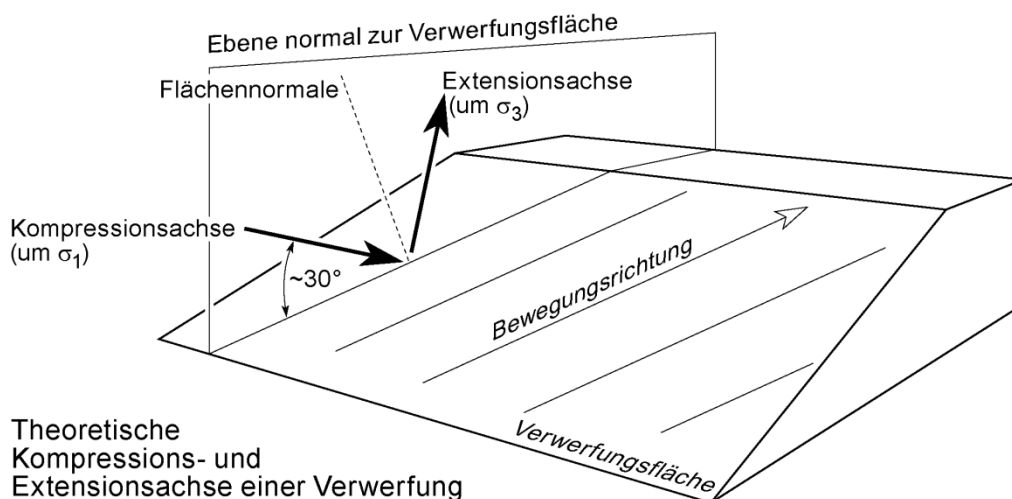


PALÄOSPANNUNGSANALYSE VON STÖRUNGSFLÄCHENDATEN

Auf einer Verwerfungsfläche repräsentiert das Linear die Richtung der relativen Bewegung zwischen den beiden Blöcken, die durch die eingemessene Fläche getrennt sind. Neben der räumlichen Orientierung der Fläche und des Lineares muss der relative Bewegungssinn zwischen den beiden Blöcken, die durch die eingemessene Fläche getrennt sind, bestimmt werden.



Das Ziel dieser Messungen ist die Ermittlung der Orientierung von sogenannten **Paläospannungstensoren** (*paleostress tensor*), das heisst, die Lage der Hauptachsen des Spannungsellipsoids zur Zeit der Entstehung der Verwerfungsflächen, sowie die Form des Spannungsellipsoids. Die Berechnung ergibt keinen wahren Paläospannungstensor, da es eine statistische Berechnung eines Näherungswertes für Verwerfungen ist, die eine geologisch bedeutende Zeit integrieren. In diesem Sinn wird die Bezeichnung Spannung falsch angewendet, weil das Resultat nicht auf die momentanen, angewandten Kräfte an einem Punkt zutrifft. Die berechneten Achsen würden treffender als kinematische Achsen bezeichnet werden. Jedoch ist die Information eine Interpretation der Spannungszustände, die für die spröde Deformation verantwortlich sind. Mehrere Anwendungen in verschiedenen tektonischen Zusammenhängen haben regional gleich bleibende Resultate erbracht, wodurch die Paläospannungsrekonstruktion zu einer nützlichen strukturellen Analyse wird, um das Spannungsumfeld und die tektonischen Regimes, welche in der Vergangenheit gewirkt haben, zu rekonstruieren.

Historisch gesehen, ist die Analyse in drei Stufen entwickelt worden:

- Hypothese zur Orientierung des Spannungsfeldes (eine vertikale Hauptspannung).
- Das Bruchkriterium, das ein Verhältnis zwischen Spannung und Verwerfungsfläche + Linear neuer Verwerfungen gibt.
- Reaktivierungskriterien für bereits vorhandene Verwerfungen, in diesem Fall sind die Verhältnisse, die oben definiert werden, komplizierter, weil viele Geometrien möglich werden (Berechnung erfolgt mit inversen Methoden).

Aufnahme und Datensätze

Alle Methoden sind statistisch. Es ist daher wichtig, im Aufschluss möglichst viele Werte einzumessen. Feldbeobachtungen sind sehr wichtig bei der Separation von Datensätzen in Teildatensätze, die das gleiche Deformationsereignis gleichmässig repräsentieren, weil diese unabhängige Informationen liefern, die Hilfe bzw. Unterstützung zur Korrektur von Unstimmigkeiten in der Berechnung bieten. Es existieren einige Kriterien, um die unterschiedlichen Verwerfungsgesteine zu unterscheiden und sie den aufeinanderfolgenden tektonischen Regimen

zuzuordnen. Das erlaubt sinngemäss eine relative Zeiteinteilung und eine Rekonstruktion der aufeinanderfolgenden Spannungsfelder. Diese Kriterien sind:

- geometrische Beziehungen, die anzeigen, ob die Verwerfungsflächen gleichzeitig oder das Resultat von überlagernden Ereignissen mit unterschiedlicher Orientierung sind.
- das qualitative Erscheinungsbild und die Morphologie der Verwerfungsflächen, das unterschiedliche geologische Bedingungen (z.B. Mineral-überzogene Flächen bei höheren Temperaturen versus wahrscheinlich jüngere, scharfe und glatte Brüche) widerspiegelt.
- der Einfluss der Lithologie.
- Die Grösse der Verwerfungsfläche und, wenn möglich, des Versatzbetrags.

Praktischerweise sollten Orientierungsdaten von kleinen Gebieten (auch sogenannten **Stationen**) gesammelt werden, die strukturell homogen sind.

Orientierungen der Hauptspannungen aus Felddaten

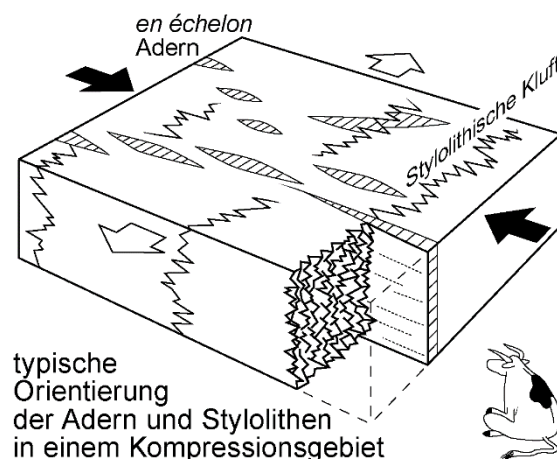
Die systematische Beziehung, die zwischen spröden Strukturen, Dehnungsverwerfungen und Hauptspannungsrichtungen besteht, bildet die Basis für die Interpretation der Richtung von Paläo-Spannungen. Es ist bereits im Gelände sehr wichtig, die Trennung unterschiedlich orientierter Kompressionsrichtungen oder Paläospannungstensoren, die möglicherweise verschiedenen Deformationsereignissen zugeordnet werden können, vorzunehmen.

Bestimmung

Wir unterscheiden die Hauptspannungsrichtungen, d.h. die Eigenvektoren vom Spannungstensor, die durch die drei Einheitsvektoren \bar{s}_1 , \bar{s}_2 und \bar{s}_3 dargestellt werden, von den Hauptspannungsgrössen, d.h. den entsprechenden Eigenwerten, die positiv sind in Kompression $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.

Anwendung

In Regionen mit geringer Deformation, die unter spröden Bedingungen verformt wurden, können einige Strukturen, die keine Verwerfungen sind, die Spannungsanalyse, insbesondere die Orientierung aufeinanderfolgender Ereignisse, wenn überlagerte strukturelle Gefüge und andere geologische Anzeigen erkannt werden, hilfreich unterstützen.



Klüfte sind die gefährlichsten Strukturen zur Berechnung von Spannungen. Jedoch können sie die einzigen Strukturen sein, die für strukturelle Analyse in subhorizontal gelagerten Regionen vorhanden sind. Die wichtigsten Kriterien für die Klassifizierung der Klüfte in Extension- oder Scherbrüche sind die allgemeine Orientierung, die Symmetrie, die Oberflächenmorphologie und der Öffnungswinkel zwischen den Klüftscharen.

Styrolithen sind unregelmässige Flächen, charakterisiert durch mm bis cm hohe Spitzen, die bei Spannungslösungsprozessen entstehen. Die Styrolithenzähne (oder Säulen) zeigen, so wird es

angenommen, in Richtung der grössten Lösung, d.h. etwa parallel zur Hauptverkürzungsrichtung (hier mit Kompression \bar{s}_1 bezeichnet).

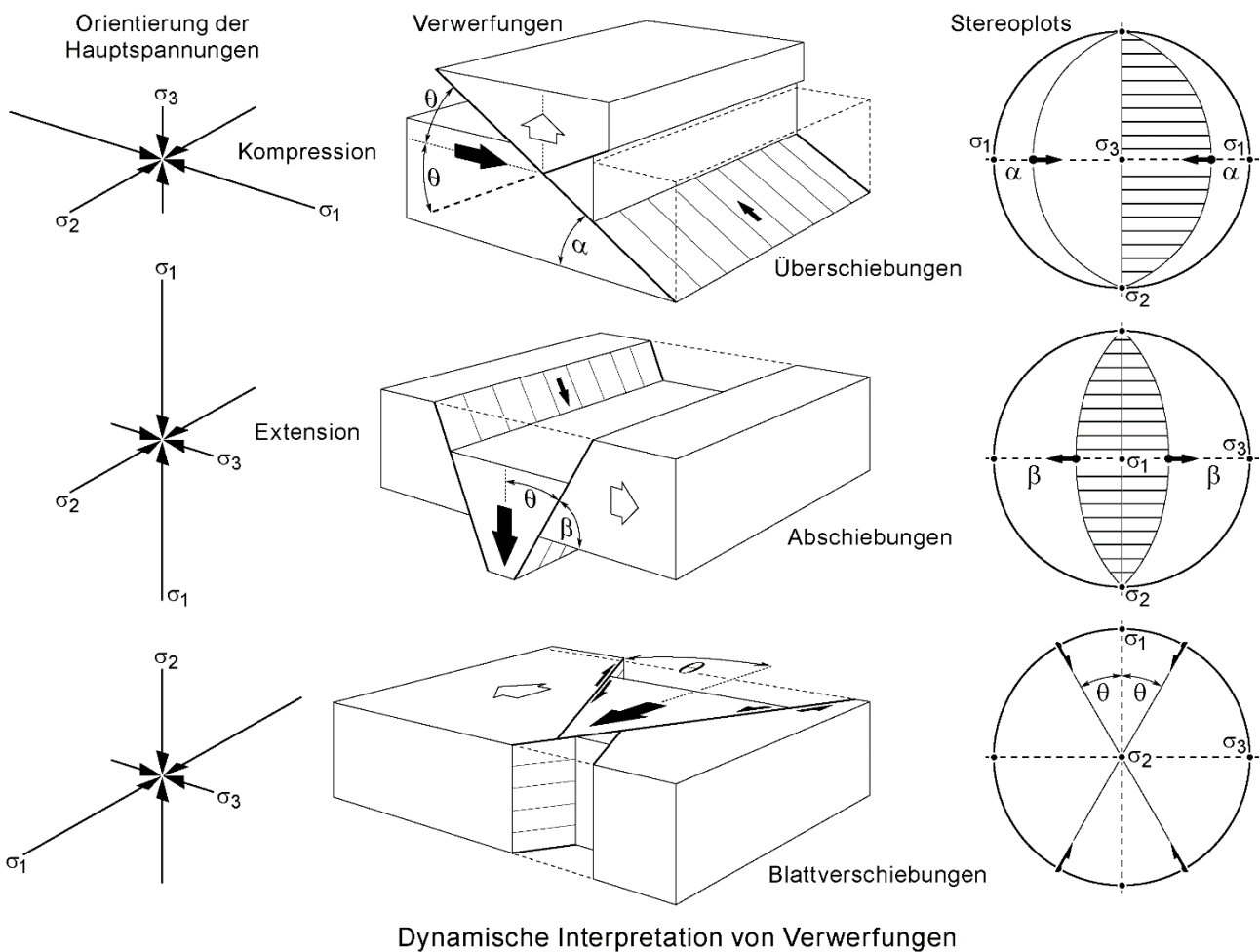
Dehnungsrisse sind senkrecht zur kleinsten Hauptspannungsachse σ_3 geöffnet.

Wenn die Richtungen von \bar{s}_1 (Stylolithe) und \bar{s}_3 (Spalten) bekannt sind, dann kann die Richtung von \bar{s}_2 senkrecht zu beiden rekonstruiert werden.

