

Lineare Struktur-Elemente

Strukturgeologie-2012

Educational Material

Author(s):

Burg, Jean-Pierre

Publication date:

2012

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007199326>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

LINEARE STRUKTUR-ELEMENTE

Lineation ist ein allgemeiner Begriff, der die wiederholte, üblich penetrative und parallele Einregelung von linearen Eigenschaften, in einem Gestein beschreibt (um sich die Lineation vorzustellen, stellen Sie sich Pakete von Spaghetti vor). Eine Lineation kann ein ursprünglich vulkanisches oder sedimentäres Element des Gesteinsgefüges sein, wie eine Reihe länglicher Kieselsteine oder Kalifeldspat Porphyroblasten oder Einschlüsse, deren lange Kornachsen alle parallel orientiert sind. Die primäre Anordnung von Markern ist mit der Fließrichtung von Magma oder Paläoströmungen verbunden und bildet so genannte **Fließlinien**. Eine Lineation kann aber auch eine sekundäre Struktur sein, die als Folge einer Deformation entstanden ist.

Lineationen sind in verformten Gesteinen überall zu finden, und liegen wirklich auf Schieferungsflächen; das deutet an, dass die Lineationen so penetrative wie die Schieferung sind. Es ist üblich, dass eine einzige Deformation verschiedene Lineationen mit verschiedenen Orientierungen innerhalb einer gegebenen Schieferungsebene produziert. Dies impliziert, dass eine Lineation ebenso penetrativ wie eine Schieferung ausgebildet ist.

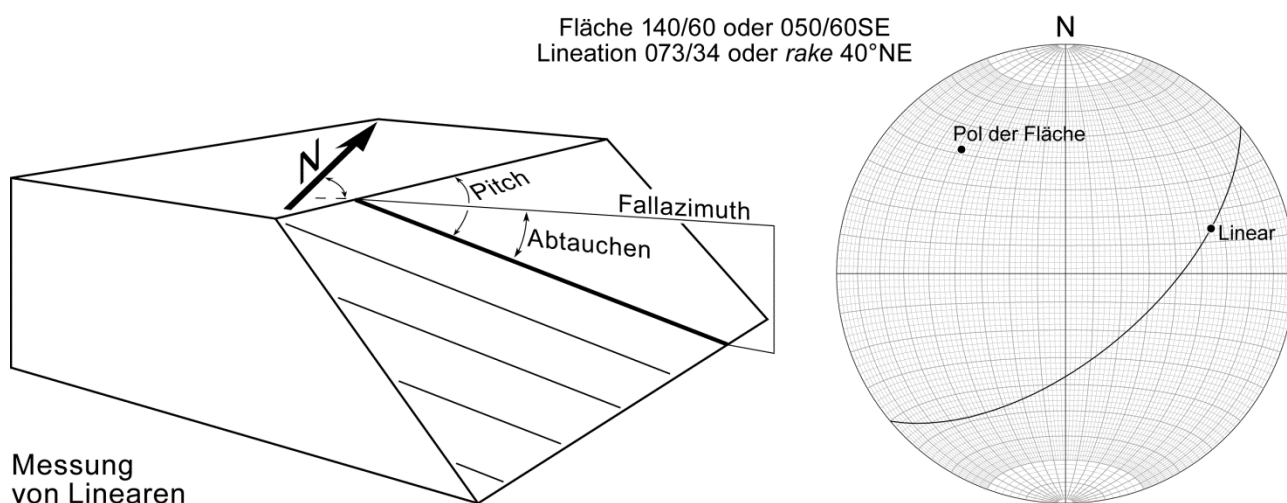
Lineationen werden als L-Elemente des Gesteinsgefüges bezeichnet. Wo L-Linien unterschiedlicher Generationen im gleichen Gefüge auftreten, werden ihnen Kennnummern entsprechend dem relativen Alter gegeben: L_0 ist die primäre Lineation, L_1 , L_2 und L_n für die sekundäre Lineation usw. in der Reihenfolge der bestimmten Superposition.

Gesteine mit Lineation, aber ohne Schieferung, sind besonders in Gneisen, als L-Tektonite (oder Bleistift Tektonite) bekannt. Die Lineationen sind eines der bedeutendsten Gefüge-Elemente, und sollte deshalb in allen vollständigen strukturgeologischen Karten enthalten sein.

Beschreibung

Orientierung

Die Orientierung einer linearen Struktur wird durch das Fallazimut und den Fallwinkel (im Buch von Eisbacher als Richtung und Abtauchen bezeichnet) beschrieben. Der **Fallwinkel** (*plunge*) ist der kleinste Winkel zwischen dem Linear und der Horizontalebene, d.h. er wird in der Vertikalebene gemessen. Das Fallazimut 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 der gleichen Fläche. 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.



Nicht-penetrative Lineationen

Harnische (*slickensides*) sind Verwerfungsflächen, die auf natürliche Art und Weise durch die Bewegung poliert werden. Sie zeigen häufig Rutschstriemen (auch: Gleitstriemung, Rutschharnisch Striemen; *slickenside striae*) an, die das direkte Resultat des Reibungsgleitens sind und eine weit verbreitete lineare Struktur darstellen. Rutschstriemen sind nicht penetrativ (sie sind an Oberflächen gebunden) ausgebildet und sind deshalb kein Gefüge-Element.

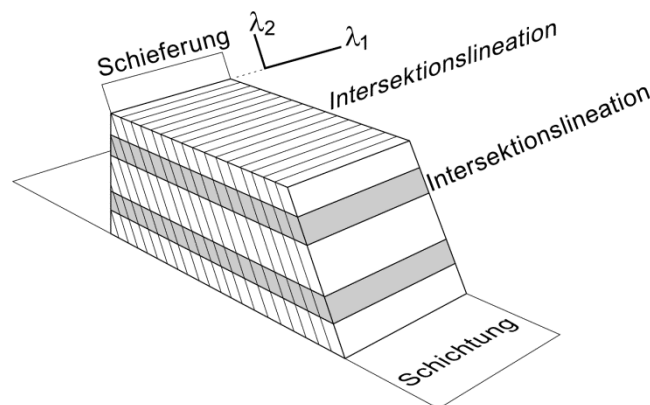
“Grate und Rillen” (*ridges and grooves*) oder **Striemungen** (*striations*) sind genau parallele lineare Spuren, die durch die Abschleifung während der Scherbewegung einer Verwerfungsseite auf der gegenüberliegenden Seite entstehen. Sie zeigen die Richtung des Gleitvektors der Verwerfung an.

