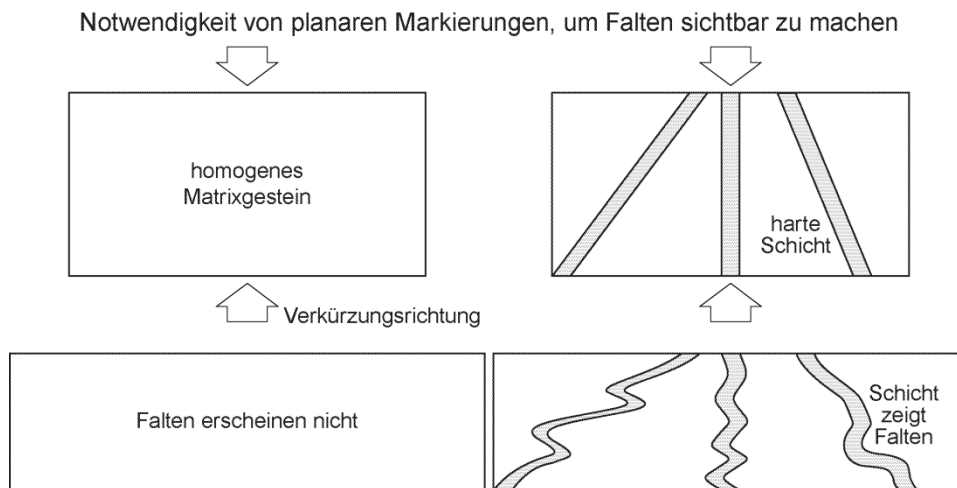


FALTUNG

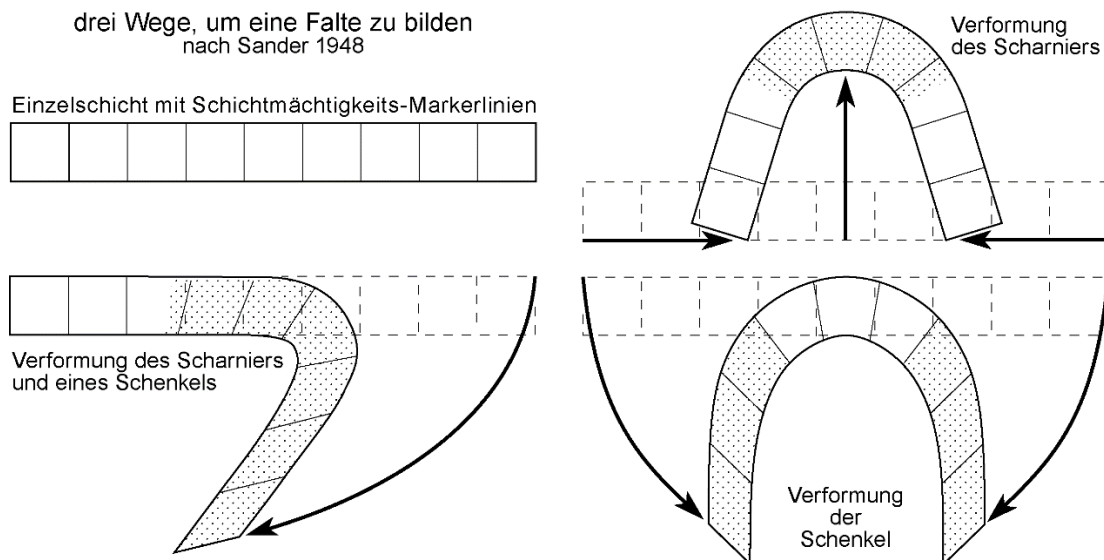
Faltung ist ein Konzept, das alle geologischen Prozesse umfasst, durch die Oberflächen im Gestein während der Deformation gekrümmt werden. Da Falten dauerhafte Deformationsstrukturen ohne oder wenig Verlust der Kohäsion der gefalteten Schicht sind, bezieht sich Faltung auf das im Wesentlichen langsame, duktile Verhalten von in verhältnismässig weichem und/oder heissem Gestein. Über die beschreibende, anatomische Klassifikation hinaus beschäftigten sich viele der frühen geologischen Arbeiten mit Prozessen, die während der Faltung von geschichteten Sedimenten wirksam sind. Verschiedene Faltungsmechanismen kombinieren einige prinzipielle Prozesse, die von geometrischen (Schichtmächtigkeit und Abstand) und physikalischen (Viskosität, Viskositätskontrast, Anisotropie) Parametern der Gesteine abhängen.

In dieser Vorlesung betrachten wir einige bildungsmechanische Aspekte der Entwicklung von Falten. Der wichtige Aspekt ist, dass Spannung alleine nicht ausreicht um Faltung zu verursachen: Es muss zuerst eine planare Fläche geben die die Form und Orientierung der Falte definiert, und die Orientierung dieser planaren Fläche in Bezug auf die Spannungsorientierung steuert in vielerlei Hinsicht die Orientierung der resultierenden Falte.



Faltungsprozesse

Die meisten Modelle zur Faltenbildung ignorieren Körperkräfte und die Auswirkung des Umgebungsmaterials (beide werden als viskose Flüssigkeiten behandelt). Aber in der Praxis spielen sie eine bedeutende Rolle bei der Bestimmung oder Veränderung der Faltengeometrie. Flache Schichten können auf verschiedene Art und Weise verbogen werden.



Rotation

Offensichtlich werden durch die Faltung Teile der Schichten rotiert. Die kontinuierliche Änderung der Orientierung der steifen Schichten bezüglich der Verkürzungsrichtung führt zuerst zu einer starken Abnahme der Druckfestigkeit der Gesteinsmasse. Dieses Verhalten ist eine Art von Massenschwächung, die die fortschreitende Veränderung der Innengeometrie des Gebirges ohne Veränderung der Materialeigenschaften (z.B. Viskosität) begleitet; es wird entsprechend als **strukturelle Erweichung** (*structural softening*) bezeichnet. Diese Erweichung wird von einem Anstieg der Druckfestigkeit, einer **strukturellen Verfestigung** (*structural hardening*) gefolgt. Erweichung und Verfestigung sind die Bedingungen für Beginn, Wachstum und Ende der Instabilitäten. Natürlich wird jede andere Art von Verformungsschwächung (z.B. eine Veränderung der wirksamen Materialeigenschaften durch Prozesse wie Mikrobrüche, Drucklösung, etc.) die Stabilität des Systems auch beeinflussen.

Verlängerung

Faltenscharniere markieren meistens die Stelle, wo die Falten zu amplifizieren begonnen haben. Amplifiziert wird in der Regel über eine kurze Strecke, so dass jede Faltenachse in Richtung der beiden Enden des gefalteten Segments taucht. Weitere Rotation der Schenkel und anschließende Amplifizierung begleiten die nicht zwangsläufig symmetrische Längsmigration der Faltenenden.

Mechanische Rolle der Schichtung: Aktive / passive Faltung

Jede Deformation beinhaltet Bewegungen von Teilchen der Materie, z.B. Partikel. Ein passives Partikel hat keinerlei Interaktion mit seinen Nachbarn; es bewegt sich nur. Ein aktives Partikel ist in Wechselwirkung mit seinen Nachbarn und seine Bewegung wird durch die der benachbarten Partikel beeinflusst.

In der Geologie hat die Schichtung mechanische Eigenschaften, die Faltungsprozesse und das Verformungsmuster beeinflussen. So können z.B. Grenzschichten zwischen Lagen mit unterschiedlicher Festigkeit (Viskosität) die Scherdeformation lokalisieren und so die Art und Weise wie eine Falte entsteht beeinflussen. Faltung ist **aktiv**, wenn Deformation im Schichtmassstab stattfindet und der Festigkeitsunterschied der Schichten direkt das Deformationsmuster beeinflusst. Demgegenüber findet bei **passiver Faltung** die Deformation im Kornmassstab statt, während die Lagen keine bedeutende Festigkeit und keinen Kompetenzkontrast haben und demnach keine aktive Kraft quer und/oder parallel zu den Lagengrenzen erzeugen; die Schichtung dient nur als geometrischer Verformungsmarker. Passive Falten entwickeln sich aus der Amplifizierung der Anfangsschichtunregelmäßigkeiten während des heterogenen Gesteinsfließens und ihre Form reflektiert das Muster der heterogenen Deformation. Passive Faltung wurde experimentell nachgebildet, indem ein Lagenstapel aus Modellierungspaste verformt wurde (denken Sie auch an Ölschichten oder Schaum auf langsam fließendem Wasser). Aktive Faltung wird im Experiment mit einem Kartenstapel nachgebildet. Die Karten gleiten dabei aneinander vorbei.

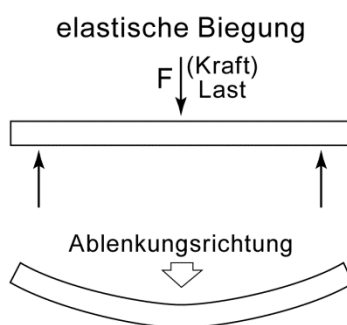
Faltungsmechanismen

Falten können aus schichtparalleler Kompression, ungleicher Belastung, die schief bis senkrecht zu den Schichten ist, oder aus Amplifizierung der Oberflächenunregelmäßigkeiten während des Deformationsfließens resultieren.

Biegung

Biegung (*bending*) beinhaltet Kräfte, die steil an Schichten angelegt sind und auf diese einwirken. Die Schichten können, müssen aber nicht einen Kompetenzkontrast haben. Eine Schicht, die der Biegung unterliegt, verhält sich wie ein elastischer Balken, der an beiden Enden gestützt und in der Mitte belastet wird. Zum Beispiel ein horizontal liegendes Notizbuch, das an beiden Enden auf vertikal stehenden Büchern aufliegt. Das Notizbuch wird nach unten durchgebogen, wenn eine Last auf die Mitte gelegt wird. Diese Verformung findet gewöhnlicherweise auch bei einem überladenen

oder zu schwachen Büchergestell statt. Die Biegung ist ein aktiver Faltungsprozess, der zur Entstehung von sehr schwachen Falten führt.

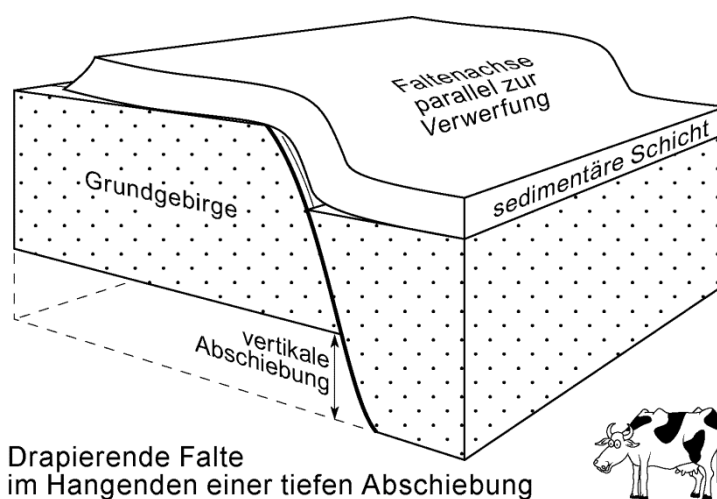


Lithosphärische Biegung

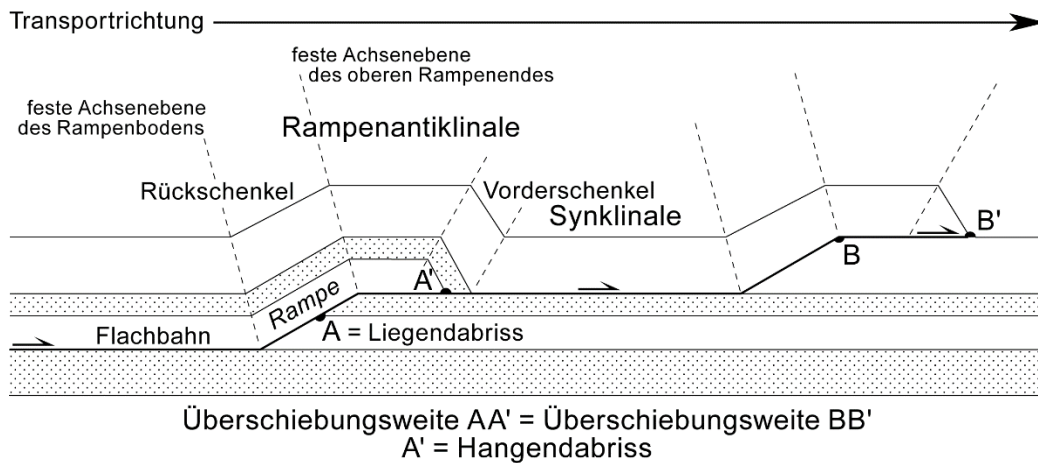
Biegung und damit zusammenhängende Faltenbildung sind im Lithosphärenbereich weit verbreitet. In Kratonen kann die Vertikalspannung breite Dome und Becken, Wölbungen und Bögen der ursprünglich horizontalen Ebenen produzieren. Verbiegung der Lithosphärenplatte geschieht auch an Subduktionszonen und angrenzend an ozeanischen Rücken, bei kleineren Ansammlungen von vulkanischen Gesteinen in Ozeanen (z.B. Guyots und grosse Vulkane), und bei grösseren Eis- oder Sedimentauflasten (isostatischer Ausgleich). Lithosphärische Biegung tritt auch in Vorlandbecken neben Gebirgssystemen auf. Die Spannungen, die durch die Schwerkraft (dh Körperkraft) verursacht wurden, sind während der Biegung auf dem lithosphärischen Massstab wichtig.

Krustale Biegung

Biegung im krustalen Massstab produziert leichte Auf- und Abwärtswölbung. Beispiele für Biegefalten sind die Bögen im Deckgestein über einem intrudierenden Pluton, *drape folds* und **erzwungene Falten** (*forced folds*). Erzwungene Falten werden gebildet, wenn Sedimente, die ein steiferes Grundgebirge bedecken, sich in Erwidern auf die vertikalen Bewegungskomponenten entlang einer Verwerfung im Grundgebirge biegen. Über einer Abschiebung bezieht die Biegung der Schichten eine schichtparallele Dehnung mit ein; über einer Aufschiebung bezieht die Biegung eine Stauchungskomponente mit ein.



Rampenfalten (*fault-bend folds*) entstehen durch das passive Verbiegen der Überschiebungsdecke beim Gleiten über die Rampe. Solche Falten sind vielleicht die einzige Art von Biegefalten, die in Gebirgsgürteln durch tektonische Kräfte entstehen.



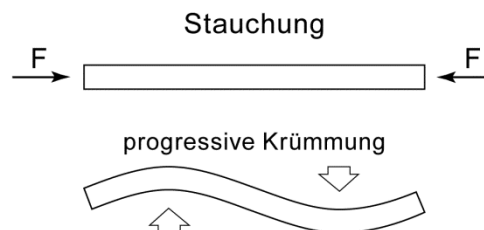
Mathematische Modellierung der Biegung funktioniert gut für kleine Falten. Bei grösseren Abschnitten der Lithosphäre werden die Berechnungen aber ungenau, infolge von nicht-elastischem Verhalten.

Biegung auf der Mesoskala

Drape folds und erzwungene Falten können um lokale Objekte im Aufschluss auftreten.

Stauchung = Buckling

Die Stauchung ist ein weithin bekannter aktiver Mechanismus für die Entwicklung von gerundeten Falten in einer kompetenten Schicht (d.h. eine Schicht mit langsamem duktilem Fließen) eingeschlossen in einem inkompetenten (mit schnellerem duktilem Fließen) Material, wenn der Viskositätskontrast ausreichend ist. Als Beispiel kann man ein Blatt Papier auf den Tisch legen und vorsichtig die beiden Seiten aufeinander zuschieben. Bei geringer Kraft bleibt das Blatt flach. Bei zunehmender Kraft wird es sich plötzlich verbiegen. Dieser schnelle Übergang von einer flachen zu einer gebogenen (*buckled*) Form, bei einer bestimmten Krafteinwirkung, wird verursacht durch die Entstehung einer **mechanischen Instabilität**.

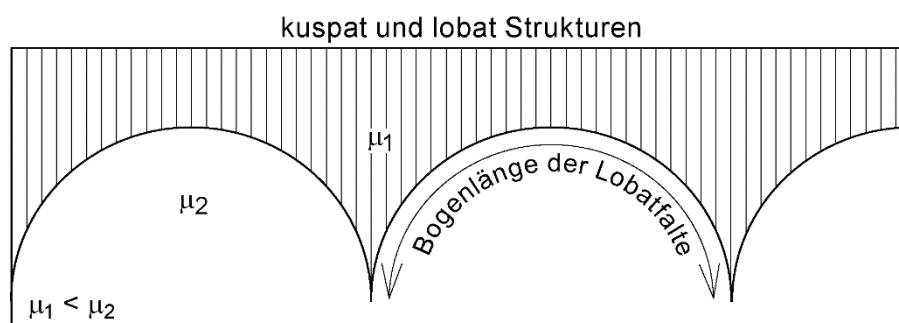


Ähnliches gilt für Gesteine; das geologische *Buckling* ist verbunden mit der **Biegeinstabilität** (*flexural instability*) einer einzelnen steifen Grenzfläche, Lage oder eines Lagenbaus unter seitlicher, d.h. lagenparalleler Kompression. Ein Kompetenzkontrast zwischen den verkürzten Lagen führt zu **mechanischer Anisotropie** (*mechanical anisotropy*), die wesentlich für die Entwicklung der **Stauchfalten** (*buckle folds*) ist. Die feste Schicht wird gefaltet, während die schwächere Matrix die Lücken füllt. Solche Bedingungen sind übliche geologische Situationen und erklären folglich, warum Stauchfalten in der Erdkruste sehr häufig auftreten. Natürliche Stauchungssysteme können in vier Gruppen unterteilt werden, nämlich Falten die gebildet werden an: (i) einer einzelnen Grenzfläche; (ii) zwei Grenzflächen, die eine einzelne Schicht in einer Matrix definieren; (iii) mehreren Schichten; und (iv) einem Mineralgefüge wie eine frühere Schieferung.