Dynamische Klassifizierung der Verwerfungen

Klassifikation

Die Koexistenz von Spannungen und gleicher Gegenspannungen auf entgegengesetzten Seiten eines Flächenelements ist eine allgemeine Eigenschaft von internen Flächen eines Körpers im Gleichgewicht. Eine wichtige Folgerung dieser Bedingung betrifft ihre Anwendung auf die Erdoberfläche. Da es in der Luft keine Scherspannungen gibt, muss die Erdoberfläche, da sie eine Luft-Gestein Grenzfläche ist, eine Ebene sein, entlang welcher keine Scherspannungen bestehen. Folglich, ist die Erdoberfläche dort wo sie einigermaßen horizontal ist, parallel zu einer Hauptspannungsebene. Es kann angenommen werden, dass eine Hauptspannungsachse nahe der Erdoberfläche und in geringen Tiefen vertikal ist (diese Annahme wird manchmal als die Anderson'sche Bedingung bezeichnet). Die anderen zwei Hauptspannungsrichtungen müssen horizontal sein.



Voraussetzung

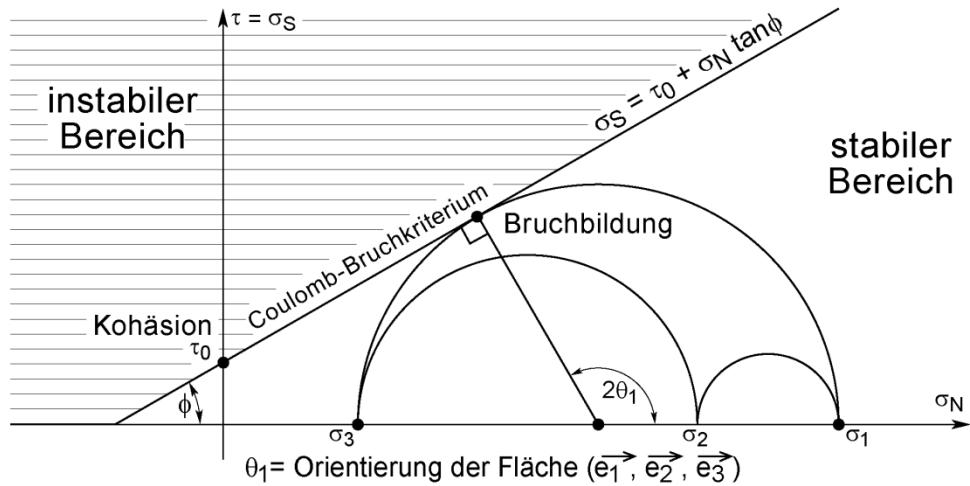
Die grundlegende Voraussetzung von Spannungsfeldern, dass sie mit den Achsen senkrecht zur gesamten krustalen Oberflächen orientiert sind und mit konstanter Intensität und Orientierung über

beachtliche Anteile der Kruste vorhanden sind, ist eine sehr weit gefasste Näherung. Spannungsfelder schwanken im Allgemeinen beträchtlich in Intensität und in Orientierung. So schwankt das Einfallen der Verwerfungen mit der Orientierung der maximalen Hauptspannungsachse (z.B. listrische Verwerfungen). Das Gleichgewicht bedingt auch, dass keine verteilte Drehkraft im Medium fungiert, was wiederum andeutet, dass der Spannungstensor symmetrisch ist.

Bruch innerhalb von isotropen Gesteinen (neue Verwerfungen)

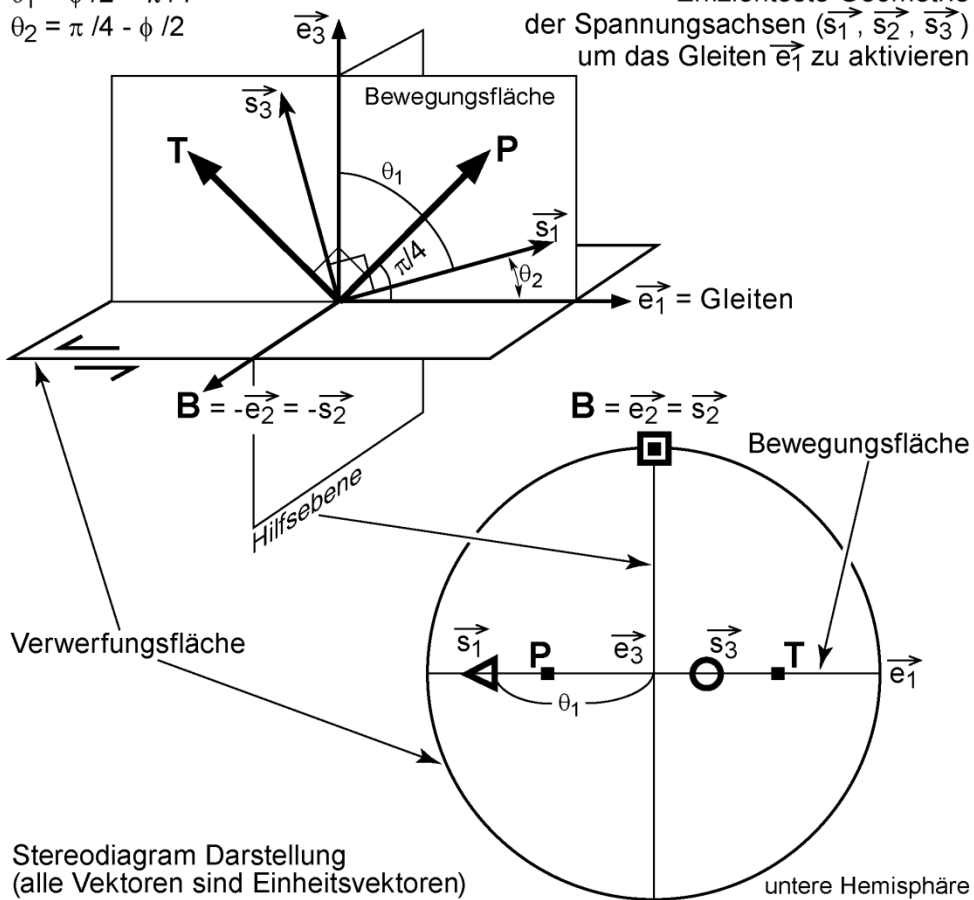
Grundprinzipien

Die dynamischen Prinzipien der bruchhaften Deformation sind einfach und beziehen sich auf die Spannungsgeometrie, wenn das Bruchkriterium erfüllt ist:



$\theta_1 = \phi / 2 + \pi / 4$
 $\theta_2 = \pi / 4 - \phi / 2$

Effizienteste Geometrie der Spannungsachsen ($\vec{s}_1, \vec{s}_2, \vec{s}_3$) um das Gleiten \vec{e}_1 zu aktivieren



- Der studierte Gesteinskörper ist homogen und isotrop.
- Ein Spannungszustand versucht Scherverwerfungen auszubilden, die dem Scherbruch-Kriterium (Mohr-Coulomb Kriterium) folgen: Bruchbildung tritt auf der Fläche auf, auf der das Verhältnis zwischen der Scher- und Normalspannung die Bruchbildungsumhüllende erreicht. Folglich bestimmt das lokale Spannungsfeld die Orientierung einer neu entstandenen Verwerfung.
- Die Richtung der kataklastischen Lineation ist die Bewegungsrichtung, die die gleiche Richtung und den gleichen Schersinn wie die auslösende Scherspannung auf der Verwerfungsfläche hat. Folglich ist diese Richtung parallel zur Intersektion der Bruchfläche mit der (\bar{s}_1, \bar{s}_3) Ebene. Diese Annahme beinhaltet, dass die Bewegung in Bezug auf die Verwerfungslänge klein ist und es keine duktile Deformation des Materials und folglich Rotation auf der Verwerfungsfläche gibt.
- Die Intersektion von konjugierten Verwerfungen in isotropen Gesteinen bestimmt die intermediäre Hauptspannung \bar{s}_2 .
- Der spitze Winkel zwischen den konjugierten Verwerfungen ist zweigeteilt durch die Hauptspannungsrichtung \bar{s}_1 . Falls die begrenzende Umhüllende eine Gerade mit der Steigung $\tan \phi$ ist, wie im Coulomb Kriterium, dann ist der Winkel zwischen \bar{s}_1 und jeder Verwerfungsfläche $45^\circ - (\phi/2)$. Typischerweise ist $\phi \approx 30^\circ$, und der Winkel ist ca. 30° .
- Benachbarte Verwerfungen sind voneinander unabhängig.

Klassifizierung

Die Annahme, dass \bar{s}_2 normalerweise entweder vertikal oder horizontal ist, führt zu einer dynamischen Klassifikation von Verwerfungen:

- für ein horizontales \bar{s}_2 sind die resultierenden Verwerfungen entweder Abschiebungen (\bar{s}_1 vertikal) oder Überschiebungen (\bar{s}_1 horizontal).
- für ein vertikales \bar{s}_2 sind die resultierenden Verwerfungen vertikale Blattverschiebungen.

Umgekehrt, um die Hauptspannungen \bar{s}_1 , \bar{s}_2 und \bar{s}_3 vor der Bruchbildung zu bestimmen, müssen das Streichen und die Neigung des Bruches zusammen mit der Richtung und dem Sinn der ursprünglichen Verschiebung bekannt sein.

Tektonisches Regime

Da \bar{s}_1 den spitzen Winkel (ungefähr 60°) zwischen konjugierten Verwerfungen halbiert oder mindestens innerhalb davon liegt, können wir annehmen, dass Abschiebungen verbunden mit vertikalem \bar{s}_1 steile Flächen sein sollten, die über 60° eintauchen; andererseits sollten Aufschiebungen verbunden mit horizontalem \bar{s}_1 flach einfallende Flächen (ungefähr 30°) sein.

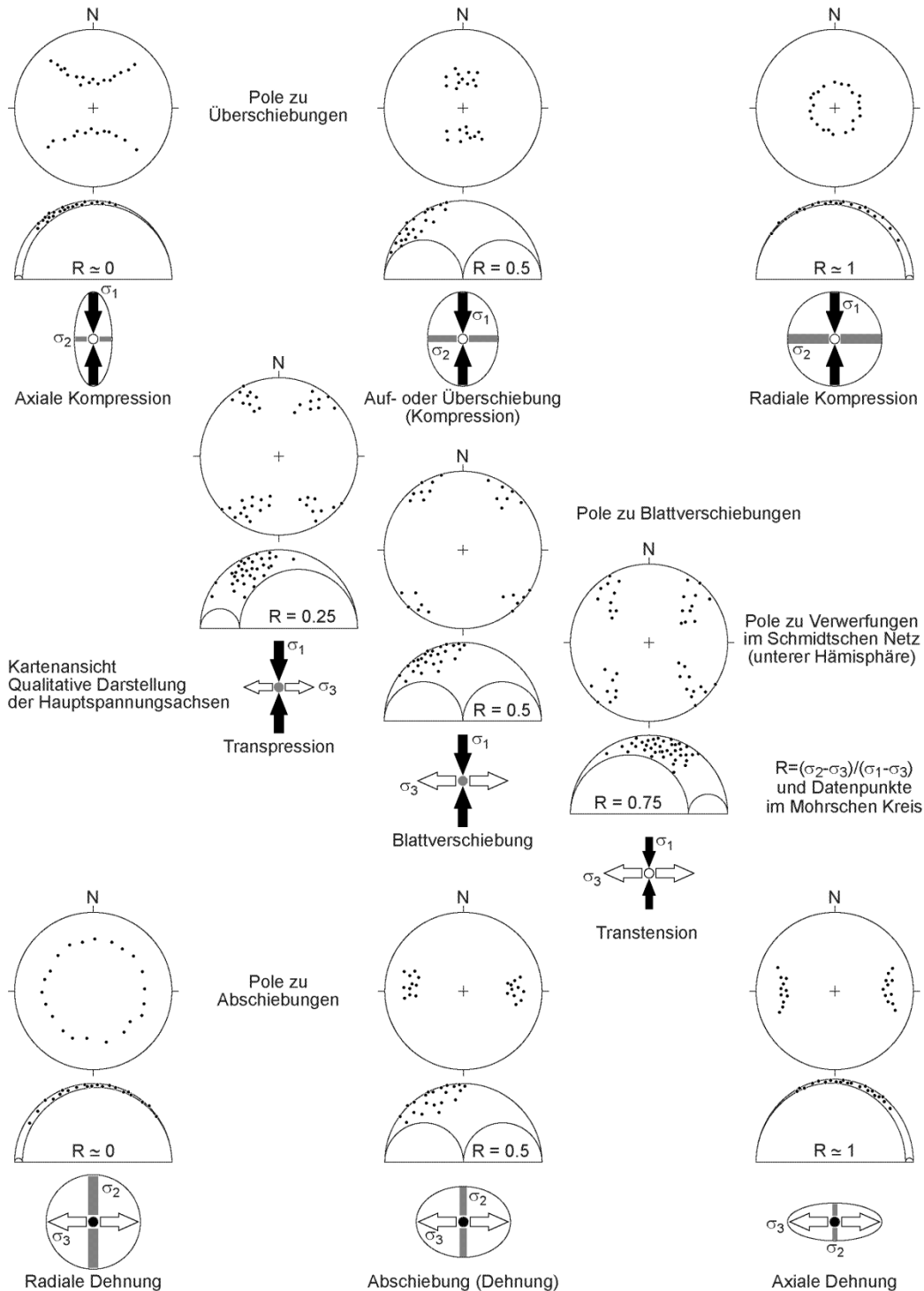
So werden 3 tektonische Hauptregime entsprechend der vertikalen Hauptspannung unterschieden:

- Vertikales \bar{s}_1 : extensionales tektonisches Regime
- Vertikales \bar{s}_2 : Blattverschiebungsregime
- Vertikales \bar{s}_3 : Kompressionsregime.

