Konzept der Verformung

Strukturgeologie-2011

Educational Material

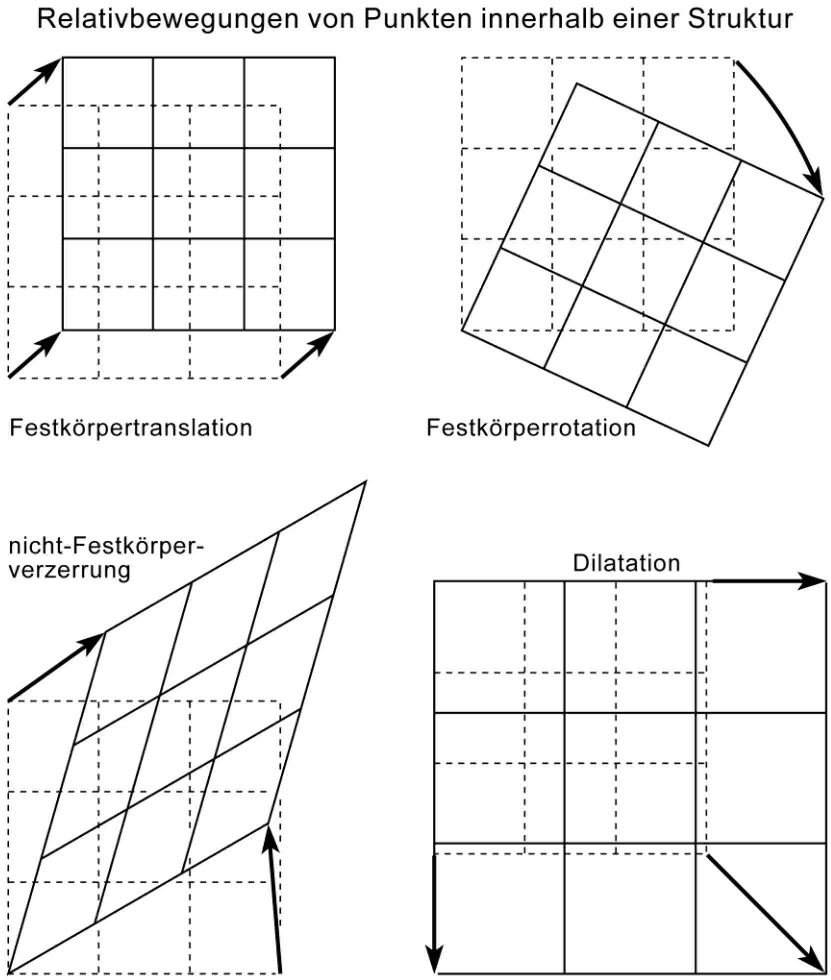
Author(s):
Burg, Jean-Pierre

Publication date:
2011

Permanent link:
https://doi.org/10.3929/ethz-a-007199343

KONZEPT DER VERFORMUNG

Deformation umfasst jeden möglichen Prozess, der zu einer Änderung der Form, der Grösse oder der Position eines Körpers führt. Ein fester Körper, der äusseren Kräften ausgesetzt ist, tendiert dazu, zu bewegen oder seine Bewegung 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 Volumen) zu verändern; er erfährt eine **Dilatation** (*dilation*).
- 4) Ein Körper wird gezwungen, seine Form zu verändern; er erfährt eine **Verformung** (*distortion*).



Diese Bewegungskomponenten 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. Deformation produziert Diskontinuitäten in

spröden Gesteinen. In duktilen Gesteinen ist Deformation makroskopisch ununterbrochen, verteilt innerhalb der Masse des Gesteins.

Verformung (*strain*) ist eine **nicht-Festkörperdeformation** infolge von Spannungseinwirkung. Folglich sind Spannung und Verformung voneinander abhängig. Verformung ist ein geometrisches Konzept, dass die relative Versetzung der Partikel in einem Körper quantitativ bestimmen soll. Diese Partikelversetzungen verursachen **Dilatation** (*dilatation* Änderung der Grösse, positiv für Dehnung und negativ für Verkürzung) und/oder **Verzerrung** *(distortion*, die Änderung der Form). **Finite Verformung** *(finite strain)* ist die Gesamtänderung der Form eines verformten Körpers im Verhältnis zu seiner ursprünglichen Form. Die **Verformungsanalyse** *(strain analysis)* beschäftigt sich mit der quantitativen Bestimmung der Änderung von Form und Grösse aufgrund von Deformation. So stellt die Verformungsanalyse, die (1) Verformungsorientierung, (2) die Grösse der Verformung und (3) die Muster der Verformungsschwankung fest. Diese Informationen helfen, die physikalischen Versetzungen zu verstehen, die die Strukturen produzieren, die im Feld gesehen wurden.

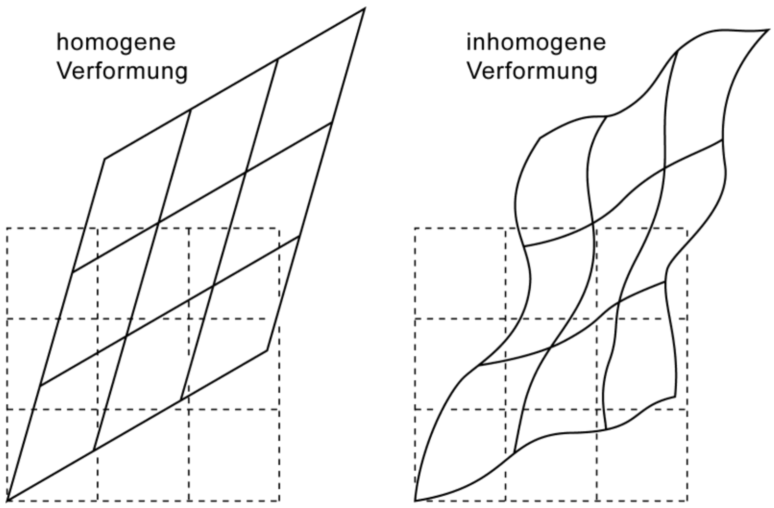
Verformungsanalyse

Homogene – inhomogene Verformung

Das Konzept der finiten Verformung ist meistens für Materialien nützlich, in denen die Deformation als einheitlich und homogen betrachtet werden kann.

Definition

Eine Verformung ist homogen, wenn alle Teile eines Körpers eine Verformung erleiden, die durch die gleiche Intensität, Art und Richtung der Versetzung charakterisiert wird. Ein typisches Kriterium ist, dass gerade und parallele Linien und Flächen gerade und parallel bleiben, wohingegen Kreise zu Ellipsen werden. 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. Kreise werden zu komplexen, geschlossenen Formen.



Annahme des Kontinuums

Verformungskompatibilität ist die Bedingung damit die Gesteine, während der Deformation kohärent bleiben. Jedoch können Linien und Flächen während einer inhomogenen und unterbrochenen Verformung auch zerbrochen werden. Die Verformungsschwankungen können am unterschiedlichen mechanischen Verhalten von Bestandteilen eines Gesteins oder einer Gesteinsverbindung liegen. Z.B. kann die Anwesenheit von verhältnismässig steifen Bestandteilen dazu führen, dass die Verformung in schwächere Teile des Gesteins **verteilt** *(partitioned)* wird,

anstatt gleichmässig im Gestein verteilt zu sein. Die Verformungsanalyse wird im Wesentlichen auf homogene und ununterbrochene Deformation (im Bezug auf den betrachteten Massstab) angewandt.
Im Falle von heterogener Deformation kann man die Analyse auf kleinere homogene Gebiete beschränken. Eine homogene Deformation auf einem Massstab kann Teil einer heterogenen Deformation auf einem anderen Massstab sein.

