

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, z.B. eine Reihe länglicher Kieselsteine, Kalifeldspat-Porphyroblasten oder Einschlüsse, deren lange Kornachsen alle parallel orientiert sind, oder auch Strömungsmarken. Die primäre Anordnung von Markern ist mit der Fliessrichtung von Magma oder Paläoströmungen verbunden und bildet so genannte **Fliesslinien**. Strukturgeologie befasst sich insbesondere mit Lineationen, die als Folge einer Deformation entstanden sind.

Lineationen liegen genau genommen auf Schieferungsflächen; das deutet an, dass die Lineationen so penetrativ 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.

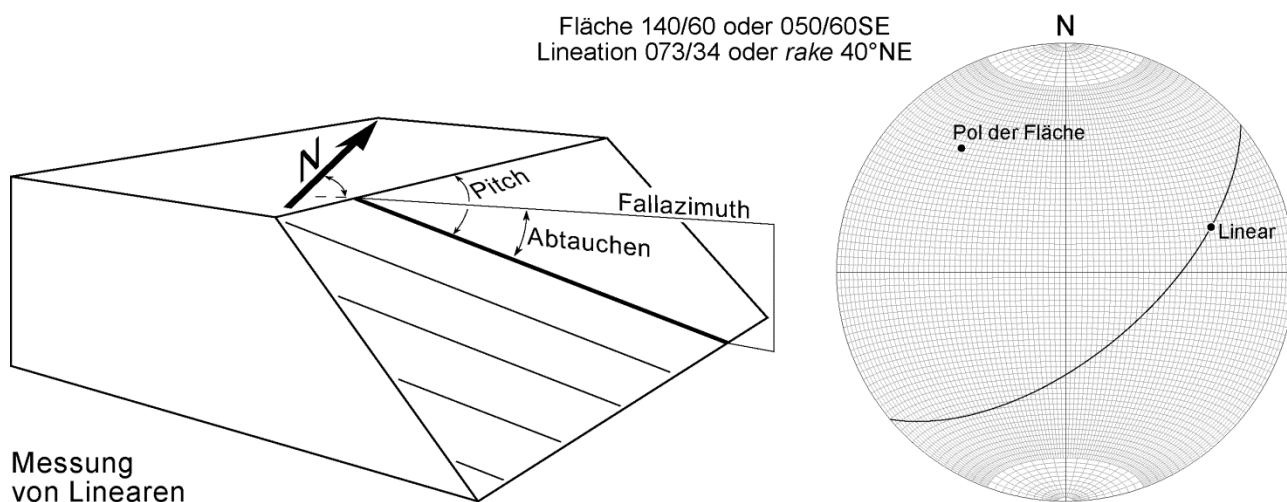
Lineationen werden als L-Elemente des Gesteinsgefüges bezeichnet. Wo L-Linien unterschiedlicher Generationen im gleichen Gefüge auftreten, werden ihnen Kennnummern entsprechend dem relativen Alter entsprechen gegeben: L_0 ist die primäre Lineation, L_1 , L_2 und L_n für die sekundäre Lineation usw. in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

Gesteine mit Lineation, aber ohne erkennbare Schieferung, sind besonders in Gneisen, als L-Tektonite (oder Bleistift Tektonite) bekannt. Die Lineationen sind eines der bedeutendsten Gefügeelemente, 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; engl.: *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) und sind deshalb kein Gefügeelement.

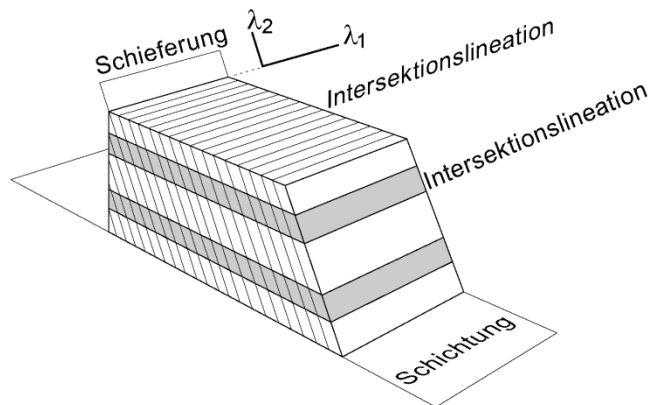
“Grate und Rillen” (*ridges and grooves*) oder **Striemungen** (*striations*) sind parallele lineare Spuren, die durch die Abschleifung während der Scherbewegung einer Verwerfungsseite auf der gegenüberliegenden Seite entstehen. Sie zeigen die Richtung des Gleitvektors der Verwerfung an.

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 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.