Die relativen Größen der Hauptspannungen schwanken ununterbrochen zwischen diesen drei Endregimen und der Übergang von einem Regime zu einem anderen liegt grundlegend an der Umstellung einer der horizontalen Hauptachsen mit der vertikalen Achse. Jedes tektonische Regime kann von radial zu axial variieren. Dies ist abhängig von den relativen Größen der intermediären Hauptspannung σ_2 in Bezug auf die grösste und kleinste Hauptspannung, beziehungsweise σ_1 und σ_3 . Diese Information wird im R-Verhältnis miteinbezogen:

$$R = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (\text{Merkten Sie dass } 0 \leq R \leq 1)$$

Transpression ist eine Deformationsart mit einem gleichzeitigen Vorkommen von Blattverschiebungen, Überschiebungen und Verwerfungen mit kombinierter Über- und Blattverschiebung. Das tektonische Regime nahe dem Übergang zwischen Kompression (vertikales \bar{s}_3 , kleines R) und Blattverschiebung (vertikale \bar{s}_2 , kleines R) ist zur Entwicklung einer solchen Deformationsart vorteilhaft.



Tektonische Regime definiert durch Berechnung der Paläospannung

Transtension bezeichnet das gleichzeitige Vorkommen von Blattverschiebungen, Abschiebungen und Verwerfungen mit kombinierter Ab- und Blattverschiebung. Das tektonische Regime nahe dem Übergang zwischen Extension (vertikales \bar{s}_1 , hohes R) und Blattverschiebung (vertikales \bar{s}_2 , hohes R) ist für diese Deformationsart vorteilhaft.

Paläospannungsrichtungen – Geometrische und graphische Näherungen

Einige Techniken erlauben einige oder alle Komponenten des lokalen Spannungstensors zu messen oder zu schätzen. Heutige Spannungen können direkt gemessen werden (Überkernung, hydraulische Bruchbildung, siehe Vorlesung 1 über Mechanische Aspekte der Deformation). Im Folgenden wird mehr Hauptgewicht auf die geologischen/strukturellen Informationen gelegt, die indirekt von den theoretischen Spannungs-/Verformungsverhältnissen abgeleitet werden.

Einzelne Verwerfung: Die P-T-Methode

Die normale Situation (jedoch schwierig zu interpretieren), ist die einer einzelnen Verwerfung mit bestimmtem Verschiebungssinn im isotropen Gestein. Die Bewegungsebene ist definiert als die Ebene, die senkrecht zur Verwerfungsfläche ist und die Gleitrichtung miteinschliesst. Bei dieser Methode wird angenommen, dass die Bewegungsebene die maximale Hauptspannung (\bar{s}_1) und die minimale Hauptspannung (\bar{s}_3) beinhaltet (bzw. die entsprechend infinitesimal kürzeste und längste Verformungsachse). Dann wird die Linie, die senkrecht zur Verschiebungsrichtung steht und in der Verwerfungsfläche liegt, als σ_2 -Richtung betrachtet. Wenn nun willkürlich angenommen wird, dass die Richtung von \bar{s}_1 30° zur Bruchfläche (Mohr-Coulomb Bruchkriterium) geneigt ist, so dass der Verschiebungssinn in Richtung \bar{s}_1 zeigt, kann auch \bar{s}_3 bestimmt werden.

Die graphische Technik für jede gemessene Verwerfung geht wie folgt:

- Plote die Verwerfungsebene und ihren Pol in einem Stereonetz;
- Plote die Gleitstriemungen auf dem Grosskreis, der die Verwerfung darstellt;
- Füge einen Pfeil zum Gleitstriemungspunkt, der die relative Bewegung des Hangenden angibt;
- Rotiere den Plot so, dass man den Grosskreis der die Gleitrichtung und den Flächenpol der Verwerfung beinhaltet, findet; Dieser Kreis definiert die Richtung der Bewegungsebene.
- Entlang des Grosskreises der Bewegungsebene wird die Kompressionsrichtung (\bar{s}_1) 60° zum Pol und 30° zur Gleitrichtung geplottet; entsprechend dem Bewegungssinn.
- Gleichermassen wird die Extensionsrichtung (\bar{s}_3) 30° zum Pol und 60° zur Gleitrichtung geplottet (die Pfeile zeigen von der Extensionsrichtung weg).

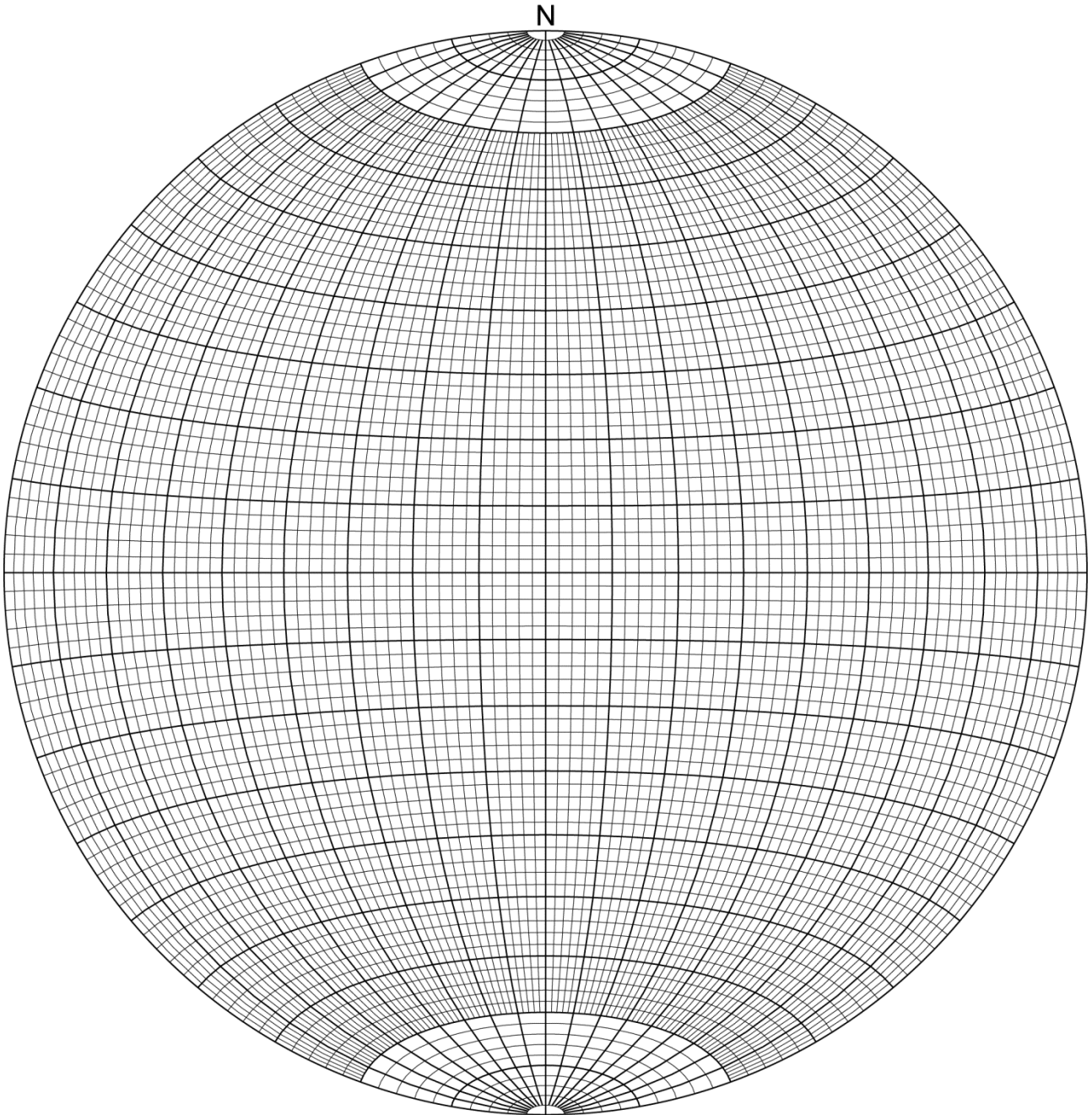
Bemerkung: 45° Winkel erbringen die seismischen P (Kompression) und T (ExTension) -Achsen der aktiven Verwerfungen.

Zur Erinnerung: Je mehr gestriemte Bruchflächen wir vermessen, desto leichter und genauer finden wir die Lage der allgemeinen Spannungsebenen.

Übung

Tragen Sie eine Verwerfung, die mit 020° streicht und 60° W einfällt in das Stereonetz ein. Auf der Verwerfungsfläche wurde eine Striemung mit Pitch 30° N eingemessen. Bestimmen Sie die Lage der Kompressions- bzw. der Dehnungsachse für die Annahme, dass die Verwerfung eine 1) Abschiebung und 2) eine Aufschiebung ist.

Berechnen Sie ebenfalls die Lage der Kompressions- bzw. der Extensionsachse für eine Striemung mit Pitch 30° S.



Konjugierte Verwerfungsflächen

Eine einfachere Abschätzung wird durch die Beobachtung konjugierter Verwerfungen im Gelände erreicht. Per Definition schneiden sich konjugierte Verwerfungen parallel zu \vec{s}_2 , was auch der Pol zum $(\vec{s}_1; \vec{s}_3)$ -Grosskreis ist. In diesem Fall kann \vec{s}_1 als Winkelhalbierende des von den beiden Bruchflächensystemen eingeschlossenen spitzen (ca 60°) Winkels angenommen werden. Jedoch sollte man prüfen, ob der Keil, der \vec{s}_1 enthält, nach innen fällt.

Feldtechnik

Bruchflächen sind konjugiert, wenn:

der Winkel zwischen Ihnen $< 90^\circ$ beträgt;

ihr Schersinn entgegengesetzt ist;

es deutliche Hinweise auf ein gegenseitiges Abschneiden gibt, d.h., dass die Störungen sich gleichzeitig gebildet haben.

Graphische Technik

Die graphische Technik geht wie folgt:

- Plotte in einem Stereonetz die zwei konjugierten Verwerfungsebenen mit einem Pfeil zu den Gleitstriemungspunkten um die relative Bewegung des Hangenden anzugeben;
- Die Schnittlinie der zwei Verwerfungsebenen beinhaltet \vec{s}_2 ;
- Zeichne den $(\vec{s}_1; \vec{s}_3)$ -Grosskreis, dessen Flächenpol \vec{s}_2 ist;
- Halbiere das Segment des $(\vec{s}_1; \vec{s}_3)$ -Grosskreises, der zwischen den zwei Verwerfungsebenen begrenzt wird, um die Kompressionsrichtung ($P = \vec{s}_1$) zu lokalisieren;
- Finde die Extensionsrichtung ($T = \vec{s}_3$) 90° zum ($P = \vec{s}_1$) entlang des $(\vec{s}_1; \vec{s}_3)$ -Grosskreis.
- Prüfe, ob die Kompressions- und Extensionsrichtungen mit dem Bewegungssinn der Verwerfungen in Einklang sind.

