oberen Teil sind die konstruierten Objekte aus a) und b) vergrößert dargestellt. Das untere Parallelogramm ist das aus dem Rechteck ideal gescherte Objekt (mit Graphikprogramm).

Diese Rotation verläuft nicht linear zum Scherstrain ab. Bereits bei 0.5 (Foto 12) beträgt der Winkel 4° bzw 6° . Da die Reibung mit der Basisplatte der Scherbox ohne Latexunterlage größer ist, ist hier auch diese innere Rotation höher. Auch mit Latextuch findet eine Rotation (4° bei strain 0.64) der gesamten Oberfläche statt, die bei der Auswertung berücksichtigt werden muß. Da allerdings das Gitter auf der PDMS-Oberfläche als Referenzsystem benutzt wird, ist die hier beschriebene Rotation unerheblich.

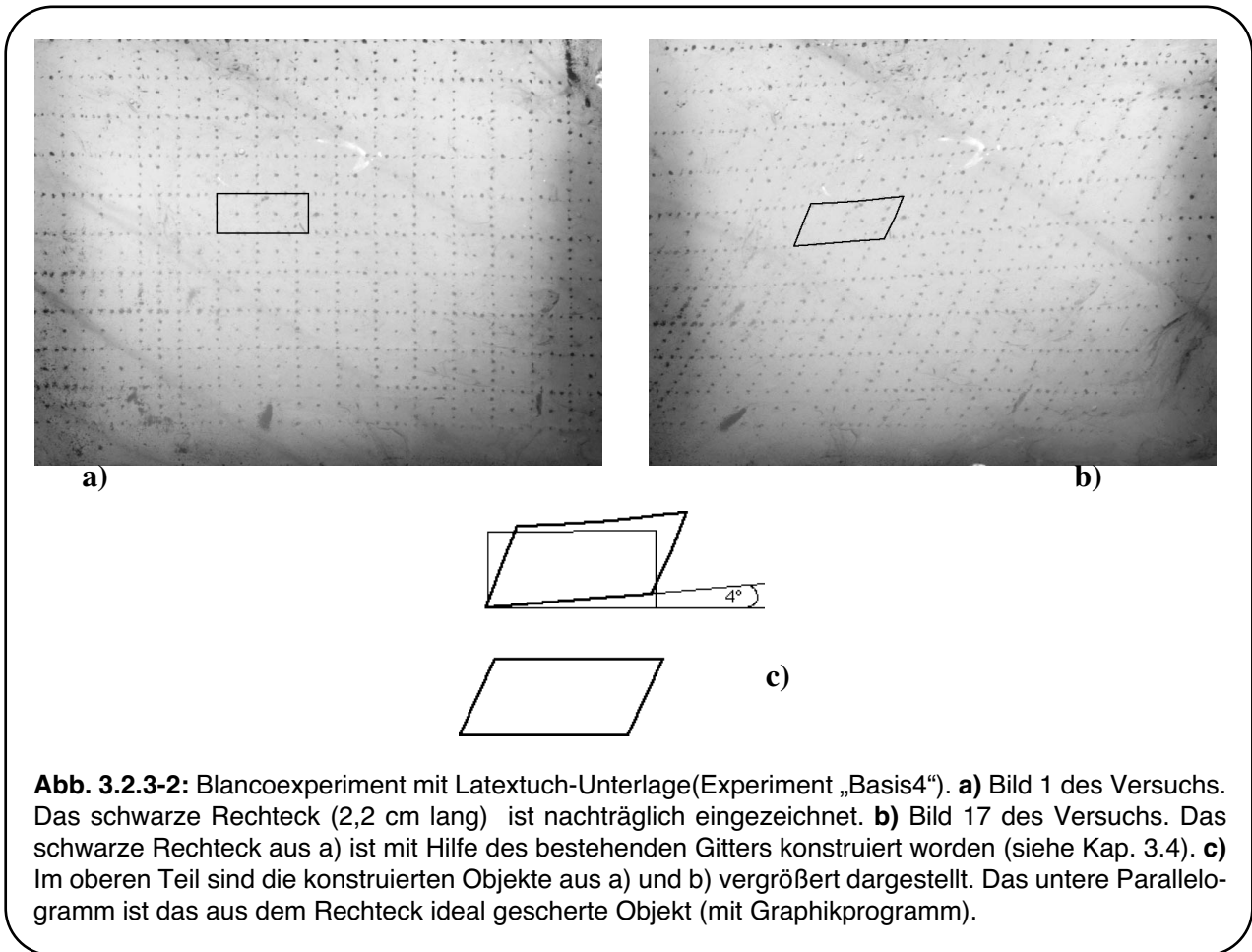


Abb. 3.2.3-2: Blancoexperiment mit Latextuch-Unterlage(Experiment „Basis4“). **a)** Bild 1 des Versuchs. Das schwarze Rechteck (2,2 cm lang) ist nachträglich eingezeichnet. **b)** Bild 17 des Versuchs. Das schwarze Rechteck aus a) ist mit Hilfe des bestehenden Gitters konstruiert worden (siehe Kap. 3.4). **c)** Im oberen Teil sind die konstruierten Objekte aus a) und b) vergrößert dargestellt. Das untere Parallelogramm ist das aus dem Rechteck ideal gescherte Objekt (mit Graphikprogramm).

3.2.4 Vorversuche

Zur Rotationsfähigkeit der Objekte

Im Fluß der Einfachen Scherung rotieren rigide Objekte kontinuierlich, abgesehen von Linearen und Ebenen (GOSH & RAMBERG 1976). Bei dextralem Fließen rotieren die Objekte mit dem Uhrzeigersinn. Dabei spielen das Längen-Breitenverhältnis und die ursprüngliche Lage eine entscheidende Rolle für den Betrag der Rotation (siehe Gleichung nach GOSH & RAMBERG 1976). Kurze, breite Objekte rotieren schneller als lange, dünne. Ein Körper, mit der Längserstreckung senkrecht zur Scherebene liegend, dreht sich am stärksten. Bei parallel zur Scherebene ausgerichteten Körpern ist die Rotation am geringsten. Bei dem Experiment „Inflation2“ (Anhang 1C bis E) steht der aufgeblähte Kärtchenstapel

auf einem kleinen Podest (gegen das Absinken) und rotiert demzufolge nicht (siehe Kap.3.3). Da jedoch dieser Versuch ohne Latexunterlage stattfindet, dreht sich das Gitter nach Basisversuch3 (siehe oben) um 6° . Relativ drehen sich die Karten also um 6° mit dem Uhrzeigersinn. Zur Überprüfung der Rotationsfähigkeit der Objekte, dienen die Experimente „Basis1“ und „Basis2“ (Anhang 1C bis E). In ihnen wird jeweils ein schwimmendes Objekt in der Matrix dextral geschert (ohne Unterlage). Relativ drehen sich die Objekte um 18° und um 6° (Anhang 3 und 4). Nach GOSH & RAMBERG (1976) liegen diese Werte in den Größenordnungen, jedoch noch unter dem Soll. Die Formel

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{\gamma} \cdot (R^2 \sin^2 \phi + \cos^2 \phi) + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{W_k^2} - 1} \cdot (R^2 - 1) \cdot \sin^2 \phi}{R^2 + 1}$$

gilt für elliptische Objekte.

mit:

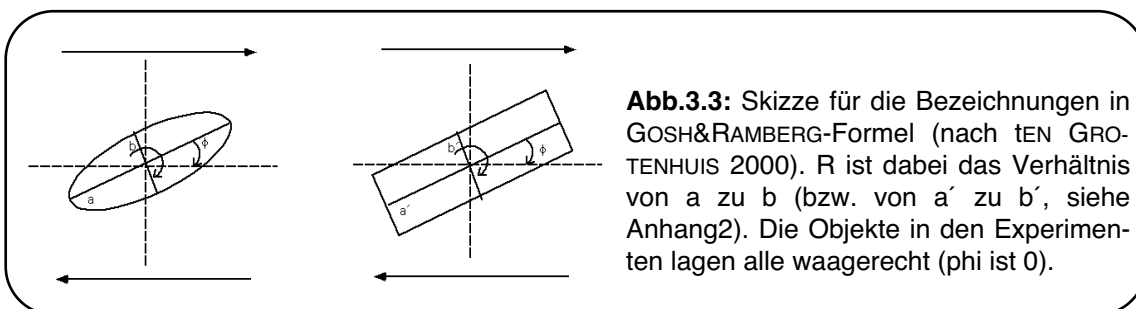
$\dot{\Phi}$ = Winkelgeschwindigkeit

R = Längen-Breitenverhältniss des Objekts

ϕ = Objektorientierung zu Beginn der Scherung

W_k = Wortizitätszahl

$\dot{\gamma}$ = Strainrate



Ihre Annäherung für rechteckige Objekte (Anhang 4) über die Flächen der Ellipse und des Rechtecks ist nur grob, liefert aber Anhaltspunkte. Die tatsächlichen Rotationen der Objekte relativ zum Gitter (Anhang 3, Spalte 16) liegen zum

Großteil in dem aus den Grenzfällen mit der Formel nach GOSH & RAMBERG (1976) berechneten Bereich.

Zur Geschwindigkeit der Experimente

Die Experimente sind in erster Linie durch Fotos der Oberfläche dokumentiert. Effekte des Experiments auf die dritte Dimension, z.B. Einbuchtungen des Matrixmaterials an der Oberfläche sollen vermieden werden, da sie nicht ausreichend aufgezeichnet werden können. Es werden nur zweidimensionale Effekte simuliert. Die Oberfläche des Versuchs soll immer eine Ebene sein. Dies kann durch einen sehr langsamen Ablauf der Experimente realisiert werden, was dem PDMS die Möglichkeit gibt, durch gravitatives Fließen auch nach einer Deformation eine ebene Oberfläche zu erhalten. Besonders bei der Simulation der echten Boudinage ist die Einstellung der Geschwindigkeit schwierig. Die Strainraten, die bei der Öffnung der Boudin necks entstehen, sind lokal sehr hoch. Es entstehen Einbuchtungen in PDMS in den Boudin necks. Die Strainraten liegen in den Experimenten über den zulässigen Werten ($<10^{-1} \text{ s}^{-1}$ für newtonsches Fließen der PDMS). Die realisierbaren Geschwindigkeiten des Scherapparates sind für die Durchführung dieses Versuchs an der Oberfläche der PDMS zu hoch. Deshalb wird der Hauptversuch unter der PDMS durchgeführt, um Luftabschluss und erzwungenes Fließen der PDMS in die Boudin necks zu erzeugen.

Bei einem Vorversuch zur echten Boudinage wird versucht, die PDMS-Einbuchtungen durch einfaches Stehenlassen des Experiments zu schließen. Dabei ergab sich ein unerwarteter Effekt: Das mittlere Boudin wandert (Abb. 3.2.4). Eventuell ist ein Boudin neck etwas größer, wodurch mehr PDMS einfließen kann. Dabei wird ein Boudin verschoben.

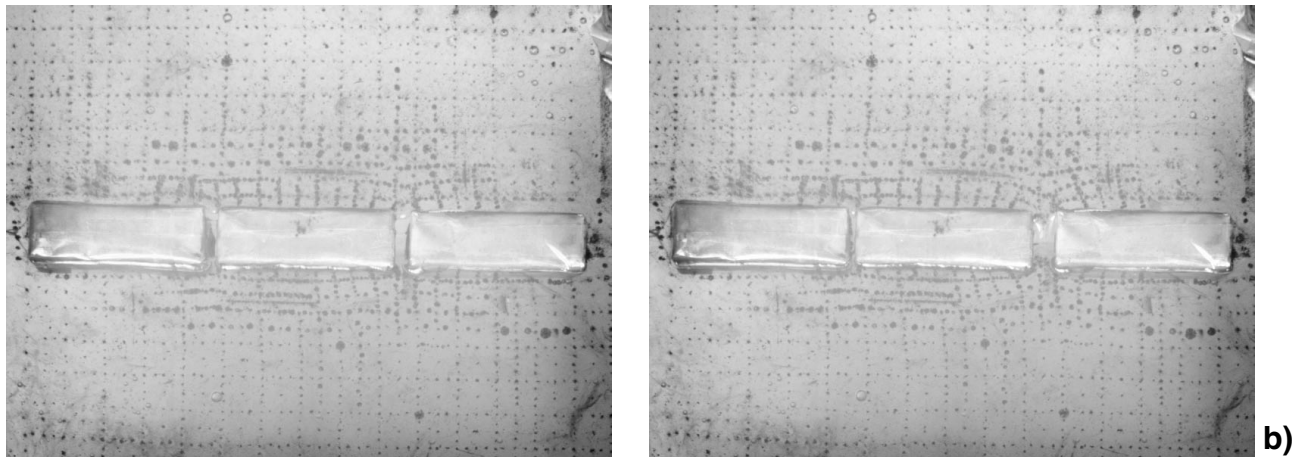


Abb.3.2.4: Wandern eines Boudins. **a)** Stadium 8 von „RealBoud3“. Die Scherung wurde wegen zu großer Löcher in der PDMS zwischen den Objekten abgebrochen. **b)** Foto nach einer Ruhephase von ca. 3 Stunden, in der keine Deformation mit der Scherapparatur ausgeübt wurde. Das mittlere Boudin ist nach links gewandert.

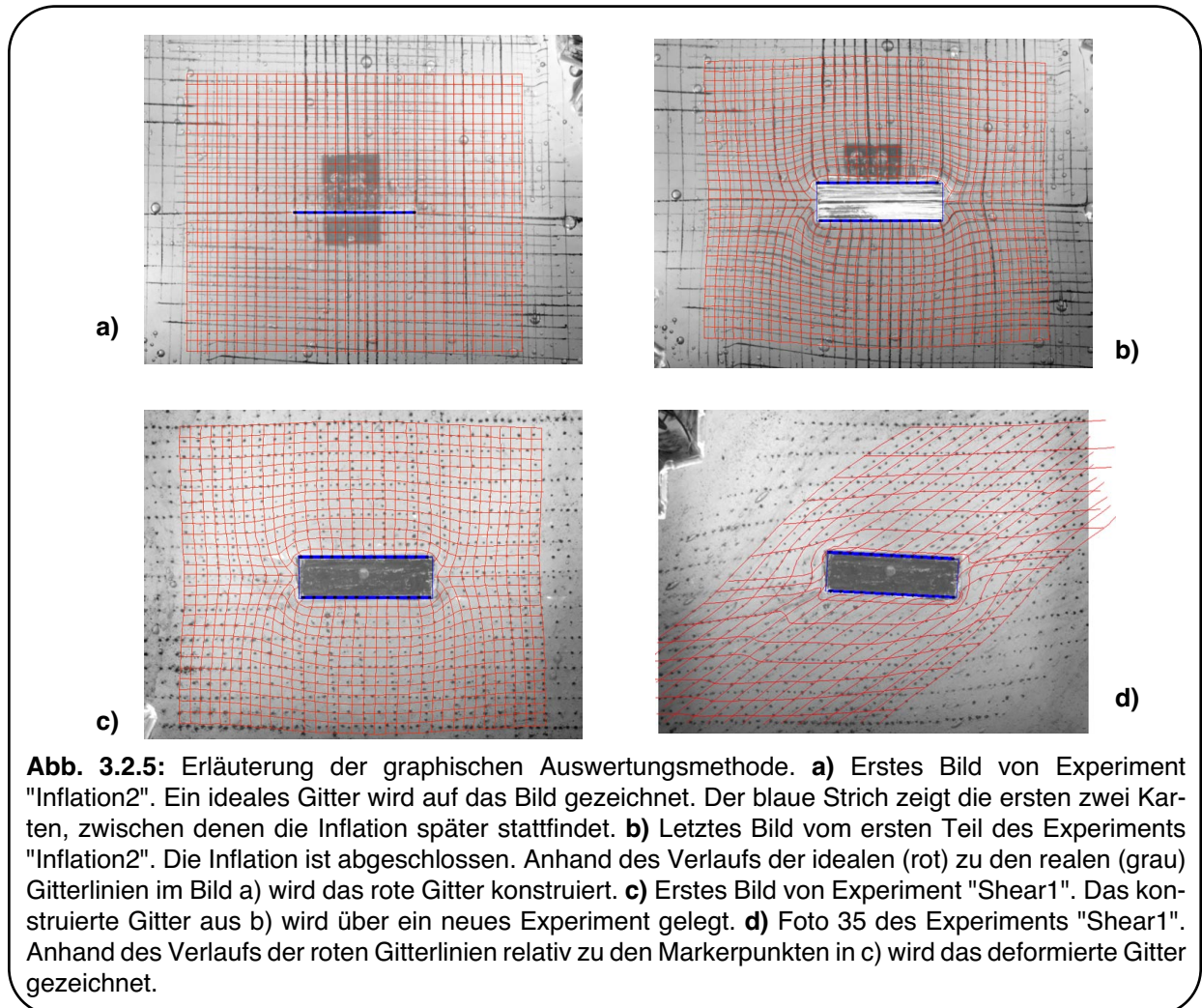
3.2.5 Auswertungsmethoden

Graphische Auswertung

Die Zeichenmethode wird benutzt, um gleichmäßige Gitter auf alle Versuche zu legen. Die Zeichnung eines idealen Gitters auf die PDMS-Oberfläche eines Experiments ist in der Regel nicht realisierbar. Darum wird ein solches Gitter auf das erste Bild eines Experiments gezeichnet (Abb. 3.2.5a). Seine Gestalt kann an jeder Stufe der Durchführung anhand vorhandener Markerlinien oder -punkte des Gitters auf der PDMS-Oberfläche nachvollzogen werden (Abb. 3.2.5b). Anhand eines gleichmäßigen, anfangs rechtwinkligen Gitternetzes, dessen Deformation in jedem Stadium nachvollzogen werden kann, können beliebige Anfangssituationen von Strukturelementen zu den Objekten theoretisch deformiert werden. Dazu wird der Verlauf der Elemente durch das Gitter in jedem Deformationsstadium beibehalten (siehe Kap. 3.4).

Da die Experimente als Fotos in zwei Dimensionen aufgenommen wurden, können sie beliebig kombiniert werden. Angewendet wurde diese Kombinationsmethode in erster Linie für die Verknüpfung der Experimente „Inflation2“ und „Shear1“. Der zweite Teil von „Inflation2“ (die Scherung) gewährleistet die Rota-

tionsfähigkeit der Objekte nicht. „Shear1“ beschreibt ein passendes schwimmendes Objekt (siehe Kap 3.3.1). Das Gitter eines Versuches wird dazu auf das erste Bild eines zweiten Experimentes gelegt (Abb. 3.2.5c). Der Verlauf der Gitterlinien kann dann in jedem beliebigen Stadium des Experiments anhand der vorhandenen Markerpunkte konstruiert werden (Abb. 3.2.5d).



Programm „Marker Analysis“

Das Programm Marker Analysis (BONS et. al. 1993) berechnet das Fließen und die Deformation eines beliebigen Materials aus digitalisierten Markerpunkten in Bildern verschiedener Stadien eines Experiments. Die Deformation kann als:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{F} \mathbf{x} + \mathbf{d} \quad (1)$$

(mit:

\mathbf{x} : Position eines Markerpunktes vor der Deformation

\mathbf{x}' : Position eines Markerpunktes nach der Deformation

\mathbf{F} : Positionsverlaufstensor

\mathbf{d} : Translationsvektor)

dargestellt werden. Das Fließen wird analog dazu durch die Gleichung:

$$\mathbf{v} = \mathbf{L} \mathbf{x} + \mathbf{l} \quad (2)$$

(mit:

\mathbf{v} : Geschwindigkeit eines Markerpunktes an der Position \mathbf{x}

\mathbf{L} : Geschwindigkeitsverlaufstensor

\mathbf{l} : Geschwindigkeitsvektor)

ausgedrückt. Über Polynome wird die Position jedes Markerpartikels (in x- und y- Richtung unabhängig) als Funktion der Zeit beschrieben. Durch eine Anpassung nach dem Verfahren der kleinsten Quadratsummen werden diese Polynome gelöst. Die Deformation auf der Fläche wird durch die Verwendung eines Gitters angenähert, wobei jedes Gitterquadrat als homogen deformierend angenommen wird. Gleichung (1) wird wiederum mit der Methode der Anpassung der kleinsten Quadratsummen mit mehr als drei Markerpunktpositionen gelöst.

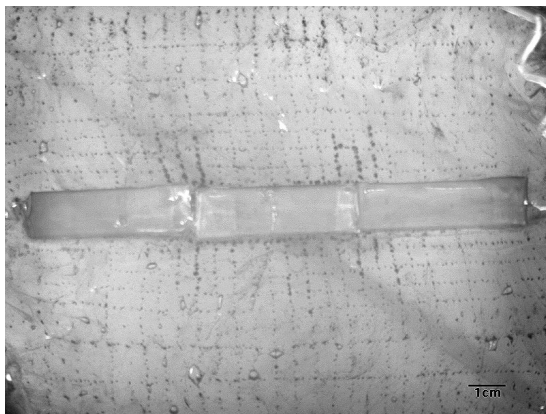
Das Programm kann aus den erhaltenen Deformationstensoren verschiedene Strainparameter für jeden Gitterpunkt berechnen und zeichnen (siehe Kap. 3.4.2).

3.3 Durchführung

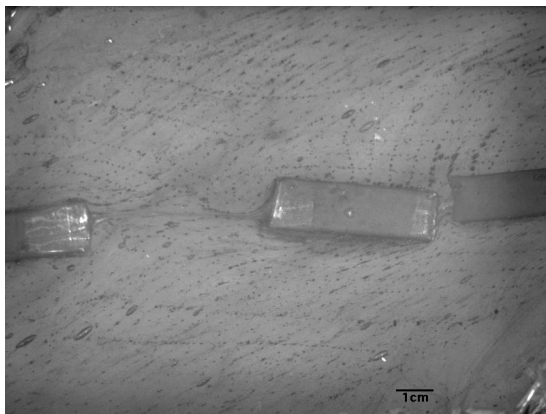
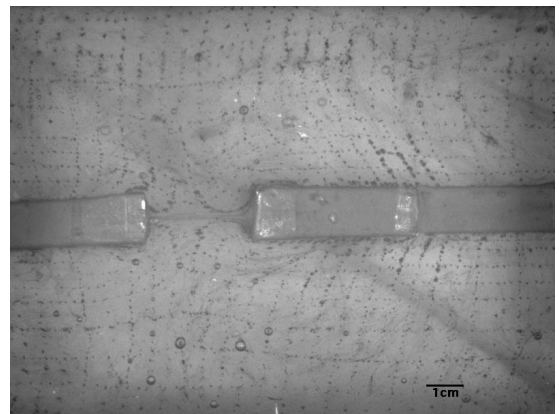
3.3.1 Echte Boudinage

Hypothese I (siehe Anhang 1 A und B, „RealBoud4 und shear“) wird mit drei schwebenden Kästchen als Objekten unter der PDMS-Oberfläche simuliert. Die Vorversuche zur Geschwindigkeit zeigen, dass eine Durchführung an der Oberfläche des Matrixmaterials nicht möglich ist (siehe Kap. 3.2.2). Die Objekte sind lückenlos nebeneinander (siehe Abb. 3.3.1a) in einem niedrigen PDMS-Level positioniert, wobei die beiden äußeren an den Wänden der Box festgebunden sind. In Höhe der Objekte wird ein Gitter auf die PDMS-Oberfläche gezeichnet

bevor eine weitere gleichmächtige und undeformierte Schicht PDMS vorsichtig aufgebracht wird.



a) b)



c)

Abb. 3.3.1: Originalfotos des Boudinage-experiments. **a)** Anfangssituation. **b)** Nach der Boudinage durch Extension in Reiner Scherung (Extension $\epsilon = 1,14$). **c)** Nach dextraler einfacher Scherung (shear strain = 1,5).