Verformungspfad

Die Verformungszustände, die ein Körper während der progressiven Deformation durchläuft, definieren den **Verformungspfad** (*strain path*). Verformungspfade beschreiben Zwischenstadien während der Deformation zwischen den Ausgangs- und den Endstadien. Verformungspfade können nur im Verhältnis zu einem externen Koordinatensystem ausgedrückt werden. Jeder Schritt, der erkannt werden kann, d.h. jede Abteilung vom Verformungspfad ist eine **Schrittweite** *(increment)*. Die Verformung, die von einem Zustand zum nächsten stattfindet, wird **inkrementelle Verformung** (*incremental strain*) genannt. Das abschliessende Stadium ist die Summe der inkrementellen Verformungen, d.h. eine Gesamtverformung, die die **finite Verformung** *(finite strain)* genannt wird. Jede Schrittweite konnte in kleineren und kleineren Schrittweiten geteilt werden. Wenn die Zeit zwischen zwei Zuständen gegen null geht, wird die infinitesimal kleine Menge an Verformung **infinitesimale** Verformung *(infinitesimal strain)* genannt, auch beschrieben als **momentane** *(instantaneous)* Verformung. Eine Vielzahl der Verformungspfade kann zu dieser gleichen finiten Verformung führen.

Fortschreitende Deformation – Verformungszustand

Fortschreitende Deformation (*progressive deformation*) bezieht sich auf die Bewegung eines Körpers von seinen unverformten Anfangszustand bis zu seinen verformten Zustand. Obwohl alle Verformungszustände das Resultat einer progressiven Deformation sind, liefert der **Endzustand der Verformung** *(finite strain)* keinerlei Information über den speziellen Verformungspfad, den der Körper durchlaufen hat. Progressive Verformung kann ununterbrochen oder unterbrochen sein.
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 verschiedener Formen und Positionen, die vom Körper durchlaufen wurden.

Infinitesimale Verformung

Der Endzustand der Verformung ist die Summe vieler infinitesimalen Verformungen.

Verformungsmessung

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

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

Längenänderung

Zwei Parameter beschreiben die **longitudinale Verformung** *(longitudinal strain):* **Elongation** *(extension)* und **Dehnung** *(stretch).*

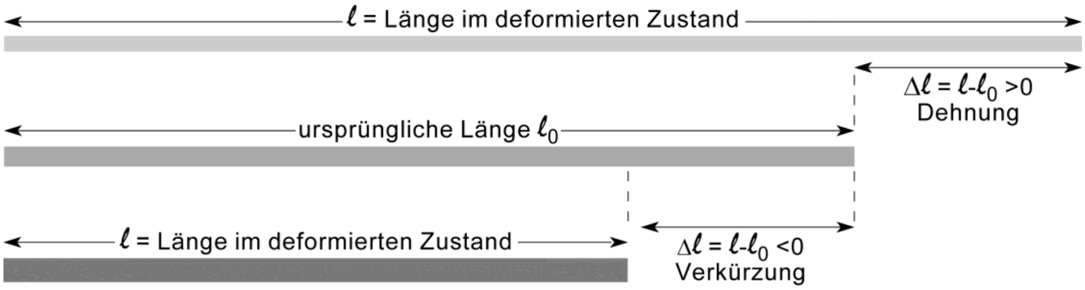
Elongation

Der Elongationsbetrag ergibt sich aus:

$$\varepsilon = \left(\ell - \ell_0\right) / \ell_0 \qquad (1)$$

wobei ℓ_0 die ursprüngliche Länge und ℓ die neue Länge einer Referenzlinie in einem Gestein ist.

Wenn $\ell > \ell_0$ → $\varepsilon > 0$ Ein positiver Wert bedeutet **Verlängerung** (*elongation*).
Wenn $\ell < \ell_0$ → $\varepsilon < 0$ Ein negativer Wert bedeutet **Verkürzung** (*shortening*).
In beiden Fällen ist die Längenänderung dimensionslos.



Definition der Elongation durch die Längenänderung einer Linie: $\varepsilon = \Delta\ell/\ell_0$

Für eine infinitesimale Verformung betrachtet man die eindimensionale Deformation einer ausdehnbaren Achse Ox. P ist ein Punkt am xP vom Ursprung O. Wenn die Achse gestreckt wird, kommt P zu P'. Wenn Δx eine lineare Funktion von x ist, und wenn die Streckung homogen ist gilt, $OP' = xP + \Delta x$. Wird P sehr nahe zu O gebracht, wird die Gleichung (1):

$$\varepsilon = \left[\left(x + \Delta x\right) - x\right] / x = \Delta x / x$$

Die infinitesimale Verformung an P ist per Definition:

$$\varepsilon = \lim_{\Delta x \to 0}\left(\frac{\Delta x}{x}\right)$$

was allgemein geschrieben wird:

$$\varepsilon = d\ell / \ell \qquad (2)$$

Dehnung

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

$$S = \ell / \ell_0 = 1 + \varepsilon \qquad (3)$$

Unter einigen Umständen wird die Dehnung verwendet, um die logarithmische Verformung zu definieren = $\ln(S)$.

Quadratische Elongation

Die **quadratische Elongation** *(quadratic elongation)* λ ist das Standardmass der finiten Längenänderung. Sie wird durch das Quadrat der Dehnung gegeben:

$$\lambda = \left(\ell/\ell_0\right)^2 = \left(1+\varepsilon\right)^2 \qquad (4)$$

Eine Nullverformung wird $\lambda = 1$.
Die quadratische Elongation ist immer positiv.
Hat nach der Verformung eine Linie die gleiche Länge wie vor der Deformation, so nennt man die Richtung der Linie ***direction of no finite longitudinal strain*** (ε = 0).
Die **reziproke** *(reciprocal)* quadratische Elongation $\lambda' = 1/\lambda$ wird manchmal verwendet.

Winkeländerung

Scherwinkel

Der **Scherwinkel** (*angular shear*) ψ wird durch die Änderung eines ursprünglichen rechten Winkels definiert:

$$\psi = 90° - (\alpha) \tag{5}$$

Der Scherungsinn ist im Uhrzeigersinn oder gegen den Uhrzeigersinn abhängig von der Richtung der Winkeländerung. α ist der Winkel zwischen zwei ursprünglich senkrecht zueinander Referenzlinien, der in der trigonometrischen Richtung positiv ist. Deswegen $-90° \leq \psi \leq +90°$

Achtung:

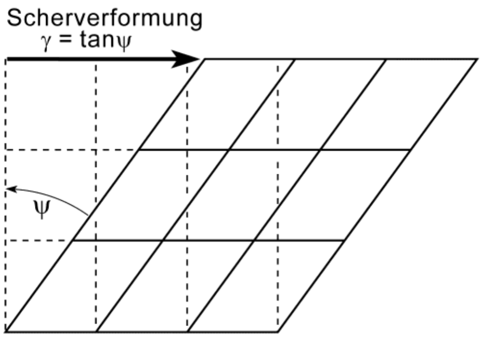
Gegen oder im Uhrzeigersinn heisst sinistral oder dextral, und bezieht sich nur und nur auf Scherung bei der Blattverschiebung. Andernfalls hängt die Richtung von der Richtung der Beobachtung ab. Es ist dann sicherer zu sagen, Oberseite-zu— *(top to..)*.