Je mehr gestriemte Bruchflächen, in denen eine Richtungsänderung in der Verschiebung vorkommt, wir vermessen und im Stereogramm eintragen, desto leichter und genauer finden wir den kleinsten Winkel zwischen den konjugierten Sets und damit eine annähernde Position der Spannungsachsen.

Übung

Tragen Sie eine Verwerfung, die mit 60° streicht und 60° SE einfällt in das Stereonetz ein. Auf der Verwerfungsfläche wurde eine Striemung mit Pitch 30° N eingemessen.

Diese Verwerfung ist eine konjugierte Fläche zur Verwerfung aus der letzten Übung ($290/60$, Pitch der Striemung 30° N). Bestimmen Sie die Lage der Kompressions- bzw. der Dehnungsachse für die Annahme, dass die Verwerfungen 1) Abschiebungen, 2) Aufschiebung sind und 3) eine Verwerfung eine Aufschiebung und die andere eine Abschiebung ist. Was sind ihre Schlussfolgerungen?

Die Zweieck Methode

Diese Methode zeigt Resultate in einer Form an, die Herdflächenlösungen von Erdbeben ähnelt. Ihre Genauigkeit basiert auf vielen Messungen von linearen Verwerfungsflächen-Paaren. Die Rechtfertigung bezieht sich auf die Tatsache, dass bereits existierende Verwerfungen geologisch häufig vorkommen und somit die Messdaten beherrschen können. In diesem Fall kann die grösste Hauptspannung in jedem möglichem Winkel zwischen 0 und 90° (im Gegenuhrzeigersinn von der Bewegungsrichtung) zur Verwerfungsfläche und -linie sein.

Die graphische Technik sucht die kinematischen Verkürzungs- und Dehnungsachsen jeder Verwerfung, um die dynamischen (Spannungs-) Achsen eines Verwerfungsbestands abzuleiten; Diese Methode geht wie folgt: Für jedes gemessene Verwerfungsflächen-Linear-Paar:

- Plotte die Verwerfungsebene und ihren Pol auf einer Projektion mit gleicher Fläche (*equal area projection*);
- Plotte die Gleitstriemungen auf dem Grosskreis, der die Verwerfung darstellt;
- Plotte den Grosskreis (der als **Hilfsfläche**, *auxiliary plane*, beschrieben wird), der senkrecht zur Gleitrichtung und Richtung der Bewegungsebene ist (die Gleitstriemung bildet dabei den Pol der Hilfsfläche). Die Hilfsfläche teilt zusammen mit der Verwerfungsfläche eine Kugel in vier Quadranten, die rechte Flächenwinkel (**Zweiecke**; *dihedral right angles*) genannt werden. Die paarweise gegenüberliegenden Quadranten haben kompressiven oder dehnenden Charakter. Irgendwo im kompressiven Quadranten liegt die \vec{s}_1 -Achse, im dehnenden die \vec{s}_3 -Achse.
- der Plot wird für alle weiteren Verwerfungs- /Bewegungsflächen-Paare wiederholt.

- Die Überlagerung von allen Zweiecken aller betrachteten Verwerfungsflächen begrenzt nach und nach die Kompressions- oder Extensionsbereiche. Nur dieses kleine Gebiet, in welchem sich alle Quadranten die entweder in Kompression oder Extension überlagern, können als \vec{s}_1 -, bzw. \vec{s}_3 -Paläospannungsrichtung, die das gesamte Verwerfungssystem darstellt, angenommen werden.

Übung

Tragen Sie eine Aufschiebung mit der Fläche 60/190 und Striemung 20/110 in das Stereonez ein. Bestimmen Sie die dazugehörigen Kompressions- und Dehnungsquadranten. Tragen Sie nun eine weitere Aufschiebung mit der Fläche 30/130 und Striemung 20/080 in dasselbe Stereonez ein und wiederholen Sie die Bestimmung der dazugehörigen Kompressions- und Dehnungsquadranten. Definieren Sie die wahrscheinlichste Orientierung der Kompressions- und Extensionsrichtungen.

Vererbte Brüche

In natürlichen Gesteinen gibt es viele geschlossene und gleichmässig verteilte Diskontinuitätsflächen (z.B. Kristallgrenzen). Vererbte Flächen können eine kritische strukturelle Anisotropie produzieren, besonders wenn sie auf einer Skala gross genug betrachtet werden, um Klüfte oder Kontakte zwischen unterschiedlichen Lithologien einzuschliessen. Als Folge koexistieren zwei Bruchkriterien:

- (1) Das Bruchkriterium für neue Verwerfungsflächenorientierungen im intakten Gestein;
- (2) Ein zweites Bruchkriterium für die Scherfestigkeit zur Reibung von "schwachen" und bereits vorhandenen Flächenorientierungen.

In der Tiefe und für positive Normalspannungen, ist das lineare Coulomb'sche Kriterium normalerweise mit beiden Fällen konsistent. Aber im zweiten Fall wird die Kohäsion bis null nach unten variieren (aus Gleichung 5 in Vorlesung: Bruchbildung). Zusätzlich wird die einfache Orientierungsbeziehung zwischen der Orientierung der Mohr-Coulomb-Scherbrüche und der Spannungsrichtung unbrauchbar:

- Mit bereits vorhandenen Brüchen, kann eine Verwerfungsebene in jedem beliebigen Winkel (ausgenommen 0° und 90°) zur σ_1 geneigt sein.
- Auf prä-existierenden Schwächezonen, die nicht parallel zu einer Hauptspannung orientiert sind, hängt die Versatzrichtung von der angewandten Differentialspannung ($\sigma_1 - \sigma_3$), d.h. vom relativen Betrag der Hauptspannungen und der Orientierung der Fläche bezüglich der Orientierung der Hauptspannungsachsen, ab.
- Die Verwerfungsebene muss keine Hauptspannungsrichtung beinhalten.

Diese sind grundlegenden Faktoren, die bestimmen, welche Richtung der möglichen Verwerfung der grössten Scherspannung ausgesetzt ist.

Graphische Darstellung

Man kann diese Eigenschaften auf einem Mohr Diagramm veranschaulichen, das einen dreiachsigen Spannungszustand darstellt, und einen kleinen Druckunterschied, der sich mit tektonischer Last erhöht, betrachten.

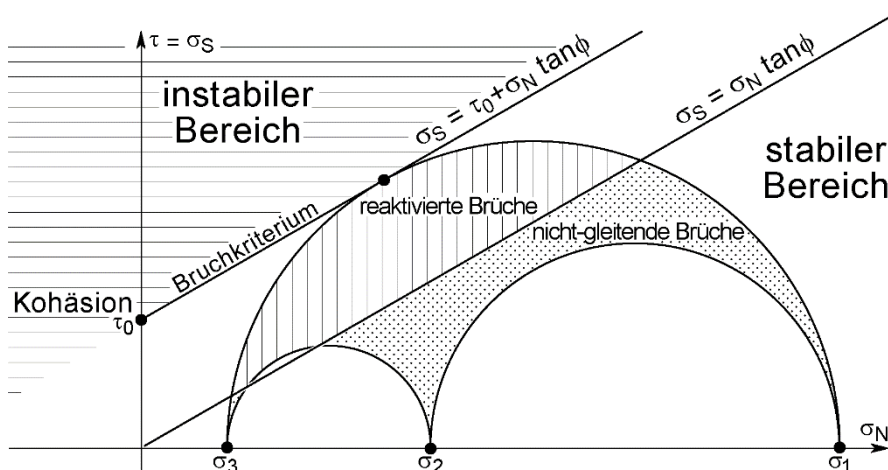
Grundsatz

Wir wissen, dass:

- Jede mögliche Bruchfläche ist ein Punkt mit (σ_N, σ_S) Koordinaten, der auf (wenn die Bruchflächen hergestellt werden) und innerhalb (wenn es keine Scherbewegung gibt) des (σ_1, σ_3) -Kreises geplottet wird.

- Eine neue Verwerfung wird verursacht, wenn der äussere (σ_1, σ_3) -Kreis das Mohr-Coulomb Bruchkriterium erreicht. Wenn dies geschieht, kann dieser Kreis nicht mehr wachsen und die Differentialspannung $(\sigma_1 - \sigma_3)$ wird durch die Bewegung auf neuen Verwerfungen begrenzt. Die Mohr-Coulomb Umhüllende ist folglich ein maximales Reibungsgesetz.
- Die kleinen Kreise (σ_3, σ_2) und (σ_2, σ_1) stellen Flächen dar, die nur eine der Hauptspannungen, die die Differentialspannung definieren, enthalten; folglich enthalten diese Kreise keine relevante Verwerfungslösung, weil die Scherbewegung (σ_N, σ_S) -Bedingungen auf und aus diesen kleinen Kreisen heraus verlangt.

Alle vererbten Gesteinsdiskontinuitäten (z.B. Brüche, Schieferungsflächen, Schichtflächen, usw.) können unter dem betrachteten Spannungszustand gleiten, wenn sie (σ_N, σ_S) -Punkten innerhalb des gekrümmten Dreiecks zwischen den (σ_1, σ_3) , (σ_3, σ_2) und (σ_2, σ_1) Mohrkreisen entsprechen; diese Punkte müssen der Orientierung einer Bruchfläche wirklich entsprechen und auf einer Reibungslinie, die die Scherbewegung definiert (Byerlee Gesetz), liegen.



Bereich der reaktivierten, vererbten Brüche
im Mohr'schen Diagramm für einen dreiachsigen Spannungszustand

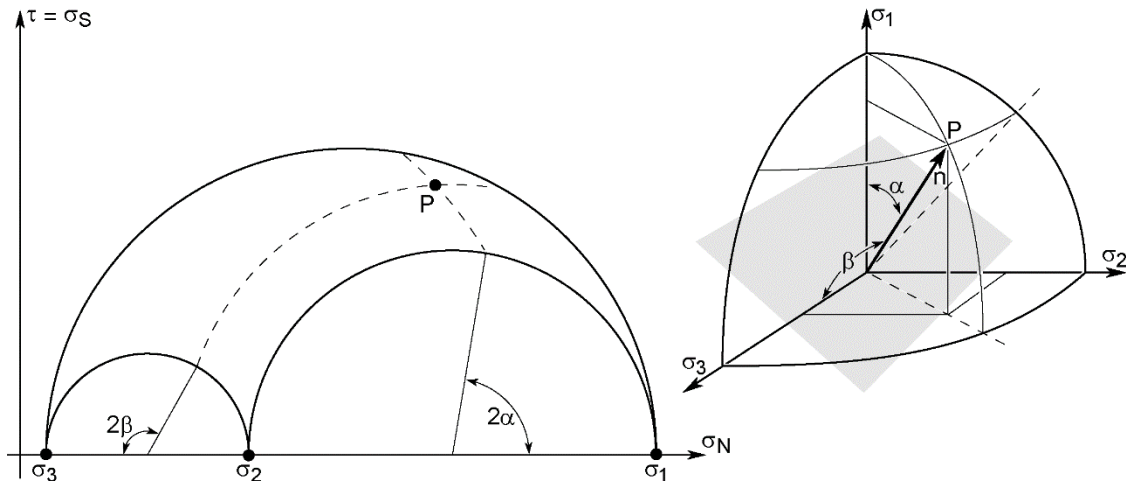
Die Nullkohäsionslinie, die durch den Ursprung läuft, stellt eine Diskontinuität dar. Sie schneidet das gekrümmte Dreieck in zwei Bereiche.

- Die Bruchflächen, die unterhalb dieser Linie liegen, sollten nicht gleiten, andernfalls würde die Kohäsion negativ sein. Die Nullkohäsionslinie ist folglich ein minimales Reibungsgesetz.
- Unter einem konstanten Spannungszustand ist eine Scherbewegung für die Bruchflächen, die entlang der Nullkohäsionslinie liegen, theoretisch möglich.
- Wegen Spannungsschwankungen in Raum und Zeit (folglich nicht ein einzelner Zustand vom Druck) ist die Scherbewegung zwischen dem kleinsten und grössten Spannungstensor möglich. Der grösste Spannungstensor produziert eine Scherbewegung auf vorher existierenden Bruchflächen kurz vor der Entwicklung neuer Störungen. Diese zwei Bedingungen werden durch die minimale Kohäsionslinie und die innere Seite des (σ_1, σ_3) Mohr'schen Kreises dargestellt.

Auf dem Mohrdiagramm sind alle möglicherweise reaktivierten Bruchflächen die Punkte, die im Bereich zwischen der Nullkohäsionslinie und dem (σ_1, σ_3) Mohr'schen Kreis enthalten sind.