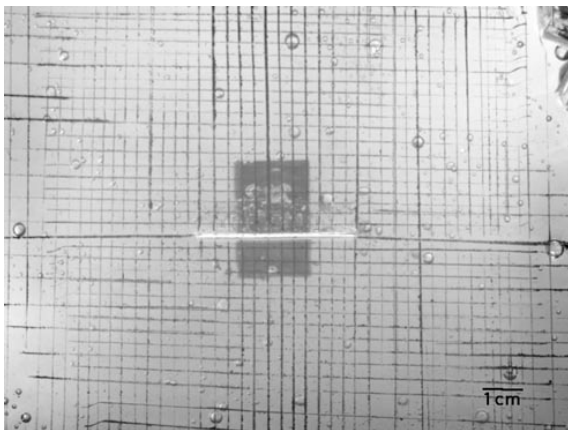
Das Labviewprogramm „Transposition D.vi“ erzeugt mit der Wortzitätszahl 0,01 Reine Scherung (Extensionsrate $\dot{\epsilon} = 6 \cdot 10^{-6} \text{s}^{-1}$) mit einer vernachlässigbar kleinen einfachen Scherkomponente. In 15-minütigen Abständen werden Fotos des Versuches aufgenommen (siehe beiliegende CD-Rom, Ordner „RealBoud-4“). Während der Reinen Scherung mit einer 14%igen Extension in x-Richtung öffnet sich nur eines der beiden vorangelegten Boudinnecks (siehe Abb. 3.3.1b). Das zweite Boudinneck öffnete sich erst bei der dextralen Scherung mit einer sinistralen Scherkomponente (siehe Abb. 3.3.1c). Eine schräge Öffnung ist offensichtlich einfacher durchzuführen, als eine direkte parallele Öffnung. Die einfache Scherung des zweiten Experimentabschnitts wurde in allen Versuchen mit dem Labviewprogramm „simple shear.vi“ gesteuert. In diesem Fall beträgt die Scherverformungsrate (shear strain rate) $2,6 \cdot 10^{-4} \text{s}^{-1}$ (shear strain = 1,5). In 3-minütigen Abständen werden Fotos aufgenommen (siehe beiliegende CD-Rom, Ordner „RealBoud4-shear“).

3.3.2 Inflation

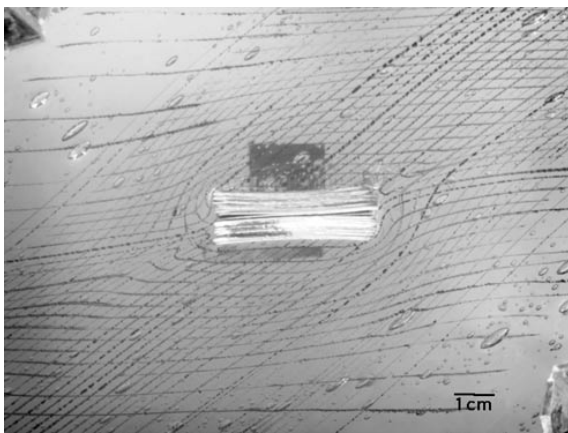
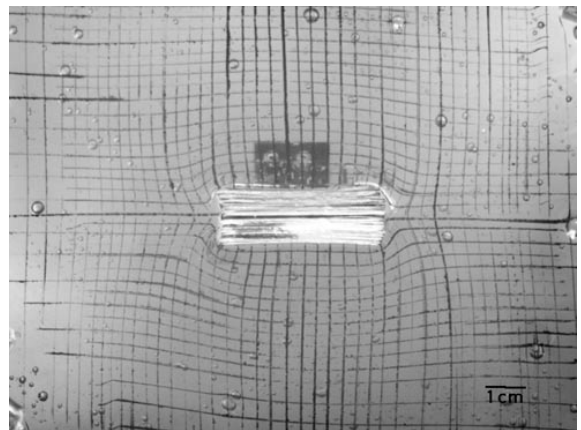
Hypothese II wird mit drei verschiedenen Versuchen simuliert: einmal mit der Inflation durch Karten und zweimal mit der Inflation durch das Öffnungsobjekt mit Schraube.

Inflation mit Karten

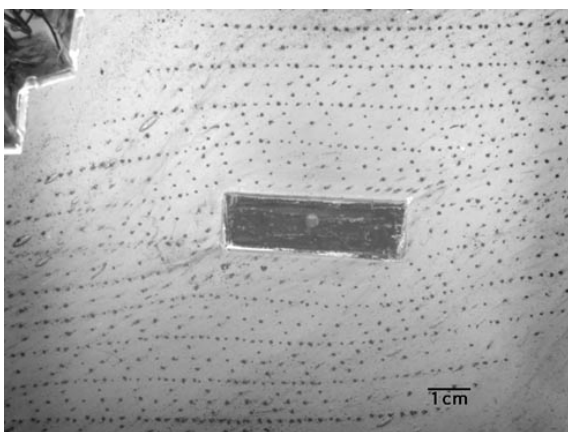
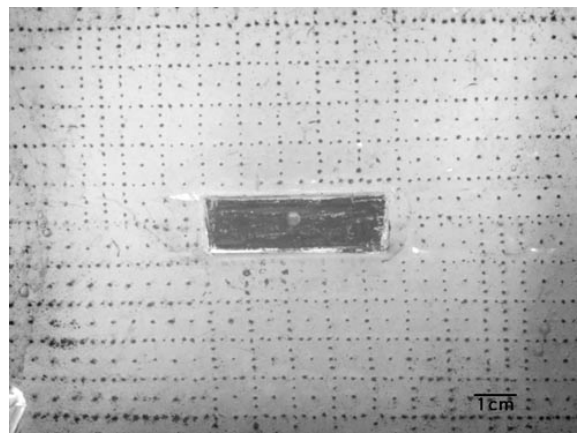
Die Inflation mit Karten (siehe Anhang 1C bis E „Inflation2 und shear“) erfolgt durch Hinzustecken weiterer Karten (Abstand 2 min) zwischen zwei initiale



a) b)



c) d)



e)

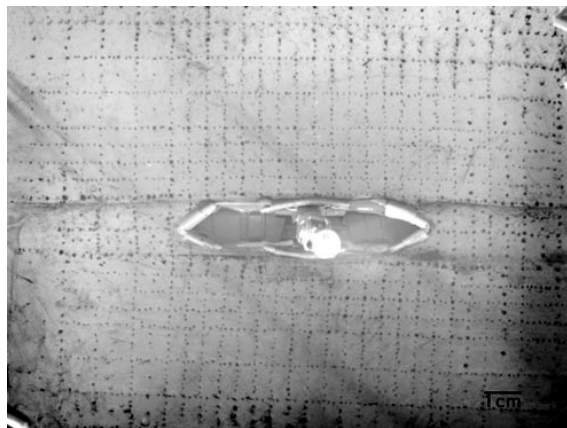
Abb. 3.3.2-1: Originalfotos des Inflationsexperiments mit Karten und des Scherexperiments. **a)** Anfangssituation des Inflationsexperiments. **b)** Nach der Inflation mit 35 Karten. **c)** Nach dextraler einfacher Scherung (shear strain = 1). **d)** Anfangssituation des Scherexperiments. **e)** Nach dextraler Scherung (shear strain = 1,4).

Karten, die vor Experimentbeginn in die glatte PDMS-Oberfläche gesteckt worden sind. Um die anfänglich positionierten Karten wird ein Gitter auf die Oberfläche des Matrixmaterials gezeichnet (Abb. 3.3.2-1a). Pro Schritt des Experiments (=Hinzustecken einer Karte) wird ein Foto zur Dokumentation aufgenommen (siehe beiliegende CD-Rom, Ordner „Inflation2“). Der mächtiger werdende Kartenstapel (Abb. 3.3.2-1b) steht auf einem Podestklötzchen um ein Absinken zu verhindern. Die hinzugefügten Karten werden jeweils mit den äußeren verklebt.

Die Verklebung soll ein Abscheren der Karten gegeneinander während des zweiten Teils des Experiments verhindern. Der zweite Versuchsabschnitt besteht aus einfacher dextraler Scherung (Scherverformungsrate (shear strain rate) = $1,7 \cdot 10^{-4} \text{s}^{-1}$, shear strain = 1). Allerdings verhindert hier die Reibung mit dem untergelegten Podest eine Rotation des Kartenstapels. Deshalb wird der zweite Experimentteil mit einem schwimmenden Objekt wiederholt (siehe Anhang 1C bis E „Shear1“). Dieses Objekt hat die gleichen Maße wie der aufgeblähte Kartenstapel (Abb. 3.3.2-1d und e). Es wurde eine Scherverformungsrate (shear strain rate) von $2,2 \cdot 10^{-4} \text{s}^{-1}$ und eine Scherverformung (shear strain) von 1,4 erreicht.

Inflation mit Öffnungsobjekt und anschließender Scherung

Das ungeöffnete Schraubenobjekt ist an der ebenen Matrixoberfläche positioniert (Abb. 3.3.2-2a) und wird gegen ein Absinken mit einem Nylonfaden an einem über dem Experiment stehenden Stativ befestigt. Auf der PDMS-Oberfläche um das Objekt herum wird das Gitter aufgebracht. Die Öffnung des Objekts erfolgt gleichmäßig nach Diagramm in Anhang 2 (Abb. 3.3.2-2b) und ist in Ordner „Inflationschr1“ dokumentiert. Die anschließende Scherung wird bei einer Scherverformungsrate von $2,2 \cdot 10^{-4} \text{s}^{-1}$ (shear strain = 1,5) durchgeführt (Abb. 3.3.2-2c, „Inflationschr-shear1“).



a) b)

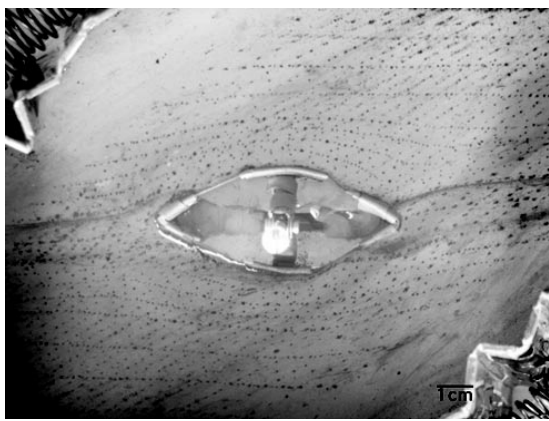
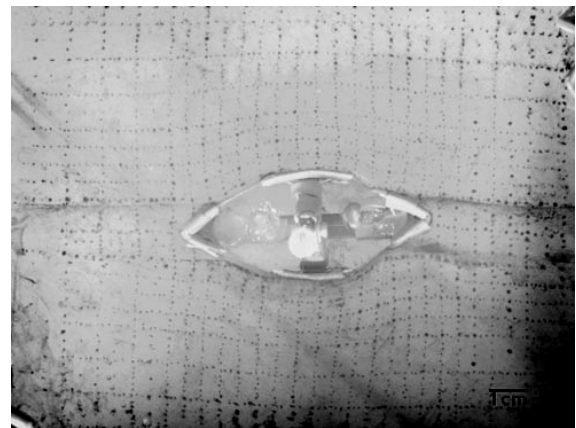
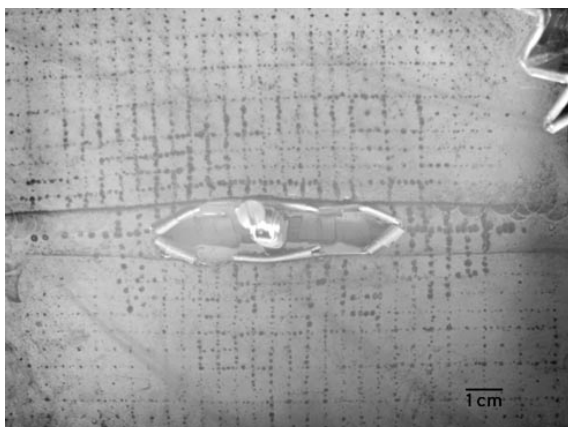


Abb. 3.3.2-2: Originalfotos des Inflationsexperiments mit anschließender Scherung. **a)** Anfangssituation. **b)** Nach der Inflation des Objekts. **c)** Nach dextraler einfacher Scherung (shear strain = 1,5).

Inflation mit Öffnungsobjekt und gleichzeitiger Scherung



a) b)

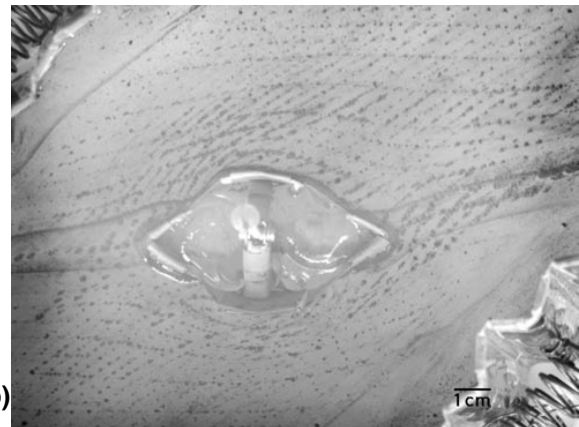
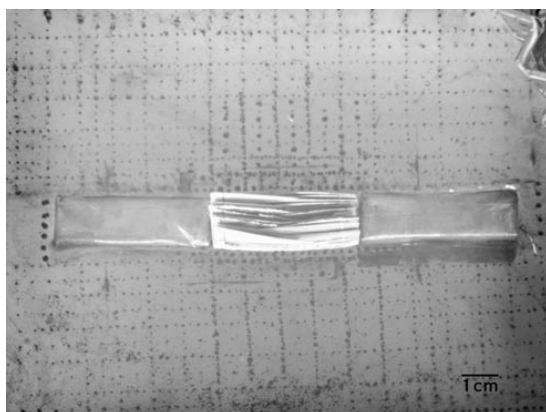


Abb. 3.3.2-3: Originalfotos des Inflationsexperiments mit gleichzeitiger Scherung. **a)** Anfangssituation. **b)** Nach Inflation mit gleichzeitiger dextraler einfacher Scherung (shear strain = 1,5).

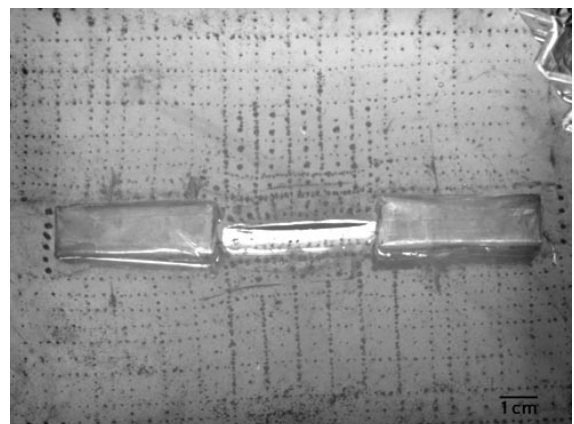
Der Aufbau des zweiten Inflationsversuchs mit Öffnungsobjekt erfolgt wie der des oben beschriebenen ersten Versuchs mit Öffnungsobjekt (Abb. 3.3.2-3a). Während des dextralen Schervorganges (shear strain = 1,5; Scherverformungsrate= $2,2 \cdot 10^{-4} \text{s}^{-1}$) wird das Objekt in 3-minütigen Abständen gleichmäßig nach Anhang 2 geöffnet (Abb. 3.3.2-3b, „Inflationschr+shear“).

3.3.3 Kollabieren

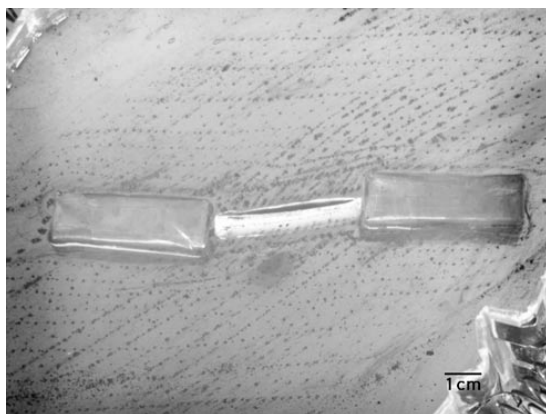
Das Kollabieren wird durch Herausziehen von Spielkarten aus einem in der PDMS-Oberfläche steckenden Kartenstapel simuliert. Der Kartenstapel wird an den kurzen Seiten von schwimmenden Objekten berührt, die die gleiche Mächtigkeit wie der Kartenstapel mit 52 Karten am Anfang des Experiments haben (Abb. 3.3.3-4a).



a)



b)



c)

Abb. 3.3.3: Originalfotos des Kollapsexperiments. **a)** Anfangssituation. **b)** Nach dem Kollabieren. **c)** Nach dextraler einfacher Scherung (shear strain = 1,5).

Der Kartenstapel steckt in einem Luftballon, was das Hochziehen von PDMS an den Karten mit dem Herausziehen der Karten verhindert. Etwas Luft im Ballon und das ständige Herausziehen der Karten nach oben begünstigen das Schwe-

ben des Stapels. Ein kleines Gewicht im Luftballon gibt dem Kartenpaket in seiner aufrechten Position Stabilität.

Die dextrale Scherung wird wiederum bei einer Scherverformungsrate von $2,2 \cdot 10^{-4} \text{s}^{-1}$ (shear strain = 1,5) durchgeführt (Abb. 3.3.3c).

3.4 Resultate

Die Resultate der Experimente (beschrieben in Kap. 3.3 und Anhang 1) wurden mit den beschriebenen Auswertungsmethoden (siehe Kapitel 3.2.5) erzielt. Die Darstellung erfolgt getrennt nach den Auswertungsmethoden.

Der erste Teil beschreibt die allgemeine graphische Auswertung (siehe Kap. 3.2.5), die die in Kap. 2.5 erläuterten Hypothesen vergleicht. Dabei werden die beiden Teile der Experimente (formbildender Mechanismus und dextrale Einfache Scherung) gesondert dargestellt. Für die Einfache Scherung werden die Experimentstadien bei einem shear strain von 1 gezeigt. Die Scherverformung 1 wurde gewählt, da diesen Strain alle Experimente erreichen und die Öffnung des Schraubenobjekts beim Versuch mit gleichzeitiger Scherung („Inflation-schr+shear“) den Ausmaßen des Schraubenobjekts aus dem Äquivalentexperiment mit anschließender Scherung („Inflationschr und shear“) entsprechen.

Der zweite Teil beschreibt die graphische Auswertung der Experimente zu einem speziellen Problem. Eine mögliche Entstehung der Divergenzpunkte (siehe Kap. 2.2.2 Divergenzpunkte) soll hier getestet werden.

Der dritte Teil erläutert die Resultate der Verformungsuntersuchung mit dem Programm Marker Analysis. Hier wird die Strainanalyse des ersten Teils der Experimente (formbildender Mechanismus) dargestellt.

3.4.1 Allgemeine graphische Auswertung

Fünf Experimentkombinationen sind dargestellt: Inflation mit Karten („Inflation2“ und „Shear1“), Inflation mit Schraubenöffnungsobjekt („Inflationschr und shear“), Inflation mit Schraubenöffnungsobjekt und gleichzeitiger Scherung („Inflationschr+shear“), Kollabieren mit Karten („Collapse3 und shear“) und Boudinage durch Extension („RealBoud4 und shear“). Vier Tabellen veranschaulichen die allgemeine Deformation (Tabelle 3.4.1-1), die Deformation von ursprünglich zu den Objekten parallelen Strukturen (Tabelle 3.4.1-2), die Deformation von ursprünglich zu den Objekten senkrechten Strukturen (Tabelle 3.4.1-3), die Deformation von ursprünglich zu den Objekten schrägen Strukturen (Tabelle 3.4.1-4). Im Text werden die Zeichnungen aus den Tabellen mit Zeilen- und evtl. Spaltenzahlen referenziert. Die Nummerierung erfolgt dabei von oben nach unten und von links nach rechts ohne die Überschriftspalten (eine oben, zwei links) mitzuzählen.

Gitter

Tabelle 3.4.1-1 zeigt die undeformierten Gitter vor Experimentbeginn (Spalte1) und die deformierten Gitter des formbildenden Mechanismus (Spalte2) und der Scherung (Spalte3).

Der Mechanismus der echten Boudinage durch Extension (Hypothese I) in Ost-West-Richtung (Zeile 5, Spalte 2) verursacht starke Deformation des Gitters im gesamten dargestellten Bereich und noch darüber hinaus. Das Gitter biegt sich in die entstandene Lücke ein. Besonders zwischen und in der Nähe der Objekte herrscht stark inhomogene Verformung. Auch in den Randbereichen des Bildes ist sie sichtbar inhomogen. Die Gitterquadrate sind alle in Ost-West-Richtung stark verlängert worden, bis zu 300% der ursprünglichen Länge der Quadrate in den Boudinnecks.

Der Mechanismus der Inflation (Hypothese II) bewirkt in den drei dargestellten Fällen (Zeile 1 bis 3) eine Deformation des Gitters von innen nach außen in Nord-Süd-Richtung. Die Gitter sind jeweils an den Objekten am stärksten verformt, wobei die Gitterquadrate in Nord-Süd-Richtung leicht verkürzt werden. Mit

der Entfernung vom Gitter nimmt die Deformation schnell ab. Bei der Inflation eines rechteckigen Objekts (Zeile 1, Spalte 2) konzentriert sich die Verformung an den Ecken des Objekts. Hier zeigt die Veränderung der Gitterquadrate inhomogene Deformation. Entlang der Längsseiten des rechteckigen Objekts ist die Verformung dagegen annähernd homogen. Bei den ovalen Objekten (Zeilen 1 und 2, Spalte 2) verteilt sie sich über die gesamte Längserstreckung des Objektes und setzt sich nach außen hin (in Nord-Süd-Richtung vom Objekt) etwas stärker durch. Hier zeigen alle Gitterquadrate ober- und unterhalb des Objekts leicht inhomogene Deformation an. Die Form der aufblähenden Körper bestimmt also die Verteilung der Deformation entlang der Außenseite des Objekts. Die endgültig deformierten Gitter der Aufblähversuche mit gleichzeitiger bzw. nachträglicher Scherung (Spalte 3, Zeile 2 und 3) unterscheiden sich nicht.

Das Gitter des Experiments zum Kollabieren (Hypothese III) in Spalte 4 zeigt Deformation ausschließlich direkt in unmittelbarer Nähe des kollabierenden Bereichs an. Die Gitterquadrate werden hier in Nord-Süd-Richtung wenig gelängt. Am Stärksten ist die Deformation wieder an den Ecken der Objekte. Es handelt sich hier um eine inhomogene Deformation. Entlang des kollabierenden Objekts erscheint die Verformung dagegen homogen.

Zeile 4 und 5 zeigen sehr deutliche Deformationsunterschiede bei einer gleichen Endgeometrie der Objekte zueinander. Hypothese I (echte Boudinage, Zeile 5) verlangt sehr viel höhere Deformation, besonders zwischen den Objekten aber auch im umgebenden Bereich. Die Verformung, die beim Kollabieren (Hypothese III, Zeile 4) entsteht, ist dagegen minimal; ebenso bei der Inflation (Hypothese II, Zeile 1 bis 3).