Stauchung einer Grenzfläche

Die Stauchung einer Grenzfläche tritt in vielen Massstäben auf, von regional wie die Diskordanz zwischen der mesozoischen Abdeckung und dem älteren Grundgebirge in den Alpen, bis zu den kleinräumigen Beispielen, die in Aufschlüssen wahrnehmbar sind. In Experimenten mit zwei-lagigen

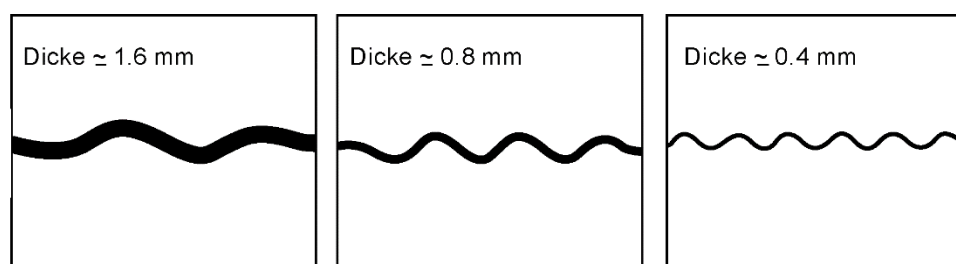
analogen Modellen die verkürzt wurden, beginnt die Stauchung der Grenzfläche mit symmetrischen sinusförmigen Biegungen. Wenn sich die Verbiegung verstärkt, ändern diese ihre Geometrie in wechselnde **kuspate** (*cusps*, ein Punkt wo zwei Bögen sich schneiden) und **lobate** (*lobes*, runde Bögen) Formen. **Kuspat-und-Lobat Falten** (*cuspsate-lobate folds*) sind für Grenzflächen zwischen Materialien mit starkem Viskositätskontrast charakteristisch. Die Spitzen zeigen immer in das stärkere der zwei Materialien. Somit ist es möglich, am Aufschluss mit Kuspat-und-Lobat Falten auf den ersten Blick zu bestimmen, welche Lage zur Zeit der Faltung die steifere war. Analytische Lösungen zeigen an, dass sich solche Falten bei der kinematischen Amplifizierung von sinusförmigen Falten, die einer Verkürzung grösser als ungefähr 10% unterliegen, entwickeln können.



Analytische Arbeiten haben auch gezeigt, dass die Faltung einer Grenzfläche zwischen zwei linearen viskosen Materialien keine mechanische Instabilität ist; mechanische Instabilitäten entwickeln sich nur in Materialien mit einem Viskositätspotenzgesetz. Jedoch wird das Wachstum der Kuspat-und-Lobat Falten in den Materialien mit nicht linearer Viskosität erhöht.

Stauchung einer einzelnen Schicht

Gefaltete einzelne Schichten kommen in der Natur häufig vor, z.B. ein lokalisierter Sandstein oder ein Kalksteinbett in einer mächtigen Schiefer-ton- oder Mergelfolge oder ein Eruptivgang der in eine ungeschichtete Matrix eingedrungen ist. Dabei wird die Dicke der gefalteten Lage beibehalten. Dadurch entstehen parallele, konzentrische Falten. Experimentelle Stauchfalten sind gewöhnlich symmetrisch.



experimentelle Verbiegung einer einzelnen Lage
Gummi Streifen in Gelatine abgezeichnet von Photographien aus
Currie et al. (1962) *Geol. Soc. Am. Bull.* **73**(6), 655-674

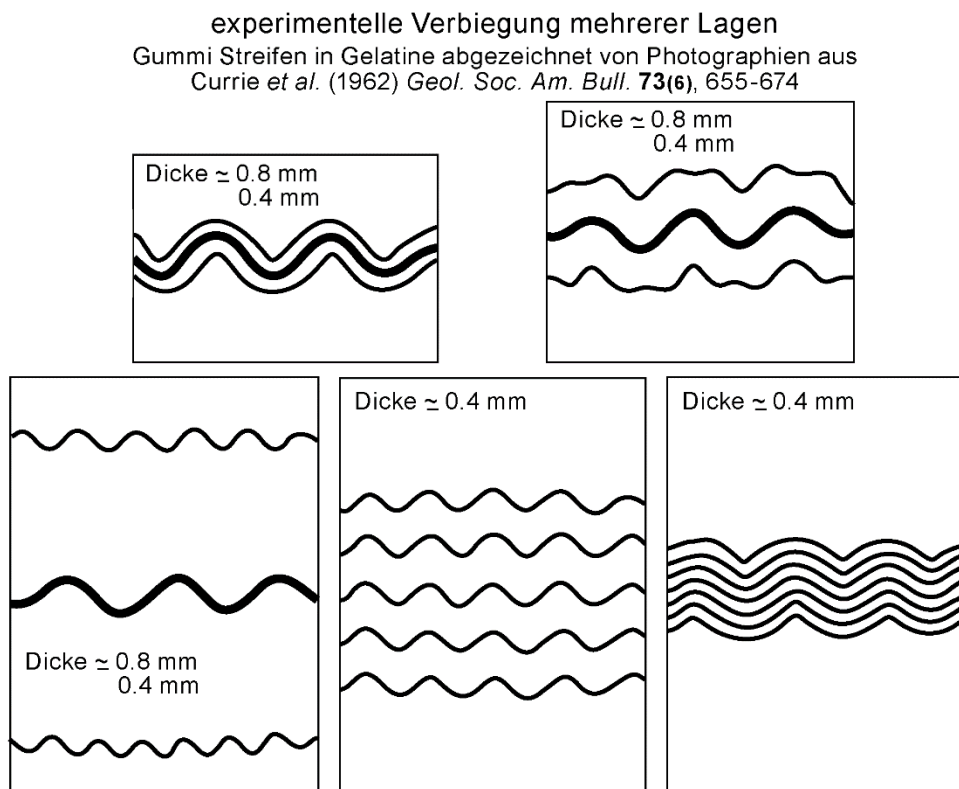
Stauchung im Lagenbau - Mehrschichtigkeit

Ein Lagenbau besteht aus einer Reihenfolge von unterschiedlichen Schichten, was die übliche Situation in der Geologie ist: eine sedimentäre Abfolge ist häufig eine mehr oder weniger regelmässige Wechsellagerung von zwei oder drei Gesteinsarten (z.B. Sandsteine und Schiefer-ton in Turbiditen). Die alternierenden Lagen haben variable Dicke und/oder Kompetenz. Theoretische und experimentelle Studien zeigen, dass das Verhalten eines Lagenbaus von vielen Faktoren abhängig ist, z.B. Anzahl und Dicke der kompetenten Lagen, Abstände zwischen den kompetenten Lagen, Kompetenzkontrast zwischen den Lagen und die Kompetenz des Umgebungsmaterials.

Einfluss der Abstände

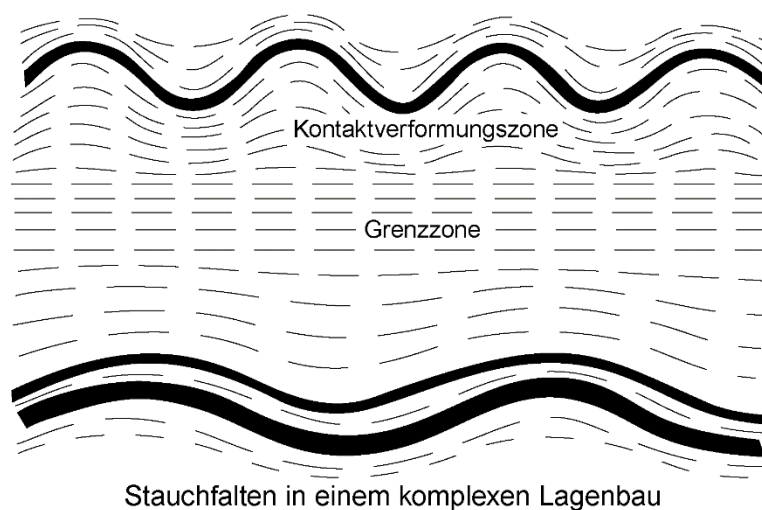
In Abfolgen, die aus Lagen verschiedener Dicke und Kompetenz (Viskosität) bestehen, sind zwei verschiedene Arten von Stauchung möglich, je nachdem wie gross die Abstände sind.

- 1) Wenn die Abstände gross sind (d.h. grösser als die dominante Wellenlänge W_d der einzelnen verfalteten Lage, die weiter unten in diesem Vortrag definiert ist), verhält sich der Lagenbau mechanisch als eine Reihe einzelner Schichten. Jede kompetente Lage neigt dazu, sich mehr oder weniger als unabhängige Einheit zu verbiegen. Die Wellenlänge der Falten ist ungefähr so gross, wie die einer einzelnen verfalteten Lage. Darum haben dickere Lagen eine grössere Wellenlänge als die dünneren Lagen. Dies ergibt "disharmonische Falten". Bei komplexem Lagenbau können durch solche Prozesse Falten mit kleineren Wellenlängen und Amplituden (**parasitäre Falten: parasitic folds**) und mit verschiedenen Wachstumsraten entstehen.
- 2) Bei geringem Abstand ($\leq 1/W_d$) können sich die kompetenten Lagen gegenseitig beeinflussen. Oft überprägt die grosse Wellenlänge der kompetenten (oder dickeren) Lagen die kleinere Wellenlänge der inkompetenten (und/oder dünneren) Lagen. Der Lagenbau verhält sich mechanisch als eine einzelne Schicht, d.h. alle Schichten passen sich an die gleiche Wellenlänge und Amplitude an, die in der Regel durch die stärkste und dickste Schicht auferlegt wird. Es kommt zu mechanischen Wechselwirkungen zwischen den kompetenten und inkompetenten Lagen. Die Faltung wird "harmonisch". Auch wenn die kompetenten Lagen so nahe beieinander liegen, dass der Lagenbau wie eine einzelne anisotrope Lage reagiert, wird der Lagenbau mit kleinerem Wellenlänge/Dicke-Verhältnis verfaltet als eine isotrope einzelne Lage gleicher Mächtigkeit.



Bei einem komplexen Lagenbau treten Falten mit unterschiedlichen Wellenlängen auf welche mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten wachsen. Die Falten können sich überlagern, häufig wird dabei eine grössere Wellenlänge über eine kleinere Wellenlänge gelagert, da sich die inkompetenten Lagen an die Formänderungen welche durch die Stauchung der starken Lagen vorgeschrieben werden, anpassen. Durch solche Überschneidungen können sich Falten verschiedener Ordnungen entwickeln. Die unterschiedlichen Arten des Stauchungsverhaltens werden erklärt unter Berücksichtigung der Verformung in der Matrix um eine einzelne, kompetente Schicht, wenn diese sich verbiegt. Die

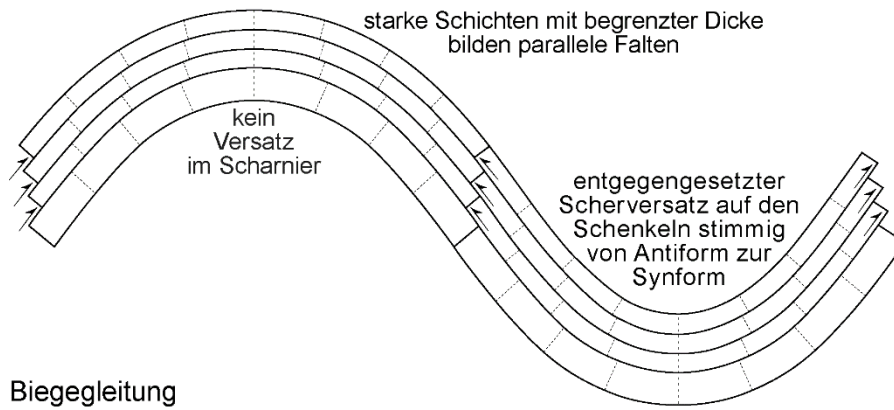
Matrix verlagert sich durch die sich entwickelnde Falte. Von der gefalteten Lage weg nimmt dieser Versatz kontinuierlich ab und wird vernachlässigbar bei einer Distanz die ungefähr der dominanten Wellenlänge entspricht. Dort zeigt die Matrix eine homogene Plättung infolge der allgemeinen Verkürzung. Die Zone der heterogenen Störung (oder Faltungsverformung) auf jeder Seite der gestauchten Schicht ist als **Kontaktverformungszone** bekannt (*zone of contact strain*). Wenn die kompetenten Schichten weit genug getrennt sind, gibt es keine Überlappung ihrer Kontaktverformungszone und jede Schicht kann sich als einzelne Schicht verformen. Wenn jedoch die Kontaktverformungszone der angrenzenden kompetenten Schichten überlappen, können sich die Schichten nicht mehr voneinander unabhängig verformen. Die Kontaktverformungszone und die mit ihnen in Verbindung stehende Kontaktstresszonen von angrenzenden Schichten müssen kompatibel miteinander sein. Daraus folgt, dass alle Schichten unter dem gleichen Spannungsfeld stehen und dieselbe Wellenlänge entwickeln.



Um feststellen zu können, wie nahe die kompetenten Schichten beieinanderliegen müssen, damit sich der Lagerbau harmonisch verformt (*multilayer buckling*), im Gegensatz zu disharmonischer Verformung einzelner Schichten (*single layer buckling*), ist es notwendig zu wissen, wie weit die Kontaktverformungszone von den Schichten in die Matrix reichen. Für eine viskose Matrix wird angenommen, dass die Störung in der Kontaktverformungszone beiderseits der kompetenten Schicht im Abstand von ungefähr einer Wellenlänge bis auf ungefähr 1% ihres Maximalwerts verkleinert ist.

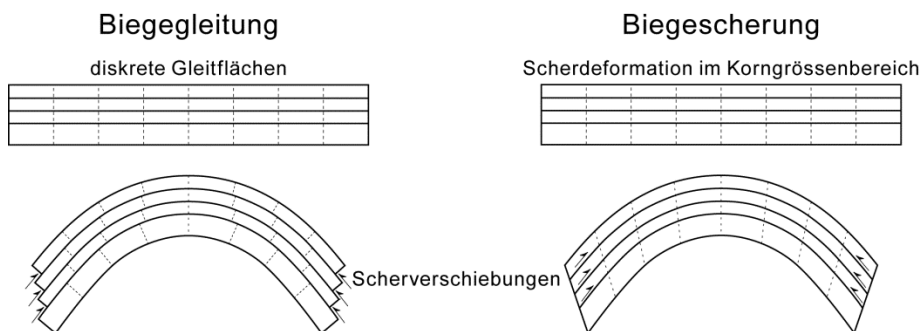
Einfluss der Diskontinuitätsflächen: Biegegleitung und Biegescherung

Ein Lagerbau kann ein Stapel von kompetenten Lagen sein, die durch Diskontinuitätsflächen oder durch wechselnde Lagen mit starken Kompetenzkontrasten getrennt sind. Die Diskontinuitätsfläche erlaubt den kompetenten Lagen, aneinander vorbeizugleiten. Die mechanische Konsequenz ist, dass sich kompetente Schichten auf beiden Seiten der Diskontinuitätsfläche oder schwachen Schicht in Bezug auf einander leicht verschieben können. Diese „Scherungsentkopplung“ der Schichten ermöglicht der Falte eine grössere Biegung aufzunehmen, als wenn der Stapel als einzelne Schicht verformt wird.