Grafische Darstellung einer Fläche im Mohrdiagramm

Jede mögliche Fläche wird durch seinen normalen Einheitsvektor definiert. Die Position einer Fläche P im dreidimensionalen Mohrkreis verwendet die zwei Euler Winkel α und β zwischen der Flächennormalen bzw. den \bar{s}_1 und \bar{s}_3 Achsen.



Darstellung einer Verwerfungsfläche P in einem dreidimensionalen Mohrdiagramm

- Für alle Winkel im Mohrdiagramm, verwendet man die Winkel 2α und 2β , um die Orientierungspunkte auf die Kleinkreise von (σ_2, σ_1) bzw. (σ_3, σ_2) zu setzen.
- Dann werden die Bögen konstruiert, die durch diese Punkte laufen und die vom Mittelpunkt des anderen Kleinkreises gezeichnet werden.
- P wird bestimmt am Schnittpunkt der zwei Bögen.

Praktische Konsequenzen

Ein wichtiger Unterschied besteht zwischen den Verwerfungen, die unter einigen Spannungsbedingungen entstanden sind und entlang eines reaktivierten vorher vorhandenen Bruchs: Die Orientierung der neuen Verwerfungen wird durch den Spannungszustand gesteuert, der sie produziert, während vorher vorhandene Verwerfungsflächen eine Vielzahl von Orientierungen bezüglich der Hauptspannungsachsen haben können. Dieses Statement hat für Feldgeologen gewisse Konsequenzen, da sie nicht immer Anzeichen finden, um neue von vorher vorhandenen Verwerfungsflächen zu unterscheiden. In solchen Fällen wird versucht, gewisse Orientierungen des Spannungsellipsoides zu identifizieren, deren Verschiebungen den falschen Schersinn ergeben. Dies sollte von Ort zu Ort getrennt durchgeführt werden, um das kausale Spannungsfeld örtlich zu bestimmen.

Mathematische Methoden

Numerische Techniken werden heutzutage bevorzugt, da computergestützte Berechnungen bequem geworden sind. Der Spannungstensor \mathbf{T} mit den Komponenten σ_{ij} verbindet \bar{t} , den Zugvektor mit den Komponenten t_i auf einer Fläche, mit dem normalen Vektor \bar{n} mit Komponenten n_j , der die Orientierung der Fläche definiert (sehen Sie Vorlesung 1). Diese mathematische Relation ist das Cauchy Gesetz:

$$t_i = \sigma_{ij} n_j$$

Diese Gleichung kann verwendet werden, um die Spannung auf jeder möglicher Fläche zu berechnen, sobald man den Wert des Spannungstensors in einem ausgesuchten Koordinatensystem kennt.

Voraussetzungen

Die Hauptrichtungen eines regionalen Spannungsfeldes können von der Analyse der Scherbewegungen auf Verwerfungen mit verschiedenen Orientierungen und Versätzen, die durch das Spannungsfeld verursacht werden, errechnet werden. Die Richtung der Scherbewegungen kann entweder von gestriemten Bruchflächen (strukturelle Analyse) oder von den Erdbebenlösungen, die mit diesen Bewegungen verbunden sind, abgeleitet werden.

Es gibt verschiedene Methoden um die Paläospannungen zu bestimmen, aber alle beziehen sich auf die gleichen Annahmen:

- (1) Das Gestein ist isotrop.
- (2) Alle Bewegungen werden durch den gleichen Spannungstensor verursacht (d.h. sind alle zeitgleich in einem geologischen Zeitrahmen).
- (3) Auf jeder Verwerfungsfläche ist der Versatz parallel zur maximalen aufgelösten Scherspannung des regionalen Spannungstensors (dies ist die so genannte Wallace-Bot Annahme).
- (4) Die Verformung ist drallfrei.

In der Praxis erfordern diese Annahmen dass:

- das Bearbeitungsgebiet in Bezug zum Störungsmassstab gross ist.
- der Spannungszustand homogen und konstant ist im Raum und in der Bruchbildungszeit oder dass die Verwerfungsdaten in Gruppen getrennt werden können, in denen diese Homogenität erwartet wird.
- die Bewegungen auf jeder Verwerfung genug voneinander unabhängig sind (d.h. Bewegung auf einer Verwerfung wird nicht durch eine Spannungsstörung infolge der Bewegung auf einer anderen Verwerfung beeinflusst).

Wenn diese Annahmen erfüllt sind, dann kann der deviatorische Tensor eines tektonischen Ereignisses von einigen unabhängigen Daten erhalten werden, die zu diesem Ereignis gehören.

Beziehung zwischen Striemung und Spannung

Die Beziehung zwischen einer Striemung und der Spannung, die diese verursacht hat, wurde von Bott (1959) erklärt. Er zeigte, dass der *rake* (oder der *pitch*, d.h. der Winkel zwischen dem Linear und dem Streichen der Verwerfungsfläche), von vier Parametern abhängt:

- 3 Winkel (im Allgemeinen Eulerwinkel), die die Orientierung der Verwerfungsfläche in Bezug auf die Orientierung der Hauptspannungen definieren, d.h. die Eigenvektoren \vec{s}_1 , \vec{s}_2 und \vec{s}_3 (mit den entsprechenden Eigenwerten $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, in der Geologie positiv bei Kompression).
- Das Verhältnis der Spannungstensoren, welches die lokalen relativen Beträge der Hauptspannungen beschreibt ist wie folgt definiert:

$$R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$$

Diese Gleichung deutet an das $0 \leq R \leq 1$ ist. Ein niedriger R-Wert zeigt ein prolates Spannungsellipsoid, in dem die Grösse von σ_2 näher zur Grösse von σ_3 als σ_1 ist. R nimmt zu, wenn σ_2 näher zu σ_1 kommt und produziert ein oblates Spannungsellipsoid.

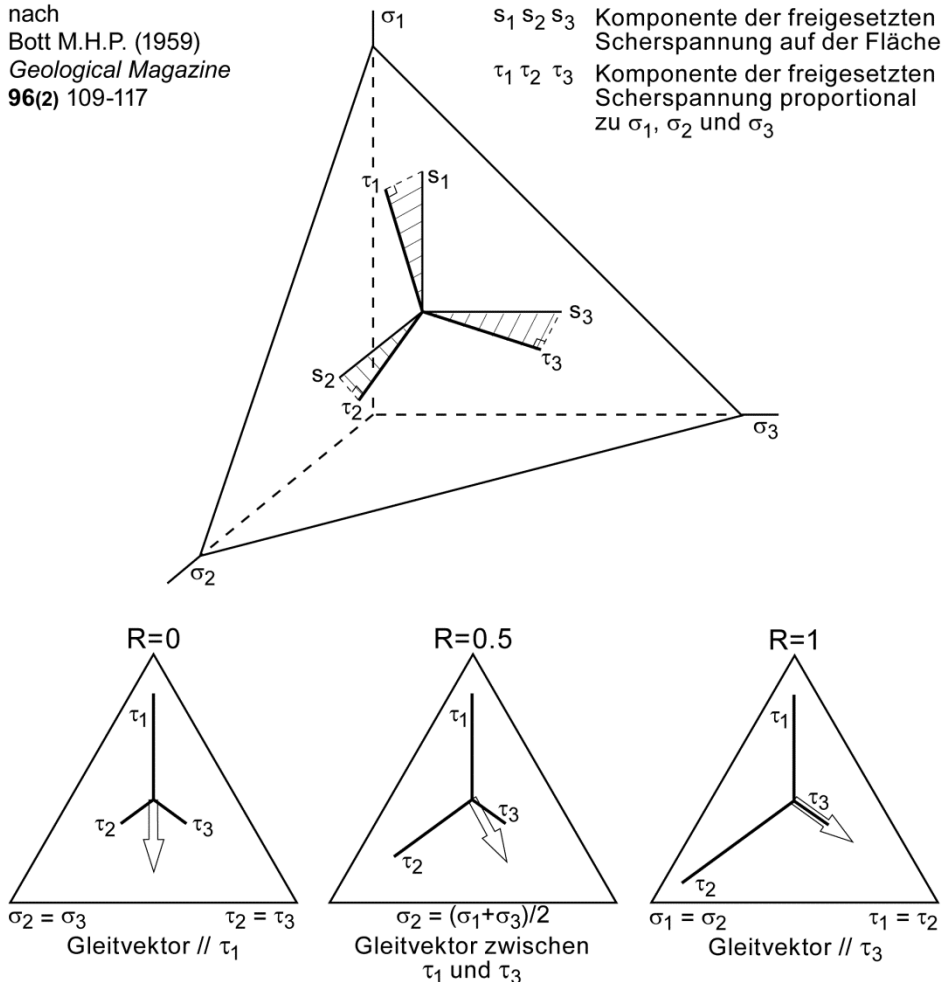
Das Spannungsverhältnis kontrolliert für jede mögliche gegebene Fläche die Richtung der Scherspannung und stellt die Geometrie der Bewegung auf Störungsflächen fest. Die Konsequenzen der Demonstration von Bott sind einfacher zu verstehen, wenn wir einen Einzelfall betrachten.

Wir betrachten eine bestimmte Fläche P, die den gleichen Winkel (ungefähr 34°) mit den drei Hauptspannungen \vec{s}_1 , \vec{s}_2 und \vec{s}_3 bildet. Die drei Richtungskosinusse der Flächen sind gleich und folglich sind die drei Komponenten der freigesetzten Scherbeanspruchung auf der Fläche proportional zu den Hauptspannungen. Wir können auf die Fläche die drei Komponenten der freigesetzten Scherbeanspruchung τ_1 , τ_2 und τ_3 ohne Berücksichtigung weiterer Winkelbeziehungen projizieren.

Jetzt betrachten wir drei unterschiedliche Werte von R:

- $R = 0$ $\sigma_2 = \sigma_3$; einachsige Kompression
- $R = 0.5$ $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$
- $R = 1$ $\sigma_1 = \sigma_2$; einachsige Extension

nach
Bott M.H.P. (1959)
Geological Magazine
96(2) 109-117



Das Bott'sche Prinzip auf der gleichmässig zu den drei Hauptspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 geneigten Fläche

Aus Annahmen erhalten wir drei unterschiedliche Strömungen (zwei Extreme und den mittleren Fall) parallel zur freigesetzten Scherspannung. Folglich variiert die Orientierung der Strömung auf derselben Verwerfungsfläche entsprechend den relativen Beträgen der Hauptspannungen. Umgekehrt kann eine einzelne Strömung einer Unzahl von Spannungszuständen entsprechen und legt daher nicht die Richtung der Spannungstensor- Hauptachsen fest. Folglich ist eine viele Daten verarbeitende Statistik notwendig, um sich dem Spannungszustand zu nähern. Als Zugabe, verglichen mit den geometrischen Annäherungen, erhalten wir die relativen Beträge der drei Hauptspannungen.

Inverse Methoden

Spannungsinversion benützt die Verwerfungsdaten, die in Aufschlüssen gemessen wurden, um auf die entfernten Paläospannungen zu schliessen, die die gemessenen Rutschharnische und Verwerfungsflächen verursachten oder reaktivierten. Die Herausforderung ist die dynamische Information (Spannung) aus kinematischen Daten (Verformung) abzuleiten. Die Parallelität zwischen den Hauptspannungsachsen und den Hauptverformungsachsen ist eine wichtige Voraussetzung, die aus der Elastizität extrapoliert wird. Die Berechnung liefert die Hauptrichtungen und das Verhältnis des Spannungstensors.

Prinzip

Im Allgemeinen, für einen gegebenen Spannungszustand dargestellt durch den Spannungstensor \mathbf{T} , können wir die Spannung und folglich die Normal- und Scherkomponenten auf jeder möglichen Fläche berechnen. Das inverse Problem besteht darin, vier von den sechs Komponenten eines symmetrischen Spannungstensors zu berechnen. Dies ist der Tensor, der den Unterschied zwischen den gemessenen und den berechneten Versatzrichtungen auf alle Verwerfungsflächen minimiert, mit der Anforderung, dass die Harnische jeder Verwerfungsebene zur gelösten Scherspannung parallel sind.

Die hohe Zahl der Unbekannten und die Nichtlinearität des Problems erfordern den Gebrauch von Computer-Software für die Berechnungen. Eine häufig eingesetzte Berechnungsmethode besteht aus dem numerischen Auswählen eines Versuchstensors aus vielen nach dem Zufallsprinzip gewählten Tensoren, dessen Summe der Winkelabweichungen zwischen gemessenen Strömungen und errechneten Gleitlinien die kleinste ist.