Die Unterschiede zwischen Hypothese II und III bestehen im Wesentlichen darin, dass das Gitter bei der Aufblähung (Zeile 1 bis 3) über den Objekten in Nord-Süd-Richtung eingeengt wird, wohingegen es über den Objekten beim Kollabieren nicht deformiert wird. Es wird hier aber in Nord-Süd-Richtung am kollabierenden Bereich zwischen den Objekten gedehnt (Zeile 4). Relativ zueinander handelt es sich dabei um das gleiche Deformationsfeld: Verkürzung entlang der Längskante der Objekte und Dehnung im Bereich um die Lücken zwischen den

		Ausgangssituation	Formbildender Mechanismus	dextrale Einfache Scherung (shear strain=1)	
		Gitter			
Inflation mit Karten (Hypothese II)	Inflation mit Karten (Hypothese II)				
	Inflation mit Öffnungsobjekt (Hypothese II)				
	Inflation mit Öffnungsobjekt (Hyp. II)				
	Kollabieren mit Karten (Hypothese III)				
	Boudinage durch Extension (Hypothese I)				

Tabelle 3.4.1-1: Gitter von fünf Experimentkombinationen in drei Schritten. Die rechteckigen Objekte sind 1.4 cm breit, die ovalen 3.1 cm.

Körpern. Demzufolge sind auch Kombinationen der beiden Mechanismen (Kollabieren und Inflation) nicht zu unterscheiden.

Parallele Strukturen

Tabelle 3.4.1-2 zeigt zur Längserstreckung der Objekte ursprünglich parallele Strukturen (Spalte 1). Spalte 2 veranschaulicht die Deformation dieser Strukturen beim formbildenden Mechanismus. Die bei der Scherung deformierten Strukturen zeigt Spalte 3. Diese Strukturen könnten Schichtgrenzen oder Schieferung sein. In allen fünf dargestellten Experimentkombinationen legen sich die Strukturen an die Objekte an. Die Krümmungen an den Objekten beschreiben die Form der Objekte. Die Aufblähung mit den linsenförmigen Objekten (Zeile 2 und 3) zeigt dies im Vergleich zur Aufblähung des rechteckigen Objekts (Zeile 1) sehr deutlich.

Die Zeichnungen zur echten Boudinage (Hypothese I, Zeile 5) zeigen diese Strukturen. Die Krümmung direkt an den Objekten zeigt ähnlich wie beim Kollabieren und Aufblähen mit rechteckigen Objekten S- bzw. Z-förmige Verbiegungen. Diese Geometrie geht jedoch mit der Entfernung sehr schnell verloren und die S- bzw. Z-Formen vereinigen sich zu einer offenen Faltenform mit einer großen Amplitude. Diese nimmt mit der Entfernung ab, hat aber noch Auswirkung auf die äußersten dargestellten Linien und darüber hinaus.

Bei der Inflation eines rechteckigen Objekts (Zeile 1, Hypothese II) und dem Kollabieren eines rechteckigen Objekts (Zeile 4, Hypothese I) entwickeln sich ebenfalls S-förmige bzw. Z-förmige Falten an den Ecken der Objekte. Die Krümmung ist allerdings lokal sehr auf den unmittelbaren Bereich um die Ecken der Objekte begrenzt. Entlang der langen Seite der Körper und zwischen den Objekten sind die Strukturen gerade und undeformiert. Je näher sich die Linien an den Objekten befinden, desto enger werden die Winkel zwischen den Faltenschenkeln, bis zu fast 90° direkt am Objekt. Mit der Entfernung zum Objekt werden diese Falten sehr rasch offener und die Amplitude wird kleiner. Allerdings setzen sich die S- bzw. Z-Formen bis zu der Entfernung, in der keine Krümmung mehr sichtbar ist, durch. Bei der Scherung (Spalte 3, Zeile 1 und 4) werden diese Falten an den druckbelasteten Ecken der Objekte offener und im Druckschatten der Objekte enger.

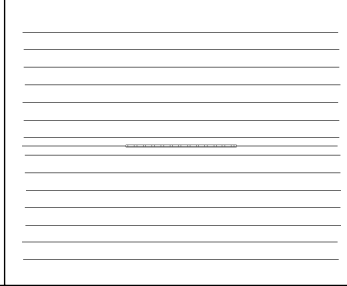
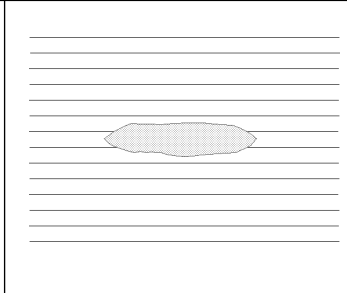
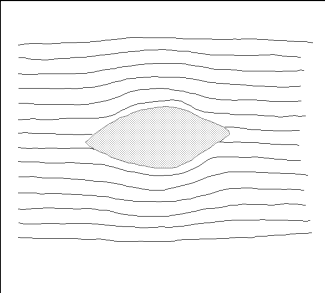
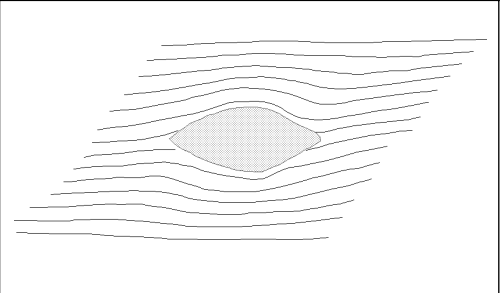
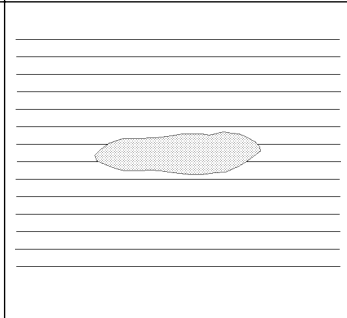
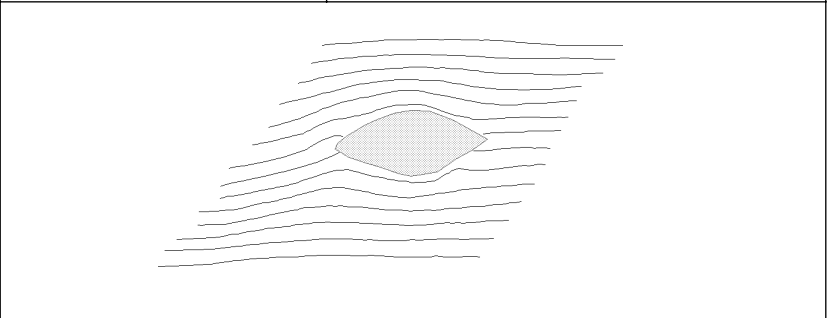
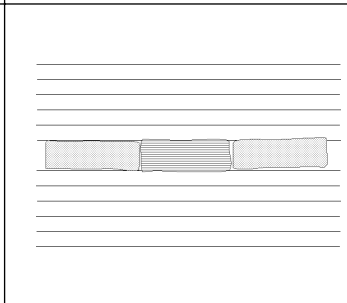
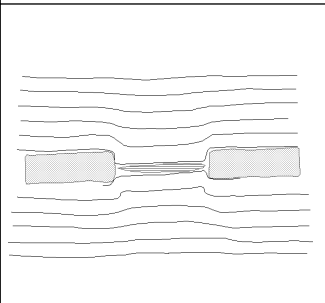
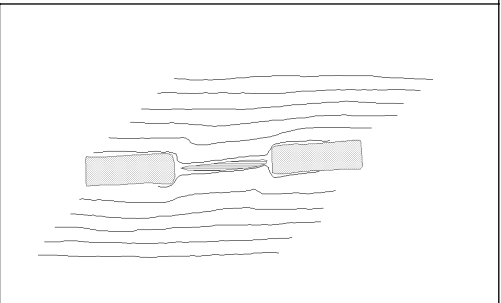
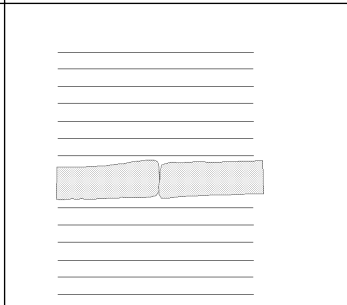
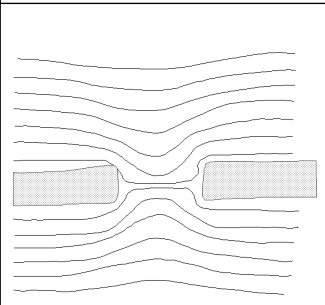
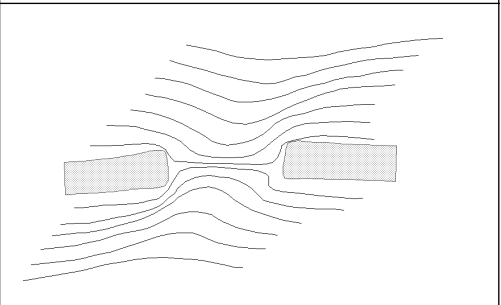
		Ausgangssituation	Formbildender Mechanismus	dextrale Einfache Scherung (shear strain=1)	
		Parallele Strukturen		Inflation mit Karten (Hypothese II)	
Inflation mit Öffnungsobjekt (Hypothese II)					
Inflation mit Öffnungsobjekt (Hypothese II)					
Kollabieren mit Karten (Hypothese III)					
Boudinage durch Extension (Hypothese I)					

Tabelle 3.4.1-2: Ursprünglich zu den Objekten parallele Strukturen auf die Gitter der fünf Experimentkombinationen in drei Schritten gezeichnet. Die rechteckigen Objekte sind 1.4 cm breit, die ovalen 3.1 cm.

Bei der Inflation der linsenförmigen Objekte (Hypothese II) dagegen entwickelt sich die Krümmung rings um das gesamte Objekt. Ober- und unterhalb des Objekts entstehen faltenähnliche Strukturen. Dass die Form der Krümmung um die Körper von deren Aussehen abhängt, ist deutlich am rechten Teil des Objekts (Spalte 2, Zeile 2) zu beobachten. Das Objekt ist zur kurzen Querachse nicht spiegelsymmetrisch: der rechte Teil ist etwas schmaler und spitzer als der linke. Die Verbiegung der Strukturen zeichnet exakt diesen Umstand nach. Auch hier nimmt die Öffnung mit der Entfernung zum Objekt sehr schnell zu, und die Amplitude ab. Die Scherung öffnet die Falten, verringert die Amplitude und macht sie asymmetrisch.

Senkrechte Strukturen

Tabelle 3.4.1-3 zeigt zur Längserstreckung der Objekte ursprünglich senkrechte Strukturen (Spalte1), die Deformation dieser Strukturen entstanden beim formbildenden Mechanismus (Spalte2) und bei der Scherung (Spalte3).

Die echte Boudinage durch Extension (Hypothese I, Zeile 5) bewirkt deutliche Deformation der ehemals senkrechten Strukturen. Nur eine Linie, die vor Experimentbeginn exakt an der Kontaktstelle der beiden Körper verlief, läuft durch die entstandene Lücke hindurch. Ihre leichte Verbiegung nach rechts hat wahrscheinlich mit der relativ höheren Geschwindigkeit des rechten Objekts im Vergleich zum linken Objekt bei der Öffnung des Boudinnecks zu tun. Die anderen Strukturen haben ihren Ansatzpunkt am Körper mit diesem nach außen verlagert und starke Krümmungen gebildet. Der Scheitel der Krümmungen weist in das Boudinneck hinein. Die so entstandenen Falten sind sehr viel enger und haben eine höhere Amplitude als alle Verbiegungen die bei Inflation (Hypothese II, Zeile 1 bis 3) oder Kollabieren (Hypothese III, Zeile 4) aus senkrechten Strukturen entstanden sind. Die Scherung verengt die Falten an druckbelasteten Ecken der Boudins und weitet sie an Ecken, die mehr im Druckschatten liegen.

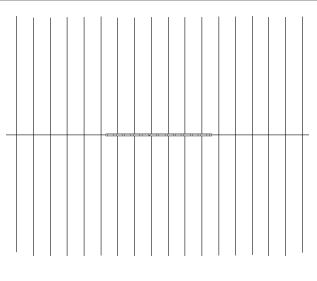
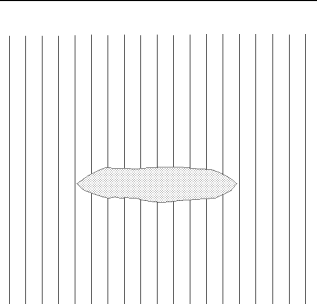
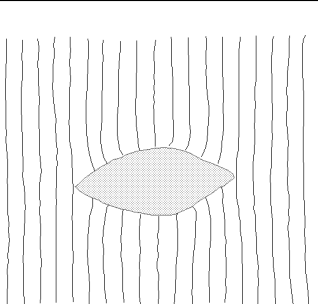
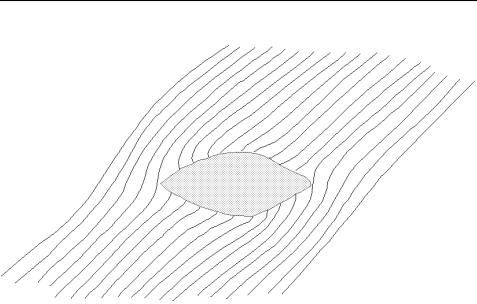
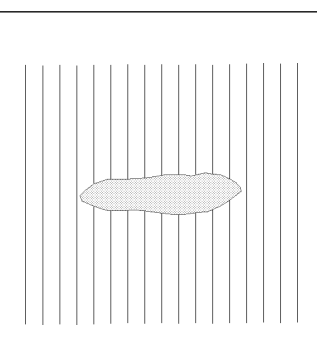

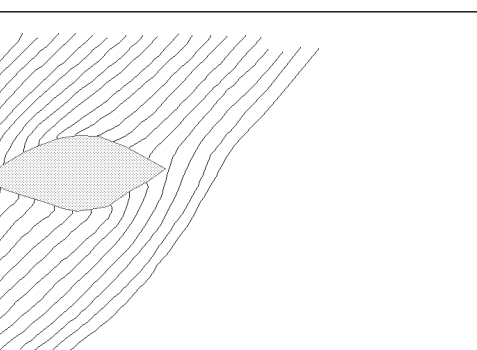
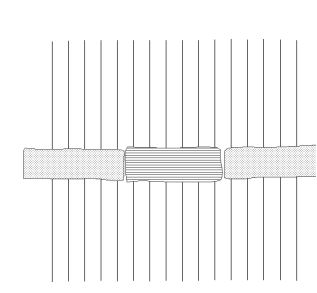
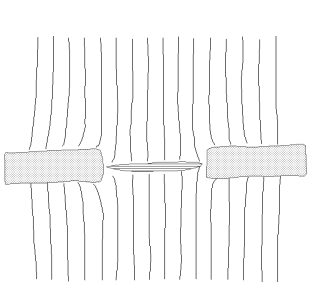
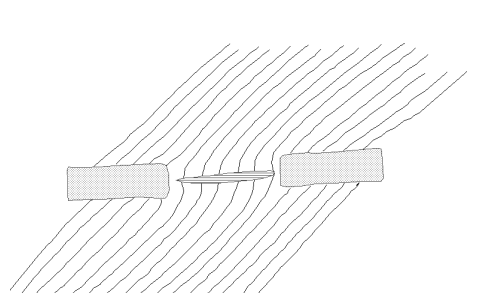
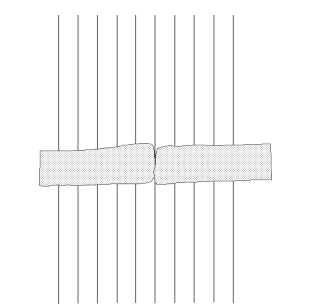
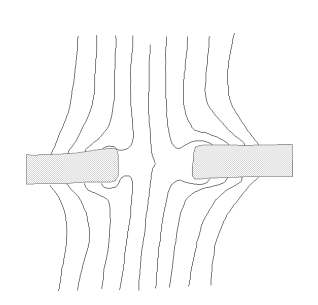
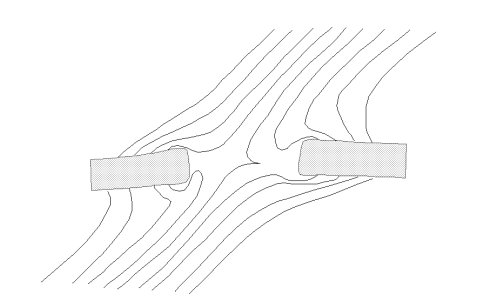
		Ausgangssituation	Formbildender Mechanismus	dextrale Einfache Scherung (shear strain=1)	
		Senkrechte Strukturen		Inflation mit Karten (Hypothese II)	
Inflation mit Öffnungsobjekt (Hypothese II)					
Inflation mit Öffnungsobjekt (Hypothese I)					
Kollabieren mit Karten (Hypothese III)					
Boudinage durch Extension (Hypothese I)					

Tabelle 3.4.1-3: Ursprünglich zu den Objekten senkrechte Strukturen auf die Gitter von fünf Experimentkombinationen in drei Schritten gezeichnet. Die rechteckigen Objekte sind 1.4 cm breit, die ovalen 3.1 cm.

Die ursprünglich senkrechten Strukturen stehen nach der Inflation des rechteckigen Objekts (Hypothese II, Zeile 1) weiterhin senkrecht auf dem Objekt. An der kurzen Seite des Objekts treten Krümmungen auf. Die senkrechten Linien verbiegen sich in die kurze Seite hinein, bzw. bilden Falten mit dem Scheitel in Richtung des Objekts. Diese Deformation tritt nur in direkter Nähe des Objekts auf. Die Linien in einigem Abstand zum Objekt gehen im Gegensatz zur Boudinage undeformiert durch die Verlängerung der Längsachse (Sutur) senkrecht durch. Die Form des aufblähenden Körpers ist wiederum maßgeblich entscheidend. Das zeigt der zweite Versuch zu Hypothese II (Aufblähung mit linsenförmigem Objekt, Zeile 2 und 3). Eine Krümmung tritt besonders an den schrägen Wandteilen der Umhüllenden des Objekts auf. Auch hier gehen die Linien in einigem Abstand zum Objekt undeformiert durch die Verlängerung der Längsachse (Sutur) durch. Die Scherung verengt oder öffnet die Falten an den Objektecken je nach deren Orientierung. Die mit dem Scheitel auf das Objekt hin gefalteten Strukturen erhalten durch die dextrale Scherung eine S-förmige Geometrie.

Die Zeichnungen zu Hypothese III (Zeile 4) zeigen ebenfalls unverändert senkrechte Strukturen auf und zwischen den Körpern. Die Linien gehen im Gegensatz zur echten Boudinage undeformiert durch die Zwischenräume der Objekte durch. Nur im Kontaktbereich des kollabierenden Bereichs zu den Objekten ist Deformation der Strukturen sichtbar. Hier biegen sich die Linien in Richtung der Objekte hin um. Die dextrale Scherung bewirkt eine schwache S-förmige Verbiegungsgeometrie im kollabierten Bereich.

Schräge Strukturen

Tabelle 3.4.1-4 zeigt zu den Objekten anfänglich schräg verlaufende Strukturen (Spalte1). Spalte2 macht die Deformation dieser Strukturen entstanden beim formbildenden Mechanismus sichtbar. Die Deformation, die bei der Scherung entsteht zeigt Spalte 3. Alle Zeichnungen mit Anfangsstrukturelementen von 45° zu den Objekten zeigen eine monokline Symmetrie sowohl nach der Durchführung des Formbildenden Mechanismus als auch nach der dextralen Scherung.

Am Stärksten ausgeprägt, mit der größten Amplitude, ist diese Faltung bei der echten Boudinage (Hypothese I, Zeile 5). Die schräg über das Boudinneck hinweg laufenden Linien (links oberhalb und rechts unterhalb der Lücke) biegen sich in einer offenen Falte tief in den Zwischenraum hinein. Auch die schräg vom Neck wegführenden Strukturelemente (rechts oberhalb und links unterhalb der Lücke) zeigen Krümmungen in den Zwischenraum der Objekte hinein. Diese sind allerdings enger, haben aber auch eine relativ große Amplitude. Keine der Linien läuft durch das Boudinneck hindurch. Die dextrale Scherung verengt die schon engen Falten und öffnet die Offenen weiter.

Die Inflation (Hypothese II) eines rechteckigen Objekts verursacht ebenfalls zwei Arten von Falten. Offene Falten links oben und rechts unten, deren Faltenachsebene in steilem Winkel (fast 90°) zu den Strukturelementen und in spitzem Winkel (ca. 30°) zur Längsachse des Objekts steht. Die zweite Art Falten zeigt eine Faltenachse, die einen spitzen Winkel mit den Strukturelementen und einen steilen (ca. 90°) mit der langen Seite des Objekts einschließt. Die Inflation mit dem Öffnungsobjekt verursacht ebenfalls zwei Faltenarten, die dadurch entstehen, dass die Linien jeweils an der runden Außenseite des Objekts divergieren. Die schräg auf das Objekt zulaufenden Linien biegen sich über dem Objekt etwas nach außen, krümmen sich dann direkt am Körper wieder in Richtung dessen Mitte. Durch das Einbiegen der Strukturen auf den Mittelpunkt des Objekts entstehen Ungleichmäßigkeiten in der Mächtigkeit der Linienzwischenräume. Die dextrale Scherung schwächt die Faltung etwas ab. Unterschiede zwischen den Versuchen Aufblähung mit nachträglicher bzw. gleichzeitiger Scherung sind nicht erkennbar.

Die Zeichnungen zum Kollabieren (Hypothese III, Zeile 4) zeigen Ähnlichkeiten mit denen zur echten Boudinage (Zeile 5). Allerdings sind die Falten sehr viel schwächer ausgeprägt und treten nur in unmittelbarer Nähe zu den Ecken der Objekte auf. Der auffälligste Unterschied ist das Durchlaufen vieler Strukturelemente durch den Objektzwischenraum. Bei der Scherung (Zeile 4, Spalte 3) ist eine Mächtigkeitzunahme der Linienzwischenräume im kollabierten Bereich zu beobachten.

		Ausgangssituation	Formbildender Mechanismus	dextrale Einfache Scherung (shear strain=1)	
		Strukturen im Winkel von 45°		Inflation mit Karten (Hypothese II)	
Inflation mit Öffnungsobjekt (Hyp. II)					
Inflation mit Öffnungsobjekt (Hypothese II)					
Kollabieren mit Karten (Hypothese III)					
Boudinage durch Extension (Hypothese I)					

Tabelle 3.4.1-4: Ursprünglich zu den Objekten schräge (45°) Strukturen auf die Gitter von fünf Experimentkombinationen in drei Schritten gezeichnet. Die rechteckigen Objekte sind 1.4 cm breit, die ovalen 3.1 cm.

Die Verkrümmungen gleichen in Form und Intensität denen an den kurzen Seiten der Inflation mit rechteckigem Objekt (Zeile 1).

Zusammenfassung

Die Verbiegung der deformierten Strukturen ist stark von der Form des jeweiligen Objekts abhängig. Gezeigt wurde dies nur an Hypothese II, es ist aber auch für die anderen Mechanismen anzunehmen. Die Verbiegungsstrukturen und Deformationsfelder von Hypothese II (Aufblähen) und III (Kollabieren) (beide mit rechteckigem Objekt) gleichen sich. Sie sind an den Verbiegungsmustern nicht zu unterscheiden. Der Unterschied zwischen Hypothese I (echte Boudinage) und den Inplatznahmemechanismen (Hypothese II und III) liegt bei ursprünglich parallelen Strukturelementen vor allem in der Intensität der Ausbildung der Strukturen. Ist kein Vergleich der Intensitäten möglich (im Gelände sicher der Regelfall), so ist eine Unterscheidung bei paralleler Konstellation der Strukturelemente zu den boudinförmigen Körpern nicht zu treffen. Bei schrägen und steilen Strukturelementen zeigt er sich in der Intensität und besonders im Durchlaufen der Linien durch die Objektzwischenräume bei Hypothese II und III (Inplatznahme), jedoch nicht bei Hypothese I (Boudinage).

