

STRUKTURELLE ANALYSE DER POLYPHASEN DEFORMATION

Die Strukturgeologie untersucht anhand von Mikro- und Mesostrukturen die Gesteine, um mit praktischen Methoden grossräumige Strukturen zu erfassen, obgleich heutzutage Satellitenbilder bei dieser Aufgabe hilfreich sein können. Diese Strukturen können so gross sein, dass sie nicht von einem einzigen Punkt aus im Feld überblickt werden können. In dieser Vorlesung fassen wir Standardtechniken zusammen, die angewandt werden, um Form, Ausmass und Anordnung von Strukturen in einem Kartiergelände zu erfassen. Dazu gehört die zeitliche Einordnung und Abfolge von Strukturen. Als **strukturelle Analysen** (*structural analysis*) bezeichnet man Untersuchungen der geometrischen Merkmale der Gesteine. Das Ziel dieser Analysen ist die Verdeutlichung grossmassstäblicher Strukturen und das Erzählen ihrer Geschichte.

Grundkonzepte

Die Untersuchung von primären und sekundären Strukturen eines bestimmten Gebietes ist ein schwieriges Vorhaben, weil die Aufschlüsse häufig diskontinuierlich oder in den kritischen Bereichen nicht vorhanden sind, was eine direkte Beobachtung der grossräumigen Strukturen oftmals unmöglich macht und sich deshalb eine korrelierende Interpretation, eine Inter- oder Extrapolation, aufdrängt. Ausserdem ist die geologische Beobachtung im Wesentlichen zweidimensional, weil das Relief gemessen am kartierten Gelände meist verhältnismässig klein ist. Dies zeigt, dass selbst bei kontinuierlichen Aufschlussbedingungen eine Interpretation noch immer notwendig ist, um ein dreidimensionales Bild zu erlangen.

Die eigentliche Frage, die wir Strukturgeologen uns stellen müssen, ist: können wir die Deformationsgeschichte der Gesteine aus primären und sekundären Strukturen ableiten? Dieses Ziel bedeutet **Feldarbeit** (*fieldwork*), d.h. unmittelbare Beobachtung von Gesteinen in ihrer natürlichen Umgebung (Aufschlüsse, Landschaften, Bohrkerne). Die generelle Annahme ist, dass jedes Merkmal eine Aufzeichnung eines geologischen Ereignisses ist, von dem der beobachtete Aufschluss mal betroffen war. Es wird folglich angenommen, dass Veränderungen in der strukturellen Orientierung die Änderungen der Verformungs- oder Spannungsachsenrichtungen konservieren. Deshalb hängt die Erklärung der Deformationsgeschichte vom Erkennen des relativen Alters der unterschiedlichen Strukturen, wie Verwerfungen, Falten und Gefüge durch sich schneidende oder überprägende Beziehungen ab.

Um diese Frage erfolgreich zu beantworten, versucht man:

- 1) Ein geometrisches Model, das heisst, ein drei-dimensionales Bild der untersuchten Region zu entwerfen, das adäquat die gebietlichen Probleme beschreibt.
- 2) Ein kinematisches Modell zu erstellen, indem versucht wird, die heutige Geometrie aus den verschiedenen Entwicklungsstufen der untersuchten Struktur geschichtlich herzuleiten.
- 3) Eine Bestimmung der Orientierungen und der Richtungen der lokalen Bewegungen vorzunehmen, die in den Gesteinen vorkommen und
- 4) Ein mechanisches Modell zu entwerfen, mit dem die Verformungs- und Spannungsgeschichte einer Region rekonstruiert wird.

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

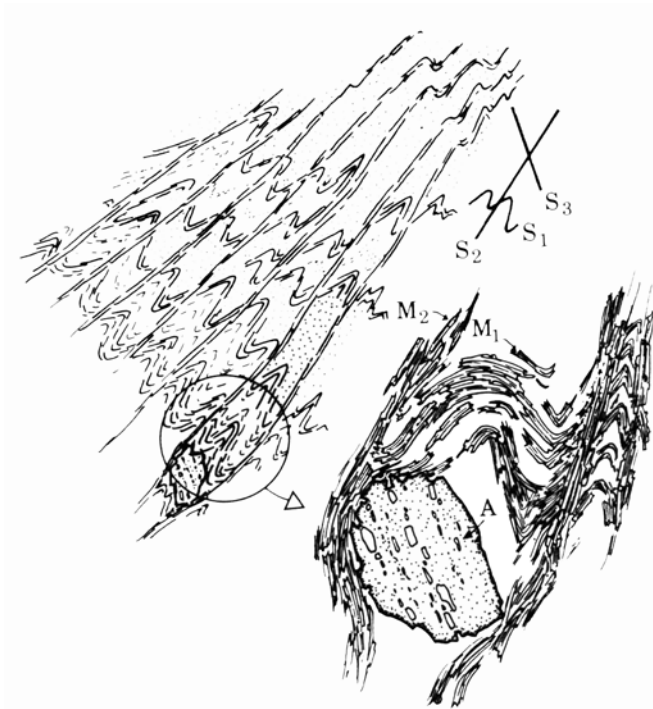
Analytische Elemente

Die Techniken, um die einfachen Gebiete zu studieren, wo die Strukturen eine konstante Richtung in Gesteinen mit einer kontinuierlichen Schichtung haben, sind die Grundlage für die strukturelle Analyse. Sie betrachten verschiedene Arten von strukturellen Elementen.

Massstab

Es gibt klassischerweise drei verschiedene Massstäbe der Betrachtung: mikroskopisch, mesoskopisch und makroskopisch.

- Der **mikroskopische** (*microscopic*) Massstab bezieht sich auf irgendeine kleine Struktur ($<10^2$ m), die mit einem optischen oder Elektronenmikroskop untersucht werden muss.



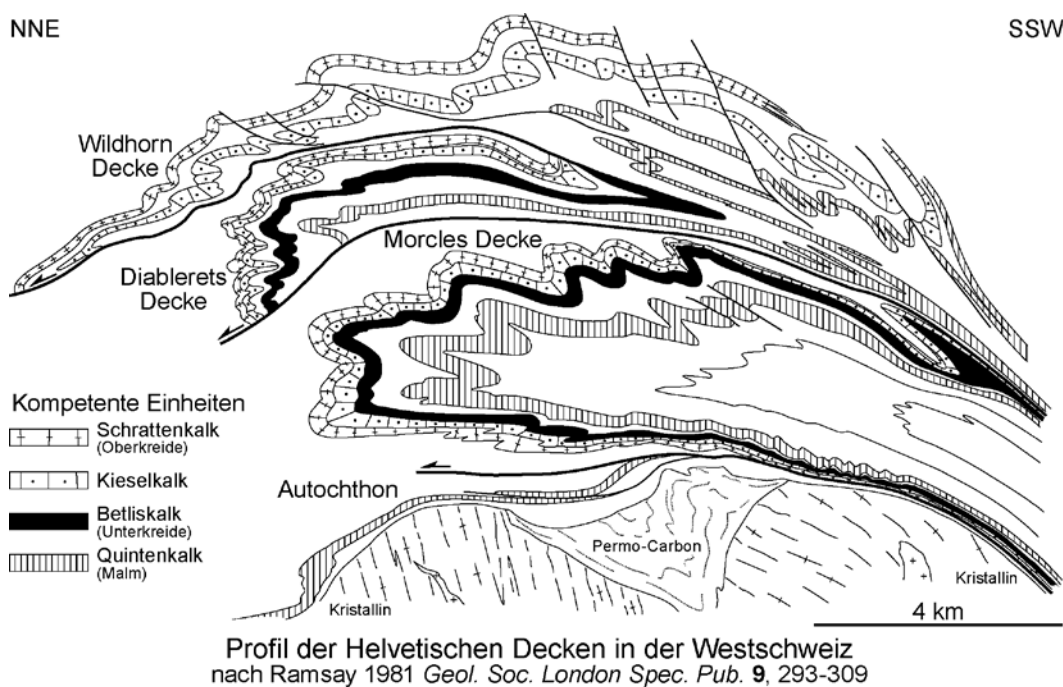
Skizze von mikroskopischen Strukturen.

Bard 1990 : *Microtextures des roches magmatiques et métamorphiques*
Masson, Paris, 208 p.

- **Mesoskopisch** (*mesoscopic*) ist jede Struktur, die ohne Hilfe eines Mikroskops angeschaut werden kann. Beispiele sind das Handstück oder ein einzelner Aufschluss (10^2 to 10^2 m).

- Der **makroskopische** (*macroscopic*) Massstab bezieht sich auf Strukturen, die zu gross sind ($>10^2$ m), um vollumfänglich in einem Aufschluss zu Tage zu treten. Dies erfordert eine Interpretation, das heisst den notwendigen Schritt, um aus einer Anzahl von gesammelten Daten verschiedener Aufschlüsse die Struktur zu rekonstruieren.

Wenn wir die Struktur eines Gebietes zu verstehen versuchen, so hat sich der Geologe zuerst mit den mesoskopischen und makroskopischen Strukturen, wie sie im Feld aussehen, zu befassen. Im Labor helfen weitere mikroskopische Untersuchungen, um Strukturen wie Schieferungen, die makroskopisch sichtbar sind, besser zu charakterisieren. Dieses Massstabskonzept ist sehr wichtig in der Strukturgeologie. Man muss sich den Beziehungen zwischen Strukturen im verschiedenen Massstab konstant bewusst sein; und zur Lösung von geometrischen Problemen im Feld verstandesgemäss eventuell auch von einem Beobachtungsmassstab zu einem anderen übergehen.