Rutschstriemen und Kristallfasern können auf Schichtflächen gefunden werden, die in den Prozess der **Biegegleitfaltung** involviert worden sind. Sie lassen darauf schliessen, dass mit zunehmender Einengung der Falten, die aufeinander folgenden 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.

Wenn ein Gestein entlang einer C-Fläche einer CS-Struktur (beschrieben in der Vorlesung auf Schieferung) sich aufspaltet, ist die Fläche in eine Grate-und-Rillen Morphologie parallel zur Scherrichtung gestreift, während die S-Schieferungsflächen eine Streckungslineation, wie unten beschrieben, tragen.

Intersektionslineationen

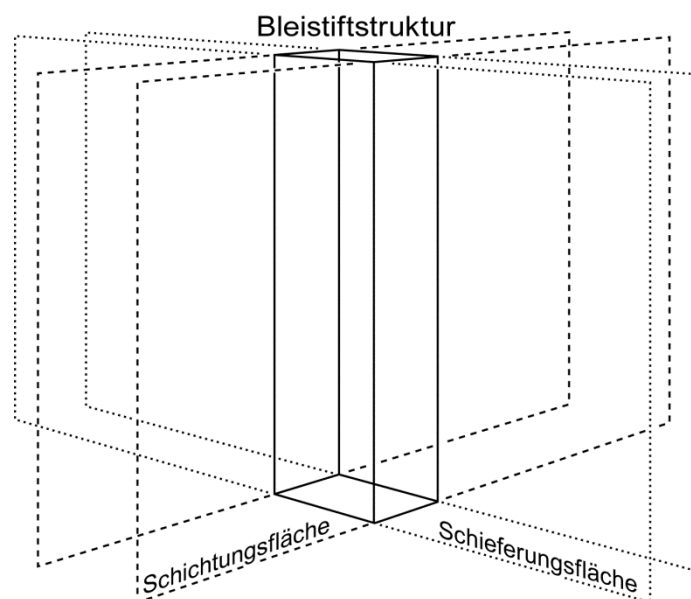
Da sich zwei beliebige planare Ebenen in einer Linie schneiden, kann in den meisten Gesteinen, die gefaltet und gleichzeitig geschiefert wurden, ein **Intersektionslinear** (*intersection lineation*) zwischen der Schichtung und der Faltenachsenebenschieferung gefunden werden. Die Spur der Schichtung auf einer schneidenden Schieferungsebene erscheint häufig als farbiges Streifenmuster (folglich wird die Intersektionslineation manchmal **Streiflinear** (*striping lineation*) genannt, um eine genetische Bezeichnung zu vermeiden). Schichtung-Schieferungsintersektionen sind meistens parallel zu den lokalen Faltenachsen. Ähnliche Lineationen 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 Intersektionen können gefunden werden.



Achtung: 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 **Bleistiftstrukturen** (*pencil structures*).

Intersektionslineare und Bleistiftstrukturen werden häufig verwendet, um die Orientierung der lokalen Faltenachsen zu bestimmen, wenn die letzteren nicht aufgeschlossen sind.

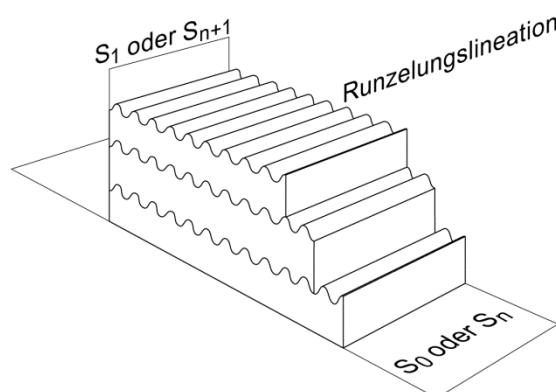


Faltenachsen als Lineationen

Faltenachsen sind lineare Strukturen.

Runzellineation

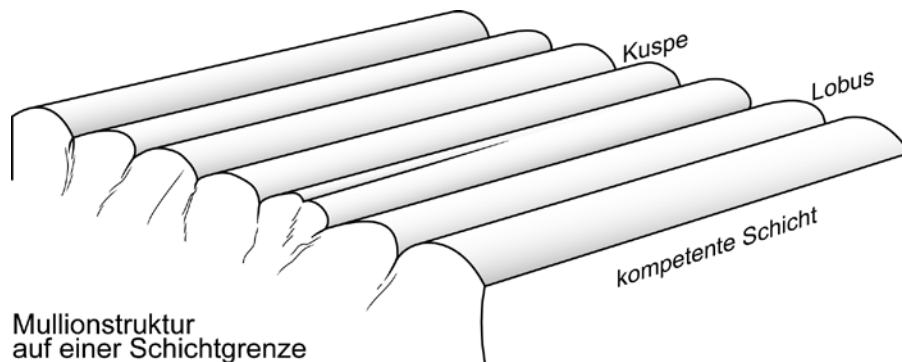
Intensive, kleinräumige Faltung oder Krenulation einer älteren Schieferung, mit parallelen und regelmässigen Faltenachsen, führt zu einer ausgeprägten linearen Struktur. Das **Krenulationslinear** (*crenulation lineation*) kann ein Gefüge-Element sein, das parallel zur dazugehörigen Achsenrichtung verläuft. Es ist im Allgemeinen ein gutes Anzeichen für überlagerte Deformationen. Zwei oder mehr Lineationen können sich gegenseitig schneiden, manchmal auf eine konjugierte Art und Weise, wobei verschiedenartigste, kleinräumige Interferenzmuster entstehen können.



Viele kristalline Schiefer zeigen spektakuläre Beispiele dieser Art von Lineation. Die Rollen von Mineralien während der Deformation kann lokal, das heisst unmittelbar um die betreffenden Mineralkörner, zur "Fältelung" oder "Runzelung" einer bestehenden Schieferung führen. Falls das Abrollen stark genug ist, kann dies eine Art von Chevron-Falten erzeugen, deren Achsen parallel zur Rotationsachse der Mineralien sind.

