

SEKUNDÄRE STRUKTURELLE ELEMENTE

Sekundäre planare strukturelle Elemente

Gesteine, die in einer bestimmten Erdtiefe deformiert wurden, in der das spröde Verhalten weniger zur Verformung beigetragen hat als die duktile Deformation, beinhalten häufig ein dicht gepacktes Set von gleichmässigen, parallelen Flächen, die zur Schichtung geneigt sind und entlang denen sich die Gesteine leicht aufspalten lassen. Sie sind begrenzt durch Diskontinuitäten aufgrund einer bevorzugten räumlichen Orientierung plattenförmiger Minerale, laminarer Mineral-Aggregate, oder einer Kombination derselben. Da sie kein Ebenbild in unverformten Gesteinen haben, müssen sie ein Produkt der Deformation sein. Deshalb stellen diese Flächen **mechanische Anisotropien** (*mechanical anisotropies*) dar. Wir werden **Foliation** als nicht-genetischen allgemeinen Ausdruck gebrauchen für sekundäre, parallele und oft dicht an einanderliegende, planare Elemente, die in deformierten Gesteinen gefunden werden. Die Foliation ist im Wesentlichen **penetrativ** (*penetrative*), das heisst, sie durchdringt den gesamten Gesteinskörper und tendiert dazu, frühere Strukturen zu verwischen. Die Intervalle zwischen den Foliationsebenen können unter dem Mikroskop beobachtet werden. Wenn der Zwischenraum zwischen den Schieferungsflächen markant grösser als einige Korngrössen ist, kann der Ausdruck **weitständige Foliation** (*spaced cleavage*) gebraucht werden. Der Ausdruck **Gefüge** (*fabric*) wird benutzt, um die Beziehung zwischen planaren und linearen Strukturen und der Textur eines Gesteins zu beschreiben.

Terminologie

Die Morphologie der Foliation ändert sich mit dem Metamorphosegrad (Temperatur und Druckbedingungen während ihrer Entstehung), mit der Position in grösseren Faltenstrukturen und mit der Gesteinsart. Neben den unten aufgeführten Endformen existiert ein weites Spektrum von Zwischenformen. Der Grad der Lokalisierung der Schieferungsflächen kann zwischen zwei ausgedehnten Kategorien schwanken: penetrative Schieferung und **weitständige Schieferung** (*spaced foliation*).

Bruchschieferung

Die **Bruchschieferung** (*fracture cleavage*) ist gekennzeichnet durch parallele und in regelmässigen Abständen auftretende Brüche (Mikrobrüche oder Klüfte), die das Gestein scharf in Serien von tafelförmigen Stücken oder **Mikrolithons** (*microlithons*) teilen. Es besteht kaum eine interne Verformung innerhalb der Mikrolithons. Die Bruchschieferung kann man sich auch vorstellen als eine dichte Population von Klüften. Sie entsteht meistens in niedrig- bis mittelgradig metamorphen Gesteinen und kommt häufig in Sand- und Kalksteinen vor.

Lösungsschieferung

Lösungsschieferung (*solution cleavage*) besteht aus gleichmässig getrennten Lösungsflächen (z.B. **stylolitische Klüfte**, *stylolitic joints*), die das Gestein in eine Serie von Mikrolithons ohne interne Deformation aufteilen. Sie wird allgemein in Gesteinen gebildet, die niedrigen Metamorphosegrad und reichhaltig Flüssigkeit haben, und wird gewöhnlich in Kalksteinen gefunden.

Glattschieferung (ursprünglich Dachschieferung)

Der Ursprung des Wortes **Schiefer** (*slate*) stammt aus dem Bergbau, in dem damit feinkörniges Gestein bezeichnet wird, das so schiefrig-schuppig ist, dass es in dünne, planare Plättchen aufgespalten werden kann, mit denen Dächer gedeckt und Schiefertafeln hergestellt werden können. Der Ausdruck **Glattschieferung** (*slaty cleavage*) beschreibt das Gefüge, das für das planare Entzweibrechen jener Gesteine verantwortlich ist, deren Einzelkörner ohne Mikroskop nicht zu sehen sind.

Glattschieferung wird durch die parallele Ausrichtung der flachen Phyllosilikatkörner (Illit, Chlorit, Glimmer) definiert, die zu klein sind, um für das blanke Auge sichtbar zu sein. Unter dem Mikroskop

betrachtet, zeigen diese Schiefer **domänenartige Struktur** (*domainal structure*). Dies bedeutet, dass das Gestein in mikroskopisch kleine, ungeschieferte Regionen (Domänen) aufgeteilt werden kann, die sich von den danebenliegenden, gut orientierten geschieferten Zonen durch unterschiedliche Zusammensetzung und Gefüge unterscheiden. Es können hauptsächlich zwei Arten von Domänen beobachtet werden. Die ungeschieferte ist linsenförmig (bekannt als **Mikrolithons**) und wird von der anderen Domäne umgeben, die wie ein dünner Überzug ist (*cleavage domain*). Die langen Dimensionen der Mikrolithons verlaufen meistens parallel zur Schieferung. In Schnitten senkrecht zur Schieferung bauen überzugsartige, hautähnliche Domänen ein verzweigtes Netzwerk auf. Die Mikrolithons sind reich in den Hauptbestandteilen der Gesteine (gewöhnlich Quarz), ausser an Schichtsilikaten. Die Kristalle zeigen gewöhnlich geringe oder gar keine bevorzugte Orientierung. Die Mikrolithons variieren in Grösse und Anzahl der Körner, die sie enthalten. Die Schieferungsflächen sind gewöhnlich hervorgehoben durch Säume und Anreicherungen von unlöslichen Rückständen (oft Oxide). Sie sind reich an kleinsten, flockigen oder tafelförmigen Mineralien (Glimmer, Chlorit und Talk), deren parallele, planare Anordnung die planare Schieferungsdomäne definiert. Die Glattschieferung ist am besten in feinkörnigen Schiefen zu beobachten, die sich bei niedriger Metamorphose verformten.

Schieferung

Bei höher metamorphen Bedingungen entsteht ein Gefüge ähnlich wie bei der Glattschieferung, doch normalerweise grobkörniger, weil die Kristallisation wichtiger wird. **Schieferung** ist ein Ausdruck, um die Foliation in Gesteinen zu beschreiben, die eine so grosse Korngrösse aufweisen, dass einzelne Minerale schon mit blossen Auge unterschieden werden können. **Phyllite** sind Gesteine, die von der Korngrösse her zwischen den feinkörnigen **Schiefern** (*slates*) und den grobkörnigen **Schiefern** (*schists*) liegen. Das Gefüge in Phylliten kann entsprechend mit **Glattschieferung** (*slaty cleavage*) oder Schieferung (*schistosity*) beschrieben werden.

Runzelschieferung (Krenulationsschieferung)

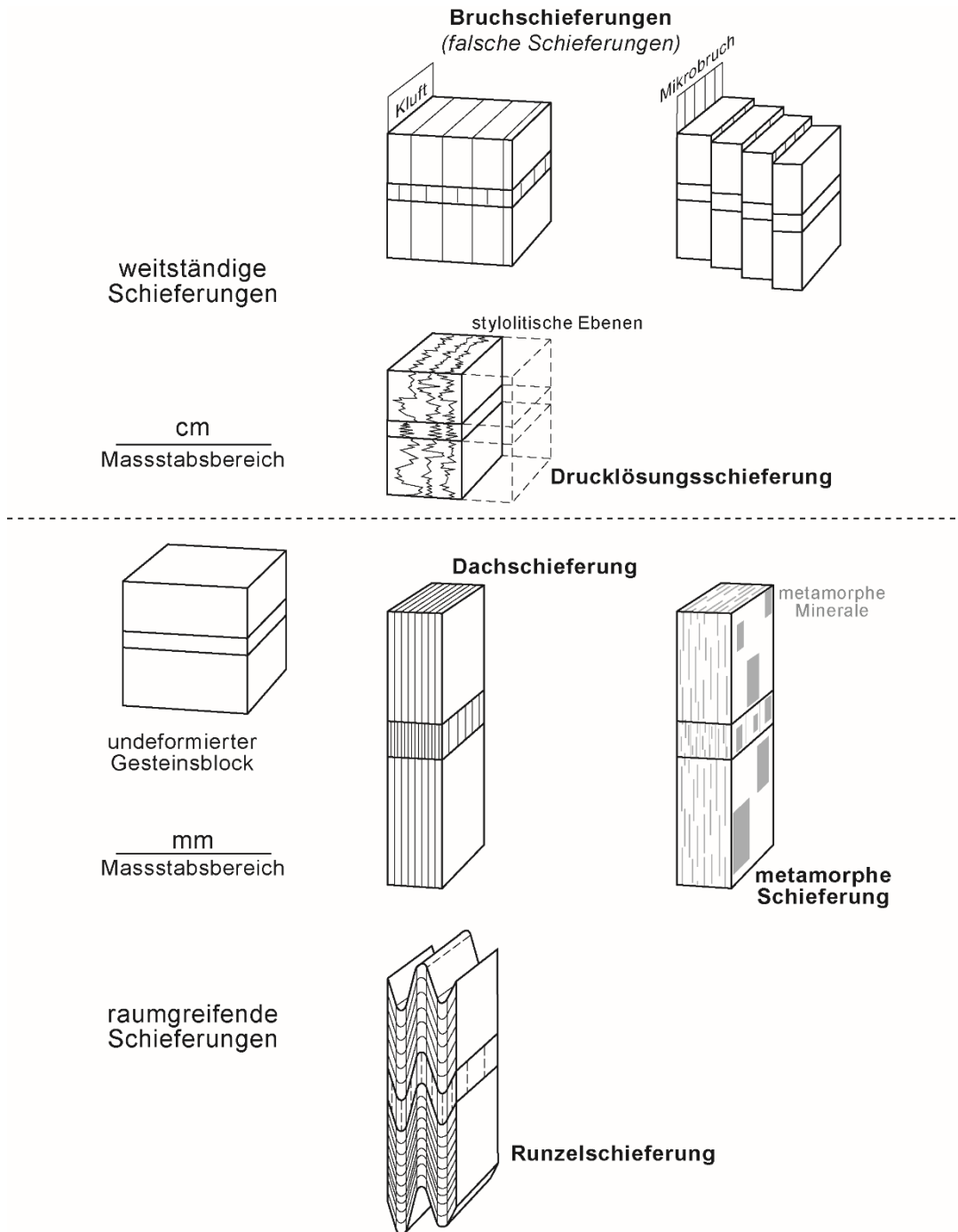
Runzelschieferung (*crenulation cleavage*) entsteht, wenn eine frühere Foliation im Mikrobereich gefaltet (**krenuliert** oder gerunzelt) wird. Die kleinen Knitterfalten können sowohl symmetrisch als auch asymmetrisch sein; jedoch sind die asymmetrischen im Allgemeinen üblicher. Die Runzelschieferung ist gekennzeichnet durch die parallelen Schenkel der Mikrofalten oder durch Mikrobrüche, die parallel zu den Faltschenkeln entstanden sind. So wird diese Art von Schieferung auch mit **strain slip cleavage** umschrieben.

In einigen Gebieten entstanden ungefähr gleichzeitig zwei Runzelschieferungen, die sich im Winkel von 60° bis 90° schneiden. Solche Flächen werden als **konjugierte Runzelschieferung** bezeichnet und können mit konjugierten Falten oder Knickfalten (*kinks*) assoziiert sein. Die Runzelschieferung wird in allen metamorphen Graden gefunden.

Differenzierte Stoffbänderung

Die Foliation kann definiert werden als alternierende Lagen mit unterschiedlicher Zusammensetzung, da aufgrund der Metamorphose die chemischen Komponenten des Gesteins neu organisiert werden und neue, anders orientierte Minerale wachsen. Die Foliation, welche durch die im Handstück sichtbaren Lagen unterschiedlicher Zusammensetzung zustande kommt, wird **differenzierte Stoffbänderung** (*differentiated layering*) genannt. Glattschieferung, Runzelschieferung und Schieferung (*schistosity*) können alle differenziert sein.

Differenzierte Stoffbänderung wird in grobkörnigen, granularen metamorphen Gesteinen jeden Grades gefunden. In hochmetamorphen Gesteinen wird sie gewöhnlich als **Gneisbänderung** (*gneissic layering*) bezeichnet, sie ist meistens durch abwechselnd mafische und felsische Schichten charakterisiert. Die Gneisbänderung kann eine mehr oder weniger stark veränderte Schichtung sein und somit die ursprünglichen, sedimentären Zusammensetzungen widerspiegeln. Sie kann aber auch nur eine Foliation sein, welche vollständig durch Differentiation während der Verformung entstand.

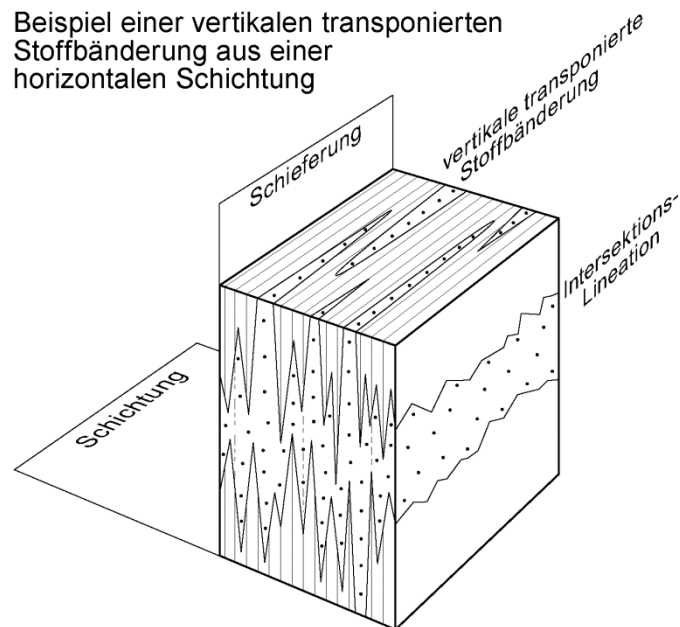


Transponierte Stoffbänderung

Transponierte Stoffbänderung (*transposition layering*) ist im weiten Sinn definiert durch eine präexistierende Bänderung vor der Verformung, sei es nun eine Schichtung oder eine Foliation.