Kartierung - Datenaufnahme

Die **Kartierung** (*mapping*) ist tatsächlich die Grundlage jeder geologischen Arbeit, da es der einzige Weg ist, um (1) eine Aufstellung von Gesteinseinheiten zu erstellen, und diese zu beschreiben; (2) die Strukturen zu erkennen, ihre Komplexität zu dokumentieren und ihre Orientierung zu messen; (3) den Kontakt zwischen Gesteinseinheiten zu beobachten und zudem die geschichtliche Reihenfolge von grossen Ereignissen zu enthüllen; (4) die erste Hypothesen zu machen, sie im Feld zu überprüfen und letztendlich (5) Querprofile zu konstruieren um die Verständnis der dreidimensionalen Geometrie eines Gebietes zu verstehen. Diese Aspekte erfordern Wiederholung, um eine dynamische oder kinematische Geschichte der Gesteine zu entwickeln.

Eine Feldkarte beinhaltet so viele Messungen wie möglich und zeigt die Verteilung der Aufschlüsse an. Alle Daten müssen an der Stelle, an der die Beobachtung gemacht wurde, auf die Karte geplottet werden. Sie sollten enthalten:

- Die stratigraphischen Daten inkl. Verjüngungsrichtungen, welche wichtig sind um komplexe geometrische Konfigurationen von stark deformierten Gebieten zu erkennen.
- Die Spur und Orientierung aller Strukturen. Penetrative Strukturen sind allerdings zu dünn, um sie im exakten Massstab auf einer Karte abzubilden. Letztere werden durch konventionelle Symbole auf eine Karte gekennzeichnet.

Moderne geologische Kartierung kombiniert häufig Satellitenbilder oder Luftfotographie mit Grundbeobachtungen.

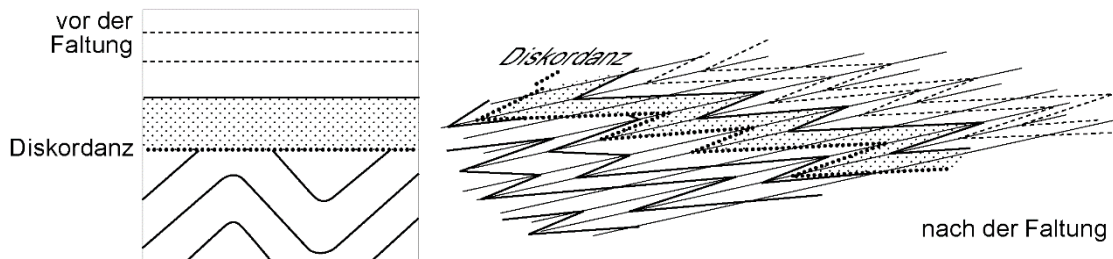
Die resultierende geologische Karte stellt mit Farben und/oder passenden Mustern die Verteilung der Gesteinsanordnungen an der Erdoberfläche dar. Beigefügte strukturelle Karten verwenden Richtungssymbole, die beispielsweise auf einen Blick die Fallrichtung der gefalteten Schieferung oder Schichtung und Gebiete in denen sie gefaltet werden, zeigen. Anwendung dieser Methode gibt uns auch ein Bild über die lokale Vergenz von Kleinfalten und die Spuren von Achsenebenenschieferungen.

Stratigraphische Abfolge - Lithologien

Die Identifizierung der **Stratigraphie** (*stratigraphy*) ist eine Grundvoraussetzung für die Interpretation von grossräumigen Strukturen und der geologischen Geschichte eines Gebietes. Jegliche strukturelle Information hat beschränkte Bedeutung wenn sie nicht aus einem

lithologischen (sedimentologisch oder petrologisch) und chronologischen (paläontologischen oder radiometrischen) Kontext heraus betrachtet wird.

- Eine Unterbrechung auf einer Karte zwischen stratigraphischen Kontakten deutet auf eine Verwerfung oder eine Diskordanz hin, die vielleicht nicht deutlich aufgeschlossen ist.
- Die Wiederholung einer stratigraphischen Sequenz kann helfen die geographische Lage von Falten und Störungen festzustellen.



Verformung einer Diskordanz durch eine Faltungs- und Schieferungsphase

Man muss allerdings vorsichtig sein bei der Interpretation einer Abfolge von lithologischen Einheiten. In verformten metamorphen Gesteinen können die kompositionellen Lagen oder die Stoffbänderung innerhalb eines Aufschlusses nicht unbedingt als Schichtung betrachtet werden (in diesem Skript wird oftmals der Begriff Schicht bloss als lithologische Stofflage verwendet, obwohl er in seiner Grunddefinition eine stratigraphische Bedeutung hat; *Bed* = Schicht s.s., *Layer* = "Stofflage"). In deformiertem metamorphem Terrain muss der Zusammenhang zwischen Stofflagen und der Stratigraphie erst bewiesen werden. Dies kann mittels Vorkommen von sedimentären Strukturen belegt werden. Einen bestimmten Markierungshorizont auszuwählen und zu kartieren ist nützlich, um regionale Strukturen zu erkennen und darzustellen. Erinnern Sie sich auch an die Trivialität: eine Deformationsstruktur ist notwendigerweise jünger als die unverformten Gesteine und eine Diskordanz zeigt die Zeit eines grossen tektonischen Ereignisses an.

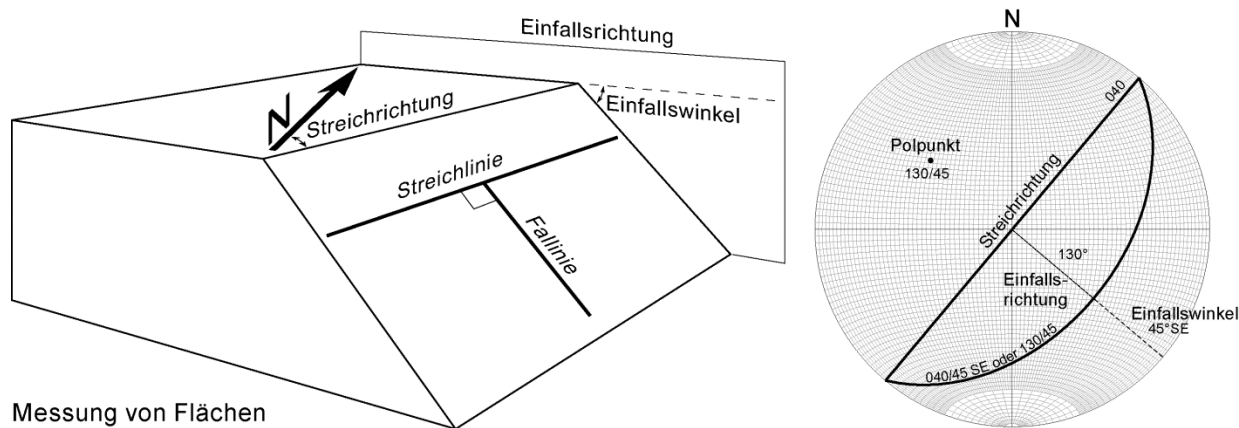
Räumlich orientierte Daten

Fallwinkel und Streichen sowie anderweitig orientierte Daten müssen in geologischen Karten graphisch dargestellt werden. In komplexen, mehrphasig verformten Gebieten ist dies von noch grösserer Bedeutung, da spätere Strukturen die Eigenschaften der älteren Strukturen verwischen und sich somit Orientierungen ergeben, die sehr variieren. Zusätzlich zu den Feldmessungen kann Information durch Gefügeanalyse von orientierten Proben erhalten werden. Eine strukturelle Probe sollte immer orientiert sein.

Solche Orientierungsmessungen werden gemacht, weil es danach viel einfacher ist, die Strukturen zu gruppieren. Wie dem auch sei, die Tatsache, dass zwei Strukturen die gleiche Orientierung haben, bedeutet nicht, dass sie notwendigerweise auch zur gleichen Gruppe oder Familie gehören. Dies gilt auch umgekehrt: Strukturen der gleichen Gruppe müssen nicht die gleiche Orientierung (wegen der Veränderlichkeit der Strukturorientierung) haben. Es ist wichtig sich daran zu erinnern, dass die Orientierungen späterer Faltenachsen von der Orientierung früherer Strukturen abhängen kann (z.B. das vererbte Eintauchen einer wiederverfalteten Fläche beeinflusst die Orientierungen der Faltenachsen).

Planare Elemente

Die **Lage** irgendeines planaren Elements (z.B. Schichtung, Schieferung, etc.) im Raum (*attitude*) wird durch das Streichen und Fallen angegeben.



Messung von Flächen

Zur Erinnerung: Vorlesung „Falten“

- Das **Streichen** (*strike*) einer Fläche ist die Orientierung der horizontalen Linie auf dieser Fläche und wird durch den geographischen Azimuth dieser Linie angegeben.
- Das **Fallen** (*dip*) ist die Linie der grösstmöglichen Neigung der Fläche (= Falllinie), d.h. die Neigung senkrecht zum Streichen, und wird als Winkel von der Horizontalebene aus nach unten gemessen.

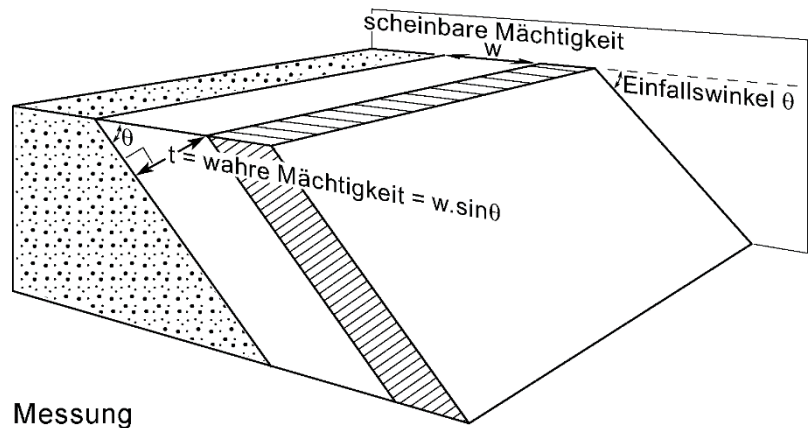
Die internationale Konvention ist, das Streichen und Fallen durch ein T-Symbol auf der Karte darzustellen, wobei der obere Balken parallel zum Streichen eingetragen wird, und das Bein des T zeigt die Fallrichtung an. Das Azimut wird durch eine dreistellige Zahl angegeben. Es zeigt an wie weit das Streichen von der Nordrichtung im Uhrzeigersinn abweicht (also kann es Werte von 000- 360 haben). Der Einfallswinkel wird durch eine zweistellige Zahl angegeben, die Werte von 00-90 haben können. Der Einfallswinkel kann mit der ungefähren Richtung der Fallrichtung (z.B. N) ergänzt werden. Azimute müssen als 3-stellige Zahlen (z.B. 045, nicht 45) ausgedrückt werden, um Verwechslungen von Richtungen <090 mit Einfallswinkeln zu vermeiden.