Mullionstrukturen

Mullions (*Mullions*) sind grobe, kissenförmige Wellung auf einer Oberfläche, die kompetente Lagen von inkompetenten Lagen trennt. Diese langen Strukturen sind äusserst zylindrisch. Der Ausdruck stammt vom alten französischen Wort „*moinel*“ ab und beschreibt die vertikalen Spalten in den hohen Fenstern der gotischen Architektur. Mullions können in jedem Massstab im ursprünglichen Gesteinsmaterial entstehen, im Gegensatz zu Strukturen, die durch Ausscheidungen von eingeführtem Material zustande kamen. Die einzelnen Oberflächenbeschaffenheiten sind entlang der Längsachse des Mullions äusserst konstant. Im Profil ist ein Mullion allerdings komplex aufgebaut: es hat ein geripptes oder gefurchtes Aussehen. Sie sind oft läppchenförmig (*lobate*) mit ausgedehnten und regelmässig gebogenen, konvexen Formen, die durch Spitzen (*cusps*) getrennt werden, die schmale, scharfe und gegen das innere der Mullions Scharniere sind. Bezeichnenderweise sind Mullions mit Glimmer überzogen, aber auch polierte oder länglich gestreifte Oberflächen sind beschrieben worden.

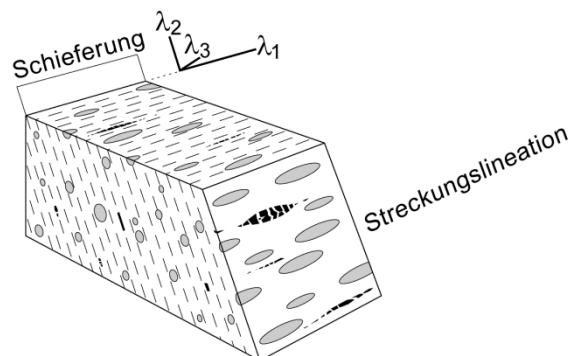


Elongierte, monomineralische Aggregate

Der Begriff **Rod** (*Rod*) ist ein Ausdruck, der die Morphologie beschreibt für längliche, zylindrische und monomineralische Körper aus ausgeschiedenen Mineralien (Quarz, Calcit, Pyrit, usw.) vorkommend in metamorphen Gesteinen aller Grade. Im Profil können *rods* jede beliebige Form haben, elliptisch bis unregelmässigen, zerstückelten Falte. Sie können aus krenulierten Faltscharnieren von Quarzadern entstehen, oder sie können extrem stark gestreckte Gerölle darstellen. Im Allgemeinen nimmt man an, dass sie parallel zu den lokalen Faltenachsen liegen und häufig isolierte Scharniere sind, die von ihren Schenkeln getrennt wurden.

Streckungslineation

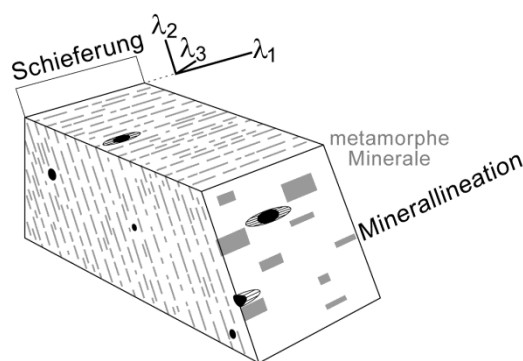
Eine wichtige Art der Lineation entsteht durch die parallele Anordnung von individuellen, detritischen Körnern, Mineralaggregate oder Fragmente jeder Grösse, die infolge von Deformation verlängert und/oder rotiert wurden. Die Lineation kann durch Ooide und Sphärolithe sind vor der Deformation im Allgemeinen recht kugelförmig und müssen deshalb stark verformt worden sein, bevor ihre ellipsoidale Form als **Streckungslinear** bezeichnet werden kann (auch **Extensionslinear**; *elongation, extension* oder *stretching lineation*).



Solche Lineationen entstehen auch bei Geröllen oder Geröllschichten. Streckungslineare liegen meistens in einem Winkel um 90° zur dazugehörigen Faltenachse (“**Querlineation**”, *transverse lineations*), können örtlich jedoch parallel zur Faltenachse ausgerichtet sein. In einem gewissen Gebiet kommt gewöhnlich nur der eine oder der andere Fall vor. Es gibt indessen Beispiele, wo die Streckungslineation im Faltschenkelbereich senkrecht zur Faltenachse und im Bereich des Faltscharniers parallel zur Faltenachse liegt.

Minerallineationen

Metamorphe Mineralien wachsen oft mit einer bevorzugten kristallographischen und räumlichen Orientierung, d.h. ihre langen Achsen sind parallel angeordnet. **Minerallineationen** (*mineral lineations*) sind gekennzeichnet durch eine bevorzugte Orientierung individueller, länglicher oder geplätteter Kristall- oder Mineralaggregate (z.B. lange Amphibolkristalle, Sillimanitnadeln) oder gelängte und subparallele, zur Schieferungsebene ausgerichtete Kristalle. Sie stellen ein penetratives Gefügeelement in einem Gestein dar, gewöhnlich parallel zu anderen Typen von Lineationen und verstärken diese. Minerallineationen können zu den dazugehörigen Falten sowohl parallel als auch geneigt sein. Sie zeigen eine Streckungsrichtung an, wenn die beteiligten Mineralien entlang der Lineation segmentiert werden; sie können die ebenso die Schnittlinie zwischen den Schieferungsflächen und den Rotationsachsen der sich drehenden Mineralien definieren.



Druckschatten (*pressure shadow*) oder **Drucksäume** (*pressure fringe*) 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 einzelnen, bereits existierenden kompetenteren Porphyroblasts oder kompetenten, detritischen Korns wachsen und eine elongierte Struktur produzieren. Sie werden gebildet, wenn das durch Drucklösung gelöste Material im Druckschatten hinter starren Körnern ausfällt und **Fasern** (*fibers*) bildet. Die Fasern bilden lange Säume. Das zentrale Korn und beide Säume haben eine gelängte Struktur gebildet, die meistens parallel zur Schieferung angeordnet ist und eine Lineation definiert.