In einer feingeschichteten Abfolge von Gesteinen haben aufeinanderfolgende Schichtlagen unterschiedliche Kompetenz. Bei intensiver Verformung können Isoklinalfalten entstehen, bis deren Schenkel ausgedünnt und parallel zur Schieferung zu liegen kommen. Die Faltscharniere sind spitz und die Falten werden **Intrafolialfalten** genannt. Schliesslich können die Scharniere entlang der gestreckten Schenkel weggerissen werden. In Gebieten, in denen die Verformung stark fortgeschritten ist, sind die Scharnierfalten undeutlich. Dort gibt es praktisch keine Änderungen mehr in der Richtung der Transpositions-Stoffbänderung.

Beispiel einer vertikalen transponierten Stoffbänderung aus einer horizontalen Schichtung



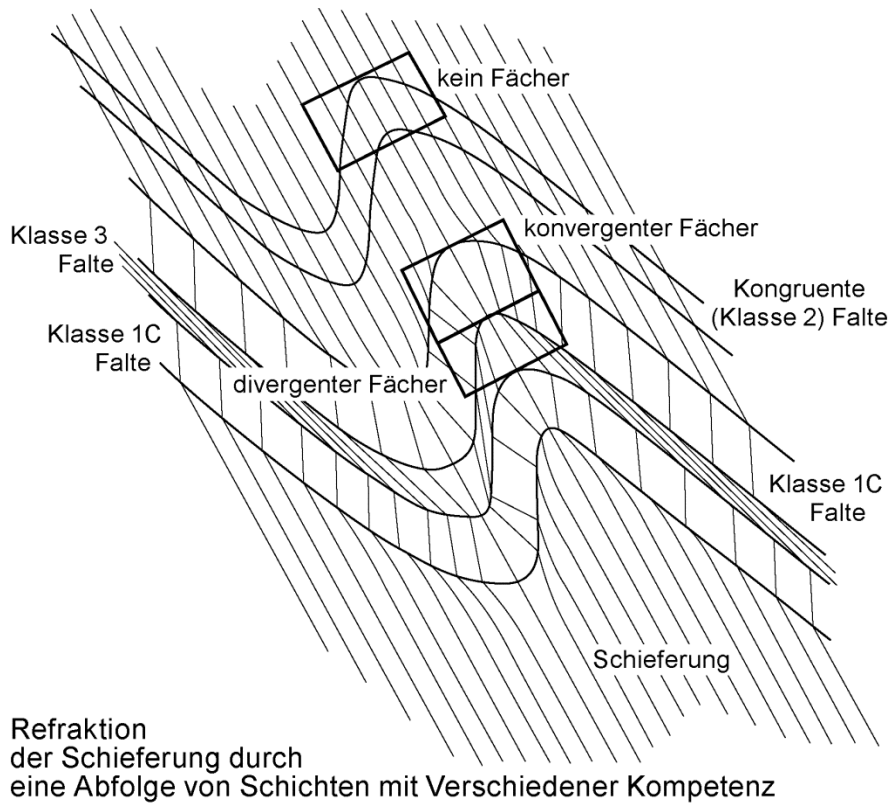
Die Transpositions-Gesteinsabfolge kann irrtümlich als normale sedimentäre Abfolge interpretiert werden. Wie auch immer, die **scheinbare Schichtung** (*pseudo-bedding*) hat keine wirkliche stratigraphische Bedeutung; Rückschlüsse auf die stratigraphische Sequenz, sowie die plumpe Disposition der stratigraphischen Einheiten und ihrer Verjüngungsrichtungen können völlig in die Irre führen. Transposition tritt in allen Grössen auf, vom Handstück bis zu grösseren Strukturen mit einer Ausdehnung über mehrere Kilometer.

Achsenebenschieferung

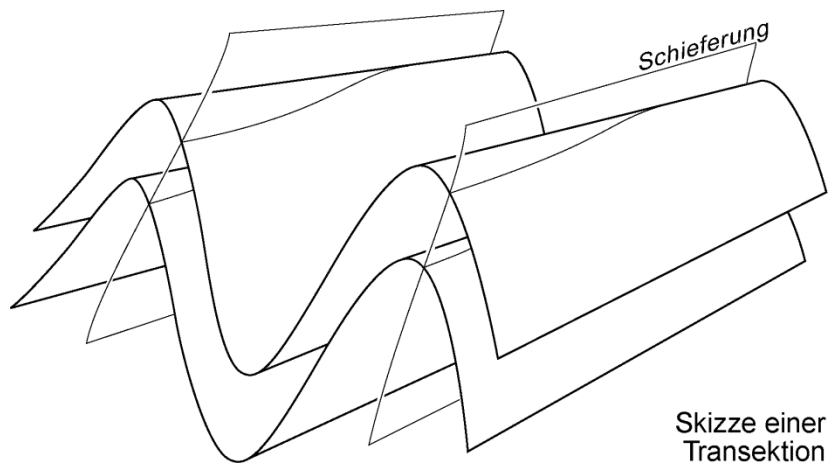
Bestimmung

In gefalteten Gesteinen ist die Schieferung im Allgemeinen zu den gefalteten Schichtoberflächen geneigt und ziemlich systematisch, parallel zur Achsenebene der Falte, ausgerichtet. Sie wird deshalb **Achsenebenschieferung** (*axial plane foliation*) genannt. Es ist indessen erwähnenswert, dass Achsenebenschieferung nicht strikt parallel zu den Faltenachsen verläuft, sondern dass jene systematisch vom Parallelismus abweichen kann. Die Schieferung baut zum Beispiel **Schieferungsfächer** (*fan*) auf, d.h. sie wechselt die Richtung durch Schichten unterschiedlicher Kompetenz, was meist auf eine Änderung der Zusammensetzung zurückzuführen ist.

Die Änderung der Winkelbeziehungen von Schicht zu Schicht zwischen Schichtung und Schieferung wird als Refraktion bezeichnet. Der Effekt der Refraktion ist ähnlich wie der des Lichtes, das an der Grenze zweier unterschiedlicher Medien gebrochen wird. Der Winkel zwischen der Schichtung und Schieferung ist grösser in kompetenten als in inkompetenten Gesteinen. Die Schieferung kann **konvergent** oder **divergent** sein, je nachdem ob die Schieferungsflächen gegen den Kern der Falte konvergieren oder divergieren. In gewissen Schichten von Falten ist es tatsächlich unmöglich, eine Schieferung zu finden, die parallel zur Achsenfläche verläuft.



Auch wenn die Schieferung beinahe mit der Faltenachsebene im Profil zusammenfällt, so kann die Schieferung in der dritten Dimension zur Scharnierlinie geneigt sein. Dies nennen wir **Transektion** (*transection*).

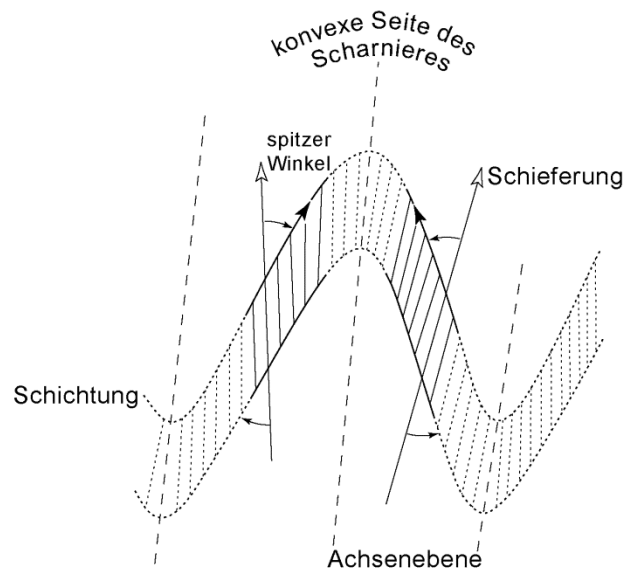


Ungeachtet der Tatsache, dass die Schieferung, die gemeinsam mit der Bildung von Falten entstanden ist, generell leicht divergent zur Achsenebene orientiert ist, spricht man von der Achsenebenenschieferung im Sinne einer deskriptiven Annäherung an die Wirklichkeit.

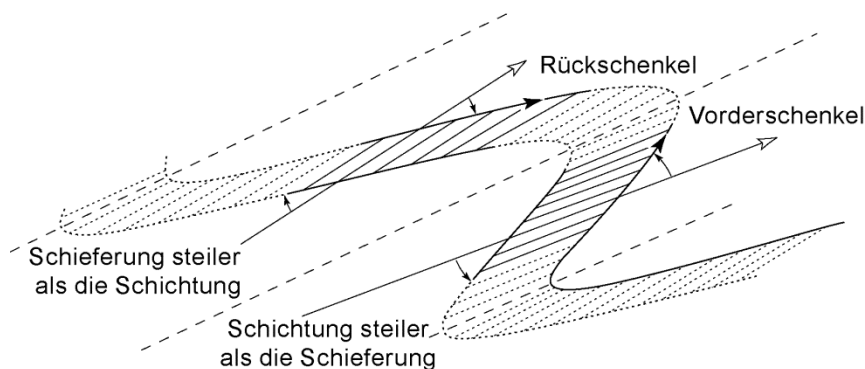
Nutzung der Achsenebenenschieferung in der Strukturanalyse

Zudem zeigt die Beziehung zwischen den synchron gebildeten Falten und Achsenebenenschieferungen einen solch klaren Zusammenhang, dass wir die **Schichtungs-Schieferungs-Winkelbeziehungen** dazu brauchen, praktische Probleme bei der Strukturkartierung zu lösen. Wenn die Falten grösser als der Aufschluss sind, kann anhand des Winkels zwischen Schieferung und Schichtung sofort gesagt werden, auf welchem Schenkel bezüglich der grossen Falte der Aufschluss liegt.

Betrachten wir eine schematische Antiform und ihre assoziierte Schieferung im Kartenmassstab. Die Schieferung ist gegenüber der Schichtung auf dem linken Faltenschenkel um einen bestimmten Winkel im Gegenuhrzeigersinn, auf dem rechten Schenkel im Uhrzeigersinn gedreht. Die geometrische Anordnung zwischen Schichtung und Schieferung ist sehr hilfreich, wenn festgestellt werden soll, ob die Schichten normal oder überkippt im Aufschluss liegen. Im Normalschenkel ist die Schieferung steiler als die Schichtung in derselben Richtung; umgekehrt steht es im Verkehrtsschenkel, in dem die Schichtung steiler ist als die Schieferung. Es ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass diese Regel konsistent ist zwischen parasitären S, M und Z-(Klein)Falten und der dazugehörigen Grossfalte. Mit anderen Worten, die Schichtungs-Schieferungs-Winkelbeziehungen sind massstabsunabhängig.



Charakteristik der Schieferungs- Schichtungs- Winkelbeziehung in einer Falte



Andere Schieferungen als Achsenebenenschieferungen

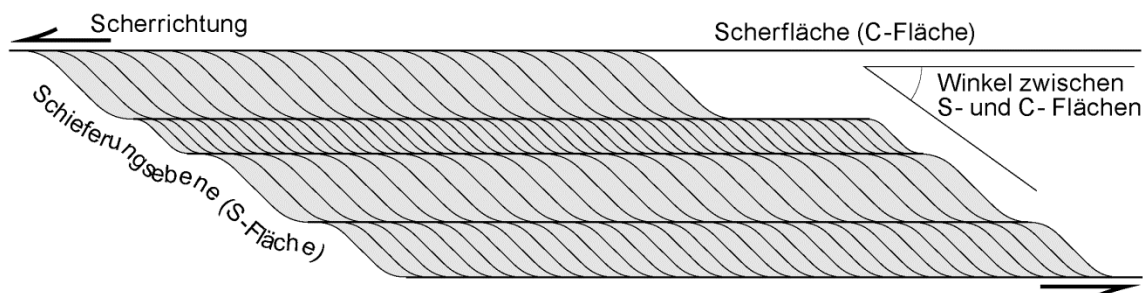
Bemerkung: nicht alle Schieferungen sind mit Faltung assoziiert!

Schichtungsfoliation

Häufig kommt es vor, dass eine Schar von Schieferungsebenen parallel zur wirklichen Schichtung liegt. Dies wird oftmals **Schichtungsfoliation** (*bedding foliation*) genannt. Sie kann durch enge Faltung hervorgerufen werden, bei der ein sehr spitzer Winkel zwischen der Achsenebenenschieferung und der sedimentären Schichtung auftritt. Schichtungsfoliation kann auch auf vertikale Kompression der Sedimente unter der statischen Last der darüberliegenden Schichten zurückgeführt werden. Im letzteren Fall ist die Foliation nicht achsenparallel zu irgendeiner Phase der Deformation. Stattdessen entsteht die Foliation meistens aus orientierter Kristallisation während der Diagenese.

Foliation durch Scherung

Wenn eine duktile Scherzone sich in einem massiven Gestein (z.B. Granit) entwickelt, so ist die sich entwickelnde Foliation nicht assoziiert mit den synchron entstehenden Falten. Die Foliation zeigt in diesem Fall allerdings eine typische, progressive Rotation mit zunehmender Intensität der Foliation. Dadurch kommen sich die Foliationsflächen gegen das Verformungsintensitätsmaxima der Scherzone immer näher. Die Foliationsflächen sind beidseits der Scherzone symmetrisch zueinander angeordnet. Die Symmetrie weist eine sigmoidale Form auf, anhand derer man die relative Bewegung der Scherung ableiten kann.