Einige Geologen messen aus Gründen der einfacheren Kompassbedienung direkt die **Richtung des Fallens** (*dip-direction*) und das Fallen.

Die anscheinende Ausstrichbreite *w* einer Schicht auf der Kartenoberfläche ist eine scheinbare Mächtigkeit. Die wahre Mächtigkeit *t* kann aus der Karte durch die einfache trigonometrische Gleichung:

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

berechnet werden (θ = Einfallswinkel).

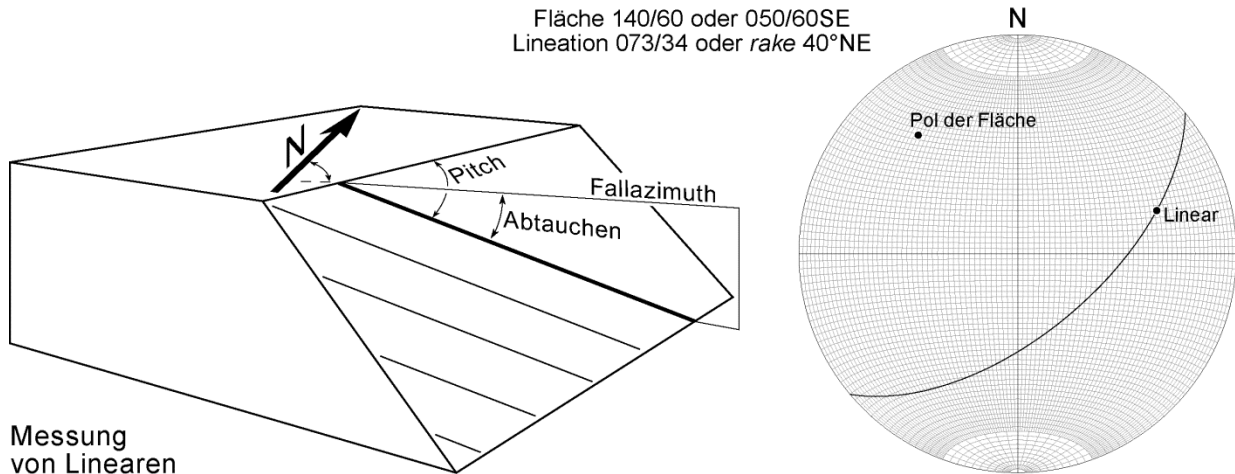


Messung der wahren Mächtigkeit aus der Kartendaten

Die Intersektion zwischen einer Fläche und einer vertikalen Ebene, die nicht orthogonal zur Streichrichtung der Fläche ist, zeigt einen scheinbaren Fallwinkel.

Lineare Elemente

Die Orientierung einer linearen Struktur wird durch das Azimut und den Tauchwinkel angegeben.



Zur Erinnerung: Vorlesung „Lineare sekundäre Elemente“

- Das **Azimut** (*plunge direction*) ist die Richtung der vertikalen Projektion des Linears auf die Horizontalebene.
- Der **Tauchwinkel** (oder **Abtauchen**; *plunge*) ist der kleinste Winkel zwischen dem Linear und der Horizontalebene, d.h. er wird in der Vertikalebene parallel zum Azimut gemessen.
- Der **Pitch** (*rake, pitch*) ist der Winkel zwischen einer Linie auf einer Ebene und der Streichrichtung. Dieser Winkel wird weder in der Horizontal- noch in der Vertikalebene gemessen, sondern in der Ebene mit der linearen Struktur. Er wird häufig benutzt, um Rutschstriemen auf einem Bruch einzumessen. Wie für Flächen werden das Azimut durch eine dreistellige (000-360°) und der Tauchwinkel durch eine zweistellige (00-90°) Zahl angezeigt.

Komplizierte Strukturen

Die vollständige **Orientierung** einer Falte wird durch ihre Faltenachse, also eine lineare Struktur, und durch ihre Faltenachsebene bestimmt.

Die direkte Messung der Richtung und des Abtauchens der mesoskopischen Faltenachse und/oder des assoziierten Intersektionslinears liefert eine gute Idee der regionalen Faltenrichtungen in einfach verformten Gebieten. Ein ähnlich genaues Resultat wird jedoch erreicht, wenn man die orientierten Daten der Schichten auf einem stereographischen Netz plottet. Es ist von Vorteil, sich zu erinnern, dass in Gebieten mit zylindrischer Faltung die Richtung der Faltenachse parallel zum Streichen irgendeiner vertikal gelagerten Schichtfläche ist. Die Neigung der Faltenachse ist gleich oder weniger als die flachste Schichtneigung.

Schichtorientierung

Die **Schichtorientierungen** (*bedding orientation*) werden dazu gebraucht, die Form von Falten zu bestimmen.

- Eine im Profil allgemein nach unten hin konvergierende Schichtorientierung lässt darauf schließen, dass beispielsweise die Falte zwischen den Messungen eine Synform ist.
- Eine im Profil allgemein nach oben hin konvergierende Schichtorientierung lässt darauf schließen, dass beispielsweise die Falte zwischen den Messungen eine Antiform ist.

- Das Schichtfallen deutet darauf hin, ob die Faltenstruktur offen, geschlossen oder isoklinal ist.
- Ein gegen Norden konvergentes Streichen deutet darauf hin, dass sich lithologische Grenzen verbinden, also nach Norden hin schliessen und nicht nach Süden. Daraus folgt, dass im Fall einer Antiform, ihre Achse nach Norden hin abtaucht, im Falle einer Synform jedoch taucht das Scharnier Richtung Süden.

Winkelbeziehungen zwischen Schichtung und Achsenebenenschieferung

Es wird angenommen, dass die Beziehung zwischen Schichtung und Achsenebenenschieferung dieselbe für makroskopische und mesoskopische Falten ist.

- Wenn die Schichtung und Schieferung senkrecht zueinander sind, so befindet sich der Aufschluss auf dem Scharnier einer Falte.
- Wenn die Schichtung mit der Schieferung einen kleinen Winkel bildet, so liegt der Aufschluss auf einem der beiden Schenkel.
- Falls sich Schichtung und Schieferung in die gleiche Richtung neigen (z.B. gegen Osten), die Schichtung jedoch steiler als die Schieferung ist, so gehört die stratigraphische Schichtabfolge an jenem Aufschluss wahrscheinlich zu einem überkippten Schenkel.
- Falls sich Schichtung und Schieferung in die gleiche Richtung neigen, die Schieferung jedoch steiler als die Schichtung ist, so gehört die stratigraphische Abfolge zu einem normalen Schenkel.
- Das Intersektionslinear zwischen Schichtung und Schieferung stellt lokal einen angemessenen Näherungswert für die Faltenachse dar.

Stereographische Projektionen

Stereographische Projektionen (*stereographic projections*) sind Techniken (ergänzend und nicht alternativ zu den Karten) zum Anzeigen und Erfassen von orientierten Daten. Diese Projektionen basieren auf der Grundregel, dass Punkte auf der Oberfläche einer Kugel auf die horizontale äquatoriale Fläche, die ein Kreis ist, projiziert werden können. Wenn man die Polachse vertikal nimmt, haben Linien jeder Longitude (Länge) auf der Oberfläche der Kugel das gleiche Zentrum wie die Kugel. Jeder mögliche Kreis dessen Zentrum in der Mitte der Kugel liegt, ist ein sog. **Grosskreis** (*great circle*). So werden der Äquator und die Longitudinallinien als Grosskreise dargestellt. Linien der Latituden (Breite) sind sog. **Kleinkreise** (*small circles*). Der Nordpol des **Stereonetzes** (*stereonet*) ist der obere Punkt des äusseren, kreisrunden Umfangs (die Spur einer horizontalen Ebene); der Südpol ist der untere Punkt. Alle Grosskreise konvergieren an den Polen. Der Grosskreis der vertikalen Länge wird zu einer geraden Linie zwischen den beiden Polen reduziert. Kleinkreise sind Kreisbögen, die von Osten nach Westen dargestellt werden. Die Ost-West-Linie des Stereonetzes ist ein Kleinkreis, der die vertikale Breite senkrecht zur N-S-Achse darstellt. Internationale Konvention unter Strukturgeologen betrachtet nur Intersektionen von Flächen mit der unteren Hemisphäre der Kugel, weil Fallen und Tauchwinkel unterhalb der Horizontalen gemessen werden.