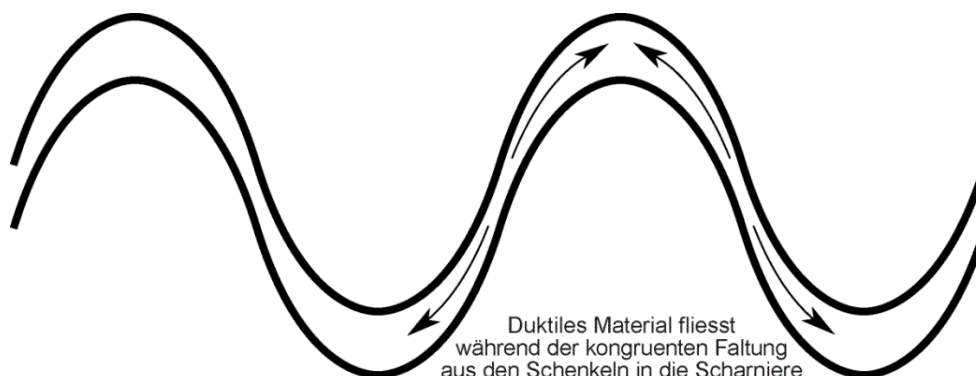
Biegegleitung (*flexural slip*) beschreibt lagenparallele Gleitung entlang einer normalerweise diskreten Verwerfungsfläche, während der Faltung. Eine klassische Simulation ist das Verbiegen von einem Buch oder einem Stapel Papierblätter; die zunehmende Verbiegung um die Faltenachse wird durch die Gleitbewegungen zwischen den Seiten des Buches oder den Blättern des Stapels aufgenommen. Die Dicke der einzelnen Blätter nicht ändert, d.h. jedes Blatt ist eine **parallele** Falte (die Schichtgrenzen bleiben parallel). Die Gleitung ist deshalb ein wichtiger Teil der Faltung, weil sich die schichtparallelen Spannungen mit zunehmender Rotation der Schenkel erhöhen. Wenn die Scherspannung den Scherwiderstand der schwachen Schichten oder Schichtgrenzen übersteigt, gleiten die starken Schichten in den Schenkeln übereinander zur Achse hin und normalerweise senkrecht zum Faltenscharnier, welches von Schicht zu Schicht örtlich festgelegt ist. Deswegen sind Gleitstriemen und faserartiges Mineralwachstum oder anderen Bewegungsindikatoren, die Überschiebung auf Schichtflächen innerhalb der Schenkel darstellen, gute Indikatoren für Biegegleitung. Der Versatz ist an den Wendepunkten der Schenkel am grössten, und verringert sich auf null am Faltenscharnier. Der Verschiebungsbetrag erhöht sich, während die Falten enger werden, und hängt auch vom Abstand der Gleitflächen ab. Beachten Sie, dass die Gleitbewegung zum Scharnier hin eine entgegengesetzte Bewegungsrichtung von einem Schenkel zum anderen nach sich zieht, und somit die Konsistenz von Antiklinale zu Synklinale bewahrt wird.

Strukturelle Veränderungen umfassen Rampen, die verschiedene schichtparallele Verwerfungen verbinden und Duplexe zwischen schichtparallelen Dach- und Sohlüberschiebungen. Die Temperatur- und Druckbedingungen für die Biegegleitung sind im Allgemeinen niedrig.



Biegescherung (*flexural flow*) beschreibt schichtparallele Scherung in Form von verteilter, duktiler, ideal einfacher Scherung innerhalb der ganzen gefalteten, duktilen Schicht zwischen steiferen Schichten. Wie für die Biegegleitung ist die lagenparallele Gleitung in den Schenkeln entgegengesetzt über die Achsenebene. Um die Kongruenz von Lage zu Lage beizubehalten, muss das Material der weichen Schichten aus den Schenkeln heraus und in die Scharniere verschoben werden. Dabei entwickeln sich verdickte Scharniere zwischen verdünnten Schenkeln. Biegescherfalten sind infolgedessen meistens **kongruente** Falten. Biegescherung kann auf schwache Schichten zutreffen, die die schichtparallele Scherung innerhalb grösserer paralleler Falten

aufnehmen, gewöhnlich in niedrigmetamorphen Gesteinen. In diesem Fall neigen die festen, aktiven Schichten dazu, ihre Dicke während der ganzen Verformung zu behalten und die Form von konzentrischen und/oder parallelen Falten zu kontrollieren. Hingegen neigen die inkompetenten Schichten dazu, die Biegescherung durchzumachen.

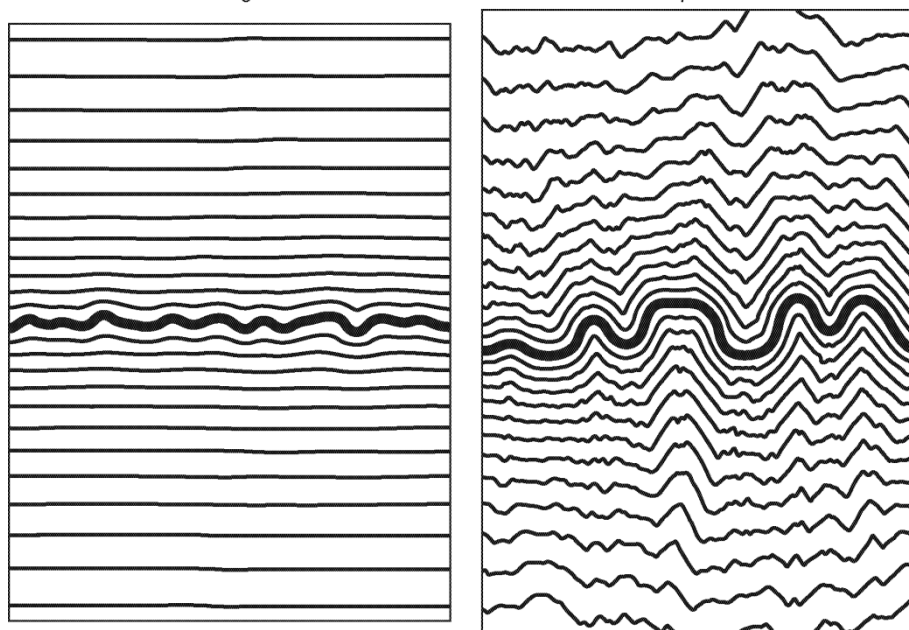


Natürliche Beispiele solcher kongruenten Falten zeigen eine intensive Foliation in den Faltschenkeln, die in Richtung zur Scharnierzone hin aussterben. Die Intensität der Scherverformung hängt von der Faltenform und der Position innerhalb der Falte ab, wobei die Scherverformung gleich dem Einfallen des Schenkels (in Radiant) ist.

Einfluss der Anisotropie

Eine schichtparallele Anisotropie ist eine intrinsische Eigenschaft des Lagenbaues. Theoretische und experimentelle Arbeiten über homogenen, anisotropen Lagenbau zeigen, dass es eine Reihe von Faltenformen gibt, die sich unter Anisotropie-paralleler Kompression bilden können. Die Art der Falte wird durch die mechanische Anisotropie festgelegt. Symmetrische, sinusförmige Falten in einem Lagenbau mit einer schwachen Anisotropie gehen in Falten mit leicht auseinanderlaufenden Achsenebenen und schlussendlich zu Kofferfalten in einen Lagenbau mit einer hohen Anisotropie über. In einer anisotropen Matrix breiten sich Faltenformen weg von der gefalteten Schicht viel weiter aus als in einer isotropen Matrix.

Verkürzung = 40% und Viskositätkontrast = 50 in beiden Experimenten



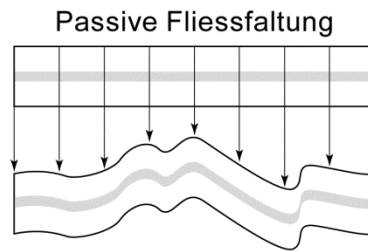
Lineare isotrope viskose Matrix

Anisotrope viskose Matrix

Numerische Modelle zeigen den Effekt der Matrixanisotropie während der Faltung einer Newton'schen Schicht
nach Kocher *et al.* (2006) *Tectonophysics* **421**(1-2), 71-87

Fliessfaltung

Fliessfaltung (*flow folding*) entspricht der Bildung von passiven Falten durch heterogene Scherung oder durch Fließen der mechanisch isotropen Gesteine in eine schräge Richtung oder normal zu planaren Markern.

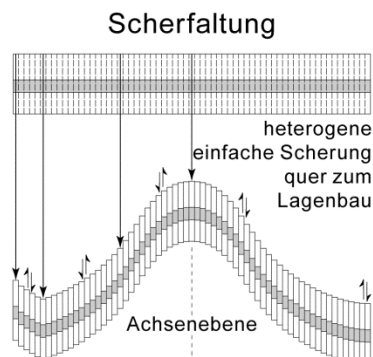


Beispiele sind Falten, die durch Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit während der Platznahme von magmatischen Körpern mit magmatischen Gefügen gebildet werden. Fliessfaltung kommt auch in Lavaflüssen und in langsam fließendem Salz, Gletschern und wassergesättigten unverfestigten Sedimenten. In metamorphen Gesteinen werden geringe Viskositätskontraste zwischen den Lagen unter hochgradigen Bedingungen begünstigt. Theoretisch können die Fliessfalten durch heterogene einfache und reine Scherung entstehen ohne anfängliche Unebenheiten auf Schichten. Die stark inkompetenten Schichtungen dienen nur als passiver Verformungsmarker in einer gleich-viskosen Matrix. Nur solche verzogene passive Markerflächen decken das Fließmuster im gleichmässig duktilen Gestein. Wo Fließlinien divergieren oder konvergieren nimmt die Schichtdicke, in Fließrichtung gemessen, zu oder ab. Diese Zu-/Abnahme ist umgekehrt proportional zum Abstand zwischen den Fließlinien. Zeitgleiche Wiederfaltung ist ein häufiger Bestandteil des viskosen und instationären Fließens. Ein klassischer Vergleich ist die Bewegung von Ölschaum auf Wasser.

Achtung: Fliessfalten bilden sich nicht durch eine Bewegung entlang der Schieferung, welche die Verformung im Kornmasstab während der Faltung aufnimmt, und somit das Einsetzen der Faltung erlaubt. Die Schieferung ist keine Bewegungsfläche.

Scherfaltung

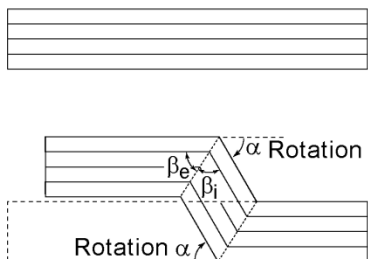
Differentiales Gleiten auf dicht aufeinanderfolgenden Ebenen oder einfache Scherung in dicht aufeinanderfolgenden Scherzonen parallel zur Achsenebene und schräg zur gefalteten Schicht, führt zu idealen kongruenten Falten. Man nennt diesen passiven Mechanismus **Scher-** (*shear*) oder **Gleitfaltung** (*slip folding*).



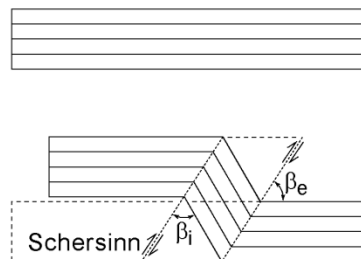
Knickung – Knickfaltung: Effekt einer mechanischen Anisotropie

Knickfalten haben gerade Schenkel zwischen scharfen bis rundlichen Scharnieren. Die Achsenebenen bilden die **Knickbandränder** (*kink band boundaries*). Die kurzen Schenkel definieren die **Knickbänder** (*kink bands*). Knickbänder treten in sehr anisotropen Gesteinen auf, in welchen die Anisotropie entweder in Schichten mit einer begrenzten Mächtigkeit oder Schieferung mit sehr dünnen Lagen besteht. Ihre spezielle Geometrie wird gesteuert durch die Rotation um einen Winkel α eines Stapels dünner Schichten (Knicklamellen). Ideal bezieht die Knickfalte keine interne Verformung in den Schichten mit ein, nur die Rotation um die Knickscharniere. Auf den Schenkeln findet Biegegleitung statt, um die Kontinuität der Lagen über die Knickbandränder hinaus zu gewährleisten.

Knickung durch Körperrotation



Knickung durch Scherung

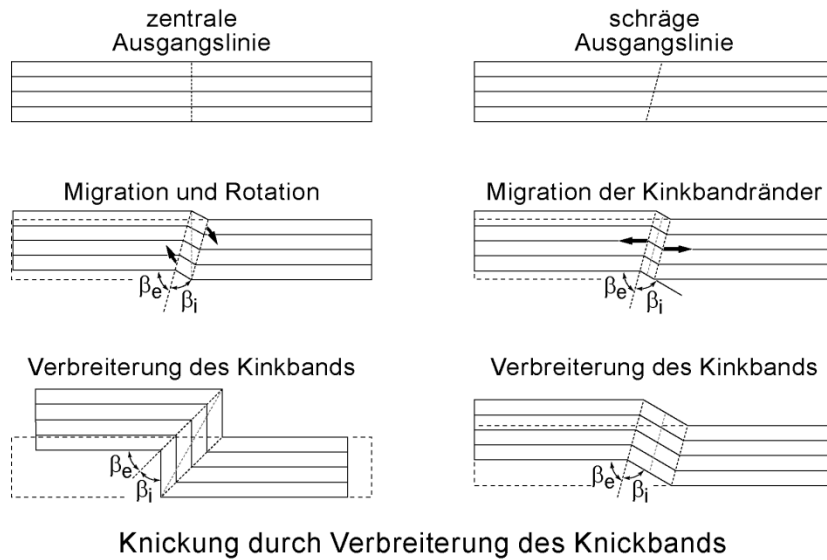


Die Bildung von Knickbändern wird durch theoretische Analyse viskoser Verformung von Materialien mit stark planarer Anisotropie vorausgesagt. Die Modelle unterscheiden sich in der Art, wie ein Knick wächst und in der Geometrie der Deformation. Die Geometrie wird beschrieben durch zwei Winkel: β_i zwischen der Knickebene (= Achsenebene) und den Lagen innerhalb des Knickbandes und β_e zwischen der Knickebene und Lagen außerhalb der Knickbänder. Knickbänder können sich durch zwei Mechanismen bilden:

- Modell 1 durch die **Verbreiterung der Knickbänder** (*kink-band boundary migration*) (auch bezeichnet als mobiles Scharnier).
- Modell 2 **Knickung durch Scherung** (*kink band shear zones*) (auch bezeichnet als örtlich fixiertes Scharnier).

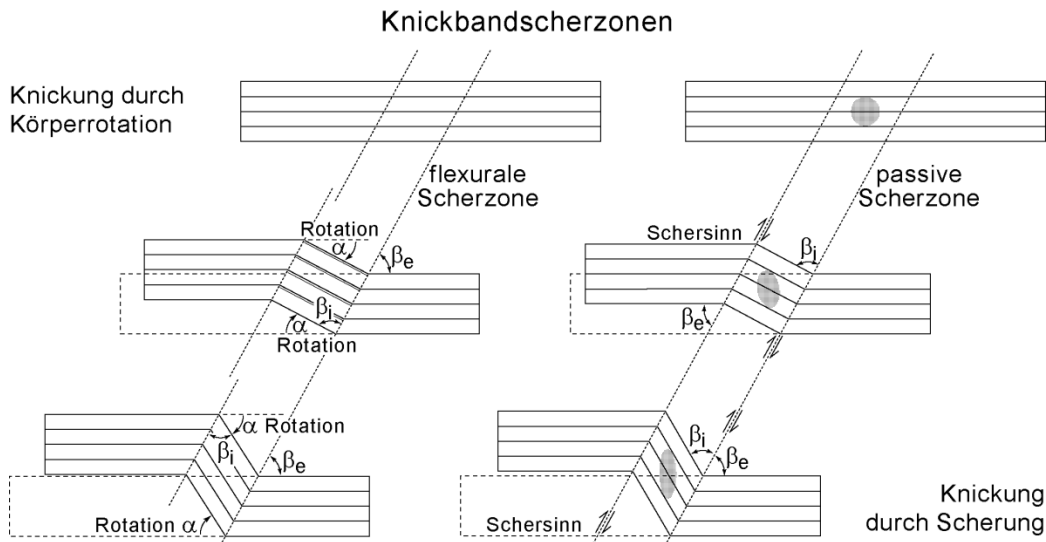
Verbreiterung der Knickbänder

Modell 1 besagt, dass beide Knickbandgrenzen von einer zentralen Ausgangslinie in undeformiertes Material hinein wandern, was zur Verbreiterung der Knickbänder führt. In diesen Modellen sind die Winkel β_i innerhalb und β_e ausserhalb des Knickbandes während der Verbreiterung des Knickbands immer gleich gross und es öffnen sich Spalten zwischen den Lamellen. Dann wird die Scherzone wieder enger bis weiteres Knicken unmöglich wird.

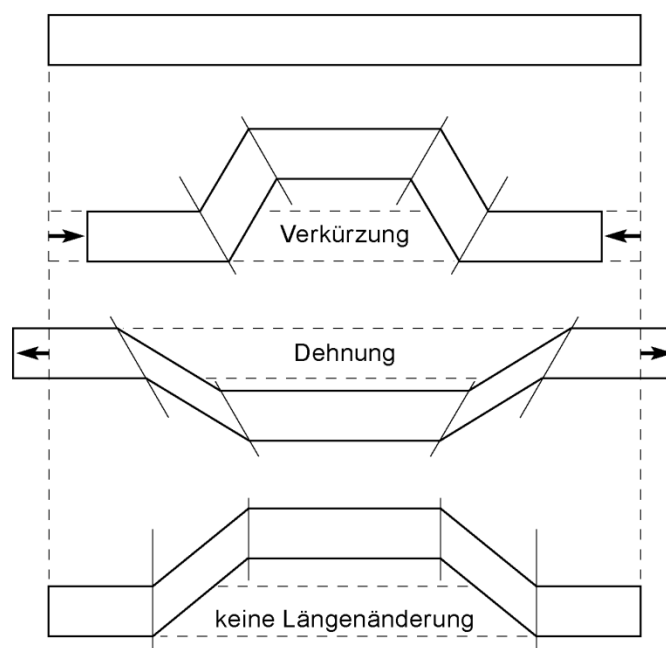


Knickbandscherzonen

Das Modell 2 besagt, dass die beiden Knickbandgrenzen die fixen Grenzen einer Scherzone am Anfang der Knickbandentwicklung sind. In diesem Fall behält das geknickte Segment eine konstante Länge während der Scherungsverursachenden Rotation bei.