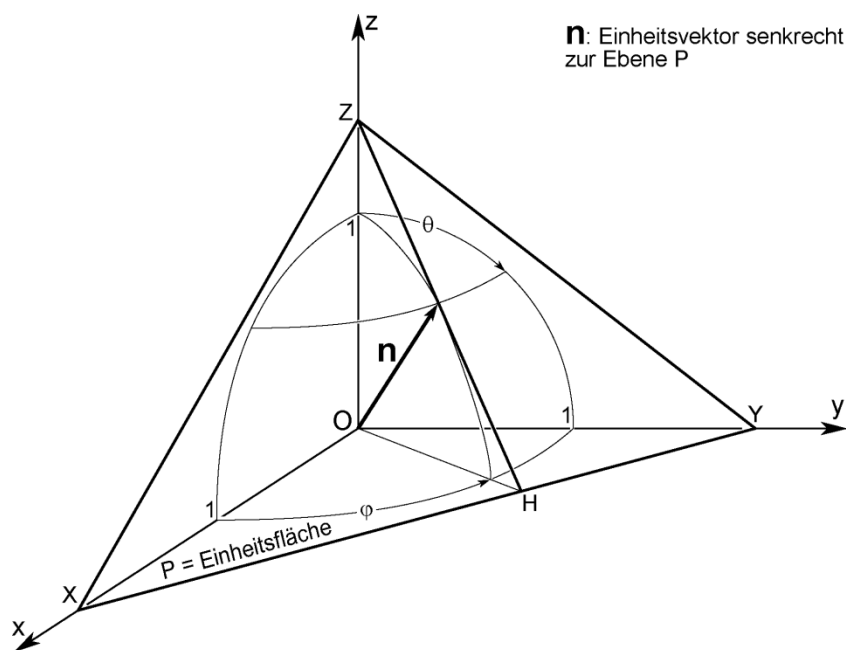
Es ist dann üblich, zu überprüfen, ob der Lösungstensor die gelöste Scherspannung erbringt, die auf jeder Fläche entweder grösser oder gleich dem Gleitwiderstand ist. Das wird leicht auf einem Mohrdiagramm getan, in welchem die Bruchbildungsumhüllende die höchsten möglichen Spannungswerte begrenzt.

Analytische Hinweise

In der Geologie entspricht das orthogonale Koordinatensystem mit den Achsen x , y und z der geographischen horizontalen NS und EW Richtung und der vertikalen Richtung.

Eine Verwerfungsfläche E ist definiert durch den Einheitsvektor \bar{n} senkrecht zur Ebene, mit geographischen Koordinaten (n_x, n_y, n_z) .

Die lineare Strömung über F ist definiert durch den Einheitsvektor \bar{L} mit geographischen Koordinaten (L_1, L_2, L_3) .



Definition einer Einheitsfläche durch ein infinitesimal kleines tetraeder

Die Zugkraft \bar{t} , die an F angewendet wird, wird vom Spannungstensor \mathbf{T} durch die symmetrische Matrix dargestellt (symmetrisch, weil das Gestein keine Torsion erleidet):

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

so dass in diesem Koordinatensystem (Cauchy Gesetz):

$$\vec{t} = \mathbf{T}\vec{n}$$

Folglich ist \vec{t} gegeben durch:

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix}$$

Weil $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ und dieses umgeformt ergibt:

$$\begin{aligned} t_1 &= \sigma_{11} \cdot n_1 + \sigma_{12} \cdot n_2 + \sigma_{13} \cdot n_3 \\ t_2 &= \sigma_{12} \cdot n_1 + \sigma_{22} \cdot n_2 + \sigma_{23} \cdot n_3 \\ t_3 &= \sigma_{13} \cdot n_1 + \sigma_{23} \cdot n_2 + \sigma_{33} \cdot n_3 \end{aligned}$$

In Hauptspannungsform wird \mathbf{T} durch die diagonale Matrix dargestellt:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$

mit $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.

Wie vorher gesehen (Vorlesung Spannungen und Mechanische Aspekte der Deformation), sind sechs Grössen notwendig, um \mathbf{T} zusammen mit den 3 Eulerwinkeln zu definieren. Die drei Eulerwinkel (θ, ϕ, ψ) , die die Orientierung der Hauptachsen von \mathbf{T} bezüglich der Koordinatenachsen beschreiben, und die 3 Hauptspannungsachsen.

\mathbf{T} kann in einen isotropen Spannungsanteil \mathbf{P} und eine deviatorische Spannung \mathbf{D} getrennt werden. Nur der deviatorische Spannungsanteil \mathbf{D} trägt zur Scherspannung bei, da der isotrope Spannungsanteil \mathbf{P} eine Kraft normal zu den möglichen Flächen bewirkt.

Man legt $\vec{\tau}$ als Scherbestandteil auf F fest. Die Orientierung und Richtung dieser Scherkomponente, zum Einheitsvektor reduziert, bleiben unverändert, wenn der hydrostatische Druck \mathbf{P} aus \mathbf{T} heraus genommen wird und \mathbf{T} mit einer willkürlichen, positiven Konstante multipliziert wird (Verhältnis der Homothetie). Folglich hängt die Scherkomponente nur von 4 Parametern ab, der Orientierung der drei Hauptspannungsachsen (θ, ϕ, ψ) und dem relativen Verhältnis der Hauptspannungen, was sich auf die Spannungsgrössen bezieht. Diese vier Parameter definieren eine **reduzierte Deviatorspannung** (*reduced stress tensor*). Sie definieren keinen eindeutigen Tensor, aber ein Set von Spannungstensoren, die auf jeder möglichen Verwerfung einen Versatz um den gleichen Einheitsvektor verursachen würden.

Achtung: Die relative Grösse der Paläospannungsachsen ist unabhängig vom Versatz und sollte nicht mit dem Verformungsgrad verwechselt werden.

Angenommen, dass die Parallelität zwischen der maximal aufgelösten Scherspannung auf der Verwerfungsfläche und der Bewegungslinie für Inversion vorherrscht, ist die zu lösende Gleichung:

$$\begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} = 0$$

wobei b_i die Komponenten des Einheitsvektors \vec{b} , der senkrecht zur Belegungslinie L auf der Störungsfläche (die Vektoren \vec{n} und \vec{L} sind zueinander orthogonal) sind.

Die Sets von Vektoren, die für eine Verwerfung gewonnen wurden, sind mehrdeutig, es sei denn zusätzliche Annahmen (wie Abschätzungen der Kohäsion und des inneren Reibungswinkels, der lithostatischen Spannung, usw.) können vorgenommen werden.

Jetzt betrachtet man N-Verwerfungsflächen mit Einheitsnormalen \vec{n}_j ($j=1,\dots,N$), auf denen Strömungen mit Einheitsvektoren \vec{S}_j dem gleichen tektonischen Ereignis entsprechen (Spannungstensor). Das inverse Problem besteht nun darin, aus einem Set von M Tensoren \mathbf{T} denjenigen Tensor \mathbf{T}_i herauszufinden, der die Daten am besten erklärt, so dass für jedes i und j der Einheitsvektor der tangentialen Kraft $\vec{\tau}_i$ infolge \mathbf{T}_i dem Einheitsvektor \vec{S}_j der gemessenen Strömung entspricht (beste Anpassung). Der Winkelfehler a_{ij} zwischen $\vec{\tau}_{ij}$ und \vec{S}_j reicht von 0 bis 180°. Die

Berechnung besteht in der Suche nach den Tensoren, die die Vektorfunktion $F_i = \sum_{j=1}^N |a_{ij}|$ minimieren.

Diese Funktion hängt von den vier Parametern (θ, ϕ, ψ) und R ab, und diese Parameter sind die zu findenden Resultate.

Methode

Die analytische Methode verfährt in zwei Schritten.

Die am besten passende Lösung (best fit solution)

Mit Hilfe eines Computerprogramms werden zuerst tausende von willkürlich erzeugten Spannungstensoren (Orientierung der Hauptspannungsachsen und Spannungsverhältnis) getestet, inwieweit sie zu einem Verwerfungsdatensatz passen. Eine Berechnung nach dem Trial und Error Verfahren, bestehend aus beliebig gewählten Parametern mit einer einheitlichen Wahrscheinlichkeitsverteilung über ihrem Variationsbereich, liefert eine erste Annäherung (eine s.g. Monte Carlo Inversion). Dieser Näherungswert der Tensorposition und des Spannungsverhältnisses wird weiter durch einen nicht linearen Erfolgs- und Fehlertest optimiert, der separat die drei Eulerwinkel und das Verhältnis R justiert, bis jede mögliche Änderung dieser vier Parameter nicht länger die Reduzierung verbessert. Die **Linearisierung**, die jetzt genügend ist, da wir sehr nah an der abschliessenden Lösung sind, verfeinert dieses zweite Resultat zur "am besten passenden Lösung", die den kleinsten Winkelunterschied zwischen den beobachteten und berechneten Bewegungsvektoren für die maximale Anzahl von Verwerfungsflächen hat.

Es müssen mindestens 5 Verwerfungsfläche-Linear-Paare vorliegen, damit eine brauchbare Berechnung durchgeführt werden kann. Die räumliche Verteilung der Flächen sollte möglichst gleichmässig sein und den gesamten Raum abdecken. Der Fehler der vier Parameter (θ, ϕ, ψ) und R zeigt den Vertrauensbereich an (normalerweise 95%).

Kompatibilität mit einem Reibungsgesetz

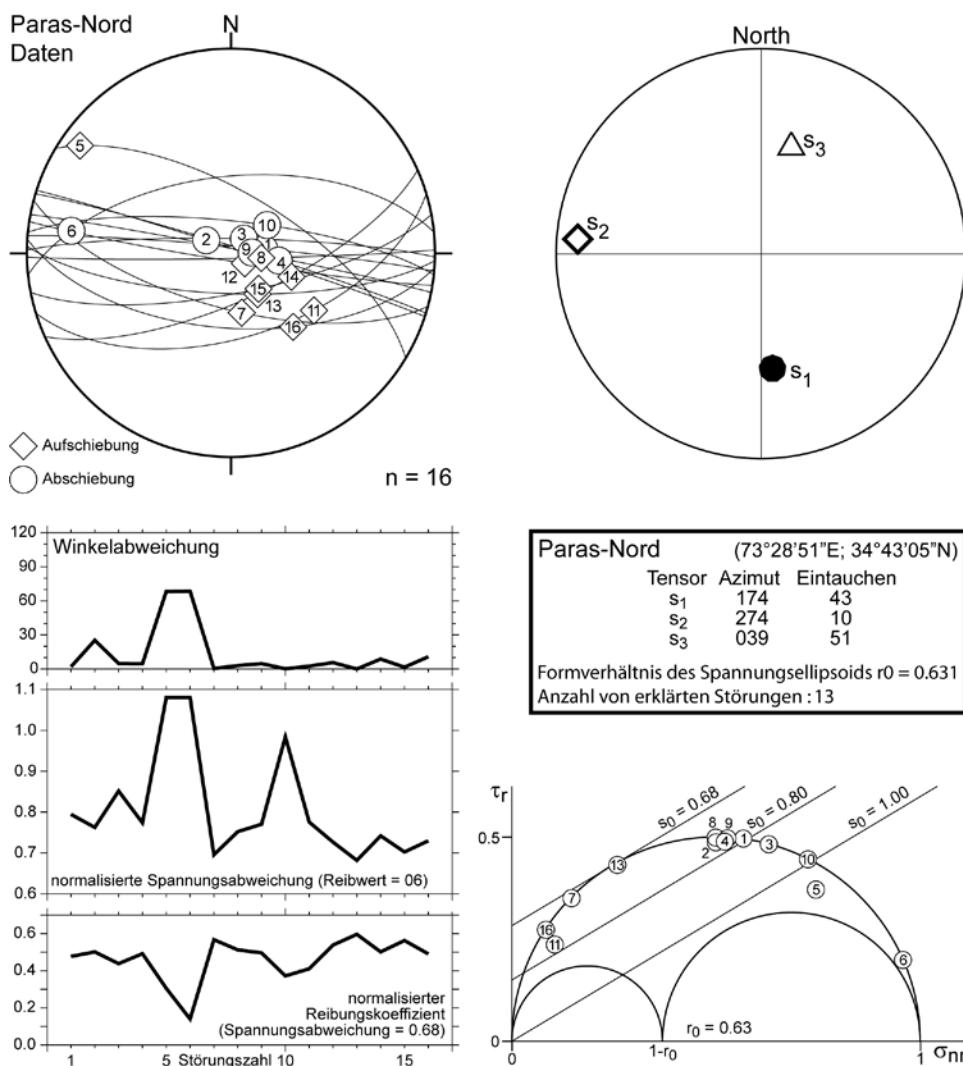
Zweitens wird die Kompatibilität der verringerten Spannungstensorlösung mit einem wahren Spannungstensor, der ein Reibungsgesetz auf den aktivierten Störungsflächen erfüllt, durch graphische Darstellungen geschätzt.