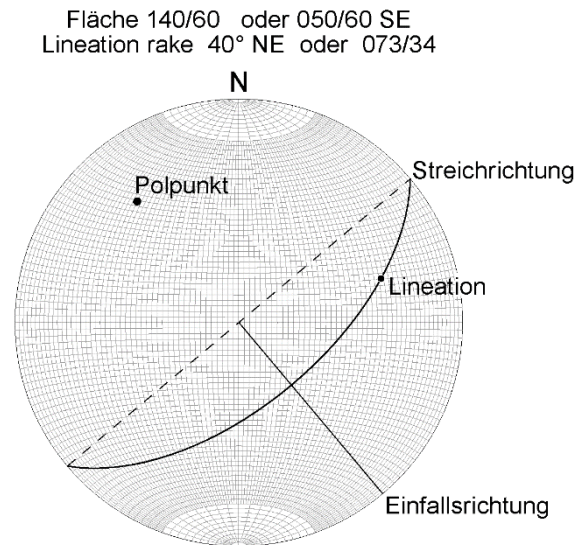
Zwei Arten von Projektionen sind in der Strukturgeologie üblich. In beiden wird das Streichen oder das Azimut am Kreisumfang des Plots geplottet und der Abstand d von der Mitte des Plots stellt den Abstand vom Pol der Kugel dar (d.h. den Winkel $(90^\circ - \text{Fallwinkel})$). Beide Projektionsarten unterscheiden sich in der Art und Weise, in der der Abstand d in Abhängigkeit vom Plotradius r berechnet wird.

Flächentreue Projektionen

Flächentreue Projektionen (sogenanntes Schmidt'sches Netz) sind die Üblichsten. In denen gilt:

$$d = \sqrt{2} \cdot r \cdot \sin[(90 - \text{dip})/2]$$

Flächen auf der Sphäre haben gleiche Flächen auf dem Plot. Die Projektion ist für eine Dichteschätzung der Orientierung der strukturellen Elemente wichtig. Jedoch werden Winkelverhältnisse, besonders am Rand der Projektion, verzerrt.



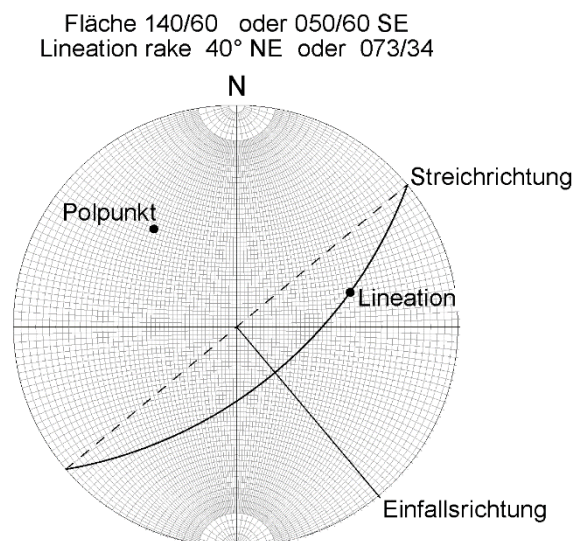
Darstellung einer Fläche mit Lineation im Schmidt'schen Netz (untere Hemisphäre)

Winkeltreue Projektionen

Winkeltreue Projektionen (sogenanntes Wulff'sches Netz) in denen Winkel auf der Projektion die gleichen sind, wie jene Winkel auf der Oberfläche der Sphäre. In diesem Fall gilt:

$$d = r \cdot \tan \left[\frac{(90 - \text{dip})}{2} \right]$$

Im Wulff'schen Netz werden Winkelverhältnisse nicht verzerrt. Insbesondere werden Kreise auf der Sphäre als Kreise im Netz dargestellt aber ihre Flächen stimmen nicht überein.



Darstellung einer Fläche mit Lineation im Wulff'schen Netz (untere Hemisphäre)

Methode

Planare und lineare Elemente sind die hauptsächlich gemessenen geologischen Strukturen. Die Vorgehensweise um sie in den Netzen zu plotten ist wie folgt:

- 1) - Ein äquatoriales Netz und ein darüber liegendes durchsichtiges Papier werden auf einem Brett oder einem festen Pappkarton mit einem Reissnagel durch die Mitte des Netzes befestigt.
- 2) - Das durchsichtige Papier, auf dem ein äquatorialer Kreis mit einer Nordmarkierung gezeichnet ist, wird gedreht und der Winkel des Streichens der Fläche oder des Azimuts der Lineation auf den Norden des Netzes plaziert.
- 3) - Das Fallen der Fläche wird entlang der E-W Linie vom Rand aus gemessen, um so die Spuren der Fläche zu identifizieren; das Tauchen einer Lineation wird vom Rand aus entlang der N-S Linie gemessen.

Symbole und Interpretation

Lineare Strukturen werden in der stereographischen Projektion als Punkte geplottet. Flächen können im Schmidt'schen Netz als Spur, das heisst als Schnitt der (geologischen) Fläche mit der Kugeloberfläche dargestellt werden (Gross- oder Kleinkreis). Wesentlich häufiger und schneller ist jedoch die Darstellung als Normalenprojektion (der Durchstosspunkt der Normalen zur Fläche). Die einzelnen Gefügeelemente werden gewöhnlich auf separaten Diagrammen eingezeichnet. Diagramme, die die Daten als Punkte plotten, werden gewöhnlich nach ihrer Häufigkeitsdichte in Form von Linien gleicher prozentualer Punktdichte konturiert. Der Vorteil dieser Projektionen ist die Handhabung der Daten. Man kann z.B. Flächen entlang von Faltenachse zurück rotieren, die ihre Ursprüngliche geographische Verteilung beeinflusst haben könnten.

In einem Gebiet, in dem eine gegebene Fläche S zylindrisch gefaltet ist, liegen die Pole, die Flächennormalen der Fläche S, auf ein und demselben Grosskreis. Die Normale des Grosskreises ist die Achse, um die die Pole oder einzelnen Flächenstücke der Fläche S gefaltet sind. Diese Achse ist die Faltenachse. Diese Methode erlaubt also, jeweils unter der Voraussetzung einer zylindrischen Falte, die Schichtpole zu plotten und daraus einen Grosskreis zu bestimmen, dessen Normale die Faltenachse darstellt. Die so konstruierte Faltenachse kann dann mit der Achse von mesoskopischen Falten und assoziierten Lineationen verglichen werden. Dadurch wird eine Verbindung geschaffen zwischen makro- und mesoskopischen Strukturen.

Eine frühe Lineation, die um eine **Biegefließfalte** (*flexural flow fold*) gefaltet ist, kommt beim Plotten auf einem Kleinkreis zu liegen. In der Praxis kann auf stereographischen Projektionen die Überlagerung von Strukturen durch charakteristische geometrische Formen (Linien) identifiziert werden. Solche Studien liefern allerdings kaum endgültige Aussagen über die Art und Weise der Deformation, die die Gesteine erlitten haben.

Mehrphasige Faltung wird durch eine breite Verteilung von Schichtungsorientierungen angezeigt, die ausserhalb von einfachen Grosskreisen oder konischen Mustern auf der stereographischen Projektion liegen.

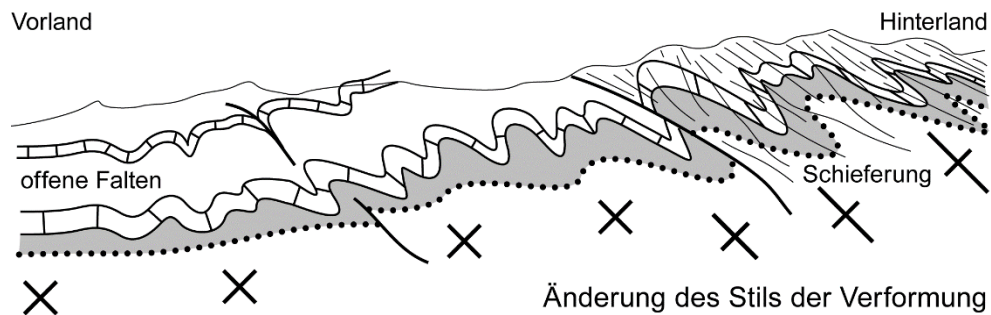
Stil - Faltengeometrie

Der Begriff **Stil** (*style*) definiert die Kombination der charakteristischen geometrischen Eigenschaften, die auf Aufschlüssen, Karten und Profilen gesehen werden. Er wird meistens gebraucht, um Falten und manchmal Bruchpopulationen zu beschreiben. Unter dem Begriff Stil fallen Charakteristika wie Form einer Falte im Profil, Anwesenheit oder Fehlen einer Achsenebenenschieferung, der Typ und das Verhalten der Achsenebenenschieferung (ist die Falte aufrecht, geneigt oder liegend?) und Begriffe wie Zylindrismus, etc... Andere wichtige Aspekte des Stils sind Existenz verformter Lineationen und die assoziierten metamorphen Mineralparagenesen und Mikrostrukturen. Quantitativ bedeutender sind Längenverhältnisse wie der Formfaktor, oder der Öffnungswinkel (*interlimb angle*), der den Grad der "Enge" (*tightness*) einer Falte bestimmt und die relative Krümmung (*bluntness*) des Scharniers einer Falte.

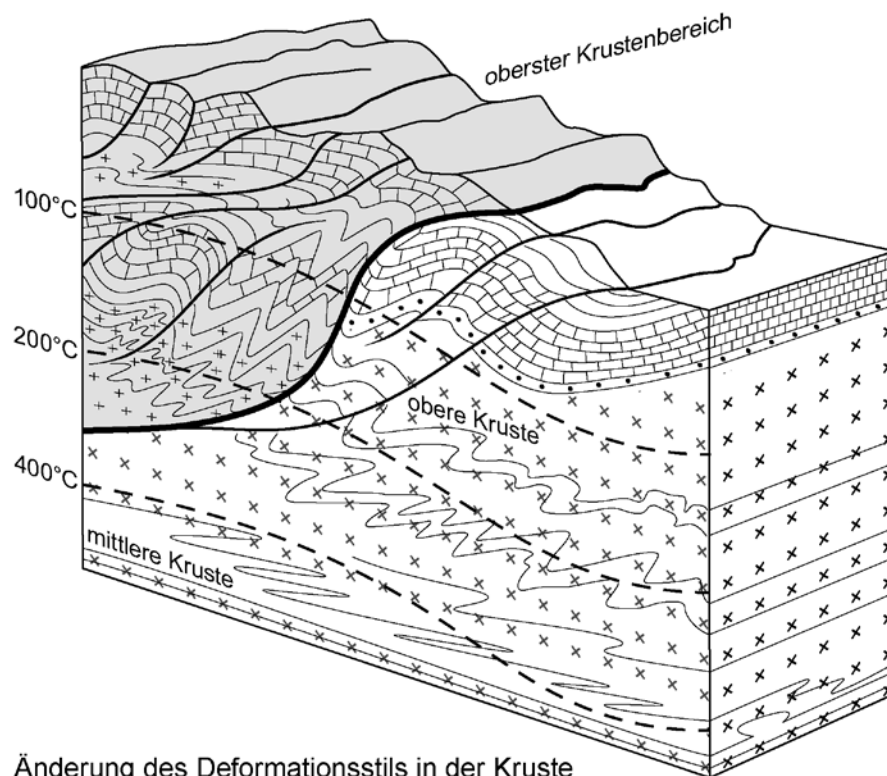
Errinerung: Vorlesung „Falten“

Der Formfaktor ist das Verhältnis der Amplitude einer Falte (entlang der Achsenebene gemessen) und der dazugehörigen Distanz zweier benachbarter Wendepunkte. Mit diesen Stilelementen lassen sich Gruppen von Falten unterscheiden.