Wenn ein Gestein entlang einer C-Fläche einer CS-Struktur (beschrieben in der Vorlesung über 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.

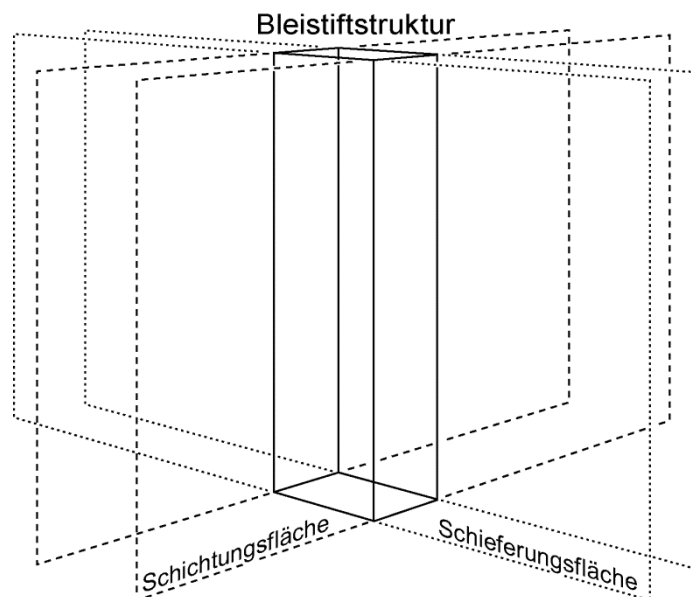
Intersektionslineationen

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 irgendeiner zufälligen Kluftfläche produziert eine lineare Struktur, die bei der Strukturanalyse allerdings ohne Bedeutung ist; direkte Messungen einer Lineation dürfen ausschliesslich auf und nur auf der Schieferungsebene erfolgen, die zur selben Verformungsperiode gehört wie die Lineation selbst. Die Intersektionslineation kann jedoch auch auf der Schichtfläche gemessen werden.

Wenn die Achsenebenenschieferung und die Schichtung (Stoffbänderung oder eine weitere Schieferung) stark ausgebildet sind, so bricht das Gestein häufig in längliche Gesteinsstücke. Die resultierende Geometrie tritt hauptsächlich mit rechteckigen oder prismatischen Querschnitten im Bereich der lokalen Faltenscharniere auf. Man spricht von **Bleistiftstrukturen** (*pencil structures*).



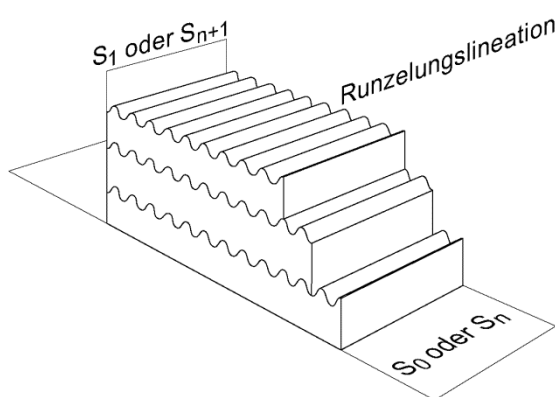
Intersektionslineare und Bleistiftstrukturen werden häufig verwendet, um die Orientierung der lokalen Faltenachsen zu bestimmen, wenn die letzteren nicht aufgeschlossen sind.

Faltenachsen als Lineationen

Faltenachsen von zylindrischen Falten sind lineare Strukturen.

Runzellineation

Kleinräumige Faltung oder Krenulation einer älteren Schieferung (und gelegentlich Schichtung) mit parallelen, eng beieinanderliegenden und regelmässigen Faltenachsen, führt zu einer ausgeprägten linearen Anordnung. Das **Krenulationslinear** (*crenulation lineation*) kann ein Gefügeelement sein, das parallel zu den dazugehörigen engabständigen Faltenachsen verläuft. Viele kristalline Schiefer zeigen diese Art von Lineation. Es ist im Allgemeinen ein gutes Anzeichen für überlagerte Deformationen. Zwei oder mehr Runzellineationen können sich gegenseitig schneiden, manchmal auf eine konjugierte Art und Weise, wobei verschiedenartigste, kleinräumige Interferenzmuster entstehen können.