Beobachtung eines Mylonites in der XZ-Ebene des Verformungsellipsoids

Zusammenfassung

Es wird angenommen, dass die duktile Abplattung die Hauptursache vieler, wenn nicht aller Foliationen ist.

Die Hauptursache der Foliation ist das Vorhandensein plattenförmiger Minerale, hauptsächlich Schichtsilikate, die parallel zur Foliation angeordnet sind. Achsenebenenschieferungen kommen in metamorphen Gesteinen aller Grade vor. Der Foliationstyp hängt von der Zusammensetzung des Gesteins ab. Unterschiedliche Typen der Foliation werden mit zunehmender Metamorphose immer stärker ausgebildet. Sie sind jedoch auch in niedriggradigeren Gesteinen üblich.

Sekundäre linear strukturelle Elemente

Lineation ist ein allgemeiner Begriff, um irgendeine lineare Struktur in einem Gestein zu beschreiben. Eine Lineation kann eine ursprünglich vulkanische oder sedimentäre Struktur sein, wie eine Reihe länglicher Kieselsteine oder Kalifeldspat-Porphyroblasten, deren lange Kornachsen alle parallel orientiert sind. Eine Lineation kann aber auch eine sekundäre Struktur sein, die als Folge einer Deformation entstanden ist. In der Strukturgeologie befassen wir uns hauptsächlich mit letzterem. Lineationen sind in verformten Gesteinen überall zu finden, und es ist üblich, dass eine einzige Deformation verschiedene Lineationen mit verschiedenen Orientierungen innerhalb einer gegebenen Schieferungsebene produziert. Viele Lineationen stehen mit der Schieferung im Zusammenhang und liegen tatsächlich in dieser Fläche.

Lineation ist eines der bedeutendsten Gefügeelemente und sollte deshalb in allen vollständigen strukturgeologischen Karten enthalten sein.

Terminologie

Rutschstriemung (auch: Gleitstriemung, Rutschharnisch Striemen)

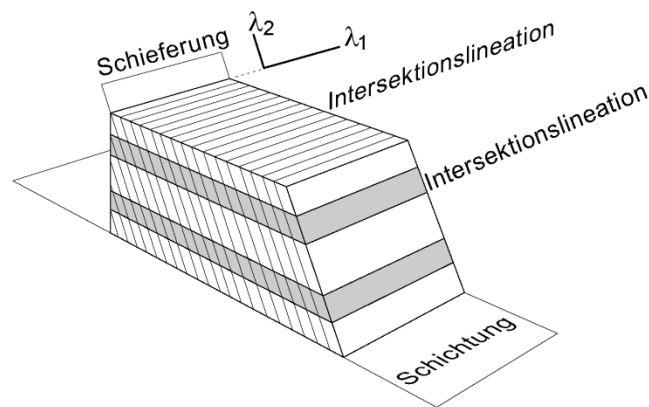
Rutschstriemen sind das direkte Resultat des Reibungsgleitens und stellen eine häufige und weitverbreitete, lineare Struktur dar, die auf Verwerfungsebenen auftritt. "Rillen und Grate" (*grooves and ridges*) oder **Striemen** (*striations*) können verwendet werden, um die diskontinuierliche Relativbewegung der beiden Bruchschollen entlang der Verwerfung festzuhalten.

Rutschstriemen (*slickenside striae*) können auf Schichtflächen gefunden werden, die in den Prozess der **Biegegleitfaltung** (*flexural slip folding*) involviert worden sind. Sie lassen darauf schliessen, dass mit zunehmender Einengung der Falten, die aufeinanderfolgenden Schichten übereinander weggeglitten sind. Diese Art von Lineationen bildet oft einen grossen Winkel mit der Faltenachse

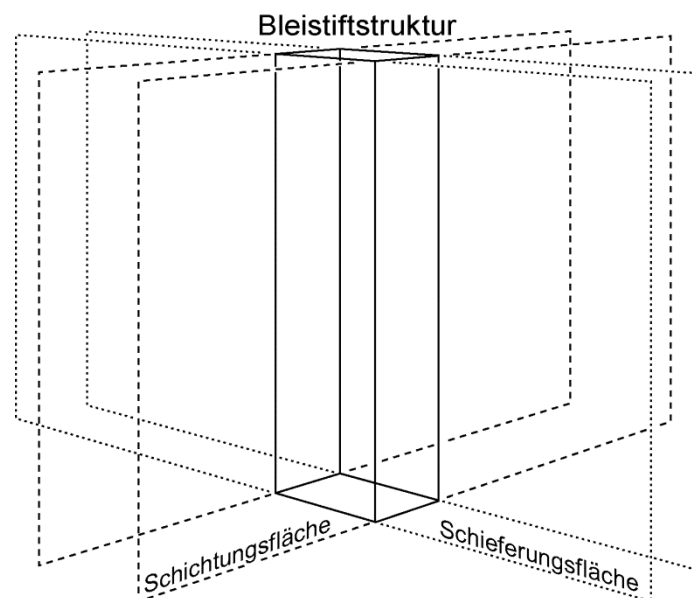
und zeigt immer wieder, dass die nächst höher liegenden Schichten sich relativ zu den tiefer liegenden Schichten zur Antiklinalachse hinbewegen. Rutschstriemen sind nicht penetrativ ausgebildet und sind deshalb kein Gefügeelement.

Intersektionslineationen

Da sich zwei beliebige planare Ebenen in einer Linie schneiden, kann in den meisten Gesteinen, die gefaltet und gleichzeitig geschiefert wurden, ein **Intersektionslinear** (*intersection lineation*) zwischen Schichtung und Faltenachsenenebenenschieferung gefunden werden. Die Spur der Schichtung erscheint häufig als farbiges Streifenmuster auf den Schieferungsebenen von geschieferten Gesteinen. Schichtungs/Schieferungs-Intersektionen sind meistens parallel zu den lokalen Faltenachsen. Intersektionslineationen können sich auch aufgrund der Intersektion zweier Schieferungen gebildet haben, zum Beispiel bei der Intersektion einer Runzelschieferung mit der zuvor gebildeten sekundären Schieferung. Je planarer die Oberflächen in einem Aufschluss sind, desto mehr Intersektionslineationen können gefunden werden. Die Spur jeder beliebigen Ebene auf irgend einer zufälligen Kluftfläche produziert eine lineare Struktur, die bei der Strukturanalyse allerdings ohne Bedeutung ist; direkte Messungen einer Lineation müssen auf der Schieferungsebene erfolgen, die zur selben Verformungsperiode gehört.



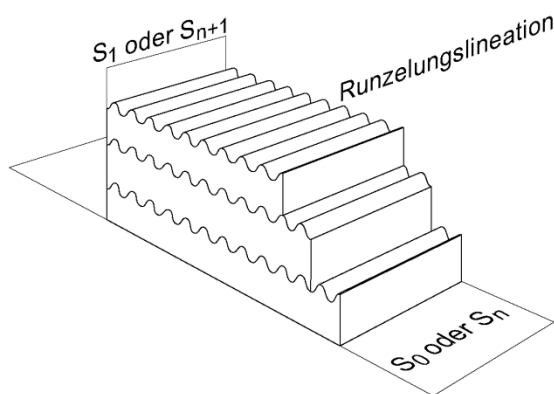
Wenn die Achsenebenenschieferung und die Schichtung (Stoffbänderung) stark ausgebildet sind, so bricht das Gestein häufig in längliche Gesteinsstücke. Letzteres tritt hauptsächlich im Bereich des Scharniers auf. Man spricht von **Stängel- oder Griffelstrukturen** (*pencil structure*).



Intersektionslineare und Griffelstrukturen werden häufig verwendet, um die Orientierung der Faltenachse zu bestimmen, wenn letztere nicht aufgeschlossen ist.

Faltenachsen als Lineationen

Faltenachsen sind lineare Strukturen. Intensive kleinräumige Faltung oder Krenulation mit parallelen und regelmässigen Faltenachsen führt zu einer ausgeprägten, linearen Struktur. Das **Krenulationslinear** (*crenulation lineation*) kann ein Gefügeelement sein, das parallel zur dazugehörigen Achsenrichtung verläuft. Zwei oder mehr Lineationen können sich gegenseitig schneiden, manchmal auf eine konjugierte Art und Weise, wobei verschiedenartigste kleinräumige Interferenzmuster entstehen können.



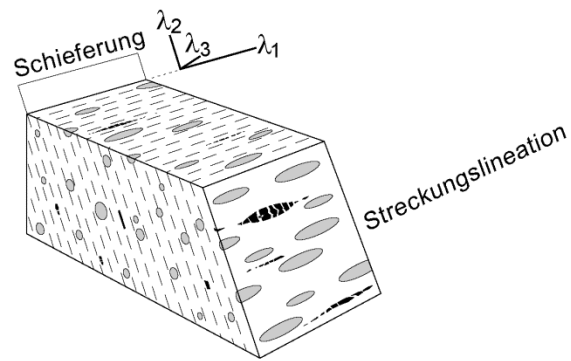
Mullionstrukturen und elongierte, monomineralische Aggregate (Rods)

Mullions sind grobe Strukturen, die im ursprünglichen Gesteinsmaterial entstanden sind, im Gegensatz zu Strukturen, die durch Ausscheidungen von eingeführtem Material zustande kamen. Das Mullion ist eine säulenartige Wellung einer kompetenten Schichtoberfläche und ist äusserst zylindrisch. Im Profil ist es allerdings komplex aufgebaut: es hat ein geripptes oder gefurchtes Aussehen, mit einer individuellen Oberflächenbeschaffenheit, die entlang der Längsachse des Mullions äusserst konstant ist. Mullions sind häufig kuspalt ausgebildet und haben im Allgemeinen gekrümmte, konvexe Oberflächen. Die einzelnen Mullions sind gewöhnlich durch schmale, scharfe und gegen das Innere der Mullions zu abgeschlossene Scharniere gekennzeichnet.

Der Begriff **rod** ist ein Ausdruck, der die Morphologie beschreibt für stabförmige (oder bleistiftförmige) Körper aus Quarz oder einem anderen ausgeschiedenem Mineral (Calcit, Pyrit, usw.), vorkommend in metamorphen Gesteinen aller Grade. Ein **rod** ist ein monomineralisches, längliches Aggregat, das aus einem andern Material als jenes des umgebenden Gesteins zusammengesetzt ist. Im Profil können **rods** jede beliebige Form haben, elliptisch bis unregelmässig, oder die einer zerstückelten Falte.

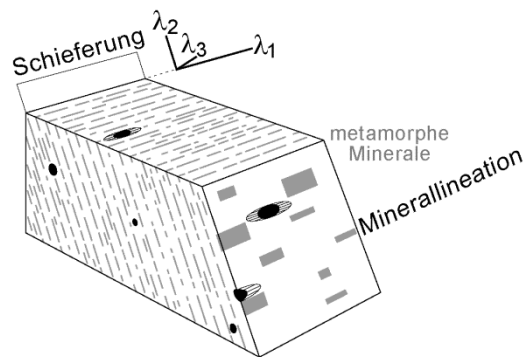
Metrische Ausrichtung von Objekten

Eine wichtige Art der Lineation entsteht durch die parallele Anordnung von Objekten, die infolge Deformation eine gestreckte Form angenommen haben. Die Lineation kann gebildet werden durch individuelle detritische Körner jeder Grösse, die verformt und/oder rotiert wurden. Ooide und Sphärolithe sind vor der Deformation im Allgemeinen recht kugelförmig und müssen deshalb zur Hauptsache verformt worden sein, bevor ihre ellipsoide Form als **Streckungslinear** (*stretching lineation*) bezeichnet werden kann (auch **Extensionslinear**). Solche Lineationen entstehen auch bei Geröllen oder Geröllschichten. Extensionslineare liegen meistens in einem Winkel um 90° zur dazugehörigen Faltenachse ("**Querlineation**", *transverse lineation*), können örtlich jedoch parallel zur Faltenachse ausgerichtet sein. Es gibt Beispiele, bei denen Gerölle mit ihrer kurzen Achse senkrecht zur Schichtung orientiert sind, wobei die lange Achse im Faltschenkelbereich senkrecht zur Faltenachse und im Bereich des Faltscharniers parallel zur Faltenachse liegt.



Minerallineationen

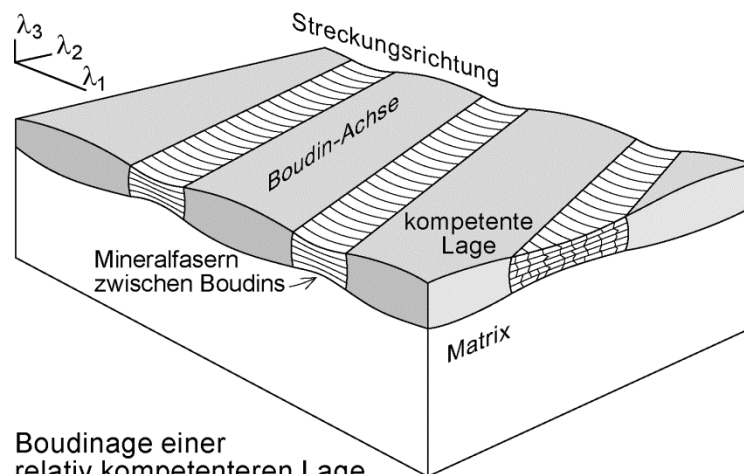
Minerallineationen sind gekennzeichnet durch eine bevorzugte Orientierung individueller, länglicher oder geplätteter Kristall- oder Mineralaggregate (z.B. lange Amphibolkristalle, Silimanitnadeln) oder durch gelängte und subparallel zur Schieferungsebene ausgerichtete Kristalle. Sie stellen ein penetratives Gefügeelement in einem Gestein dar. Minerallineationen können zu den dazugehörigen Falten sowohl parallel als auch geneigt sein.