Wenn $\beta_i > \beta_e$ findet Ausdehnung der Lagen innerhalb des Knickbandes statt. Wenn die Rotation weiter geht als $\beta_i = \beta_e$ müssen die Lagen verdünnt werden, was blockierend wirken kann. Daher müssen die Knicklamellen deformierbar sein. Anfänglich werden sie kürzer und dicker, dann länger und dünner.



Drei Arten der Beziehung zwischen konjugierten Knickungen und der allgemeinen Verformung

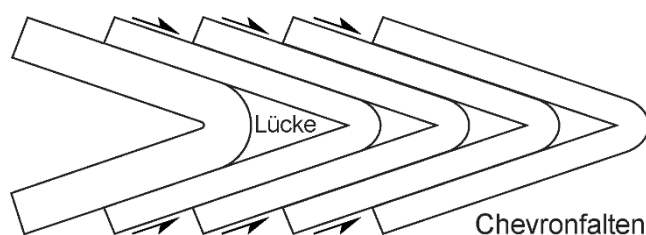
Experimente zeigen, dass sich Knickbänder immer in konjugierten Sets bilden, die entgegengesetzte Asymmetrie haben, wenn die grösste Hauptspannung (sub-)parallel zu einer bereits bestehenden planaren Anisotropie ist. Sie entwickeln sich allerdings nicht entlang von Ebenen mit hoher Scherverformung, was anzeigt, dass Knickbänder keine richtigen Scherzonen sind. Jedoch in Analogie zu Verwerfungen definiert der Versatz des oberen Langschenkels der Knickfalte in Bezug auf den unteren drei Arten von Knickbändern:

- normale Knickbänder, in denen eine Volumenabnahme im Knickband stattfindet.
- reverse Knickbänder, in denen eine Volumenzunahme im Knickband stattfindet.
- neutrale Knickbänder in denen keine Volumenänderung stattfindet.

Je nach Orientierung zur Deformation unterscheidet man **kontraktionale Knickbänder** (*synthetic, reversed, negative*) und **extensionale Knickbänder** (*antithetic, normal, positive* oder *shear band*).

Chevronfalten

Chevronfalten ähneln Knickbändern. Ihre Schenkel sind planar und sie treten in regelmässig geschichteten Lagenbauten auf, aber der Scharnierbereich ist nicht eckig. Die erforderliche Verformung (Rotation) wird während der Faltung auf das Scharnier beschränkt, was bedeutet, dass einzelne Schichten der Schenkel keine interne Verformung erleiden. Da das kleine Scharnier sich zwischen den planaren Schenkeln verengt, kommt es zu Platzproblemen, wobei sich Hohlräume zwischen kompetenten Schichten öffnen. Die schwachen Zwischenlagen fließen in die Hohlräume und füllen diese auf.



Faltungsdynamik: die Entstehung von Stauchfalten

Viele Arbeiten haben theoretisch und experimentell aufgezeigt, dass die lagenparallele Verkürzung einer kompetenten (d.h. steifen) dünnen Lage in einem weniger kompetenten Umgebungsmaterial ein instabiler Prozess ist, weil geometrische, anfängliche Unregelmässigkeiten auf der steifen Schicht

verstärkt werden und **Stauchung** (*buckling*) der steifen Lage ausgelöst wird, während das gesamte System (d.h. die Schicht zusammen mit der umgebenden Matrix) durch reine Scherung verformt wird.

Die früheren Studien konzentrierten sich auf die Analyse der Stauchung. Sie behandelten es als ein elastisches Problem, d.h. für alle Lagen wird ein elastisches Verhalten angenommen. Die Annahme einer linearen Beziehung zwischen der Spannung und der Verformung, oder zwischen Spannung und Verformungsrate, ist eine Vereinfachung, um das Problem überhaupt abhandeln zu können. Letzten Endes führt der Gebrauch von linearen Beziehungen zu Differentialgleichungen, die in ihrer Handhabung schwierig genug sind. Der Gebrauch von nicht linearen Beziehungen zwischen Spannung und Verformungsrate führt normalerweise zu mathematisch unlösbaren Problemen. Im Folgenden werden drei Annahmen gemacht:

- Erstens, dass die Falten so klein sind, dass die Gravitationskraft kein wichtiger Faktor bei ihrer Entstehung war.
- Zweitens, dass die Kompression anfänglich parallel zur Schicht war.
- Und drittens, dass die Verformung nur eine ebene Verformung war.

Steuerung der Faltenwellenlänge

Man betrachtet, dass eine einzelne viskose Lage innerhalb einer Matrix mit geringerer Viskosität viel dünner als die Faltenwellenlänge ist (die sogenannte Dünnbalkentheorie). Die Stauchung produziert ein Faltenystem mit symmetrischer, periodischer, sinusförmiger Geometrie. Die Analyse untersucht die Keimung, d.h. den Beginn der Faltenbildung mit sehr kleinen Amplituden, die aus infinitesimaler Deformation entstehen.

Theorie

Die mathematische Abhandlung geht davon aus, dass sich eine seitlich komprimierte, perfekte Schicht während der Verkürzung ohne Verfaltung verdickt. Eine kleine Imperfektion ist nötig, um die Stauchfaltung zu verursachen. Diese Anfangsimperfektion kann schon vor der Kompression in der Schicht vorhanden sein, oder es kann eine lokale **Instabilität** (*instability*) sein, die sich während der Kompression entwickelt. Technisch wird es mit einer oder einigen überlagerten, sinusförmigen Funktionen geringer Amplitude simuliert, die die Schichtgrenzen beschreiben. In der Theorie wird angenommen, dass das Umgebungsmaterial der Aufwölbung senkrecht zur Lage entgegenwirkt. Die stabilste Form ist dann diejenige, welche durch die kleinste schichtparallele Spannung (d.h. bei geringster elastischer Verformungsenergie) in der Schicht und im umgebenden Material spontan entsteht. Eigentlich könnten alle primären Unregelmässigkeiten zu wachsen beginnen, aber nur ein sinusförmiger, regelmässiger Faltenzug mit einer bestimmten Wellenlänge wächst vorzugsweise, während die Deformation fortfährt. Diese ausgewählte und amplifizierte Wellenlänge ist die **dominante Wellenlänge** (*dominant wavelength*).

Dominante Wellenlänge

Zwei Schlüsselfaktoren kontrollieren die dominante Wellenlänge:

- die Schichtdicke;
- der Viskositätskontrast (allgemeiner: Festigkeitskontrast) zwischen der Schicht und der Matrix, die beide als Newton'sche viskose Materialien behandelt werden.

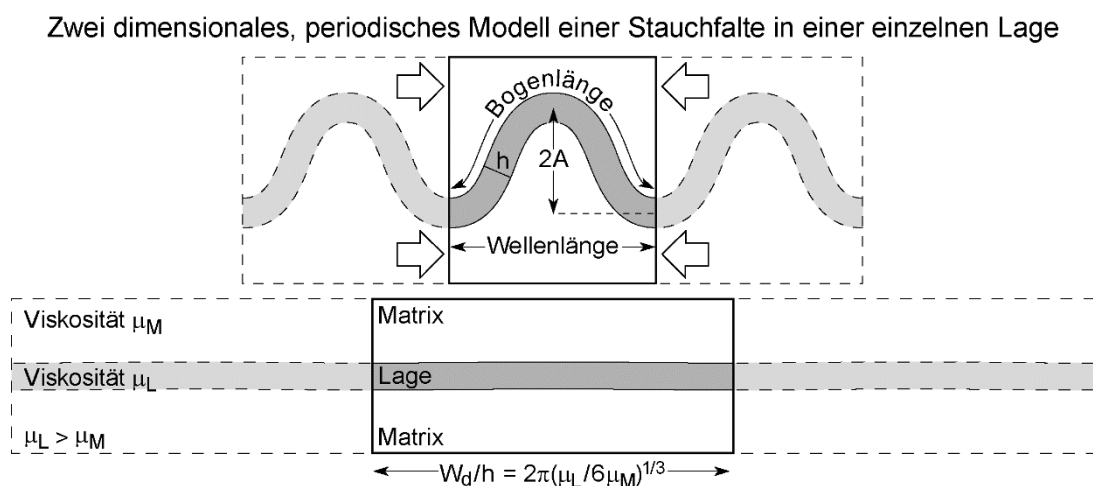
Für mathematische Modelle wird das Verhalten einer einzelnen kompetenten Lage untersucht mit einer Dicke h und der Viskosität μ_L , eingebettet in einer weichen Matrix unendlicher Dicke mit der Viskosität μ_M . Gegen die Entstehung einer Stauchfalte mit Anfangswellenlänge W_i wirken zusammen die Kraft F_{int} (Widerstand der kompetenten Lage) und die Kraft F_{ext} (Widerstand der Matrix):

$$F_{\text{int}} = \frac{2\pi^2 \mu_L h^3 e_x}{3W_d^2 e_x}$$

$$F_{\text{ext}} = \frac{\mu_M W_d e_x}{\pi e_x}$$

Das Modell wird mit der Verkürzungsrate $\dot{\epsilon}_x = de_x/dt$ um den Betrag e_x in x-Richtung verkürzt. Die charakteristische Wellenlänge (**Biot-Ramberg Analyse**) ist diejenige Wellenlänge mit der geringsten Gesamtkraft ($F_{\text{tot}} = F_{\text{int}} + F_{\text{ext}}$). Dann lautet die Gleichung für die dominante Anfangswellenlänge W_d (auch charakteristische Wellenlänge genannt):

$$W_d = 2\pi h (\mu_L/6\mu_M)^{1/3} \quad (1)$$



Diese relativ einfache Gleichung wurde experimentell und numerisch bestätigt und gilt nur für Falten mit kleiner Amplitude. Nach Gleichung (1) gilt:

- Die Wellenlänge ist unabhängig vom Betrag der kompressiven Spannung und von der Verformungsrate.
- die Wellenlänge ist direkt proportional zur Dicke h der kompetenten Lage; So entstehen unterschiedliche Wellenlängen in den unterschiedlichen Schichten variabler Dicke, in denen die Verkürzungsverformung konstant ist. Dicke Schichten entwickeln eine längere Wellenlänge. Variable Intensitäten der Faltenentwicklung zeigen nicht unbedingt variable Intensitäten der Deformation an.
- die Wellenlänge W_d hängt nur von der kubischen Wurzel des Viskositätsverhältnisses der kompetenten Schicht und der inkompetenten Matrix ab. Die Auswirkung des Viskositätsverhältnisses auf das Verhältnis Wellenlänge / Dicke (folglich Faltenart) kann durch Umstellung der Gleichung (1) veranschaulicht werden:

$$W_d/h = 2\pi(\mu_L/6\mu_M)^{1/3}$$

Beachten Sie, dass in dieser Gleichung das Verhältnis μ_L/μ_M nur das Viskositätsverhältnis zwischen der Lage und dem umgebenden Material ist. Wenn nun μ_L ähnlich gross wie μ_M ist, nähert sich die dominante Wellenlänge dem Wert $3.46h$.

Gleichung (1) kann umformuliert werden zu:

$$\mu_L/\mu_M = 0.024(W_d/h)^3$$

Aus dieser Gleichung wird ersichtlich, dass

- der Viskositätskontrast durch das Messen der Wellenlänge der Falten und der Mächtigkeit der Schicht abgeschätzt werden kann.

- es existiert ein Grenzwert für das Viskositätsverhältnis, unter welchem keine Stauchung mehr stattfindet. Diese Beziehung gilt nur dann genau, wenn $\mu_L/\mu_M > 10$ ist.

Übung

Rechnen Sie und zeichnen Sie die Wellenlänge der Falten bei Schichtdicken von je 1, 5 und 10 cm und mit Viskositätskontrasten von je 1, 5 und 10.

Wachstumsrate

Die **Wachstumsrate** (*growth rate*) einer Falte kennzeichnet ihre Amplifizierungsrate. Folglich ist die Frage, wie schnell sich die Scharnierpunkte orthogonal zur Richtung der allgemeinen Verkürzung während der Faltung aufwärts oder abwärts bewegen. Aus Gründen der Symmetrie haben die Autoren Segmente der halben Wellenlänge betrachtet deren Endpunkte reibungsfreie vertikale Flächen sind, entlang denen zwei aufeinanderfolgende synklinale und antiklinale Scharniere frei um den gleichen Versatzbetrag, in entgegengesetzte Richtungen gleiten (abwärts bzw. aufwärts).

Per Definition ist die dominante Wellenlänge, diejenige die mit der schnellsten Rate amplifiziert. Man kann sofort folgern, dass, wie in Gleichung (1), die Dicke h der gefalteten Schicht und ihr Viskositätskontrast mit der einbettenden Matrix Parameter der Gleichung sind, die die Amplifizierungsrate spezifizieren. Tatsächlich erhöht sich die Wachstumsrate mit erhöhtem Viskositätskontrast zwischen Schicht und Matrix. Amplifizierung ist die Summe von zwei Komponenten: das kinematische und das dynamische Wachstum

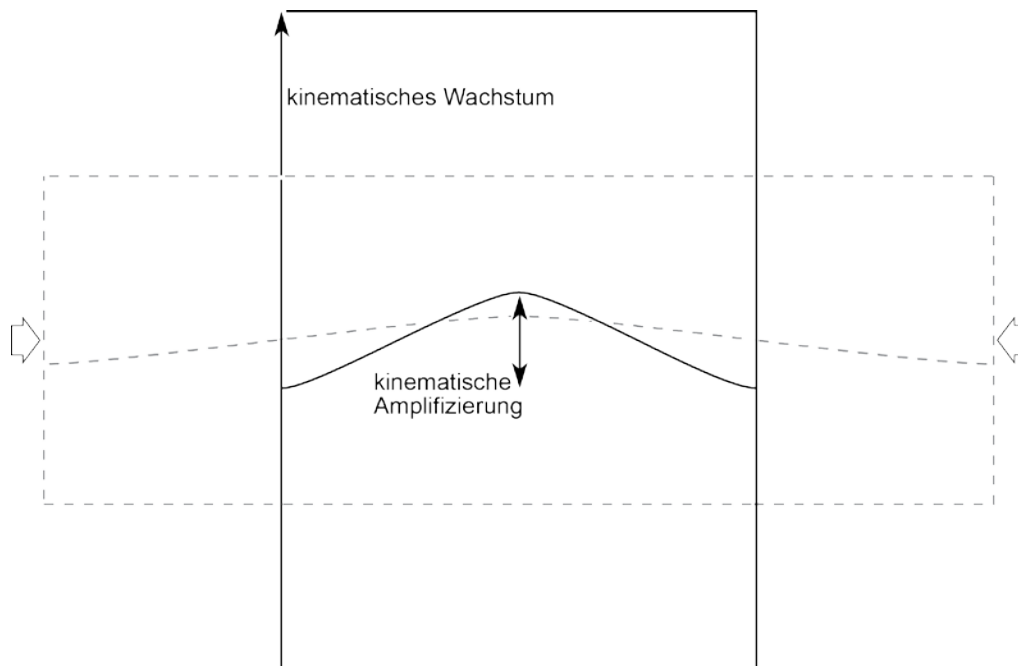
- A_k ist die **kinematische** (passive) **Wachstumsrate** infolge der Massenverdickung der Matrix. Eine sinusförmige passive Linie erwirbt eine kürzere Wellenlänge und eine höhere Amplitude während der Verkürzung, aber diese Deformation ist nicht auf eine mechanische Instabilität zurückzuführen. Passive Amplifizierung herrscht vor, wenn der rheologische Kontrast klein ist. Folglich ist die passive Amplifizierung in den hochgradig metamorphen Gesteinen und in wassergesättigten Sedimenten wichtig.

- A_d ist die **dynamische Wachstumsrate** infolge der Amplifizierung der mechanischen Anfangsinstabilität.