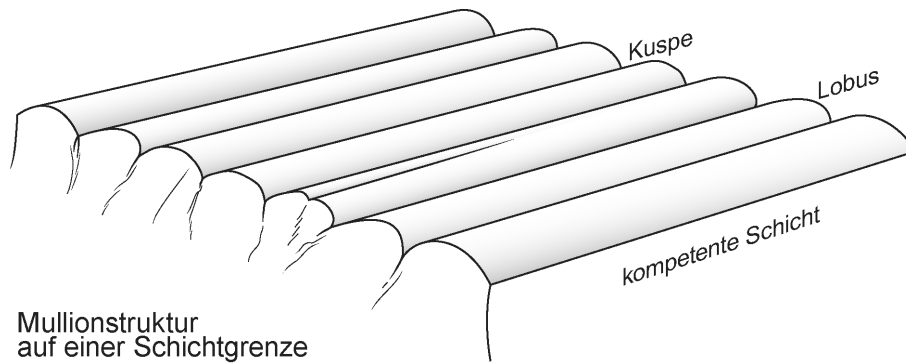


Das Rollen von Mineralien während der Deformation kann lokal, das heisst unmittelbar um die betreffenden Mineralkörner, zur "Fältelung" oder "Runzelung" einer bestehenden Schieferung

führen. Falls das Abrollen stark genug ist, kann dies eine Art von Falten erzeugen, deren Achsen parallel zur Rotationsachse der Mineralien sind und die daraus resultierenden Knitter quer zur allgemeinen Fließrichtung verlaufen.

Mullionstrukturen

Mullions (*Mullions*) sind grobe, kissenförmige Wellungen auf der Oberfläche zwischen einer kompetenten und einer inkompetenten Lage. Der Ausdruck stammt vom alten französischen Wort „moine“ 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. Sie sind oft **läppchenförmig** (*lobate*) mit ausgedehnten und regelmässig gebogenen, konvexen Oberflächen der kompetenten Schicht, die durch **Spitzen** (*cusps*) ziemlich regelmässig getrennt werden, die schmale, scharfe und nach innen schliessende Scharniere sind. Diese langen Lobat- und Kuspat Strukturen sind äusserst zylindrisch. 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. Typischerweise sind Mullions mit Glimmer überzogen, aber auch polierte oder länglich gestreifte Oberflächen sind beschrieben worden.



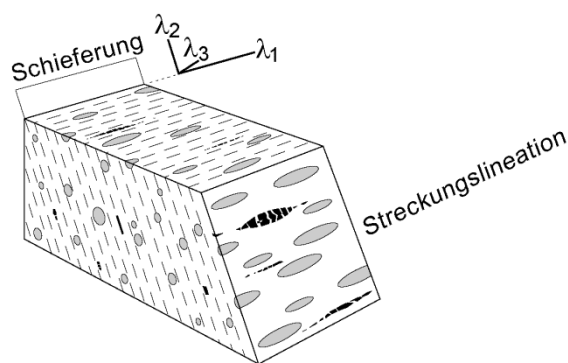
Mullions bilden meistens die Intersektion einer Schichtfläche und einer groben, mit Zwischenraum Schieferung in der kompetenten Lage.

Elongierte, monomineralische Aggregate

Der Begriff **Rod** (*Rod*) ist ein Ausdruck, der die Morphologie beschreibt für längliche, zylindrische und monomineralische Körper aus ausgeschiedenen Mineralien (Quarz, Kalzit, Pyrit, usw.) vorkommend in metamorphen Gesteinen aller Grade. Im Profil können *rods* jede beliebige Form haben, von elliptischen bis unregelmässige, zerstückelten Falten. Sie können aus krenulierten Faltenscharnieren 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.

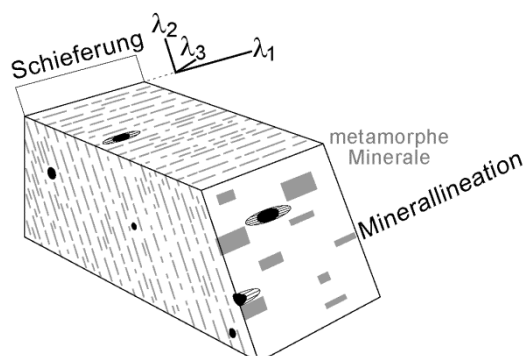
Streckungslineation

Die parallele Anordnung von individuellen Körnern, Mineralaggregaten oder Fragmenten jeder Grösse, die infolge von Deformation verlängert und/oder rotiert wurden, ist eine wichtige Art der Lineation. Ellipsoidale Ooide und Sphärolithe müssen verformt worden sein, da sie vor der Deformation im Allgemeinen recht kugelförmig sind. Ihre langen Achsen werden als **Streckungslinear** bezeichnet (auch **Extensionslinear**; *elongation*, *extension* oder *stretching lineation*). Solche Lineationen entstehen auch bei Geröllen oder Geröllschichten. Längliche Körner oder Kornaggregate definieren eine **bevorzugte Kornformorientierung** (*preferred shape orientation*).