3.4.2 Spezielle graphische Auswertung

Eine spezielle graphische Auswertung wurde zur Frage der Entstehung der Divergenzpunkte (siehe Kap. 2.2.2) durchgeführt. Dazu sind zwei Experimentkombinationen dargestellt: **(1)** Inflation („Inflation2“) und Kollabieren („Collaps2“) hintereinander ausgeführt und **(2)** Inflation eines Objekts („Inflation2“), einfache Scherung dieses Objekts und seiner Umgebung („Shear1“) und Kollabieren („Collapse2“).

(1) Das Gitter nach Inflation und Kollaps (Abb. 3.4.2-1d) ist im äußeren Bereich leicht gestaucht (verkürzt in Nord-Süd-Richtung, Inflationssignatur). Auch im inneren Bereich an den Ecken des kollabierten Objekts zeigt sich eine nord-südgerichtete Verkürzung. In der Mitte der langen Seiten des Objekts sind die Gitterquadrate leicht gelängt (Kollapssignatur).

(2) Das Kollabieren nach Inflation und einfacher Scherung (Abb.3.4.2-1e) verstärkt die nach der Scherung entstandene monokline Symmetrie. Die endgültige Verformung des ursprünglich idealen rechteckigen Gitters ist deutlich inhomogener im Vergleich zu den einzelnen Mechanismen.

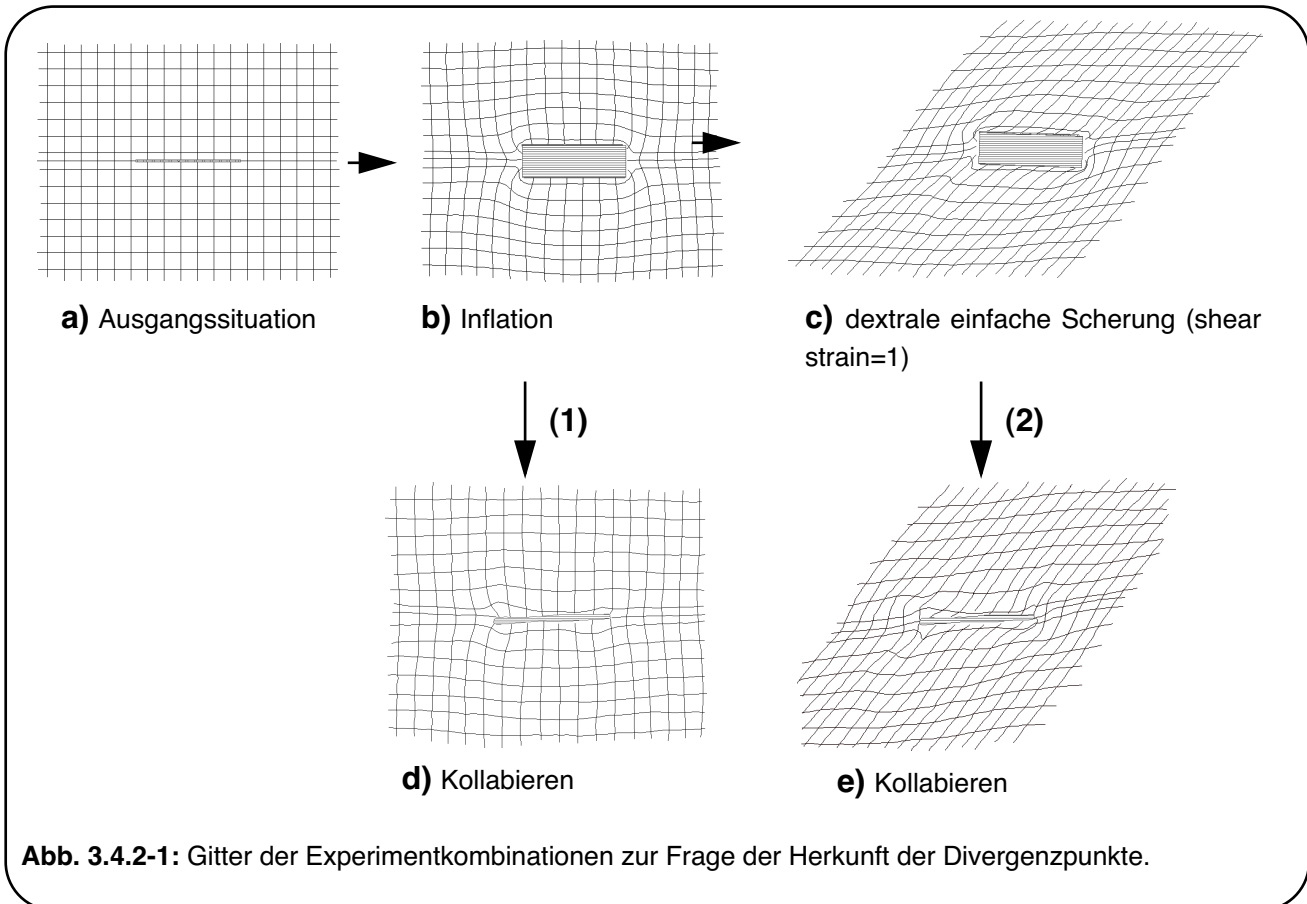
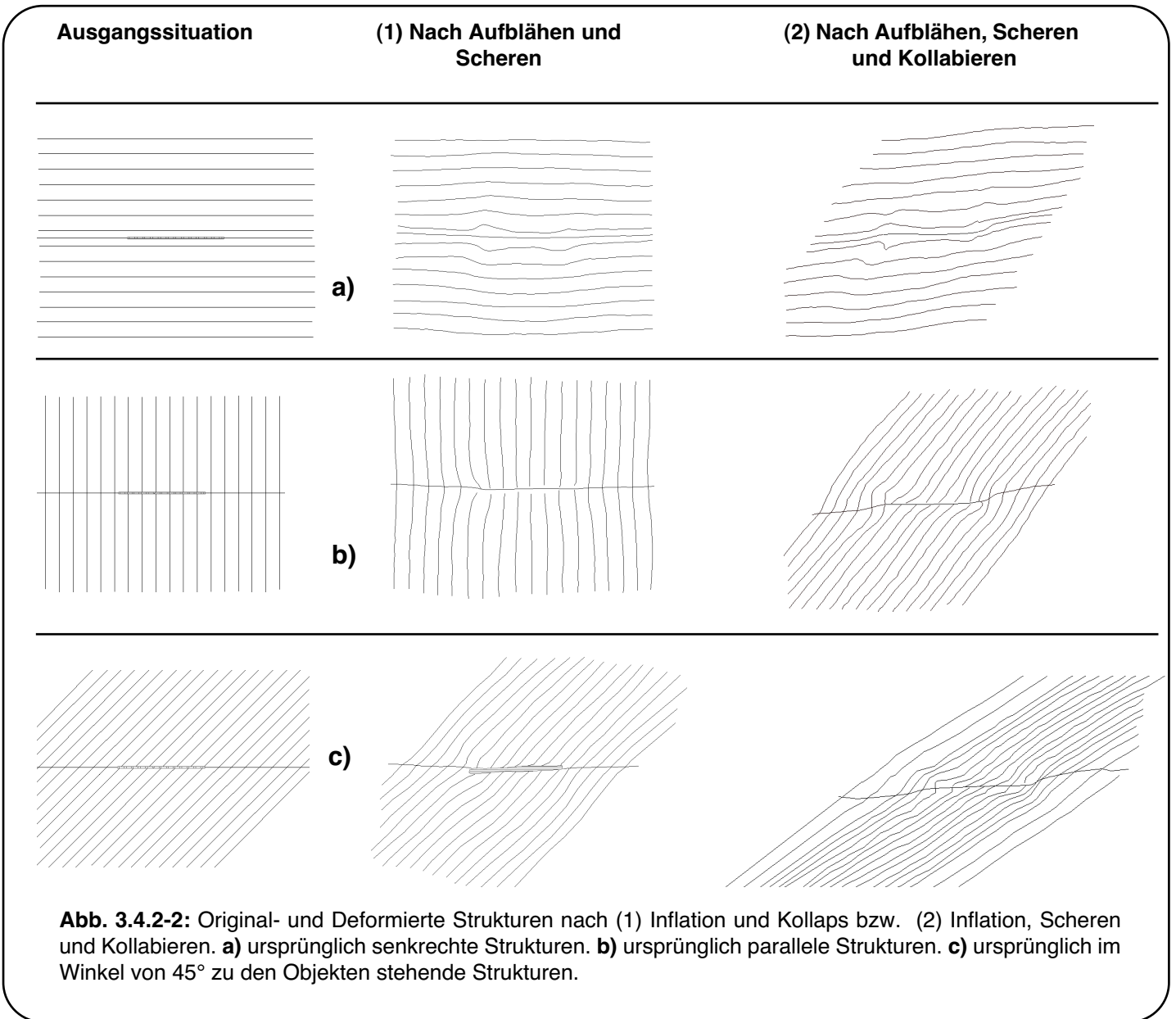


Abb 3.4.2-2 zeigt die Deformation von Strukturen unterschiedlicher Ausgangslagen zum Objekt nach der Abfolge der Mechanismen: **(1)** Inflation und Kollaps und **(2)** Inflation, Scherung und Kollaps.

(1) Das Kollabieren eines vorher aufgeblähten Körpers erzeugt aus ursprünglich parallelen Strukturelementen relativ unregelmäßige Strukturen, die im äußeren Bereich (Abb. 3.4.2-2a) nach außen gewölbt sind (Signatur der Inflation). Im inneren Bereich, näher an das Objekt sind die Linien nach innen auf das Objekt zu gebogen (Signatur des Kollabierens). Die Inflation hat räumlich einen etwas weiteren Einfluß auf das Matrixmaterial als der Kollaps. An den Ecken des kolla-

bierten Objekts zeichnen sich kleinräumig noch die S- bzw. Z-förmigen Falten stark durch, die bei der Inflation des Körpers entstanden sind. Die ursprünglich senkrechten Strukturelemente (Abb. 3.4.2-2b) laufen bis auf die Bereiche an den Ecken des kollabierten Objekts gerade durch. An den Ecken des ehemaligen Objekts biegen sich die Linien nach innen ein. Es entstehen sehr kleinräumige Divergenzpunkte neben dem kollabierten Bereich. Auffällig ist hierbei die Asymmetrie der rechten gegenüber der linken Seite des Objekts, eventuell als Folge einer leichten Drift des kollabierenden Objekts während des Experiments. Die ursprünglich schräg zum Objekt verlaufenden Strukturen (Abb. 3.4.2-2c) sehen nach Inflation und Kollaps den ursprünglich senkrechten sehr ähnlich: Einbiegen der Linien nach innen, wodurch kleinräumige Divergenzpunkte außerhalb des kollabierten Bereichs entstehen.

(2) Die vormals zum Objekt parallelen Strukturen sind aufgrund des Wechsels zwischen Verformungen in konkave bzw. konvexe Formen nach dem Kollabieren unruhig und unregelmäßig. Sie wechseln von der nach außen gebogenen Form der Inflation zu der nach innen gewölbten Form des Kollabierens (Abb 3.4.2-2a). Dicht am Objekt ist diese Mischung deutlich. An den Stellen der Ecken des ehemaligen Körpers hat sich die konvexe Gestalt des Inflationsmechanismus erhalten. In der Mitte der Längsseite des kollabierten Bereichs überwiegt jetzt eine konkave Form. Der konkave Einfluß des Kollabierens verliert sich nach außen hin schnell, weshalb die Linien in einigem Abstand zur Zentrallinie noch leicht nach außen gebogen sind. Die nach außen divergierenden Verkrümmungen der ehemals senkrechten Linien (Abb. 3.4.2-2b), entstanden bei der Aufblähung, werden hier leicht intensiviert. Sie sind an den Stellen, an denen sich die Begrenzungen des Objekts befanden leicht nach außen verkrümmt (Abb 3.4.2-2b). An der bei der Scherung im Druckschatten gelegenen Seite (rechte obere und linke untere Ecke des ehemaligen Objekts) handelt es sich um eine einfache Krümmung. Eine Rückkrümmung ist an den bei der Scherung druckbelasteten Stellen zu sehen (links ober- und rechts unterhalb des kollabierten Bereichs). Die entstehenden Strukturen der ursprünglich schräg laufenden Linien (Abb. 3.4.2-2c) sehen sehr ähnlich aus. Die Verbiegungen sind hier je nach Orientierung etwas enger bzw. offener.



Beide Kombinationen der Mechanismen ergeben leichte Divergenzen steil auf dem Körper stehender Strukturen. Die Verbiegungen in Kombination (1) (Inflation und Kollaps) sind schwächer ausgebildet als in Kombination (2). Die Geometrien unterscheiden sich jedoch nicht. Die gut sichtbar divergierenden Linien sind bei beiden Varianten im Vergleich zu ihrer Reichweite in Richtung senkrecht zur Längserstreckung des Objekts weit voneinander entfernt. Die Strukturen konstruiert aus den Experimentkombinationen (Abb 3.4.2-2b und c) zeigen ähnliche Geometrien, wie die Divergenzpunkte des Geländebeispiels (vgl. Abb. 2.2-

3 und Tafel III: III-3). Eventuell spielt die Form der aufblähenden und kollabierenden Körper wieder eine entscheidende Rolle und kann die Geometrie der entstehenden Strukturen beeinflussen. Besonders kleine Längen-Breitenverhältnisse der Körper könnten die Intensität und Reichweite der Divergenzen begünstigen. Auch das Kollabieren des Objekts senkrecht zu der simulierten Richtung, also parallel zur Zentrallinie (Sutur) könnte bevorzugt solche Geometrien bilden. Über die Rolle der Form der Körper und der Richtung des Kollabierens ist für dieses Problem aus den durchgeführten Experimenten jedoch nicht mehr auszusagen.

3.4.3 Strainanalyse

Mit dem Programm Marker Analysis wurden die ersten Teile der Experimente, der jeweils formbildende Mechanismus für die echte Boudinage („RealBoud4“, siehe Anhang 1), für die Inflation mit Karten („Inflation2“), für den Kollaps mit Karten („Collapse3“) und für die Inflation mit dem Schraubenöffnungsobjekt („Inflationschr“) ohne gleichzeitige Deformation analysiert. Dieses Kapitel beschreibt die Darstellungen der Verlagerungsvektoren der Gitterpunkte (Punktwandervektoren) (Abb.3.4.3-1), der Strainellipsen (Abb.3.4.3-2), der Haupttextensionsrichtungen (Abb.3.4.3-3) und der Strainratio (Abb.3.4.3-4). Mit Punktwandervektoren sind die Vektoren gemeint, die die ursprüngliche Position der Gitterpunkte mit der Position verbinden, die die Gitterpunkte nach der Deformation einnehmen. Sie machen die Richtung und den Betrag des Fließens des Materials sichtbar. Die Strainellipsen sind die Ellipsen, die als Hauptachsen die größte Elongation ($1+e_1$) und die größte Verkürzung ($1+e_2$), jeweils am Gitterpunkt, haben (mit jeweils $e=(l-l_0)/l_0$ wobei l_0 die ursprüngliche Länge und l die gelängte bzw. verkürzte Länge sind). Als Haupttextensionsrichtung werden die Orientierungen der größten Extension, also die lange Achse der jeweiligen Verformungsellipse bezeichnet. Die Strainratio (auch Elliptizität genannt) ist das Verhältnis der größten Elongation zur größten Verkürzung ($Rf= (1-e_1)/(1-e_2)$), also das Verhältnis der beiden Achsen der Strainellipse.

Punktwandervektoren

Die Punktwandervektoren zeigen in ihrer Größe und Richtung sehr unterschied-

liche Fließfelder des Matrixmaterials um die Objekte herum an. Zu beachten ist, dass die Vektoren, die durch Inflation bzw. Kollabieren (Abb. 3.4.3-1a bis c) entstanden sind, für den gesamten formbildenden Mechanismus-Teil der Experimente dargestellt sind. Für die Boudinage (Abb. 3.4.3-1d) sind die Vektoren der Übersichtlichkeit wegen nur für einen Teil des Experimentverlaufs dargestellt.

Die Punktwandervektoren der echten Boudinage (Hypothese I), die unter Reiner Scherung simuliert wurde, zeigen das typische Muster für die Reine Scherung (Abb.3.4.3-1 d). Ein Teil der Vektoren zeigt in die Mitte des Bildes (in die Richtung der Kompression). Der andere Teil weist nach außen (in die Richtung der Extension). Die Gitterpunkte verschieben sich in die Boudinnecks zwischen den Objekten hinein.

In den Inflationsversuchen (Hypothese II) zeigen die Vektoren im Wesentlichen nach außen, d. h. in die Richtung des Öffnungsvorganges. Durch die annähernd rechteckige Aufblähung mit den Spielkarten hat sich jenseits der langen Seite des Objekts ein gleichmäßiges Muster paralleler Bewegungsvektoren gebildet (Abb.3.4.3-1 b). Bei der Öffnungsgeometrie des elliptischen Körpers (Abb.3.4.3-1 a) laufen die Vektoren nicht parallel. Sie bilden mit der Wand des Objektes immer einen großen Winkel ($>60^\circ$), weshalb sie außerhalb des Schraubenobjekts divergieren. An den Ecken des rechteckigen Kartenobjekts (Abb.3.4.3-1 a) beschreiben die Punktwandervektoren kreisförmige Perturbationen des Fließens des Matrixmaterials, die jeweils gegenüberliegend die gleiche Orientierung zeigen: links oben und rechts unten sinistral; rechts oben und links unten dextral.

Die Punktwandervektoren im Kollaps-Experiment (Hypothese III, Abb.3.4.3-1 c) zeigen ebenfalls (siehe echte Boudinage) in die entstehende Lücke hinein, sind jedoch parallel und stehen senkrecht auf der Verbindungslinie der bleibenden Objekte. An den Ecken der unveränderten Körper treten kreisförmige Perturbationen auf (rechts oben und links unten stärker ausgeprägt), die die gleiche Geometrie beschreiben, wie die Perturbationen im Karteninflationsversuch.

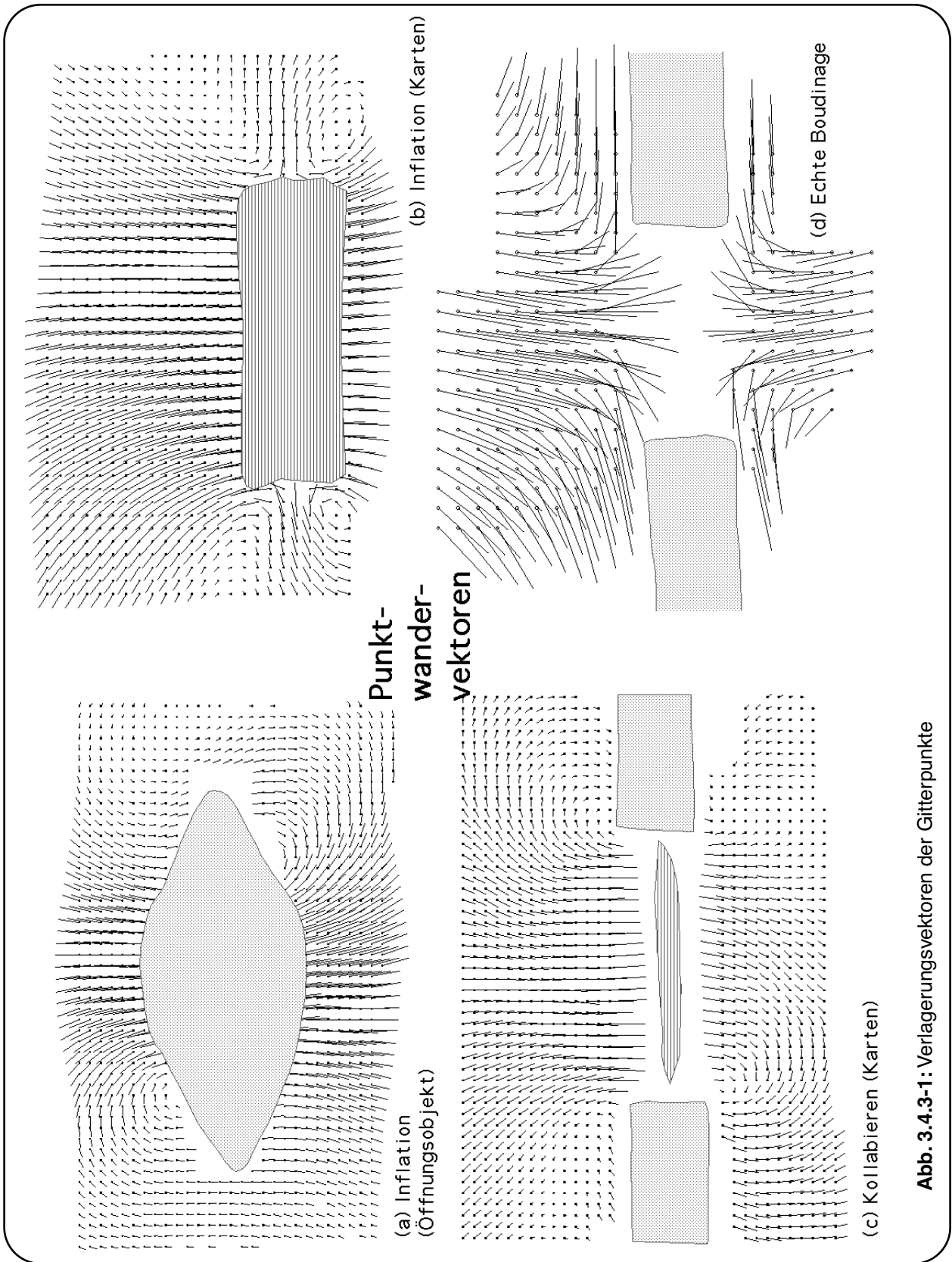


Abb. 3.4.3-1: Verlagerungsvektoren der Gitterpunkte

Strainellipsen

Die Strainellipsen machen einen wichtigen Unterschied zwischen Hypothese I (echte Boudinage, Abb. 3.4.3-2d) und Hypothesen II und III (Inplatznahmemechanismen, Abb.3.4.3-2a bis c) sehr deutlich: die Intensität der Verformung.

Die echte Boudinage (Hypothese I) erzeugt langelliptische Strainellipsen, besonders im Bereich des Boudinnecks. Hier sind die Ellipsen, im speziellen die kollabierten Ellipsen, vielleicht zum Teil etwas übertrieben dargestellt, da die Digitalisierung der Markerpunkte in diesem Bereich sehr schwierig und damit ungenau ist. Aber Ellipsen, die um das Doppelte verlängert wurden, sind realistisch. Auch im Bereich außerhalb des Boudinnecks sind die Ellipsen deutlich gestreckt.

Die Strainellipsen in den Bildern der Inplatznahmemechanismen (Hypothese II und III) sind dagegen kaum deformiert. Bei der Inflation (Hypothese II) sind die Ellipsen ober- und unterhalb der Objekte leicht parallel zur Umhüllenden der Körper gestreckt. Der Kollapsmechanismus (Hypothese III) erzeugt leicht extendierte Ellipsen senkrecht zum kollabierenden Bereich zwischen den Objekten.

Haupttextensionsrichtungen

Die Muster der Haupttextensionrichtungen (Abb.3.4.3-3) zeigen ebenfalls deutliche Unterschiede zwischen den Hypothesen. Einzelne „Querschläger“ der Richtungen, besonders auffällig in den Mustern der Inplatznahmemechanismen (Abb.3.4.3-3a bis c) rühren im Wesentlichen vom geringen Unterschied der Ellipsenachsen her, was die Unterscheidung Kurz-Lang schwierig macht.