Die Schwierigkeit dabei, liegt darin im Gestein zwei Linien zu bestimmen, von denen man weiss, dass sie ursprünglich orthogonal waren.

Scherverformung

Der Wert der **Scherverformung** *(shear strain)* γ der Tangente zum Scherwinkel ψ:

$$\gamma = \tan\psi \tag{6}$$



Die Tangente eines sehr kleinen Winkels ist dem Winkel in Radiant gleich, damit ist die Infinitesimalverformung $\psi = \gamma$.

Volumenänderung

Die Volumenänderung (Dilatation, *dilatation*) ist gegeben mit:

$$D = (V - V_0)/V_0 \tag{7}$$

wobei V und V_0 die Volumen des deformierten und nicht deformierten Zustandes sind.
Für infinitesimale Verformung gilt: $\Delta_V = dV/V$.

Graphische Darstellung

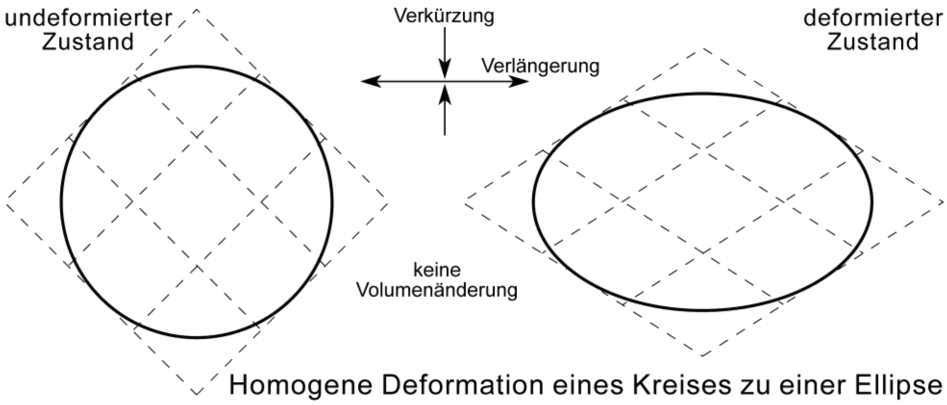
Eine Vielfalt von Methoden ist entworfen worden, um finite Verformung in den Tektoniten zu schätzen. Meistens wird die Verzerrung von Objekten (z.B. Ooiden und Fossilien) oder Punktverteilungen (z.B. Quarzkornzenter in Quarziten) verwendet, alle Methoden versuchen, die Form und die Orientierung der Verformungs-Ellipse (Ellipsoids) zu schätzen.

Verformungsellipse

Der Einfachheit halber denken wir zuerst in zwei Dimensionen.

Definition

Ein Materialkreis mit Einheitsradius (der jegliche Grösse haben kann) wird homogen in eine Ellipse mit zwei Hauptachsen deformiert, die vorher die Durchmesser des Kreises waren. Diese **Verformungsellipse** (*strain ellipse*) ist ein zwei-dimensionales, graphisches Konzept, um die Menge an linearer und angularer Verformung bei der Gesteinsdeformation zu visualisieren. Die Verformungsellipse wird durch seine Hauptachsen definiert, die als die **Hauptverformungsachsen** (*principal strain axes*) bekannt sind.



Homogene Deformation eines Kreises zu einer Ellipse

Von Gleichung (3):

$1+\varepsilon_1$ ist die Länge der langen Hauptverformungsachse, die **Hauptdehnungsachse** *(stretch axis)*, und

$1+\varepsilon_2$ ist die Länge der kurzen Hauptverformungsachse, die **Hauptverkürzungsachse** *(shortening axis)*.

Die zweidimensionale Verformung der Fläche, in der die Ellipse liegt, wird über folgende Faktoren definiert:

- die Orientierung der Hauptverformungsachsen und
- die Grösse der Verformungsellipse.

Zu jedem Zeitpunkt der Deformation, gibt es zwei Verformungsellipsen, die die Gesteinsverformung darstellen: die **finite Verformungsellipse** *(finite strain ellipse)* stellt die Gesamtverformung und die **infinitesimale Ellipse** *(infinitesimal ellipse)*, stellt die blitzschnelle Verformung, die den Partikel belastet, dar.

Form

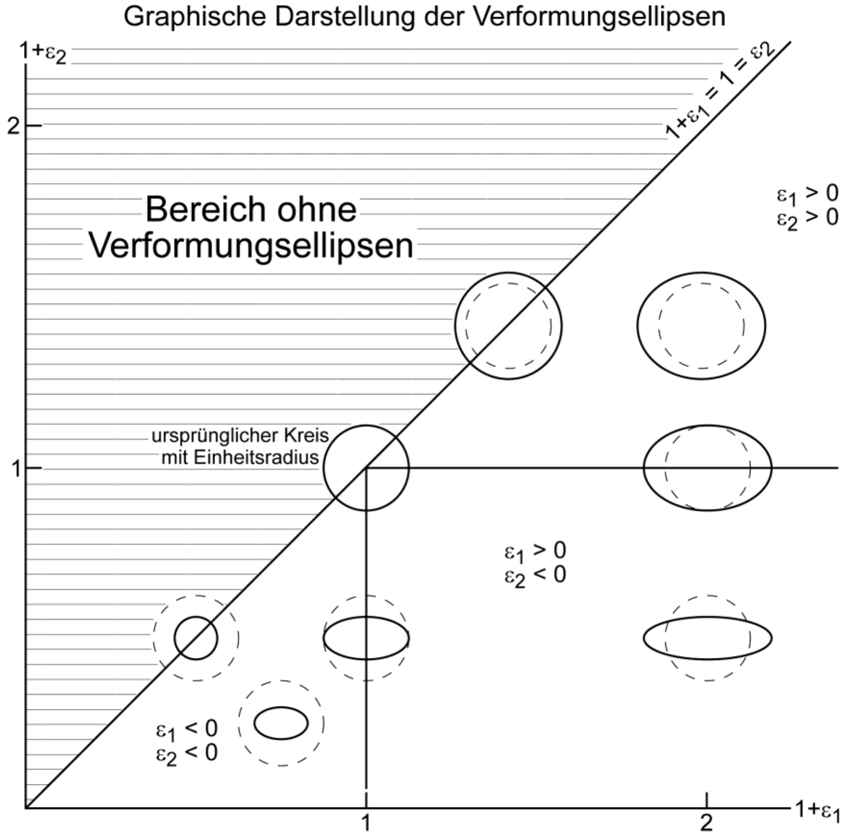
Die Form der Ellipse ist der **Verformungsgrad** *(strain intensity)*. Sie ist einfach das Verhältnis der Hauptachsen (d.h. die Elliptizität):

$$R=(1+\varepsilon_1)/(1+\varepsilon_2) \tag{8}$$

Man kann die Hauptverformungsachsen gegeneinander entlang skalierter kartesischer Koordinaten plotten, mit der Hauptdehnungsachse $1+\varepsilon_1$ entlang der horizontalen Achse und der Hauptverkürzungsachse $1+\varepsilon_2$ entlang der vertikalen Achse. Die diagonale Linie ist der Ort von Ellipsen, die Kreise geblieben sind, weil sie gleiche Verlängerung oder gleiche Verkürzung in allen Richtungen, d.h. $1+\varepsilon_1=1=\varepsilon_2$, durchgemacht haben. Keine Ellipse wird über dieser Linie eingetragen, weil $1+\varepsilon_1$ immer grösser oder gleich $1=\varepsilon_2$ ist. Zwei andere, bestimmte Linien können gezeichnet werden: eine für $\varepsilon_1=0$ ist vertikal, die andere, für welche $\varepsilon_2=0$, ist horizontal. Die Diagonale zusammen mit diesen zwei Linien teilen drei Felder, in denen alle mögliche Verformungsellipse dargestellt werden.