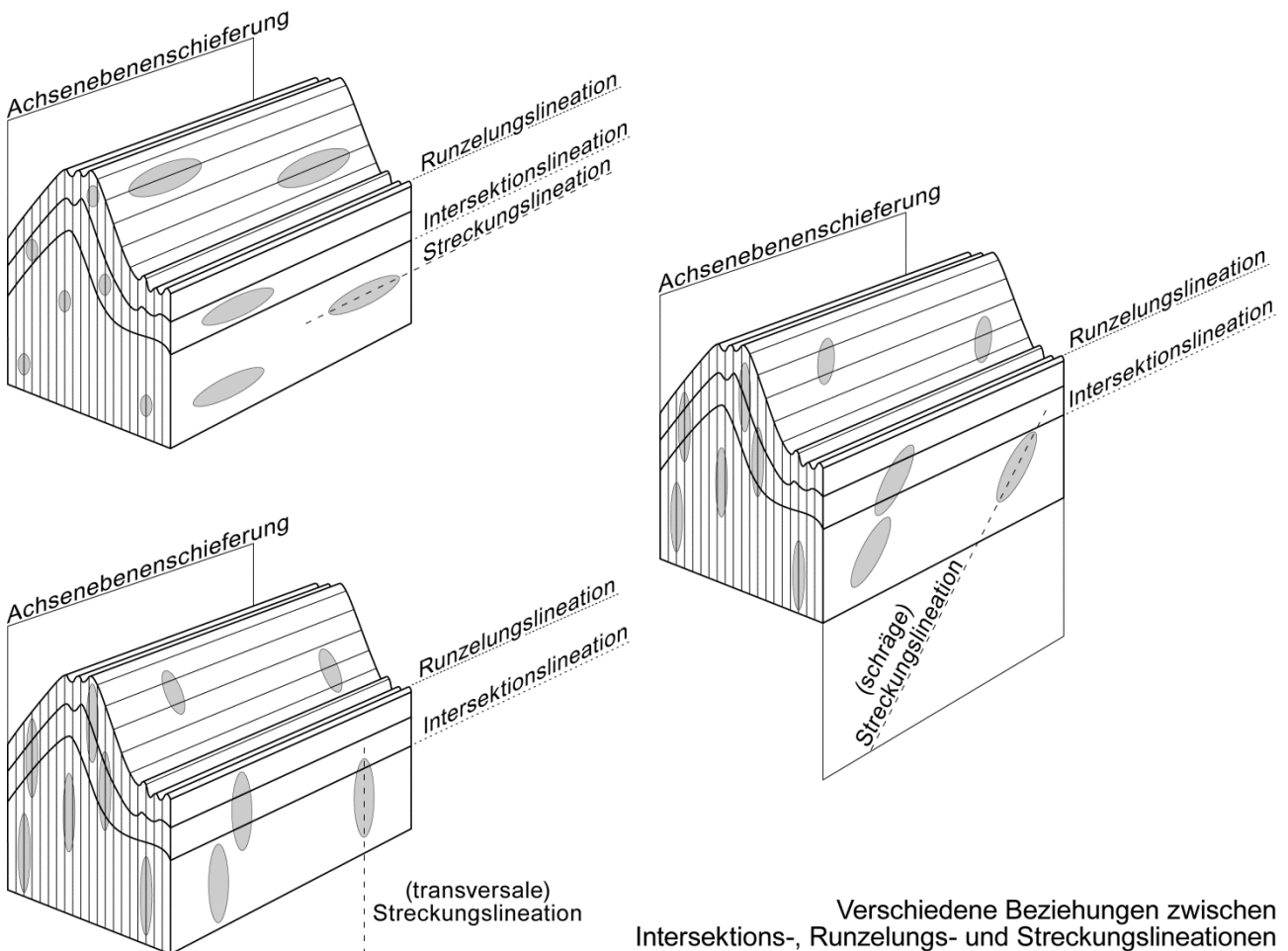
Zusammenhang zwischen Lineation, Verformung und Faltenachsen

Die Lineationen hängen genetisch mit den Schieferungen, in denen sie auftreten zusammen. Dies ist teilweise dort erkennbar, wo beide durch Mineralreorientierungen und Mineralneubildungen gebildet wurden. Deshalb sind sowohl planare als auch lineare Gefüge gleichzeitig Aspekte derselben dreidimensionalen Geometrie. Beide Gefüge sind direkt verknüpft mit dem finiten Verformungsellipsoid, respektive mit der Geschichte der inkrementellen Verformung.

Wenn sich eine Minerallineation auf einer Schieferung entwickelt, die Verformungsmarker wie Fossilien, Ooide oder Blasen enthält, wird durch finite Verformungsmessungen im Gestein deutlich, dass die längste Achse des finiten Verformungsellipsoids λ_1 (Streckungsachse) mit der Minerallineation zusammenfällt. Aus diesem Grunde werden die meisten Minerallineationen auch mit der Streckungslineation verglichen.

Bei den Geröllen ist die Situation komplexer, weil ihre mechanischen Eigenschaften sich von der Matrix unterscheiden. Unter diesen Umständen repräsentiert eine ursprünglich sphärische Geröll- oder Kieselsteinform lediglich die Verformung des Gerölls selbst und nicht den finiten Verformungszustand des Gesteines. Neben der Verformung des Gerölls findet im Allgemeinen auch eine Rotation gegenüber der ihn umgebenden Gesteinsmatrix statt. Eine theoretische Behandlung der Rotation gestreckter Körper (wie Gerölle), die einerseits mit der koaxialen oder nicht-koaxialen Verformungsgeschichte, andererseits mit der finiten Verformung des Gesamtgesteines (Gerölle und Matrix) verknüpft werden muss, ist komplex. Falls die Verformungsgeschichte koaxial ist, besteht die Tendenz, dass die sich streckenden Gerölle mit zunehmender Verformung parallel zu λ_1 reorientieren. Unter nicht-koaxialen Verformungsbedingungen ist es möglich, dass die Gerölle sich senkrecht zur Fliessebene, das heisst (ziemlich) parallel zur finiten Verformungsachse λ_2 , anordnen. Dies ist auch für einige anisometrische Minerale der Fall.