Die Falten eines bestimmten Gebiets können gewöhnlich einer kleinen Anzahl von Stilgruppen zugeordnet werden. Zum Beispiel enthalten oft dichte bis isoklinal liegende Falten in orogenen Regionen eine Achsenebenenschieferung. Diese sind gewöhnlich von anderen aufrechten, offeneren Falten, die keine oder bloss eine Runzelschieferung als Achsenebenenschieferung aufweisen, begleitet und wahrscheinlich verformt. All diese Falten können zwei Gruppen mit unterschiedlichem Faltenstil zugeordnet werden.



Der Stil ist eine Funktion der physikalischen Bedingungen, kann aber auch je nach Gesteinsart wechseln. Zum Beispiel kann im Profil eine bestimmte Falte in glimmerreichen Schichten ein spitzes Scharnier haben, aber in einer kompetenteren sandigeren Zwischenschicht ist sie gerundet. Zusätzlich kann diese Falte eine Achsenebenenschieferung in glimmerreichen Schichten haben, jedoch möglicherweise nicht in den kompetenten Schichten. Zudem können Faltenstile regional sehr unterschiedlich sein, indem sich auf eine kontinuierliche Art und Weise ein bestimmtes Merkmal, wie die Krümmung des Scharniers, ändert. Z.B. der Öffnungswinkel von Falten wird im Hinterland spitzer.



Der Stil kann daher nur zwischen Falten innerhalb derselben Lithologien verglichen werden. Der effiziente Ansatz ist, zuerst die Strukturen in den massigen, kompetenten Lithologien zu betrachten, welche nur auf die grösseren tektonischen Ereignisse reagierten. Erst als Zweites werden die komplexeren Strukturen in den inkompetenten Horizonten betrachtet, welche aus kleinsten oder lokal tektonischen Impulsen entstanden sind.

Die Verwendung von kleinräumigen Strukturen in der Strukturanalyse

Geometrische Extrapolation

Die Profil- und Vergenzrichtung von mesoskopischen Falten wird dazu benützt, um die relative Position eines Aufschlusses in Bezug auf die grösseren, makroskopischen Falten zu bestimmen, wobei angenommen wird, dass sich diese im Profil und Querschnitt ähneln. Beispielsweise zeigt die Vergenz einer mesoskopischen Falte (S-Typ) eine Position auf dem östlichen Schenkel einer Antiklinale an, beziehungsweise die Position auf dem westlichen Schenkel einer Synklinale. Für mesoskopische Falten des Z-Typs ist es genau umgekehrt. Wo die Falten im Aufschluss symmetrisch sind, sollte man sich im Bereich des Scharniers einer grösseren Falte befinden.

Grundregel der überlagerten Strukturen

Deformationsstrukturen variieren von Millimeter bis zu Kilometer Grösse. Es ist beinahe unumstösslich in einem Gebiet, dass kleine Strukturen die Orientierung und den Charakter grösserer Strukturen derselben Generation nachahmen. Mit anderen Worten: Deformationsstrukturen einer Generation sind synthetisch und teilen den gleichen Stil und die gleiche Orientierung unabhängig vom Massstab. Obwohl diese Annahme nicht immer wahr ist, studieren die Strukturgeologen die kleinräumigen Strukturen, weil sie ein sehr nützliches Werkzeug sind. Damit werden die Geometrie und die Orientierung von regionalen Strukturen, die zu gross sind, um beobachtet zu werden, bestimmt und auch die Abfolge der tektonischen Ereignisse, im untersuchten Gebiet kann entwickelt werden.

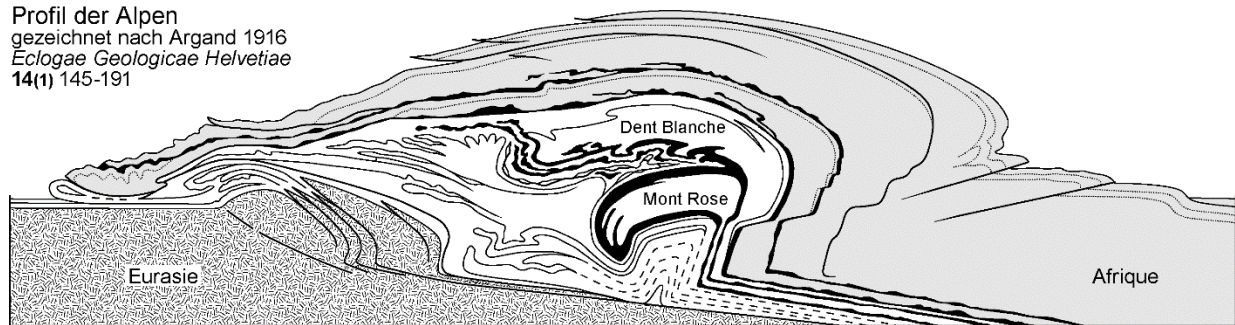
Die sichersten Anzeichen für eine mehrphasige Deformation sind direkte Beobachtungen von überlagerten Strukturen und Gefügen während der Kartierung. Die verschiedenen Strukturen werden jeweils untersucht und nach Stilgruppen geordnet. Überschneidende und Überprägungsbeziehungen erlauben eine zeitliche Abfolge der verschiedenen strukturellen Stilgruppen zu verschaffen, die **Generationen** zugeschrieben werden. Von dieser Abfolge von Strukturgenerationen erhält man ein Bild der Art von grossräumigen Strukturen, die angetroffen werden können. Wenn zum Beispiel zwei Gruppen von Kleinfalten ein mesoskopisches Interferenzbild von Dom- und Becken-Strukturen erzeugen, so besteht die grosse Wahrscheinlichkeit, dass dieselben Strukturen auch im makroskopischen Massstab auftreten.

Eines der wichtigen Prinzipien ist, dass jede Deformation das Gestein verändert hat und nachhaltig Spuren im Gestein hinterlassen hat. Damit sind theoretisch aus einer kleinen Probe alle notwendigen Informationen vorhanden, um den kompletten Ablauf der Deformationsereignisse zu bestimmen. Meistens ist es allerdings notwendig, mehr als eine Probe zu untersuchen, um die gesamte Deformationsgeschichte eines Gebietes zu rekonstruieren. An einzelnen, gut ausgewählten Handstücken, kann rückblickend die gesamte Geschichte in allen Einzelheiten erkannt werden. Dennoch ist dies leider nicht immer möglich, denn es können in stark verformten Gebieten frühere Gefüge infolge späterer Deformation bis zur Unkenntlichkeit überprägt worden sein.

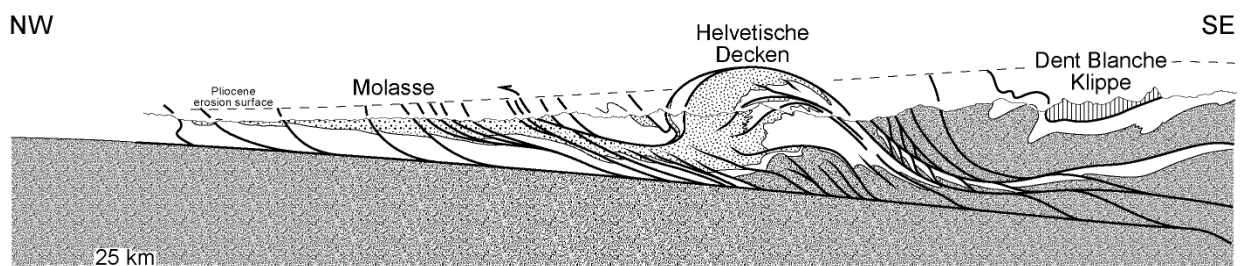
Profile

Genauso wie in anderen Wissenschaften, wird auch in der Geologie häufig die graphische Darstellung der Daten als gute Möglichkeit für eine Problemlösung genutzt. Geologische Karten sind zweidimensionale horizontale, graphische Darstellungen der Oberflächeneigenschaften. Die vertikalen **Profilschnitte** (*cross sections*), die vorzugsweise fast immer senkrecht zur örtlichen Streichrichtung sind, deuten eine strukturelle Interpretation an.

Profil der Alpen
gezeichnet nach Argand 1916
Eclogae Geologicae Helvetiae
14(1) 145-191



Sie zeigen die Form, die Orientierung und die Anordnung der Verhältnisse zwischen den Gesteinseinheiten in einer vertikalen Fläche, unterhalb und oberhalb der Erdoberfläche. Die Genauigkeit eines Profils wird um einiges verbessert, wenn Informationen aus dem Untergrund (aus Bohrlöchern, Minen, Steinbrüchen, seismischen Profilen) vorliegen.