Druckschatten (*pressure shadows*) oder **“Drucksäume”** (*pressure fringes*) bilden Strukturen eines mineralischen Aggregates, welches einen Beitrag zur Lineation eines Gesteines leisten kann. Druckschatten bestehen häufig aus spindelförmigen Mineralaggregaten. Solche Strukturen beinhalten meistens Aggregate von neugewachsenen Körnern, die auf den gegenüberliegenden Seiten eines bereits existierenden, kompetenteren Porphyroblasten oder detritischen Korns wachsen und eine elongierte Struktur produzieren. Sie sind meistens parallel zur Schieferung angeordnet und definieren eine Lineation.

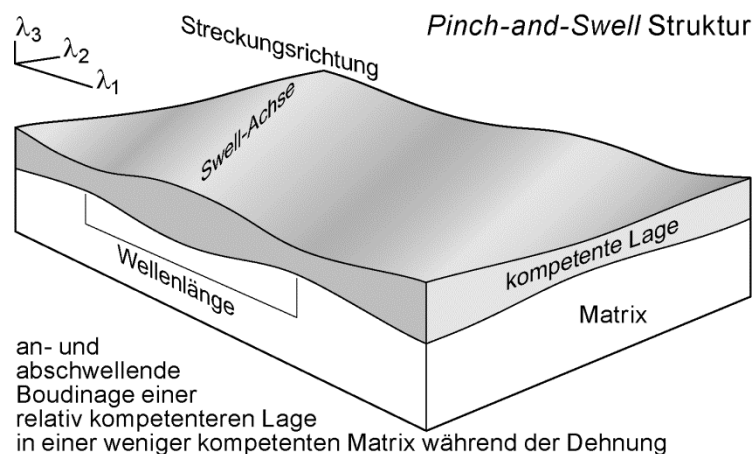
Boudinage

Unter Boudinage versteht man einen präexistierenden, im Allgemeinen kompetenteren Körper, der infolge Streckung innerhalb einer inkompetenten Matrix segmentiert wurde. So wird eine harte Schicht oder ein Gesteinsgang auf eine typische Art und Weise in eine Serie gestreckter und aufgereihter Blöcke zerbrochen (deren zylinderförmige Form den Namen **Boudin** herbeiführte; das Wort Boudin kommt ursprünglich aus Frankreich, wo man damit an einer Schnur aneinandergereihte Würste bezeichnet).



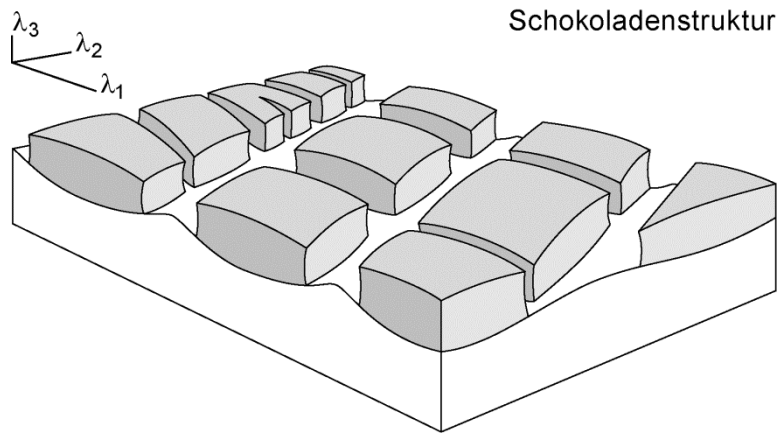
Boudinage einer relativ kompetenteren Lage in einer weniger kompetenten Matrix während der Dehnung

In niedriggradigem Gestein sind die Boudins meistens getrennt und bilden so eine **pull-apart** Struktur. Bei höhergradigem Gestein sind die kompetenten Schichten meistens nicht zerbrochen. Dann sind die Boudins durch schmale Einbuchtungen, die **Boudinhäule** (*necks*), getrennt und die daraus entstehende Struktur ist als **pinch-and-swell** ("an- und abschwellige Strukturen") bekannt. Pinch-and-swell- und pull-apart-Strukturen können überall gemeinsam vorkommen, da sie tatsächlich nur vom Kompetenzkontrast zwischen der härteren (kompetenteren) und weicheren (inkompetenteren) Schicht abhängen. Objekte wie Fossilien, Gerölle und Mineralkörner können ebenfalls in kleine boudinförmige Strukturen deformiert werden (*linear streaking of minerals*).



an- und abschwellige Boudinage einer relativ kompetenteren Lage in einer weniger kompetenten Matrix während der Dehnung

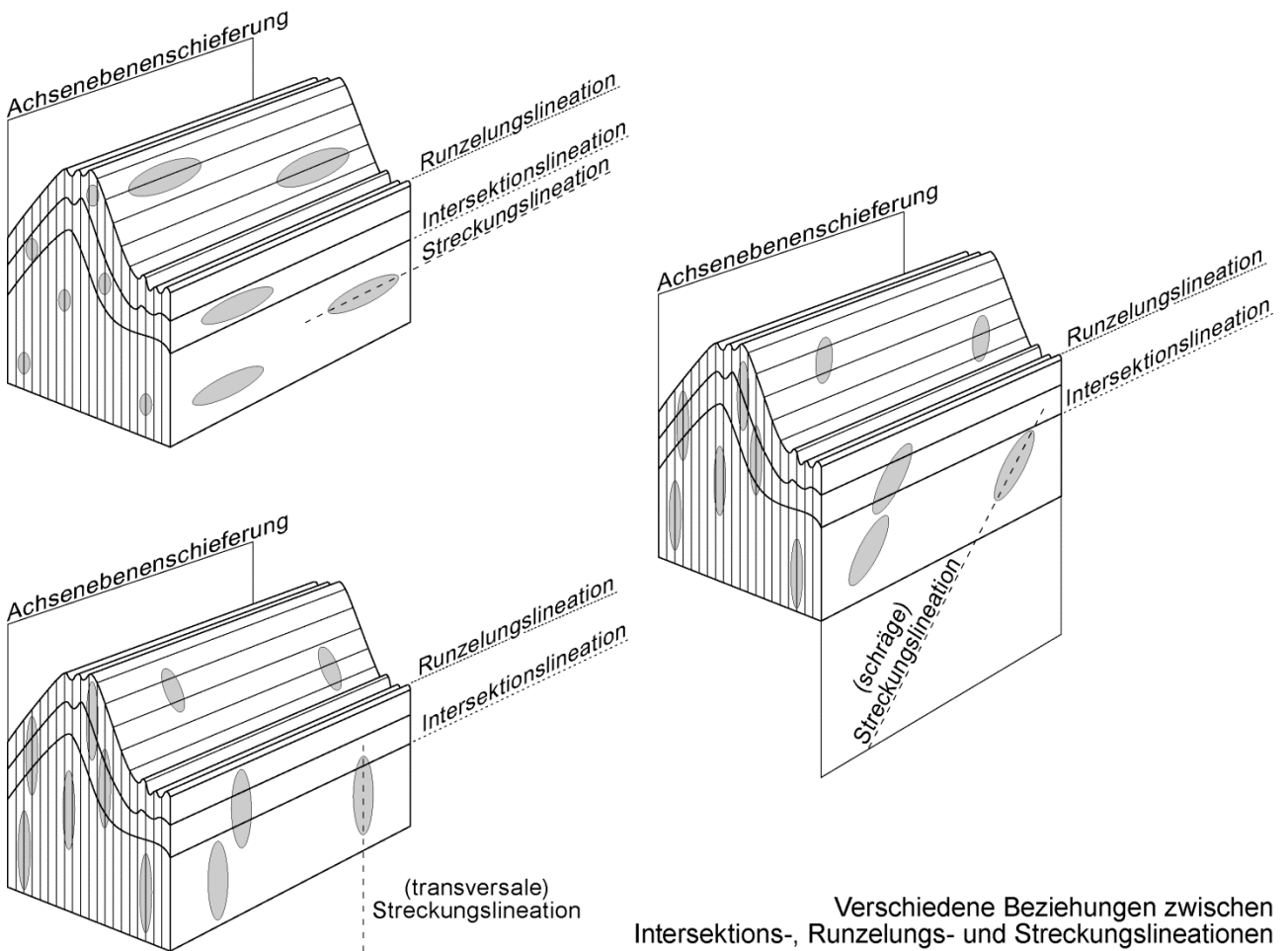
Boudins sind gewöhnlich linear und parallel zur Faltenachse angeordnet. Eine Schicht kann indessen in zwei Richtungen segmentiert sein. Dabei werden Boudins gebildet, die in beiden Streckungsrichtungen ähnliche Längendimensionen annehmen. Gestreckte Formen kommen dabei weniger vor. Diese Art von Boudinage nennt man **chocolate-tablet boudinage** ("Schokoladenstruktur"). Sie erscheinen deshalb im Aufschlussbereich nicht penetrativ.



Zusammenhang zwischen Lineationen und Faltenachsen

Die meisten Lineationen sind innerhalb der Schieferung gebildet und mit derselben assoziiert. Dies ist teilweise dort erkennbar, wo beide durch Mineralreorientierungen und Mineralneubildungen gebildet wurden. Deshalb sind sowohl planares als auch lineares Gefüge gleichzeitig Aspekte derselben, dreidimensionalen Geometrie.

In zahlreichen Beispielen ist die Streckungslineation parallel oder geneigt zur Faltenachse. Die Anwesenheit gestreckter Boudins weist darauf hin, dass die Streckungsrichtung parallel zur boudinierten Schicht und senkrecht zur Länge der Boudins ist. Die Präsenz von *chocolate-tablet* Boudinage weist darauf hin, dass alle Richtungen innerhalb der boudinierten Schicht Streckungsrichtungen sind. Die aus Boudins ermittelten Streckungsrichtungen der Verformung treffen zumindest für einen Teil der Deformationsgeschichte zu.



Verschiedene Beziehungen zwischen Intersektions-, Runzelungs- und Streckungslineationen

Zusammenfassung

Eine geeignete Unterteilung von Lineationen in verschiedene Gruppen kann auf folgende Art gemacht werden:

- Lineationen, welche die Bewegungsrichtung entlang einer Fläche anzeigen (z.B. Rutschstriemungen) oder einer ganzen Bewegungszone (Streckung in Scherzonen).
- Achsen von parallelen Krenulationen oder kleinräumigen Falten, sowie Intersektionslineare von verschiedenen Ebenen, die keine spezifische Beziehung, weder zur finiten Hauptachse der Verformung, noch zur Gesamtbewegung haben.

Achtung: Lineare Strukturen können nur dann zur Orientierung der Faltenachsen oder zur Bestimmung der Bewegungsrichtung benutzt werden, wenn ihre geometrische Beziehung mit den Falten oder Scherzonen an kritischen Aufschlüssen (Schlüsselstellen) nachgewiesen werden kann.

KONZEPT DER VERFORMUNG

Ein fester Körper, der äusseren Kräften ausgesetzt ist, tendiert dazu, sich zu verschieben oder zu verändern. Diese Verschiebung kann vier verschiedene Arten beinhalten:

- 1) Ein Körper wird gezwungen, seine Position zu verändern; er erfährt eine **Translation**.
- 2) Ein Körper wird gezwungen, seine Orientierung zu verändern; er erfährt eine **Rotation**.
- 3) Ein Körper wird gezwungen, seine Grösse (oder sein Volumen) zu verändern; er erfährt eine **Dilatation** (*dilation*).
- 4) Ein Körper wird gezwungen, seine Form zu verändern; er erfährt eine **Verformung** (*distortion*).

Diese Bewegungen werden oft als **Rutschen** (*slip*) oder **Fliessen** (*flow*) bezeichnet. Die Unterscheidung ist vom Massstab abhängig. Rutschen beschreibt eine Bewegung auf einer diskreten Fläche, wohingegen Fliessen eine Bewegung darstellt, die das Gestein durchgehend als Ganzes erfasst, d.h. jeden Materialpunkt des Gesteins.

Diese vier grundlegenden Bewegungen können kombiniert werden.

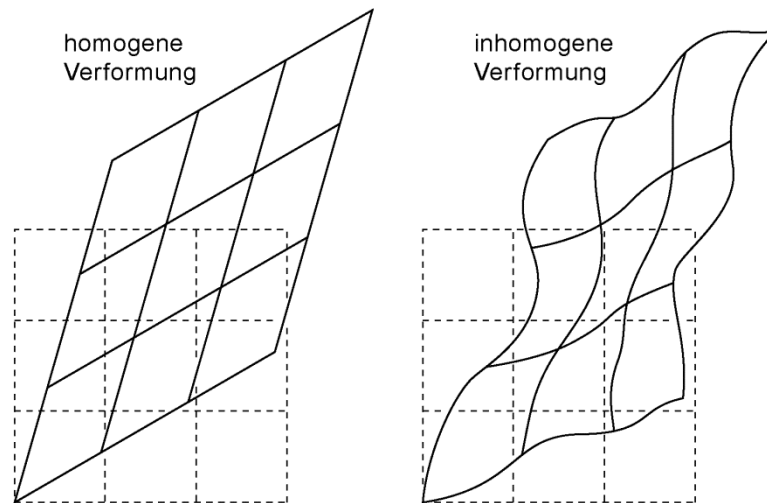
- Während einer **Festkörperdeformation** (*rigid body deformation*) werden Gesteine derart versetzt und/oder rotiert, dass sie ihre ursprüngliche Grösse und Form beibehalten.
- Werden einige oder alle auf den Körper einwirkenden Kräfte vom Körper absorbiert, anstatt ihn zu bewegen, dann wird der Körper **gespannt** (*stressed*). Die Kräfte bewirken dann eine Partikelbewegung innerhalb des Körpers, so dass der Körper seine Form und/oder Grösse verändert und somit **verformt** (*deformed*) wird.