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 Kristall- oder Mineralaggregate (z.B. lange Amphibolkristalle, Sillimanitnadeln) oder 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 ebenso die Schnittlinie zwischen den Schieferungsflächen und den Rotationsachsen der sich drehenden Mineralien definieren.



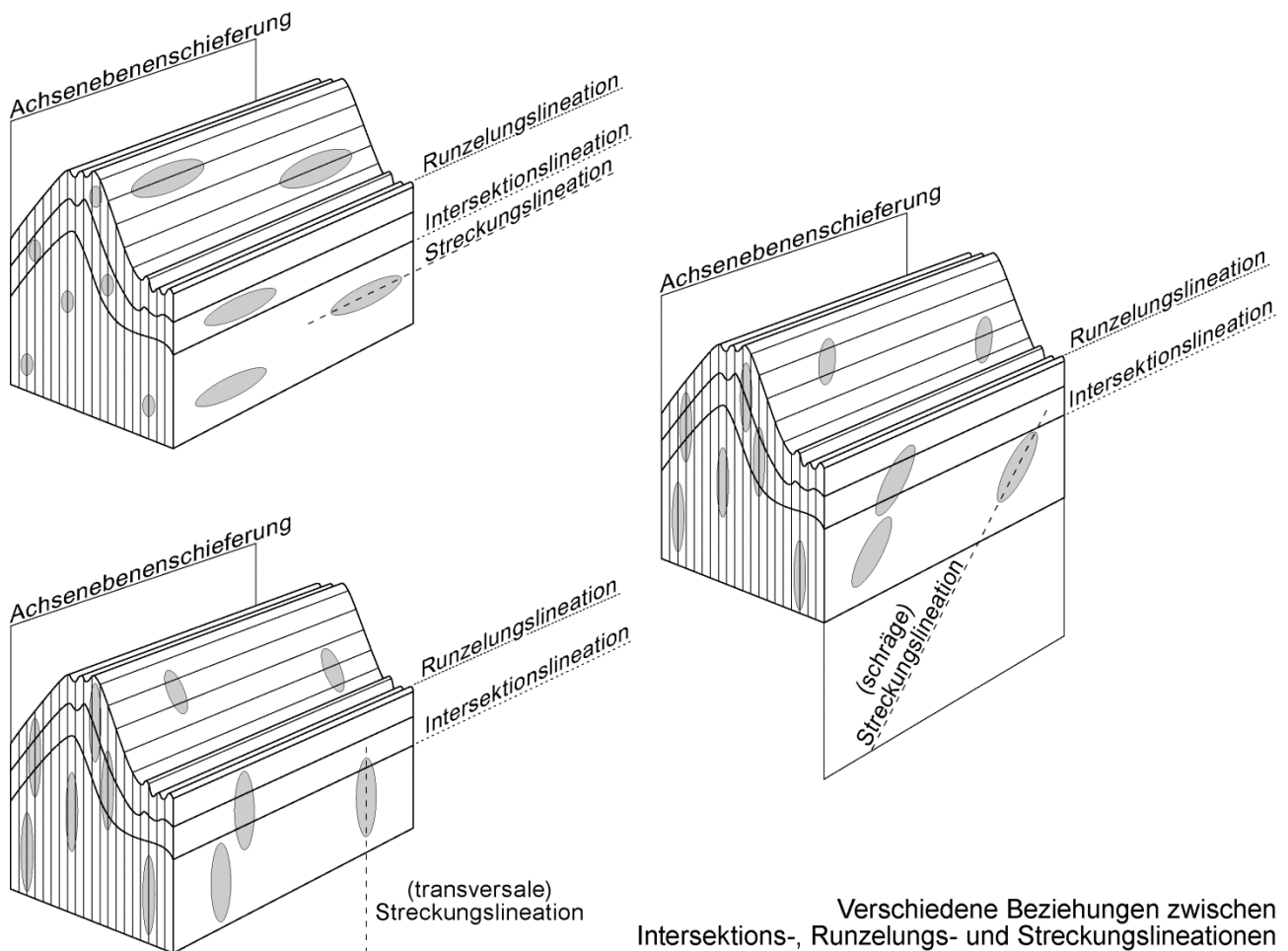
Druckschatten (*pressure shadow*) oder **Drucksäume** (*pressure fringe*) bestehen häufig aus spindelförmigen Mineralaggregaten. Solche Strukturen beinhalten meistens Aggregate von neugewachsenen Körnern, die auf den gegenüberliegenden Seiten eines bereits existierenden kompetenten Porphyroblasts oder klastischen Objekts wachsen und eine elongierte Struktur produzieren. Diese neuen Körner kristallisieren, wenn das durch Drucklösung gelöste Material im Druckschatten hinter und auf beiden Seiten starrer Körner ausfällt und **Fasern** (*fibers*) bildet. Die Fasern bilden lange Säume, die Lücken während der Verformung in Dehnungsrichtung zwischen Korn und Matrix füllen. Das zentrale Korn und beide Säume bilden eine gelängte Struktur, die meistens parallel zur Schieferung angeordnet ist und eine Lineation definiert. Kreisförmige Säume mit radialen Fasern auf der Schieferung charakterisieren jedoch reine Scherung ohne definierte Dehnungsrichtung (Pfannkuchenform des finiten Verformungsellipsoids). In ähnlicher Weise gibt das orientierte Wachstum der Mineralfasern in Spalten und Adern die lokale Dehnungsrichtung wieder, und kann die inkrementale Dehnungsrichtung aufzeichnen.