Deckschicht Interpretation - bilanziertes Profil der Alpen
nach Boyer & Elliott 1982 *Am. Ass. Petrol. Geol.* 66(9), 1196-1230

Mehrere nebeneinander liegende **Serienprofile** (*serial sections*) kombiniert mit der entsprechenden Karte können helfen ein **Blockdiagramm** zu erstellen, wodurch man die dreidimensionalen Verhältnisse darstellen kann. Infolge von Perspektivwinkeln sind Blockdiagramme für illustrative Zwecke ausgezeichnet, aber zeigen verzerrte Oberflächen an. Zweidimensionale Karten und Profile sind genauer.

In der Mathematik besteht eine wichtige Art der Lösung von Problemen darin, das Verhalten einer Funktion über einer begrenzten Strecke zu untersuchen. Das **Balancieren** (*balancing*) und Wiederherstellen (**Restaurieren**, *restauration*) sind Hilfsmittel, die von Strukturgeologen benutzt werden, um die ursprüngliche Form und Deformation eines Profils zu erforschen.

Strukturgenerationen

Die ideale strukturelle Analyse zielt darauf ab, jede Struktur einer sowohl relativen, als auch absoluten Zeitabfolge zuzuordnen. Um dieses Ziel zu erreichen versucht man Strukturen bestimmten Generationen zuzuordnen und diese dann relativ zu datieren.

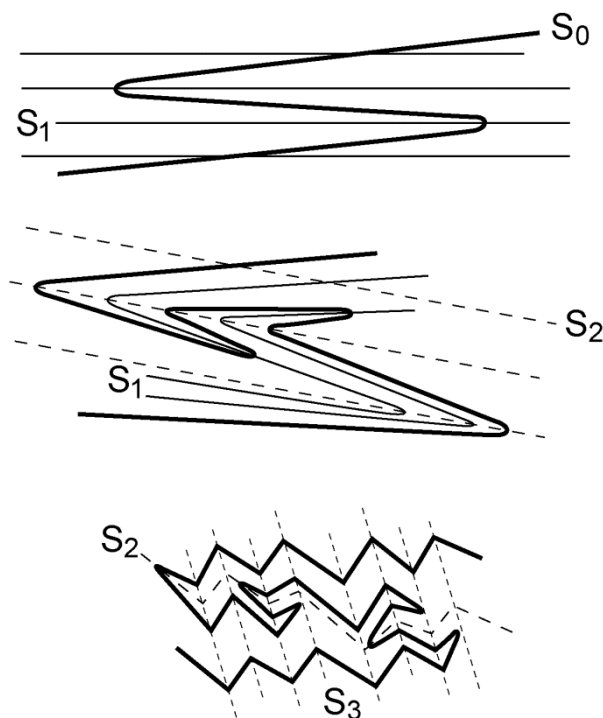
Allgemein wird angenommen, dass eine **Generation** Strukturen bündelt, von denen man annimmt, sie seien im selben relativen Zeitintervall entstanden. Um deshalb eine Generation einzuführen, sind zwei Schritte nötig:

- (i) - Die Gruppierung der Strukturen benutzt geometrische Eigenschaften wie Orientierung und Stil, wobei man davon ausgeht, dass Strukturen ähnlicher Orientierungen und Stils wirklich zur gleichen Gruppe gehören.
- (ii) - Obwohl Strukturen ähnlichen Stils gewöhnlich in isolierten Aufschlüssen gesehen werden, wird angenommen, dass sie sich zur gleichen Zeit bildeten. Dann werden die verschiedenen Stilgruppen chronologisch geordnet, indem man die zeitlichen Überprägungsbeziehungen zwischen Vertretern der verschiedenen Gruppen untersucht.

Auf diese Weise sind die Überprägungskriterien die Grundlage für die Entschlüsselung einer narrativen Reihenfolge von getrennten und aufeinanderfolgenden "**Deformationsphasen**", die

ebenso viele Sätze von gleichzeitigen Strukturen sammeln. Wenn die Gruppierung stimmt, d.h. gehören die Strukturen einer Gruppe dem gleichen relativen Zeitbereich an, so gehören sie einem anderen relativen Zeitbereich an als alle anderen Strukturen. Praktisch wird die chronologische Abfolge der Strukturen mit numerischen Indizes bezeichnet. Für Falten werden meistens Kurzbezeichnungen wie F_1 , F_2 , etc., für Schieferungen S_1 , S_2 , usw. und für Lineationen L_1 , L_2 , usw. verwendet. Die Nummerierung der Strukturen kann aber zu verwirrenden oder sogar Fehlinterpretationen führen. Z.B. steht die älteste Schieferung S_1 an einem Aufschluss nicht zwingend in Verbindung mit den ältesten Falten F_1 im Gebiet. Die ersten Falten können ohne eine Achsenebenenschieferung entstehen, und die lokal erste Schieferung S_1 erst mit einer späteren Faltengeneration F_n . Darum ist es kritisch, dass man nachprüft, ob die Schieferungsgenerationen S_1 , S_2 , usw. systematisch und regional einheitlich achsenebenenparallel zu den Faltengenerationen F_1 , F_2 , usw. sind, bevor auf eine Reihenfolge von regionalen Deformationsphasen D_1 , D_2 , usw. geschlossen wird.

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



Allerdings ist eine konsistente Überprägung kein Beweis, dass die vorgenommene Gruppierung stimmt. In gewissen Gebieten können Falten des gleichen Stils zu mehr als einer Generation gehören. Der Stil als Basis für die zeitliche strukturelle Gruppierung und Zuordnung ist deshalb nicht ganz befriedigend. Wie dem auch sei, es gibt (bis jetzt) keine bessere Methode in Gebieten mit diskontinuierlichen Aufschlussverhältnissen. Die Methode der Gruppierung von Strukturen war zumindest in begrenztem Umfang in vielen geologischen Gebieten erfolgreich. Es war nicht immer für anderen Erdwissenschaftler/Innen überzeugend, weil die geometrisch-basierte Methode nicht andere Schwierigkeiten kommuniziert. Z.B. können zwei Generationen von Falten folgendermassen entstanden sein:

- (i) während eines einzigen, progressiven oder langwierigen Deformationsereignisses mit wechselnden Orientierungen der Verformungs- (Spannungs-) Achsen, so dass die Kennzeichen der aufeinanderfolgenden "Phasen" von geringer Bedeutung sind, oder
- (ii) während zwei voneinander im Abstand von Hundert Millionen Jahren getrennten Deformationsperioden, deren Dauer nicht bekannt ist, oder

(iii) während einer einzigen, kontinuierlichen Orogenese, in welcher eine Überlagerung von getrennten Deformationen mit verschiedenen Orientierungen der Verformungsachsen, deren Dauern auch nicht bekannt sind, stattfand.

Ohne klare Diskordanzen zwischen Strukturgenerationen oder eindeutig unterschiedlichen, syntektonischen metamorphen Mineralparagenesen oder zusätzliche Techniken, wie die der absoluten Datierung, kann keine Unterscheidung zwischen den oben genannten Möglichkeiten gemacht werden.

Darüber hinaus kann eine identische Abfolge von Strukturereignissen in allen Aufschlüssen bedeuten, dass die Faltenbildung regional **diachron** (*diachronous*) verlaufen ist. D.h. wie eine Welle sind die Verformungsereignisse mit der Zeit über ein Gebiet (wahrscheinlich Richtung Vorland) gewandert. Ausserdem kann heterogene Verformung (*strain partitioning*) falsche Korrelation bedingen.

Überprägung - Aufschluss (zweidimensional) Muster überlagerter Falten

Wir nehmen an, dass **Überprägungskriterien** (*overprinting criteria*) in verformten Gesteinen die Basis für die relative Datierung von Strukturen untereinander bilden.

Deformationsgeschichte

Dies gilt auch dann, wenn die Zeitspanne zwischen der Bildung der beiden sehr klein gewesen sein mag. Zwei Aspekte gelten als Regel:

- Strukturen die geschnitten werden sind älter als die, die sie schneiden (das gilt besonders bei Adern, Gängen oder Schieferungen).
- Die Falte, die das Scharnier oder die Achsenebene einer existierenden Falte überprägt, gehört einer späteren Generation an.

Beispielsweise kann eine F_1 Falte die Form gewechselt haben während der Entwicklung einer F_2 Falte (Warnung bei Stilbetrachtungen!), F_1 muss allerdings bereits vor der Entstehung von F_2 vorhanden gewesen sein. Wenn beide Falten eine Achsenebenenschieferung ausgebildet haben, so wird S_1 von S_2 überprägt.

Reaktivierung

Verwerfungen sind häufig langlebige Strukturen. Die gleiche Verwerfungsfläche kann für mehrere Bewegungsverläufe benutzt werden: spätere Bewegungen **reaktivieren** die Verwerfung. Gelegentlich resultiert Reaktivierung in einer entgegengesetzten Bewegung; beispielsweise wird eine Abschiebung als Aufschiebung reaktiviert: Reaktivierung ist in diesem Fall **Inversion**.

Drei Situationen können Reaktivierung erklären:

- Die Bruchfläche hat eine günstige Orientierung für Gleiten unter der angelegten Spannung (z.B. sind flach abfallende Abschiebungen einfacher zu reaktivieren als steile Abschiebungen unter horizontaler Kompression).
- Material mit geringer Reibungsfestigkeit beschichtet die Bruchfläche (z.B. tonreichen Letten sind einfacher zu verformen als die direkten Gesteinskontakte).
- Lokal hoher Porendruck unterdrückt den Reibungswiderstand entlang der Bruchfläche (heterogene Verteilung der Flüssigkeiten verändert in Zeit und Raum durch Umverteilung den lokalen hydrostatischen Druck).