Die Änderung der Position von Punkten in einem Körper durch Verlagerung von Material resultiert in einer **Verformung** (*strain*). Verformung ist eine **nicht-Festkörperdeformation** eines Gesteins infolge Krafteinwirkung. Die quantitative Bestimmung der Änderung von Form und Grösse aufgrund von Deformation ist der Fokus der **Verformungsanalyse** (*strain analysis*).

Verformungsanalyse

Homogene – inhomogene Verformung

Das Konzept der finiten Verformung ist meistens für Materialien nützlich, in denen die Deformation als einheitlich und homogen betrachtet werden kann. Eine Verformung ist homogen, wenn alle Teile eines Körpers die gleiche Intensität, Art und Richtung der Verformung erfahren. Ein typisches Kriterium ist, dass gerade und parallele Linien und Flächen gerade und parallel bleiben. Ist die Verformung im Körper unterschiedlich von Ort zu Ort, dann ist die Verformung inhomogen. Gerade Linien und Flächen werden gekrümmt und parallele Linien und Flächen bleiben nicht parallel. Linien und Flächen können während einer inhomogenen Verformung auch zerbrochen werden.



Fortschreitende Deformation – Verformungszustand

Fortschreitende Deformation (*progressive deformation*) bezieht sich auf die Bewegung eines Körpers von seinem unverformten Anfangszustand bis zu seinem verformten Zustand. Ein **Verformungszustand** (*state of strain*) eines Körpers ist die gesamte vom Körper aufgenommene Verformung bis hin zum Zeitpunkt der Messung, d.h. die Summe aller verschiedenen Formen und Positionen, die vom Körper durchlaufen wurden. Die Verformungszustände, die ein Körper während der progressiven Deformation durchläuft, definieren den **Verformungspfad** (*strain path*). Die Verformung, die von einem Zustand zum nächsten stattfindet, wird **inkrementelle Verformung** (*incremental strain*) genannt. Wenn die Zeit zwischen zwei Zuständen gegen null geht, wird die infinitesimal kleine Menge an Verformung infinitesimale Verformung genannt. Obwohl alle Verformungszustände das Resultat einer progressiven Deformation sind, liefert der Endzustand der Verformung keinerlei Information über den speziellen Verformungspfad, den der Körper durchlaufen hat.

Verformungsmessung

Verformung kann auf zwei Arten gemessen werden:

- durch die Änderung der Länge einer Linie: dies ist die lineare Verformung oder **Extension**.
- Durch die Änderung eines Winkels zwischen zwei Linien: dies ist die Winkelverformung oder **Scherverformung** (*shear strain*).

Jede Verformungsgeometrie kann als Kombination dieser beiden Änderungen gemessen werden. Sie sind wie folgt definiert:

Extension

$$\varepsilon = (\ell - \ell_0) / \ell_0$$

wobei ℓ_0 die ursprüngliche Länge und ℓ die neue Länge einer Referenzlinie in einem Gestein ist. Ein positiver Wert bedeutet **Verlängerung** (*elongation*) und ein negativer Wert bedeutet **Verkürzung** (*shortening*).

Für eine infinitesimale Verformung schreibt man: $\varepsilon = d\ell / \ell$.

Für Deformationen im grossen Massstab ist die Änderung der Länge einer Linie durch die **Dehnung** (*stretch*) gegeben, die das Verhältnis der deformierten Länge zur nicht deformierten Länge ist:

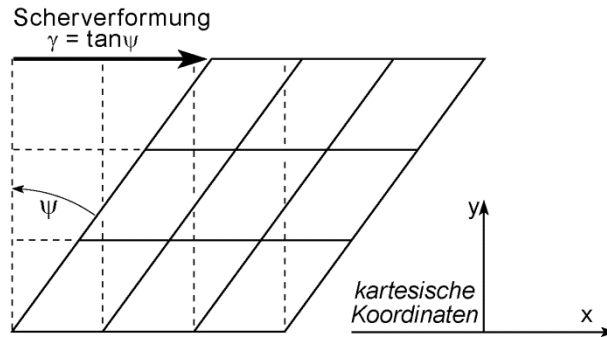
$$\ell / \ell_0 = (1 + \varepsilon)$$

Scherverformung

$$\gamma = \tan \psi$$

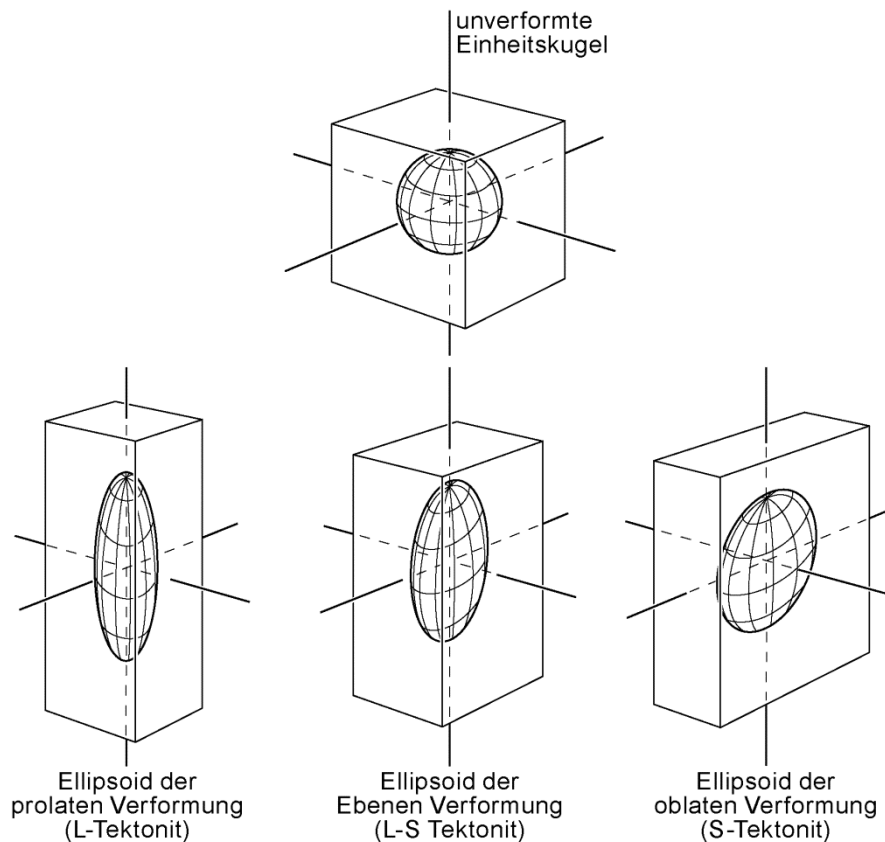
wobei ψ ein Winkel ist, der **Winkelscherung** (*angular shear*) genannt wird. Es ist die Änderung des rechten Winkels zwischen zwei ursprünglich senkrechten Referenzlinien.

ε und ψ sind dimensionslose Grössen, die Verformung in einer bestimmten Richtung messen.



Finite Verformung

Ein Materialkreis mit Einheitsradius wird homogen in eine Ellipse mit zwei Hauptachsen deformiert. Diese Ellipse wird **Verformungsellipse** (*strain ellipse*) genannt und ist ein zwei-dimensionales, graphisches Konzept, um die Menge an linearer und angularer Verformung bei der Gesteinsdeformation zu visualisieren. Das **Verformungsellipsoid** (*strain ellipsoid*) bezieht sich auf das gleiche Konzept in drei Dimensionen und resultiert aus der homogenen Deformation einer Materialkugel. Das Verformungsellipsoid wird entsprechend durch seine drei Hauptachsen definiert. Die Achsen der Verformungsellipse oder des Verformungsellipsoides sind bekannt als die **Hauptverformungsachsen** (*principal strain axes*). Die maximale, mittlere und minimale Achse werden mit X, Y und Z bezeichnet. Axiale Plättung ist ein Spezialfall, bei dem $X=Y>Z$ ist und das Ellipsoid die Form eines Pfannkuchen hat. Axiale Auslängung ist der Fall, bei dem $X>Y=Z$ ist und das Ellipsoid wie eine Zigarre aussieht.



Typen homogener Verformung eines Würfels und einer Kugel

Dieses graphische Konzept ist für jegliche Deformation, egal wie gross, und für jedes Material anwendbar.

Verformungsanalyse kann auf eine Vielzahl von Objekten angewendet werden, die wie folgt gruppiert sind:

Ursprünglich kugelige Objekte (z.B. Ooide, Zylindrische Grabspuren von Würmern, *reduction spots*).

Ursprünglich ellipsoidale Objekte (z.B. Steinkugeln, Xenolite).

Ursprünglich lineare Objekte (z.B. Belemniten).

Objekte mit bekannten Winkeln (z.B. Fossilien).

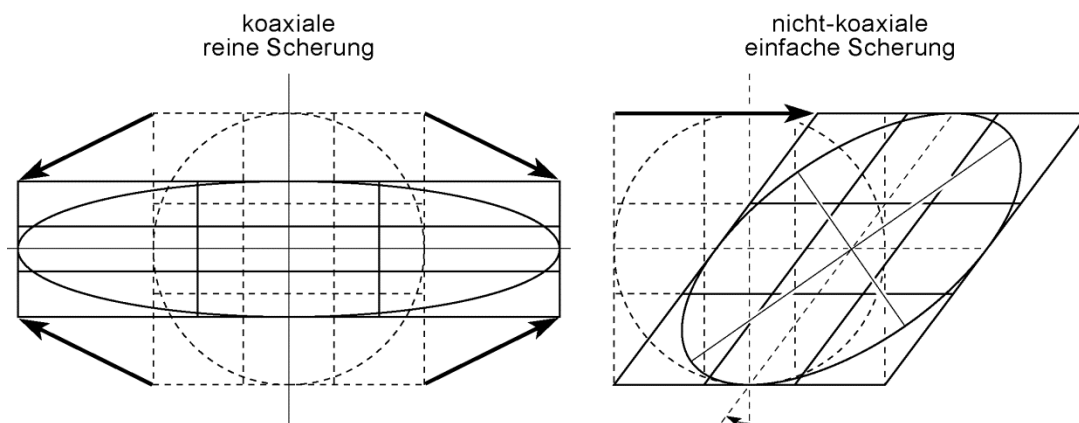
Gleichmässig verteilte Objekte (z.B. Mittelpunkte von Mineralien, Pebbles).

Die Resultate werden beeinflusst von der Orientierung der betrachteten Flächen.

Reine Scherung und Einfache Scherung

Wir betrachten ein orthogonal angeordnetes Koordinatensystem mit den drei Achsen, O_x , O_y (horizontal) und O_z (vertikal), die sich in O schneiden. Als erstes Beispiel nehmen wir einen Würfel mit einer Ecke im Ursprung O und die Koordinaten der Flächen in der X , Y und Z Richtung sind O_x , O_y und O_z .

Wenn die Orientierungen der Hauptachsen X, Y und Z sich während der homogenen Deformation nicht verändert haben, war die Verformung **ohne Rotation** (*irrotational*) und wird dann als **koaxial** (*coaxial*) bezeichnet. Eine solche Verformung mit konstantem Volumen ist allgemein als **Reine Scherung** (*pure shear*) bekannt. Jedoch beinhaltet koaxiale Verformung gleichmässige Dilatation.



Ist eine homogene Veränderung der Orientierung entstanden, war die Verformung **mit Rotation** (*rotational*) und wird als **nicht-koaxial** (*non-coaxial*) bezeichnet. Wenn alle Punkte der yOz -Fläche parallel zur O_x Achse mit einem Versatz, der proportional zu Z ist, verschoben werden, wird dieser Prozess als **Einfache Scherung** (*simple shear*) bezeichnet, wenn das Volumen konstant bleibt.

Jede beliebige Verformung kann demzufolge in eine Verformungskomponente, die die Form des Ellipsoides misst, und eine Rotationskomponente, die die Rotation der Hauptachsen gegenüber ihrer ursprünglichen, unverformten Richtungen misst, unterteilt werden.

Volumenänderung

Die Volumenänderung (Dilatation) ist gegeben mit

$$\Delta_V = (V - V_0)/V_0$$

wobei V und V_0 die Volumina des deformierten und nicht deformierten Zustandes sind.