Darstellung der Ergebnisse aus Paläospannungsanalysen

Eine wichtige Annahme ist, dass in einem bestimmten Gebiet ein gegebenes tektonisches Ereignis durch einen homogenen Spannungstensor charakterisiert wird.

Die graphische Ausgabe enthält eine Histogrammdarstellung der Fehlerberechnungen sowie die Darstellung der Spannungsverhältnisse im Mohrschen Kreis. Sie liefern ergänzende Informationen, um die Qualität der Lösung auszuwerten.

- Die Histogrammdarstellung zeigt die Abweichung des gemessenen Lineares von der errechneten Richtung der maximalen Scherspannung für jede einzelne Verwerfung aus dem Datensatz. Diese Darstellung erlaubt die Qualität des Resultats auf einen Blick abzuschätzen. Das Maximum, das die meisten Verwerfungen enthält, sollte nahe bei der 0°-Fehler Achse stehen. Das Resultat wird als korrekt angesehen, wenn die Störungsdaten innerhalb eines Bereichs kleiner 20° von der errechneten Achse sind. Strömungen in einem grösseren Winkel werden nicht in zufriedenstellender Weise erklärt. Diese Verwerfungen können einem anderen tektonischen Ereignis angehören oder anzeigen, dass das Spannungssystem innerhalb eines einzelnen Ereignisses nicht homogen ist.



- Die Darstellung der errechneten Spannungswerte im Mohrschen Kreis kann zur Kontrolle der Berechnungsergebnisse herangezogen werden. Verwerfungsflächen, deren Strömung mit dem festgelegten Spannungstensor übereinstimmen, haben ein akzeptables Verhältnis von Scher- zu Normalspannung und plotten deswegen nahe dem Punkt, an dem das Bruchkriterium (Mohrsche Umhüllende) den Mohrschen Kreis tangiert. Verwerfungsflächen, die im unteren Teil des Diagramms

plotte, sind nicht akzeptabel, da die Normalspannung im Vergleich zur Scherspannung zu gross ist. Diese Verwerfungen können möglicherweise nicht mit dem errechneten Tensor zusammenhängen. Jedoch gibt es häufig präexistierende Verwerfungen, die einfach zu aktivieren sind, und auf welchen der Betrag der Scherkomponente in Bezug auf die Normalkomponente nicht ein bestimmendes Kriterium ist. Weiterhin stellt das Mohrdiagramm die räumliche Verteilung der Verwerfungsflächen dar.

Wir können nun unbefriedigende Störungsdaten identifizieren und aus dem Datensatz ausschliessen um eine Verbesserung unserer Lösung mit den verbleibenden, akzeptablen Messungen zu erreichen. Eine neue Berechnung mit den ausgeschlossenen Daten liefert uns die Information, ob diese ausgeschlossenen Daten einem eigenen tektonischen Ereignis zuzuordnen sind. Jedoch ist die Ermittlung der überlagerten tektonischen Ereignisse im Gelände zuverlässiger als blindes Vertrauen in die Berechnungen.

Überprägte Verwerfungsphasen

Störungsreaktivierung und Wechselbeziehung sind gut begründete natürliche Phänomene. Die Beweise, dass Verwerfungen charakteristische Bewegungen wiederholten, stammen von seismologischen Studien, von Rutschharnischen mit verschiedenen Orientierungen auf einer Verwerfungsfläche und von veränderten stratigraphischen Abtrennungen.

Im Falle mehrerer tektonischen Phasen ist das wohl schwierigste und mühsame Problem die Bestimmung relevanter Spannungstensoren und die Zuordnung entsprechend gestriemter Verwerfungsflächen. Die Trennung von heterogenen Datensätzen in verschiedene homogene Verwerfungspopulationen ist eine Voraussetzung für Ergebnisse mit geologischer Signifikanz. Erfahrungsgemäss ist es häufig der Fall, dass eine Trennung nach Überschneidungskriterien oder anderen Altersrelationen im Aufschluss nicht ausreichend möglich ist.

Die grundlegende mechanische Annahme ist, dass ein angelegtes Spannungsfeld nur prä-existierende Verwerfungen reaktivieren kann, die vorteilhafte Orientierungen haben, in denen die Scherspannungen genug hoch sind, um den Reibungswiderstand zu überwinden.

Die Grenze der Trennbarkeit von homogenen Verwerfungspopulationen mit unterschiedlichen kinematischen Richtungen liegt im Bereich von 20-40°.

Die mathematische Separationsmethode, stets unter Beaufsichtigung der BearbeiterIn, läuft so:

- Berechne den ersten Durchgang des Datensatzes mit allen Verwerfungsdaten.
- Entferne alle „schlechten“ Daten im Histogramm und Mohr'schen Kreis.
- Die bei der ersten Separation des Datensatzes gewählten Daten werden zu einem zweiten Datensatz zusammengefasst und erneut berechnet, um die Lösung zu verbessern. Die Prozedur wird solange fortgeführt, bis eine stabile Störungsdatenpopulation einen stabilen Tensor liefert.
- Für Daten, die nicht zu dem berechneten Spannungstensor passen, muss der Vorgang noch einmal durchgeführt werden.

Eine rein mathematische Methode besteht in zwei simultanen Berechnungen mit jeweils unterschiedlichen Zielen:

- Bestimmen Sie den besten Tensor, der nur einen begrenzten Prozentsatz der Verwerfungen erklärt (z.B. n% aus n-Daten)
- Bestimme für jeden Tensor den Prozentsatz der Verwerfungsdaten, die akzeptiert werden.

Die erste Berechnung kann als Zufallsrechnung mit Tausenden von Tensoren zusammengefasst werden, wobei aber die vom zufälligen Tensor akzeptierte N-Verwerfungspopulation nicht notwendigerweise die gleichen Daten umfasst. Die Minimalisierung des Winkelfehlers ist die beste Methode, die N%-Verwerfung unter den N-Daten zu finden, damit die Winkelfunktion den kleinsten Wert ergibt. Das Hauptproblem liegt darin, N zu bestimmen. Wenn N zu gross ist, umfasst die Berechnung Daten, die zum gesuchten Ereignis ohne Bezug sind. Wenn N zu klein ist, ist das Resultat unvollständig. Es gibt keine direkte Methode, N zu definieren. Infolgedessen ist die Prozedur eine Abfolge von Versuch und Irrtum mit zwei Kriterien:

- Konvergenz von Resultaten von zuerst unterschiedlichen Tensoren.
- Analyse des Histogramms und des Mohrschen Kreises.

In Wirklichkeit sind numerische Simulationen, um eine völlig automatische Trennung zwischen einem homogenen Verwerfungsdatensatz (der aus einer einzelnen Bruchbildungsphase resultiert) von einem heterogenen (Mehrphasen-) zu erreichen, erfolglos. Verschiedene Tensorpopulationen können sowohl zeitliche als auch räumliche Heterogenität der spröden Verformung widerspiegeln. Es ist schwierig, zeitlich aufeinander folgende tektonische Spannungsereignisse statt partitionierte Verwerfungsbewegungen oder kurzfristige Schwankungen des Spannungsfeldes zu ermitteln. Der Geologe muss die korrekte Wahl des Spannungstensors lenken. Strukturelle Daten wie die Eigenschaften der Störungsflächen, die Stylolithen und die Spaltungsadern sind für die korrekte Trennung der Spannungstensoren aus Verwerfungsdaten essenziell.

Hydraulisches Zerbrechen

Der dreidimensionale Spannungszustand und der treibende Druck, der mit der Öffnung der Adern und der Gänge verbunden ist, kann aus den Orientierungen der Adern (Gänge) geschätzt werden. Das treibende Porendrucksverhältnis D_R kann durch einen Bruch gewonnen werden, dessen Senkrechte zu den Hauptspannungsachsen \bar{s}_1 , \bar{s}_2 und \bar{s}_3 mit den jeweiligen Winkeln θ_1 , θ_2 und θ_3 geneigt ist. Die Richtungskosinusse dieser Winkel, schriftlich $\mathbf{n}_1 = \cos \theta_1$, $\mathbf{n}_2 = \cos \theta_2$ und $\mathbf{n}_3 = \cos \theta_3$, erfüllen das Verhältnis (Gleichung 9 in Vorlesung Spannungen):

$$\mathbf{n}_1^2 + \mathbf{n}_2^2 + \mathbf{n}_3^2 = 1$$

Die Fern-Normalspannung ist die Summe der Komponenten:

$$\sigma_N = \sigma_1 \mathbf{n}_1^2 + \sigma_2 \mathbf{n}_2^2 + \sigma_3 \mathbf{n}_3^2$$

Mit diesen Gleichungen ist die Bedingung um einen Bruch zu öffnen:

$$p - \left\{ \sigma_1 \mathbf{n}_1^2 + \sigma_2 \mathbf{n}_2^2 + \sigma_3 (1 - \mathbf{n}_1^2 - \mathbf{n}_2^2) \right\} \geq 0$$

Neu geordnet, erhält man:

$$p - \left\{ (\sigma_1 - \sigma_3) \mathbf{n}_1^2 + (\sigma_2 - \sigma_3) \mathbf{n}_2^2 + \sigma_3 \right\} \geq 0$$

$$p - (\sigma_1 - \sigma_3) \mathbf{n}_1^2 - (\sigma_2 - \sigma_3) \mathbf{n}_2^2 - \sigma_3 \geq 0$$

Dividieren jeder Bezeichnung durch $(\sigma_1 - \sigma_3)$ ergibt:

$$\frac{p - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)} - \mathbf{n}_1^2 - \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \mathbf{n}_2^2 \geq 0 \quad (1)$$

Diese Gleichung kennzeichnet zwei Verhältnisse:

Das vorher definierte Verhältnis des Spannungstensors: $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$.

Das Verhältnis des treibenden Drucks $D_R = (p - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$, das auch zwischen 0 und 1 schwankt und die Balance zwischen dem Wert des Porendrucks und den minimalen und maximalen Hauptspannungskomponenten beschreibt.

Dividieren der Gleichung (1) durch R ergibt:

$$1 - \frac{\mathbf{n}_1^2}{R} - \frac{D_R}{R} \mathbf{n}_2^2 \geq 0 \quad (2)$$

Diese Gleichung ist eine Kurve, die für ein gegebenes Paar von R und D_R von einem 3-D Mohr Kreis auf eine stereographische Projektion mit \bar{s}_1 , \bar{s}_2 und \bar{s}_3 als seine vertikalen und horizontalen Achsen gebracht werden kann. Die Kurve ist in Bezug auf die Hauptspannungsflächen symmetrisch und

trennt zwei Bereiche: Ein Bereich umfasst die Pole zu den Brüchen mit einem positiven treibenden Druck, d.h. die Brüche, die fähig sind, sich in diesem bestimmten Druckzustand zu öffnen, und der andere umfasst die Pole zu den Brüchen mit einem negativen treibenden Druck mit ein, die geschlossen bleiben.

Diese Grundregel kann mit der Verteilung von Adern oder Gängen in einem Stereogram umgedreht werden, um die relativen Werte der Spannung und des Porendrucks auf einem Mohr-Kreis festzustellen, um dadurch Informationen zu den Drücken zu liefern, die die Bruchöffnung steuern. Z.B. nehmen Sie den Fall von einem niedrig treibenden Druck, der wenige offene Brüche produziert, die fast senkrecht zu \bar{s}_3 sind. \bar{s}_3 ist die Mitte der Region mit Polen. Man kann die Grösse des Blockes definieren durch seine Länge und Breite, die als halbe Winkel gemessen werden, die Länge in der \bar{s}_2 -Richtung und die Breite in der \bar{s}_1 -Richtung. In einem 3D Raum sind diese Grösseparameter Winkel in der (s_2, s_3) Fläche, beziehungsweise in der (s_1, s_3) Fläche.