Die Amplitude A einer viskosen Stauchfalte hängt exponentiell mit der Zeit (T) zusammen, so dass:

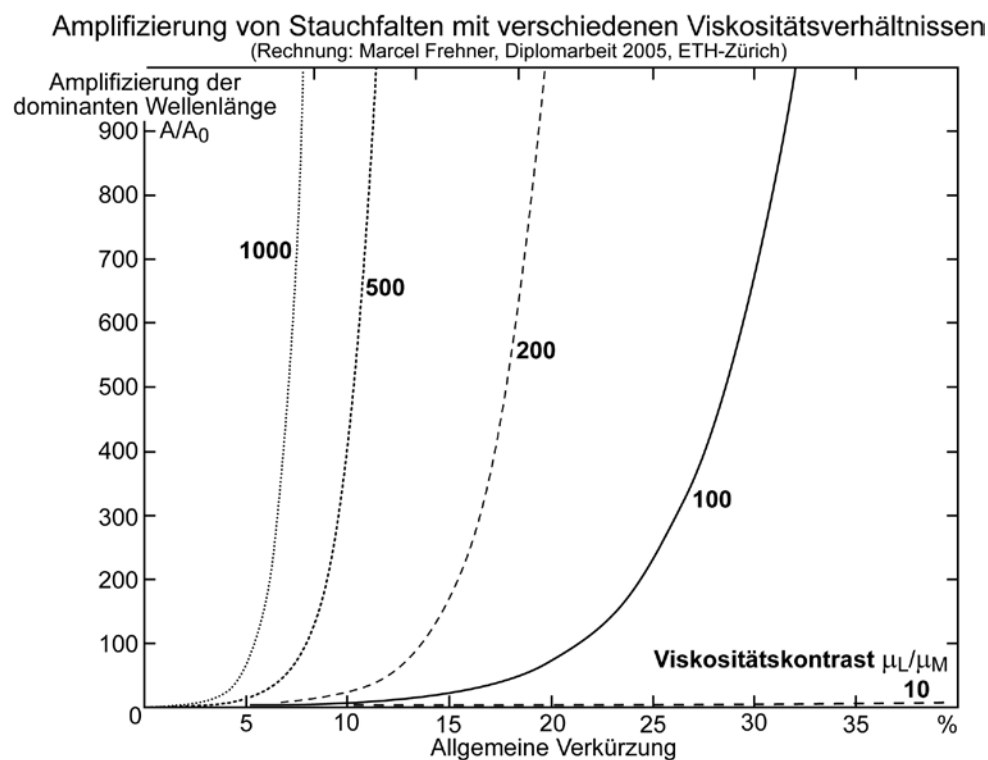
$$A = A_0 e^{P_A t}$$

A_0 ist die Amplitude der sinusförmigen Anfangsstörung. Ihre Anwesenheit in dieser Gleichung deutet an, dass die Amplitude der Ausgangsunregelmässigkeit die abschliessende Geometrie der Wellenform beeinflusst. Die endlichen (finiten) Amplituden der Falten können die ursprünglichen Schwankungen der Amplituden der vorhandenen Unregelmässigkeiten, wie z.B. **Rippelmarken**, als auch den Kompetenzkontrast und die erfolgte Verkürzung reflektieren.



Passive Amplifizierung einer passiven Linie während Verkürzung / Verdickung

P_A ist der **Amplifizierungsfaktor** (*amplification factor*), der die Amplifizierungsrate angibt. Er integriert die Summe ($A_k + A_d$) aber der Gesamtausdruck, der auch den Viskositätskontrast und die Schichtdicke mit einbezieht, ist ziemlich komplex. Wenn die Amplifizierung exponentiell ist, sollte sie einen "explosiven" Modus erreichen, wenn sich die stufenweise Amplifizierung in Bezug auf die Verkürzung für hohe Amplifizierungsfaktoren enorm erhöhen sollte. Schätzungen schlagen vor, dass dieser „explosive“ Modus auftreten sollte, wenn der Amplifizierungsfaktor der dominanten Wellenlänge ungefähr 1000 ist und wenn der Viskositätskontrast sehr gross ist. Komplizierte Ausdrücke vermeiden dieses Problem.



Ablauf der Stauchung

Ein Kompetenzkontrast zwischen den zusammenhängenden Lagen ist wesentlich für Stauchung. Die Entwicklung von Stauchfalten ist ein instabiler Vorgang und kann in vier Stufen unterteilt werden:

- 1) - Die ersten lagenparallelen Spannungen werden durch lagenparallele elastische und inelastische Verkürzung aufgenommen.
- 2) - Als Nächstes entsteht eine Stauchungsinstabilität. Eine bestimmte Wellenlänge von Störungen wird selektiv verstärkt, wobei diese Wellenlänge abhängt von den mechanischen Eigenschaften der steifen Lage.
- 3) - Dann wird die Amplitude der Stauchfalte vergrößert. Die Wachstumsrate ist abhängig vom Duktilitätskontrast zwischen der steifen und der weichen Lage (je grösser der Kontrast, umso schneller wächst die Falte).
- 4) - Das Faltenwachstum ist beendet, wenn die Schenkel stark rotiert sind und das System nur noch durch reine Scherung verformt wird.

1) Anfängliche homogene Verkürzung

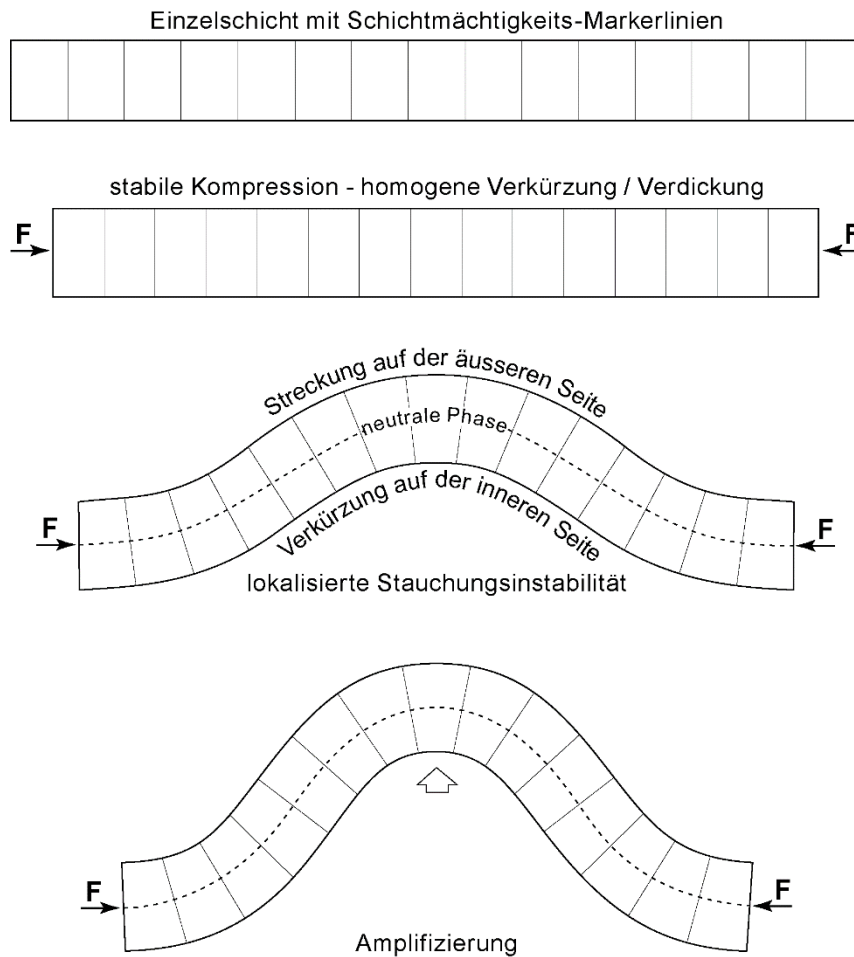
In Faltenexperimenten führen ca. die ersten 20% von lagenparalleler Verkürzung nicht zur Faltenbildung. Im Gegenteil, die einzelnen Lagen verdicken sich, im Wesentlichen um lagenparallele homogene Verkürzung auszugleichen. Der Betrag dieser homogenen, elastischen und nicht-elastischen Plättung parallel zur Schicht ist eine Funktion der Verformungsrate und der relativen mechanischen Eigenschaften der Lagen. Die Schichtmächtigkeit bleibt konstant; folglich gibt es keine Scherverformung im Inneren und parallel zur verkürzten Schicht.

2) Keimung

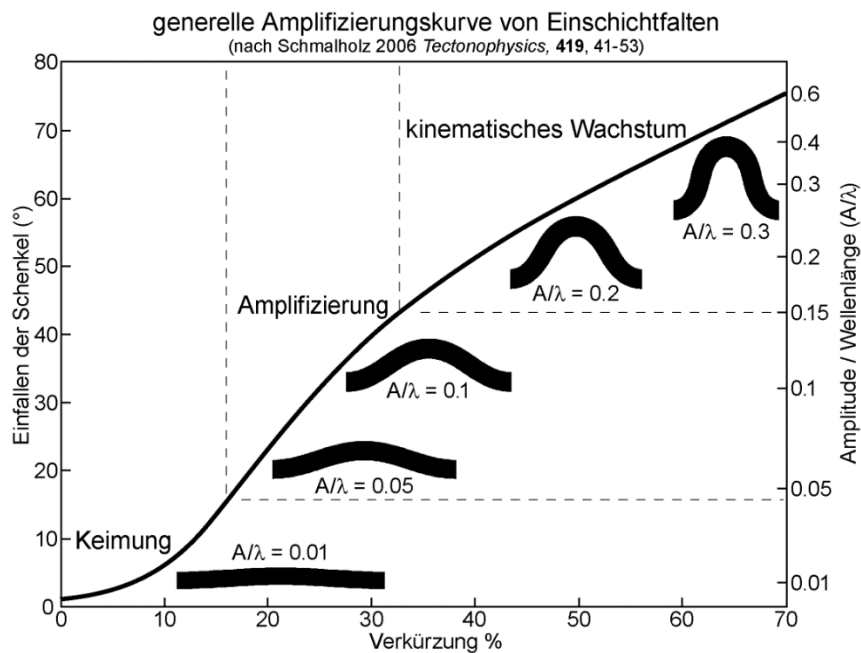
Bei einer Verkürzung um 20-30% entsteht die Falte und beginnt zu wachsen. Der Beginn der Stauchung ist schwierig und erfordert im Allgemeinen irgendeine Form von Unebenheit auf der vorverkürzten/verdickten Schicht. Die Keimung beinhaltet, dass die Schichtung rotiert und zwar an bestimmten Orten mit bereits vorhandenen (z.B. ursprüngliche Unregelmässigkeit der Schichtung) oder gebildeten (z.B. lokale Schwankung in der angelegten Grenzspannung) Heterogenitäten in der Verformung. Die Amplifizierung dieser Unebenheiten produziert die Stauchfalten; die Wellenlänge hängt von den mechanischen Eigenschaften der steifen Schichten ab.

3) Wachsen der Amplitude (Amplification)

Die Amplifizierung bezeichnet das fortschreitende vertikale Wachstum der Falte. Theoretische Studien über Faltung und das daraus resultierende Konzept der dominanten Wellenlänge sind normalerweise nur für das erste Inkrement (d.h. Keimung) der Stauchung gültig, wo die Faltenamplitude so klein ist, dass sie praktisch nicht sichtbar ist. Sobald die Faltung eingeleitet worden ist, kann die Verkürzung durch Rotation der Schenkel fortfahren. Die Stauchfaltung wird nach und nach einfacher, und es gibt eine schnelle Zunahme im Einfallen der Schenkel, im Vergleich zur allgemeinen Verkürzungsrate. Die Stauchfaltung ist in diesem Stadium ein strukturelles Enthärtungsverfahren, d.h. der Schichtwiderstand mit zunehmender Verkürzung (Amplifizierung) nimmt ab, während die Materialeigenschaften konstant bleiben. Die Stauchfaltung ist folglich ein Erweichungsprozess. Die Stauchfalte wird sich amplifizieren mit einer Rate, die vom Duktilitätskontrast zwischen den steifen und weichen Schichten abhängt (je grösser der Kontrast, desto schneller erfolgt die Amplifizierung). Ein Fallwinkel von 15° für die Schenkel ist etwa die Grenze für die Amplitude, wo der dominante Wellenlängen-Typ der in (1) ausgedrückten Analyse unwirksam wird.

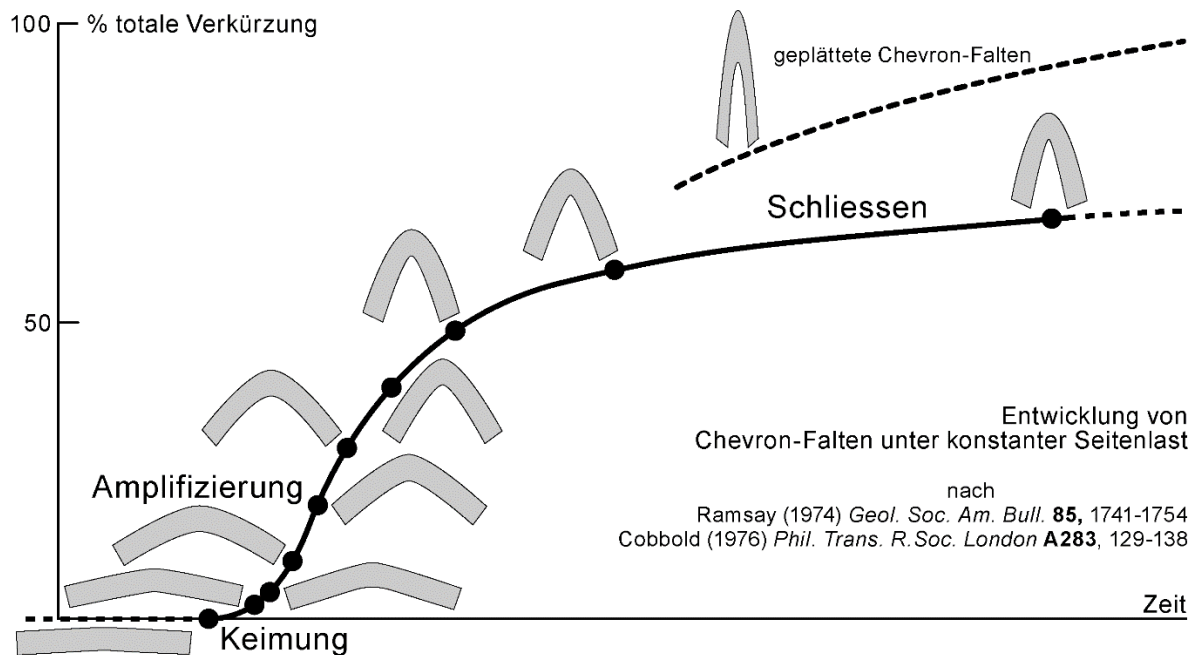


Wenn während der Faltung homogene Verkürzung stattfindet, wird die schwache Matrixlage weiterhin kontinuierlich, auch nach der Faltenentstehung, verkürzt. Diese progressive Verkürzung besteht aus zwei Komponenten. Ein Teil steht in direkter Verbindung mit der Verbiegung der Lagen. Der andere Teil besteht aus zusätzlicher Verformung in jedem Punkt, mit einer Verkürzungskomponente ungefähr senkrecht zur Achsenebene, und einer Extensionskomponente parallel zur Achsenebene aber senkrecht zur Faltenachse. Erweiterung (Propagation) bezieht die Vergrößerung des verfalteten Gebiets mit ein.



4) Schliessen (Locking-up)

Weitere Verkürzung tritt sowohl durch Abflachung der Falte als auch durch Biegung auf. Abflachung kann die ursprüngliche Stauchfaltenform durch Ausdünnung der Schenkel und Verdickung des Scharniers verengen. Entsprechend bezieht die progressive Entwicklung der natürlichen Falten mehr als einen Mechanismus mit ein. Wenn die Schenkel zueinander parallel (d.h., die Falte wird isoklinal) werden, kann keine weitere Verkürzung durch Schenkelrotation auftreten. Das dynamische Wachsen der Amplitude ist beendet aber die Verkürzung kann durch homogene Plättung der gefalteten Schicht und der Matrix fortfahren. Die letzte Stufe des Absterbens ist erreicht, wenn die Schichtung an jedem Punkt eine beinahe stabile Lage erreicht hat und der Verformungswiderstand zunimmt ("locking up").



5.1) Späte reine Scherung

Falls dann der Kompetenzkontrast nicht zu gross ist, werden die Schenkel dünner und die Scharniere dicker. Wenn es senkrecht zur Faltenachse Extension gibt, kann die kompetente Schicht im Faltenprofil Boudinage-Strukturen aufweisen. Je nach Orientierung der Achsen der Gesamtverformung gibt es eine/keine Extension parallel zur Faltenachse.

5.2) Wiederverfaltung

Wechselweise anhaltende Kompression kann die Ursache für eine erneute Stauchung einer bereits gefalteten Schicht sein. Die Schicht hat eine neue effektive Mächtigkeit, die der Höhe der flachgedrückten Stauchfalten fast gleich ist, und sich so in Übereinstimmung mit der Theorie (Gleichung 1) mit einer grösseren Wellenlänge faltet.

Eine Wiederfaltung aufgrund sich verändernden Spannungsrichtungen kann komplexe Strukturen (Interferenzmuster) generieren.

Mehrschichtigkeit

Für die Beschreibung des Verhaltens eines Lagenbaus werden komplizierte mathematische Ausdrücke benötigt. Es müssen schliesslich alle Variablen, besonders auch die Abstände der Lagen und die Kohäsion zwischen den Lagen berücksichtigt werden. Darum ist die experimentelle Verformung eines Lagenbaus entscheidend bei der Untersuchung der physikalischen Faktoren, welche die Form der Falten bestimmen. Mehrlagige Modelle aus Lagen verschiedener Dicke und unterschiedlicher mechanischer Eigenschaften sind komplexe Systeme, die eine spezifische Entwicklung zeigen: Im Schritt (2), bezieht sich die Stauchinstabilität auf den mechanischen Charakter und auf die dickste, steifste Lage innerhalb der Abfolge. Während sich bei Schritt (3) die steifsten und dicksten Lagen jeweils als einzelne Einheit verfallen, unterliegt die mehrlagige Abfolge

als Ganzes der Biegegleitfaltung. Die Art und Weise wie sich kleinere Strukturen in den relativ weichen Lagen entwickeln, ist abhängig vom lokalen Verformungsregime, das durch die Faltung der steifen Lage kontrolliert wird.