Für infinitesimale Verformung gilt: $\Delta_V = dV/V$

Graphische Darstellung

Das Flinn Diagramm drückt die verschiedenen, homogenen Verformungszustände aus. Die Verhältnisse der Hauptverformungen werden so bestimmt, dass $a = X/Y$ und $b = Y/Z$ gilt. a wird

gegen b aufgetragen. Die verschiedenen Formen des Ellipsoides werden mit Hilfe des Parameters $K = (a-1)/(b-1)$ unterschieden. Die verschiedenen Verformungszustände werden wie folgt beschrieben:

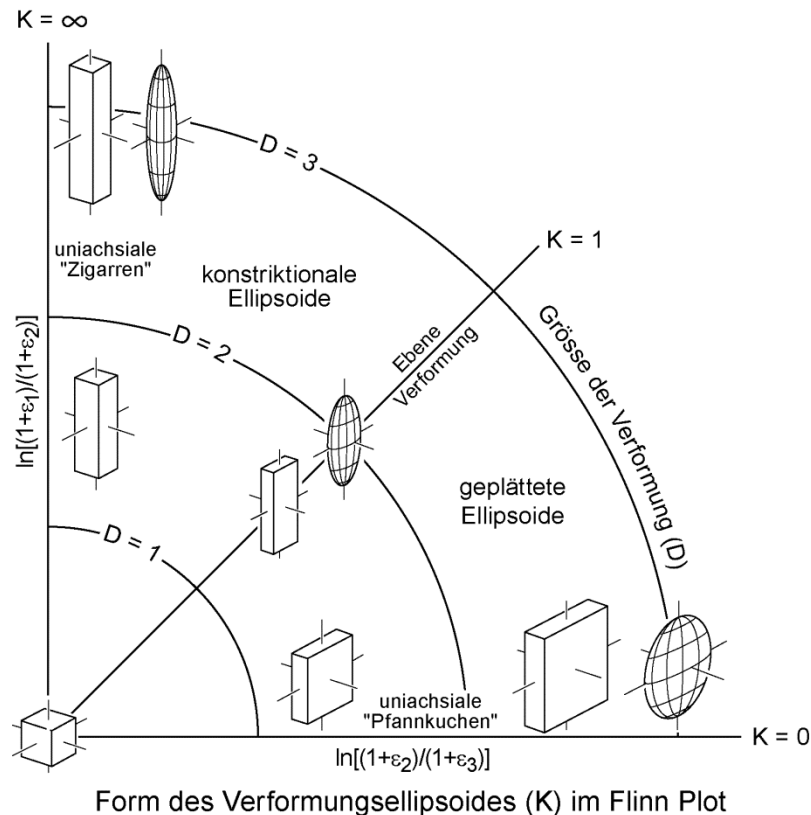
$K = \infty$: axiale symmetrische Extension.

$\infty > K > 1$: konstriktionale Verformung (*prolate* oder zigarrenförmige Ellipsoide)

$K = 1$: Ebene Verformung bei konstantem Volumen

$1 > K > 0$: Plättungsverformung (*oblate* oder pfannkuchenförmige Ellipsoide)

$K = 0$: axiale symmetrische Plättung



Tektonite

Das Wort **Tektonit** bezeichnet jedes Gestein, das ein starkes Verformungsmuster zeigt. Jede Deformation wird ein isotropes Gestein in einen anisotropen Tektonit durch die Entwicklung eines **Kornform-Musters** (*grain-shape fabric*) verwandelt. Diese Deformation kann die Entwicklung einer Schieferung und einer Lineation beinhalten. Abhängig von der qualitativen Intensität der planaren und linearen, sekundären Strukturen und unter der Annahme, dass sich die Mineralkörner ausschliesslich als passive Marker verhalten, werden drei Beschreibungen benutzt, um die Deformation des Gesamtvolumens zu repräsentieren.

L-Tektonite sind deformierte Gesteine, in denen die bevorzugten Mineralorientierungen nur Lineationen definieren.

S-Tektonite sind durch eine durchgehende Foliation dominiert.

L-S und S-L Tektonite zeigen beide eine Foliation und Lineation, wobei L und S die dominanten Elemente sind.

Im Allgemeinen produzieren prolate Ellipsoide L-Tektonite, oblate Deformation resultiert in S-Tektoniten und S-L oder L-S Tektonite umfassen das allgemeine Verformungsellipsoid. Gleichmässige verteilte L und S entsprechen ebener Verformung.

Beziehung zwischen Achsenebenenschieferung und Verformung

Das Verformungsmuster innerhalb gefalteter Gesteine lässt darauf schliessen, dass die Achsenebenenschieferung senkrecht zur Achse der maximalen finiten Verkürzung verläuft.

Messungen der finiten Verformung in natürlichen Strukturen bekräftigen den Beweis numerischer und analoger Erwägungen.

- Finite Verformungsanalysen an **Reduktionsflecken** (*reduction spots*), Ooiden oder flachgedrückten Fossilien und **Lavakissen** (*pillows*) zeigen, dass die Foliation in diesen spezifischen Gesteinen normal zur kurzen Achse der finiten Verformung Z ist. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Achsenebenenschieferung, infolge der Kompression der Gesteine, senkrecht zur finiten Verkürzungsachse liegt.

- Die Orientierungen der XY-Ebene des finiten **Verformungsellipsoids** (*finite strain ellipsoid*) von numerisch oder unter Verwendung von viskosen oder elastischen Materialien als Analogmaterial von Gesteinen modellierten Falten entsprechen ziemlich genau den Richtungen der Achsenebenenschieferungen, die in natürlichen Falten beobachtet werden können.

Die Übereinstimmung der Schieferung mit der Ebene der finiten Plättung erlaubt die Voraussage über die Richtungen der XY Ebene in Gesteinen, die keine eigentlichen **Verformungsmarker** (*strain markers*) enthalten.

Schieferung und Intensität der Verformung

Die Verformung ist eine wichtige Grösse bei der Entwicklung von Achsenebenenschieferungen. Es ist indessen schwierig, etwas über das Minimum an erforderlicher Verformung zu sagen, das der Bildung der Schieferung vorangehen kann. Es bestehen Hinweise, dass die Schieferungen mit einem weiten Bereich von Verformungen assoziiert sind. Die Dachschieferung, zum Beispiel, scheint sich in einem geeigneten Gestein zu bilden, wenn die Kompression ca. 30% erreicht hat.

Beziehung zwischen Spannung und Verformung

Da Verformung aus der Wirkung einer Spannung resultiert, muss es eine Beziehung zwischen beiden geben. Da sich jedoch die Geometrien sowohl des Spannungs- als auch des Verformungsfeldes mit der Zeit ändern, ist die Beziehung nicht einfach.

Im Falle von Reiner Scherung entspricht die Orientierung der Hauptverformungsachsen derjenigen der Hauptspannungsachsen, so dass $X // \sigma_3$, $Y // \sigma_2$ und $Z // \sigma_1$ gilt.

Bei Einfacher Scherung können sich nur die mittleren Achsen entsprechen.

Da die Natur diese beiden Deformationsregime gerne kombiniert, gibt es keine einfache Beziehung zwischen anhaltenden Verformungs- und Spannungsrichtungen.

Zusammenfassung

Deformation beinhaltet jede mögliche Änderung in der Form, der Position und/oder in der Orientierung eines Körpers. Diese Änderung ist das Resultat von Kräften, die auf das Gestein einwirken. Die Verformung ist die Änderung der Form, die in den Gesteinen gemessen werden kann, wenn die ursprüngliche Form eines Objekts bekannt ist.

STRUKTURELLE ANALYSE DER POLYPHASEN DEFORMATION

Strukturgeologen müssen die Deformationsgeschichte der Gesteine aus primären und sekundären Strukturen, die im Gelände gefunden werden, herleiten. Die Frage, die sich die Strukturgeologen stellen, ist: was ist die chronologische Reihenfolge der Deformationsereignisse, die auftraten oder in einem Gestein oder in einem Gebiet erkannt werden können? Zur Erklärung der Deformationsgeschichte muss man das relative Alter der unterschiedlichen Strukturen, wie Verwerfungen, Falten und Gefüge unter Zuhilfenahme von sich schneidenden oder überprägenden Beziehungen erkennen. Es wird folglich angenommen, dass progressive Änderungen in der Bewegungsrichtung oder in der Orientierung der Verformungsachsen als Änderungen in den strukturellen Orientierungen konserviert werden.

In dieser Vorlesung fassen wir Standardmethoden zusammen, die in Feldstudien angewendet werden, um Form, Ausmass und Anordnung von Strukturen in einem Kartierungsgelände zu erfassen. Dazu gehört die zeitliche Einordnung oder Abfolge von Strukturen. Untersuchungen dieser Art werden **strukturelle Analysen** (*structural analysis*) genannt. Es werden räumliche und geometrische Merkmale der Gesteine studiert und damit, mit all diesen Einzelheiten, Rückschlüsse auf Strukturen im Grossmassstab abgeleitet. Um diese Frage zu beantworten, versucht man erst ein geometrisches Modell, das heisst, ein drei-dimensionales Bild der untersuchten Region zu entwerfen, sodann in einem zweiten Schritt ein kinematisches Modell, indem versucht wird, die heutige Geometrie geschichtlich herzuleiten. Die Kinematik einer Region versucht also eine zeitliche Abfolge zu rekonstruieren, in der die Richtung und der Sinn lokaler Bewegungen in einer Art Puzzle zusammengefügt werden müssen. Drittens wird versucht, ein mechanisches Modell zu entwerfen, mit dem die Verformungs- und Spannungsgeschichte einer Region rekonstruiert wird.

Die Untersuchung von duktilen und spröden Strukturen eines bestimmten Gebietes ist ein schwieriges Vorhaben, weil die diskontinuierliche Art des Aufschlusses eine direkte Beobachtung der grossräumigen Strukturen oftmals verunmöglicht und sich deshalb eine Interpretation, eine Inter- oder Extrapolation, aufdrängt. Da zudem das Relief, gemessen am kartierten Gelände, meist verhältnismässig klein ist, wird die Beobachtung im Wesentlichen zweidimensional sein. Dies zeigt, dass selbst bei kontinuierlichen Aufschlussbedingungen eine Interpretation noch immer notwendig ist, um ein dreidimensionales Bild zu erlangen.

Wir beginnen nun mit der Vorstellung einiger Grundkonzepte, die für die Untersuchung der tektonischen Geschichte eines bestimmten Gebietes unentbehrlich sind. Wir diskutieren erst die Deformation für Gebiete, die durch eine einzelne Episode verformt wurden, dann für Gebiete, die durch eine ganze Reihe verschiedener Episoden auf eine komplexe Art und Weise deformiert wurden. Wir werden auch sehen, dass eine Antwort "richtig" (in sich widerspruchsfrei) sein kann, sie jedoch nicht die einzig mögliche sein muss.

Grundkonzepte

Massstab

Wir unterscheiden drei verschiedene Massstäbe der Betrachtung: mikroskopisch, makroskopisch und mesoskopisch.

- Der **mikroskopische** (*microscopic*) Massstab bezieht sich auf irgendeine kleine Struktur, die mit einem optischen oder Elektronenmikroskop untersucht werden muss. Diese Untersuchungen schliessen sowohl Deformationsmerkmale von einzelnen Körnern, kristallographische Merkmale, wie c-Achsen von Quarz, als auch Einzelheiten der Versetzungs- (*dislocation*) Substruktur mit ein.

- **Mesoskopisch** (*mesoscopic*) ist jede Struktur, die ohne Hilfe eines Mikroskopes angeschaut werden kann. Beispiele sind das Handstück oder ein einzelner Aufschluss, letzterer ohne Rücksicht auf die Grösse. Wichtig dabei ist, dass auf mesoskopischer Ebene gemachte Beobachtungen frei von Interpretationen sind, zumindest was die Form der Struktur betrifft. Wenn wir von der Morphologie einer mesoskopischen Falte sprechen, so heisst dies, dass die Form der Falte gänzlich beobachtet werden kann, im Gegensatz zu Beobachtungen, die aus einer bestimmten Anzahl isolierter Aufschlüsse hätte rekonstruiert werden müssen.

- Der **makroskopische** (*macroscopic*) Massstab bezieht sich auf Strukturen, die zu gross sind, um vollumfänglich in einem Aufschluss zu Tage zu treten. Dies erfordert eine Interpretation, das heisst den notwendigen Schritt, um aus einer Anzahl von gesammelten Daten verschiedener Aufschlüsse die Struktur zu rekonstruieren.

Wenn wir die Struktur eines Gebietes versuchen zu verstehen, so hat sich der Geologe hauptsächlich mit dem mesoskopischen und makroskopischen Massstab zu befassen. Mikroskopische Untersuchungen helfen, Strukturen wie Schieferungen, die makroskopisch sichtbar sind, besser zu charakterisieren. Dieses Massstabskonzept ist sehr wichtig in der Strukturgeologie. Immerzu muss man die Beziehungen zwischen Strukturen verschiedenen Massstabs erkennen; und zur Lösung von geometrischen Problemen im Feld eventuell auch von einem Beobachtungsmassstab zu einem anderen übergehen.

Geologische Karte

Das Prinzip der Kartierung verwendet grundsätzlich die gleichen Techniken, unabhängig davon, ob man sich in einfach gefalteten sedimentären Gebieten befindet, oder in einem mehrfach verformten metamorphen und magmatischen Terrain. Die geologische Karte repräsentiert die vorgefundenen Daten und zeigt die horizontale Verteilung der verstreuten Aufschlüsse auf einer topographischen Karte. Der Massstab gibt an, um welchen Betrag die Grösse der Objekte, die auf der Karte gezeigt werden, verringert worden ist. Die unbestrittene Macht der geologischen Karten entsteht aus den weiteren Deutungen und Rekonstruktionen, die von ihnen abgeleitet werden können, in die dritte Dimension unterhalb und oberhalb des Bodens und zurück in die geologische Zeit (die vierte Dimension). Die Karten sind der zweidimensionale Schlüssel zum vierdimensionalen geologischen Raum.

Farben

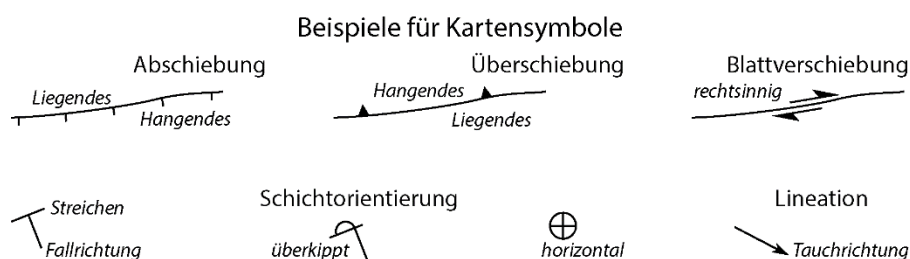
Farben zeigen die Beziehungen zwischen den Aufschlüssen und dem Umfang der stratigraphischen Einheiten und Orientierungsdaten (z.B. Verjüngungsrichtungen der Sedimente). Die geologische Kartierungsarbeit erlaubt es beispielsweise, auf einen Blick die Flächenverteilung der unterschiedlichen Gesteinsarten und das strukturelle Muster von z.B. gefalteten gegen planare Regionen auseinanderzuhalten.