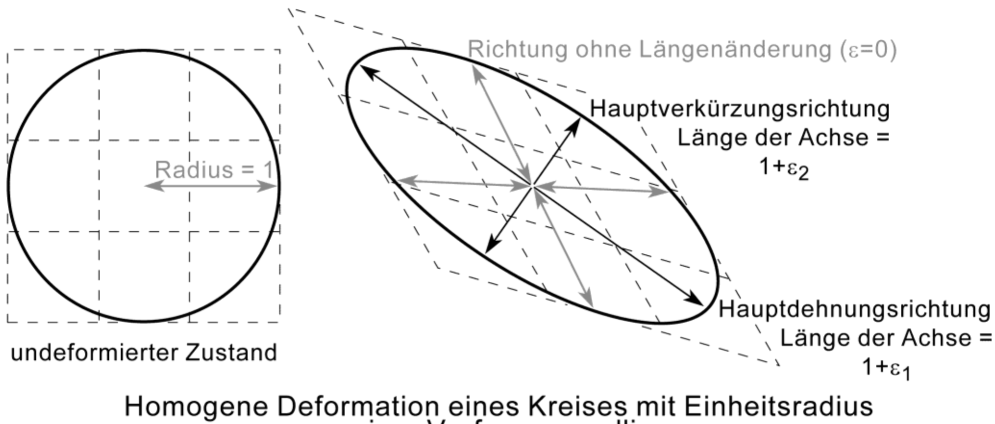
- das oberste Feld (unter der Diagonale und über der horizontalen Linie $1+\varepsilon_2=1$) schliesst alle Ellipse ein, in denen beide Hauptverformungsachsen positive Verlängerungen sind.

- das Feld unterhalb der horizontalen Linie und auf der rechten Seite der vertikalen Linie schliesst die Ellipse ein, in denen $\varepsilon_1 > 0$ und $\varepsilon_2 < 0$.
- das Dreieck unter der Diagonale und auf der linken Seite der vertikalen Linie schliesst jene Ellipse ein, in denen ε_1 und ε_2 negative Verkürzungen sind.



Längenänderung in Bezug auf die Orientierung einer Linie

Der unverformte Kreis, der konzentrisch auf der finiten Verformungsellipse gelegt wird, erbringt vier Durchschnittspunkte. Sie decken zwei spezielle Linien auf, die keine Nettoänderung in der Länge erlitten haben: d.h. es sind Linien ohne **Gesamtverlängerung**. Gegeben durch die Symmetrie halbieren die Verformungsachsen diese Linien. Alle Linien in den zwei Sektoren, die die längste Verformungsachse enthalten, werden verlängert, alle Linien in den Sektoren, welche die kürzeste Verformungsachse enthalten, werden verkürzt.



Homogene Deformation eines Kreises mit Einheitsradius zu einer Verformungsellipse

Anwendung

Wenn man in einem deformierten Gestein einen elliptischen Marker bestimmt, welcher vor der Verformung ein kreisförmiges Gebilde war, kann man direkt die zwei Hauptachsen $k(1+\varepsilon_1)$ und $k(1+\varepsilon_2)$ messen. k ist eine Konstante, da man die ursprüngliche Grösse des Kreises nicht kennt. Durch Einmessen von mehreren Markern kann man die Daten gegeneinander plotten (kurze Achse≡x, lange Achse≡y). Aus der Steigung der Regressionsgerade ergibt sich die Elliptizität R.

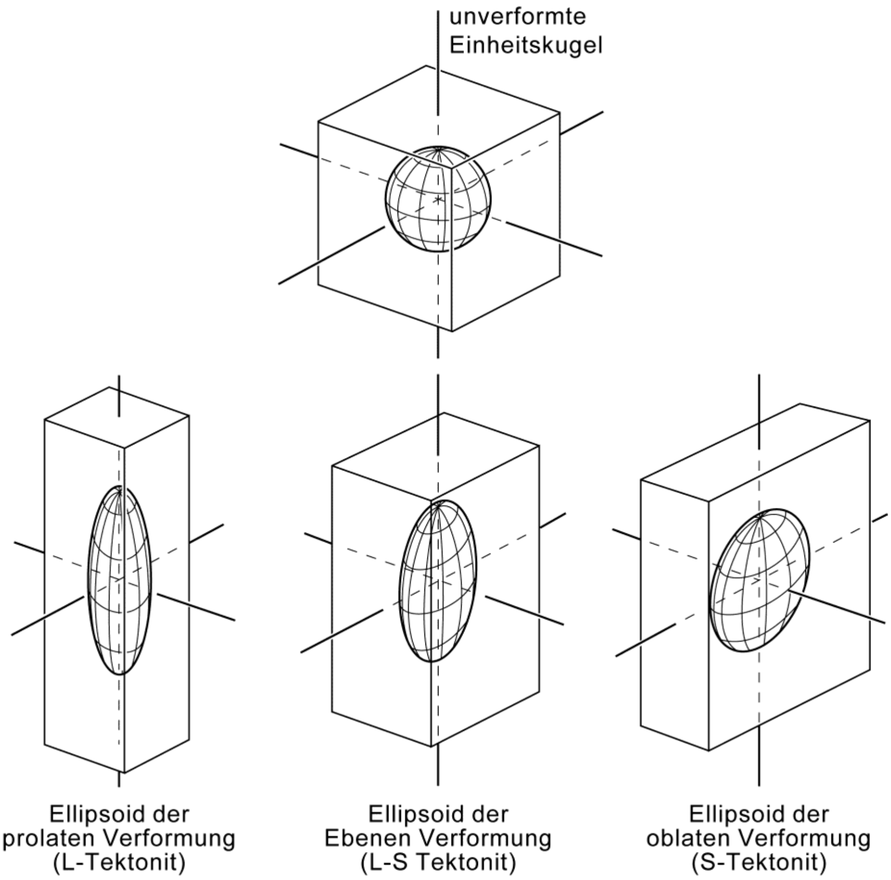
Verformungsellipsoid

Ein deformierendes duktiles Material fliesst von hoch-Spannungs- nach niedrig-Spannungsgebieten. An einem Massstab, an dem die Deformation als ununterbrochen und homogen betrachtet werden kann, wird die natürliche Deformation in drei Dimensionen als die Formänderung einer imaginären oder Materialkugel mit Einheitsradius $r=1$ beschrieben. Diese Einheitskugel ist das **Verformungsellipsoid** (*strain ellipsoid*), dessen Form und Orientierung die Gesamtverformung beschreiben. Das Verformungsellipsoid wird ebenfalls durch seine drei Hauptachsen definiert, die als die **Hauptverformungsachsen** (*principal strain axes*) bekannt sind. Die maximale, mittlere und minimale Achse werden mit X, Y und Z bezeichnet. Ihre Längen sind:

$$X=1+\varepsilon_x \quad \geq \quad Y=1+\varepsilon_y \quad \geq \quad Z=1+\varepsilon_z$$

beziehungsweise wenn die ursprüngliche Kugel einen Radius von 1 hat. Die längste Achse ist die X-Achse, sie stellt die **Hauptdehnungsrichtung** dar. Dis kürzeste Achse ist die Z-Achse, sie stellt die **Hauptverkürzungsrichtung** dar. Y ist die mittlere Achse.