Viskose Rheologie und Faltung

Wissenschaftler, die numerische Methoden benutzten, um festzustellen wie Falten wachsen, nahmen meistens ideal-viskoses Materialverhalten an.

Spannungsverteilung

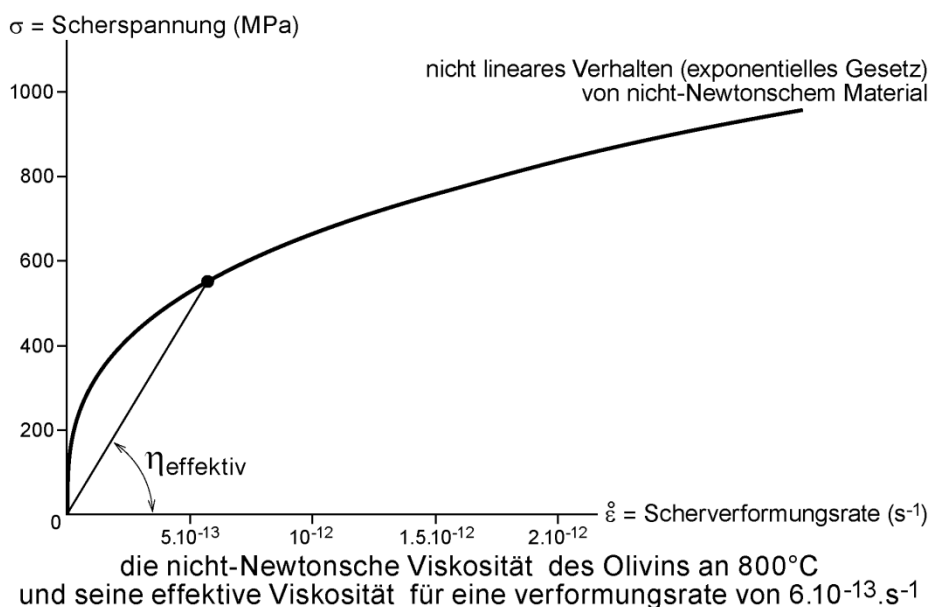
Das Resultat zeigt einen komplexen Zusammenhang zwischen Faltung und Spannungsorientierung:

- In den Scharnierzonen ist die maximale Kompressionsspannung auf der konkaven Seite der Falte (schichtparallele Verkürzung) parallel zur Schicht.
- Auf der konvexen Seite, wo schicht-parallele Streckung stattfindet, steht sie ziemlich senkrecht zur Schicht.
- In den Schenkeln tendiert die maximale Kompressionsspannung mit den Schenkeln mitzurotieren, bis das Einfallen der Schenkel steil wird. An diesem Punkt kehrt sie zu ihrer ursprünglichen Orientierung zurück und tendiert dazu, in steilem Winkel zur Schichtung zu verlaufen.

Die Magnitude der Spannung wechselt in der Falte und während des gesamten Deformationsprozesses. Diese Änderungen reflektieren die Tatsache, dass die kompetente Schicht einen grossen Anteil der Kraft, die an das System angelegt wird, aufnimmt, falls die Schicht parallel zur Verkürzungsrichtung liegt. Dieser Festigkeits-Effekt nimmt jedoch ab, wenn die Schenkel auf höhere Winkel rotiert werden.

Einfluss des Viskositätskontrastes

Numerische Modellierungen haben gezeigt, dass die anfängliche, homogene Schichtverkürzung einen Grossteil der allgemeinen Verformung aufnimmt, und die Faltung ein weniger wichtig Prozess wird, wenn der Viskositätskontrast zwischen der Schicht und der Matrix abnimmt.



Ein aus dieser Modellierung resultierender wichtiger Punkt ist die Tatsache, dass der Viskositätskontrast abnimmt, die anfängliche, homogene Schichtverkürzung zunimmt und die Faltung in Bezug auf die allgemeine Verformung weniger wichtig wird.

Stauchung einer einzelnen Schicht

Infolge der Temperaturabhängigkeit der Rheologien verändert eine Zunahme der Temperatur das mechanische Verhalten des Systems. Dadurch wird auch die Geometrie der sich bildenden Falten

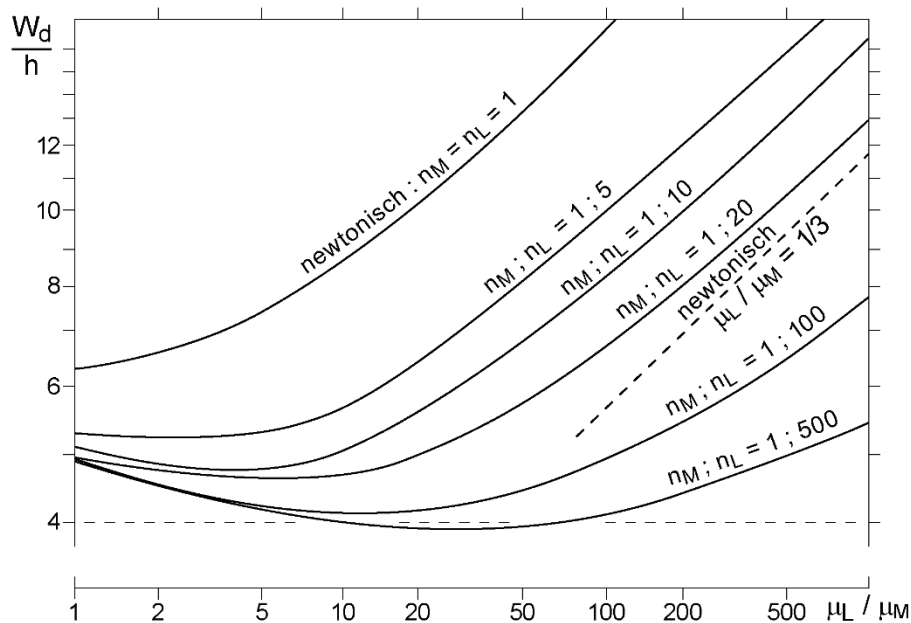
beeinflusst. Jede Form von Falten kann entstehen. Die Faltenform ändert sich je nach dem Viskositätsverhältnis, dem Ausmass der Verkürzung und dem Wellenlänge/Dicke Verhältnis.

- Bei einer sehr steifen Schicht, im Vergleich zum Umgebungsmaterial ($\mu_L/\mu_M > 50$), ist die Amplifizierungsrate der Stauchung sehr gross und die kompetente Lage schwingt lebhaft in das Material niedrigerer Kompetenz. Zunächst entwickelt sich eine Falte mit einer grossen Wellenlänge im Verhältnis zur Dicke der kompetenten Schicht, wobei die Länge der kompetenten Schicht nicht oder kaum verändert wird. Bei weiterer Deformation werden die Faltenschenkel bis zu mehr als 90° rotiert. Grosse Wellenlängen und runde Formen werden entstehen, wie **ptygmatische** (*ptygmatic*) Falten.

- Andererseits ist bei geringem Kompetenzkontrast ($\mu_L/\mu_M < 10$) die Amplifizierungsrate auch niedrig. Dann kommt es kaum zur Faltenbildung, die Verformung wird durch Lagenverkürzung und -verdickung aufgenommen. Dies drückt sich teils durch Falten mit geringer Amplitude und kurzer Wellenlänge auf den Grenzen der kompetenten Schicht aus. Bei weiterer Verkürzung entstehen Falten an der Schichtgrenze mit abwechselnd runden und spitzen Formen. Dies sind **Kuspat-Lobat Falten** (*cusate-lobate folds*). Die Ablenkung des weichen Gesteins in die kompetenteren Gesteine produziert spitze Hörner (*cusps*), die ins festere Gestein hineinreichen. In drei Dimensionen ergibt sich eine lineare **Mullionstruktur** (*fold mullion structure*), die zu den Faltenachsen parallel ist. Solche Lagenverkürzung ist in geringem Grad auch bei höheren Viskositätskontrasten vorhanden.

Die Unterschiede im Verhalten sind indessen nicht gross. Demzufolge geben die Modelle Einsicht in die Geometrien natürlicher Falten. Diese Ergebnisse lassen auch darauf schliessen, dass eine linear-viskose Rheologie wahrscheinlich ein vernünftiger erster Annäherungswert ist. Diese Beobachtung hat eine grosse Auswirkung auf Analogexperimente oder Deformation in unterschiedlichen Niveaus in der Kruste, da Lagen mit dem gleichen Viskositätsverhältnis im niedrigeren wie auch im tieferen Krustenniveau gleiche Strukturen ergeben können. Gleichung (1) und ihre Aussagekraft relativieren sich jedoch, da sie nur für Materialien mit **linear viskosem Fliessen** (*linear Newtonian viscosity*) gelten.

Verhältnis der dominanten Wellenlänge / Dicke
gegen den Viskositätskontrast zwischen der Schicht (L) und der Matrix (M)
für verschiedene Werte des Exponenten n in einer nicht-linearen Rheologie



Mit zunehmender Nichtlinearität (n_L) häufen sich die Kurven zwischen 4 und 6
nach Smith (1979) *Am. J. Sci.* **279**, 272-287

Es stellt sich die Frage, inwieweit solche anfängliche Schichtverkürzung die dominante Wellenlänge (Gleichung 1) verändert. Arbeiten, die diese Schichtverkürzung berücksichtigt haben zeigen, dass sich die dominante Wellenlänge mit dem Betrag der Verformung ändert. Gleichung (1) wurde umgeschrieben in folgende Form:

$$W_d = 2\pi h \left\{ \frac{[\mu_L (s-1)]}{[6\mu_M 2s^2]} \right\}^{1/3} \quad (2)$$

wo s = kubische Wurzel von λ_1/λ_3 ist; λ_1 und λ_3 sind die quadratischen Hauptstreckungen senkrecht bzw. parallel zur Schicht. Aus Gleichung (2) geht klar hervor, dass sich die dominante Wellenlänge mit der Verformung ändert. Die Theorie sagt voraus, dass bei fortschreitender Verformung fortlaufend grössere Dicke/Wellenlänge-Verhältnisse am stärksten amplifiziert werden.

Wegen der Verdickung muss der Begriff der dominanten Wellenlänge der neuen Schichtstärke h_n angepasst werden, für die eine **bevorzugte Wellenlänge** (*preferred wavelength*) W_p berechnet wird:

$$W_p/W_d = (h_n/h)S$$

wobei S die schichtparallele Hauptstreckung ist.

Stauchung im Mehrlagenbau

Ein Mehrlagenbau kann grossen, mittleren oder kleinen Kompetenzkontrast zwischen den verschiedenen Schichten aufweisen. Der Kompetenzkontrast zwischen den Schichten beeinflusst die Form der Falten. Wie im Fall einer einzelnen eingebetteten Schicht, tendiert auch der dickere und steifere Mehrlagenbau zu grösseren Wellenlängen und gerundeten Falten. Folglich zeigen mehrlagige Systeme eine viel grössere Vielfalt von Stauchfalten als einlagige Systeme. Zum Beispiel können im natürlichen oder experimentellen Mehrlagenbau Falten mit runden Scharnieren, Chevronfalten, Knickbänder und konjugierte Falten auftreten. Somit ist es möglich, im Aufschluss auf den ersten Blick zu bestimmen, welche Lage zur Zeit der Faltung die steifere war.

Einfluss der Elastizität

Jüngere Arbeiten integrieren die kurzfristige Elastizität und das langfristige viskose Fließen im viskoelastischen Verhalten. Für perfekt elastische Materialien wird die dominante Wellenlänge in dem elastischen Modulkontrast ausgedrückt. Gleichung (1) wird:

$$W_d = 2\pi h (E_L/6E_M)^{1/3}$$

wo E_L der Elastizitätsmodul der Schicht und E_M der Elastizitätsmodul der Matrix sind.

Eine lediglich elastische Lösung ist nicht sinnvoll für dauerhaft gefaltete Gesteine. Die dominante Wellenlänge, die auf einer elastischen Schicht innerhalb einer viskosen Matrix entwickelt wird

$$W_d = 2\pi h (G/P)^{1/2} \quad (3)$$

wo G das elastische Schermodul der kompetenten Schicht, und P die schichtparallele Spannung sind. Die Viskosität der Matrix spielt keine Rolle.

Die dominante Wellenlänge für eine viskoelastische Schicht ist das Ergebnis der Kombination viskoser und elastischer Verformung. Sie wird durch das dimensionslose Verhältnis R_{Wd} gegeben:

$$R_{Wd} = (4\mu_L \dot{\epsilon}/G)^{1/2} (\mu_L/6\mu_M)^{1/3}$$

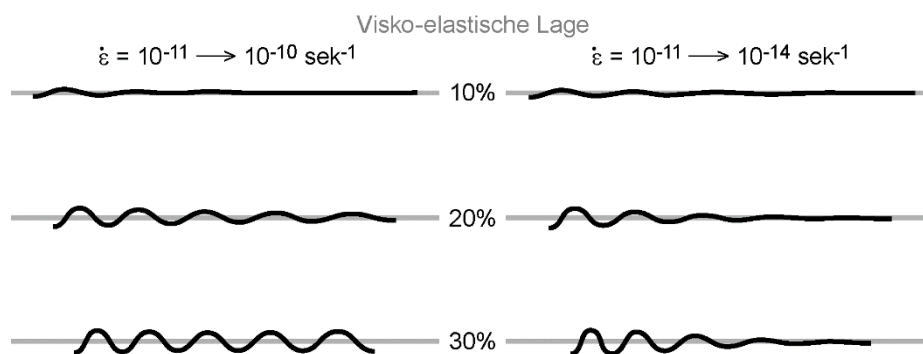
In dieser Gleichung ist ein Grossteil des ersten Terms:

$$D_e = \mu_L \dot{\epsilon}/G$$

D_e wird die **Deborah Zahl** (*Deborah number*) genannt. Diese Zahl legt fest, ob eine Verformung effektiv elastisch oder viskos ist. Sie gilt als das Verhältnis von der Zeit der Spannungserholung (μ_L/G) zur Verformungszeit ($1/\dot{\epsilon}$). Wenn $De \gg 1$ braucht die Spannungserholung viel mehr Zeit als die Verformung, die tatsächlich elastisch ist. Umgekehrt, wenn $De \ll 1$, ist die Spannungserholung viel schneller als die Verformungszeit und die Verformung ist tatsächlich viskos. Die Deborah-Zahl ist nicht geeignet, um zu klären, ob Faltung einer viskoelastischen Schicht effektiv viskos oder elastisch ist, weil Faltung eine zusätzliche Zeitskala beinhaltet, nämlich die der Amplifizierung, die durch die Wachstumsgeschwindigkeit gesteuert wird. Das dimensionslose Verhältnis, geeignet um das effektive Verformungsverhalten einer viskoelastischen Schicht zu bestimmen, ist das Verhältnis R_{Wd} von viskosen (Gleichung 1) zur elastischen (Gleichung 3) dominanten Wellenlängen. Dieses Verhältnis kann mit $P = 4\mu_L\dot{\epsilon}$ modifiziert werden, unter der Annahme, dass die schichtparallele Spannung effektiv viskos ist und nur die Biegespannungen während der Faltung viskoelastisch sind. Dann:

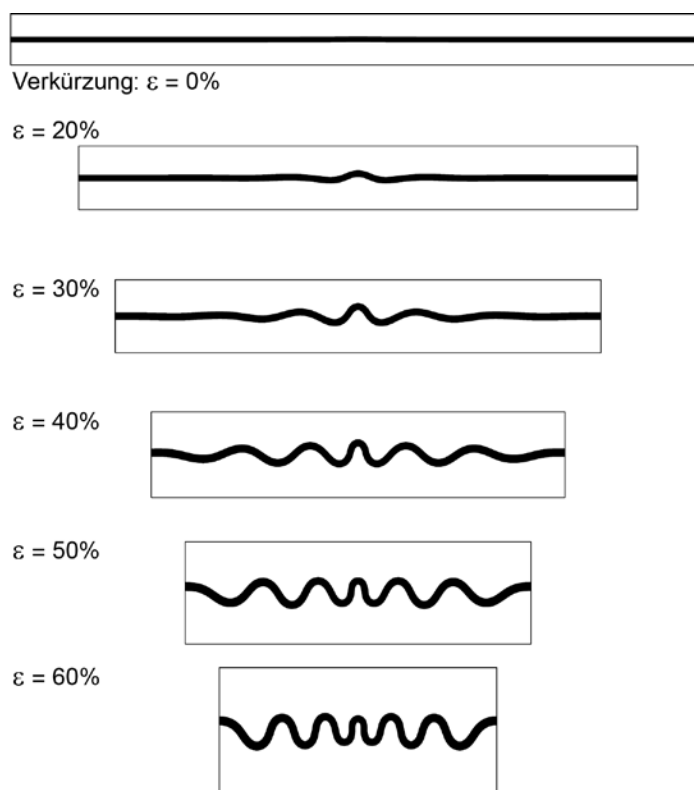
$$R_{Wd} = (P/G)^{1/2} (\mu_L/6\mu_M)^{1/3}$$

Die volle Analyse zeigt, dass eine viskoelastische Schicht im Wesentlichen entweder zu elastischem oder zu viskosem Faltungsverhalten für $R_{Wd} < 1$ bzw. für $R_{Wd} > 1$ neigt. Das heisst, dass das Faltungsverhalten solch einer viskoelastischen Schicht entweder mit reinem elastischem oder mit viskosem Material vergleichbar ist, abhängig davon ob die Verformungsrate verhältnismässig schnell oder langsam ist. Zusammenfassend ist Gleichung (1) für die meisten geologischen Fälle in guter Näherung gültig.