In einigen komplizierten Fällen wie transpressive oder transtensive Zonen, liegt die Streckungslineation an der Intersektion der Schieferung mit der $\lambda_1\lambda_3$ Fläche des Verformungsellipsoides. Die Orientierung der Streckungslineation hängt von der relativen Raten der Entwicklung und der Erholung des Gefüges ab.

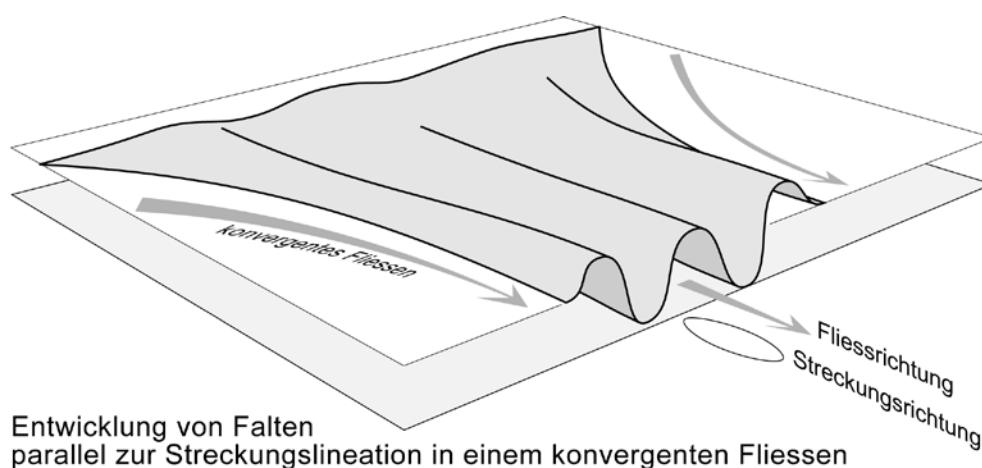


Zusammenhang zwischen Lineation und Faltenachsen

Die Intersektion zwischen Schichtung und Achsenebenenschieferung ist parallel zur Faltenachse orientiert. Andere lineare Strukturen können oder können nicht parallel zur Faltenachse orientiert sein. In zahlreichen Beispielen sind die Streckungslineation und die Minerallineation parallel oder geneigt oder sogar orthogonal zur Faltenachse.

Minerallineationen und gerichtete, gestreckte Objekte, die parallel zu den Faltenachsen verlaufen, sind weitverbreitet. Sie lassen darauf schliessen, dass die Faltenachse parallel zu λ_1 verläuft. Streckung parallel zur Faltenachse kann in der Kulmination von zweiseitig abtauchenden Falten (*doubly plunging fold*) oder in den äusseren Bereichen gebogener Faltengürtel auftreten. Experimente haben jedoch gezeigt, dass Faltung nur geringe faltenachsenparallele Streckung verursacht (meist $<15\%$), selbst bei einer intensiven Verkürzung. Eine andere mögliche Erklärung ist, dass eine faltenachsenparallele Minerallineation ein nachahmendes Wachstumsphänomen darstellt, das infolge einer präexistierenden Anisotropie (z.B.: Intersektionslineation) gesteuert wird.

Bei hoher Scherverformung ist die Minerallineation parallel zur Hauptstreckungsrichtung des finiten Verformungsellipsoids. Der Parallelismus der Lineationen und der Faltenachse kann mehrere Interpretationen haben. Eine ist, dass die unter einem Winkel zur Streckungsrichtung entstandene Faltenachse, annähernd in jene Richtung rotiert worden ist. Theoretisch können sie nur dort absolut parallel sein, wo die Verformung unendlich ist. Dennoch, die Diskrepanz kann bei hoher Verformung vernachlässigbar klein sein. Dieser Mechanismus, das heisst Parallelismus zwischen Faltenachse und Mineralstreckungslineation, wurde für Mylonite vorgeschlagen, in denen grosse Verformung als einfache Scherung betrachtet werden kann. Aus diesem Grunde zeichnet die Lineation die Richtung grosser Bewegungen nach. Die Alternative ist, dass sich die Faltenachsen direkt parallel zur Streckungsrichtung in einem einschränkenden (konvergenten) Fliesen bildeten.



Ursprung der Lineationen

Eine ganze Anzahl von Mechanismen kann zitiert werden, die versuchen, die Entwicklung von Lineationen zu erklären. Was die Bildung von Schieferungen betrifft, so beinhalten diese passive und aktive Rotation, bevorzugtes Wachstum und Verformung.

Gerichtetes Mineralwachstum

Lineationen sind definiert durch eine parallele, lineare Ausrichtung gestreckter Mineralkörner und **Mineralfasern** (*fibres*). Sie entwickeln sich aufgrund eines orientierten Wachstums, zeigen deshalb eine **Wachstumsanisotropie** (*growth anisotropy*), und sind mit den örtlich und zeitlich herrschenden deviatorischen Spannungsbedingungen in Verbindung zu bringen. Die Mineralien können dann eine statistische Gitterorientierung erreichen. Minerallineationen sind gewöhnlich parallel zu anderen Typen von Lineation und verstärken diese.

Strukturen wie Druckschatten sind Wachstumsphänomene auf gegenüberliegenden Seiten von Klüften, die in jenen Teilen des Gesteins entstanden sind, in denen die mittlere Spannung tief ist infolge eines "Abschirmungseffekts" eines relativ starren Körpers in einer sich verformenden, weichen Matrix.

Rods entstehen bei der Segregation von Quarz bei der Bildung von Quarzadern und durch die Deformation von Quarzgeröllen.

Das postkinematische Wachstum von Kristallen kann eine während der Deformation entstandene Lination verstärken. Dies wird **mimetische Kristallisation** (*mimetic crystallisation*) genannt.