Zusammenhang zwischen Lineation und Verformung

Die Lineationen hängen genetisch mit den Schieferungen, auf 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, beziehungsweise 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 X (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. Die 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 X reorientieren. Unter nicht-koaxialen Verformungsbedingungen ist es möglich, dass die Gerölle sich senkrecht zur Fliessebene, das heisst (ziemlich) parallel zur finiten Verformungsachse Y , 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 XZ Fläche des

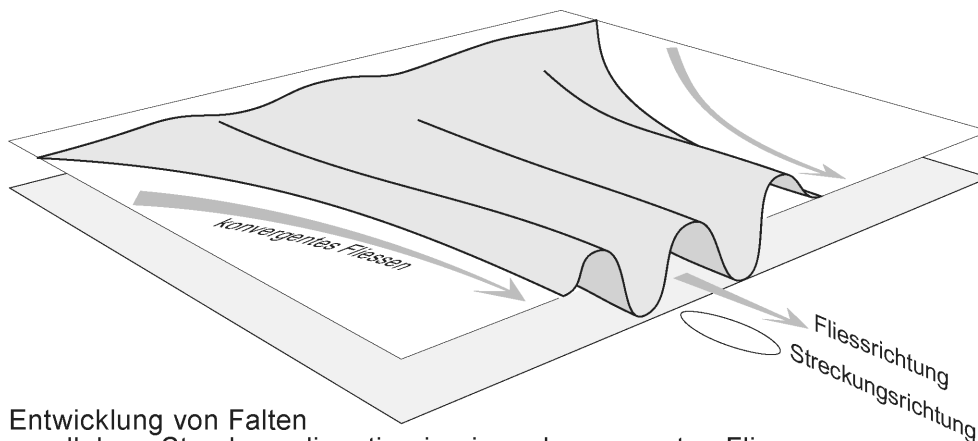
Verformungsellipsoides. Die Orientierung der Streckungslineation hängt von den relativen Raten der Entwicklung und der Erholung des Gefüges in Bezug auf die auferlegte Verformungsrate ab.

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, 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 zur X-Achse des finiten Verformungsellipsoids verläuft. Streckung parallel zur Faltenachse kann in der Kulmination von zweiseitig abtauchenden Falten (*doubly plunging fold*) oder in den äusseren Bereichen gebogener Faltengebirge 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.

Streckungslineare liegen meistens schräg zur Faltenachsen; die Lineationen in einem Winkel von ca. 90° zur dazugehörigen Faltenachse, werden "**Querlineation**" (*transverse lineations*) genannt. 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) Fließen bildeten.



Entwicklung von Falten parallel zur Streckungslineation in einem konvergenten Fließen

Ursprung der penetrativen Lineationen

Mehrere Mechanismen werden zitiert, um die Entwicklung von Lineationen zu erklären. Wie für die Bildung von Schieferungen, beinhalten diese Mechanismen bevorzugtes Wachstum, passive und aktive Rotation und Verformung von Mineralkörnern.

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 Objekts 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 Lineation verstärken. Dies wird **mimetische Kristallisation** (*mimetic crystallisation*) genannt.

Passive Rotation und Zerstückelung

Eine Minerallineation kann auch durch Rotation in eine bevorzugte stabile Position während der Deformation entstehen, welche annähernd parallel zur Streckungsrichtung sein kann. Die Rotation kann vom Zerbröckeln der grossen Körner und Kornaggregate begleitet werden. Ketten von Fragmenten bilden eine Lineation entlang der Bewegungsrichtung. Dieser Prozess wird in duktilen Myloniten sowie in Kataklastiten identifiziert. Bei letzteren spricht man von **kataklastischer Lineation** (*cataclastic lineation*).