Faltenzüge

Experimentelle Verkürzung von geschichteten Modellen, die von analogen Materialien gebildet werden, stellen viele Informationen von der Amplifizierung bis zu Blockierungsstadien der Stauchung zur Verfügung. Solche Experimente zeigen, dass die Falten, die sich während der Kompression der Modelle entwickeln, im Allgemeinen nicht synchron sind. Sie bilden sich in einer Serie eine nach der anderen entweder in zufälliger Position innerhalb des Modells oder indem jeweils die Amplifizierung einer Falte die Initiierung und Amplifizierung einer benachbarten Falte anregt. Im Allgemeinen entwickeln sich Falten der Reihe von der Position der Anfangsinstabilität nach aussen.



Serienentwicklung von letztlich schmalen Stauchfalten in einem Faltenzug angeordnet.
 Computer-Simulation mit Potenzgesetz der viskosen Schicht und Matrix mit Spannungsexponenten = 3.
 Kompetenzkontrast = 25 für die allgemeine Verkürzungsrate.
 nach Schmalholz & Schmid 2012 *Phil. Trans. R. Soc.* **A28(370)** 1798-1826

Grossmassstäbliche Stauchung – Wellenlänge grosser Falten

Während der Entwicklung von grossmassstäblichen Falten wird die Aufwölbung in der Antiform, oder die Abwölbung in der Synform, durch die Gravitationskraft beeinflusst. Intuitiv verstehen wir, dass sich die Antiform unter dem Einfluss der Gravitationskraft etwas senkt und die Synform etwas hebt. Das heisst die Stauchfalten neigen zur Abflachung. Diesem Trend wirkt die lagenparallele Kompressionskraft entgegen.

Man betrachte eine elastische Lage der Dicke h , die auf einem viskosen Untergrund der Dichte ρ schwimmt. $\Delta\sigma$ ist die deviatorische Spannung, die notwendig ist zur Bildung von elastischen Stauchfalten innerhalb der Lage. Die charakteristische Wellenlänge für das Stauchen dieser elastischen Schicht bei kombinierter Wirkung von Gravitationskraft und seitlicher deviatorischer Spannung $\Delta\sigma$, kann analytisch berechnet werden:

$$W_d = \pi h \left[\frac{2\Delta\sigma}{h\rho g} \right]^{1/2} \quad (4)$$

Die deviatorische Spannung wird zu

$$\Delta\sigma = \left\{ \frac{Eh\rho g}{3(1-\nu^2)} \right\}^{1/2} \quad (5)$$

wobei E der Elastizitätsmodul und ν die Poissonzahl (*Poisson ratio*) der elastischen Schicht ist. Die Resultate experimenteller Studien stimmen bemerkenswert gut mit dieser Theorie überein.

Die Gleichungen (4) und (5) zeigen, dass eine grössere Kompressionsspannung benötigt wird für Falten grösserer Amplitude. Da aber die deviatorische Spannung die Festigkeit des Gesteins nicht überschreiten kann, setzt Gleichung (5) die obere Grenze für die Grösse von Stauchfalten.

Betrachten wir Stauchung in der Erdkruste. Ein granitisches Gestein hat eine Festigkeit in der Größenordnung von $5 \cdot 10^9 \text{ dyn cm}^{-2}$. Die durchschnittliche Krustenmächtigkeit ist 30 km und ihre Gesamtdichte circa 3 g cm^{-3} . Damit ist nach Gleichung (4) die grösstmögliche Wellenlänge für Stauchung innerhalb der Kruste ungefähr 100 km.

Treibende Kräfte

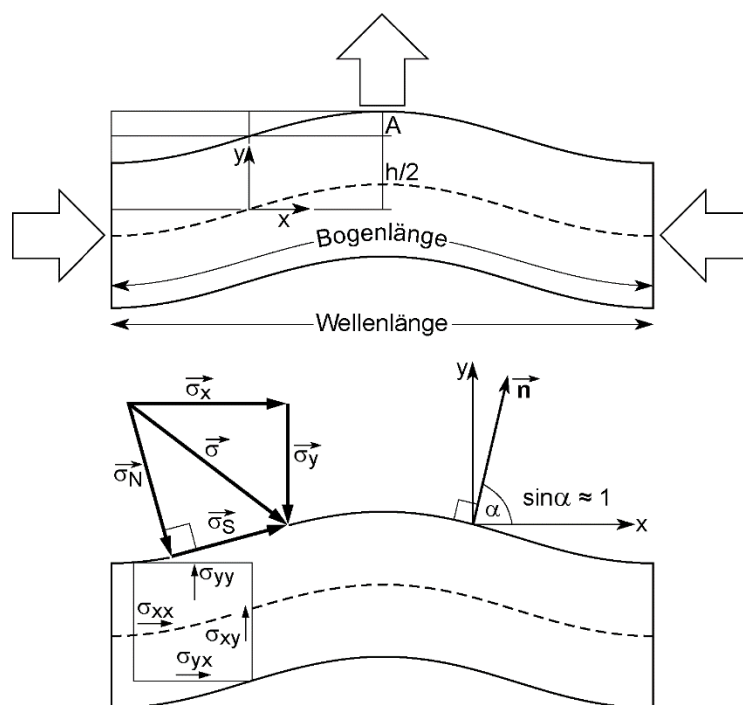
Die hauptsächlich treibenden Kräfte sind (1) seitliche Kompression und (2) Gravitationskraft.

Die meisten natürlichen Falten entstehen aus einer seitlichen Verkürzung. Seitliche Kompression wird normalerweise durch Plattentektonik verursacht (meist Konvergenz) oder durch magmatische Intrusionen.

Die Gravitationskraft führt zu zwei Arten von Faltungsinstabilitäten: Dichte-Instabilitäten und Relief-Instabilitäten. Das allgemeinste Beispiel einer Dichte-Instabilität tritt auf, wo dichte Gesteine über weniger dichten Gesteinen liegen. Um die Gravitationskräfte ins Gleichgewicht zu bringen, müssen die dichteren Gesteine absinken und die weniger dichten Gesteine aufsteigen. Im Verlauf dieses Prozesses wird geschichtetes Gestein verfaltet. Schliesslich können die Gesteine niedriger Dichte die darüber liegenden Gesteine in einer Antiform durchbrechen, dies ist dann ein Diapir. Relief-Instabilitäten treten dort auf, wo die Erosionsraten im Vergleich zur Verformungsrate desselben Gesteins klein sind. Ein hohes tektonisches Relief neigt dazu durch seitliches Wegfliessen ausgeglichen zu werden. Solches Einebnen kann durch Gleiten entlang von Störungsflächen (wie bei Erdbeben) oder durch seitliche Ausbreitung stattfinden. Letzteres führt zu **Kollapsfaltung** (*collapse folding*). Auch *Drape folds* und andere erzwungene Falten, die durch Störungsbildung in ihrem Kern geformt werden, nehmen das Relief des Grundgebirges auf und ihre Bildung ist vorwiegend durch die Gravitationskraft kontrolliert. Durch die Schwerkraft angetriebene Falten bilden sich nahe der Oberfläche und sind normalerweise Biegefalten, die von Brucherscheinungen begleitet werden.

Faltung in Beziehung zur Spannung

Die Spannung bei der Faltung muss von den auf das System wirkenden Kräften klar getrennt werden. Die Annahme einer kompressiven Spannung parallel zur Schichtung kann in einem regionalen Massstab zutreffend sein, im Massstab eines Aufschlusses ist diese jedoch weniger sicher. Tatsächlich wirkt häufig während der Faltung ein Teil der Scherspannung parallel zur Schichtung, jedoch ändert sich diese in jedem Schritt der Faltung.



Geometrische Parameter einer Stauchfalte und die darauf einwirkenden Spannungen

Während der Anfangsstadien der Faltung, wenn die Schichten praktisch flach sind, werden Spannungen homogen innerhalb der Schicht und der Matrix verteilt. Die Spannungsverteilung wird deutlich heterogener, wenn die Amplituden finit werden für die ganze Amplifizierungsgeschichte.

Numerische Simulationen, die die Größen der Differentialspannung (d.h. $\sigma_1 - \sigma_3$, der Durchmesser des Mohr'schen Kreises) rechnen, zeigen, dass die Spannungen um mehr als zwei Größenordnungen in der Schicht einer Falte hoher Amplitude variieren.

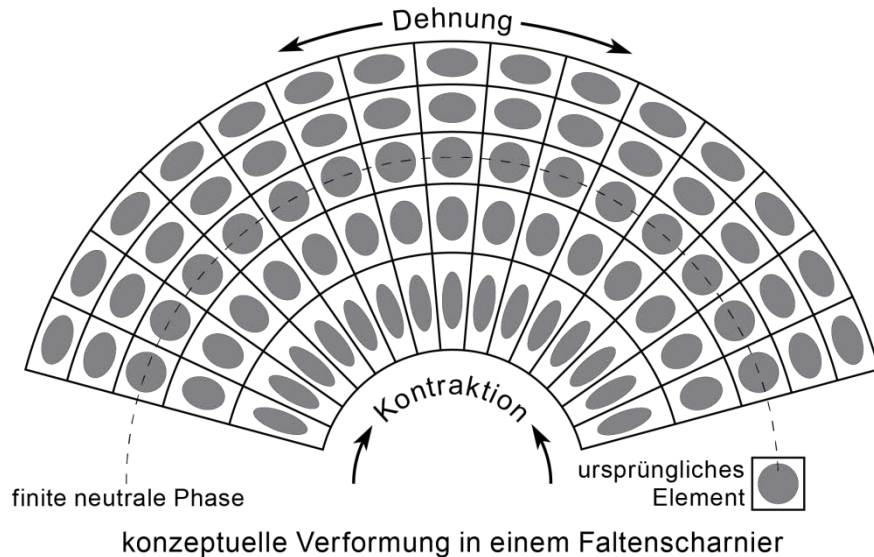
Verformungsverteilung in symmetrischen Falten

Da eine gefaltete Lage am Anfang eine ebene Fläche war, ist Faltung immer heterogen und produziert variable Verformungszustände entlang und quer zu einer deformierten Lage. Man erwartet, dass die Verteilung der zusätzlichen, faltungsverbundenen Verformung im sich faltenden Körper von der Weise abhängt, in der sich die mechanischen Eigenschaften der Schichten mit progressiver Deformation ändern. Wenn es eine geringe Änderung gibt, dann sind die zusätzlichen Verformungen wahrscheinlich homogen. Wenn, andererseits, die Festigkeitszunahme oder -abnahme in den stark verformten Bereichen wichtig ist, oder es Änderungen in den mechanischen Eigenschaften gibt, die mit der Entwicklung von Anisotropie wie Schieferung oder kristallographisch bevorzugten Orientierungen verbunden ist, dann ist das zusätzliche Verformungsfeld wahrscheinlich heterogen. Die Vielfältigkeit der sich gegenseitig beeinflussenden Parameter (geometrische, wie z.B. die Schichtmächtigkeit, und rheologische) führt zu extremer Komplexität, deshalb wird das Problem hier auf einige typische und symmetrische Fälle reduziert. Dann ordnen sich auch die Verformungsellipsen symmetrisch um die Achsenebene an. Zwei Fälle beherrschen die Diskussionen: Die Belastung wird sich entweder in den Scharnieren oder in den Schenkeln konzentrieren.

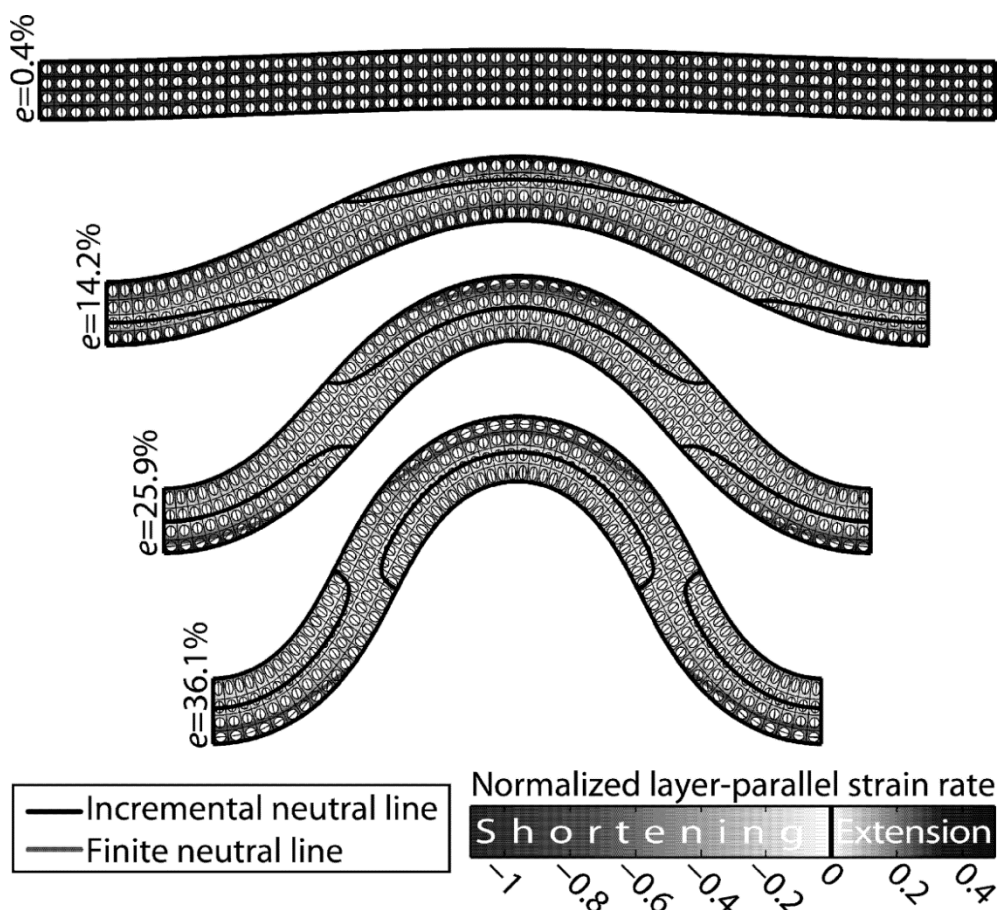
Stauchfalten: tangentielle longitudinale Verformung

Die Verformung innerhalb einer gebogenen kompetenten, homogenen und isotropen Schicht wird durch tangentielle, schicht-parallele Streckung des äusseren Bogens, und durch ebensolche schicht-parallele Verkürzung im inneren Bogen aufgenommen. Es gibt keine finite Längenänderung der Linien, die zur Schicht senkrecht sind (konstanter Dickenzustand). Es existiert eine immaterielle

Fläche ohne Verformung innerhalb der gefalteten Schicht. Diese Fläche wird **neutrale Fläche** (*neutral surface*) genannt, die sich bei fortschreitender Einengung zum Kern der Falte nach unten verschiebt. Die Schenkel bleiben auf beiden Seiten des verformten Scharniers unverzerrt. Für niedrige Viskositätskontraste ist die tangentielle longitudinale Verformung ein wichtiger Beitrag zur Gesamtdeformation.



Die Migration der neutralen Fläche von aussen nach innen während der Faltschliessung deutet an, dass es einen Unterschied zwischen einer inkrementellen und einer finiten neutralen Fläche gibt. Die Tatsache, dass die Schenkel nicht verformt sind, deutet an, dass die neutralen Flächen entlang der Falten kontinuierlich sind. Numerische Modelle jedoch deuten an, dass sowohl die inkrementelle- als auch die finite neutrale Fläche unterbrochen sind und entweder an der Unterseite oder an der Oberseite der Schicht in der Übergangszone zwischen Scharnier und Schenkel enden. Die Modellierung deutet weiter an, dass die inkrementelle neutrale Fläche vor der finiten neutralen Fläche durch viskose Schichten wandert.