Passive Rotation und Zerstückelung

Eine Minerallination kann aber auch als Resultat der Deformation, durch Rotation in eine bevorzugte Position geraten. Die Rotation kann vom Zerbröckeln der grossen Körner und Kornaggregate begleitet werden. Schnüre von Fragmenten bilden eine Lination entlang der Bewegungsrichtung. Dieser Prozess wird in duktilen Myloniten sowie in Kataklasiten identifiziert. Einige dieser Schnüre entstehen bei der Zerstückelung und Rotation von Quarzadern zur Fliessrichtung.

Metrische Streckung (dimensional elongation)

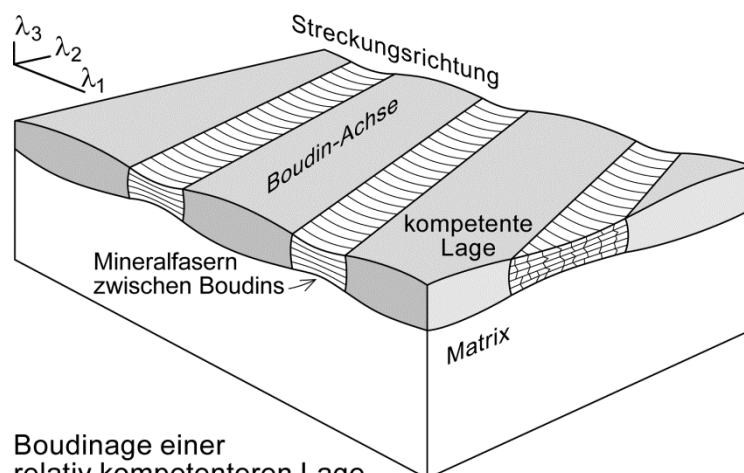
Plastische Deformation und Drucklösung können für metrische Streckung verantwortlich sein. Zum Beispiel ursprünglich sphärische Ooide mit im Allgemeinen denselben mechanischen Eigenschaften wie die Gesteinsmatrix, definieren mit ihrer deformierten ellipsoidalen Form das finite Verformungsellipsoid des Gesteins. Dies ist unabhängig davon, ob die Deformation duktiler Natur oder auf Lösungs-Wiederablagerungsprozesse zurückzuführen ist. Wir haben bereits die Tatsache festgehalten, dass Gerölle nicht nur ihre Form wechseln, sondern auch rotieren, um eine metrische Streckung im Raum zu bilden. Gewöhnlich wird die Interpretation solcher Linationen schwierig, sobald eine Körperrotation in der Deformation involviert ist. Deformation von Körnern und Mineralaggregaten, die zu einer Lination beitragen und durch plastische oder diffusive Prozesse geführt werden, entwickeln oft eine kristallographisch bevorzugte Orientierung.

Boudinage-Strukturen

Boudins sind lineare, wurstförmige Strukturen, die durch Dehnung, Verengung und schliesslich Segmentation einer Schicht, die durch eine weniger kompetente Matrix umgeben wird, gebildet werden.

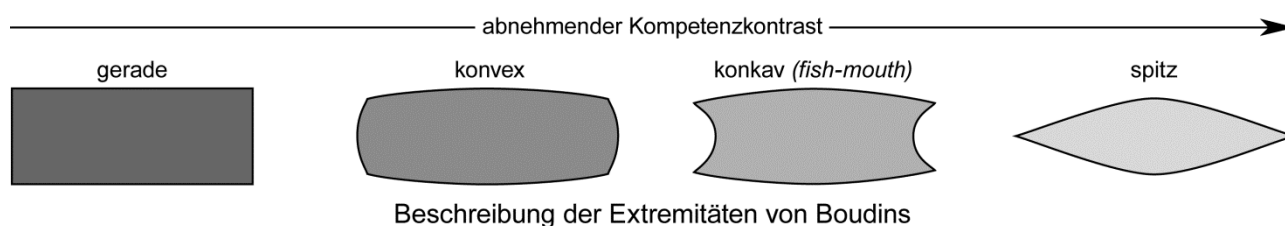
Beschreibung

Unter Boudinage (*boudinage*) versteht man eine im Allgemeinen kompetentere Schicht, die in einer inkompetenten Matrix periodisch segmentiert wurde. Objekte wie Fossilien, Gerölle und Mineralien können ebenfalls in kleine, boudinförmige Strukturen deformiert werden (*linear streaking of minerals*). Folglich erstreckt sich Boudinage im Massstab von Inframillimeter zu Dekameter; typischerweise wird eine harte Schicht oder ein Gesteinsgang in eine Serie gestreckter und aufgereihter Blöcke zerbrochen (deren zylinderförmige Form den Namen **Boudin** herbeiführte; das Wort Boudin kommt ursprünglich von Frankreich, wo man damit an einer Schnur aneinander gereichte Würste bezeichnet).



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

Die Terminologie basiert auf Profilen, die orthogonal zur langen Achsen der Boudins gesehen sind. Boudins sind im Profil variabel, symmetrisch oder asymmetrisch. Die langen Seiten der Boudins (gewöhnlich die Schichtfläche) können konkav (Knochen-förmige Boudins), konvex (Fass-förmige Boudins) oder zueinander parallel (blockartige Boudins) sein. Die Formen reflektieren Duktilitätskontraste zwischen Schicht und Matrix.



Boudins mit einer blockartigen Geometrie

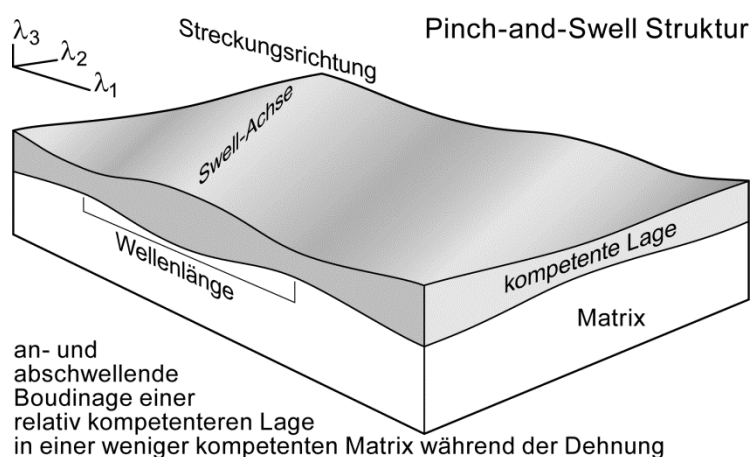
In niedriggradigem Gestein zeigen häufig die Boudins rechteckige, Fass-förmige, rhomboide und rautenförmige Formen. Die Boudins sind meistens getrennt und bilden so eine **pull-apart** Struktur, die üblicherweise mineralisiert ist. Die Trennungszone wird als **scar** bezeichnet.