Betrachten Sie die Intersektion des Blockumschlags mit der (s_1, s_3) Fläche. Dieser Punkt wird durch drei Richtungskosinusse definiert, mit den Winkeln θ_{1w} , θ_{2w} und θ_{3w} (w für Breite) als Neigungen zu den Hauptspannungsachsen \bar{s}_1 , \bar{s}_2 und \bar{s}_3 .

Alle Punkte in der (s_1, s_3) Fläche haben $\theta_{2w} = 90^\circ = \pi/2$, folglich $\cos^2 \theta_{2w} = 0$.

$\theta_{3w} = (\pi/2) - \theta_{1w}$ bedeutet dass $\sin^2 \theta_{3w} = \cos^2 \theta_{1w}$ (trigonometrisches Gesetz).

In dieser Fläche wird die Gleichung (2) verringert auf:

$$1 \geq \frac{\cos^2 \theta_{1w}}{R}$$

was man schreiben kann: $\sin^2 \theta_{3w} \leq R$. (3)

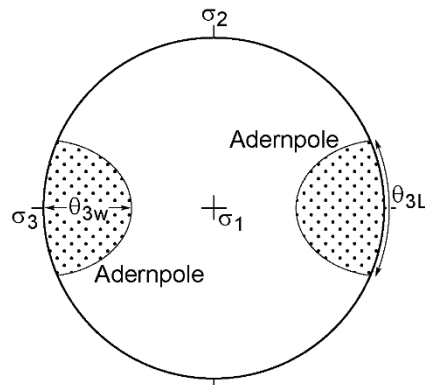
Betrachten Sie die Intersektion des Blockumschlags mit der (σ_2, σ_3) Fläche. Alle Punkte in dieser Längenfläche (L) haben $\theta_{1L} = 90^\circ = \pi/2$, folglich $\cos^2 \theta_{1L} = 0$ und $\theta_{3L} = (\pi/2) - \theta_{2L}$. Das bedeutet, dass $\sin^2 \theta_{3L} = \cos^2 \theta_{2L}$. In dieser Fläche wird die Gleichung (2) verringert auf:

$$1 \geq \frac{D_R}{R} \sin^2 \theta_{3L}$$

ersetzend R, wie in Gleichung (3) definiert und neu arrangiert, ist dieser Ausdruck:

$$\frac{\sin^2 \theta_{3w}}{\sin^2 \theta_{3L}} \geq D_R \quad (4)$$

Gleichungen (3) und (4) zeigen an, dass zwei Winkel ein Mass der Form des Spannungsellipsoids und des treibenden Porendrucks liefern. Diese Winkel können auf einer stereographische Projektion direkt gemessen werden:



Zwei stereographische Winkel,
die ein Mass der Form des Spannungsellipsoids
und des treibenden Porendrucks liefern
nach Baer et al. 1994 *J. Geophys. Res.* **99B12**, 24039-24050

Als Erstes trägt man die Pole zu geöffneten Brüchen (Adern) auf einer stereographischen Projektion ein. Gewöhnlich werden diese Pole in einer begrenzten Region der Projektion gesammelt.

Vom Zentrum des Polenblockes (vermutlich \bar{s}_3) und der Einhüllenden des Blockes kann man θ_{3w} entlang der (s_1, s_3) Diagrammmittellinie messen, und θ_{3L} ist der Halbwinkel, der den Block in der (s_1, s_3) Richtung enthält. Dann können die Gleichungen (3) und (4) gelöst werden.

Spannungs- oder Veformungsachsen?

Die Ähnlichkeit der Beziehung zwischen Bruchorientierung und den Spannungsrichtungen einerseits, und den Verformungsrichtungen andererseits führt zu verwirrenden Interpretationen. Paläospannungsrekonstruktionen leiden unter einigen Punkten der Unzufriedenheit:

- Störungsmuster ändern sich mit der Zeit meistens aufgrund von Versatz und starren Rotationen, die entlang früherer Verwerfungen akkumuliert werden.
- Es ist häufig notwendig, die Messungen von mehreren Aufschlüssen mit einzubeziehen, um genügende Verwerfungsdaten für die Berechnung der Paläospannungsachsen zu bekommen. Offensichtlich kann der lokale Spannungszustand anders als die durchschnittlich berechnete Spannungsorientierung gewesen sein. Es ist schwierig diesen statistischen Fehler zu schätzen.
- Die Verwerfungsinteraktion beeinflusst stark die Bewegungsrichtungen, weil die Bewegung einer Verwerfungsfläche zur regionalen Spannung abweichen kann. Die resultierende Änderung in der Spannungsorientierung wird die Bewegung auf anderen Verwerfungen in der Nähe beeinflussen.
- Hauptverwerfungen erzeugen kleine Verzweigungsverwerfungen, die auch kleinere Verzweigungsverwerfungen erzeugen, damit die Spannungsorientierungen, die von Verwerfungsdaten berechnet werden, Massstabsabhängig werden. Ausserdem können lokale Strukturen lokale und vorübergehende Paläospannungsregime produzieren (z.B. nahe einer Rampe).
- Viele Hauptverwerfungen bewegen sich eher unter einer niedrig gelösten Scherspannung („schwache“ Verwerfung) mit einem grossen Winkel zu \bar{s}_1 als unter einer hohen Scherspannung, wie durch das Byerlee Gesetz prognostiziert ist, und mit einem kleinen Winkel zu \bar{s}_1 , wie es durch das Mohr-Coulomb Bruchbildungskriterium vorausgesagt ist.

Deswegen sind Störungsdaten häufig kompliziert und reflektieren nicht einfach die lokalen Spannungs- oder Verformungstensoren im Moment des Ausfalls. In vielen Fällen bilden sie ein heterogenes Muster, das stark durch Rotationen zwischen den Blöcken beeinflusst ist. Die errechneten, homogenen Tensorachsen, die von der Analyse der Verwerfungsdaten abgeleitet werden, sind in einigen Fällen konsistent mit dem Versatz entlang von Blockgrenzen. Sie entsprechen eher der finiten Deformation (Kinematik) als den Spannungsrichtungen (Dynamik). Dieses Argument führt zur Beschränkung der Paläospannungsberechnungen auf sehr wenig verformte Bereichen, in denen Verformungs- und Spannungsorientierungen mehr oder weniger als parallel angenommen

werden können, wie z.B. im Falle des elastischen Verhaltens. Allerdings, um die Verformung entlang einer Störung zu quantifizieren muss man den Versatzbetrag genau kennen, was in der Praxis meist unmöglich ist. So kann man höchstens auf die Orientierung der Hauptspannungsrichtungen schliessen. Die Analyse von Störungsdaten führt zu einem durchschnittlichen Spannungstensor, der über Zeit (über einige Tausende oder Millionen Jahren) und Raum (das Volumen des Gesteins, das die analysierten Störungen enthält) berechnet wird.

Mechanische Zwillinge in Mineralien

Zwillingsbildung hängt von der Grösse der Scherspannung ab, die auf das verzwilligte Mineral angewendet wurde. Zwillingsflächen entsprechen spezifischen Flächen des Kristallgitters, und Zwillingsbildung findet in eine spezifische Richtung dieses Kristallgitters statt. Die Gitterorientierung kann durch gewöhnliche mikroskopische Analyse mit einem U-Tisch und/oder einem Goniometer gemessen werden. Diese Eigenschaft wird für die Schätzung der Spannungen, die ein Gestein während seiner Geschichte erfahren hat, benutzt.

Infolge von der Häufigkeit der *e*-Zwillinge, ist Kalzit das besondere Objekt einiger Methoden für Paläospannungsanalyse. Diese Zwillinge werden mit einfachen Scherzonen in einer bestimmten Richtung und einem bestimmten Sinn entlang kristallographisch definierten *e*-Flächen {01-12} der Kalzitkörner gleichgestellt. Als solche ist die Zwillingsbildung geometrisch vergleichbar mit der Scherbewegung entlang der Striemungslinie einer Verwerfungsfläche. Dann kann eine inverse Methode, die der für Verwerfungsdaten ähnlich ist, eingesetzt werden. Inverse Methoden werden am besten an sehr kleinen Verformungen in Gesteinskörnungen angewandt, die unter niedrigem Druck und Temperatur verformt werden und die die grundlegende Annahme teilen, dass die gemessenen Zwillinge in einem homogenen Spannungszustand im Kornmassstab gebildet wurden und nicht passiv nach ihrer Anordnung gedreht wurden. Wie für Verwerfungen, führt die Inversion der Bewegungsdaten entlang der Zwillingsflächen nur zu vier Parametern des kompletten Spannungstensors: die Orientierungen der drei Hauptspannungsachsen und das Formverhältnis des Spannungsellipsoids *R*.

Zusammenfassung

Die Striemungen auf Verwerfungsflächen reflektieren die tektonische Aktivität in irgendeinem Spannungsumfeld. Innerhalb der Grenzen einiger Annahmen (Materialisotropie, Koaxialität der Spannungs- und Verformungsachsen) und unter Bedingungen der spröden Deformation, die Verformung verursacht die klein genug ist um Rotationen und Zusammenspiel zwischen den Verwerfungen auszuschliessen, kann ein System von Hauptspannungsachsen das Paläospannungsumfeld wertvoll darstellen. Dieser Zustand wird quantitativ durch ein Paläospannungsellipsoid dargestellt. Dieser geologische Näherungswert vernachlässigt Schwankungen der Spannungsintensität und der Orientierung, die auf Materialheterogenitäten zurückzuführen sind. Das Verhältnis der Hauptpaläospannungsachsen gibt im Zusammenhang mit ihrer Orientierung Auskunft darüber, in welchem Paläospannungsregime die Ausbildung der Verwerfungsflächen stattgefunden hat, obgleich Berechnungen keine absolute Grösse des Spannungstensors erbringen. Diese Berechnungsmethoden sind abhängig von der Stetigkeit des Störungssystems im Massstab des untersuchten Gebietes. Diese Voraussetzung muss untersucht werden, um folgern zu können, dass die Spannungen im Gleichgewicht waren. Die Übereinstimmung von Resultaten in regionalen Studien von wenig verformten Regionen zeigt an, dass die Paläospannungsinversion eine gültige geologische Anwendung ist. Dank diesem Erfolg, wird Paläospannungsinversion eine analytische Routinetechnik in der Strukturgeologie. Sie ergibt ein **kinematisches Modell** (*kinematic model*), das Karten und Profile umfasst, welche die Beziehung zwischen Verwerfungsorientierungen und regionalem Spannungsfeld oder grossräumigen kristalen Bewegungen und ihre Entwicklung durch geologische Zeiträume, veranschaulicht. Als solches ist das Wissen der aktuellen und aktiven Spannungsfelder wichtig für die seismische Gefährdungsbeurteilung und Risikominderung; die Kenntnis von der Entwicklung des

Spannungsfeldes durch die Zeit ist von grundlegender Bedeutung für das Verständnis von dem dynamischen System Erde.

Zitierte und empfohlene Literatur

- Angelier J. - 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research* **89** (B7), 5835-5848.
- Angelier J. - 1994. Fault slip analysis and paleostress reconstruction, in: Hancock P.L. (Ed.), *Continental deformation*. Pergamon Press Ltd, Oxford, 53-100.
- Bott M.H.P. - 1959. The mechanics of oblique slip faulting. *Geological Magazine* **96** (2), 109-117.
- Burkhard M. - 1993. Calcite twins, their geometry, appearance and significance as stress-strain markers and indicators of tectonic regime : a review. *Journal of Structural Geology* **15** (3-5), 351-368.
- Célérier B. - 2008. Seeking Anderson's faulting in seismicity: a centennial celebration. *U.S. national report to International Union of Geodesy and Geophysics 1987-1990* **46** (RG4001), 1-34.
- Célérier B., Etchecopar A., Bergerat F., Vergely P., Arthaud F. & Laurent P. - 2012. Inferring stress from faulting: From early concepts to inverse methods. *Tectonophysics* **581**, 206-219.
- Etchecopar A., Vasseur G. & Daignières M. - 1981. An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *Journal of Structural Geology* **3** (1), 51-65.
- Twiss R.J. & Unruh J.R. - 1998. Analysis of fault slip inversions: Do they constrain stress or strain rate? *Journal of Geophysical Research* **103**, 12205-12222.

Auf Deutsch

Meschede M. 1994 Methoden der Strukturgeologie. Enke, Stuttgart, 169 s.

Empfohlenes freies Computerprogramm

http://www2.arnes.si/~jzaloh/t-tecto_homepage.htm