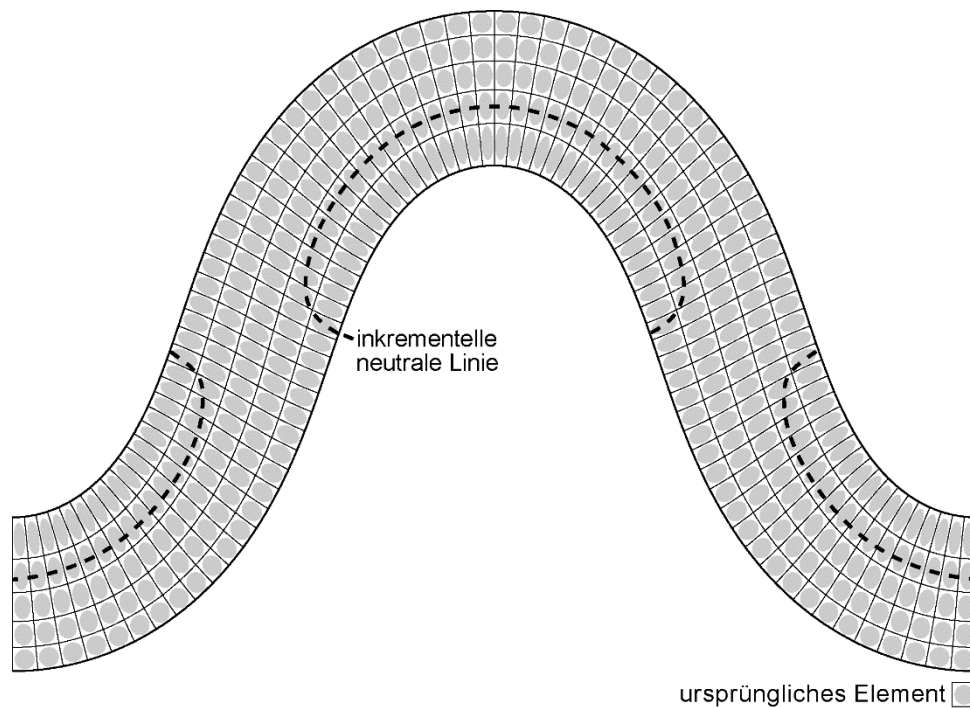


in Frehner (2011) *Journal of Structural Geology*, 33(10), 1501-1508

Die Auswirkungen der schichtparallelen Verformung kann durch die Entwicklung von scharnierparallelen, schichtsenkrechten (radialen) Rissen auf der konvexen äusseren Seite der neutralen Fläche einer kompetenten Schicht, und auf der konkaven inneren Seite der neutralen Fläche durch die Bildung von kleinen Aufwölbungen, Mullions, Falten oder Überschiebungen erkannt werden. Da die Krümmung im Bereich des Scharniers maximal ist und gegen die Wendepunkte hin zu null abnimmt, nimmt auch der absolute Wert der tangentialen longitudinalen Verformung vom Scharnier zum Wendepunkt ab. Die tangentielle Verformung nimmt aber auch gegen die neutrale Fläche hin ab.

Die wichtigen geometrischen Merkmale der Verformung bei Stauchung sind:

- 1 - Die Deformation beinhaltet lediglich ein Verbiegen um die Faltenachse, es entsteht im Idealfall keine Streckung parallel zur Faltenachse, und über die ganze Falte hinweg gibt es nur ebene Verformung. Die Faltenachse ist an jedem Punkt der Falte parallel zur intermediären Hauptverformungsachse λ_2 .
- 2 - Die verformende Schicht behält ihre ursprüngliche Dicke, senkrecht zur Schicht gemessen, an jedem Punkt bei (parallele Falten). Die Schicht wurde indessen am äusseren Bogen jeder Falte gestreckt und am inneren Bogen verkürzt. Diese Verformung nimmt mit dem Abstand von der neutralen Fläche zu. Die $(\lambda_1; \lambda_2)$ Ebenen des Verformungsellipsoids fächern sich durch jede Falte hindurch auf, wobei der Fächer auf der äusseren Seite der neutralen Fläche vom Faltscharnier weg divergiert, und auf der inneren Seite zum Faltscharnier hin konvergiert.



Verformung in einer Stauchfalte einer viskosen Schicht bei 50% Verkürzung
(Viskositätskontrast zwischen Schicht und Matrix = 100)
Finite Elemente Simulation, gerechnet von M. Frehner, Diplomarbeit, 2005

- 3 - Die neutrale Fläche behält ihre ursprüngliche Fläche bei. Auf dieser Fläche findet keine Verformung statt.
- 4 - Eine ursprünglich gerade Lineation liegt auf einer Schicht, die später verfaultet wird, und zwar macht die Lineation einen Winkel θ zur neu entstehenden Faltenachse. Wird die Schicht nun verfaultet, so wird die Lineation auch verbogen. Der Winkel θ bleibt nur in der neutralen Fläche konstant. Auf der stereographischen Projektion plottet die Lineation der neutralen Fläche (konstanter Winkel θ) entlang des Kleinkreises mit dem halben Öffnungswinkel θ um die Faltenachse. Die Lineationen von anderen Flächen fallen auf etwas kompliziertere Kurven. Auf Flächen innerhalb des äusseren Bogens nimmt θ je nach dem Verformungsbetrag zu. Auf Flächen im inneren Bogen nimmt θ ab, wiederum je nachdem wie stark die Verformung ist.

Biegegleit- und Biegescherfalten

Die Faltung von homogenen aber anisotropen Schichten bezieht schichtparallele Gleitung mit ein, die die Verformungsverteilung beeinflusst: die Scherverformung konzentriert sich entlang von eindeutigen Schichtflächen. Die Magnitude der schichtparallelen Scherverformung ist in der Mitte der Schenkel maximal und nimmt zum inneren und äusseren Bogen hin ab. Auf irgendeiner Fläche parallel zur Schicht ist die Scherverformung maximal an den Wendepunkten und wird am Scharnier zu null. Die wichtigsten Merkmale der Verformung in Biegegleitfalten sind die folgenden:

- 1 - Es gibt keine oder geringe interne Verformung der kompetenten Schicht, die an jedem Punkt der Falte ihre ursprüngliche Dicke ohne Verzerrung (parallele Falten, Stauchfalten in steifen Schichten) behält.
- 2 - Die Verformung besteht aus zwei Komponenten: Biegen um die Faltenachse und Scherung auf Flächen senkrecht zur Richtung der Faltenachse. Somit ist die Verformung an allen Punkten der Falte eine ebene Verformung, und die Faltenachse ist parallel zu λ_2 des Verformungsellipsoids.
- 3 - Die gefaltete Fläche ist parallel zu einem Kreisabschnitt des Verformungsellipsoids in jedem Punkt. Die $(\lambda_1; \lambda_2)$ Ebenen des Verformungsellipsoids bilden einen divergierenden Fächer.
- 4 - Der Betrag der schichtparallelen Gleitung oder einfachen Scherung γ ist im Scharnier null und nimmt dann, bis zum Maximalwert an den Wendepunkten, zu. Der Schersinn kehrt am Scharnier um. Der Gleitversatzbetrag an der Oberseite einer Schichtgrenze ist folglich einfach zu berechnen.

In der Profilebene der Falte, dort wo der Gleitversatz bestimmt werden soll, wird die Neigung der Schichtfläche α bestimmt. Der Gleitversatz berechnet sich nach:

$$\text{Gleitung} = (\text{Dicke der verfalteten Lage}) * \alpha \text{ [in rad]}.$$

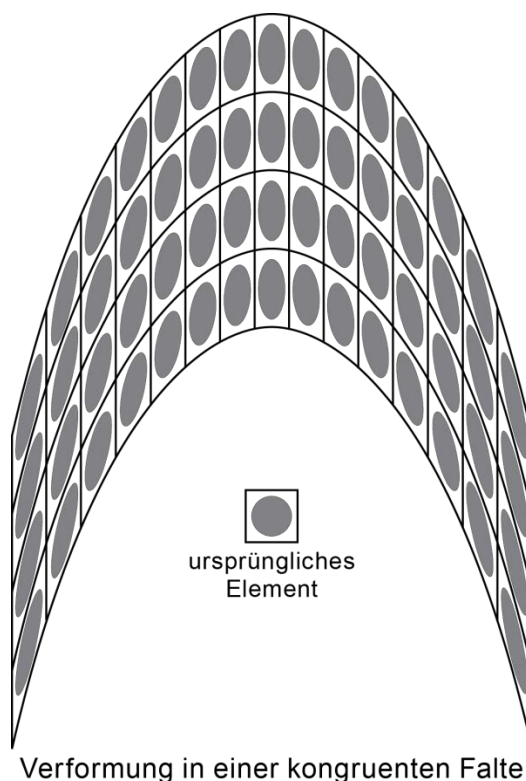
rad (Abkürzung für Radiant) ist die Einheit für das Bogenmass. Das Bogenmass ist die Länge des Kreissegments, welches der Winkel in einem Einheitskreis ausschneidet:
 $1^\circ = 2\pi/360 \approx 0.01745 \text{ rad}$).

- 5- Da innerhalb der Flächen der gefalteten Schichten keine Verzerrung vorliegt (diese sind kreisförmige Schnitte des Verformungsellipsoids bei jedem Punkt), verbleibt der Winkel θ (Winkel zwischen der Lineation und der neu entstehenden Faltenachse) während der ganzen Faltung immer gleich gross. Deshalb liegt die Lineation auf einem Kegel mit halbem Öffnungswinkel θ und mit der Faltenachse als Kegelachse. Auf der stereographischen Projektion erscheint die Lineation als ein Kleinkreis.

Scherfalten und passive Fliessfalten

Heterogene einfache Scherung, in der die Intensität der Scherung im Gestein schwankt, kann Falten bilden und verstärken. Scherverformung wird gleichmässig über die homogenen, anisotropen Schichten in den Fliessfalten verteilt. Die wichtigsten Merkmale der Verformung im Zusammenhang mit Scherfaltung oder Gleitfaltung sind die folgenden:

- 1 - Weil die Verformung durch einfache Scherung entsteht, sind die Scherebenen kreisförmige Schnitte durch das Verformungsellipsoid in jedem Punkt in der Falte, und die Verformung ist überall eine ebene Verformung.



- 2 - Es gibt keinen Grund dafür, dass die Scherrichtung senkrecht zur Faltenachse sein sollte. Die einzige Einschränkung liegt darin, dass die Scherrichtung nicht parallel zur Schicht ist. Die λ_2 Achse ist überall in den Scherebenen senkrecht zur Scherrichtung, und sie kann parallel zur Faltenachse sein, oder auch nicht.
- 3 - Weil die Scherebene ein kreisförmiger Schnitt des Verformungsellipsoids ist, bewahrt die Schicht konstante Dicke (parallel zur Achsenebene im Faltenprofil gemessen). Dies führt zu verdickten Scharnieren und ausgedünnten Schenkeln.

- 4 - Eine ursprünglich gerade Lineation wird so verzerrt, dass jeder Punkt der Lineation auf systematische Weise parallel zur Gleitrichtung verschoben wird. Die Lineation ist deshalb so umorientiert, dass sie in einer Ebene liegt, die durch die ursprünglichen Orientierungen der Lineation und der Gleitrichtung aufgespannt wird. Im Stereogramm liegt sie entlang eines Grosskreises.

Knickbänder

Konjugierte Knickbänder sind häufige Strukturen in fein geschieferten Gesteinen. Aus der Symmetrie der Achsenebenen und dem Versatz an konjugierten Knickbändern kann man die Richtungen von λ_1 , λ_2 und λ_3 angeben: λ_1 halbiert den meist spitzen Winkel der gestreckten Richtung, λ_2 ist die Intersektion der Achsenebenen und λ_3 halbiert den meist stumpfen Winkel der gestauchten Richtung.

Zusammenfassung

Faltung spiegelt eine permanente Verformung in einem inhomogen verformten, geschichteten Körper wider; normalerweise, aber nicht immer, unter seitlicher Kompression. In der Geologie befasst sich die Faltung meistens mit einer vielschichtigen Abfolge, in welcher die einzelnen Schichten verschiedene mechanische Eigenschaften und Dicken aufweisen. Das heisst im Grossen und Ganzen, dass anfangs nur eine oder zwei Schichten sich zu falten beginnen, und es sind diese Schichten, welche die Deformation von diesem Zeitpunkt an steuern. Andere schwächere Schichten sind mehr oder weniger dazu gezwungen, sich auf die Weise zu verhalten, wie es die stärkeren Schichten bestimmen.

Die folgenden Faktoren sind wichtig:

- 1) Je nach Dicke und mechanischen Eigenschaften entwickelt eine einzelne Schicht oder ein Mehrlagenbau grössere oder kleinere Stauchfalten. Bei gleich bleibenden Bedingungen entstehen in einer dickeren oder steiferen Schicht grössere Falten. Dementsprechend entstehen in grob geschichteten dicken Mehrlagenbauten grössere Falten als in dünn geschichteten dünnen. Die Wellenlängen der Falten sind gross (im Vergleich zur totalen Mächtigkeit des Mehrlagenbaus), wenn das Umgebungsmaterial schwach oder sehr inkompetent ist. Mit stärkerem Umgebungsmaterial nimmt die Wellenlänge ab. Wenn das Umgebungsmaterial sehr kompetent ist, sind die Falten viel kleiner als die totale Mächtigkeit des Mehrlagenbaus.
- 2) Die Wachstumsrate der Faltenamplitude ist zum grössten Teil vom Kompetenzkontrast abhängig. Bei gleich bleibenden Bedingungen verfaultet sich eine steifere Lage oder ein steifer Lagenbau schneller als weniger steifes Material.
- 3) Ein Mehrlagenbau mit Stauchfalten hat eine grössere Vielfalt von Faltenformen als die Stauchfalten einer Einzellage. Folglich können in der Natur, wo verschiedene Schichten mit unterschiedlicher Dicke und Viskosität zusammen vorkommen, Falten mit unterschiedlichen Wellenlängen und Wachstumsraten aufeinanderprallen. Aus solchen Zusammenstössen können andere Falten entstehen.
- 4) Die Form der Stauchfalten im Mehrlagenbau wird im Wesentlichen von zwei Faktoren kontrolliert: dem Kompetenzkontrast oder dem Gleitvermögen innerhalb des Lagenbaus und der Art des Umgebungsmaterials, worin der Mehrlagenbau eingebettet ist.
- 5) Es besteht eine komplexe Verwandtschaft zwischen Faltengeometrie und Orientierung finiter Verformung.

Drei wesentliche physikalische Mechanismen können für die Faltung verantwortlich gemacht werden. Das sind Stauchung, wahrscheinlich aufgrund einer primären Unregelmässigkeit, Umbiegen und Amplifizierung. Die Geschichte der Verformung irgendeines Punktes einer Falte ist aufgrund der fortwährenden Änderungen des Spannungs- und Verformungszustandes kompliziert. Es ist wichtig zu beachten, dass es nicht möglich ist, anhand der Form einer gefalteten Schicht die Verformung an jedem Punkt der Falte herzuleiten. Es werden zusätzlich andere Arten von Information benötigt. Unsere Kenntnis über die Vielfältigkeit der finiten Verformungsmuster in gefalteten Gesteinen beruht

einerseits auf Ergebnissen der Verformungsanalyse, andererseits auf Ergebnissen aus Modellierungsexperimenten, wo die resultierende Verformungsverteilung beobachtet werden kann. Die folgenden Faktoren sollten bei der Analyse jeder Faltenbildung berücksichtigt werden:

- Die rheologischen Eigenschaften des sich verformenden Materials
- Die mechanische Anisotropie der Gesteinsmasse
- Das Spannungsfeld, das auf das Gestein einwirkt unter Einbezug der Körperkräfte
- Der Einfluss irgendeiner Inhomogenität
- Die Randbedingungen

Vergessen Sie nie, dass der Massstab der Beobachtung Zugang zu den kleinen Teilen von Falten erlaubt, deren Eigenschaften sich an anderen Orten ändern können.

Empfohlene Literatur

- Cobbold P.R. - 1976. Fold shapes as functions of progressive strain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **A283**, 129-138.
- Cobbold P.R. & Quinquis H. - 1980. Development of sheath folds in shear regimes. *Journal of Structural Geology* **2 (1/2)**, 119-126.
- Hansen E. - 1971. *Strain facies, Minerals, Rocks and Inorganic Materials*. Springer-Verlag, Berlin, 208 p.
- Hudleston P.J. - 1986. Extracting information from folds in rocks. *J. Geol. Education* **34**, 237-245.
- Hudleston P.J. & Treagus S.H. - 2010. Information from folds: A review. *Journal of Structural Geology* **32 (12)**, 2042-2071.
- Pollard D.D. & Fletcher R.C. - 2005. *Fundamentals of structural geology*. Cambridge University Press, Cambridge, 500 p.
- Price N.J. & Cosgrove J.W. - 1990. *Analysis of geological structures*. Cambridge University Press, Cambridge, 502 p.
- Ramberg H. - 1963. Fluid dynamics of viscous buckling applicable to folding of layered rocks. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists* **47 (3)**, 484-505.
- Ramsay J.G. - 1974. Development of chevron folds. *Geological Society of America Bulletin* **85 (11)**, 1741-1754.
- Ramsay J.G. & Huber M.I. - 1987. *The techniques of modern structural geology - Volume 2 : Folds and fractures*. Academic Press, London, 700 p.
- Schmalholz S.M. & Podladchikov Y.Y. - 2000. Finite amplitude folding: transition from exponential to layer length controlled growth. *Earth and Planetary Science Letters* **179**, 363-377.
- Turcotte D.L. & Schubert G. - 2002. *Geodynamics*, Second Edition ed. Cambridge University Press, Cambridge, 456 p.