Bei der echten Boudinage (Hypothese I) finden die Haupttextensionen parallel zum Boudinneck statt und setzen sich um die Ecken der Boudins herum fort, indem sie tangentialähnliche Richtungen an den Ecken der Objekte beschreiben. Über und unter den Körpern bilden sie einen kleinen Winkel mit der Längsachse der Objekte.

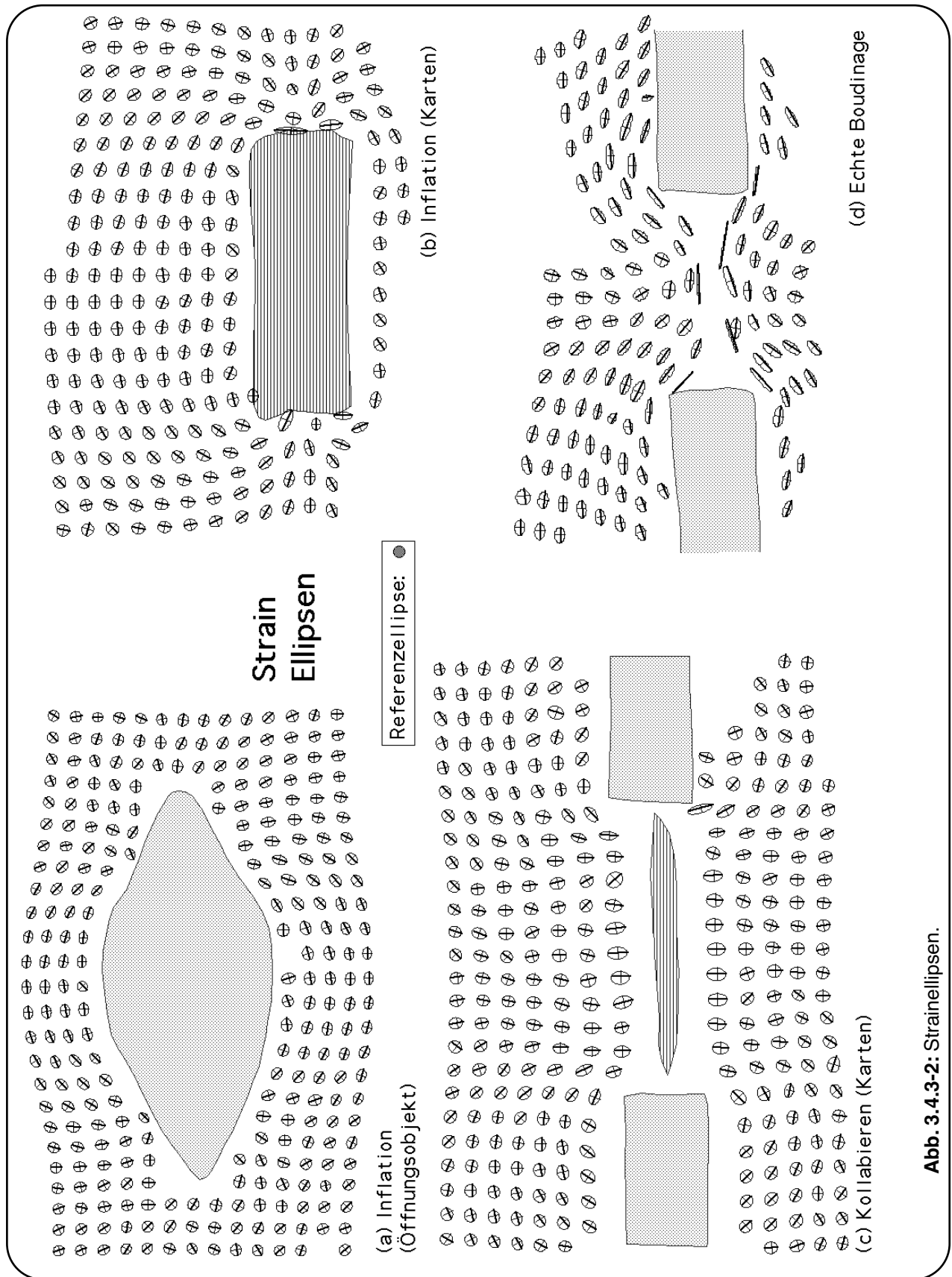


Abb. 3.4.3-2: Strainellipsen.

Bei der Inflation (Hypothese II) sind die Haupttextensionsrichtungen parallel zum Außenrand der Objekte angeordnet. Bei der Inflation des rechteckigen Objektes (Abb.3.4.3-3b) beschreibt die Änderung der Richtungen über den Ecken einen Bogen auf die kurze Objektseite zu und in sie hinein. Ein ähnlicher Bogen ist bei der Öffnung des linsenförmigen Objekts zu beobachten (Abb.3.4.3-3a), allerdings nicht an den Enden des Objekts sondern an den Endpunkten der Bereiche der größten Öffnung. Dies sind die Teile der Umhüllenden des Objekts bestehend aus der semiflexiblen Wand, welche an den Öffnungsflügeln der Objekt-konstruktion festgemacht sind (siehe Kap. 3.2.3 Objekte).

Die Haupttextensionsrichtungen resultierend aus dem Kollabieren (Hypothese III, Abb.3.4.3-3c) sind über und unter dem Zwischenraum der Objekte senkrecht zu dessen Achse ausgerichtet. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zur Boudinage, die die gleiche Anordnung der Objekte erzeugt.

Strain Ratio

Die Darstellung der Verhältnisse der langen gegen die kurzen Achsen der Strain-ellipsen (Abb. 3.4.3-4) macht die Bereiche mit den größten endlichen Verformungen sichtbar. Die unterschiedlichen Strainverhältnisse, die durch die formbildenden Mechanismen entstehen werden hier deutlich. Für die echte Boudinage (Hypothese I, Abb. 3.4.3-4d) liegen die Strain Ratios zwischen 1 und 2,5. Für die Inplatznahmemechanismen (Abb. 3.4.3-4a bis c) sind sie geringer: 1 bis 1,5.

Im Boudinneck der Boudinage (Abb.3.4.3-4d) und in einem relativ großen Umfeld um ihn herum erreicht das Strain Ratio die höchsten Werte. Auffällig ist ein besonders weiter Bereich großer Werte an den Ecken der Boudins.

Auch bei der Inflation (Hypothese II) eines rechteckigen Objekts mit Karten (Abb. 3.4.3-4b) erreicht die endliche Verformung die größten Beträge an den Ecken des Objekts. Jedoch ist die Verteilung mehr auf die kurze Seite des Körpers hin beschränkt und reicht nicht über die Ecken hinweg auf das Gebiet über oder unter der lange Seite des Objekts.

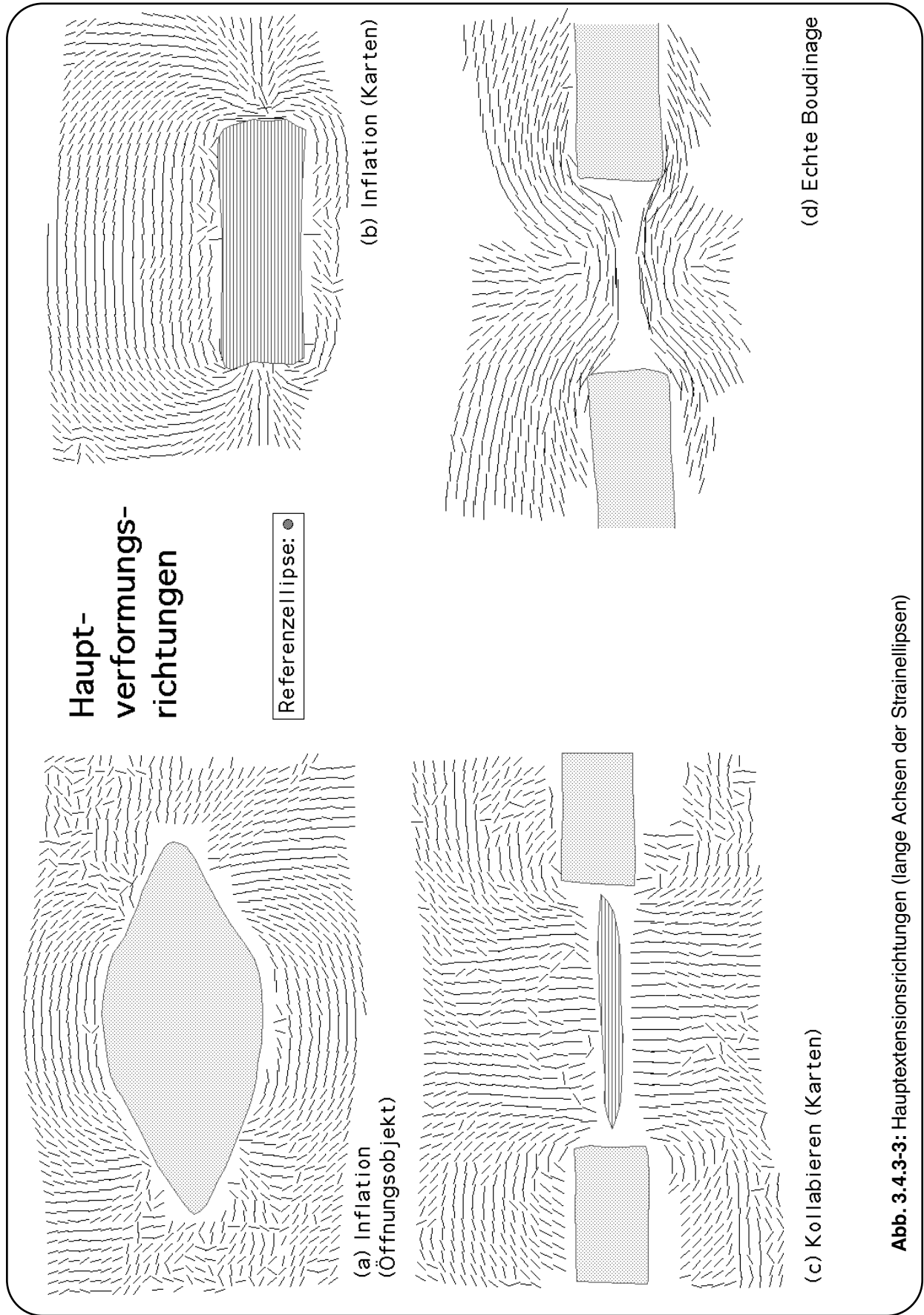


Abb. 3.4.3-3: Haupttensionsrichtungen (lange Achsen der Strainellipsen)

Die Verteilung des Strain Ratio im zweiten Versuch zur Inflation (Abb. 3.4.3-4a) zeigt eine komplett andere Anordnung. Die Felder um die Ecken erfahren sehr wenig Verformung ($R_f < 1,2$). Leicht höhere Strain Ratios ($R_f > 1,2$) sind in den Bereichen der größten Öffnung zu beobachten. Dies sind die Bereiche außerhalb der semiflexiblen Wand, welche an den Öffnungsflügeln der Objekt-konstruktion festgemacht sind (siehe Kap. 3.2.2 Objekte). Es gibt nur zwei kleine Bereiche, die ein Strainverhältniss von 1,5 erreichen. Diese liegen an kleinen Ausbuchtungen des Objekts, die durch die Konstruktion entstanden und auf der im Bild rechten Seite des Objekts stärker ausgeprägt sind.

Abb.3.4.3-4c zeigt die Verteilung der Verformungsverhältnisse für den Kollapsmechanismus (Hypothese III). Die höchsten R_f -Werte (1,5) sind hier in den Zwickeln zwischen dem kollabierten Objekt und den unveränderten Körpern, sowie entlang eines schmalen Streifens entlang des kollabierten Objekts festzustellen. Die Felder hohen Strains an den Zwickeln reichen bis an die Ecken der Objekte heran, jedoch nicht über sie hinaus. Auch sind die Felder in die Richtung senkrecht zu den Objektachsen relativ klein.

Zusammenfassung

Die Strainanalyse macht unterschiedliche Verformungsfelder in den einzelnen Mechanismen deutlich. Die echte Boudinage (Hypothese I) benötigt generell einen sehr viel höheren Strain. Die Inplatznahmemechanismen (Hypothese II und III) brauchen keinen äußeren Strain und verursachen lokal nur geringe Strainwerte. Dabei ist die Form der entstehenden Körper ausschlaggebend für die Höhe und die Verteilung der Verformung um die Objekte herum. Eckige Objekte konzentrieren den Strain an den Ecken. Ein ovales Objekt verteilt den Strain entlang den Grenzen des Körpers nach den lokalen Öffnungsbeträgen. Auch die Hauptrichtungen der Verformungsfelder zeichnen die verschiedenen Mechanismen aus. In den Necks der echten Boudinage (Hypothese I) findet die Extension parallel zur Verbindungslinie der angrenzenden Boudins statt. Bei der Öffnung eines Raumes zwischen zwei Körpern durch Kollabieren (Hypothese III) stehen diese Richtungen senkrecht auf der Linie, die die angrenzenden Objekte verbindet.

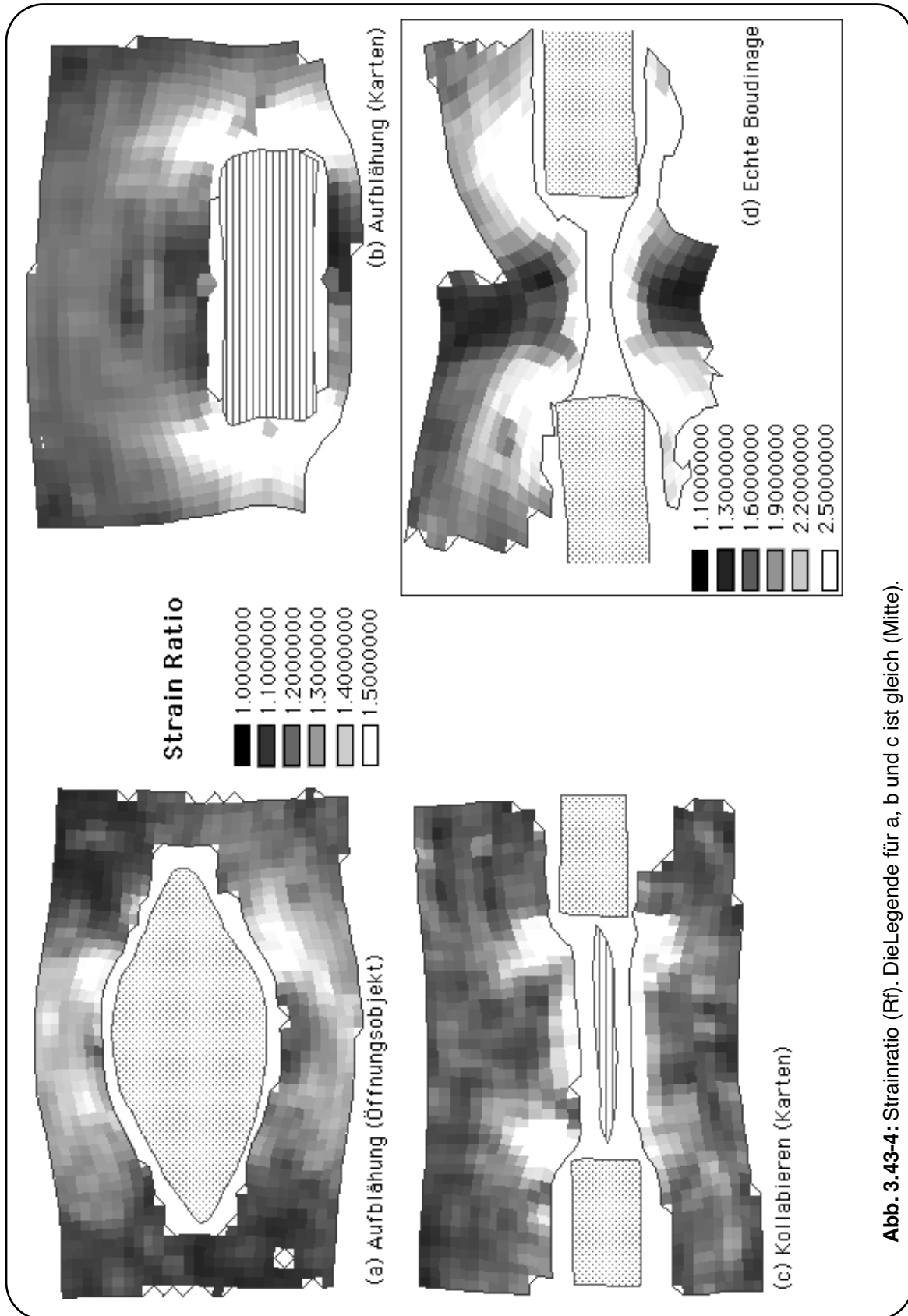


Abb. 3.43-4: Strainratio (Rf). DieLegende für a, b und c ist gleich (Mitte).

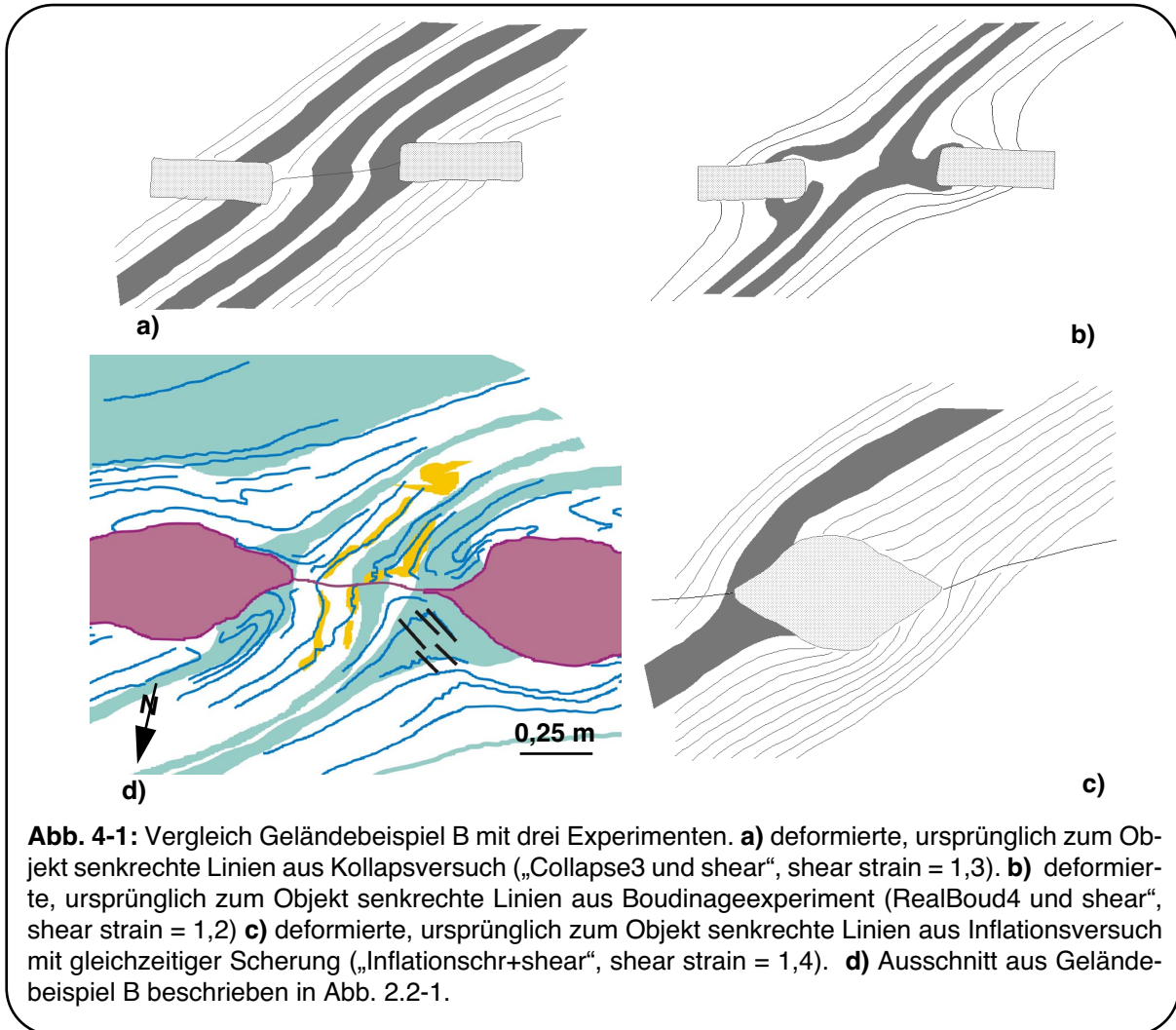
4 Vergleich des Geländebeispiels mit den Experimenten

Die Strainanalyse ergab einen signifikanten Unterschied zwischen Boudinage und Inplatznahmemechanismen in der Intensität der Verformung. Die meist starken Verbiegungsmuster um die boudinähnlichen Körper des Geländebeispiels (siehe Abb. 2.2-1 bis 4 und Abb. 2.3-1) scheinen für Inflations- und Kollapsmechanismen zu hohen Strain anzuzeigen. Im Folgenden werden einige Details beschrieben und mit den Verformungsmustern der Experimente verglichen, die nicht mit echter Boudinage sondern besser mit Inplatznahmemechanismen erklärt werden können. Am Ende des Kapitels findet noch eine Gegenüberstellung eines unzweifelhaften Boudingeländebeispiels und eines Literaturbeispiels für Boudinage mit den Experimenten statt.

Der Vergleich der Geländebeispiele mit den Experimenten erfolgt anhand von Ausschnitten aus Abb. 2.2-1 bis 4, Abb. 2.3-1 und Abb. 2.1.2-3. Den Detailausschnitten werden Zeichnungen nach den Experimenten (siehe Kap. 3.2.4) gegenübergestellt. Die Scherverformungen und die Anfangsgeometrien der dargestellten Experimentzeichnungen sind den im Gelände vorgefundenen Geometrien angepasst. Andere Kombinationen dieser beiden Parameter sind oft möglich.

Geländebeispiel B gegen Experimente

Das Geländebeispiel B zeigt Schichtung, Schieferung und Quarzgänge, die durch den Zwischenraum zweier boudinähnlicher Körper laufen. Drei Schichten davon (weiß, grün, weiß) verlaufen durch die Lücke ohne Kontakt zu den Pegmatitkörpern. Abb. 4-1b beschreibt Schichten dicht am Boudinneck einer echten Boudinage. Es ist jedoch nicht möglich sie durch den Zwischenraum laufend zu konstruieren, ohne einen der Boudins mit der Schicht zu berühren. Die Zeichnung nach dem Kollapsexperiment (Abb. 4-1a) ermöglicht dies. Abb. 4-1c zeigt die experimentelle Öffnung eines linsenförmigen Objekts. Die Form des Objekts stimmt annähernd mit der des rechten Pegmatitkörpers in der Geländebeispielzeichnung überein. Die betonte Schicht in der Experimentzeichnung wird am Objekt verdickt. So kann die auffällige Mächtigkeitsänderung der Schichten (Abb. 4-1d) in der Nähe der Pegmatitkörper erklärt werden.



Geländebeispiel D gegen Experimente

Abb. 4-2d zeigt einige deutliche und einige kleinere Divergenz- und Konvergenzpunkte unregelmäßig entlang der Sutur zwischen zwei großen Pegmatitkörpern verteilt. Echte Boudinage erzeugt allerdings nur einen Divergenzpunkt (Abb. 4-2a) genau in der Mitte des Boudinnecks. Bei Inflation oder Kollaps treten Divergenzpunkte nur direkt an den Körpern auf, an der Suturlinie sind hier dagegen keine zu erwarten (z. B. Abb. 4-2c). Abb 4-2b zeigt die Divergenz- und Konvergenzpunkte entstanden bei der Kombination von Inflation, Scherung und Kollaps. Diese Kombination wurde gewählt, da hier die Divergenzen deutlicher sind, als bei Inflation und Kollaps hintereinander (siehe Kap. 3.4.2). Wie bereits angemerkt, ist eine Intensivierung der Verbiegungen im Wesentlichen durch die Form der Objekte wahrscheinlich möglich. Eine mögliche Entstehung der Divergenzpunkte entlang der Suturlinie in Geländebeispiel D (Abb. 2.2-3) kann die Inflation

und das anschließende Kollabieren von pegmatitgefüllten Bereichen zwischen den heutigen Pegmatitkörpern während der Intrusion der Pegmatite sein.