Linien

Kontaktklinien zwischen lithologischen (Farbe) Einheiten werden Spuren genannt. Verschiedene Arten (Dicke, gepunktet oder gestrichelt, Farbe oder dazugehörige Symbole) drücken die Kontakteigenschaften (z.B. gestrichelte = vergrabene Kontaktpure) aus. Die drei Hauptkontakttypen sind sedimentär, tektonisch (Verwerfung) und intrusiv.

Symbole

Penetrative Strukturen (Schieferung, Lineation) sind allerdings zu dünn, um sie im exakten Massstab auf einer Karte abzubilden. Letztere werden durch konventionelle Symbole auf einer Karte gekennzeichnet. Eine ganze Reihe von Symbolen wird verwendet, um andere Informationspunkte wie die Orientierung der Schichtung, den Vergenz-Sinn von Kleinfalten und die Spuren von jeder möglichen Struktur wie z.B. Achsenebenenschieferungen oder sogar lithologische Details (Fossilienfunde) darzustellen.



Beschreibung der Gesteine

Eine ausführliche Feldbeschreibung der Gesteine (d.h. Arten natürlicher Materialien für Ingenieurperspektiven) ist zu einer genauen Deutung ihrer geologischen Geschichte essentiell. Viele Informationen können hinsichtlich der Gesteinsbestandteile im Feld mit einer Lupe festgestellt werden. Wichtige Eigenschaften, die Wechselbeziehungen zwischen unterschiedlichen Aufschlüssen darlegen, sind:

- Farbe: Die Farben der frischen und verwitterten Oberflächen müssen beschrieben werden; sie sind abhängig vom Felsenaufbau und daher charakteristisch für diesen.
- Die Korngrösse und die Form, die in Sedimentgesteinen häufig die Verformungsintensität, aber auch ein räumliches Gefüge ausdrücken, beziehen normalerweise bevorzugte Orientierung des Kieses mit ein.
- Die Schichtmächtigkeiten und die Strukturen auf den Schichtflächen (zum Beispiel Schichten sind planar oder haben Rippel, sind erosiv oder durchgehend).
- Das interne Gefüge und die Struktur (zum Beispiel Kreuzschichtungen, Rutschfalten).

Stratigraphische Abfolge - Lithologie

Eigenschaften von Schichtung und sedimentäre Strukturen, die wichtig für die Interpretation der sedimentären Ablagerungsräume sind, können nur im Feld studiert werden. In solchen Gebieten, in denen die relative Zeitabfolge (d.h. eine **Stratigraphie**; *stratigraphy*) identifizierbar ist, ist die Festlegung einer Verjüngungsrichtung oder Ablagerungssequenz ein wichtiger Schritt, um einerseits die Geometrie von Strukturen im Grossmassstab zu bestimmen, andererseits eine geologische Geschichte festzulegen. Alle strukturellen Informationen haben wenig Bedeutung, wenn sie aus ihrem lithologischen (sedimentologischen oder petrologischen) und Alters- (paläontologischen oder radiometrischen) Kontext herausgenommen werden. Eine **Formation** ist eine Gesteinseinheit, die aufgrund der Gesteinsart und erkennbarer Grenzen mit anderen Gesteinseinheiten kartiert werden kann.

- Eine Unterbrechung zwischen stratigraphischen Kontakten deutet auf Verwerfungen hin, die vielleicht nicht deutlich aufgeschlossen sind.
- Die Wiederholung einer stratigraphischen Sequenz kann dazu verwendet werden, die Achsenebenenspur einer Falte oder eine Überschiebung festzulegen.

Jedoch müssen die Abfolgen von aufeinanderfolgenden lithologischen Einheiten in metamorphen Gesteinen keine stratigraphische Abfolge sein. Deshalb ist es in solchen Gebieten wichtig, mittels sedimentärer Strukturen, die stratigraphische Verjüngungsrichtung (oben b.z.w. unten, *way-up-criterion*) zu identifizieren und zu zeigen, dass die metamorphe Stoffbänderung tatsächlich eine Schichtung und eine stratigraphische Sequenz darstellt. Die stratigraphische Abfolge wird in einem **graphischen Profil** (*log*) abgebildet. Dieses Profil ist eine Säule, die die Gesteinsarten, die Schichtdicke und die relative Chronologie zwischen Gesteinseinheiten darstellt. **Diskordanzen** (*unconformities*) sind primäre (stratigraphische) Ebenen entlang welchen die jüngeren Schichten ältere Abfolgen schneiden. Diskordanzen sind essentiell für das Verständnis der tektonischen Geschichte eines Gebietes.

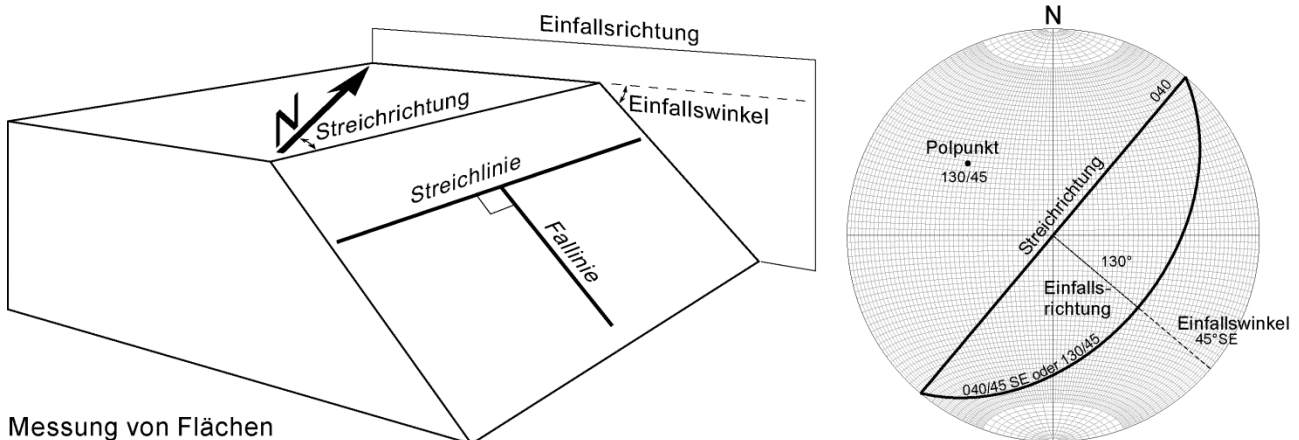
Räumlich orientierte Daten

Planare Elemente

Die Euklidische Geometrie besagt, dass zwei nicht parallele Linien in einer Ebene enthalten sind und diese Ebene definieren. Die Lage im Raum irgendeines planaren geologischen Elements (z.B. Schichtung, Schieferung, etc.) wird durch das **Streichen** (*strike*) und **Fallen** (*dip*) zusammen angegeben. Zur Erinnerung:

- Das Streichen einer Fläche ist die Orientierung einer imaginären, horizontalen Linie auf dieser Fläche und wird durch den geographischen Azimuth (gemessen in Grad, im Uhrzeigersinn von Norden) dieser Linie angegeben.
- Das Fallen ist die Linie der grösstmöglichen Neigung der Fläche (= Falllinie), d.h. die Neigung senkrecht zum Streichen und wird als Winkel von der Horizontalebene aus nach unten mit einem Neigungsmesser in Grad gemessen.

Das Messen des Streichens, des Fallwinkels und der Fallrichtung einer Fläche liefert ihre Orientierung im drei-dimensionalen Raum. Diese Messungen sind auf geologischen Karten durch das Streich-und-Fall Symbol dargestellt. Dabei ist die horizontale Linie parallel zum Streichen und die kleinere Linie, die in der Mitte senkrecht auf der grossen Linie steht, zeigt in die Fallrichtung. Diese ist die Richtung, in welche eine Struktur **gekippt** (*tilted*) ist. Durch viele Streich- und Fallmessungen an zahlreichen Aufschlüssen kann ein Strukturgeologe die drei-dimensionale, unterirdische Form von grossen Strukturen bestimmen, die an der Erdoberfläche nicht direkt sichtbar sind.



Messung von Flächen

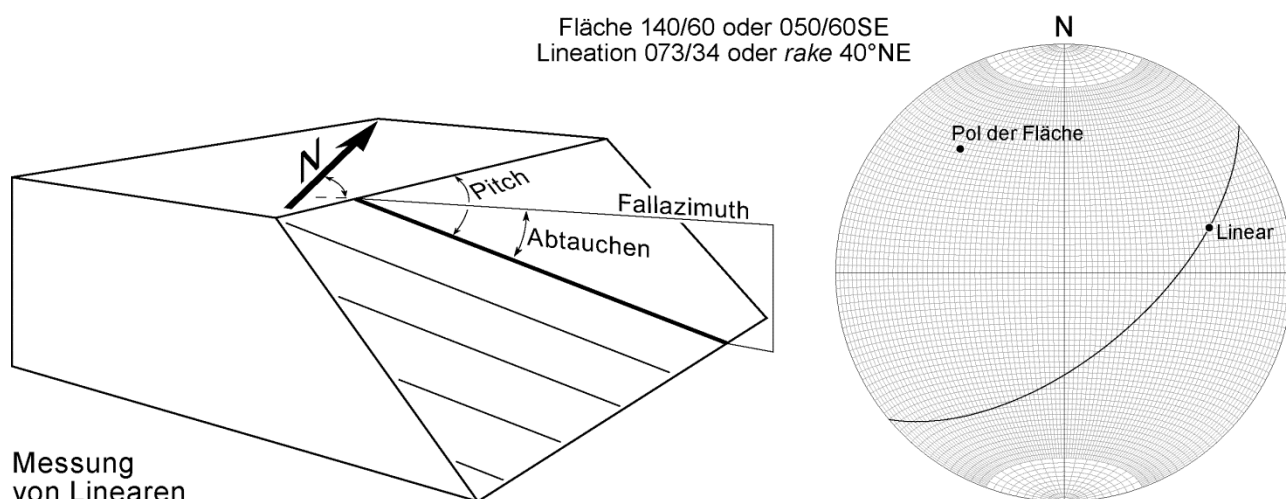
Gemäss der internationalen Konvention werden die Azimut-Richtungen im Bereich "000-360" angegeben, um Verwechslungen mit anderen Winkeln, wie das Fallen im Bereich "00 bis 90", zu vermeiden.

Die scheinbare Mächtigkeit w einer Schicht auf der Karte ist mit der wahren Mächtigkeit t und dem Einfallen θ durch eine einfache trigonometrische Gleichung verknüpft:

$$t = w \cdot \sin \theta$$

Lineare Elemente

Die Orientierung einer linearen Struktur wird durch die **Tauchrichtung** (Azimut) und das Abtauchen beschrieben. Der **Tauchwinkel** (*plunge*) ist der kleinste Winkel zwischen dem Linear und der Horizontalebene, d.h. er wird in der Vertikalebene, die durch die Tauchrichtung läuft, gemessen. Die Tauchrichtung ist die Richtung des Einfallens, nach der vertikalen Projektion des Linears auf die Horizontalebene. Der **Pitch** (*rake, pitch*) ist der Winkel zwischen einer Linie auf einer Ebene und der Streichrichtung. Dieser Winkel wird weder in der Horizontal- noch in der Vertikalebene gemessen, sondern in der Ebene mit der linearen Struktur. Er wird häufig benutzt, um Rutschstriemen auf einem Bruch einzumessen. Die vollständige Orientierung einer Falte wird durch die Faltenachse, also eine lineare Struktur, und durch die Faltenachsebene angegeben.



Solche Orientierungsmessungen werden gemacht, weil es danach viel einfacher ist, die Strukturen zu gruppieren. Wie dem auch sei, die Tatsache, dass zwei Strukturen die gleiche Orientierung haben, bedeutet nicht, dass sie notwendigerweise auch zur gleichen Gruppe oder Familie gehören. Dies gilt auch umgekehrt: Strukturen der gleichen Gruppe müssen nicht die gleiche Orientierung haben.

Stil - Faltengeometrie

Der Begriff **Stil** (*style*) definiert das allgemeine Aussehen einer Struktur und wird meistens gebraucht, um Falten zu beschreiben. Unter den Begriff Stil fallen Merkmale wie Form einer Falte im Profil, Anwesenheit oder Fehlen einer Achsenebenenschieferung, der Typ und das Verhalten der Achsenebenenschieferung (ist die Falte aufrecht, geneigt oder liegend?) und Begriffe wie Zylindrismus, etc. Andere wichtige Aspekte des Stils sind Existenz verformter Lineationen und die assoziierten metamorphen Mineralparagenesen und Mikrostrukturen. Quantitativ bedeutender sind Längenverhältnisse wie das **Aspektverhältnis** (*aspect ratio*) oder der **Öffnungswinkel** (*interlimb angle*), der den Grad der "Enge" (*tightness*) einer Falte bestimmt, und die **relative Krümmung** (*bluntness*) des Scharniers einer Falte. Das Aspektverhältnis ist das Verhältnis der Amplitude einer Falte (entlang der Achsenebene gemessen) und der dazugehörigen Distanz zweier benachbarter Wendepunkte ("Inflexionspunkte"). Mit diesen Stilelementen lassen sich Gruppen von Falten unterscheiden. Die **Orientierung** einer Falte wird durch die Orientierung ihrer Achse und Achsenebene bestimmt.