Das Verformungsellipsoid ist die Sichtbarmachung des Verformungstensors zweiter Ordnung.



Typen homogener Verformung eines Würfels und einer Kugel

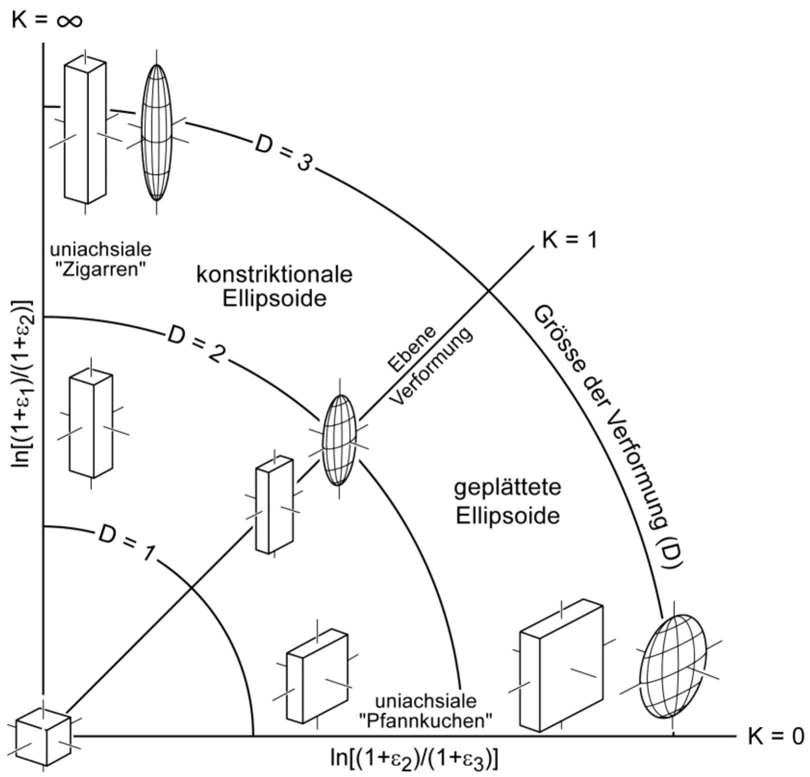
Verformungsfeld; Flinn Diagramm

Die genaue Form jedes möglichen Ellipsoids wird komplett durch nur zwei Verhältnisse der Hauptverformungen gekennzeichnet: Das Verhältnis a der längsten und intermediären Achsen und das Verhältnis b zwischen den intermediären und kürzesten Achsen:

$a = X/Y$ und $b = Y/Z$

Jedes Ellipsoid kann im Flinn Diagramm geplottet werden, in dessen a gegen b aufgetragen wird. Dieses graphische Konzept ist für jegliche Deformation, egal wie gross, und für jedes Material anwendbar.

Die Diagonale ($a = b$) definiert die **ebene Verformung** *(plane strain deformation)*, in der die Y-Achse des finiten Verformungsellipsoids während der Deformation konstant bleibt (d.h., Y ist eine Nullverlängerungsrichtung). Deformation, die in den 3 Hauptverformungsachsen nicht null ist (X>Y>Z), nennt man **dreiachsig** *(triaxial)*.



Form des Verformungsellipsoides (K) im Flinn Plot

Die diagonale Linie der ebenen Verformung teilt das Diagramm in zwei Bereiche auf. Die verschiedenen Formen des Verformungsellipsoids werden mit Hilfe des Parameters $K = (a-1)/(b-1)$ unterschieden. Ohne Volumenänderung, werden die verschiedenen Verformungszustände wie folgt beschrieben:

$K = \infty$: **Axiale symmetrische Auslängung** *(axially symmetric extension)*. Die Ellipsoide haben eine lange Form und plotten nahe der vertikalen Diagrammachse.

$\infty > K > 1$: **konstriktionale Verformung** *(Constrictional strain)*. In diesem Fall X>Y=Z und die Ellipsoide haben eine prolate Form, die wie eine Zigarre aussieht (**prolates Ellipsoid,** *prolate ellipsoid)*. Diese zigarrenförmigen Ellipsoide plotten plotten nahe der vertikalen Diagrammachse, über der Diagonallinie der ebenen Verformung.

$K = 1$: Ebene Verformung bei konstantem Volumen. Der gesamte Versatz tritt in einer einzelnen Ebene auf, die zu der Y-Hauptverformungsachse senkrecht ist. Es gibt weder Verlängerung noch Verkürzung entlang dieser der Hauptverformungsachse.

$1 > K > 0$: **Plättungsverformung** *(Flattening strain)*. In diesem Fall X=Y>Z. Die Ellipsoide haben die Form eines Pfannkuchen (**oblates Verformungsellipsoid**, *oblate ellipsoid)* und plotten nahe der horizontalen Diagrammachse, unterhalb der Linie der ebenen Verformung.

$K = 0$: **Axiale symmetrische Plättung** *(axially symmetric flattening)*. Die Ellipsoide werden flachgedrückt und plotten entlang der horizontalen Diagrammachse.

Wenn man den Scherbetrag kontinuierlich erhöhen würde, könnte man Kurven erzeugen, welche die Längenänderung (ε) oder die Scherverformung (γ) einer Linie in Abhängigkeit vom gesamten Scherverformung $\left(\gamma_{yx}\right)$ zeigen. Besondere Bedeutung hat dabei die Richtung der Linie ohne Längenänderung $\left(\varepsilon_f = 0\right)$.

Verformungsmarker

Verformungsmarker sind alle möglichen Objekte, deren ursprüngliche Formen in undeformierten Gesteinen entweder weithin bekannt sind oder geschätzt werden können. Angenommen dass sie sich passiv innerhalb und mit ihrer Matrix verformen, werden durch ihre Formänderungen die Intensität und das Verformungsregime im Gestein angezeigt. Verformungsanalyse kann an einer Vielzahl von Objekten angewendet werden. Die Grösse der Verformung wird normalerweise gemessen, indem man die ursprüngliche und die neue Form oder Konfiguration vergleicht. Die allgemeinen Formen, die in der Verformungsanalyse verwendet werden, schliessen Kugel, Kreis, Ellipse, und Formen mit oder ohne bilaterale Symmetrie ein. Dementsprechend sind die Verformungsindikatoren wie folgt gruppiert:

- Ursprünglich kugelige Objekte (z.B. Ooide, Zylindrische Grabspuren von Würmern, Reduktionsflecken: *reduction spots*).
- Ursprünglich ellipsoidale Objekte (z.B. Kieseln, Xenolithe).
- Ursprünglich lineare Objekte (z.B. Belemniten).
- Objekte mit bekannten Winkeln (z.B. Fossilien).
- Gleichmässig verteilte Objekte (z.B. Mittelpunkte von Mineralien, Kieseln).