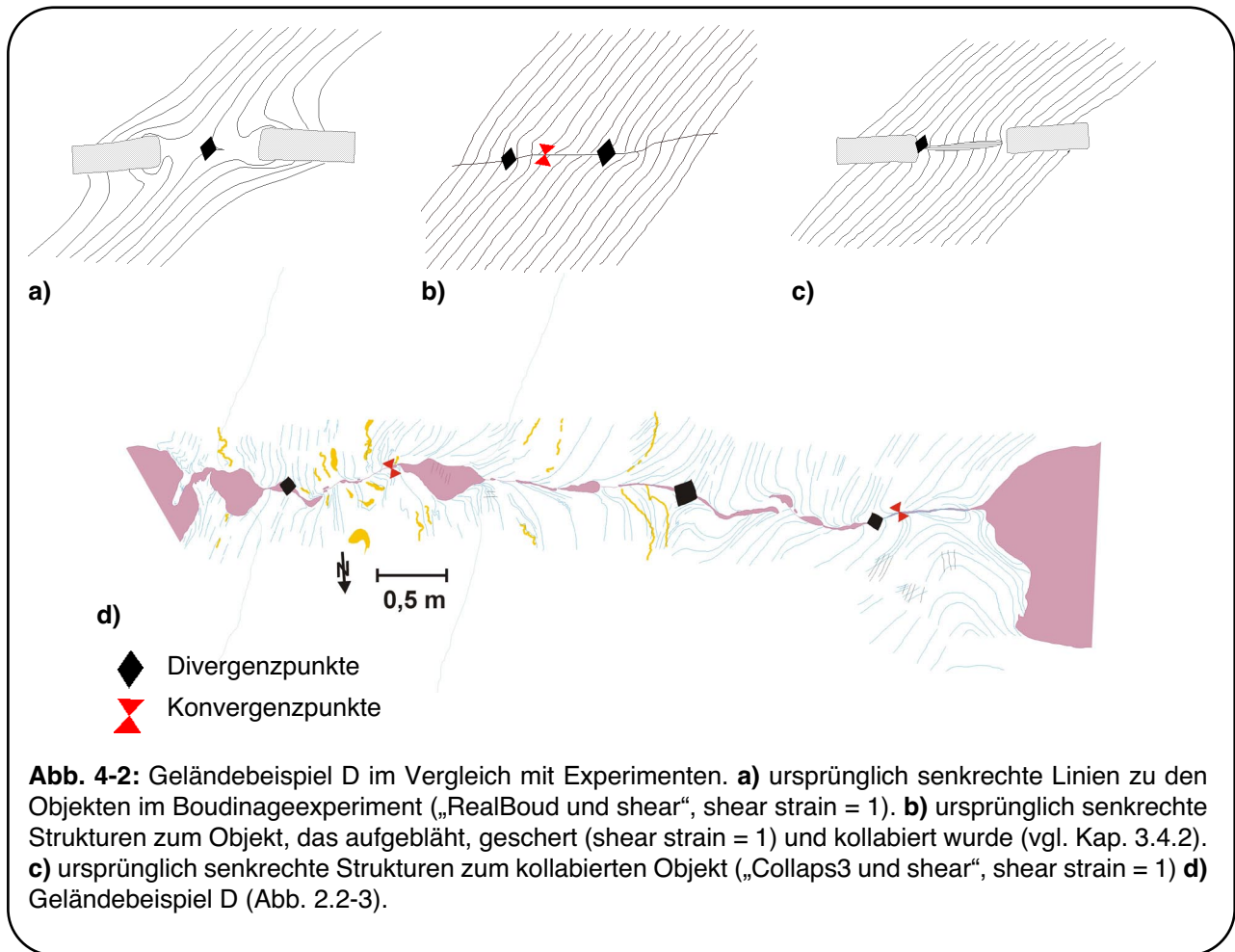
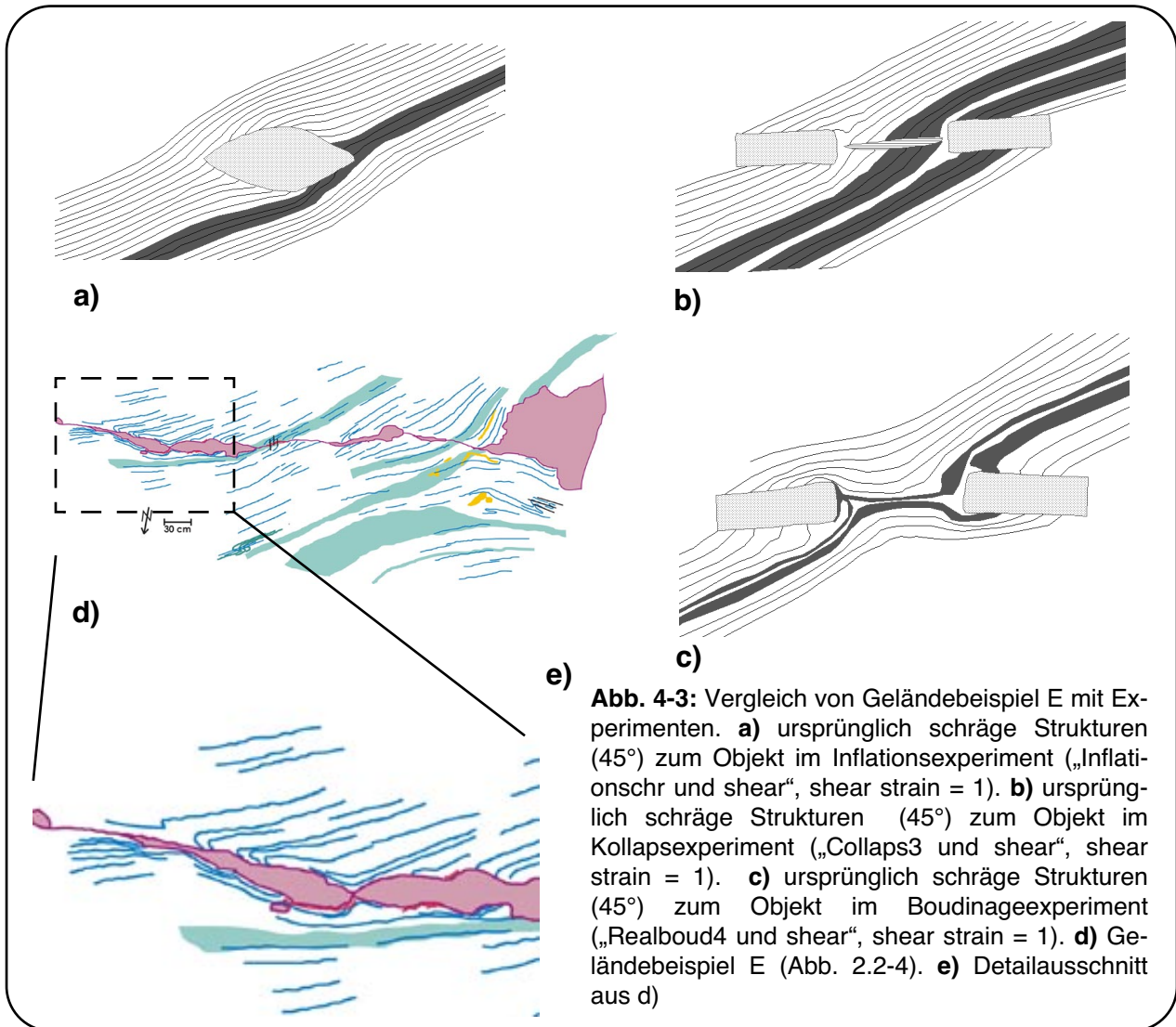


Abb. 4-2: Geländebeispiel D im Vergleich mit Experimenten. **a)** ursprünglich senkrechte Linien zu den Objekten im Boudinageexperiment („RealBoud and shear“, shear strain = 1). **b)** ursprünglich senkrechte Strukturen zum Objekt, das aufgebläht, geschert (shear strain = 1) und kollabiert wurde (vgl. Kap. 3.4.2). **c)** ursprünglich senkrechte Strukturen zum kollabierten Objekt („Collaps3 and shear“, shear strain = 1) **d)** Geländebeispiel D (Abb. 2.2-3).

Geländebeispiel E gegen Experimente

Geländebeispiel E (Abb. 2.2-4) zeigt nahezu gerade Schichtung und Schieferung, die durch die Suturen laufen und von kleinen und einem großen Pegmatitkörper abgeschnitten werden. Dies ist bei beiden Inplatznahmemechanismen (Hypothese II und III) möglich (siehe Abb. 4-3a und b), jedoch nicht bei Boudinage (Hypothese I) (siehe Abb. 4-3c). Bei echter Boudinage sollten die Strukturen um die Körper und zwischen den Körpern extrem verbogen sein (Abb. 4-3c). Die engen S-förmigen Verbiegungen an der (im Bild) Oberseite des linken Pegmatitkörpers (Abb. 4-3e) können mit keinem der in den Inplatznahmeexperimenten erreichten Shearstrains konstruiert werden. Diese Falten müssen schon vor dem Eindringen der Pegmatite vorhanden oder danach erst gebildet worden sein.



Geländebeispiel F gegen Experimente

Abb. 4-4 zeigt den Vergleich eines boudinförmigen Quarzkörpers (Abb. 4-4a) mit einem Inflationsversuch (Abb. 4-4b) und dem Boudinageexperiment (Abb. 4-4c). Die in den Experimentzeichnungen jeweils eingefärbte Schicht zeigt etwa die gleiche Position der Schicht zum Objekt wie im Geländebeispiel. Zu beachten ist, dass im Gelände eine eventuell höhere Scherverformung geherrscht hat. Die als ursprünglich senkrecht angenommene Schichtung könnte so auch vor dem formbildenden Mechanismus schräg zum Körper (nordwest-südost streichend) gestanden haben. Der Vergleich von b) und c) in Abb. 4-4 zeigt, dass die Strukturen des Aufblähens besser die Strukturen der Schichtung des Geländebeispiels annähern als die Boudinage. (Der wichtige Einfluß der Form der Körper kann aufgrund der Experimentdurchführung nur beim Infla-

4 Vergleich von Geländebeispielen und Analogexperimenten

tionsmechanismus etwas berücksichtigt werden.) Die ursprüngliche Lage der Schieferung ist in Turmalinrändern erhalten (siehe Tafel VI: VI-2). Sie stand sehr steil (ca. 90°) zum Körper. An der (im Bild) Oberseite des Quarzkörpers im Geländebeispiel beschreibt die Schieferung das vom Aufblähversuch vorausgesagte Muster: leichtes Divergieren der Strukturen (z. T. verstärkt durch die Turmalinimprägnation) am Rand der linken gegenüber der rechten Hälfte des Körpers. Die Verbiegungen der Schieferung (im Bild) unterhalb des Körpers sind komplexer. Sie divergieren ebenfalls, aber sehr viel stärker.

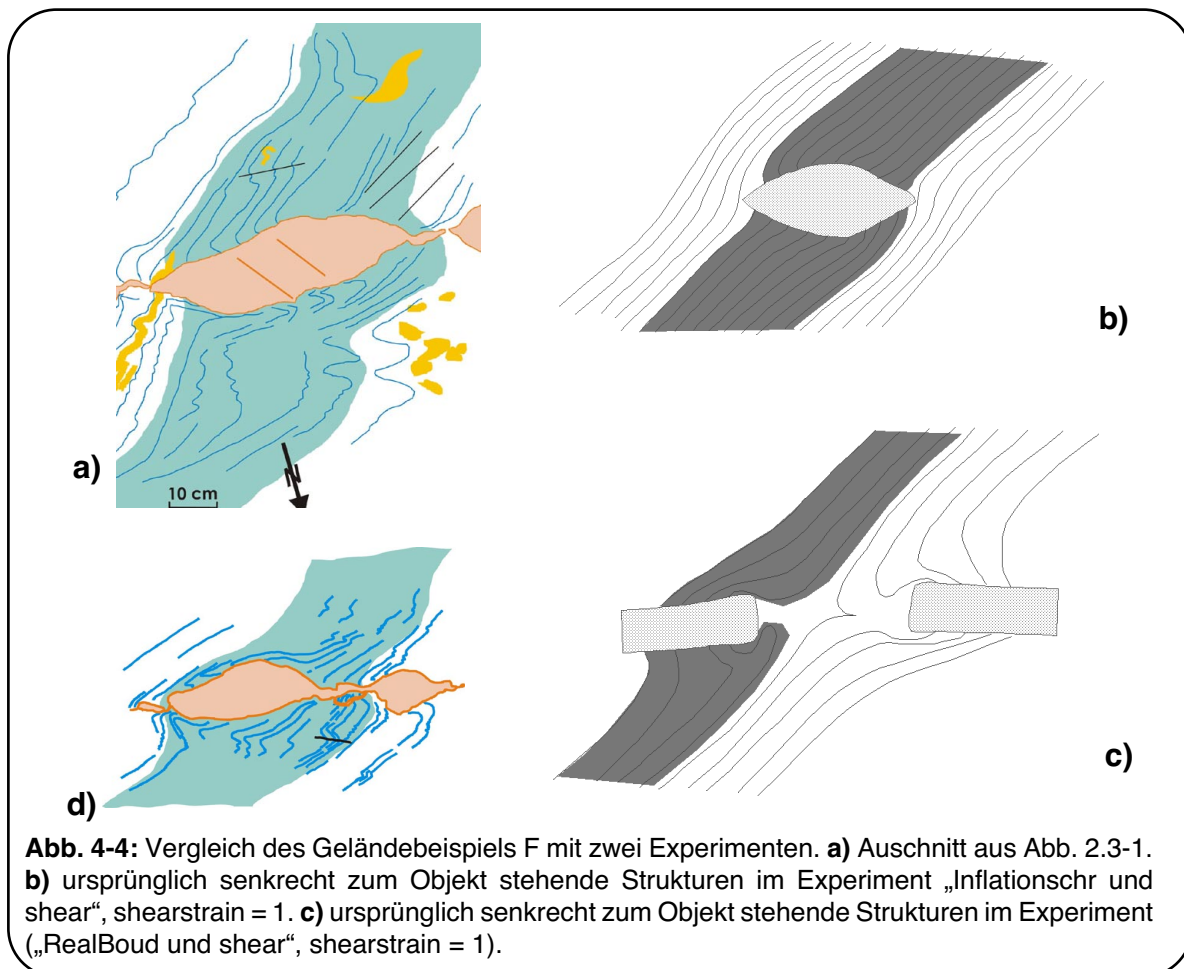


Abb. 4-4: Vergleich des Geländebeispiels F mit zwei Experimenten. **a)** Ausschnitt aus Abb. 2.3-1. **b)** ursprünglich senkrecht zum Objekt stehende Strukturen im Experiment „Inflationschr und shear“, shearstrain = 1. **c)** ursprünglich senkrecht zum Objekt stehende Strukturen im Experiment („RealBoud und shear“, shearstrain = 1).

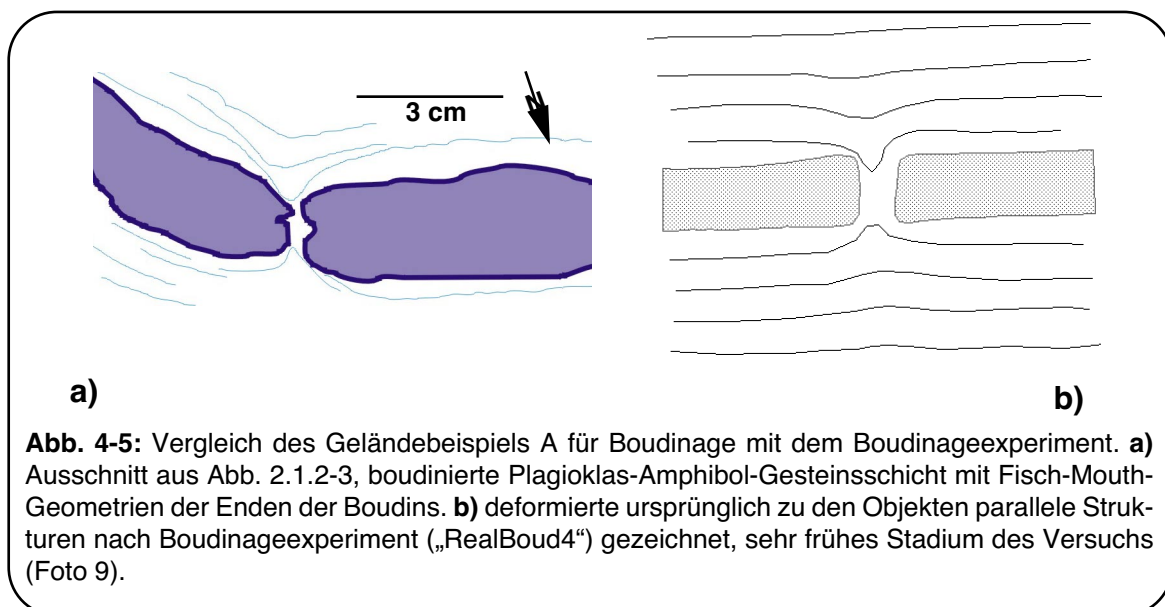
Die Krümmungen sind zu stark um durch Aufblähung allein entstanden zu sein. Die Schieferung müßte schon vor der Bildung des linsenförmigen Körpers gefaltet gewesen, oder nachträglich zusätzlich verfault worden sein. Abb. 4-4 d zeigt einen weiteren Quarzkörper der gleichen Kette (Abb. 2.3.1). Die Schichtung zeigt ebenfalls die oben beschriebene Geometrie. Die Schieferung allerdings, besonders an der linken Seite des Körpers, beschreibt Verkrümmungen, die besser mit dem Boudinageexperiment verglichen werden können. Die Ent-

scheidung zwischen Inplatznahmemechanismus oder Boudinage ist hier deswegen nicht ohne Weiteres zu treffen.

Geländebeispiel A gegen Experimente

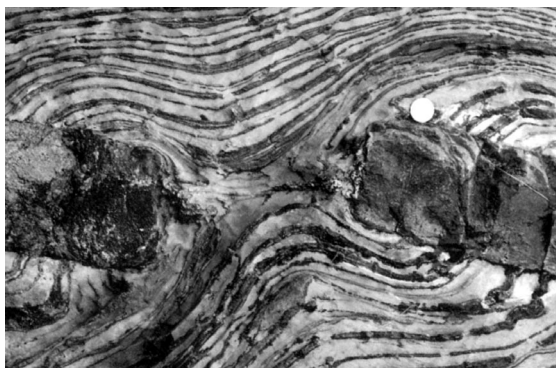
Abb. 4-5a zeigt einen Ausschnitt des im Detail in Abb. 2.1.2-3 beschriebenen Plagioklas-Amphibolgesteinsbandes. Da es sich hier um eine sedimentäre Schicht handelt, muss der Ursprung der linsenförmigen Körper hier echte Boudinage sein. Dafür sprechen auch die typischen Fishmouth-Formen (RAMSEY & HUBER 1983) an den Enden der Boudins. Die Schichtung und Hauptfoliation liegen hier parallel zur boudinierten Schicht. Abb. 4-5b ist aus einem frühen Stadium des Boudinageversuchs mit ursprünglich zu den Objekten parallelen Linien konstruiert. Die Strukturen ergeben etwa das gleiche Muster wie im Geländebeispiel beobachtet.

Tabelle 3.4.1-2 zeigt jedoch, dass die Unterschiede bei ursprünglich parallel zu den Objekten verlaufenden Strukturelementen zwischen den formbildenden Mechanismen im Wesentlichen nur in der Intensität der Verbiegungen liegen. Generell ist bei einem solch relativ frühen Stadium der Boudinage oder engen Lücken zwischen den Körpern eine Entscheidung für einen Mechanismus nur anhand der Verbiegungsgeometrien um die boudinförmigen Körper nicht zu treffen.

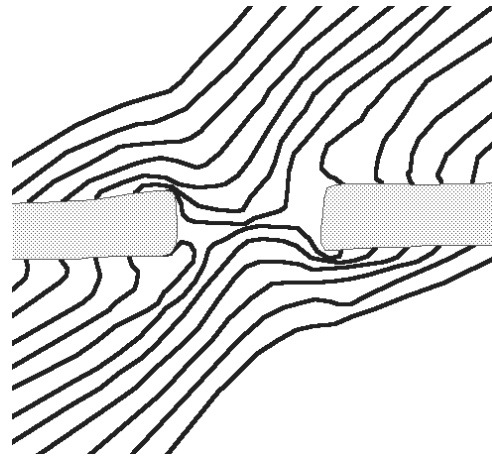


Literaturbeispiel gegen Experimente

Das Literaturbeispiel zeigt im Vergleich mit dem Boudinageexperiment (Abb. 4-6), dass dieses eine realistische Simulation der natürlichen Boudinage ist. Die Bänderungen im Literaturbeispiel stehen noch etwas flacher als ursprünglich 45° zu den Boudins. Es ist aber deutlich das tiefe Einbiegen der Schichten in das Boudinneck und das Hinausragen dieser Einbiegung bis in vom Neck entferntere Schichten zu erkennen. Auch ist deutlich, dass keine Schicht durch das Boudinneck läuft.



a) (aus RAMSEY&LISLE 2000)



b)

Abb. 4-6: Literaturbeispiel für echte Boudinage im Vergleich mit Boudinageexperiment. **a)** Ausschnitt aus RAMSEY&LISLE 2000, S.1012, fig. 37.30: Blockhafte Boudinage, entwickelt in einem diskordant zu gebänderten Kalkmetasedimenten stehenden basischen Gang (Adamello Massif, NE Italien). **b)** deformierte, ursprünglich zu den Objekten schräg stehende Strukturen (45°), gezeichnet nach „RealBoud4“, Extension $\varepsilon = 1,14$.

5 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die Analogexperimente zeigen, dass es Unterschiede der entstehenden Verkrümmungsmuster bei echter Boudinage und Pseudoboudinage (Inplatznahmemechanismen) gibt. Die signifikanten Unterschiede sind die geringere Intensität der Verbiegungen und das Durchlaufen der Strukturelemente durch die Körperzwischenräume bei Pseudoboudinage. Der Vergleich der Experimentergebnisse mit der Natur zeigt jedoch, wie schwierig die Entscheidung zwischen den Mechanismen dennoch sein kann. Die beiden Inplatznahmemechanismen (Inflation und Kollabieren) sind bereits in den Experimenten nicht anhand der Verbiegungen um die Körper zu unterscheiden. Im Gelände ist auch eine eindeutige Unterscheidung zwischen Boudinage und Pseudoboudinage nicht immer zu treffen, z. B. wenn die Zwischenräume zwischen den boudinähnlichen Körpern nicht groß genug sind, bzw. die Körper nicht komplett voneinander getrennt sind, oder wenn die verbogenen Strukturen einen sehr kleinen Winkel mit den linsenförmigen Objekten einschließen.