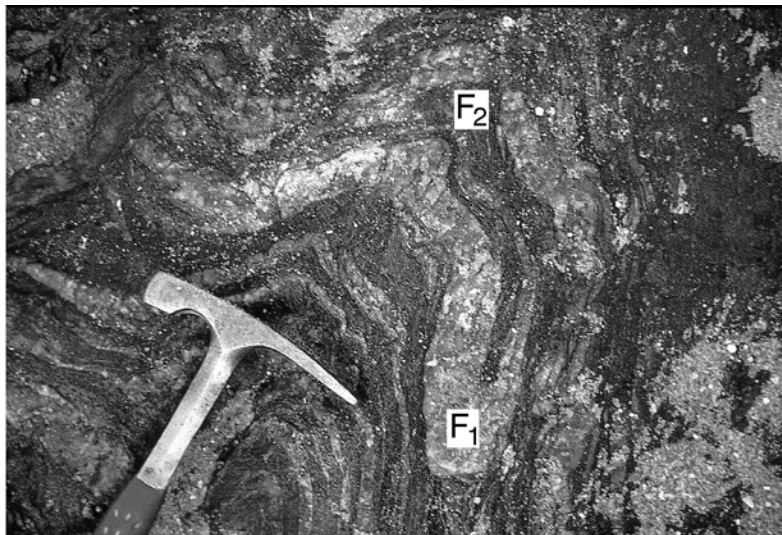
Es wird vorgeschlagen, dass die Falten eines bestimmten regionalen Gebietes einer kleinen Anzahl von Stilgruppen zugeordnet werden können. Zum Beispiel findet man in der Literatur viele Gebietsbeschreibungen mit gewöhnlichen, liegenden Falten, die dicht bis isoklinal sind und eine schwach einfallende Achsenebenenschieferung aufweisen. Diese werden begleitet von anderen aufrechten Falten, die charakterisiert sind durch einen offeneren Faltenstil. Sie enthalten oft keine Schieferung oder bloss eine Runzelschieferung als Achsenebenenschieferung. In einem solchen Gebiet, wenn alle Falten dem einen oder anderen dieser zwei Stile zugeordnet werden können, spricht man von zwei Gruppen mit unterschiedlichem Faltenstil.

Die Verwendung von kleinräumigen Strukturen in der Strukturanalyse

Faltengenerationen

Es ist der Wunschtraum jedes Strukturgeologen, alle verschiedenen Strukturen und metamorphen Mineralparagenesen der richtigen absoluten Zeit zuzuordnen. In der Praxis hat er sich mit einer relativen Datierung zu begnügen. In polyphasen Deformationsgebieten kann der Versuch unternommen werden, Strukturen einer gewissen Generation von Falten zuzuordnen.

Allgemein wird angenommen, dass eine **Generation** von Falten (*fold generation*) und die damit zusammenhängenden Merkmale eine Gruppe von Strukturen bilden, von denen man annimmt, sie seien in demselben relativen Zeitintervall entstanden. Um deshalb eine Generation festzustellen, sind zwei Schritte nötig: (i) Zuerst müssen die verschiedenen Strukturen untereinander gruppiert werden. Eine Gruppe enthält alle diejenigen Strukturen, die zur selben Deformationsphase gehören. Dies geschieht hauptsächlich aufgrund des Stils, wobei man davon ausgeht, dass Strukturen des gleichen Stils wirklich zur gleichen Gruppe gehören. Obwohl Strukturen ähnlichen Stils gewöhnlich in isolierten Aufschlüssen gesehen werden, wird angenommen, dass sie sich zur gleichen Zeit bildeten. (ii) Dann werden die verschiedenen Stilgruppen chronologisch geordnet, indem man die zeitlichen Überprägungsbeziehungen zwischen Vertretern der verschiedenen Gruppen untersucht. Das heisst, Falten aus isolierten Aufschlüssen werden verschiedenen zusammengehörigen Stilgruppen zugeordnet und anschliessend (gruppenmässig) gegenseitig datiert. Wenn die Gruppierung stimmt, das heisst, wenn die Strukturen einer Gruppe dem gleichen relativen Zeitbereich angehören, so muss die Überprägungsbeziehung konsistent sein. Die chronologische Abfolge der Strukturen wird mit numerischen Indizes bezeichnet. Für die Falten werden meistens Kurzbezeichnungen wie F_1 , F_2 , etc., für Schieferungen S_1 , S_2 , etc. und für Lineationen L_1 , L_2 , etc. verwendet. Aber die älteste Schieferung S_1 an einem Aufschluss steht nicht zwingend in Verbindung mit den ältesten Falten F_1 . Wir können uns vorstellen, dass die ersten Falten ohne eine Achsenebenenschieferung entstanden sind, und dass die lokal erste Schieferung erst mit der zweiten Faltengeneration entstand. Darum ist es sehr wichtig, dass man vorsichtig nachprüft, ob die Schieferungsgenerationen S_1 , S_2 , etc. achsenebenenparallel sind zu den Faltengenerationen F_1 , F_2 , etc. Wenn dem so ist, kennzeichnen die Zahlen das relative chronologische Alter der Struktur, die aus einer Deformationsepisode oder -phase D_1 , D_2 , etc. hervorging. Das Symbol S_0 bezeichnet die älteste, ursprünglich ebene Fläche wie z.B. die Schichtung.



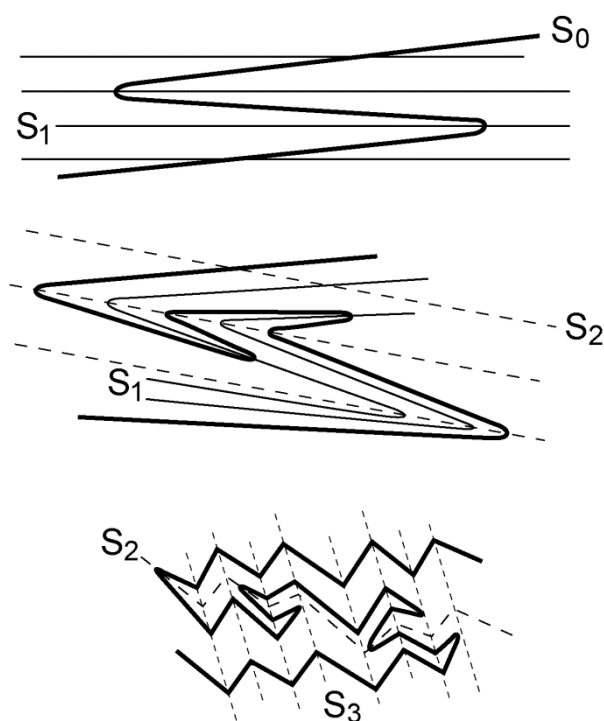
Zwei Generationen von Falten können folgendermassen entstanden sein: (i) während einer einzigen kontinuierlichen Deformation mit wechselnden Orientierungen der Verformungs- (Spannungs-) Achsen, oder (ii) während zweier, voneinander vielleicht im Abstand von hundert Millionen Jahren getrennten Deformationsperioden, die zwei verschiedenen Orogenesen angehören, oder (iii) während einer einzigen Orogenese, in welcher eine Überlagerung von getrennten Deformationen mit verschiedenen Orientierungen der Verformungsachsen stattfand. Ohne klare Diskordanzen zwischen Strukturgenerationen oder zusätzliche Techniken, wie die der absoluten Datierung, kann keine Unterscheidung zwischen den oben genannten Möglichkeiten gemacht werden. Obschon beispielsweise in allen Aufschlüssen die F_2 -Falten die F_1 -Falten überprägen, so resultiert daraus nicht, dass alle F_2 Falten tatsächlich jünger sind als die F_1 -Falten. Es kann nämlich auch sein, dass die Faltenbildung regional **diachron** verlaufen ist. D.h. wie eine Welle sind die Verformungsereignisse mit der Zeit über ein Gebiet gewandert. Eine identische Abfolge von

Strukturereignissen bedeutet eigentlich, dass das beobachtete Gebiet wahrscheinlich die gleiche Sequenz von Deformationsepisoden erlebte.

Überprägung

Wir nehmen an, dass **Überprägungskriterien** (*overprinting criteria*) in verformten Gesteinen die Basis für die relative Datierung von Strukturen untereinander bilden. Dies auch dann, wenn die Zeitspanne zwischen der Bildung der beiden sehr klein gewesen sein mag. Nehmen wir z.B. Falten: die Falte, die das Scharnier oder die Achsenfläche einer existierenden Falte überprägt, gehört einer späteren Generation an. Die daraus resultierende Komplexität der Geometrie reflektiert sich in den vielfältigen **Interferenzmustern** (*interference patterns*), die im Aufschluss auftreten. Beispielsweise kann eine F_1 Falte die Form gewechselt haben während der Entstehung einer F_2 Falte (Warnung bei Stilbetrachtungen!). Sie muss allerdings bereits zuvor bis zu einem gewissen Grad vorhanden gewesen sein. Wenn beide Falten eine Achsenebenenschieferung ausgebildet haben, so wird S_1 von S_2 überprägt.

Beispiel von drei Überprägten Faltungsphasen mit drei Schieferungen S_1 , S_2 und S_3



Wir müssen uns indessen bewusst sein, dass wenn die Achsenebenen und Faltenachsen der beiden Faltengenerationen parallel sind, kein Interferenzbild entstehen wird. Andererseits kann eine Überprägung einer älteren Struktur, infolge Neubildung einer neuen, zur Zerstörung der älteren Struktur führen. –Dies trifft vor allem dann zu, wenn eine Schieferung durch eine neue überprägt wird. Unter gewissen Umständen können "augenförmige" („eyed“) oder kreisförmige Interferenzmuster von Falten, wie beispielsweise Zungenfalten (sheath folds), entstehen, die einphasig sind. Deshalb impliziert die Präsenz einer dome-and-basin-Struktur nicht unbedingt, dass zwei getrennte Deformationsphasen stattgefunden haben. –Falteninterferenz kann dann synchron stattfinden, wenn die Deformation die Schichten in fast allen Richtungen verkürzt, mit Ausnahme einer Richtung, in der gestreckt wird.

Geometrische Extrapolation

Deformationsstrukturen variieren von Millimeter- zu Kilometer-Grösse. Es ist beinahe unumstösslich in einem Gebiet, dass kleinräumige Strukturen die Orientierung und den Charakter grösserer

Strukturen derselben Generation nachahmen. Mit anderen Worten: Deformationsstrukturen einer Generation sind synthetisch und teilen den gleichen Stil und die gleiche Orientierung unabhängig vom Massstab. Obwohl diese Annahme nicht immer wahr ist, hat das Studium kleinräumiger Strukturen bewiesen, dass es ein sehr nützliches Werkzeug ist. Damit werden die Geometrie und die Orientierung von Strukturen, die zu gross sind, um beobachtet zu werden, bestimmt und auch die Abfolge der tektonischen Ereignisse im untersuchten Gebiet kann entwickelt werden.

Beschränkungen

Die Interpretation mehrfach verformter Gebiete beruft sich in der Praxis oft auf die Hypothese, dass die Mitglieder einer Stilgruppe alle derselben Generation eines Deformationsereignisses angehören. Es zeigt sich jedoch, dass dies nicht immer zutrifft.

Grössere Verformungsphasen stehen manchmal in Beziehung mit Gruppen kleinerer Strukturen. Einige davon können durch etwas spätere Strukturen überprägt sein, die aber immer noch zur gleichen Verformungsphase zählen. Wenn solche Strukturgruppen im Feld erkannt werden, können die grossen Verformungsphasen ohne Einbezug der zahllosen kleineren Deformationsereignisse diskutiert werden, obwohl sie in Gebieten mehrfacher Verformung charakteristisch sind. Jede Strukturgruppe kann für sich betrachtet werden, und so wird ein detailliertes Bild der grossen Verformungsphase abgeleitet. Zusätzlich kann die relative Bedeutung jeder grösseren Phase durch Abschätzen der regionalen Ausdehnung und der Verformungsintensität bestimmt werden.

Zusammenfassung

Geologen sehen das Endresultat einer Abfolge von Ereignissen: Ablagerung, Verformung, Erosion, etc. Sie identifizieren Gesteinslagen und ihr Alter, sie zeichnen die räumliche Orientierung von Schichten auf Karten, kartieren Falten und Brüche, leiten die Geometrie grösserer Strukturen von kleineren ab, bestimmen deren räumliche und zeitliche Beziehung und konstruieren Profile des Untergrundes anhand der Oberflächeninformationen. Somit ist die Verformungsgeschichte einer Region bestimmt. Zur Unterscheidung der Falten verschiedener Generationen sollten unterschiedliche Orientierung und unterschiedlicher Faltenstil vorsichtig verwendet werden. Die Überprägung von kleinen Strukturen geschieht entweder durch die schrittweise Entwicklung von Strukturen während progressiver Verformung in einer einzigen grossen Verformungsphase, oder durch zwei grosse, getrennte tektonische Ereignisse. Geologen bestimmen das relative Alter einer Verformung, indem sie eine jüngere unverformte Formation suchen, die diskordant darüber liegt.

In Zonen orogener Aktivität, das sind Gebiete, in denen Berge entstehen, sind Gesteine gewöhnlich durch mehr als nur eine **“Phase”** der Verformung deformiert worden. Um diese Phasen zu erkennen, werden zusammengehörende Falten, Schieferungen, Lineationen und andere Strukturen Verformungsphasen zugeordnet. Die zeitlichen Intervalle zwischen aufeinanderfolgenden Ereignissen (Faltensysteme, Schieferungen und Lineationen verschiedener Phasen) können sich von unendlich kurzen Zeiträumen (geologisch gemessen) bis zu solchen von mehreren hundert Millionen Jahren erstrecken.