Beschränkungen und Warnung

Matrix-Objekt Beziehung

Nicht alle verformten Objekte können als absolutes Verformungsmass benutzt werden, weil sich die Matrix einiger Gesteine stärker verformt als die Verformungsmarker. In dieser Hinsicht sind die zuverlässigen Verformungsmarker diejenige, die die gleiche Kompetenz wie die Gesteinsmatrix haben (z.B. Wurmröhren und Reduktionsflecken), damit sie sich genauso viel wie das Gestein verformen.

Orientierung der betrachteten Fläche

Die Messungen der Verformung beschäftigen sich häufig mit:

- den Änderungen im Verhältnis von einer Länge im Bezug auf einer Länge in einer anderen Richtung und
- der Änderung im Winkel zwischen zwei Linien, die zuerst in einem bekannten Winkel waren.

Die Resultate werden von der Orientierung der betrachteten Flächen beeinflusst. Zusätzlich kann die ursprüngliche Grösse jeder einzelnen Marker unbekannt sein.

Volumenänderungen

Zutreffende Verformung wird leicht gemessen, wenn die Deformation Volumenkonstant ist. In diesem Fall sind Verkürzungen und Verlängerungen ausgeglichen. Die volumetrische Komponente der Verformung kann nicht ermittelt werden, wenn man eine ursprüngliche Form auf einer abschliessenden Form bezieht. Eine weitere Komplikation entsteht, wenn die Volumenverkleinerung während der Deformation nur die Matrix beeinflusst, ohne die Objekte zu beeinflussen.

Die Volumenänderung $1+\Delta_V$ ergibt sich aus $\left(1+\varepsilon_1\right)\left(1+\varepsilon_2\right)\left(1+\varepsilon_3\right)$.

Ursprünglich kugelige Objekte: Direkte Messung von elliptischen Objekten

Die einfachste Technik, um die volumenkonstante Verformung zu messen, benutzt zuerst kugelförmige Marker, die im Querschnitt eine Kreisform ergeben. Diese Sphären werden als Ellipsoide verformt und geben elliptische Querschnitte, deren Achsen die Achsen des Verformungsellipsoids sind. Mit der Kombination von axialen Verhältnissen auf Querschnitten mit verschieden Orientierungen, kann die dreidimensionale Verformung des Gesteins bestimmt werden. In der Praxis ist die ursprüngliche Form der kugelförmigen Verformungsmarker wie Oolite nicht tadellos kugelförmig, und die Deformation schwankt von Punkt-zu-Punkt. So enthält ein verformter oolitischer Kalkstein eine Vielzahl von Grössen und Formen der Verformungsellipsoide, und viele von ihnen müssen gemessen werden, um eine durchschnittliche Verformung des Gesteins ableiten zu können.

Ursprünglich zylindrische Objekte: Direkte Messung der Elongation

Manchmal sind lineare Objekte vorhanden aus denen dann die ursprüngliche Länge vor Deformation wieder rekonstruiert werden kann. Z.B. können steife längliche Objekte wie Belemniten und Turmalin Kristalle während der Verlängerung einer Boudinage unterliegen.
Die ursprüngliche Länge des Objektes kann festgestellt werden, wenn einfach die Längen aller Fragmente zusammenzählt wird.
Die abschliessende Länge kann direkt gemessen werden, und die Dehnung ℓ / ℓ_0 kann berechnet werden.
Die Annahmen dieser Methode sind:

- Es gibt keine Verzerrung der Boudins;
- Die Trennung der Boudins stellt die gesamte Verlängerung dar.

Wenn diese Annahmen erfüllt werden, kann durch diese Methode theoretisch die Dilatations- und die Formänderungskomponenten der Verformungsellipse erhalten werden.
Sobald mehrere Objekte gemessen worden sind, können ihre Orientierungen und Längen grafisch in Radialkoordinaten dargestellt werden. Eine Ausgleichsellipse kann unter Verwendung eines Satzes elliptischer Schablonen geschätzt werden. In der Theorie kann ein Minimum von drei Punkten die Ellipse begrenzen, aber mehr Punkte sind ratsam.

Objekte mit bekannten Winkeln: Mohrkreis und Wellman Methode

Verformung von Fossilien

Der Fossilien haben häufig eine bilaterale Symmetrie, mit bekannten eckigen Verhältnissen und Grössenverhältnissen, die eine gegebene Spezies verkörpern. Wenn ihre ursprüngliche Form bekannt ist und wenn viele von ihnen im Aufschluss vorhanden sind, können Fossilien als Verformungsmarker benutzt werden.

Fry Methode: Mitte-zu-Mitte Abstand

Verformungsmarker in Gesteinen können zu stark sein um sich mit ihrer Matrix homogen zu verformen. Beispiele sind Kiesel in einer weichen Matrix, Sandkörner, Ooide, Porphyroklaste, usw. Die Formen dieser Objekte können nicht verwendet werden, um die Verformung festzustellen. Stattdessen ist es möglich, ihren Abstand zu verwenden, wenn die Objekte gleichmässig in allen Richtungen vor der Deformation (z.B. eng gepackte Kreiskörner oder Ooide) verteilt waren und keine bevorzugte Formorientierung hatten. Stellen Sie sich vor, dass die Form von nicht-verformten Körnern oder Ooiden gut durch einen Kreis approximiert wird. Dann waren die Abstände vor der Deformation und die kleinsten Abstände zwischen ihren Mittelpunkten gleich die Summe der zwei Radien von zwei benachbarten Kreisen. Diese Radien waren gleich, wenn die Korngrösse homogen und die Kornverteilung isotrop waren. Weil die Mindestabstände zwischen Mittelpunkten in allen Richtungen gleich waren, definierten sie somit einen Kreis um jede mögliche Kornmitte. Dieser Kreis wird durch homogene Deformation verkürzt oder ausgedehnt. Die Radien werden durch homogene Deformation der Matrix um die Achsen der Verformungsellipse verkürzt oder gedehnt.

Eine wichtige Annahme ist, dass die Verformungsmarker während der Verformung nicht übereinander geschoben wurden.

Verfahren

- Zeichnen Sie zwei orthogonale Linien, die sich in der Mitte eines Transparentpapiers schneiden. Setzen Sie den Ursprung über der Mitte von einem Objekt.
- Markieren Sie die Mittelpunkte aller nahe gelegenen Objekte.
- Verschieben Sie das Transparentpapier (ohne es zu drehen) auf das folgende Objekt. Wiederholen Sie das Verfahren.
- Wiederholen Sie das Verfahren für alle Objekte.
- Nachdem eine genügende Anzahl von Objekten nachgezeichnet worden ist (gewöhnlich > 50), erscheint um den Bezugsschnittpunkt ein freie Stelle. Die Form dieser freien Stelle ist die Form der Verformungsellipse.

Rf/φ Methode: Verformte Gerölle

Die R_f/ϕ-Methode ist ein praktisches Werkzeug für die Ermittlung der Verformung von ursprünglich elliptischen Objekten wie Kieseln.

R_f ist das Verhältnis der langen, zur kurzen Achse eines verformten elliptischen Objektes. Dieses Verhältnis kann als eine Kombination des Anfangsverhältnisses (Elliptizität) R_i, des gemessenen elliptischen Objektes und des axialen Verhältnisses R_s, der Verformungsellipse gesehen werden.