Boudins mit einer welligen Geometrie

Bei höhergradigem Gestein und in nichtverfestigten Lagen sind die kompetenten Schichten meistens nicht zerbrochen. Dann sind die Boudins von fast immer noch ursprünglichen dicken Lagen durch schmale, ausgedünnte **Einbuchtungen** (*necks*) getrennt und die daraus entstehende Struktur ist als **pinch-and-swell** ("an- und abschwellige Strukturen") bekannt.

Nach der Trennung, weisen die getrennten Schichtsegmente Linsen- oder Kissenformen auf. Eine extreme Dehnung verdünnt die Einbuchtungen bis lange, feine **Salbänder** (*selvages*) der Schicht übrig bleiben, die variabel geformte Schwellen verbinden. Boudins können an einem Punkt enden (spitz zulaufende, linsenförmige Boudins), oder haben konvexe (Wurst-Boudins), gerade (blockige Boudins) und konkave bis extrem-konkave (*fishmouth*) Endpunkte.

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.

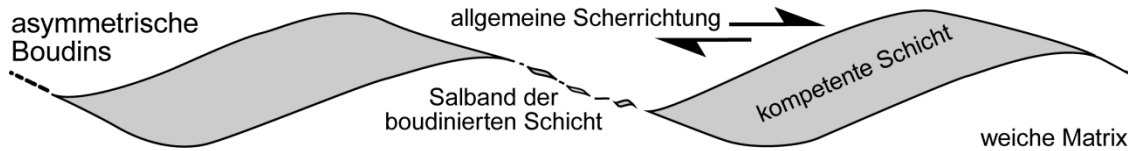


Foliationsboudinage

Strukturen, welche den Boudin (oder *pinch-and-swell*) Strukturen ähnlich sind, können in stark homogen geschieferten Gesteinen vorkommen, welche keine scheinbaren lithologischen Unterschiede zwischen den Boudins und dem umgebenden Nebengestein aufweisen. Diese im Allgemeinen langen, linsenförmigen (unboudinierten) Strukturen werden als **Foliationsboudinage** (*foliation boudinage*) bezeichnet.

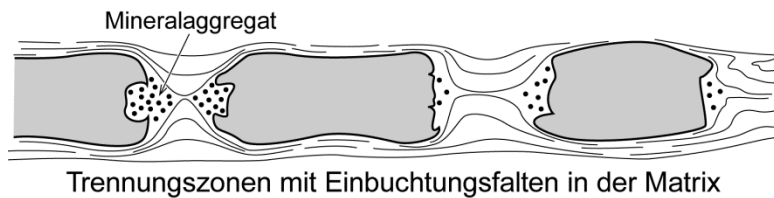
Asymmetrische Boudins

Asymmetrische Boudins kommen häufig in mittel- bis hochgradigen metamorphen Gesteinen vor. Solche Boudins haben häufig an diagonal entgegengesetzten Ecken ausgedehnte Rautenformen; diese Form kann als Schersinnindikator verwendet werden, und ist kohärent mit den ausgedünnten Spitzen.



Trennungszone

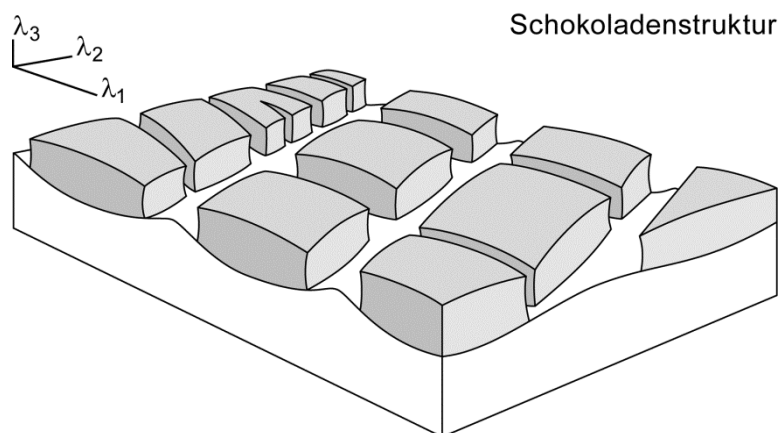
Boudins sind durch ein Material getrennt, das entweder ursprünglich beidseits der segmentierten Schicht gelegen hat, oder durch in situ entstandene Mineralaggregate, die sich bildeten, als die Boudins sich voneinander trennten (fortbewegten). Die duktilen Schichten, die unterschiedliche Boudins umgeben, und die in die Trennungszone fließen, bilden **Narbenfalten** (*scar folds*) (oder **Einbuchtungsfalten**: *neck folds*). Quarz, Glimmer und Karbonat, sowie Pegmatite und Leukosom-Adern in hochgradigen Gesteinen stellen Materialumlagerung in den Trennungszonen dar.



Beziehung zu anderen Strukturen

Boudins sind gewöhnlich linear und durch einen einzelnen Satz von Dehnungsbrüche getrennt; häufig sind ihre langen Achsen parallel zur Faltenachsen angeordnet. Eine Schicht kann indessen in zwei, schichtparallele Richtungen segmentiert sein. Segmentation und Öffnung der Trennungszonen in beiden Streckungsrichtungen erzeugen Boudins mit ähnlichen Längendimensionen. Gestreckte Formen kommen dabei weniger vor. Diese Art von Boudinage nennt man **chocolate-tablet boudinage** ("Schokoladentafel-Boudinage").

Boudins (und Mullions) sind gewöhnlich lang und auf gewisse Lagen beschränkt. Sie erscheinen deshalb im Aufschlussbereich nicht penetrativ.