Die in Cap de Creus beobachteten Strukturen um die Pegmatit- und Quarzkörper zeigen viele Ähnlichkeiten mit den von Inplatznahmemechanismen erzeugten Strukturen. Zusätzlich sind einige Details nicht mit echter Boudinage zu vereinbaren. Der Ursprung der boudinähnlichen Form der beschriebenen Körper und die Verbiegungen des Nebengesteins herum ist Pseudoboudinage durch Inplatznahmemechanismen. Es fand demzufolge keine Ost-West-Dehnung der Pegmatite, wie in der Boudinage Hypothese angenommen, statt. Die daraus resultierende Strainanalyse muß neu überdacht werden. Es ist aus den durchgeführten Experimenten nicht zu entscheiden, ob eine Scherung während der Inplatznahme stattfand, d. h. ob D_2 und D_3 als eigenständige Deformationsereignisse oder als ein sich fortentwickelndes, heterogenes Deformationsereignis anzusehen sind, da sich die Strukturen der Inplatznahme mit anschließender Scherung bzw. mit gleichzeitiger Scherung nicht unterscheiden.

Inplatznahme, wie sie hier beschrieben und simuliert ist, hängt eng mit duktiler Deformation des Nebengesteins zusammen. Um Inflation und Kollabieren stattfinden zu lassen, muß die Schmelze langsam auskristallisieren. Die hohen Temperaturen von Nebengestein (750°C, DRUGUET 1997) und Schmelze (600°C,

4 Vergleich von Geländebeispielen und Analogexperimenten

DAMM et. al. 1992) machen langsames Auskristallisieren der Schmelze und duktilen Verhalten des Nebengesteins möglich und sind wahrscheinlich wichtige Parameter für das Auftreten von Pseudoboudinage.

Quarzadern können ganz ähnliche Strukturen aufweisen, die ebenfalls auf Pseudoboudinage hinweisen. Quarzadern kristallisieren allerdings nicht aus Schmelzen. Eine Entstehung von Quarzadern, die ähnliche Mechanismen wie Inflation und Kollaps zulässt, könnte eine Frage für zukünftige Untersuchungen sein.

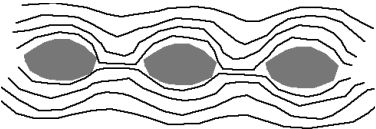
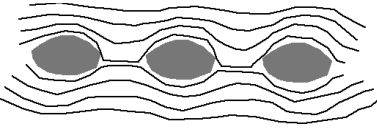
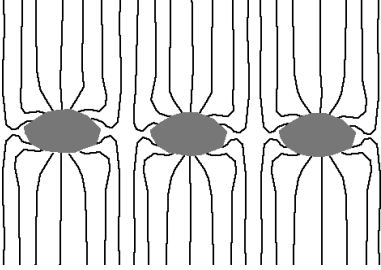
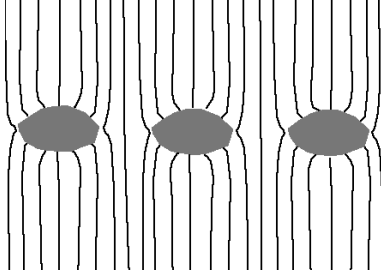
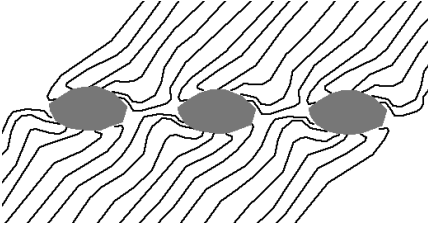
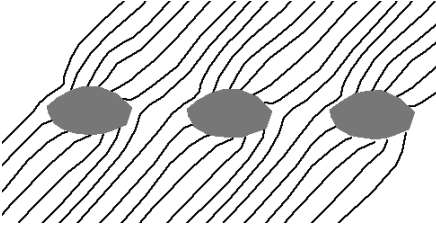
	Boudinage	Pseudoboudinage	
Parallel			nur leichte Intensitätsunterschiede
Senkrecht			Intensitätsunterschiede und Durchlaufen der Strukturelemente
Schräg			Intensitätsunterschiede und Durchlaufen der Strukturelemente

Tabelle 5.1: Gegenüberstellung von Boudinage und Pseudoboudinage (schematisch)

Tabelle 5.1 zeigt schematisch zusammenfassend die Strukturen der Boudinage und Pseudoboudinage. Bei zu den Objekten parallelen Strukturelementen ist es nicht möglich die beiden Mechanismen im Gelände zu unterscheiden. Schräge und senkrechte Elemente jedoch zeigen deutlich unterschiedliche Ausprägungen. Treten diese Geometrien im Gelände auf und sind die Körper

4 Vergleich von Geländebeispielen und Analogexperimenten

deutlich voneinander getrennt, so können Boudinage und Pseudoboudinage unterschieden werden.

6 Literaturverzeichnis

- ALFONSO ABELLA, P., CORBELLA i CORDOMÍ, M., MELGAREJO i DRAPER, J.-C. 1995. Nb-Ta-Minerals from the Cap de Creus pegmatite field, eastern Pyrenees: distribution and geochemical trends. *Mineralogy and Petrology* 55, 53-69.
- BONS, P.D., JESSELL, M.W. & PASSCHIER, C.W. 1993. The analysis of progressive deformation from dispersed marker-particles. *Journal of Structural Geology* 15, 403-411.
- BRISBIN, W.C. 1986. Mechanics of pegmatite intrusion. *American Mineralogist*, 71, 644-651.
- CARRERAS, J. 2001. Zooming on the Northern Cap de Creus shear zones. *Journal of Structural Geologie*, 23, 1457-1486.
- CARRERAS, J., CAPELLA, I. 1994. Tectonic levels in the Palaeozoic basement: a review and a new interpretation. *Journal of Structural Geologie*, 16, 1509-1524.
- CARRERAS, J., CASAS, J. M. 1987. On folding and shear zone-development: a mesoscale study on the transition between two different tectonic styles. *Tectonophysics* 135, 87-98.
- CARRERAS, J., DRUGUET, E. 1994. Structural zonation as a result of inhomogeneous non-coaxial deformation and it's control on syntectonic intrusions: an example from the Cap de Creus area, eastern-Pyrenees. *Journal of Structural Geologie*, 16, 1525-1534.
- CLOOS, E., 1947. Boudinage. *Transaction of the American Geophysical Union* 28, 626-632.
- DAMM, K.-W., HARMON, R. S., HEPPNER, P.-M., DORNSIEPEN, U. 1992. Stable isotope constraints on the origin of the Cabo de Creus garnet toumaline

- pegmatites, Massif des Alberes, eastern Pyrenees, Spain. *Geological Journal*, 27, 75-86.
- DRUGUET, E. 1997. The Structure of the NE Cap de Creus Peninsula, Dissertation. Universitat Autònoma de Barcelona.
- DRUGUET, E. 2001. Development of high thermal gradients by coeval transpression and magmatism during the Variscan orogeny: insights from the Cap de Creus (Eastern Pyrenees). *Tectonophysics* 332, 275-293.
- DRUGUET, E., HUTTON, D. H. W. 1998. Syntectonic anatexis and magmatism in a mid-crustal transpressional shear zone: an example from the Hercynian rocks of the eastern Pyrenees. *Journal of Structural Geologie*, 20, 905-916.
- DRUGUET, E., PASSCHIER C. W., CARRERAS, J., VICTOR, P., BROK, DEN, S. 1997. Analysis of a complex high-strain zone at Cap de Creus, Spain. *Tectonophysics* 280, 31-45.
- EECKHOUT, B. V. D., ZWART, H. J. 1988. Hercynian crustal-scale extensional shear zone in the Pyrenees. *Geology* 16, 135-138.
- GHOSH, S. K., RAMBERG, H. 1976. Reorientation of inclusions by combination of pure and simple shear. *Tectonophysics* 34, 1-70.
- GROTENHUIS, TEN , S.M. 2000. Mica fish in mylonites – deformation mechanisms and implications for rheology. Dissertation. Johannes Gutenberg-Universität, Mainz. www.uni-mainz.de/FB/Geo/Geologie/tecto/publications/publ.html
- LLOYD, G. E., FERGUSON, C. C., READING, K. 1982. A stress-transfer model for the development of extension fracture boudinage. *Journal of Structural Geology* 3, 355-372.

- MAJESTE-MENJOULAS, C., DEBAT, P. 1994. Pyrenees. Keppie, J. (Ed.): Pre-Mesozoic Geology in France and Related Areas. Springer-Verlag.
- NEURATH, C., SMITH, R. B. 1982. The effect of material properties on growth rates of folding and boudinage: experiments with wax models. *Journal of Structural Geology* 4, 215-299.
- PASSCHIER, C. W. 2001. Flanking structures. *Journal of Structural Geology* 23, 951-962.
- PIAZOLO, S. 2001. Shape fabric during progressive deformation. Dissertation. Johannes Gutenberg-Universität, Mainz. www.uni-mainz.de/FB/Geo/Geologie/tecto/publications/publ.html
- PIAZOLO, S., PASSCHIER, C. W. 2002. Controls on lineation development in low to medium grade shear zones: a study from the Cap de Creus peninsula, NE Spain. *Journal of Structural Geology* 24, 25-44.
- PIAZOLO, S., TEN GROTENHUIS, S. M., PASSCHIER C.W. 2001. New apparatus for controlled flow modeling of analog materials. *Geological Society of America, Memoir* 193.
- RAMSEY, J. G., HUBER, M. 1983 *The Technics of modern Structural Geology, 2: Strain Analysis*, London [u.a.] : Acad. Press, p. 1-13.
- RAMSEY, J. G., LISLE, R. J. 2000. *The Technics of modern Structural Geology, 3*, London [u.a.] : Acad. Press, S.1012, fig. 37.30.
- SEN, R., MUKHERJEE, A. D. 1975. Comparison of experimental and natural boudinage. *Geol. Mag.* 112, 191-196.
- SENGUPTA, S. 1983. Folding of boudinaged layers. *Journal of Structural Geology* 5, 197-210.

VICTOR, P. 1996. Kinematische Analyse einer HT-Deformationszone im Cap de Creus Gebiet, NE Spanien. Diplomarbeit, Johannes Gutenberg-Universität, Mainz.

ZWART, H. J. 1986. The Variscan Geology of the Pyrenees. *Tectonophysics*, 129, 9-27.

7 Tafeln

Tafel I

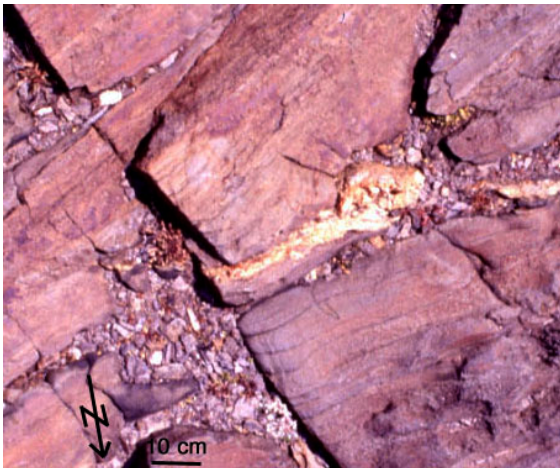
Fotos und Detailfotos zu Geländebeispiel E (Abb. 2.2.4)



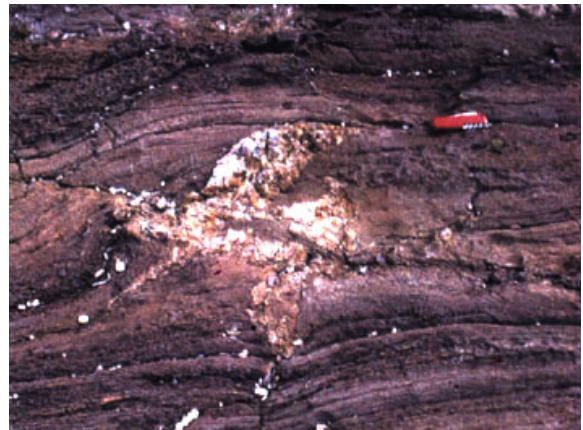
I-1: Gerader durchgängig gleichmäßiger Pegmatitgang. Er fällt mit 79° nach Süd ein. Die Spitze des gelben Bleistifts zeigt nach Norden. Er ist 12 cm lang. Gut erkennbar ist hier auch das unterschiedliche Erscheinungsbild der pelitischen und psammitischen Lagen. Die Schichten werden am Pegmati mächtiger.



I-2: S-förmig gefaltetes Quarzboudin eines alten Quarzganges, während D_1 boudiniert und während D_2 gefaltet. Bleistift zeigt nach Norden und ist 12 cm lang.



I-3: Tropfenförmiger Pegmatitkörper. (Foto Paul Bons)



I-4: Flammenförmige Abzweigungen. Sie entspringen der Sutur, die rechts und links des Körpers kein pegmatitisches Material zeigt. (Foto: Paul Bons)



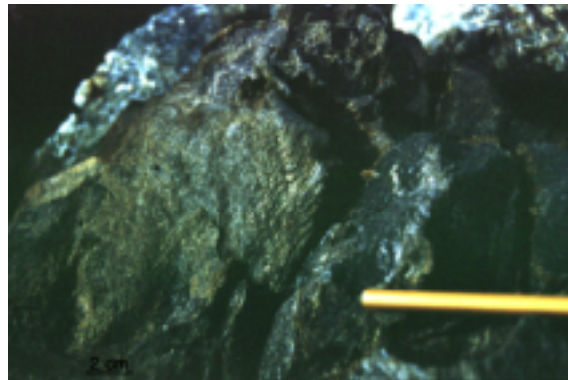
I-5: Pegmatitkörper, der sich aus einem schmalen Gang plötzlich in einen breiten schulterförmigen Körper entwickelt. Stift zeigt nach Nord. (Foto: Paul Bons)

Tafel II

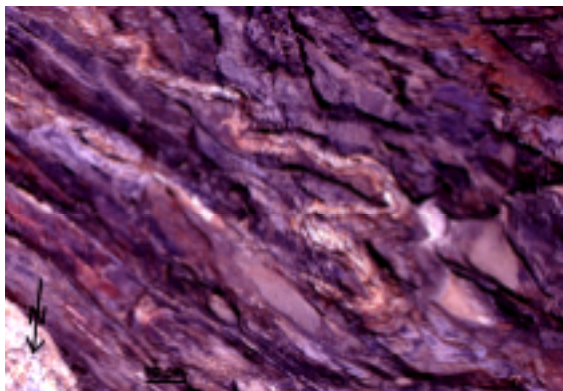
Detailfotos zu Geländebeispiel C (Abb. 2.2.2)



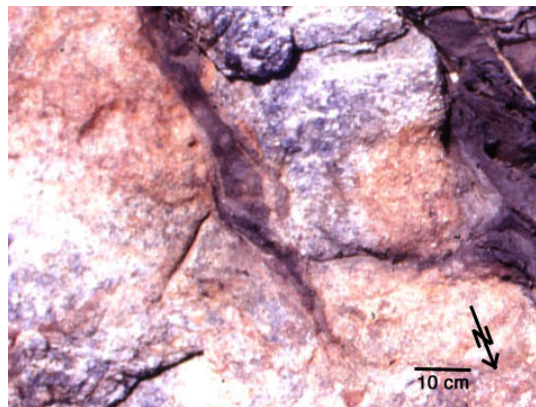
II-1: Krenulation in Hauptschieferung (s_3). Bleistift zeigt nach Nord und ist 12 cm lang. Die sehr unterschiedlichen Orientierungen von s_3 (siehe III-4) sind wahrscheinlich auf die Nähe des Pegmatits zurückzuführen.



II-2: Krenulation in Hauptschieferung (s_3). Stift zeigt nach Nord. Bleistift zeigt nach Nord.



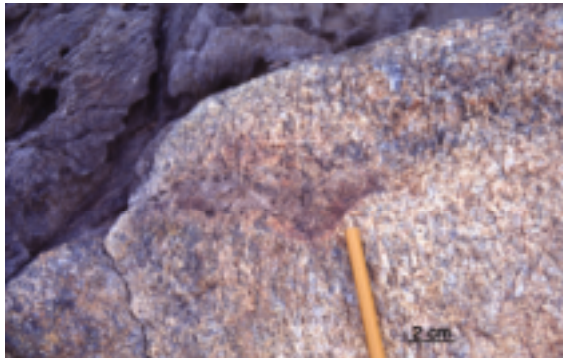
II-3: D_2 -Falte. Am Rand des Quarzganges ist s_1 -Foliation erhalten. Diese Falte ist eventuell durch das Eindringen des Pegmatits enger geworden.



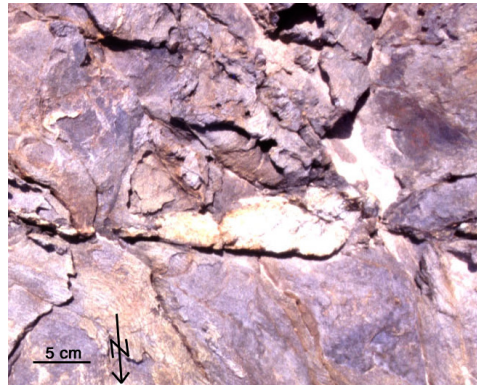
II-4: Streifen von stark geschiefertem Nebengestein in Pegmatit. Eventuell eine Intrusionsstruktur, ähnlich einer Intrusionsbrücke.

Tafel III

Detailfotos zu Geländebeispiel D (Abb. 2.2.3)



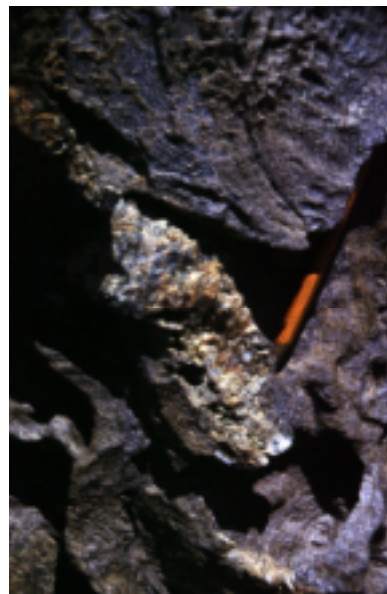
III-1: Internstruktur in Pegmatit. Stift zeigt nach Nord.



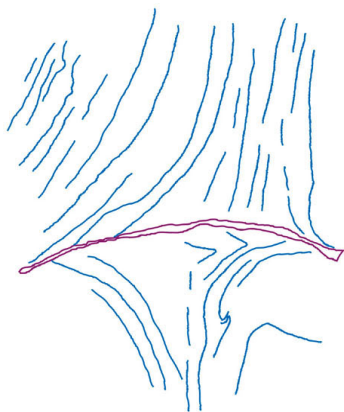
III-2: Tropfenförmiger Pegmatitkörper. (Foto: Paul Bons)



III-3: Divergenzpunkt. siehe auch Zeichnung III-5 (unten). Stift zeigt nach Nord und ist ca. 12 cm lang. (Foto: Paul Bons)



III-4: Tropfenförmiger Pegmatitkörper und typisches Erscheinungsbild der s_2 -Foliation. Bleistift zeigt nach Nord und ist 12 cm lang.



III-5: Zeichnung zu III-3.

Tafel IV

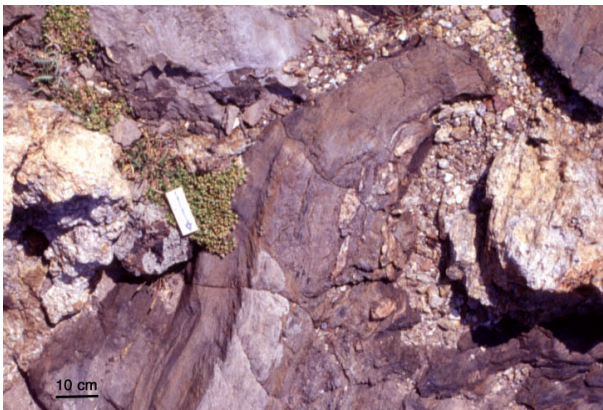
Detailfotos zu Geländebeispiel B (Abb. 2.2.1)



IV-1: Durchlaufende Schieferung durch Sutur. Bleistift zeigt nach Nord und ist 12 cm lang. Die Schieferung biegt sich in die Lücke ein, schmiegt sich an die Körper an, wird oberhalb der Körper engständiger (siehe über linkem Körper).



IV-2: Durch Sutur laufende alte Quarzgangboudins. Die Zusammengehörigkeit zu einem ehemaligen Gang ist noch verfolgbar. Bleistiftspitze zeigt nach Nord.



IV-3: Durchlaufende Schieferung. Die Sutur fehlt hier (oder liegt im nicht aufgeschlossenen Streifen, oberer Bildteil), evtl. handelt es sich um zwei verschiedene Ketten. Pfeil zeigt nach Nord. (Foto: Paul Bons)



IV-4: Turmalinrand an altem gefalteten Quarzgang.



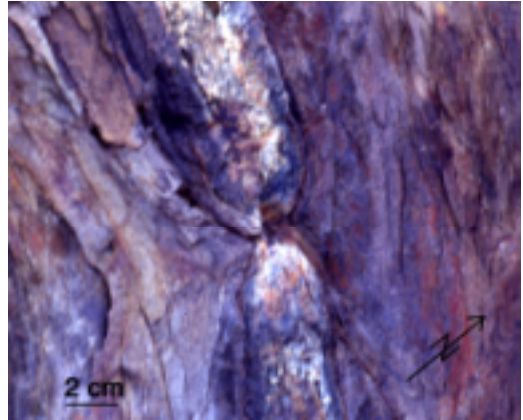
IV-5: Turmalinrand.

Tafel V

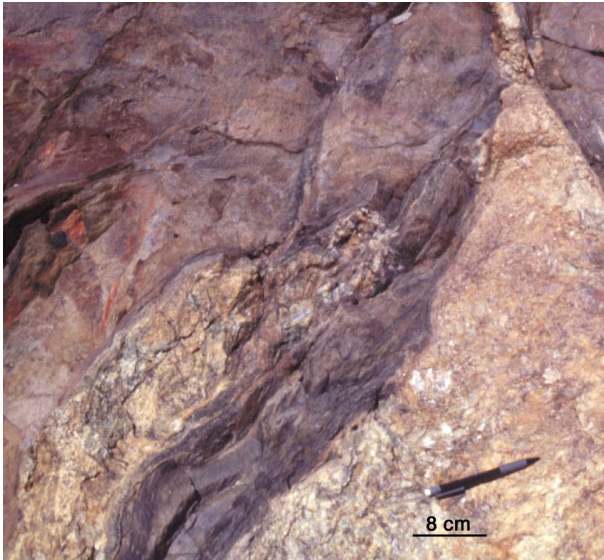
Detailfotos zu Geländebeispiel A (Abb. 2.1.2-2)



V-1: Quarz in Boudinneck in Plagioklas-Amphibol-Band. Die Boudins liegen parallel zur Schichtung. (Foto Paul Bons)



V-2: Typische Fishmouthgeometrie an Boudinenden. Die Boudins liegen parallel zur Schichtung.



V-3: Stark geschieferter Bereich zwischen Pegmatit und Plagioklas-Amphibol-Band. Stift zeigt nach Nord. Die Boudins liegen parallel zur Schichtung.



V-4: Zwei Boudins aus Plagioklas-Amphibol-Gestein parallel zur Schichtung. Bleistift zeigt nach Nord und ist 12 cm lang.



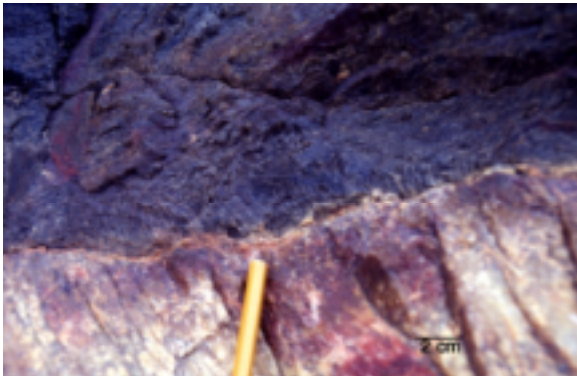
V-5: Fishmouth- und langezogenes Boudin. Stift zeigt nach Nord. Die Schieferung biegt sich in das Boudinneck ein, schmiegt sich an die Ecken der Körper an und wird dort engständiger.