ϕ ist der $\pm 90°$-Winkel zwischen der langen Achse des elliptischen Objektes und einer willkürlichen Bezugslinie.

Verformungsregime

Verformungsellipsen und -ellipsoide sind die Endprodukte der Deformation. Es ist wichtig zu wissen, wie sie sich während der Deformation entwickelten. Als erste Näherung wird angenommen, dass die allgemeine Verformung homogen ist und dass sie in zwei Dimensionen (ebene Verformung), in denen keine Änderung der Fläche stattgefunden hat, behandelt werden kann. Die allgemeine Deformation hat zwei Endglieder:

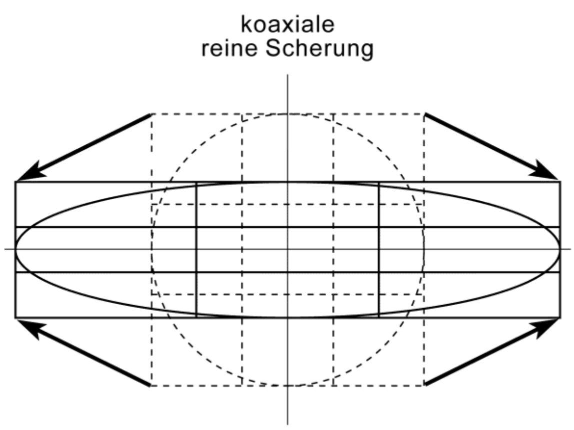
- die einfache Scherung;
- die reine Scherung.

Sie beziehen sich auf zwei Arten von Verformungspfaden, beziehungsweise:

- Einfache Scherung folgt einen koaxialen Verformungspfad;
- Reine Scherung einen nichtkoaxialen Verformungspfad.

Reine Scherung: Koaxiale Verformung

Reine Scherung *(pure shear)* wandelt ein Quadrat in ein Viereck durch homogene Plättung um. Zwei gegenüberliegende Seiten des Quadrats werden in einer Richtung verkürzt und die anderen zwei Seiten werden in der senkrechten Richtung verlängert. Nach einer reinen Scherung bleiben die Seiten des Quadrats parallel und senkrecht.



Koaxialer Verformungspfad

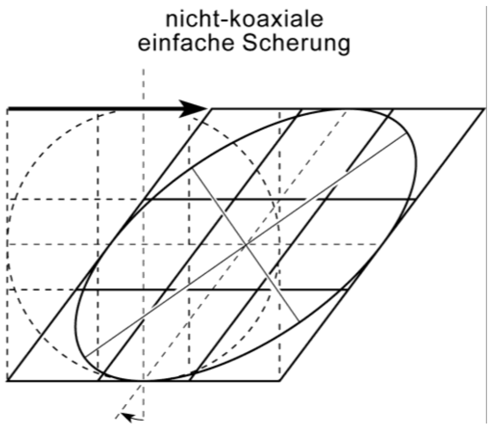
Ein koaxialer Verformungspfad ist ein Verformungspfad, in dem die Hauptverformungsachsen zu den gleichen Materiallinien während der Deformation parallel bleiben. Die Orientierungen der Hauptachsen X, Y und Z haben sich während der homogenen Deformation nicht verändert (d.h. die Achsen der finiten und der inkrementellen Verformungsellipsen bleiben während der Deformation parallel): die Verformung **ohne Rotation** (*irrotational*) wird dann als **koaxial** (*coaxial*) bezeichnet. Eine solche Verformung mit konstantem Volumen ist als **Reine Scherung** (*pure shear*) bekannt, wenn die Y intermediäre Achse des Verformungsellipsoides konstant in der Länge bleibt.
In der reinen Scherung wird ein Gesteinswürfel in einer Richtung verkürzt und verlängert in der Senkrechtrichtung. Der Würfel wird in eines rechtes Parallelepipedon umgewandelt, als die Seiten des Würfels während der Deformation parallel bleiben, d.h. sind die Seiten des abschliessenden Parallelepipedon sind zu den Seiten des ursprünglichen Würfels parallel.

Koaxiale Gesamtverformungsellipse

Jedoch kann koaxiale Verformung gleichmässige Dilatation beinhalten.

Einfache Scherung: Nicht-koaxiale Verformung

Einfache Scherung *(simple shear)* ist dem Prozess analog, der auftritt, wenn ein Kartenstapel rechts oder links mit jeder mehrmals hintereinander intervenierenden, gleich dünnen Karte geschert wird, die über ihren unteren Nachbar schiebt. Es gibt einfache Scherung, wenn das Volumen sowohl die Länge der Y intermediäre Achse des Verformungsellipsoides konstant bleiben. Da die Karten sich nicht ausdehnen (ihre kurze Seite ist zu Y parallel), kann man von der Seite, was einfache Scherung in zwei Dimensionen ist, mit besonderem Interesse die Deformation der Materiallinien beobachten. Ein Quadrat (oder Viereck das durch die Begrenzungen des Kartensatzes definiert ist) das einfacher Scherung unterworfen ist, wird in ein Parallelogramm umgewandelt. Die vertikalen Seiten des Quadrats drehen sich, aber bleiben während der Deformation zueinander parallel. Diese zwei Seiten verlängern sich nach und nach, als die Scherung fortfährt, aber die oberen und unteren Seiten sich weder dehnen noch verkürzen. Stattdessen behalten sie ihre ursprüngliche Länge bei, die die Länge der Seiten des ursprünglichen Würfels ist, und bleiben auch zueinander parallel. Diese beständigen Linien, die die Kartenfläche in drei Dimensionen darstellen, sind Richtungen die keine Dehnung aufzeigen. Sie stellen die **Scherrichtung** *(shear direction)* dar, während jede mögliche Karte die **Scherfläche** *(shear plane)* verwirklicht. Orthogonale Linien, die auf die Seite über einigen Karten gezeichnet werden, drehen und ändern eckige Verhältnisse. In der gleichen Weise rotieren.