Eine Boudinachse kann in ähnlicher Weise wie eine Faltenachse gemessen werden. Die *neck line* verbindet Punkte kleinster Lagenmächtigkeit. Die Länge eines Boudins wird parallel zur Boudinachse gemessen. Die Breite und Dicke sind Dimensionen orthogonal zu dieser Achse.

Entstehung

Boudinage entsteht infolge inhomogener, schichtparalleler Streckung eines Gesteins oder einer Minerallage, die von einer duktileren Matrix umgeben ist, und kann mühelos bei Gesteins-Analogexperimenten reproduziert werden.

Ein einfaches konzeptuelles und physikalisches analoges Modell, das die Boudinage beschreibt, besteht aus einem Dreischichtpaket mit einer steifen, kompetenten Mittelschicht. Die Verformungsrate in solch einer Abfolge variiert für die duktile Deformation der verschiedenen Schichten. Das Paket wird normal zu den Schichten komprimiert und verursacht ein Herausquetschen der duktilen Matrixschichten. Reibung auf den Kontaktflächen zwischen den Schichten verursacht Extension und eine Verkleinerung der Längsspannung in der steifen Schicht. Wenn die Verformungsrate in einer gesamten Gesteinsabfolge jene Rate übersteigt, bei der eine kompetente Schicht noch duktil deformiert werden kann, wird diese Schicht bei Überschreitung ihrer Festigkeit spröde zerbrechen. Andauernde Kompression führt zu fortlaufender Extension und zum Zerbrechen.

Die Form der Boudins im Profil ist eine Funktion des Rheologiekontrastes zwischen Schicht und Matrix, Schichtdimension, und Zustand der Spannung und Verformung. Die Viskosität der Schicht und der Zustand der Spannung kontrollieren die Art der Verformung (spröde Extension oder Fließen). Bei grossen Viskositätsunterschieden hat die kompetentere Schicht ein spröderes Verhalten, und es entstehen Zugbrüche (*tensile failure*) durch die Bildung diskreter Extensionsbrüche. Wenn dieser Unterschied kleiner ist, dünnen lokal die Schichten auf duktile Art aus (Einbuchtung, *necking*), bevor sie schliesslich zerbrechen.

Ein ähnliches System, nun komprimiert parallel zu den Lagen und auch mit erlaubter Extension parallel zu den Lagen produziert Aufwölbungen mit Boudins, die ungefähr normal zu den Faltenscharnieren stehen, die boudiniert sein können.

Schätzung der Verformung aus der Boudinage

Boudinage wird herkömmlich in Verformungsfeldern ausgedrückt behandelt, die durch die Werte der zwei Hauptelongationen λ_1 und λ_2 definiert sind, wie sie in der Fläche der Lagen gemessen werden.

- Im Verformungsfeld $\lambda_1 > 1 > \lambda_2$ gibt es keinen Bereich der Hauptextension und der Hauptkontraktion und es entwickeln sich Falten in einer Richtung und Boudins (oder Kreuzklüftung) orthogonal zu den Faltenachsen.
- Im Verformungsfeld $\lambda_1 > \lambda_2 > 1$ haben sich alle Richtungen innerhalb der Ebene der Schichtung ausgedehnt und produzieren Schokoladentafel-Boudinage oder linsenförmige, phacoidale Strukturen. Viele Einbuchtungen werden ungefähr senkrecht zu λ_1 ausgerichtet, obgleich gewöhnlich keine einheitliche Orientierung vorherrscht. Auf der Feldgrenze $\lambda_2 = 1$ bildet sich ein Set von Boudins mit den langen Achsen orthogonal zu λ_1 .

Zusammenfassung

Viele Lineationen sind Verformungsindikatoren und diese Lineationen sind grundsätzlich parallel zur maximalen finiten Streckungsachse.

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

- Lineationen, welche die Bewegungsrichtung entlang einer Fläche (z.B. *slickenside striations*) oder einer ganzen Bewegungszone (Streckung in Scherzonen) anzeigen.
- 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. Das Intersektionslinear (Schnitt zwischen Schieferung und Lagenbau) ist immer parallel zur Faltenachse.

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

Die Trennung zwischen Boudins ist ein Hinweis auf Matrixverformung. Die Anwesenheit gestreckter Boudins weist darauf hin, dass die Streckungsrichtung parallel zur boudinierten Schicht und fast senkrecht zur Länge der Boudins ist. Die Präsenz von Schokoladentafel-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.

Wir sehen nun, dass das Verständnis für die verschiedenen Arten von Lineationen uns Informationen über die Bewegungsgeschichte eines Gebietes geben kann. Für lange Zeit wurden Lineationen mehr oder weniger ungeachtet ihres Ursprungs als Indikatoren für die "**Richtung des tektonischen Transportes**" ("*direction of tectonic transport*") gebraucht. Der Ausdruck der "Richtung des tektonischen Transportes" ist gleichbedeutend mit der Richtung, in der eine Gesteinsmasse relativ zu einer anderen verlagert worden ist. Letzteres ist eine vernünftige Annahme bei hohen Scherverformungen, wie bei bedeutenden Überschiebungs- oder Abscherungssystemen. In einem Handstück hingegen hat die Streckungslineation jeweils bloss die Bedeutung der Richtung maximaler finiter Extension. Vorausgesetzt, dass die Falten und alle assoziierten Lineationen zum selben tektonischen Ereignis gehören, zeigen die parallel zur Faltenachse angeordneten Lineationen wie Schichtungs/Schieferungsintersektion, Mullions, rods, und Krenulationslineation keine spezifische geometrische Beziehung zur regionalen **Fliessrichtung** (*flow direction*).

Empfohlene Literatur

- Cloos E. 1962. Lineation. A critical review and annotated bibliography. *Geological Society of America Memoir* **18**, 122 + 14.
- Ramsay J. G. & Huber M. I. 1983. *The techniques of modern structural geology - Volume 1 : Strain analysis*. Academic Press, London. 307 p.
- Sanderson D. J. 1974. Patterns of boudinage and apparent stretching lineation developed in folded rocks. *J. Geol.* **82**, 651-661.

Auf Deutsch

- Sander B. 1948. *Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper*. Springer Verlag, Wien.

Web

<http://www.earth.monash.edu.au/Teaching/mscourse/lectures/lec1.html>