Einige dieser Schnüre entstehen bei der Zerstückelung und Rotation von Quarzadern in Fließrichtung.

Metrische Streckung (dimensional elongation)

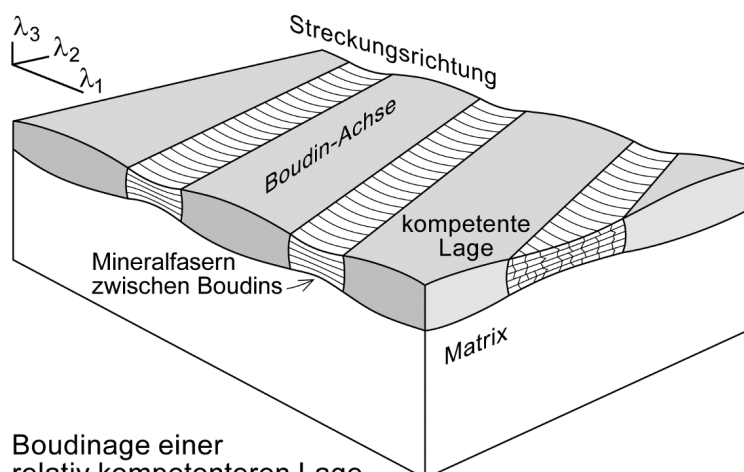
Duktile Deformation und Drucklösung können für metrische Streckung verantwortlich sein. Zum Beispiel ursprünglich sphärische Ooide mit im Allgemeinen denselben mechanischen Eigenschaften wie die Gesteinsmatrix, definieren mit ihrer deformierten ellipsoidalen Form das finite Verformungsellipsoid des Gesteins.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

Boudinage-Strukturen

Boudins (*boudins*, Blutwurst auf Französisch) sind nebeneinanderliegende Segmente einer Schicht oder eines Objekts, die in einer weniger kompetenten (d.h. mehr deformierbaren) Matrix eingebettet sind. **Boudinage** beschreibt den Prozess der Dehnung, Einschnürung und schließlich Segmentierung und Trennung dieser Segmente; dies wird im Allgemeinen durch Verlängerung parallel zur Schichtung und durch Zerbrechen der kompetenten, boudinierten Schicht während des duktilen Fließens der weniger kompetenten Matrix erzeugt. Objekte wie Fossilien, Gerölle und Mineralien können ebenfalls in kleine, boudin-förmige Strukturen deformiert werden (*linear streaking of minerals*).

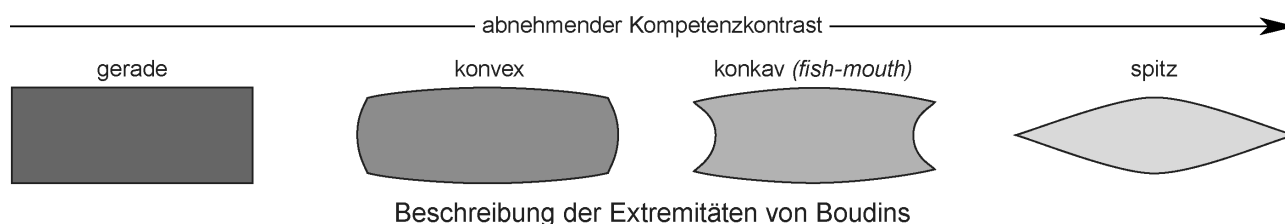
Beschreibung

Boudinage erstreckt sich im Massstab von Mikrometer 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). Die Terminologie basiert auf Profilen, die orthogonal zur langen Achse der Boudins sind.



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

Boudins sind im Profil variabel, symmetrisch oder asymmetrisch. Die langen Seiten der Boudins (gewöhnlich die Schichtfläche) können konkav (knochenförmige Boudins), konvex (fassförmige Boudins) oder zueinander parallel (blockartige Boudins) sein. Die Formen reflektieren Duktilitätskontraste zwischen Schicht und Matrix. Grosse Materialkontraste erzeugen Boudins mit scharfen Kanten und kleine Materialkontraste erzeugen abgerundete Boudins.