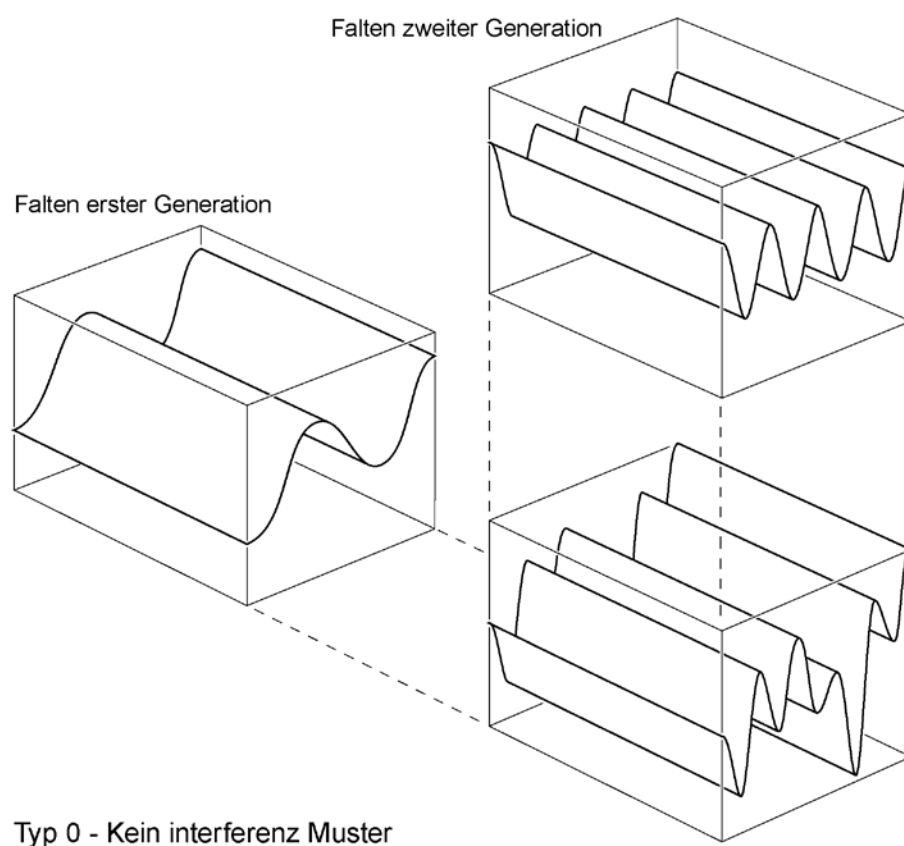
Interferenzmuster

Die daraus resultierende Komplexität der Geometrie reflektiert sich in den vielfältigen **Interferenzmustern** (*interference patterns*), die im Aufschluss auftreten. Die Muster schwanken entsprechend dem Massstab und den Beziehungen der Orientierungen zwischen den beteiligten Faltengenerationen. Wenn jüngere Falten kleiner sind als die älteren Falten, dann sind die Muster der kleineren Falten mit den Hauptfalten unvereinbar. Sind beide Generationen im gleichen Massstab, hängt die Form der Interferenzmuster von den Winkelbeziehungen zwischen den Falten ab. Wenn jüngere Falten grösser sind als die älteren Falten, dann wird das Muster der älteren Falten konserviert, aber die Orientierung wird durch die jüngeren Falten festgelegt.

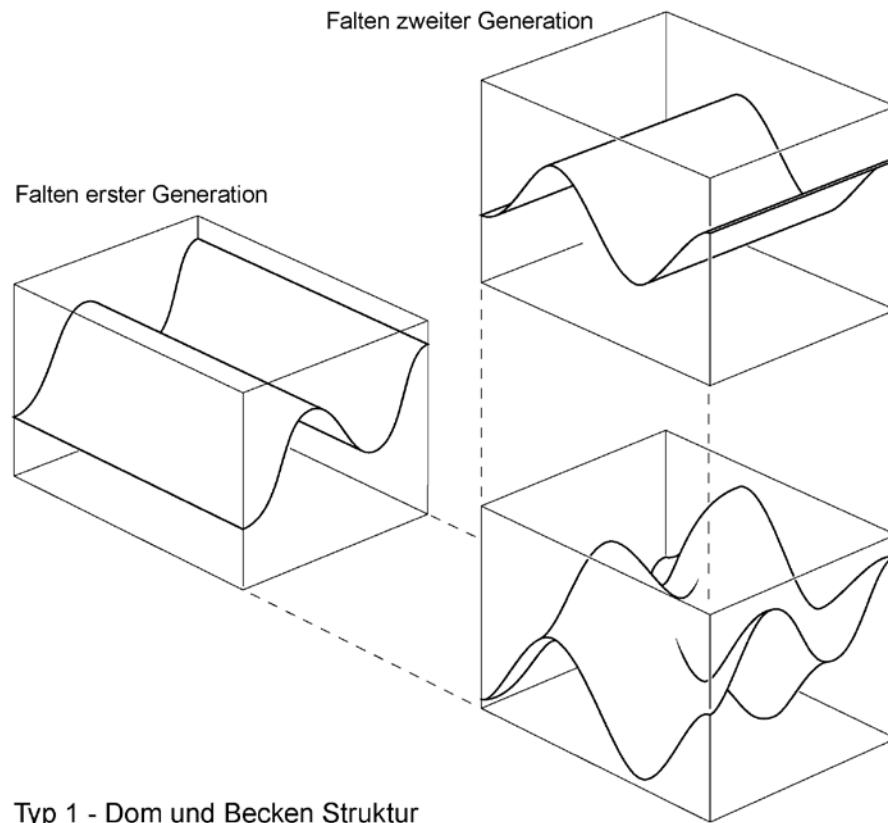
Strukturelle Elemente	Orientierung → Interferenzmuster		
	Vertikal		Horizontal
S_1			
S_2	Vertikal		
$F_1 // F_2$	Typ 0		
$F_1 \perp F_2$		Typ 1	
$F_1 \perp F_2$			Typ 2
$F_1 // F_2$			Typ 3

Interferenzbilder, die aufgrund der Intersektion von zwei Gruppen von Falten entstanden sind, aufrechte F_2 Falten auf F_1 Falten mit verschiedenen Orientierungen, können in vier charakteristische Grundtypen unterteilt werden, die wiederum zu verschiedensten Kombinationsmöglichkeiten zusammengefügt werden können, die in der Natur auftreten:

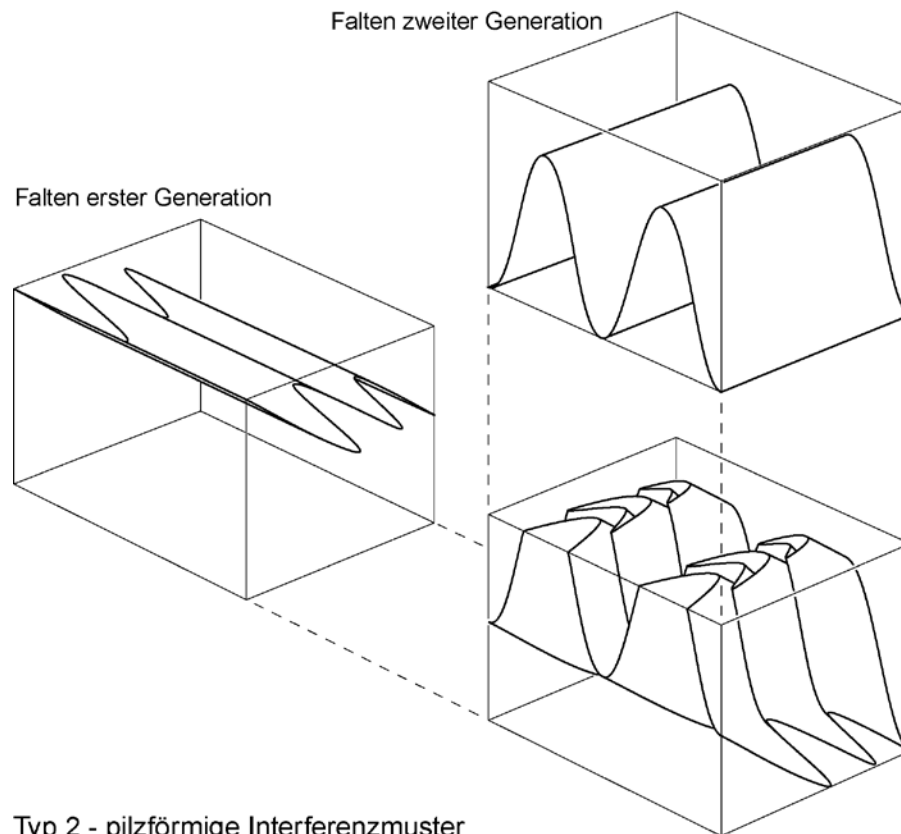
Typ 0) Kein Interferenzmuster: die Achsenebenen und die Achsen der beiden Falten Generationen sind parallel.