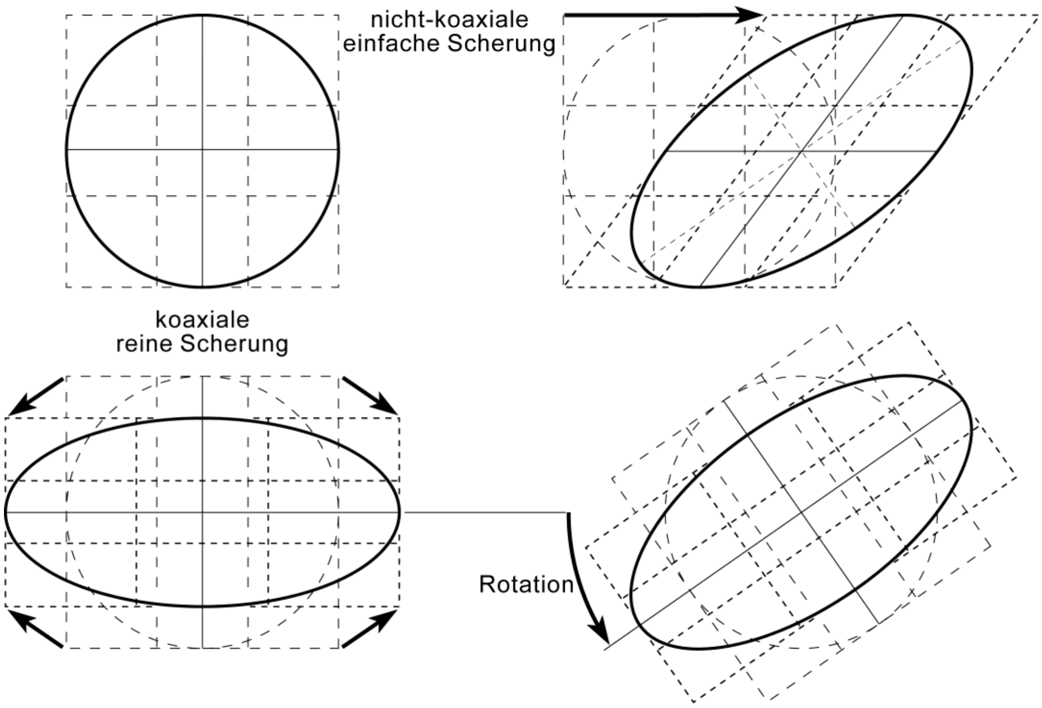
Nicht-koaxialer Verformungspfad

Alle Linien, die nicht parallel zur Scherrichtung in der Scherebene sind, rotieren in die gleiche Richtung wie die Scherung. Dies gilt auch für die Hauptverformungsachsen, was bedeutet, dass es eine Deformation **mit Rotation** (*rotational deformation)* ist. Die homogene, permanente und progressive Veränderung der Orientierung der Hauptachsen X und Z der Verformungsellipse wird

als **nicht-koaxial** *(non-coaxial)* bezeichnet. Die Achsen der finiten und der inkrementellen Verformungsellipsen bleiben nicht parallel. Die ausführliche Beobachtung zeigt, dass ein nicht-koaxialer Verformungspfad so ist, dass sich die Hauptverformungsachsen durch unterschiedliche Materiallinien an jeder infinitesimalen Schrittweite der Verformung drehen. Merken Sie, dass in drei Dimensionen, die intermediäre Achse des Verformungsellipsoides Y eine Richtung ohne Änderung der Länge ist, und zu sich parallel bleibt (die frontale Seite der Karten). Es ist eine beständige Richtung während der einfachen Scherdeformation.
In der einfachen Scherung wird eine Linie ohne finite Verlängerung oder Verkürzung bereits definiert: sie ist örtlich festgelegt und zur Scherfläche parallel; infolgedessen sind die Felder der linearen Verlängerung und Verkürzung asymmetrisch.

Nicht-koaxiale Gesamtverformungsellipse

Jede beliebige Verformung kann demzufolge in eine Verformungskomponente, die die Form des Ellipsoids misst, und eine Rotationskomponente, die die interne Rotation der Hauptachsen gegenüber ihrer ursprünglichen, unverformten Richtungen misst, unterteilt werden. Eine Verformung mit Rotation ist mit einer Verformung ohne Rotationskomponente, die mit externer Rotation kombiniert wird, gleichwertig. Folglich kann die Form eines finiten Verformungsellipsoids nicht anzeigen, wie die Verformung tatsächlich entstanden ist.



Finite Verformung und Versetzung

Ein Weg, jede mögliche Deformation zu kennzeichnen ist das zu jedem Punkt eines Körpers ein Versatzvektor in einem kartesischen Koordinatensystem zugewiesen wird. Der Versatzvektor verbindet die Position des betrachteten Punktes in seiner (i.Allg. ursprünglichen) Bezugsposition zu seiner Position im verformten Zustand.

Versetzung in 2-Dimensionen: Mathematische Beschreibung

Deformation beschreibt die Änderung der relativen Position der Materialpunkte, die einen Körper bilden.

Skript N. Mancktelow

Koordinaten

Verformungsmatrix

Deformation beschreibt die Änderung der relativen Position der materiellen Punkte, die einen Körper bilden. Die Verlagerung eines Punktes dessen Koordinaten sind $(x_0; y_0)$ durch eine Koordinatentransformationsgleichung mathematisch beschrieben wird:

$$x_1 = a x_0 + b y_0$$
$$y_1 = c y_0 + d y_0$$

$(x_1; y_1)$ sind die neuen Koordinaten des Punktes nach der Versetzung, d.h. Deformation. Die allgemeine Transformationsgleichung kann auch als Matrix (die sogenannte **Strain Matrix**) geschrieben werden:

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$$

Bewegungskomponenten

<u>Translation</u>

Ein Feld von parallelen und gleich orientierten Vektoren mit konstanter Länge verschiebt den Körper ohne innere Deformation:

$$x = x_0 + A$$
$$y = y_0 + B$$

<u>Rotation</u>

Rechtsrotation

$$x = x_0 \cos\omega + y_0 \sin\omega$$
$$y = -x_0 \sin\omega + y_0 \cos\omega$$

Linksrotation

$$x = x_0 \cos\omega - y_0 \sin\omega$$
$$y = -x_0 \sin\omega + y_0 \cos\omega$$

Reine Scherung

Einfache Scherung

Allgemeine, homogene Festkörperdeformation mit Rotation

Allgemeine heterogene Deformation

Wirbligkeit

In der reinen Scherung, gibt es für jede Linie, die im Uhrzeigersinn rotiert, eine Linie, die sich genau durch den gleichen Winkel entgegen zum Uhrzeigersinn dreht; die durchschnittliche Rotation ist somit Null. Wenn die Deformation nicht-koaxial ist, rotieren alle Materiallinien um die Verformungsachse. Die durchschnittliche Winkelgeschwindigkeit der rotierenden Materiallinien ist die **Wirbligkeit** *(vorticity)*.

Achtung: wenn der Körper während der Deformation sich dreht, hat die Wirbligkeit zwei Komponenten: die durch Scherung verursachte Wirbligkeit und die **Drehbeschleunigung** *(spin)*, die die Wirbligkeit der Verformungsachsen ist.

Versetzung in 3-Dimensionen: Mathematische Beschreibung

Skript N. Mancktelow

Zusammenfassung

Verformung ist die Änderung der Form eines Körpers resultierend aus der Deformation wegen der angewandten Drücke. Verformung bezieht sich auf Volumenänderungen (Verbreitung oder Kompaktion), Längenänderungen (Verlängerung oder Verkürzung) und Winkeländerungen (Scherbelastung). Verformungszustände können durch 3 aufeinander senkrecht stehende Hauptverformungsachsen gekennzeichnet werden: gewöhnlich ist X > Y > Z. Der Geologe analysiert den langfristigen kumulativen Effekt der Deformation, also die finite Verformung. Für die Verformungsanalyse sind Abschätzungen, an den verschiedenen Punkten eines Gesteinskörpers, der Form und der Orientierung des finiten Verformungsellipsoids nötig. Ähnliche Formen können durch unterschiedliche Deformationsmechanismen erhalten werden.

Empfohlene Literatur

Means W. D. 1976. *Stress and strain. Basic concepts of continuum mechanics for geologists*. Springer Verlag, New York. 339 p.

Ramsay J. G. 1967. *Folding and fracturing of rocks*. McGraw-Hill, New-York. 568 p.

Ramsay J. G. & Huber M. I. 1983. *The techniques of modern structural geology - Volume1 : Strain analysis*. Academic Press, London. 307 p.

Ramsay J. G. & Huber M. I. 1987. *The techniques of modern structural geology - Volume2 : Folds and fractures*. Academic Press, London. 700 p.