Boudins mit einer blockartigen Geometrie

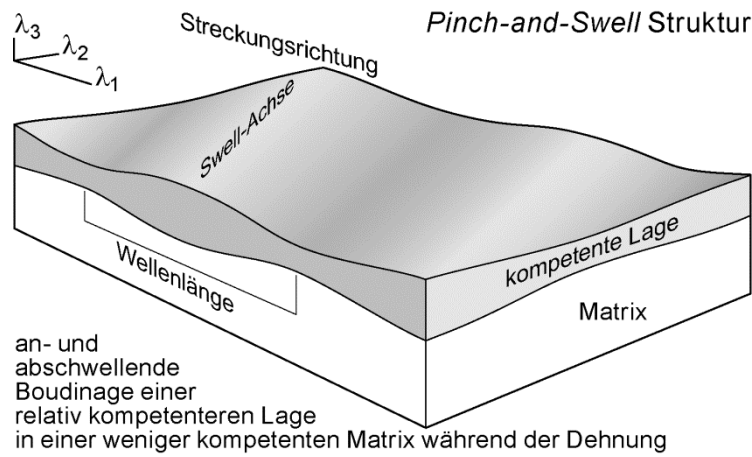
In niedriggradigem Gestein zeigen die Boudins häufig rechteckige, fassförmige, rhomboide und rautenförmige Formen. Die Boudins sind meistens getrennt und bilden so eine ***pull-apart*** Struktur, die üblicherweise mineralisiert ist. Die Trennungszone wird als ***scar*** bezeichnet.

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 abschwellende*** Struktur") bekannt.

Nach der Trennung weisen die getrennten Schichtsegmente Linsen- oder Kissenformen auf. Eine extreme Dehnung verdünnt die Einbuchtungen bis lange, feine Bänder der Schicht übrig bleiben, die variabel geformten 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.

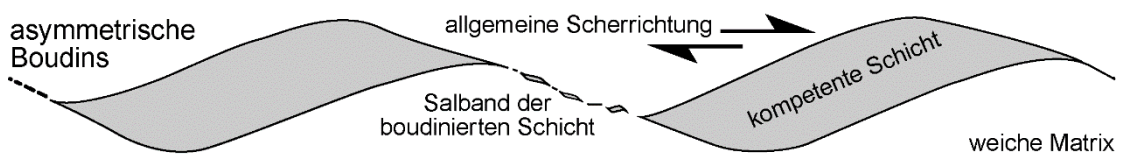


Schieferungsboudinage

In stark homogen geschieferten Gesteinen können Strukturen vorkommen, welche Boudin- (oder *pinch-and-swell*) Strukturen ähnlich sind, jedoch keine erkennbaren lithologischen Unterschiede zwischen dem segmentierten Gestein und dem umgebenden Nebengestein aufweisen. Die im Allgemeinen langen, linsenförmigen Boudins sind durch Frakturen getrennt, die oft mit Adermaterial gefüllt sind. Die gebrochenen Schieferungsflächen sind häufig neben dem Trennungsbruch gebogen oder eingeklemmt. Das ganze wird als **Schieferungsboudinage** (*foliation boudinage*) bezeichnet. Bei einer Boudinage in steifen Schichten gibt es Abweichungen, hier ist die Foliationsboudinage weniger aufeinanderfolgend und weniger periodisch.

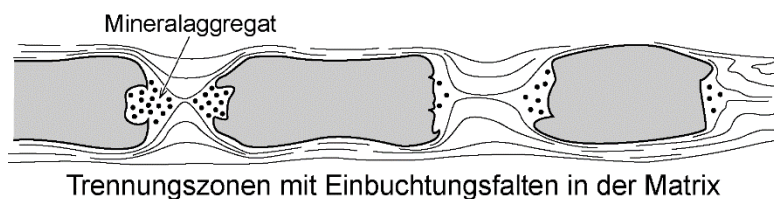
Asymmetrische Boudins

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



Trennungszone

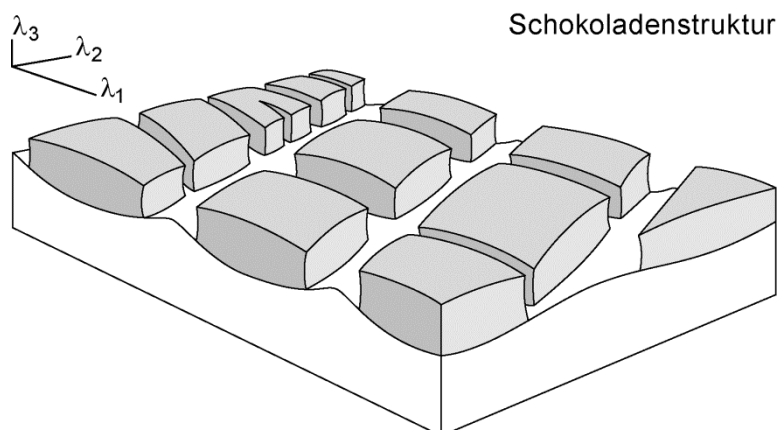
Boudins sind durch ein Material getrennt, das entweder ursprünglich beidseits der segmentierten Schicht gelegen hat, oder durch in situ entstandene Mineralaggregate, die sich bildeten, als die Boudins sich voneinander trennten (fortbewegten). Die duktilen Schichten, die unterschiedliche Boudins umgeben, und die in die Trennungszone fließen, bilden **Narbenfalten** (*scar folds*) (oder **Einbuchtungsfalten**: *neck folds*, auch *flanking structures* genannt). 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 beide (oder mehr als zwei, die Wirkung der reinen Scherkomponente über die segmentierte Schicht) Streckungsrichtungen erzeugen Boudins mit ähnlichen Längendimensionen. Gestreckte Formen kommen dabei weniger vor. Die dreidimensionale, blockartige Fragmentierung der Schichten 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 **Einschnürungslinie** (*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 kann mühelos bei Gesteins-Analogexperimenten reproduziert werden. Boudinage entsteht infolge inhomogener, schichtparalleler Streckung und Segmentierung eines relativ harten Gesteins oder einer Minerallage, die von einer duktileren Matrix umgeben ist.