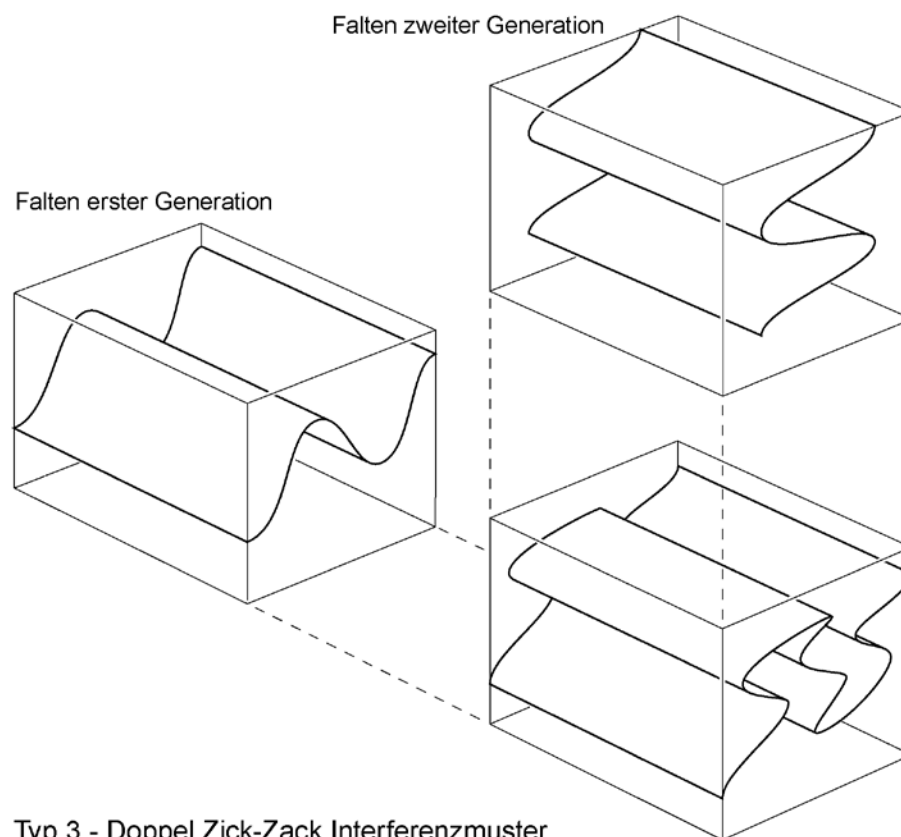
Typ 1) geschlossene **Dom und Becken Strukturen** (*dome and basin*) erkennt man an ovalen, etwas rhombusförmigen Mustern (Eierkarton-Struktur). Sie entstehen, wenn sowohl die Achsenebenen als auch die Achsen der aufrechten F_2 Falten fast senkrecht zu jenen der F_1 sind. Beide Falten Generationen sind vom gleichen Stil und beide Achsenebenen fallen steil ein. Dome entstehen, wo sich antiformale Achsen schneiden und Becken dort, wo sich synformale Achsen schneiden. Beachte, dass die F_1 Achsenebenen ungefalted bleiben.



Typ 2) **Pilzförmige Interferenzmuster** (*crescent* oder *mushroom structures*) werden erzeugt, wenn sowohl die Achsenebenen als auch die Achsen der aufrechten F_2 Falten in einem steilen Winkel zu den zuvor überkippten F_1 Falten liegen (d.h. nicht-koaxiale Falten generationen). Die Spitzen der Pilzformen sind F_1 Scharniere. Die gefaltete Verbindungslinie dieser Spitzen hat die gleiche Richtung wie die F_1 Faltenachse.



Typ 3) **Doppel Zick-Zack Formen** (*double zig-zag*) entstehen, wenn die Achsenebenen der F_2 fast senkrecht zu jenen der zuvor überkippten F_1 liegen und die Faltenachsen der F_1 und F_2 subparallel sind (d.h. koaxiale Falten generationen).



Typ 3 - Doppel Zick-Zack Interferenzmuster

Wir müssen uns indessen bewusst sein, dass eine Überprägung einer älteren Struktur, infolge Neubildung einer neuen, zur Zerstörung der älteren Struktur führen kann. Dies trifft vor allem dann zu, wenn eine Schieferung durch eine neue überprägt wird. Unter gewissen Umständen können geschlossene oder kreisförmige ("eyed") Interferenzmuster von Falten, wie beispielsweise Zungenfalten, entstehen, die einphasig sind. Dies lässt darauf schließen, dass die Präsenz einer Dom-und-Becken Struktur nicht unbedingt impliziert, dass zwei getrennte Deformationsphasen stattgefunden haben. Falteninterferenz kann dann synchron stattfinden, wenn die Deformation die Schichten in fast alle Richtungen verkürzt, mit Ausnahme einer Richtung, in der gestreckt wird.

Beschränkungen der strukturellen Analysen

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

In manchen Gebieten sind die Aufschlüsse gut genug, um die Überprägungsbeziehungen aller oder der meisten Falten zu bestimmen. In diesen Gebieten können die Falten Generationen zugeschrieben werden, ungeachtet des Stils, so dass dann Stilunterschiede innerhalb einer Generation untersucht werden können. In Gebieten, wo dies durchgeführt wurde, konnte man feststellen, dass es keine einfache eins-zu-eins Korrelation zwischen den Stilgruppen und Generationen gibt. Deshalb ist der Term Stil unbefriedigend für die Gruppierung von Strukturen. Unglücklicherweise besteht keine bessere Methodik, ausgenommen in Gebieten mit guten, kontinuierlichen Aufschlüssen, wo mehr oder weniger alle Überprägungsbeziehungen

beobachtet werden können. Gewöhnlich gibt es zu wenige Überprägungsbeziehungen, da die einzelnen Aufschlüsse zu weit voneinander entfernt sind. Die erstellte Deformationsabfolge ist in jenen Gebieten mit Vorsicht zu "geniessen".

Eine andere Einschränkung ist, dass die strukturelle Analyse in Gebieten, die einer Transposition unterworfen wurden, nicht immer zum Erfolg führt, wenn es darum geht, makroskopische Strukturen zu interpretieren.

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

Mehrphasige Bruchbildung

Die exakte Mechanik der Reaktivierung von Verwerfungen ist im Detail noch nicht verstanden. Die Reaktivierung von Verwerfungen tritt in einem breiten Bereich tektonischer Umgebungen auf. Es gibt zwei Möglichkeiten:

- die Verwerfung behält ihre relative Richtung der Bewegung während der geologischen Geschichte.
- die relative Richtung der Bewegung verändert sich.

Abschiebungen, die sich in einer frühen Phase der krustalen Extension gebildet haben, können in der Kompression während **positiver Beckeninversion** (*positive basin inversion*) reaktiviert werden.

Zusammenfassung

Aufschlüsse zeigen das Endresultat einer Abfolge von Ereignissen: Ablagerung, Verformung, Erosion, etc. Mit Erfahrung lernen beobachtende Feldgeologen, kritische Aufschlüsse mit Beziehungen zwischen den einzelnen Gesteinseinheiten oder anderen bedeutenden Eigenschaften zu erkennen, die unmissverständliche Anhaltspunkte zu den sedimentären, eruptiven und metamorphen Prozessen zur Verfügung stellen. Geologen identifizieren Gesteinslagen und fixieren ihr Alter, sie zeichnen die räumliche Orientierung von Schichten auf Karten, kartieren Falten und Brüche, leiten die Geometrie grösserer Strukturen von kleineren ab, bestimmen deren räumliche und zeitliche Beziehung und konstruieren Profile des Untergrundes anhand der Oberflächeninformationen. Somit ist die Verformungsgeschichte einer Region bestimmt. Zur Unterscheidung der Falten verschiedener Generationen sollten unterschiedliche Orientierungen und Faltenstile vorsichtig verwendet werden. Die Überprägung von kleinen Strukturen geschieht entweder durch die schrittweise Entwicklung von Strukturen während progressiver Verformung in einer einzigen grossen Verformungsphase, oder durch zwei grosse getrennte tektonische Ereignisse. Geologen bestimmen das relative Alter einer Verformung, indem sie eine jüngere unverformte Formation suchen, die diskordant darüber liegt. Aufschlüsse zu lesen ist die Fähigkeit, die für Feldbeobachtungen entscheidend ist und eine Gelegenheit bietet, sich entwickelnde Hypothesen durch genauere Feldbeobachtung prüfen zu können; dann ermöglicht sie Geologen, folgende Feld- und Laborarbeit effektiv zu planen. Jene Hypothesen können dann zu computergestützten theoretischen Modellen entwickelt werden, aber um überzeugend zu sein, müssen sie mit feldgeologischen Beweisen überprüfbar und vergleichbar sein oder Grundwahrheit („*ground truth*“) beinhalten, wie Fernerkundungsfachleute es nennen. In Zonen orogener Aktivität, das sind Gebiete, in denen Berge entstehen, sind Gesteine gewöhnlich durch mehr als durch nur eine **“Phase”** der Verformung deformiert worden, was wiederum bedeutet, dass Sets von geometrisch überlagerten Strukturen einer Abfolge von

bestimmten Episoden regionaler Deformation zugeordnet werden. Um diese Phasen zu erkennen, werden zusammengehörende Falten, Schieferungen, Lineationen und andere Strukturen Verformungsepisoden zugeordnet. Die zeitlichen Intervalle zwischen aufeinanderfolgenden Ereignissen (Faltensysteme, Schieferungen und Lineationen verschiedener Phasen) können sich von unendlich kurzen Zeiträumen (geologisch gemessen) bis zu solchen von mehreren hundert Millionen Jahren erstrecken. Folglich sind die Zeitabstände zwischen strukturellen (d.h. geometrischen) Phasen, und die Verformungsraten entscheidende Parameter in der Untersuchung von Gesteinsdeformation. Zur Unterscheidung von Falten verschiedener Generationen sollten Stil und Orientierung immer mit Vorsicht genossen werden.

Empfohlene Literatur

- Eisbacher G.H. (1996) *Einführung in die Tektonik* (2.Auflage), EnkeVerlag, 374 s.
- Davis, G.H. & Reynolds S.J. (1996) *Structural geology* (2nd edition), John Wiley & Sons, 776 p.
- Park R.G. (1997) *Foundations of Structural Geology* (3rd edition), Chapman & Hall, 202
- Price N.J. & Cosgrove J.W. (1991) *Analysis of geological structures*, Cambridge University Press, 502 p.
- Ragan D.M. (2009) *Structural geology. An Introduction to geometrical techniques* (4th edition), Cambridge University Press, 602 p.
- Ramsay J.G. & Huber M.I. (1983) *The techniques of modern structural geology, volume 1*. Academic Press, 307 p.
- Ramsay J.G. & Huber M.I. (1987) *The techniques of modern structural geology, volume 2*. Academic Press, 391 p.
- Twiss R.J. & Moores E.M. (1992) *Structural Geology*, Freeman & Co, 532 p.