Tafel VI

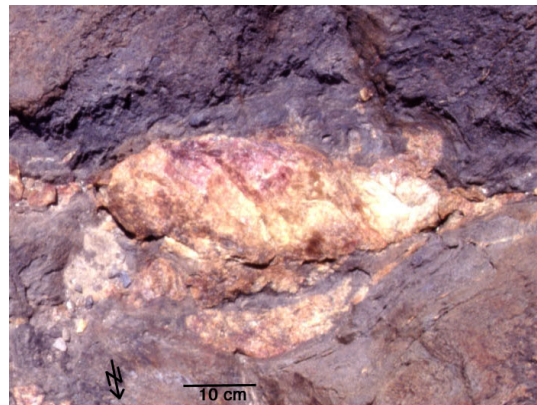
Detailfotos zu Geländebeispiel F (Abb. 2.3.1)



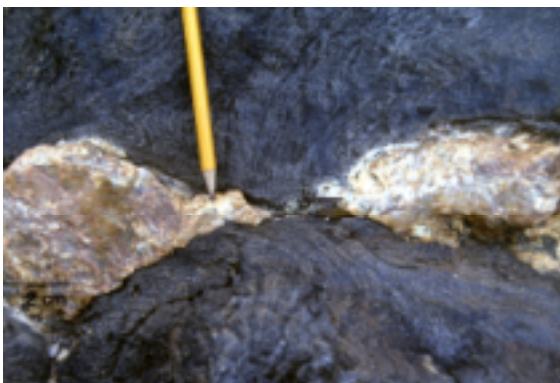
VI-1: Intrusionsbrücke an Quarzkörper mit Turmalinrand. Bleistift zeigt nach Nord und ist 12 cm lang.



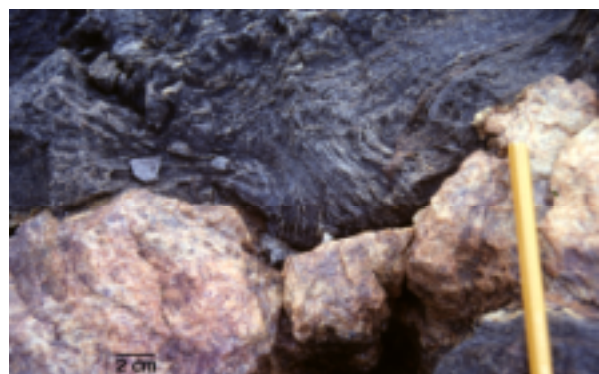
VI-2: Turmalinrand an Quarzkörper. Bleistiftspitze zeigt nach Nord.



VI-3: Abschneiden des alten durch den jungen Quarzgang. (vergleiche Abb. 2.3-1, Kasten VI-3.) (Foto Paul Bons)



VI-4: Durchlaufende Strukturen durch Quarzkörperzwischenräume. Bleistiftspitze zeigt nach Nord.

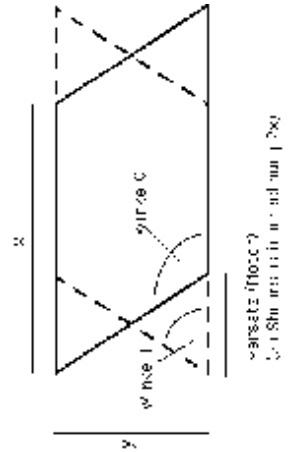


VI-5: Verbiegung um Quarzkörper. Bleistiftspitze zeigt nach Nord.

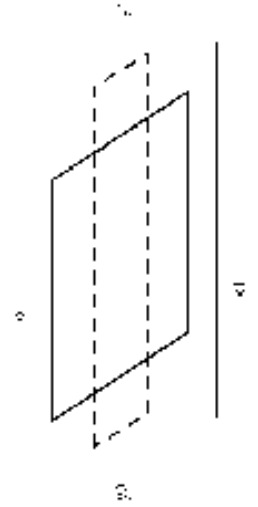
8 Anhang

Nr.	Name	Datum	Objekte	Kurzbeschreibung	Latex sheet	Höhe PDMS	formbildender Prozess	Verkürzungsrate (1/s)	Temperatur (°C)	x0 (cm)	y0 (cm)	x1 (cm)	y1 (cm)	Extension (%)	Dauer (s)	strain rate (s ⁻¹)	Zeit zwischen Fotos (s)	
										e = x0/x1								
										e = x0/x1								
16	RealBoud4 und shear	11.06.02	3 schwimmende Kästchen (4.7x1.4x3.5cm), Dichte 0.965g/cm ³	echte Boudinage durch Extension; einfache Scherung (dextral)	ja	6.2 Höhe Gitter: 5	pure shear (Transpression mit Wn=0.01) (in 2 Schritten)	0.01	24	21.5	17.5	24.5	14.5	1.14	13.95	21600	6.0E-06	900
12	RealBoud3	31.05.02	3 schwimmende Kästchen (4.7x1.4x3cm), Dichte 0.93g/cm ³	echte Boudinage durch Extension	ja	6.5	pure shear (Transpression mit Wn=0.01)	0.01	22	21.8	18	22.5	17	1.03	3.21	1260	2.5E-05	780
11	RealBoud2	31.05.02	3 schwimmende Kästchen (4.7x1.4x3cm), Dichte 0.93g/cm ³	echte Boudinage durch Extension	ja	6.5	pure shear (Transpression mit Wn=0.01)	0.03	22	21.5	18	n.gem.	n.gem.			690		300
10	RealBoud1	29.05.02	3 schwimmende Kästchen (4.7x1.4x3cm), Dichte 0.93g/cm ³	echte Boudinage durch Extension	ja	5.5	pure shear (Transpression mit Wn=0.01)	0.2	21	21.5	18	n.gem.	n.gem.			900		120

Tabelle mit Experimentparametern zu den Experimenten zur echten Boudinage (Teil1). (n.gem. = nicht gemessen, n.d. = nicht durchgeführt). Grau markiert sind zur Auswertung benutzte Experimente.



Erläuterung zu den Parametern der einfachen Scherung. Gilt auch für Inplatznahmeexperimente.



Erläuterung zu den Parametern der reinen Scherung.

Nr.	Name	Simplexhear		Geschwindigkeit (Labvie winkel w)	winkel 0	winkel 1	shear strain $\tan(w_0 - 90) + \tan(90 - w_1)$	shear strain $2 \cdot V/y$	shear strain Mittelwert	Versatz der Motoren y0	Dauer t (s)	shear strain rate	Zeit zwischen den Fotos (s)	Bemerkungen	benutzt oder nicht?	
		Temperatur (°C)	x0													N/t
16	RealBoud4 und shear	24	24.5	0.02	117	45	1.51	1.54	1.53	11.2	5828	2.6E-04	2.7E-04	2.6E-04	180	über Gitter weitere Schicht PDMS; Pause von 1,5h wegen Einbuchung in PDMS über Lücke zwischen Objekten und Probleme beim Neuanfahren des Programms (falsche Richtung der Motoren) ja
12	RealBoud3	n.d.			n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	180	Große Einbuchungen an Lücken zwischen Objekten, Stehenlassen auf Reinfließen warten: mittleres Objekt wurde zur Seite geschoben nein, da Einbuchungen in der PDMS nicht zu beseitigen
11	RealBoud2	n.d.			n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Große Einbuchungen an Lücken zwischen Objekten, zu schnelles Fahren des Experiments nein, da zu schnell
10	RealBoud1	n.d.			n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Große Einbuchungen an Lücken zwischen Objekten, viel zu schnelles Fahren des Experiments nein, da viel zu schnell

Anhang 1B

Tabelle mit Experimentparametern zu den Experimenten zur echten Boudinage (Teil2). (n.gem. = nicht gemessen, n.d. = nicht durchgeführt). Grau markiert sind zur Auswertung benutzte Experimente.

Nr.	Name	Datum	Objekte	Kurzbeschreibung	Latex sheet	Höhe PDMS (cm)
15	inflationshr+sch	05.06.02	Schraubenobjekt	Aufblähen während einfacher Scherung (dextral)	ja	6.2
14	inflationshr und shear	04.06.02	Schraubenobjekt	Aufblähen, anschließend einfache Scherung (dextral)	ja	6.5
13	collapse3 und shear	03.06.02	2 schwimmende Objekte(4.7x1.4x3cm) (3&4), Kartenstapel mit 40 angeschrägten Karten von 3 Seiten in Luftballon gehüllt	Kollabieren zwischen zwei unveränderlichen Körpern ; anschl. Einfache Scherung (dextral)	ja	6.5
9	basis4	15.05.02	keine	einfaches Scheren (dextral)	ja	6.5
8	collapse2 und shear	13.05.02	2 schwimmende Objekte(4.7x1.4x3cm), Kartenstapel mit 40 angeschrägten Karten von 3 Seiten in Luftballon gehüllt	Kollabieren zwischen zwei unveränderlichen Körpern mit Abstand; anschl. Einfache Scherung (dextral)	ja	7.5
7	shear1	08.05.02	schwimmendes Objekt (4.7x1.45x6cm)(1)	einfaches Scheren (dextral)	ja	8
6	basis3	25.04.02	keine	einfaches Scheren (dextral)	nein	n.gem.
5	basis2	25.04.02	Hartgummiklötzchen (2.4.2x1.4cm, nach unten zugespitzt) an Oberfläche	einfaches Scheren (dextral)	nein	n.gem.
4	basis1	24.04.02	Plastikkästchen (6.4x2.7x7.3cm) bis auf 1cm mit PDMS gefüllt	einfaches Scheren (dextral)	nein	8
3	collapse1	11.04.02	2 verklebte Kartenstapel, 1 loser Kartenstapel (40 Karten)	Kollabieren zwischen zwei unveränderlichen Körpern mit Abstand; anschl. Einfache Scherung (dextral)	nein	n.gem.
2	inflation2 und shear	09.04.02	loser Kartenstapel	Aufblähen; anschl. Einfache Scherung (dextral)	nein	n.gem.
1	inflation1 und shear	05.04.02	loser Kartenstapel	Aufblähen; anschl. Einfache Scherung (dextral)	nein	n.gem.

Tabelle mit Experimentdaten zu den Pseudoboucinexperimenten (Teil1).(n.gem. =nicht gemessen). Grau markiert sind zur Auswertung benutzte Experimente.

Nr.	Name	formbildender Prozess									
		Temperatur (°C)	Objektlänge vor(cm)	Objektbreite vor(cm)	Objektlänge nach(cm)	Objektbreite nach(cm)	Extension des Objekts	Extension (%)	Dauer (s)		
15	inflationsschraub	25	7.3	1.6	7.1	4	2.50	150.00	6600		
14	inflationsschraub und shear	24	7.3	1.6	7.3	3.1	1.94	93.75	5045	16200 gesamt (9540 Kartenziehe	
13	collapse3 und shear	24	4.5	1.7	4.4	0.3	0.18	-82.35	n		
9	basis4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
8	collapse2 und shear	23	4.4	1.4	4.4	0.3	0.21	-78.57	7200		
6	basis3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
5	basis2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
4	basis1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
3	collapse1	n.g.	4.3	1.3	4.3	0.2	0.15	-84.62	5940		
2	inflation2 und shear	25	4.1	0.1	4.2	1.4	14.00	1300.00	4200		
1	inflation1 und shear	25	4.1	0.1	4.1	1.6	16.00	1500.00	3480		

Tabelle mit Experimentdaten zu den Pseudoboulinexperimenten (Teil2). (n.gem. =nicht gemessen, n.d. = nicht durchgeführt). Grau markiert sind zur Auswertung benutzte Experimente.

Nr.	Name	Simplexhear		Geschwindigkeit (mm/s)	win kel		shear strain $2 \cdot V/y$	shear strain Mittelwert	Versatz der Motoren		shear strain rate	benutzt oder nicht?	
		Temperatur (°C)	x0 (cm)		w0	win kel			win kel	Motor n (cm)			y0 (cm)
15	inflationssch	21.5	0.02	115	45	1.47	1.46	1.46	12.75	17.5	6600	2.2E-04	ja
14	inflationssch r und shear	24	0.02	115	45	1.47	1.46	1.46	12.75	17.5	6500	2.2E-04	ja
13	collapse3 und shear	24	0.02	120	50	1.42	1.49	1.45	13	17.5	6475	2.3E-04	ja
9	basis4	23	0.02	125	95	0.61	0.62	0.61	5.7	18.5	3015	2.0E-04	nein, nur zur Überprüfung des Aufbaus
8	collapse2 und shear	23	0.02	125	55	1.40	1.35	1.38	12.5	18.5	6471	2.1E-04	(ja)
7	shear1	24	0.02	120	50	1.42	1.41	1.41	13	18.5	6500	2.2E-04	ja
6	basis3	23	0.02	125	90	0.70	0.65	0.67	6	18.5	3000	2.2E-04	nein, nur zur Überprüfung des Aufbaus
5	basis2	25	0.02	125	50	1.54	1.41	1.47	13	18.5	6500	2.2E-04	nein, keine ausreichende Rotationsfähigkeit
4	basis1	26	0.02	125	50	1.54	1.54	1.54	14.2	18.5	6500	2.4E-04	nein, keine ausreichende Rotationsfähigkeit
3	collapse1	n.gem.	0.02	125	n.gem.	0.81	n.gem.	n.gem.	n.gem.	18.5	3889	2.1E-04	nein, keine ebene Oberfläche der PDMS Teil: ja Teil2: nein, keine
2	inflation2 und shear	25	0.02	125	62	0.81	1.17	0.99	10.8	18.5	5940	1.7E-04	Rotationsfähigkeit
1	inflation1 und shear	25	0.02	125	60	0.81	1.30	1.05	12	18.5	6004	1.3E-04	nein, keine Rotationsfähigkeit, unbrauchbares Gitter

Tabelle mit Experimentdaten zu den Pseudobouinexperimenten (Teil3). (n.gem. = nicht gemessen, n.d. = nicht durchgeführt). Grau markiert sind zur Auswertung benutzte Experimente.

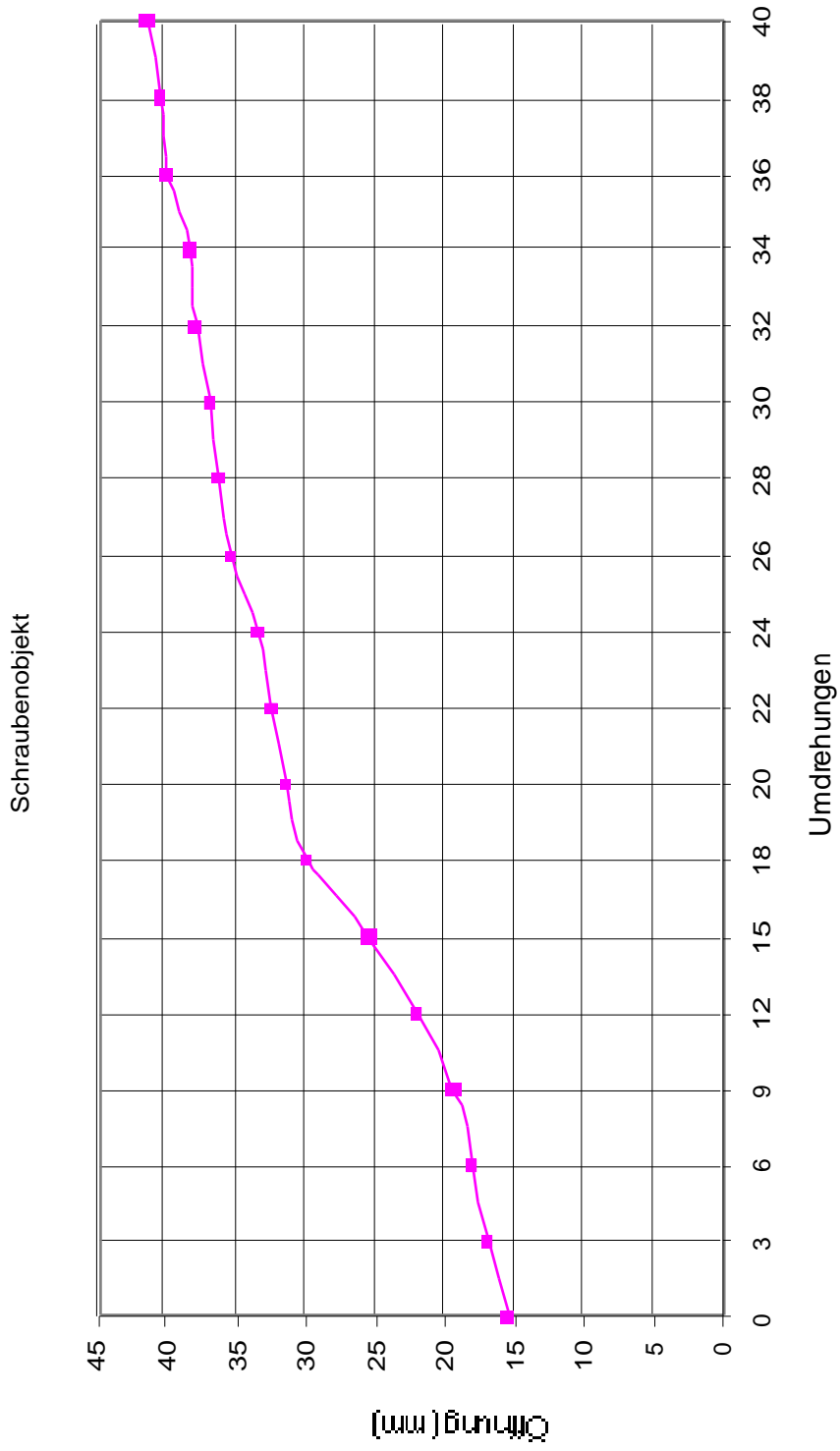


Diagramm 1: Öffnung des Schraubenobjekts gegen Umdrehungen, zur Einstellung der gleichmäßigen Aufblähung verwendet

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Nr. (Experiment)	Name	shear strain $\dot{\gamma}$ (s^{-1})	shear strainrate $\dot{\gamma}$ (s^{-1})	Dauer t (s)	a (cm)	b (cm)	Verhältnis der Seiten im Rechteck $R' = a'/b'$	Annäherung von R an Ellipse über Fläche (Grenzfall $b'=b$)	Annäherung von R an Ellipse über Fläche (Grenzfall $a=a$)	Winkelgeschwindigkeit \dot{W} (rad/s) (Grenzfall $b=b$)	Winkelgeschwindigkeit \dot{W} (rad/s) (Grenzfall $a=a$)	minimaler Rotationswinkel w (°)	maximaler Rotationswinkel w (°)	absolute tatsächliche Rotation der Objekte (°)	relative tatsächliche Rotation der Objekte (°)
								$R = R'^4 / \pi^{1/4} b'^2$	$R = R'^4 / \pi^{1/4} a'^2$	$\dot{W} = \dot{\gamma} / (R^2 + 1)$	$\dot{W} = \dot{\gamma} / (R'^2 + 1)$	$w = \dot{W} \cdot t$	$w = \dot{W} \cdot t$		
16	RealBoud4 und shear	1.53	2.6E-04	5828	4.78	1.41	3.39	4.32	2.66	1.3E-05	3.2E-05	4.5	10.8	0	9
14	inflationsschr und shear	1.46	2.2E-04	6500	7.3	3.1	2.35	3.00	1.85	2.3E-05	5.1E-05	8.4	18.9	5	9
13	collapse3 und shear (Karten)	1.45	2.2E-04	6475	4.4	0.3	14.67	18.67	11.52	6.4E-07	1.7E-06	0.2	0.6	5 (gegen Uhr!)	1
13	collapse3 und shear (schwimmende Kästchen)	1.45	2.2E-04	6475	4.7	1.4	3.36	4.27	2.64	1.2E-05	2.8E-05	4.3	10.5	5 und 3	9 und 7
8	collapse2 und shear (Karten)	1.38	2.1E-04	6471	4.4	0.3	14.67	18.67	11.52	6.1E-07	1.6E-06	0.2	0.6	0	4
8	collapse2 und shear (schwimmende Kästchen)	1.38	2.1E-04	6471	4.7	1.4	3.36	4.27	2.64	1.1E-05	2.7E-05	4.1	9.9	0	4
7	shear1	1.41	2.2E-04	6500	4.7	1.45	3.24	4.13	2.55	1.2E-05	2.9E-05	4.5	10.8	5	9
5	basis2	1.47	2.3E-04	6500	2.4	1.7	1.41	1.80	1.11	5.4E-05	1.0E-04	19.9	37.8	12	18
4	basis1	1.54	2.4E-04	6500	6.4	2.7	2.37	3.02	1.86	2.3E-05	5.3E-05	8.7	19.7	0	6
2	inflation2 und shear	0.99	1.7E-04	5940	4.2	1.4	3.00	3.82	2.36	1.1E-05	2.5E-05	3.6	8.6	0	6
1	inflation1 und shear	1.05	1.8E-04	6004	4.1	1.6	2.56	3.26	2.01	1.5E-05	3.5E-05	5.2	12.0	0	6

Tabelle zur Rotationsfähigkeit der Objekte (siehe Kap. 3.2.4). Berechnungen der Winkelgeschwindigkeiten und Rotationswinkel nach GOSH & RAMBERG 1996 (siehe auch Anhang 4).

Anhang 4

Erklärung zu Anhang 3

Da die Formel von GOSH & RAMBERG (1976) für elliptische Körper gilt, muß eine Annäherung für rechteckige Körper gemacht werden. Abb. 7.1 zeigt Annäherungen dreier verschiedener Ellipsen an ein Rechteck. Dem Rechteck am ähnlichsten sieht die mittlere Ellipse. Die Außenbeschreibende des Rechtecks ist zu groß und die Innenbeschreibende zu klein. Das Bild zeigt auch das die Flächen sehr unterschiedlich sind. Um eine Ellipse zu erhalten, die genau zwischen den beiden äußeren Extremfällen liegt, kann man für diese die gleiche Fläche annehmen wie für das Rechteck.

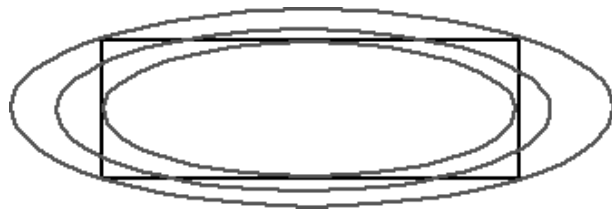


Abb. 7.1: Ellipsen einem Rechteck angenähert.

zu Spalte 9 und 10:

Annäherung über die Flächen

Ellipse: $S = \frac{\pi}{4} \cdot ab$

Rechteck: $S = a' \cdot b'$

Die Längen-Breitenverhältnisse sind:

$$R = \frac{a}{b}$$

$$R = \frac{a'}{b'}$$

aus

$$S = S' \Leftrightarrow R' \cdot b'^2 = \frac{\pi}{4} \cdot R \cdot b^2$$

resultieren:

$$R = R' \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{b'^2}{b^2}$$

zu Spalte 11 und 12:

Da die Objekte alle parallel zur Scherrichtung (zur Scherebene) liegen, ist der Winkel der Anfangorientierung 0.

$$\phi = 0$$

Damit vereinfacht sich die Formel nach Gosh & Ramberg (1976) (siehe Text) auf:

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{\gamma}}{R^2 + 1}$$