Ein einfaches konzeptuelles und physikalisches analoges Modell, das die Boudinage beschreibt, besteht aus einem Dreischichtpaket mit einer steifen, kompetenten Mittelschicht. In einer solchen Ablagerung wird die Rate, mit welcher sich die verschiedenen Schichten duktil verformen, variieren. 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 Dehnungsfestigkeit spröde zerbrechen. Andauernde Kompression führt zu fortlaufender Extension und zum Zerbrechen.

Die Bandbreite der Boudinprofile ist eine Funktion des rheologischen Kontrasts zwischen der Schicht und der Matrix, der Schichtdimensionen sowie der Spannungs- und Dehnungszustände. Die Schichtviskosität und der Spannungszustand steuern die Art der Verformung (Sprödehnung oder Fließen). Bei grossen Viskositätsunterschieden weist die kompetente Schicht ein sprödes Verhalten und auf Zugversagen bricht durch die Bildung von diskreten Verlängerungsbrüchen. Ist der Viskositätsunterschied gering, verdünnen sich die Schichten lokal duktil (Einschnürung), bevor sie schliesslich brechen. Einschnürung ist typisch für steife Schichten mit einer nichtlinearen Rheologie (d.h. nicht newtonschem Verhalten).

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

Numerische Modellierung stimmt mit dieser Laborbeobachtung überein.

Schätzung der Verformung aus der Boudinage

Boudinage wird herkömmlich in Form von Verformungsfeldern ausgedrückt behandelt, die durch die Werte der zwei Hauptelongationen λ_1 und λ_2 (X- und Y-Achsen des Verformungsellipsoids) definiert sind, wie sie in der Fläche der Schichten 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. Trennschnitten senkrecht zur λ_1 ist angenommen, aber anfängliche Schräge wird nicht ausgeschlossen.
- 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 Satz von Boudins vorzugsweise mit den langen Achsen orthogonal zu λ_1 .

Die lineare Trennung zwischen Boudins kann parallel zur Streckungslineation der Matrix gemessen werden und gibt die Mindestmenge der Matrixverlängerung an.

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 zwei oder mehr Richtungen innerhalb der boudinierten Schicht Streckungsrichtungen sind. Die aus Boudins ermittelten Streckungsrichtungen der Verformung treffen zumindest für einen Teil der Deformationsgeschichte zu.

Verständnis der Herkunft der verschiedenen Arten von Lineationen kann Informationen über die Bewegungsgeschichte eines Gebietes geben. 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 Streckungslination jeweils bloss die Bedeutung der Richtung maximaler finiter Extension. Vorausgesetzt, dass die Falten und alle assoziierten Linationen zum selben tektonischen Ereignis gehören, müssen die parallel zur Faltenachse angeordneten Linationen wie Schichtungs/Schieferungsintersektion, Mullions, rods, und Krenulationslination keine spezifische geometrische Beziehung zur regionalen **Fließrichtung** (*flow direction*) haben.

Empfohlene Literatur

- Cloos E. - 1946. Lination: A critical review and annotated bibliography. *Geological Society of America Memoir*. **18** 1-122, 10.1130/MEM18-p1
- Passchier C.W. & Trouw R.A.J. - 1996. *Microtectonics*. Springer-Verlag, Berlin. 289 p.
- Sanderson D.J. - 1974. Patterns of boudinage and apparent stretching lination developed in folded rocks. *Journal of Geology*. **82** (5), 651-661, 10.1086/628012
- Schwerdtner W.M. - 1973. Schistosity and penetrative mineral lination as indicators of paleostrain directions. *Canadian Journal of Earth Sciences*. **10** (8), 1233-1243, 10.1139/e73-109

Auf Deutsch

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